



Projekt Post-ISS

Recherche – ISS Analyse &
Lessons Learnt

AP 1000



Dokumenteigenschaften

Titel	Recherche - ISS-Analyse & Lessons Learnt
Betreff	Dokumentation zu AP 1000 des Projektes "Post-ISS"
Institut	Institut für Raumfahrtssysteme, RY-SRS
Erstellt von	C. Philpot, W. Seboldt, D. Quantius
Beteiligte	DLR Raumfahrtmanagement, GSOC
Geprüft von	O. Romberg
Freigabe von	
Datum	21. August 2014
Version	1.0
Dateipfad	D:\SVN\Post-ISS\Work Packages\1000-Recherche\DLR-RY-Post-ISS-AP1000_Version 1.0 20140821.docx

Inhaltsverzeichnis

Dokumenteigenschaften	3
1. Einleitung.....	6
2. Forschungsplattformen in der Raumfahrt - Übersicht Konzepte und Strategien	7
2.1. Entwicklung von Raumstationen	7
2.1.1. Historie früher Raumstationsideen und erste Verwirklichungen	7
2.1.2. Europas Einstieg in die bemannte Raumfahrt.....	11
2.1.3. Beginn der internationalen Raumstationsplanung und Kooperation.....	13
2.1.4. Wissenschaftliche und technologische Ziele bei der Entwicklung von Raumstationen/Forschungsplattformen	16
2.2. Internationale Vereinbarungen zur ISS	19
2.2.1. Auszug aus der Aufbauperiode der ISS bis heute	19
2.2.2. ISS Konfiguration und Verpflichtungen der Partner zur Nutzung der ISS	21
2.3. Raumfahrtprogramme und Explorationsstrategien.....	23
2.3.1. Europa- ESA und EU	28
2.3.2. USA - NASA	31
2.3.3. Russland - ROSCOSMOS	33
2.3.4. Japan- JAXA und ISAS	37
2.3.5. Chinesisches Raumfahrtprogramm.....	39
3. ISS Analyse	42
3.1. Kooperationspartner und ihre Schlüsseltechnologien	42
3.1.1. Technologien im ISS Projekt.....	43
3.1.2. Technologien ISS am Beispiel Columbus	47
3.1.3. Technologien für Nutzlasten (für ESA Experimente)	56
3.2. Logistik ISS.....	59
3.2.1. Vergleich Aufbau MIR und ISS	60
3.2.2. Versorgung/nominaler Betrieb	61
3.2.3. Kommunikation	62
3.2.4. Bodensegment.....	62
3.3. Bewertung Nutzung und Kosten.....	64
3.3.1. Darstellung erreichter Ziele	64
3.3.2. Kosten im Vergleich	70
3.4. Risikoanalyse.....	70
3.5. Entsorgungsszenario ISS	76
3.6. Wiederverwendbare ISS Komponenten	78

4. ISS Lessons Learnt und Nutzen.....	81
4.1. Vor- und Nachteile des ISS Konzepts.....	82
4.1.1. Management und internationale Arbeitsteilung.....	82
4.1.2. Nutzung und Nutzer.....	83
4.1.3. Astronauteneinsatz und -training.....	85
4.1.4. ISS als Testzentrum für neue Technologien und Anwendungen.....	86
4.2. Vergleiche (terrestrisch und unbemannt).....	88
4.3. Resümee der ‚Lessons Learnt‘ und Empfehlungen	89
Abbildungsverzeichnis	91
Tabellenverzeichnis	92
Literaturverzeichnis & Notizen.....	94
Abkürzungsverzeichnis	98
ANNEX.....	101

1. Einleitung

Ein Blick auf die letzten Jahrzehnte der deutschen, europäischen und globalen Raumfahrtgeschichte zeigt, dass sich die gesetzten Akzente seit den Anfängen kaum verändert haben. Beginnend mit dem Fokus auf Entwicklung der technologischen Bedingungen und mit dem Wissen erfolgreich Satelliten und Trägerraketen (z.B. Ariane) bauen und betreiben zu können folgten weltraumgestützte Wissenschaft und erste Anwendungen (Meteorologie, Telekommunikation). In den 80er Jahren entwickelte sich die astronautische Raumfahrt (Spacelab, MIR) und führte mit der ISS zur technologischen Reife der kontinuierlichen Langzeit-Aufenthalte und Forschung im LEO.

Erfahrungen sind geprägt durch Erfolge und Misserfolge, Trends, Entwicklungen und Tendenzen der Raumfahrt. Der Erhalt von Know-how in Wissenschaft, Technik, Politik und professionellem Management solch globaler Projekte erfordert eine lückenlose Weiterentwicklung. Werden die Weichen nicht heute schon gestellt, wird das z.B. Projekt ISS 2028 und der Erhalt seines Know-hows eine Herausforderung. Nationale Alleingänge sind bereits seit Spacelab aufgrund der hohen Kosten nicht mehr möglich. Es wird zunehmend die Frage nach dem Sinn und Zweck gestellt. Nach Zeiten der Forschungsorientierung (Bedeutungsfindung der physikalischen Phänomene in den verschiedenen Bereichen wie Biologie, Materialwissenschaft) in der Raumfahrt, setzt man heute Experimente auch mit dem Gedanken nach operationellen Anwendungen und volkswirtschaftlichem Nutzen auf. Weltweite Studien und Planungen zu Post-ISS Themen orientieren sich aber weiterhin an der Nachfrage der Wissenschaft. Wissenschaft allein sollte jedoch die LEO Aktivitäten nicht begründen.

Die Studie spiegelt Bekanntes wider: Nationen wie USA, Russland und China sind Treiber der astronautischen Raumfahrt und wollen sowohl den LEO astronautisch weiter nutzen, als auch wieder tiefer in den Weltraum vorstoßen. Ob die nächsten Ziele Mond, Mars oder Asteroiden heißen, wird sich in den nächsten 20 Jahren entscheiden. Zur Vorbereitung solch großer, vielschichtiger und anspruchsvoller Explorationsmissionen werden u.a. neue Schwerlasttrakteten (Angara, SLS, Falcon Heavy Lift) oder Modulentwicklungen (MPCV) von Russland und den USA entwickelt. Ob und wie wir uns als Europa oder Deutschland an der Exploration jenseits des LEOs beteiligen und somit unser Know-how erhalten, weiterentwickeln und einbringen, ist nicht Teil dieser Studie. Die Studie konzentriert sich auf astronautische Raumfahrt im LEO und ihre mögliche zukünftige Entwicklung. Im Teil 1 dieser Studie sind dazu einige Kernelemente auch aus der Historie recherchiert, in Übersichten gesammelt und diskutiert.

Es wird vorausgesetzt, dass die Geschichte der astronautischen Raumfahrt und insbesondere die der ISS und MIR grundsätzlich bekannt sind, ebenso wie der politische Kontext der vielen Entscheidungen und des derzeitigen Betriebs und der Nutzung. In der vorliegenden Studie wird daher zur Einführung und Vorbereitung der Analyse nur eine kompakte Zusammenfassung dargestellt.

2. Forschungsplattformen in der Raumfahrt - Übersicht Konzepte und Strategien

Forschungsplattformen in der Raumfahrt untergliedern sich in erdgebundene, suborbitale und orbitale Systeme. Sie erfüllen im Gesamtprozess jeweils ihren Zweck im Programm der Forschung unter Weltraumbedingungen und dienen als Ergänzung und Erweiterung der terrestrischen Labore. Die Studienrecherche konzentriert sich auf die Forschung und Raumfahrt im niedrigen Erdorbit (LEO), wozu sowohl bemannte als auch unbemannte Plattformen gehören. Tabelle 1 und Tabelle 15 geben eine Übersicht der im Fokus dieser Studie und ihrer Fragestellung stehenden Forschungsplattformen und ihrer möglichen Nutzungsdisziplinen.

2.1. Entwicklung von Raumstationen

Ein historischer Überblick führt in die Raumstationskonzepte ein - von ersten Ideen bis zu ersten Verwirklichungen wie dem US-amerikanischen 'Skylab' oder der sowjetischen Station 'MIR' (Frieden). Anschließend wird Europas Einstieg in die bemannte Raumfahrt durch seinen 'Spacelab'-Beitrag zum US-amerikanischen 'Space Shuttle' Programm erörtert, sodann der Beginn der Raumstationsplanung in internationaler Kooperation und schließlich die wissenschaftlichen und technischen Ziele.

2.1.1. Historie früher Raumstationsideen und erste Verwirklichungen

Die folgende Übersicht stellt eine Auswahl an ersten Ideen und realisierten Raumstationskonzepten im Vorfeld der Internationalen Raumstation ISS dar.

- 1902-1903: Erste Ideen von Konstantin Tsiolkovsky, insbesondere zu rotierenden Raumstationen mit künstlicher Gravitation [56]
- 1928 Herman Potočnik (Pseudonym Noordung) publizierte eine Untersuchung der bemannten RF im GEO, welche erstmals von Hermann Oberth aufgegriffen wurde [14]
- 1920 - 1930 Hermann Oberth ('Die Rakete zu den Planetenräumen') und Robert Goddard diskutieren erdnahe Raumstationen, vor allem zur Kommunikation, Erdbeobachtung und als Weltraum-Bahnhof für Treibstofflager [56, 57, 58, 59]
- 1948 H.E. Ross greift Noordungs Ideen auf und untersucht zusammen mit der 'Britisch Interplanetary Society' BIS eine Raumstation als astronomisches, Mikrogravitations- und Vakuum Labor.[15, 57]
- 1952-1954: Wernher von Braun konzipiert rotierende radförmige Raumstations-Konfigurationen (Abbildung 1) in erdnahen Orbits mit relativ großer Inklination (z.B. 50°) und Bahnhöhe (~1700 km) vor allem zur Erdbeobachtung [20, 56]

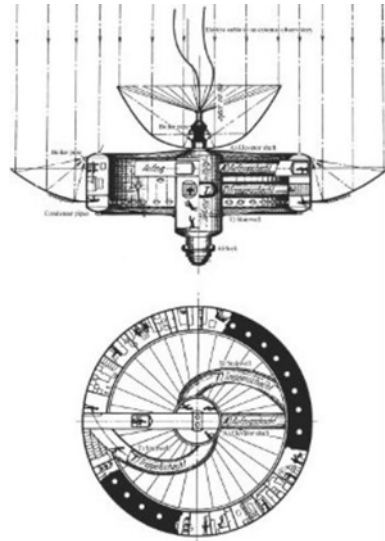
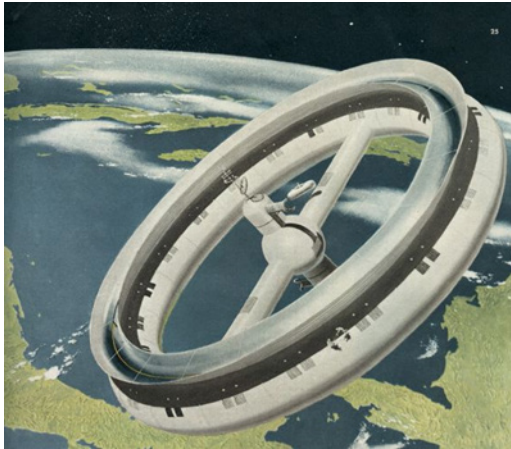


Abbildung 1: Erste Entwürfe von Raumstationen im LEO/GEO (1948-1952) [22, 14]

- 1965 **Manned Orbiting Laboratory (MOL)**, USA, konzipiert als Spionage-Plattform (Abbildung 2) zur Überwachung Russlands; war Teil des bemannten Raumfahrtprogramms der US Air Force und wurde am 10. Juni 1969 eingestellt.



Abbildung 2: Manned Orbiting Laboratory (MOL) [90]

- 1971-1982: Nacheinander folgten sowjetische Raumstationen 'Salyut-1 bis 7' (Abbildung 3: Zentralmodul ca. 15m lang, max. $\varnothing=4,2\text{m}$, ab Salyut-6 mit 2 Andockstützen vorne und hinten, so dass ein weiteres Ergänzungsmodul angekoppelt werden konnte); Versorgung erfolgte mit Sojus und Progress Fahrzeugen.

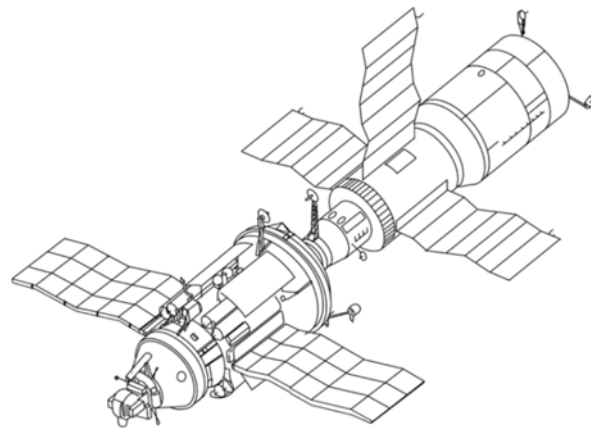


Abbildung 3: Salyut-7 Raumstation mit stirnseitig angekoppeltem Ergänzungsmodul [Cosmos 1686 TKS]

- 1973-1974: Skylab 1-4 Missionen; erste bemannte amerikanische Raumstation 'Skylab' aus umgebaute Saturn V-Oberstufe (Skylab I unbemannt) [21, 22]
- 1975 Stanford University / NASA Studie zur Besiedlung des Weltraums - Konzept einer sich drehenden, ringf6rmigen Raumstation mit k6nstlicher erdähnlicher Erdumgebung und kulturellen und landwirtschaftlichen Nutzflächen [16]
- 1975: ASTP ('Apollo-Sojus-Test-Programm'); erste Zusammenarbeit zwischen USA und Sowjetunion in bemannter Raumfahrt durch Andocken von 'Apollo- und Sojus-Kapsel' im Erdorbit mittels speziellem 'Adapter' [23, Abbildung 4] Beginn der Verhandlungen ab 1970, Vereinbarung 24.Mai 1972 unterschrieben.

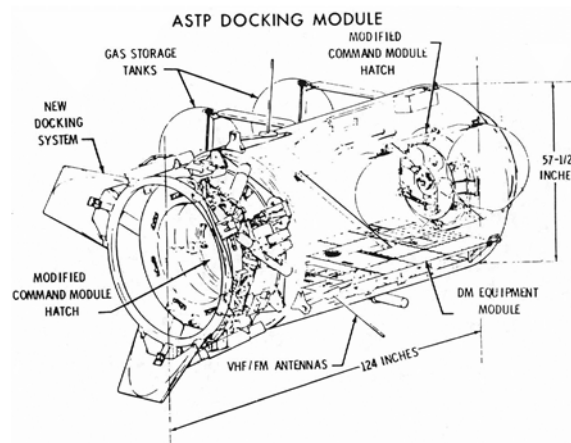


Abbildung 4: Apollo-Sojus Test Programm - Docking Adapter/Modul

- 70er Ende: Studien in den USA von McDonnell Douglas + Marshall Space Flight Center (→'SAMPS: Science and Application Manned Platform System') und von Boeing + Johnson Space Flight Center zu Infrastrukturen im Erdorbit f6r Bahnhofsfunktionen, Konstruktionsaktivitten und Hangar f6r Reparaturen von Satelliten (→'SOC: Space Operation Center'). [60, Seite 127] (Siehe als Beispiel auch Abbildung 5)

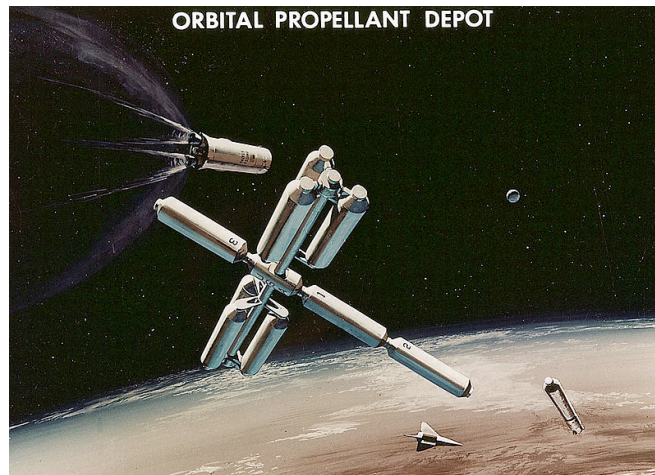


Abbildung 5: NASA/MSFC orbital propellant depot concept (1971)

1986-2001: Sowjetische 'MIR'-Raumstation; nach Feuer an Bord (1997) und Beschädigung durch Kollision mit Progress-Fahrzeug (1997) wurde 2001 der kontrollierte Absturz eingeleitet (Abbildung 6)

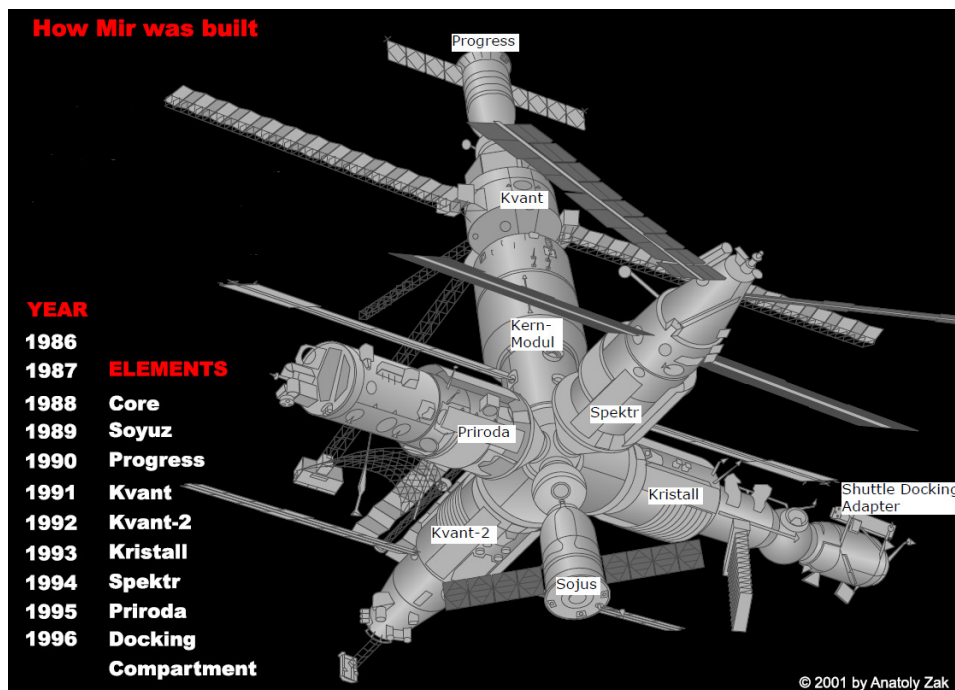


Abbildung 6: Module MIR Raumstation (Stand: 2001) [24]

Ab 1987: Internationale MIR-Beteiligungen durch Mitflüge von Astronauten, u.a. die Deutschen Klaus-Dietrich Flade (1992) und Reinhold Ewald (1997), sowie zwei ESA-Missionen ('EuroMIR 94 und 95') mit den deutschen Astronauten Ulf Merbold und Thomas Reiter

1993: Kooperationsabkommen zwischen USA und Russland über 11 Space Shuttle-Missionen zu MIR ab 1995 (~400 Mio.US\$ an Russland)

2.1.2. Europas Einstieg in die bemannte Raumfahrt

[56, 57, 60] Den Beginn der europäischen bemannten Raumfahrt-Aktivitäten markierte die Zusammenarbeit mit den USA bei der Entwicklung von 'Spacelab' für das 'Space Shuttle'. Auf ESRO-Vorschlag (European Space Research Organization - Vorgänger der ESA) wurde 1973 ein MOU zwischen beiden Partnern unterschrieben, welches ESRO bzw. später ESA zum Bau des (druckbeaufschlagten) Forschungs-Moduls sowie weiterer unbemannter 'Paletten' mit anfänglich geschätzten Kosten von 370 Mio. US\$ verpflichtete (die Kosten erhöhten sich später auf insgesamt ca. 1 Mrd. US\$), wobei als Kompensation für den ersten Flug und Astronauten-Mitfluggelegenheiten die Hardware anschließend in den Besitz der NASA überging. NASA kaufte später ein weiteres Modul. Insgesamt gab es von 1983- 1998 22 Spacelab-Missionen (16 mit Druckmodul, 6 mit ausschließlich Paletten). 10 europäische Staaten (inkl. Schweiz) beteiligten sich an der Finanzierung - hauptsächlich Deutschland (~ 50%) mit ERNO Entwicklungstechnik GmbH (Bremen) als Hauptauftragnehmer, Frankreich und Italien. Über 200 Wissenschaftler aus 53 Universitäten und Hochschulen weltweit, 20 Industriefirmen und 16 Forschungseinrichtungen trugen zu den Nutzlasten und Experimenten bei. Die Crew wurde bei der Vorbereitung und Durchführung unterstützt durch über 2000 Experten [49].

Das druckbeaufschlagte Spacelab-Modul hatte eine Länge von 6 m, ein Volumen von 22 m³ und eine Nutzlastmasse von 4,6 t. Das bordeigene Lebenserhaltungssystem für 3 Astronauten wurde unterstützt vom Shuttle durch Sauerstoffzufuhr, Wärmekontrolle und elektrische Leistung von 7 kW. Struktur und Thermalsystem wurden von Aeritalia bereitgestellt, Hauptauftragnehmer und verantwortlich für die Gesamtintegration war ERNO (Abbildung 7).

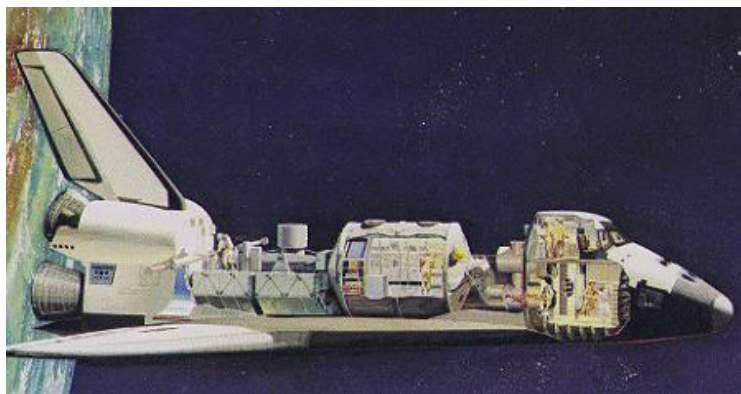


Abbildung 7 Spacelab in der Shuttle-Nutzlastbucht

Im Folgenden einige Highlights in einer Auswahl wichtiger Spacelab-Missionen (Orbit ca. 270km):

- 1983: FSLP ('First Spacelab Payload'): NASA + ESA (Astronaut Ulf Merbold), Werkstofflabor (u.a. Proteinkristallisation)
- 1985: D1-Mission: µg Material-/Lebenswissenschaften und Navigation (mit den europäischen Astronauten Ernst Messerschmid, Reinhard Furrer, Wubbo Ockels)
- 1992: IML-1 ('International Microgravity Laboratory') mit Astronaut Ulf Merbold

- 1993: D2-Mission: NASA + D (Astronauten Ullrich Walter, Hans Schlegel) + ESA + Japan, 90 Experimente (Material-/Lebenswissenschaften, Astronomie, Erdkunde, Robotik), Gesamtkosten ~ 900 Mio. DM, davon D ~ 760 Mio. DM (Startkosten ~ 250 Mio. DM)
- 1994: IML-2: 79 internationale Experimente (inkl. aus D: Strahlungsexperiment 'Biostack' und als berührungsfreier Schmelzofen 'TEMPUS')
- 1997: MSL-1 ('Microgravity Science Laboratory'): die im April am 4. Tag wegen technischer Schwierigkeiten mit dem Shuttle abgebrochene Mission wurde im Juli wiederholt; Material-/Biologie-/Medizin-Forschung (u.a. Wiederflug von 'TEMPUS')
- 1998: NEUROLAB-Mission: letzter Einsatz von Spacelab (u.a. mit ATLAS 'Atmospheric Laboratory for Applications and Science')

Zu erwähnen ist noch die europäische Entwicklung einer unbemannten Plattform 'EURECA (Orbit ca. 450km, Inklination 28,5°, Masse 4,5 t, Masse PL: 1,0 t, el. Leistung 1,5 kW, Spannweite: 20m), die mit dem Shuttle STS-46 1992 in den Orbit gebracht und später rückgeführt wurde (Abbildung 8). Nach einem 11 Monate langen autonomen Aufenthalt im Erdorbit wurde sie zur Analyse der Experimente im Jahr 1993 mit dem Shuttle auf die Erde zurückgeholt. 71 Experimente wurden in 15 verschiedenen Anlagen betrieben, u.a. zur μ g-Forschung (Materialwissenschaften, Protein-Kristallisation), Strahlenbiologie und Technologie (RIT-Iontriebwerk).



Abbildung 8: EURECA-Plattform im Erdorbit

Die Mission hat früh gezeigt, dass komplexe automatisierte Forschung ohne Unterstützung durch Astronauten im LEO möglich ist. Die EURECA Mission verbrauchte ca. 5% ihrer Zeit für reine Betriebsaufgaben (ESA/ESOC), die restliche Zeit stand der automatisierten Forschung zur Verfügung. Die Struktur wäre für mehrere Missionen wiederverwendbar gewesen – die sogenannte ‚turn-around‘ Zeit zwischen Genehmigung und Start hätte bei 2 Jahren gelegen. Nutzlastkosten (Bau/Wartung) lagen theoretisch bei damals 100KECU/kg (1ECU=1,95DM) im Vergleich zu 200kg Klasse-Kleinsatelliten mit ca. 300KECU/kg. Jedoch überschritten die Flugkosten das Gesamtbudget und es blieb bei einem Einsatz. Die Mission kostete ca. 307 MECU [ESA Programmrat 1983/84], wobei Deutschland sich mit 56% beteiligte. Die Kosten beinhalteten $\frac{1}{4}$ Shuttle Nutzlast. [DLR RFM, 50]

2.1.3. Beginn der internationalen Raumstationsplanung und Kooperation

Ab ca. 1978 begannen erste Diskussionen und Studien von NASA und ESA zum Thema Spacelab-Nachfolge bzw. zur Errichtung einer Raumstation. Am 25.1.1984 kündigte US-Präsident Reagan den Bau einer permanent bemannten Raumstation an (damals geschätzte Kosten ~ 8 Mrd. \$) und lud internationale Partner (westliche Verbündete) zur Beteiligung ein. Hier eine kurze Zusammenfassung der wichtigsten Ereignisse [56, 60]:

- 1983+: Bilaterale deutsch-italienische (ERNO-Aeritalia) Kooperationsabsprachen und Studien bzgl. einer europäischen Raumstationsbeteiligung in Form eines 'Spacelab-Type' zeitweise angedockten druckbeaufschlagten langen Moduls, das durch ein deutsches Ressourcenmodul versorgt auch Freiflug-Phasen ('Columbus-Free-Flyer') durchführen kann und später als Basis einer autonomen europäischen Ministation dienen soll. Es wurde eine ESA-Europäisierung mit D- bzw. I-Anteilen von ca. 35% bzw. 25 % angestrebt
- 1985: ESA Ministerratskonferenz in Rom erteilt vorläufige Genehmigung der COF-Beteiligung ('Columbus Orbital Facility' COF) am US-Raumstationsprogramm mit 4 Elementen: 'Pressurized Module' PM, 'Resource Module' RM, 'Polar Platform' PP, 'Service Vehicle' SV; Kosten ~ 2,6 BAU ('Billion accounting units (ECU)') bis 1995; der ESA-Plan beinhaltet zu dieser Zeit für das druckbeaufschlagte Modul inkl. Versorgungsmodul noch ausschließlich das Konzept des sogenannten 'Columbus-Free-Flying-Laboratory' CFLL, das nur zeitweise bemannt wird und gelegentlich an der internationalen Raumstation zwecks Wartung und Reparatur andockt. Dieses Projekt wurde später nach endgültigem Beschluss über die ISS Beteiligung eingestellt.
- 1985: 1. Abkommen von Europa (9 ESA-Mitgliedsstaaten), Kanada und Japan mit USA zur Errichtung einer internationalen Raumstation
- 1984 - 93: Es wurden verschiedene US-Entwürfe und Modifikationen zu Konfiguration und Tragestruktur für mehrere druckbeaufschlagte Module entwickelt (kostengünstige und schrittweise erweiterbare Stationen) - anfänglich 4 verschiedene Konzepte: 'Big T', 'Delta/ROOF', 'Planar', 'Power Tower' (letzteres war zunächst als Referenz erste Wahl (Abbildung 9); insgesamt wurde ein modulares Aufbaukonzept angenommen mit Stück für Stück (im wesentlichen durch das Space Shuttle) in den Orbit zu transportierenden Elementen.

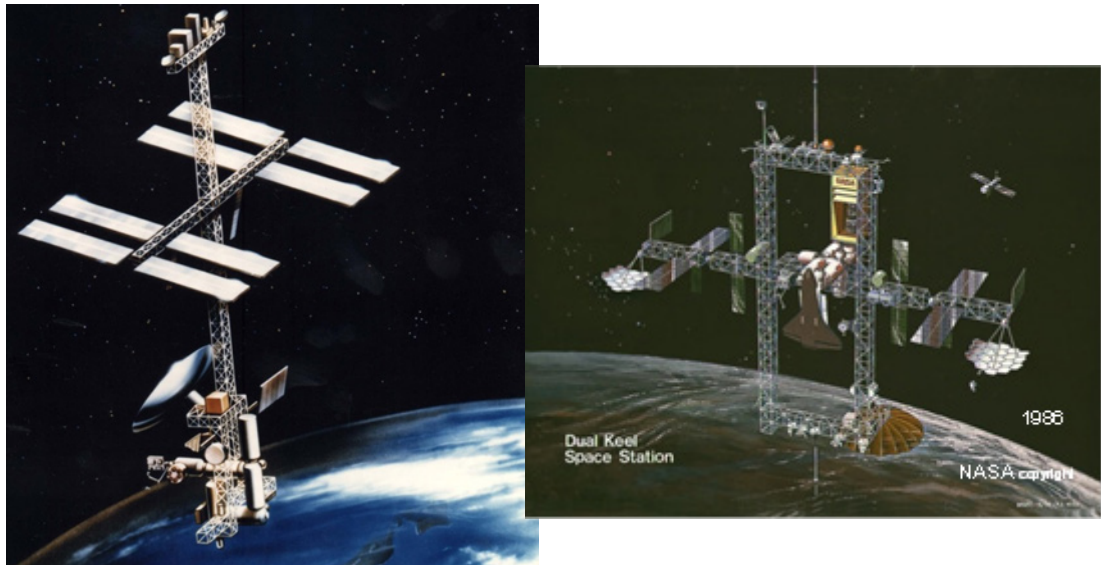


Abbildung 9: links - Power Tower Space Station Konzept der NASA mit andockten Modulen (19.6.1985), rechts - Dual Keel Konzept vom Glen Research Center (1. April 1986)

Die im April 1984 vom neu gebildeten 'Space Station Program Office' am NASA/JSC entworfene erste Referenzkonfiguration war der 'Power Tower', ein langer Gittermast, an dessen unterem Ende mehrere druckbeaufschlagte Module befestigt waren. Diese Konfiguration konnte daher mit relativ geringem Lageregelungsaufwand im Gravitationsgradienten der Erde radial stabil ausgerichtet werden [61]. 1986 wurde der Entwurf zum 'Dual Keel' Design modifiziert mit den druckbeaufschlagten Modulen nun an einem horizontalen zentralen Gittermast im Massen- bzw. Gravitationszentrum, so dass dort bessere Mikrogravitationsbedingungen herrschten. Zur Stabilisierung der radialen Ausrichtung wurde die vertikale Gitterstruktur über zwei Masten à 105 m Länge verbunden und an beiden Enden erweitert. Die zur Energieversorgung an den zentralen Mastenden konzipierten solardynamischen Anlagen mit ihren höheren Wirkungsgraden wurden später wegen zu großer Komplexität wieder gestrichen. Auffällig ist auch eine 'Service-Box' im oberen Bereich der Gitterstruktur zur Wartung von Satelliten bzw. Stationierung von 'Orbit-Transfer'-Fahrzeugen, die später ebenfalls gestrichen wurde.

US-Wunsch war ein permanent an die Raumstation andocktes Columbus-Modul; ESA schlug das MTFF ('Man Tended Free-Flyer') bzw. CFFL als unabhängiges Element.

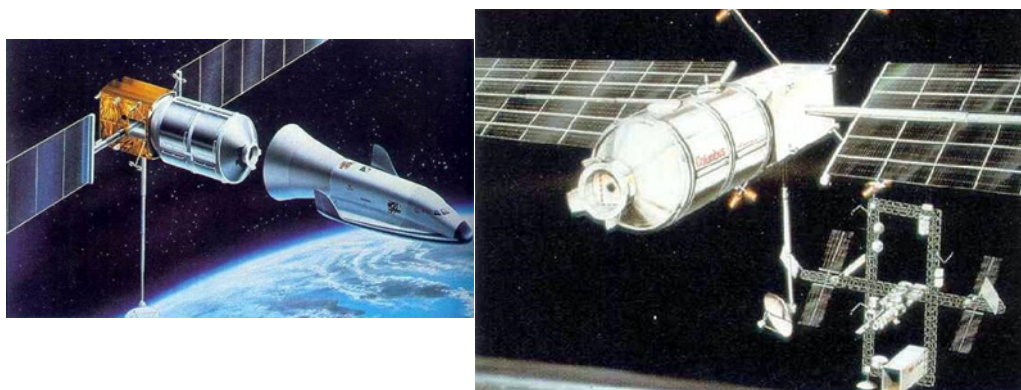


Abbildung 10: MTFF mit Hermes bzw. mit Raumstation [50]

1987: Auf ESA-Beschluss bei der Ministerratskonferenz in Den Haag soll es ein permanent an die Raumstation angedocktes europäisches 'Columbus-Modul' und zusätzlich ein frei-fliegendes Modul (MTFF) geben, sowie eine 'Polare Plattform' PP zur Erdbeobachtung (an letzterem hatte England großes Interesse, da es keine Beteiligung an der bemannten Komponente wollte) plus Raumgleiter 'Hermes' mit besonderem Interesse aus Frankreich und erste Studien zum ATV ('Automated Transfer Vehicle', Abbildung 11) auf Ariane 5

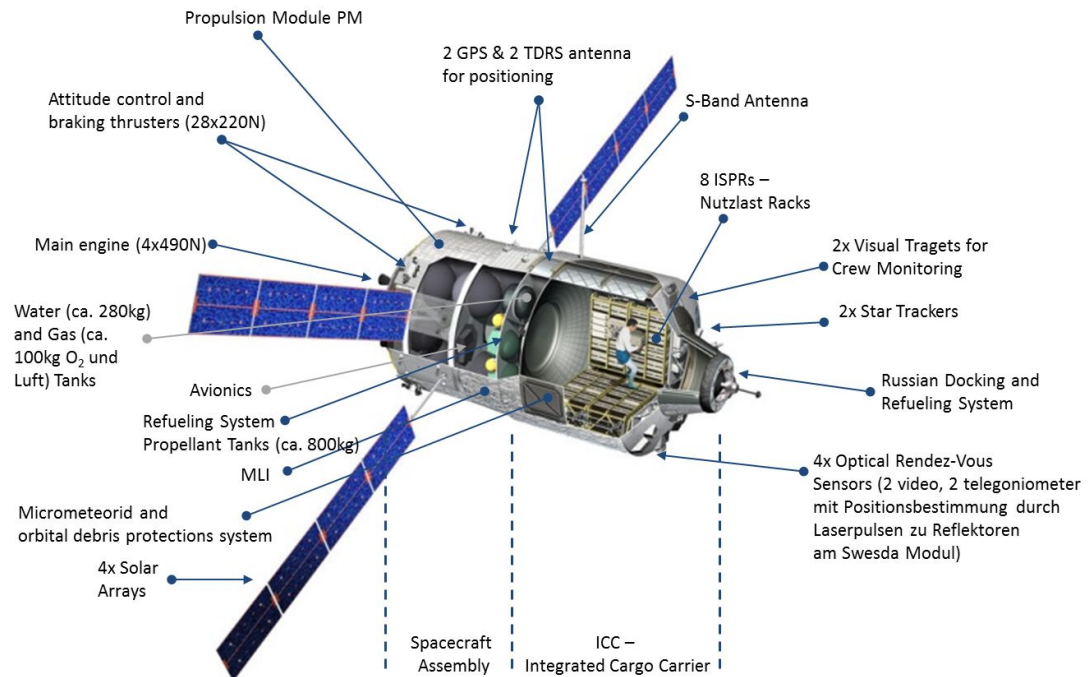


Abbildung 11 ATV-5 modular [13]

- 1989: Es gibt Schwierigkeiten bei der Abstimmung zu Dimensionen und Bemaßung der verschiedenen internationalen Module und Beiträge (USA, Japan, Europa) durch laufende Änderungen der geplanten Raumstation 'Freedom' sowie Verzögerungen bei den Verträgen mit ESA
- 1991: ESA Ministerratskonferenz in München: Vorbereitung einer Raumfahrt-Zusammenarbeit mit Russland nach dem Fall der Berliner Mauer (insbes. auch bzgl. Missionen zu MIR); Ankündigung von Einsparzwängen bei ESA-Mitgliedsländern (insbes. D - getrieben durch die hohen Kosten der Wiedervereinigung)
- 1992: ESA Ministerratskonferenz in Granada: Beschluss einer Reduktion der geplanten ESA-Ausgaben um ~ 13 %; 'Hermes' und 'MTFF' werden gestoppt; attached PM - jetzt 'Columbus Orbital Facility' COF genannt - und PP bleiben weiter im Programm sowie als Ersatz zusätzlich ein 'Data Relay Satellite' und 'Envisat'; Zusammenarbeit mit Russland bei der Raumstation wird geplant; geschätzte jährliche Betriebskosten für ESA von ~ 200 MAU (Million accounting units (ECU)) sollen durch 'in-kind-Beiträge' ('Barter-System') geleistet werden (vor allem durch ATV-Versorgungsflüge)
- 1992: US-Präsident Clinton verordnet Kostenreduzierung der Raumstation 'Freedom' auf ≤ 7 Mrd. \$. Es folgen radikale Änderungen und Vereinfachungen des Konzeptes (insbes. Wegfall der

- 'Wartungs- und Bahnhofs-Funktion' für weiterführende Missionen, d.h. keine Hangars für Satellitenreparaturen und Betankung)
- 1993: Einladung an Russland, sich an der internationalen Raumstation zu beteiligen; erneute Re-Konfiguration der Raumstation (die 8. Version innerhalb von 9 Jahren); Europa in nun deutlich kleinerer Rolle als Kooperationspartner startet Vorschlag zu einem europäischen 'Crew Return Vehicle' CRV (ev. Kapsel) und beginnt mit Studien dazu (Aerospatiale/DASA)
- 1994: US-Kongress genehmigt ganz knapp mit einer Mehrheit von 1 Stimme (216 gegen 215 Stimmen) die Fortführung des Internationalen Raumstationsprojektes, jetzt ISS ('International Space Station') genannt
- 1995: ESA-Paris verordnet nach neuen Kostenschätzungen von ~ 1,2 BAU für das COF, ~ 1,6 BAU für das CRV und ~ 750 MAU für das ATV ('up to completion') einen Gesamtentwicklungs-Kostenlimit von ~ 2 BAU, was einen Konflikt hervorruft (D-Position: CRV streichen, F-Position: COF streichen); zusätzlich kündigt Italien eine Beteiligungsreduktion wegen ASI-Budget-Problemen an
- „Hearing“ zum Raumstationsprogramm der NASA vor dem Kongress/Senat: Untersuchung des bisher US\$30Mrd Raumstationsprogramms plus US\$5Mrd der Partner zusammen. SpinOffs seien marginal, dennoch sollen auf jeden investierten Dollar in die Raumfahrt ca. US\$8 in Form von kommerziellen Produkten und neuen Technologien zurückgekommen sein. Kooperation und damit angenommene(s) Kosteneinsparung und Vertrauen mit Russland in Frage gestellt.
- 1995: ESA Ministerratskonferenz in Toulouse beschließt Beibehaltung von COF und ATV sowie Studien zu einem 'Crew Transfer Vehicle' CTV; der Beteiligungsschlüssel ist für D 41 %, für F 27 % und für I 19 % ; Gesamtkostenschätzung für ESA jetzt ~ 2,7 Mrd. € ('up to completion')

2.1.4. Wissenschaftliche und technologische Ziele bei der Entwicklung von Raumstationen/Forschungsplattformen

Während der Planungsphasen der Internationalen Raumstation in den 80-er und 90-er Jahren gab es eine ganze Reihe von Studien (z.B. die ESA-Studie 'European Utilization Aspects of Low Earth Orbit Space Station Elements' EUA), die eine ausgewogene und effektive Nutzung der zukünftigen Raumstation ermöglichen sollten. Über zahlreiche Aktivitäten und Konferenzen mit den Nutzer-Gemeinden in Europa und weltweit wurde versucht, möglichst umfassend das Interesse auszuloten. Entsprechende Nutzungsvorschläge wurden in so genannten Modell-Nutzlasten zusammengefasst. Auch kommerzielle Anwendungen kamen zur Sprache. Letztere sollten der Industrie unter Eigenbeteiligung an den Kosten die Möglichkeit zu Forschung, Anwendung und sogar Produktion im Weltraum ermöglichen. Hier zeigte sich aber kein signifikanter Bedarf, und erste Ideen zu Produktionsprozessen im Weltraum wurden unter Ökonomie-Gesichtspunkten schnell wieder fallen gelassen. Insgesamt wurde festgestellt, dass die wissenschaftliche Gemeinde zwar großes Interesse an Mitfluggelegenheiten hat - wenn die

Raumstation einmal aufgebaut ist -, aber wissenschaftliche Experimente alleine keinen hinreichenden Treiber für eine permanent bemannte Raumstation mit ihren hohen Kosten darstellen. Es wurde erwartet, dass vor allem politische Gesichtspunkte (z.B. industriepolitische und/oder die Möglichkeit der Kooperation mit internationalen Partnern - insbesondere Russland) den Ausschlag für eine positive Entscheidung geben. Was die Experimente betraf, hoffte man auf Möglichkeiten ähnlich denen in einem terrestrischen Labor mit regelmäßigem auch kurzfristigem Zugang und kostengünstigem Betrieb. Dies erwies sich später allerdings aus vielen Gründen - nicht zuletzt aus Sicherheitsaspekten - als Illusion.

Europa hatte (und hier vor allem die Industrie in D und I) ein besonderes Interesse an Einsatz und Weiterentwicklung von Habitat-Technologien einschließlich Lebenserhaltungssystemen - motiviert durch die Spacelab-Erfahrungen und unter Nutzung des erarbeiteten 'Know-hows'. Hinzu kam bei den technologischen Zielen auch die Robotik ('Service Vehicle' und 'Robotic Arm' ERA, s.u.) und der Transport in den Orbit (z.B. ATV). Die USA wiederum wollte ihre bemannten Raumfahrtaktivitäten fortsetzen/erweitern und suchten auch ein öffentlichkeitswirksames Ziel für ihren 'Space Shuttle'. Anfänglich gab es noch amerikanische Ideen der 'Wartungs- und Bahnhofsfunction' im Erdorbit für Betankung und Reparaturen von Raumfahrzeugen, die aber aus Kostengründen früh aufgegeben wurden.

Wissenschaftlich konzentrierte sich das Interesse auf die Fortführung ähnlicher Experimente, wie sie im 'Spacelab' unter Zeitbeschränkung (ca. 1-2 Wochen) unter Schwerelosigkeit durchgeführt wurden (insbes. Material- und Bio-Wissenschaften) - nun aber über längere Zeiträume - einschließlich medizinischer Langzeit-Untersuchungen zur Gesunderhaltung von Astronauten. Dabei hilft die Mikrogravitation, fundamentale Fragen aus Medizin, Ingenieurtechnik, Technologie und Wissenschaft genauer zu untersuchen und zu beantworten. Durch Langzeitforschung wie in Raumstationen sollen zum Beispiel physikalische, chemische und biologische Prozesse, die in unsere täglichen Lebensbereiche einfließen, zum besser verstanden und optimiert werden. Das Ausschalten der Gravitation bedeutet zum Beispiel, dass Temperaturunterschiede in Flüssigkeiten keine Konvektion, Auftrieb oder Sedimentation zeigen.

Die Nutzung von Infrastrukturen für Forschung unter Schwerelosigkeit hängt neben dem verfügbaren Budget auch von der notwendigen Forschungszeit in Mikrogravitation ab. Es existieren derzeit verschiedene Formen: Fallturm, Flugzeug, Höhenforschungsraketen, Kapseln oder Raumstationen wie in der Tabelle 1 ersichtlich.

Das Spektrum der weltweit im Betrieb bzw. Aufbau begriffenen Plattformen zeigt nicht nur die nationalen Interessen sondern auch die Möglichkeiten des LEOs als zusätzliche Laborumgebung je nach Forschungsanforderung. Bei einigen Experimenten stellte sich die jeweilige Plattform z.B. aufgrund zu kurzer μg Zeiten als nicht günstig heraus (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht der verschiedenen Mikrogravitations-Plattformen und ihre Forschungsbereiche, Stand März 2014

✓ Experimente wurden durchgeführt, () nicht ideale Experiment-Umgebung ✗ keine Experimente durchgeführt	Parabelflug	Space Shuttle	ISS + Bigelow* / OKA-T-Free Flyer	Tiangong/ CSS	MIR	Fallturm	u.a. Sounding Rocket/ XCOR	(Foton/Bion/ Shenzhou) Kapsel	Satelliten
Experimentdauer Potenzial für Langzeituntersuchung	≤22s (vorr. Precursor)	~10Tage (vorr. Precursor)	Jahre (vorr. Langzeitstudien)	Jahre (tbc., vorr. Langzeitstudien)	Jahre (vorr. Langzeitstudien)	≤9,3s (vorr. Precursor)	Min (vorr. Precursor)	Tage (bis 1Monat) (vorr. Precursor)	Jahre (Precursor / Langzeitstudien)
	<i>Human Spaceflight</i>					<i>automatisiert/robotisch</i>			
Fundamentalphysik (komplexe Plasmen, Teilchenphysik, kalte Atome, Quantumfluide)	✓	✗	✓	Möglich	unbekannt	✓	✓	✗	✗
Fluid- und Verbrennungsphysik (Fluide und Multiphasensysteme, Verbrennung)	(✓)	✓	✓	Möglich	✓	✓	✓	✗	✓
Materialwissenschaften (thermophysikalische Eigenschaften, neue Materialien/Produkte/Prozesse)	✓	✓	✓	Möglich	✓	(✓)	✓	✓	(✓)
Biologie: Biotechnologie/Proteinkristallisation	✓	✗	✓	Möglich	✓	✗	✓	✓	✗
Biologie: Pflanzenphysiologie / Molekularbiologie	✓	✓	✓	Möglich	✗	✗	✓	✓	✗
Biologie: Zellbiologie	✓	✓	✓	Möglich	✗	✓	✓	✓	✗
Physiologie: Muskeln und Knochen	✓	✓	✓	Möglich	✓	✗	✗	✓	✗
Physiologie: Neurowissenschaften	✓	?	✓	Möglich	✓	✗	✗	✗	✗
Physiologie: Herz-Kreislauf	✓	✓	✓	Möglich	✓	✗	✗	✗	✗
Physiologie: Metabolismus/Immunsystem	✓	✓	✓	Möglich	✓	✗	✗	✗	✗
Astro-/Exobiologie: Ursprung/ Evolution/ Verteilung des Lebens	✓	✗	✓	Möglich	✓	✗	✗	✓	✓
Extraterrestrik (z.B. AMS)	✗	✗	✓	Möglich	✓	✗	✗	✗	✓
Erdbeobachtung	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✓
Technologiedemonstration	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Bildung	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

*Orbitalstrukturtests im Orbit und später angedockt an ISS. Nutzungsmöglichkeiten noch unbekannt

2.2. Internationale Vereinbarungen zur ISS

2.2.1. Auszug aus der Aufbauperiode der ISS bis heute

- 1998: Offizielles multilaterales Übereinkommen zwischen NASA, ESA, Russland (RKA), Kanada und Japan zur gemeinsamen ISS; ESA baut das COF (Abbildung 14); anstelle von Geldzahlungen unter den ISS Partnern gibt es 'in-kind' Beiträge ('bartering').
- 1998: Baubeginn der ISS durch Start des ersten Elements (russ. Zarja-Modul - früher FGB-Block genannt) mittels Proton-Rakete im Auftrag und auf Rechnung der Amerikaner (~ 190 Mio. \$)
- 2007: Beginn des Starts der europäischen Module (Abbildung 15) mit dem Knoten 2 (Harmony) durch das Space Shuttle Discovery und Andocken an die ISS; Struktur und Thermalsystem wurde von Thales Alenia (Italien) unter Vertrag der ESA gebaut. Das Modul verbindet später die Forschungsmodule Columbus und KIBO und bietet Docking Adapter für das Shuttle und das HTV.
- 2008: Start der europäischen COF (Abbildung 14) mit Space Shuttle Atlantis und Andocken an die ISS mit Hans Schlegel; Struktur und Thermalsystem wurde von Alenia (Italien) gebaut, Integration und Gesamtverantwortung lag bei EADS (Bremen).
- 2009: Auswahl von 6 neuen europäischen Astronauten für zukünftige Missionen: A. Gerst (D), S. Cristoforetti und L. Parmitano (I), C. Mogensen (Dänemark), T. Pesquet (F) und T. Peake (GB)
- 2011: Beendigung des ISS-Aufbaus und Beginn der vollen Nutzung durch 6 Astronauten; Beschluss im ESA-Rat zur Beteiligung am Betrieb der Raumstation bis mindestens 2020 mit einem Finanzrahmen von 4 Mrd. € (von 2000 bis 2020) als Obergrenze für den europäischen Anteil von 8,3 % (D-Anteil ~ 40 %)
- 2012: Ministerratskonferenz in Neapel: Frankreich, Italien und Spanien reduzieren erheblich ihren Beitrag zum Betrieb der ISS; Deutschland erhöht sein Engagement auf 51 % der genehmigten Mittel, Großbritannien steigt erstmals mit einem Beitrag von 20 Mio. € ein; Beschluss einer Beteiligung am amerikanischen Crew-Raumschiff 'Multi-Purpose Crew Vehicle' MPCV (Abbildung 12) mit einem europäischen Servicemodul ESM ('Barter-Element') für den ersten unbemannten Flug im cis-lunaren Raum in 2017 als Kompensation für die ISS Betriebskosten von 2017 bis 2020.

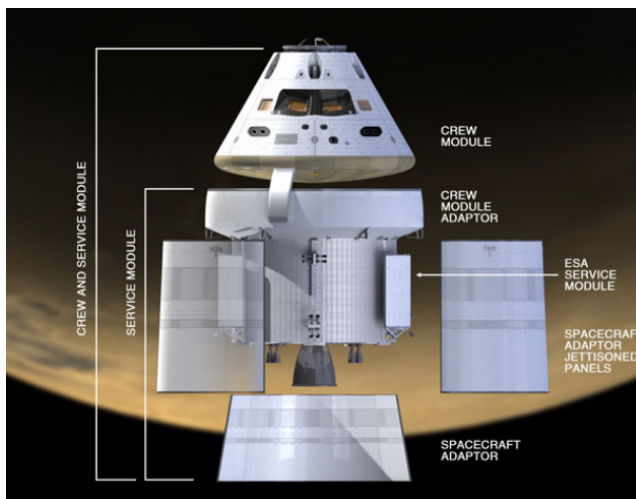


Abbildung 12: MPCV Modulübersicht [NASA]

- Jan. 2014 USA/NASA kündigen den Willen zur Verlängerung des ISS-Betriebs bis mindestens 2024 an
- Mai 2014 Russland (V. Putin) kündigt Ausstieg aus dem ISS Programm 2020 an. NASA bleibt weiter auf Kurs mit dem Ziel, die ISS bis mindestens 2028 zu nutzen.
- Dez. 2014 Ministerratskonferenz in Luxemburg: Neben den Programmen der Erdbeobachtung und Telekommunikation, muss eine Entscheidung über die Entwicklung der Ariane (5ME / 6) sowie die ISS Betriebskosten bis 2020 getroffen werden.
Innerhalb der ESA trägt Deutschland knapp 42 Prozent des ISS-Betriebsprogramms und 52 Prozent des ESA-Wissenschaftsprogramms ELIPS [28, 50].Übersicht¹:

ISS Gesamtkosten	ca. 100 Mrd. € (bis 2014, gemischte ökon. Bedingungen)
ESA-Anteil Gesamtkosten	ca. 10,6 Mrd. €
D-Anteil Gesamtkosten	ca. 4,4 Mrd. €

ESA-Entwicklungskosten 3,9 Mrd.€ (Gesamt 1998 bis 2008) inklusive Barterelemente und Nutzlasten (ATV-1 und Columbus)

D-Anteil Entwicklung 41% ca. 1,5 Mrd. €

ESA-Betriebskosten 4,36 Mrd. € (Gesamt 2001 bis 2020, inklusive Barterelemente und Nutzlasten (ATV-2 bis5, MPCV-ESM, Racks, ACLS)

Aktueller jährl. Betriebsbeitrag ca. 300 Mio. € („Flatrate“ bis einschließlich 2021)

D-Anteil Betriebskosten ca. 1,88 Mrd. € (Gesamt)

D-Anteil ca. 42% ca. 130 Mio. €

ESA- ELIPS 1-4 Kernforschungsprogramm 2002 bis 2016

ca. 840 Mio.€ (inkl. Bau der Nutzlasthardware)

D-Anteil ELIPS 1-4 ca. 338 Mio. € (von 37% auf 51% in 2012 angestiegen)

¹ Die Kostenzahlen basieren auf Angaben der ESA (PB-HME) und des DLR Raumfahrtmanagements im Juli 2014. Die Zahlen sind als Angabe der realistischen Größenordnungen zu verstehen.

2.2.2. ISS Konfiguration und Verpflichtungen der Partner zur Nutzung der ISS

Die aktuelle bemannte Raumfahrt ist maßgeblich geprägt durch die Internationale Raumstation ISS, ein Kooperationsprojekt von 5 Raumfahrtagenturen und 14 Regierungen (ESA: 10)² basierend auf dem International Space Station Intergovernmental Agreement (IGA) vom 29. Januar 1998 – einer mehr als vierjährigen Verhandlungsarbeit. Abbildung 13 zeigt den aktuellen Stand der ISS Struktur. Die Versorgungsvehikel sind hier nicht dargestellt, da sich Typ und die Andockpositionen abwechseln.

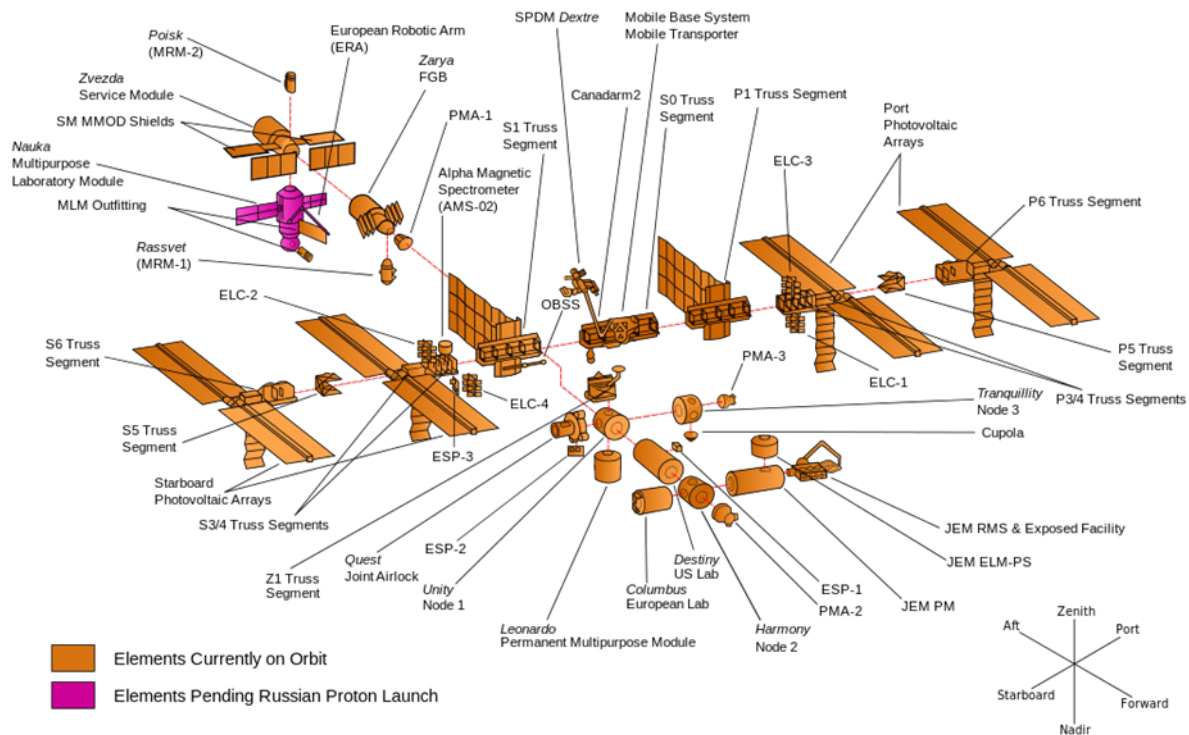


Abbildung 13: Internationale Raumstation ISS (Stand Mai 2011)

Alle fünf Partner tragen jeweils die Verantwortung für die Elemente und Personen, welche sie beistellen. Zu den europäischen Groß-Lieferungen gehören: das Columbus Forschungslabor, fünf Versorgungsvehikel ATV (Abbildung 15), der robotische Arm ERA, das Datenmanagementsystem DMS-R, der Knoten 2 „Harmony“ und 3 „Tranquility“ sowie das 360°Fenster Cupola (gebaut in Italien im Auftrag von ESA). Zusätzlich betreibt Europa noch 2 Kontrollzentren (für ATV und Columbus) und unterstützt u.a. die Laboranlagen und Experimente durch die neun sogenannten Nutzerunterstützungszentren USOCs. Ursprünglich waren 6-7 ATV Flüge vorgesehen, um den europäischen Anteil an den Betriebskosten abzudecken.

Darüber hinaus liefert Italien über ein bilaterales Abkommen mit USA 3 Logistik-Module ('Multi-Purpose-Logistics-Module' MPLM) für den Shuttle-Nachschub-Transport. Eines der Module, Leonardo, wurde für einen Langzeitaufenthalt modifiziert und ist nun Teil der ISS Struktur.

² 10 europäische Agenturen/Regierungen haben sich IGA verpflichtet - unabh. von ihrer finanziellen Beteiligung. Insgesamt 15 europäische Agenturen/Regierungen nutzen die ISS über ESA als ISS-Partner

Der russische Teil mit mehreren eigenen Druckmodulen, Wissenschafts-Laboratorien, diversen Außenstationen, separater Energieversorgung und Lebenserhaltung sowie Experimentiermöglichkeit bildet einen Infrastrukturbeitrag von fast der Hälfte der ISS. Russland hat das vollständige Nutzungsrecht für seine Elemente. Der westliche ISS Teil unter der Leitung der NASA besteht aus drei Forschungsmodulen, drei Knoten für verschiedene Funktionen wie Schlafplätze, Energieverteilung, Thermalkontrolle sowie diversen externen Plattformen für Lager und wissenschaftliche Experimente an den Modulen bzw. der Truss Struktur. Europa und Japan haben jeweils Anspruch auf etwa die Hälfte der Nutzungskapazitäten in ihren eigenen Elementen (westlicher Teil). Ihr Beitrag zu den Betriebskosten von jeweils etwa 8-10 % wird im Wesentlichen durch Versorgungsflüge mit dem ATV (ca. alle 18 Monate) bzw. dem japanischen Pendant HTV geleistet. Dabei dockt das ATV an das Swesda Modul des russischen Teils an. Sein Design erlaubt für den Nachschub nur das Docken an den russischen Kopplungsstutzen, der für den Durchstieg im Vergleich zum amerikanischen einen deutlich kleineren Querschnitt hat (Kapitel 3.1.2). Dies bedeutet beim Nachschub gewisse Einschränkungen.

Der fünfte ISS Partner Kanada steuert ein großes automatischen Greifarmsystem *Canadarm* und *DEXTRE* bei, das sog. 'Mobile Servicing System' MSS, ein Manipulator-System, das sich entlang der zentralen Gitterstruktur bewegen kann (Entwicklungskosten ca. 1 Mrd. \$). Der Anteil Kanadas an den Unterhaltskosten der ISS beträgt 1,5 %.

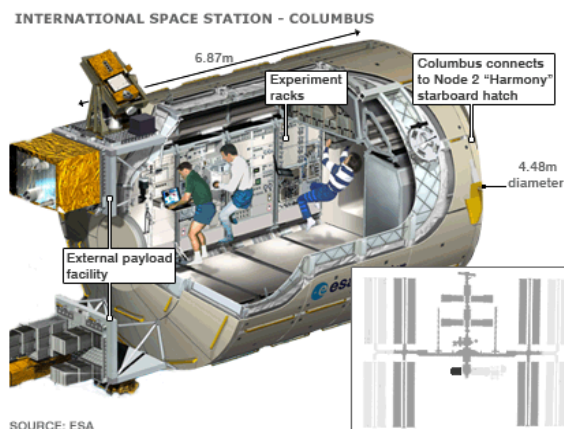


Abbildung 14: Columbus-Modul, Columbus Orbital Facility COF

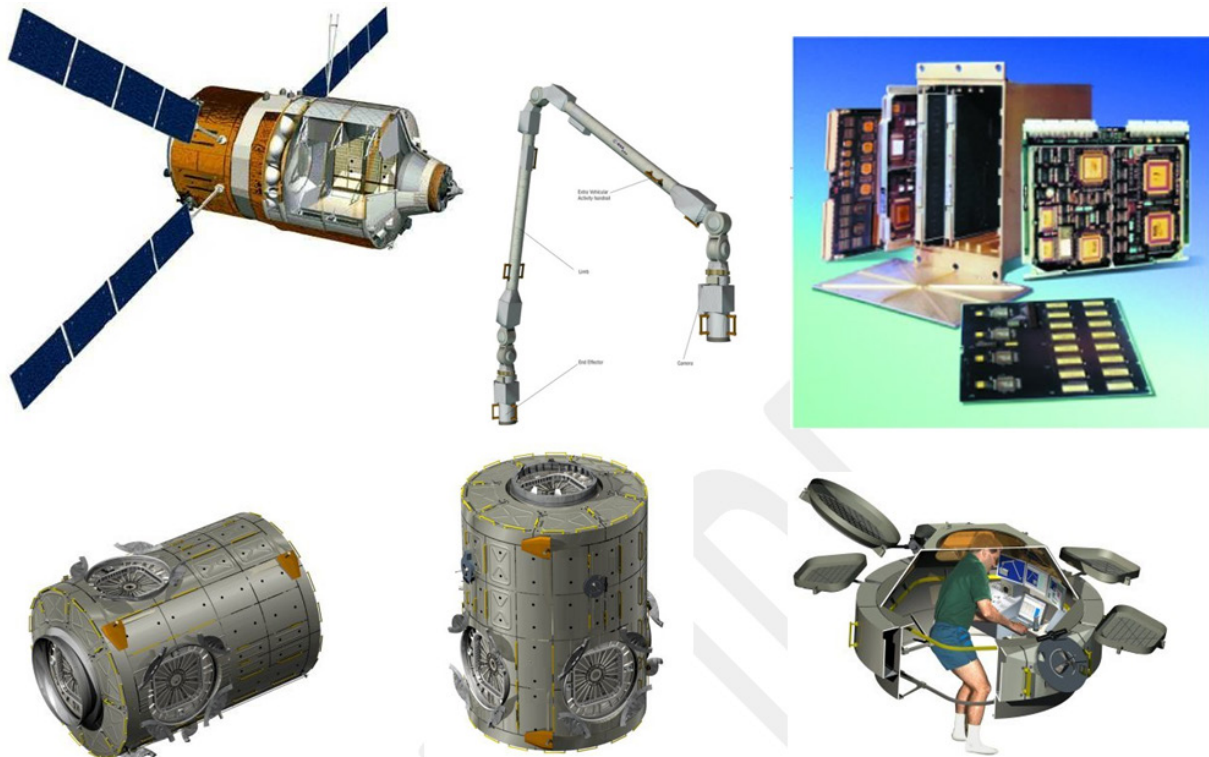


Abbildung 15: europäische ISS-Elemente im Rahmen des 'Bartering-Agreements': ATV, ERA, Data Management System, Knoten 2 und 3 'Harmony' und 'Tranquility', Cupola

2.3. Raumfahrtprogramme und Explorationsstrategien

Alle Raumstationspartner gaben Ihre Zusage, die ISS bis mindestens 2020 zu betreiben und zu forschen. NASA kündigte im Januar 2014 an, den Betrieb bis mindestens 2024 fortsetzen zu wollen. Ob ein Betrieb bis ca. 2028, ein Termin den NASA öfters erwähnt [25], technisch, politisch und finanziell von allen Partnern ermöglicht werden kann, bleibt abzuwarten. Der Zeitrahmen dieser Studie bezieht sich daher mit dem heutigen Wissensstand auf plus 15 bis 30 Jahre vom Zeitpunkt des Studienabschlusses.

Für zukünftige LEO- und Explorationsaktivitäten wird internationale Koordination und Kooperation unabdingbar sein. Das liegt an der Größe des finanziellen, technischen und logistischen Aufwands. Dabei werden auch Chancen für die Fähigkeiten neuer Raumfahrtakteure eröffnet. Zum Beispiel hat China in den letzten Jahrzehnten ein bemanntes Raumfahrtprogramm aufgebaut und plant eine chinesische Raumstation bis 2020. Zusätzlich wird eine Vielzahl von unbemannten Erkundungsmissionen zu Mond, Mars und erdnahen Asteroiden von den Raumfahrtagenturen vorbereitet. Wissenschaftliche Aktivitäten mit bemannten Plattformen insbesondere im erdnahen Orbit erscheinen unabdingbar für größere Explorationsvorhaben, sind derzeit jedoch noch nicht hinreichend definiert. Es gibt hierzu verschiedene Ansätze der bisherigen ISS Partner, die im Folgenden kurz erläutert werden. Welche Plattform auf welchen Nutzer des Weltraums und seine Bedingungen am ehesten zugeschnitten ist, steht im Fokus der Nutzungsanalyse dieser Studie. Die bisherige Nutzung des Weltraums ist im Vergleich zur

terrestrischen Forschungslandschaft erst in den Anfängen, zumal es aufgrund der Komplexitäten erfahrungsgemäß Jahrzehnte bis zur endgültigen betriebsfertigen Plattform braucht.

Das sogenannte International Space Exploration Forum (ISEF) ist die Fortsetzung eines politischen Dialogs über Exploration, der im Rahmen der Konferenzen in Prag, Brüssel und Lucca (2011) angestoßen wurde. Es nehmen politische Vertreter aus etwa 40 Ländern teil, um sich zur Zukunft der bemannten und unbemannten Raumfahrt auszutauschen. Der ISEF-Dialog kann Impulse für die weitere Zusammenarbeit in der Weltraumexploration zwischen den Raumfahrtationen in bilateralen oder multilateralen Vorhaben setzen. ISEF ergänzt dadurch die technische und programmatische Diskussion auf Ebene der Raumfahrtagenturen, z.B. in Foren wie der International Space Exploration Coordination Group (ISECG).

Die ISECG ist ein Forum von 14 Raumfahrtagenturen für die technisch-programmatische Diskussion zur Exploration. Im offenen und unverbindlichen Austausch werden hier Informationen und Planungen geteilt, um gemeinsame Ziele und Umsetzungsoptionen zu erarbeiten. Zuletzt hat ISECG im letzten Jahr die zweite Version der „Global Exploration Roadmap“ (GER) herausgebracht (Abbildung 16).

Die GER ist ein Fahrplan für die synergetisch bemannte und robotische Erkundung des Weltraums bis ca. 2035. Nach der ersten Veröffentlichung 2011 stellt die neue Version zum ersten Mal ein international koordiniertes Szenario dar. Zwölf Raumfahrtagenturen, darunter das DLR, die europäische Weltraumorganisation ESA, die US-Raumfahrtbehörde NASA, die russische Raumfahrtagentur Roskosmos und die japanische JAXA, haben sich auf gemeinsame wissenschaftliche Ziele zur weiteren Nutzung des LEO, zur Erkundung von Mond, Mars und Asteroiden verständigt und Konzepte für notwendigen Fahrzeuge, Wohnmodule und weitere Infrastrukturen sowie konkrete Vorbereitungen im All und auf der Erde diskutiert. Die Roadmap ist damit eine wesentliche Grundlage für Partnerschaften bei der Vorbereitung und Umsetzung der Missionen. [DLR-RFM]

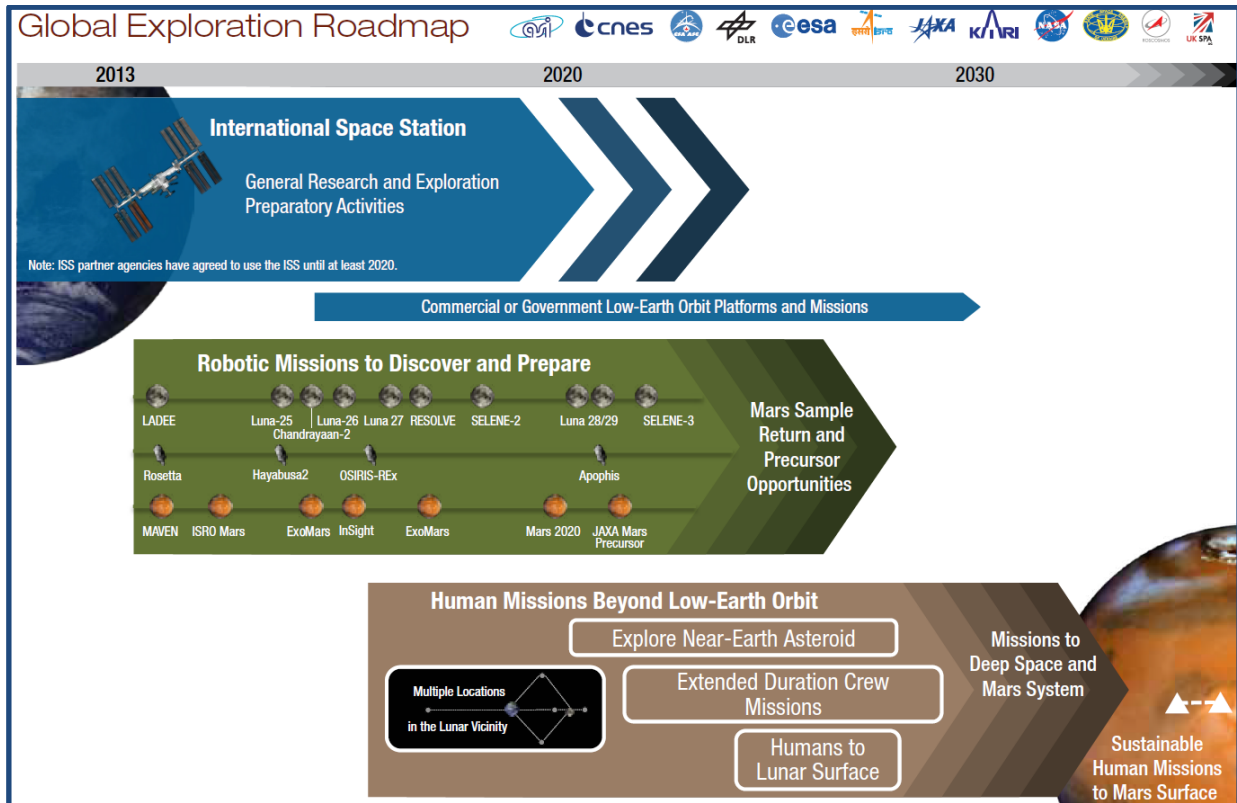


Abbildung 16: The Global Exploration Roadmap (GER) of the ISECG, Stand: August 2013

Langfristiges Ziel der ISECG-Planung ist eine bemannte Marsmission, deren Umsetzung jedoch noch außerhalb der aktuellen Roadmap liegt. Andere Organisationen, wie z.B. die UN, unterstützen die globale Kooperation, fordern aber auch anwendungsorientierte und mit der Politik abgestimmte Raumfahrtaktivitäten, zum Beispiel dedizierte Satelliten für den Katastrophenschutz. Auf nationaler Ebene obliegt es den Staaten über die Umsetzung der Empfehlungen aus den beratenden Gruppen und Agenturen zu befinden und diese auch in nationale Raumfahrtstrategien und Projekte umzusetzen sowie ihre Raumfahrtwissenschaften und Industrien auszurichten. Die Tabelle 2 gibt eine Übersicht zu den Strategien und Budgets der größten Player in der astronautischen Raumfahrt. Zum Beispiel das Apollo Programm kostete ca. 165 Mrd€ über 14 Jahren, das Shuttle ca. 185 Mrd€ über 40 Jahren, die ISS bisher über 100 Mrd€ bis 2014, wobei Europa ca. 11 Mrd€ für die ISS ausgibt.

Tabelle 2: Übersicht³ der Raumfahrtstrategien und gerundeter Budgets astronautischer Aktivitäten (soweit veröffentlicht), Stand Januar 2014 [88, 28, 50]

	Space Budget [pro Jahr]	Strategie /Plan	Veröffentlicht	Umsetzung
Europa [28,50]	EU: Zivil 1,57MrdUS\$ ⁴ ESA: 4,1Mrd€ (2014) Bem. 370M€ (2014) ELIPS4: ~80M€ (2013)	Europe 2020 EU: FP7 (Raumfahrt) Horizon 2020 Work Programme 2014-2015* ² Space Exploration and Innovation PB-HME/EUB => ESA RAT Beschluss	17.06.2010 Dez. 2013	EC Europäische Kommission ESA
Deutschland	Gesamt 2,1Mrd US\$ Zivil 1,9Mrd US\$ DLR nat.Prog.: ~272M€ DLR bem. RF: 2M€ D-ESA bem. RF: 158M€	Raumfahrtstrategie der Bundesregierung, Hightech-Strategie 2020 Deutsche Raumfahrtplanung (DLR Raumfahrtmanagement)	November 2010 August 2012 2010 14.12.2011	DLR
Frankreich	Gesamt 2,9Mrd US\$ Zivil 2,4Mrd US\$ F-ESA bem.RF: 102M€	Französische Raumfahrtstrategie Raumfahrt Budget Frankreich [53]	Mrz 2012	CNES
Italien	Gesamt 1,1Mrd US\$ Zivil 0,9Mrd US\$ I-ESA bem.RF: 72M€	Italienische Raumfahrtstrategie Strategic Vision 2010-2020 Technologies for Human Space Exploration: ASI PROGRAMS	2011	ASI
USA	Gesamt 38,7Mrd US\$ ⁵ Zivil 19,77Mrd US\$ Bem.RF: 7,8Mrd US\$ (ohne CCDev)	NASA Manifest, NASA strategic direction	April 2012 Nov. 2012	NASA
Russland	Gesamt 11Mrd US\$ Zivil 6,4MrdUS\$ Bem. RF: ca. 1,2MrdUS\$ (ohne Launcher)	Raumfahrtaktivitäten Russlands 2013 – 2020 Lunar cooperation with ESA Programme presentation	28.12.2012 2012 Jan 2010	ROSCOSMOS
Japan	Gesamt 3,27MrdUS\$ Zivil 1,96MrdUS\$ Bem.RF: 340MUS\$	Basic Plan on Space Policy JAXA Vision 2025 ⁶	2009, 25. Jan 2013 Mrz. 2005, Sept. 2011	JAXA
Kanada	Gesamt 630MUS\$ Zivil: 473 MUS\$ Bem.RF: 54MUS\$	Canadian Space Strategy	14.08.2012	CSA
China	Gesamt 4 MrdUS\$ Zivil 2,4MrdUS\$ Bem.RF: 0,9MUS\$ (ohne Launcher)	Strategie Roadmap	nicht veröffentlicht IAC 2013	
GLOBAL	ISECG: kein Budget	ISECG Road Map	2013	

³ Die Zahlen spiegeln Größenordnungen wider.

⁴ FP 7 bis 2013, Raumfahrtanteil; Horizon 2020 (2014-2020): 1,4Mrd€, derzeit 5-6Mio€ bem. RF-Anteil

⁵ NASAs jährliches Budget von 2012 bis 2017 liegt bei ca. 17,7MrdUS\$. Darunter fallen u.a. für den ISS Betrieb (Systembetrieb, Wissenschaft, Crew&Cargo) ca. 3,1Mrd.US\$, MPCV&SLS sowie kommerzielle Orbitalstrukturen Entwicklungen ca. 3MrdUS\$ an.[71]

⁶ Widersprüchliche Angaben, [1] „Basic Plan on SpacePolicy“ Januar 2013 nennt 300Mrd¥ pro Jahr (2,1Mrd€) und [72] JAXA FY2013 nennt ca. 181,5Mrd¥ (1,3Mrd€). 24% sind für das ISS-Programm allokiert.

Die internationalen Raumfahrtstrategien stimmen in vielen Punkten hinsichtlich Zukunftsideen zu astronautischer Nutzung des Weltraums überein:

- Missionsdurchführung in internationaler Kooperation
- Erweiterung und Entwicklung der Fähigkeiten und Infrastrukturen für Wohn- und Forschungsplattformen im niedrigen Erdorbit und darüber hinaus
- Voranbringen von neuen Technologien, zuverlässigen Systemen und effizienten Betriebskonzepten
- Verbessern der Technologien zum Schutz der Erde (speziell: Weltraumschrott, Asteroiden)
- Forschung, um Exploration erst zu ermöglichen – Reduktion der Risiken, Steigerung der Produktivität
- Wissenschaftliche Erforschung des gesamten Sonnensystems
- Suche nach weiterem Leben bzw. lebensfähigen Umgebungen im Universum
- Maßnahmen hinsichtlich Förderung von Technologien, Systemen, Hardware und Servicebereichen von privaten Anbietern zur Entwicklung neuer Märkte angelehnt an zukünftigen Raumfahrtaktivitäten und mit dem Ziel eines ökonomischen und technologischen Gewinns sowie der Verbesserung der Lebensqualität

Gemeinsame Ziele der Exploration sind in der ISECG formuliert worden (Tabelle 3) und stimmen teilweise mit den Zielen der Nutzung des niedrigen Erdorbits überein:

Tabelle 3: Auszug der Einzelziele für Nutzung des LEO nach ISS [Basis ISECG]

Zielrichtung	Ziele
Technologie & Fähigkeiten	(Weiter-) Entwicklung und Test von: Wohn- und Arbeitsmodule, Energieversorgung- und speicherung, Lebenserhalt/Recycling, Antriebe, Start-/Rückkehr-/Landesysteme, Docking/Zusammenbau Betrieboptimierung (Arbeitsprotokolle) Kommunikationskapazitäten ausbauen
	Wartung/Reparatur/Wiederverwendung/Betankung
	Robotische Fähigkeiten ausbauen zur Unterstützung der Astronauten
	Missionsunterstützende Arbeitsmittel/Technologien
Sicherheit	Technologie(weiter-)entwicklung zur Erkennung und Vorhersage von Weltraumschrott/ Weltraumobjekten (Asteroiden) Debrisüberwachung und -reduktion
Präsenz	Langzeiteffekte der WR-Umgebung auf Menschen und Material und daraus resultierende Infrastrukturoptimierung
	Prestige
Forschung	Abdeckung sinnvoller Forschungsbereiche durch modulare Infrastrukturen unterstützt durch den Menschen und Robotik: Tabelle 1 und Tabelle 15.

Erweiterung ökonomischer Bereiche	Marktschaffung für selbstregulierende, autarke LEO Nutzung: u.a. mit kommerziellen Dienstleistungen (Start, Versorgung und Betrieb) und Ausweitung der industriegetriebenen Nutzung. Modernisierung der Stationsnutzung, um Wirtschaftlichkeit näher zu kommen (z.B. Werbung, Tourismus, auch nicht Grundlagenforschungsgetriebene Projekte zulassen)
Einbindung der Öffentlichkeit	Bildung/Technikbegeisterung durch virtuelle und reale Daten sowie Einbindung in aktuelle Geschehen Unterhaltung

2.3.1. Europa- ESA und EU

Europas astronautische Raumfahrtaktivitäten sind koordiniert durch Programme der Europäischen Raumfahrtorganisation ESA als die ausführende Agentur, und seit neuestem verstärkt sich die Einbindung der Europäischen Union (EU). Von jährlich ca. 4,1 Milliarden Euro des Gesamthauhalts (ca. 200 Mio€ weniger als 2013) der ESA sind ca. 370 Millionen Euro für die europäische bemannte Raumfahrt „Human Spaceflight“ bei der ESA als Exekutive allokiert (ca. 30 Mio€ weniger als 2013). Darunter fallen folgende Programmelemente: Columbus Betrieb und Nutzung, Nutzerunterstützungszentren, ATV Produktion, Starts und Betrieb, MPCV-ESM, EAC und das Programm-Management.

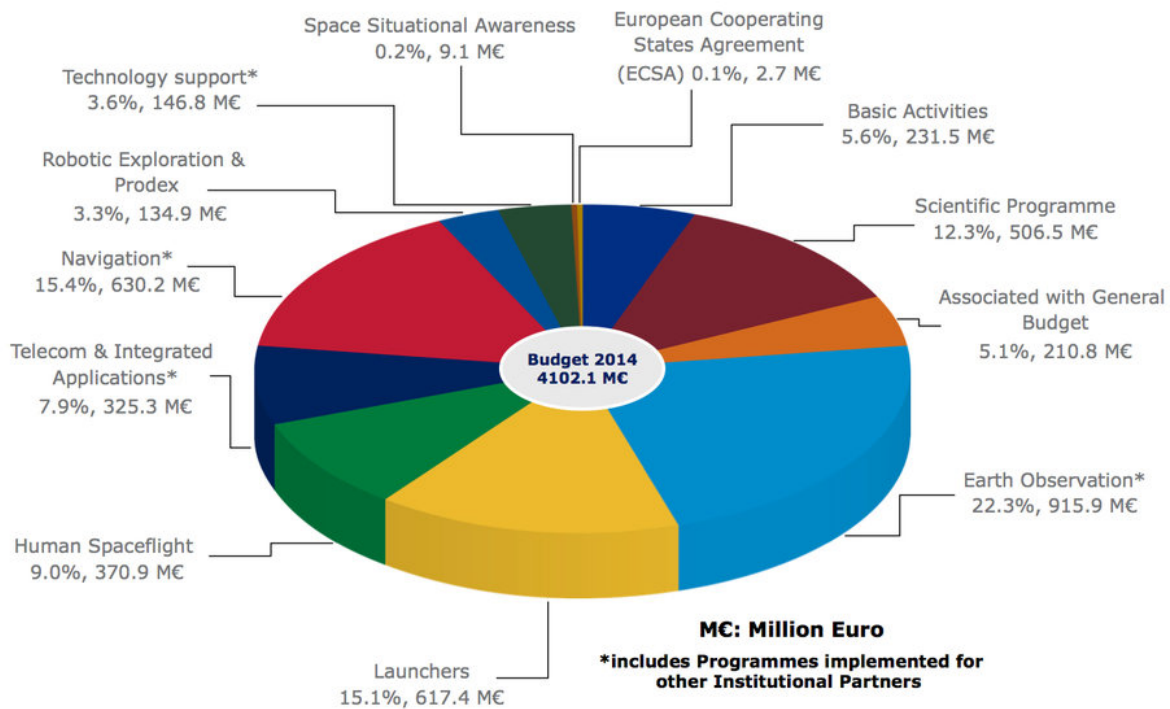


Abbildung 17: ESA Raumfahrt- und Technologieprogramme und ihre Budgets [Quelle: ESA, Stand 2014]

[3] Die EU visiert an, Raumfahrtinfrastrukturen und Anwendungen weiterzuentwickeln. Die EU möchte über die nächsten Jahre in Zusammenarbeit mit der ESA und ihren Mitgliedsstaaten eine Raumfahrtstrategie entwickeln, um sowohl den europäischen Arbeitsmarkt zu verbessern als auch die Forschungsexzellenz und den Forschungsumfang auszuweiten und zu fördern. Dazu fordern sie die einzelnen Staaten und die ESA auf, ihre Wissenschaft und Industrie anzukurbeln, um die

kritischen Raumfahrttechnologien bereitzustellen und um dann allgemein das Know-how für den globalen Wettbewerb generieren zu können. Fokus liegt hier auf Raketen, Satellitensystemen und entsprechenden Technologien. Der ‚kommerzielle‘ Markt soll durch EU Hilfe in Europa gefördert werden, um eine nachhaltige europäische Raumfahrtindustrie und Forschung zu gewährleisten. Die EU bestärkt in ihrem Ratspapier (2010) und Workshops zur astronautischen Exploration seit 2009, die Raumstation ebenfalls bis zum endgültigen Betriebsende weiter so effektiv wie möglich zu nutzen und weist darauf hin, dass es die einzige Plattform von dieser Komplexität für die Vorbereitung bemannter Missionen über den Erdorbit hinaus ist. Der Rat fordert daher alle Mitgliedsstaaten auf, die Finanzen zu sichern, um diese Nutzung zu ermöglichen. Im übrigen forciert die EU eine Bottom-up Forschungspolitik, um von der Raumfahrt zu profitieren. Jedoch gehört die bemannte Raumfahrt derzeit nicht zu den Leuchttürmen der EU-Politik. Man ist sich ausschließlich einig darüber, die Raumstation – so lange sie vorhanden ist – zu nutzen und die Nutzergemeinschaft möglichst auf alle EU Mitgliedstaaten auszuweiten. Notwendige und Mindest-Budgets und Beitragschlüsselmethoden sind noch ein wesentlicher offener Punkt. Ebenso zeigen die jüngsten Vorbereitungen zur Ministerratskonferenz Interessenskonflikte zwischen ESA und EU sowie die noch notwendige und abschließende Klärung der Übernahme der verschiedenen Raumfahrt-Kompetenzbereiche.

Konkrete Neuentwicklungen hinsichtlich Logistikvehikel, Forschungsplattformen für den LEO und Nutzungspläne, die bemannte Raumfahrt erfordern, lassen auf sich in Europa warten. ESA und EU bereiten sich auf die nächste Generation der bemannten Nutzung des Weltraums vor. Erste umfangreiche WS der EU [4] identifizieren folgende potenzielle Forschungsbereiche der Zukunft: *Strahlenschutz gegen hochenergetische Teilchen; Effekte von Licht/Temperatur/Druck/Gaskonzentration auf die Pflanzenphysiologie; Mikroorganismen; Insekten; Systeme für Extraktion/Prozessierung und Lagerung von Sauerstoff sowie für Nahrungsmittel/Nährstoffe einschließlich Management und Stabilisierung der Ökosysteme im All; nachhaltige Technologien; Prävention und Gegenmaßnahmen zur Verunreinigung und Infektion; kostengünstige Pflanzenwachstumstechnologien (Erde/Wasser); Entwicklung von Gewächshäusern und entsprechende Einrichtungen für geschlossene Anbausysteme; in-situ Nutzung von Ressourcen bei nicht-geschlossenen Kreisläufen (z.B. bzgl. O₂, H₂O, CO₂, NO, Mineralien).* Zusätzlich möchte die EU folgende Fähigkeiten verbessern (Auszug):

- Energetisch-effizientere und finanziell tragbare Startplattformen für Kleinsatelliten (< 200kg)
- Probenrückführung aus dem niedrigen Erdorbit
- Infrastrukturen zur Energiegewinnung, in-situ Ressourcennutzung und Nahrungsmittelproduktion sowie Lagerung für z.B. Treibstoffe
- Habitate im LEO, in Lagrangepunkten, auf dem Mond und Mars mit z.B. aufblasbaren Systemen oder in situ Entwicklungen
- Umweltschutz, speziell Strahlungsschutz
- Bessere Nutzung der Crewzeit und Fertigkeiten durch Erweiterung des robotischen Aufgabenradius

Es gibt sowohl bei ESA als auch in einigen nationalen Agenturen viele Studien zur Fortführung einiger Forschungsthemen im niedrigen Erdorbit (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Übersicht zu einigen europäischen Studien/Entwicklungen zur Zukunft der astronautischen Raumfahrt im LEO; aktuelle Entwicklungen zu Forschungsplattformen (soweit bekannt)

Agentur	(einige) Studien / relevante Entwicklungen (Forschungsplattformen)
EU	Mehrere Klein-Projekte (à ca. 2Mio€)
ESA	LEO 2020 Workshop - Nutzer-Anforderungen (HSO, Hauptauftragnehmer extern) Scenario Studies / Post-ISS Infrastrukturen (HSO, Hauptauftragnehmer Astrium, TAS-I) mit Kerntechnologie-Fokus: ECLSS, RFC, IBDM, Radiation Shielding) Man-tended Free-Flyer MTF (Hermes, 80er Jahre)
CNES	VAC (Versatile Autonomous Concept, ESA/CNES, Industrie: AST (SAS/GmbH) /TAS- /Aviospace (I) /JOP (D) /NEPTEC (CA)/ SODERN (F))
DLR	Post-ISS Free-Flyer (zweiteilige Studie des RFM: 1. LEO Nutzung – 2011, 2. Exploration EML2 - 2014, Hauptauftragnehmer AST Bremen), Post-ISS AG (Studie des DLR Köln), (tbd) Post-ISS Workshop (Studie des RFM) EuCrops (Nutzlast: Biologische Experimente, Gravitationsforschung) PRIDE (ESA-DLR-Sierra Nevada (Dream Chaser); Program for Reusable In-orbit Demonstrator in Europe) ESM (European Service Module for MPCV, ESA, Airbus (ehem. Astrium))
Uni Stuttgart	SSDW 2005: GEO servicing station

Im Fokus der vorliegenden Studie stehen zwei Bereiche: a) die Orbitalplattformen und b) die Anforderungen der Mikrogravitationsnutzergemeinschaft. So untersuchte auch eine ESA Studie aus 2013, LEO 2020, u.a. die Nutzeranforderungen und mögliche multi-nutzbare Orbitalplattformen. Neben einer ausführlichen Technologierecherche konzentrierte sich die Studie auf die Befragung der derzeitigen Wissenschafts-/Nutzergemeinschaft, um deren Anforderungen für zukünftige Forschung im Weltall herausfiltern zu können bevor mit dem Design einer neuen Plattform begonnen bzw. mit der europäischen Explorationsplanung fortgefahren wird. Randbedingungen wie politische und finanzielle Aspekte fließen in die Schlussfolgerung durch die Workshop-Splintermeetings mit ein. Kernbotschaften waren:

- Wissenschaftler fordern die Fortsetzung der Forschung in Mikrogravitation
- Wissenschaftler fordern die Lockerung von aus Sicherheitsgründen verursachten Einschränkungen, die viele Experimente jahrelang verzögern und die Kosten treiben

Speziell für acht verschiedene Szenarien wurden folgende Argumente vorgebracht:

- Free-Flyer:

- Hohe Güte der Mikrogravitation / Verringerung der Störungen für einige Forschungsbereiche
- Lockerung der Sicherheitsanforderungen
- Größere Entfernungen von der Erde möglich – je nach Missionsanforderung
- Ständig bemannte Station:
 - Als Goldrandlösung angesehen, nicht zwingend erforderlich für Missionen über den Erdborbit hinaus
 - Astronauten führen selbst Wissenschaft durch
 - Astronauten können justieren oder Aufbau ändern
 - Einzig nützliche Möglichkeit für humanphysiologische Untersuchungen
- Teils bemannte Station:
 - Keiner der Nutzer hatte Interesse an dieser Infrastruktur und ihren Möglichkeiten. Es erschien, dass alle negativen Aspekte einer bemannten Station sich in diesem System vereinen
 - Kosten sind nicht geringer, da Kosten für Bemannung auch weiterhin anfallen und die Neuentwicklung der zusätzlich benötigten automatisierten Systeme und deren Wartung bisher nicht existieren. Zusätzlich steigt auch das Startgewicht durch robotische Systeme
 - Flexibilität durch die Crew eingeschränkt
 - Kurzzeitforschung im Bereich Physiologie ist fast ausgereizt und der Wunsch nach mehr astronautischen Langzeitmission wurde verstärkt

Allgemein tendiert die aktuelle Nutzergemeinschaft zu einer dauerhaft bewohnten kleinen Station, jedoch mit einem Free-Flyer als Forschungsoption für spezielle Forschungsaufgaben wie z.B. Materialforschung. Man ist sich einig, dass Kurzzeitflüge auch in Zukunft immer für Forschung, Exploration und Vorbereitung von Langzeitaktivitäten nützlich sind. Sie reichen jedoch nicht aus, um die Nutzeranforderungen zu erfüllen bzw. den Wissenschaftshypothesen Rechnung zu tragen. Astronautische Sub-orbitale Flüge/ Parabelflüge/ ‚Sounding Rockets‘ zum Beispiel sind eine gute Gelegenheit, um Forschung zu ergänzen und für Langzeitmöglichkeiten vorzubereiten. Sie sind attraktiv durch eine kurze Vorbereitungszeit und häufige Fluggelegenheiten. Einige Phänomene können durch die hohen Beschleunigungsphasen jedoch gestört werden. Größter Kritikpunkt der aktuellen Nutzergemeinschaft sind die formalen Prozesse, Kosten und komplexen Zugangsanforderungen der Agenturen.

2.3.2. USA - NASA

Die amerikanische Regierung hat sich - vertreten durch den NASA Administrator Charles Bolden und den White House Direktor für Wissenschafts- und Technologiepolitik Dr. John P. Holdren - am 8./9. Januar 2014 für eine Verlängerung des Betriebes der Internationalen Raumstation (ISS) bis mindestens 2024 ausgesprochen. Der Hauptteil des ebenfalls im Januar verabschiedeten Raumfahrtbudget für NASA umfasst Neuentwicklungen für die US amerikanische Schwerlastrakete SLS (‚Heavy-Lift Space Launch System‘) mit rund 1,6 Mrd US\$ sowie für die Rückkehrkapsel Orion – MPCV mit rund 1,2 Mrd US\$. Ein Betrieb der beiden Systeme wird ab 2017 erwartet. Das ISS

Programm und die Sicherstellung des Raumflugbetriebes werden nicht in Zahlen spezifiziert (laut Anfrage ca. 3,8MrdUS\$), jedoch wurde geschrieben: „Die ISS erhält weiterhin starke Unterstützung“. Das Budget kündigt auch 100MioUS\$ für das Satelliten Servicing Programm an.

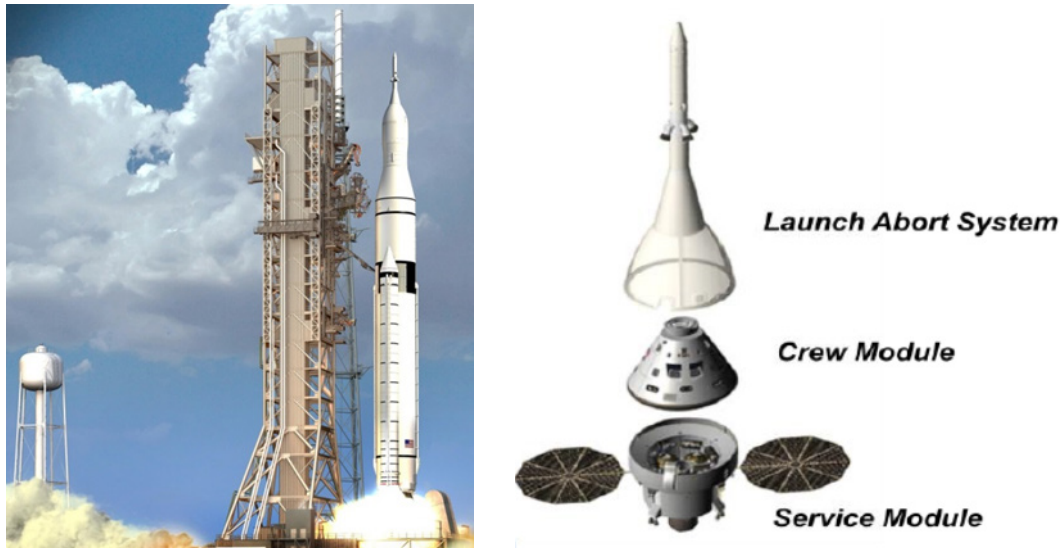


Abbildung 18: SLS und MPCV Modul [NASA]

NASA versucht mit seinem Aufbau-Programm COTS ('Commercial Orbital Transportation Services') für privatwirtschaftliche Unternehmen neue Wege zu beschreiten und den laufenden bzw. zukünftigen Transport zur ISS durch sogenannte Kommerzialisierung kostengünstiger zu machen. Sowohl unbemannter Nachschub durch 'SpaceX' (mit Rakete 'Falcon 9' + 'Dragon-Kapsel') und 'Orbital Sciences' (mit Rakete 'Antares' + 'Cygnus-Kapsel') wie bemannter Transport ab ca. 2017 (z.B. durch 'Boeing' mit 'CST-100' und 'Sierra Nevada' mit 'Dream Chaser') sind in Entwicklung oder bereits in Erprobung. Zum 'Commercial Crew Development Programm' CCDEV gehören auch geplante bemannte Systeme von 'SpaceX', 'Blue Origin' und 'Bigelow Aerospace' (letzterer mit seinen entfaltbaren Habitat-Modulen, Abbildung 19). Insgesamt sind diesem Programm rund 696MioUS\$ zugewiesen. 171MioUS\$ von diesem Budget werden allerdings von der Regierung zurückgehalten, bis NASA eine Kosten-Nutzen-Analyse zu den einzelnen Systemen im CCDEV Programm durchgeführt hat unter Berücksichtigung des nationalen Investments und der tatsächlichen Betriebslaufzeit der ISS. Durch ständige Ungewissheit der ISS Gesamtbetriebszeit kommt Kritik der kommerziellen Partner auf.

Zusätzlich zu den budgetären Bereitstellungen für die neuen Programme müssen Nachweise erbracht werden, ob ein Heavy-Lift Launcher auch für die Zeit nach der ISS gebraucht wird und wer diesen Markt generieren muss. Diese Diskussion ähnelt den Verhandlungen in Europa zum Thema Ariane5 ME und/oder 6.

Bis mind. 2024 soll die Raumstation voll genutzt und die neuen Logistikvehikel sollen vollständig in den regulären Betrieb integriert werden. Auch neue Module, wie das „aufblasbare“ Modul BEAM (Masse ca. 1,3t, LxØ 4m x 3m) von Bigelow [NASA, 51], sollen von 2015 bis 2017 an der ISS angedockt – wahrscheinlich am Knoten 3 – in den Nutzungsbetrieb der Raumstation

übergehen und für zukünftige astronautische Plattformen vorbereitend getestet werden. NASAs Auftrag von 17,8 MioUS\$ an Bigelow für BEAM vom 15. Januar 2013 beinhaltet auch die Einbindung anderer ‚kommerzieller‘ Firmen wie Sierrea Nevada (Berthing Mechanismus, [SpaceNews 12. Juni 2013]) und SpaceX. Der Start soll mit Falcon 9 als unbedruckte Nutzlast durchgeführt werden. Einmal angedockt werden Astronauten den Entfaltungsvorgang initiieren. Erst nach Abschluss der Sequenz und Validierung der Daten mit Blick auf Überlebensfähigkeit für Astronauten im Inneren des Moduls ist es möglich, das Modul zu betreten. Bigelow besitzt ein eigenes ‚Mission Control Center‘ in Las Vegas, welches derzeitige Module im Orbit betreibt⁷. Bigelow verfolgt hier ein kompaktes, effizientes zentralgesteuertes Betriebsmanagement im Vergleich zum dezentralen Konzept der ISS.

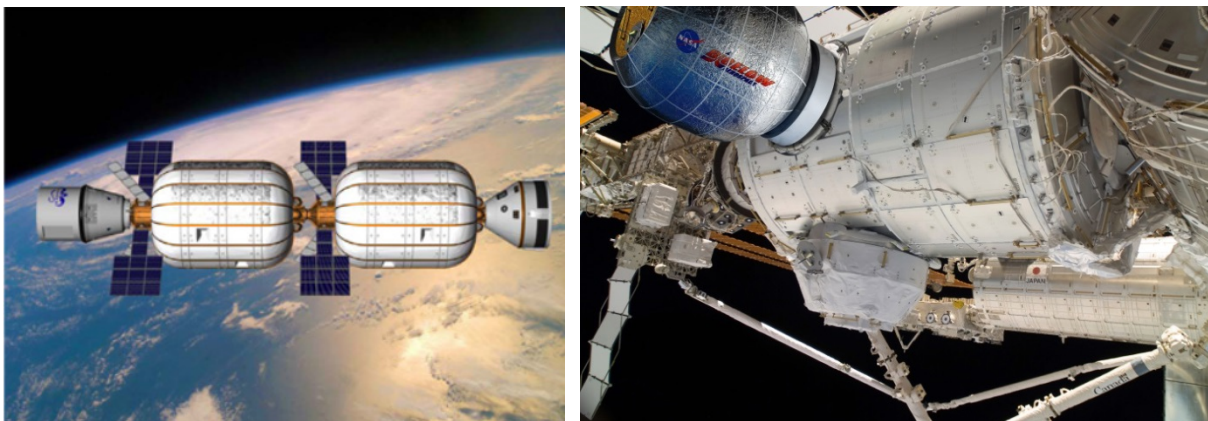


Abbildung 19: links: Bigelow's Alpha Station mit 2xBA330, Rechts: BEAM Modul an ISS [Quelle: NASA, Bigelow, 2014]

2.3.3. Russland - ROSCOSMOS

Beteiligt bei der Erstellung der russischen Raumfahrtstrategie sind das Verteidigungsministerium und andere Ministerien und Agenturen. Das zur Verfügung stehende Gesamtbudget für das russische Raumfahrtprogramm beträgt etwa 11 Milliarden US\$ [88]. Die Prioritäten dabei sind der garantierte Zugang zum Weltraum und volkswirtschaftliche Nutzen, die Wissenschaft und die bemannte Raumfahrt. Weltmarktanteile in Produktion von Raumfahrttechnik: derzeit 10,7%, für 2015 sind 14% geplant und 16% für 2020. Aufgaben zur Erfüllung der genannten Ziele:

1. Aufbau und Erhaltung der für die Erfüllung der Zielaufgaben erforderlichen Orbitalkonfiguration,
2. Modernisierung der Kosmodrome Plesezk und Baikonour, Aufbau des neuen Kosmodroms Wostotschnyj,
3. Neu- und Weiterentwicklung russischer Trägersysteme (z.B. Angara),
4. Schaffung eines wissenschaftlichen und technischen Vorlaufes für die Entwicklung neuer Raumfahrttechnik,

⁷ Derzeit werden Genesis I und II im niedrigen Erdorbit auf Machbarkeit getestet. Genesis I (NORAD ID: #29252) wurde mit Dpnr in Russland am 12. Juli 2006 gestartet. Genesis II (NORAD ID: #31789) wurde mit Dpnr in Russland am 28. Juni 2007 gestartet [51].

5. Sicherstellung der internationalen Zusammenarbeit zur Nutzung des Weltraums für friedliche Zwecke

Die Konkurrenzfähigkeit der russischen Raumfahrtindustrie soll gestärkt werden. Dazu gibt es einen Maßnahmenkatalog zu Entwicklung von Technologie, Infrastruktur, Personal und Investitionen. Explizit genannt sind ‚Public Private Partnership‘ PPP. Russland will besonders dort investieren, wo es bereits heute stark ist: Startdienstleistungen bemannt und unbemannt. Um sich dem globalen Wettbewerb zu stellen, sollen Unternehmen verschmolzen werden. Als Zulieferer soll es territoriale Cluster geben, die aus einem Netzwerk mittelständischer Unternehmen bestehen. Damit einher geht eine weitere Kommerzialisierung der Raumfahrtindustrie. Die PPP ist dafür ein Mittel. Der staatliche Anteil umfasst dabei hauptsächlich die Raumfahrtinfrastruktur (Raum- und Bodensegmente), die Sicherheit der Orbitalkonfigurationen, den juristischen Schutz und die entsprechenden Raumfahrtstandards. Der Privatsektor hingegen soll die dafür nötige operative Infrastruktur (genauer unbekannt) schaffen, und daraus Dienstleistungen für die Volkswirtschaft generieren.

Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Erdbeobachtung, der Navigation, aber auch im Bau und Betrieb von Kleinstsatelliten. Die juristische Grundlage dafür wird ein föderales Gesetz bilden. Dessen Bezeichnung ist: „Über das Einbringen von Änderungen in das föderale Gesetz der Russischen Föderation über die Raumfahrtaktivitäten“. Es schafft Rechtssicherheit für private Investitionen in den Raumfahrtsektor. Darüber hinaus wird das Gesetz eine Reihe wichtiger Fragen neu regulieren: Nutzung der Drop-Zonen, Versicherungen, Gestaltung der Grundlagen für Leistungsgarantien des Raumfahrtsektors. Die Prozesse von Entwicklung, Produktion und Nutzung von Raumfahrttechnik sollen weiter entwickelt und stärker standardisiert und qualitativ überwacht werden. Dazu wird ein branchenübergreifendes Qualitätssicherungssystem geschaffen. Russland hat bisher NASA nicht unterstützt, die ISS nach 2020 weiterzubetreiben. Man entwickelt hier eigene Konzepte.

Tabelle 5: Übersicht zu Russischen Studien/Entwicklungen zur Zukunft der astronautischen Plattformen im LEO (soweit bekannt)

Agentur/Firma	Studien / relevante Entwicklungen (Forschungsplattformen)
Excalibur-Almaz*	Space Station for Tourists (60ger Jahre, HW Teile wurden bereits gebaut, 1970 Projektstop, Kommerzialisierungsversuch 1990)
RKK	Klipper – wiedereintrittsfähiger Gleiter
Energija/ROSCOSMOS	OKA-T und seine Vorläufer-Designs AKA-T, MAKOS Inflatable Structures (Abbildung 20)

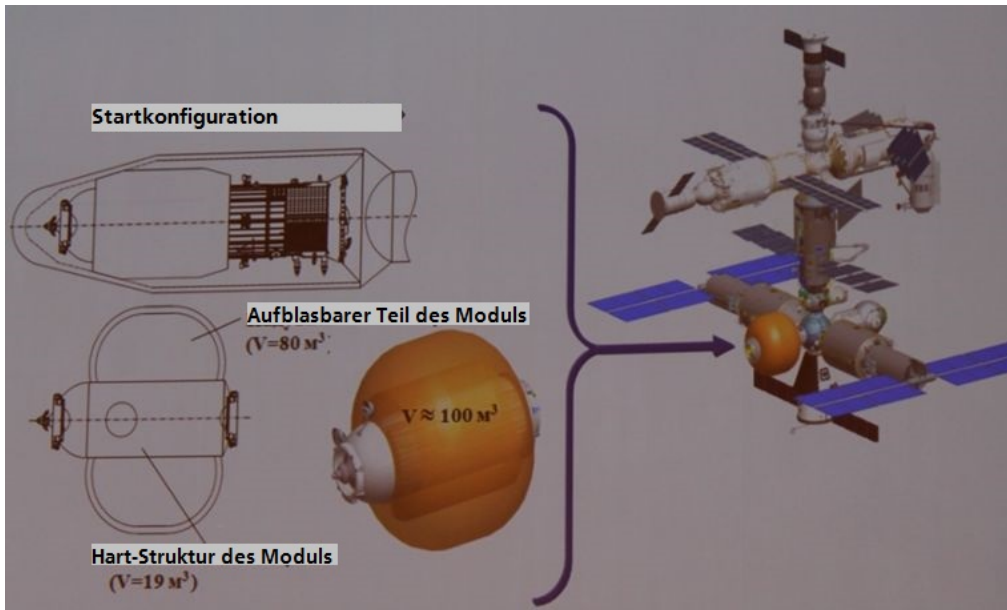


Abbildung 20: Russische „Aufblasbare“ Strukturen an der Bigelow-Station [Quelle: Nasaspaceflight.com]

Der eigenständige Zugang Russlands zum Weltraum soll über die Entwicklung des Kosmodroms Plesezk sowie die Entwicklung des Trägerraketenkomplexes Angara-A5 erfolgen (Präsidentenerlass vom 06.11.2007). Bis 2018 soll der Prototyp eines „Energetischen Orbit-Transportmoduls“ mit einem modernisierten Antriebssystem (möglicherweise nuklear-elektrisch) zur Flugerprobung fertig gestellt sein. In der Grundlagenforschung will Russland den Rückstand gegenüber den führenden Wissenschaftsnationen aufholen. Dazu werden drei Weltraumteleskope in verschiedenen Spektralbereichen gestartet (Spektrum UV, mm (Millimetern) und Gamma 400), die der astrophysikalischen Erforschung des Universums dienen werden.

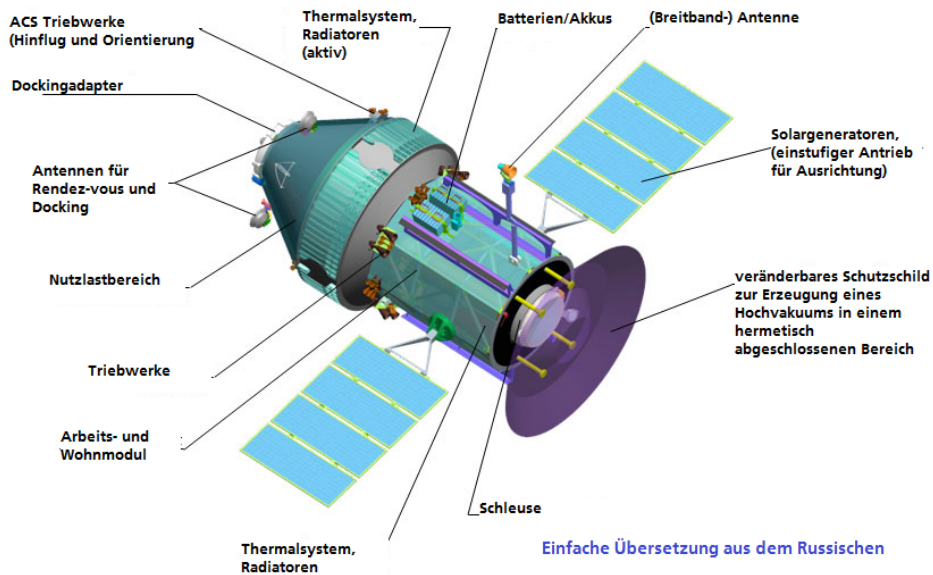


Abbildung 21: Russischer OKA-T Free Flyer Phase 1 [Quelle: RKK Energija]

In der bemannten Forschungsumgebung baut Russland derzeit den 7,8t autonomen OKA-T MKS Free Flyer, der 2017 zur ISS fliegen soll. Das Vehikel ist modular aufgebaut und enthält einen eigenständig rückführbaren Teil für Proben. Das Labor soll in seiner bisher auf 5 Jahre definierte Betriebszeit zwischen den Andockphasen an der Station bis zu 120 Tage frei fliegen können. Erste Veröffentlichungen eines Betriebsszenarios zeigen periodische Andockphase von u.a. fünf Tagen am Swesda-Modul. Die sogenannte Mini-Station soll laut Aussagen von RKK Energija kommerziell betrieben werden. Die zahlenden Kunden sollen zwischen drei bis sechs Monaten das Labor jeweils nutzen können.

Ziel des freifliegenden Labors ist z.B. der Test des Formationsfliegens und der Logistikanforderung für Forschung und Betrieb.

Das periodische Docking ermöglicht den Austausch von Experimentcontainern und die allgemeine Wartung durch Astronauten der ISS. Es sollen Nutzungsmöglichkeiten (Abbildung 22) für die Disziplinen wie z.B. Biologie, Nanotechnologie, Materialwissenschaften und Astronomie geschaffen werden. Der Vorteil eines solchen freifliegenden Labors liegt für Russland in der Verbesserung der Mikrogravitationsqualität durch geringere Vibrationen, der vereinfachten Handhabung im Vergleich zur multi-modularen Raumstation wie die ISS.

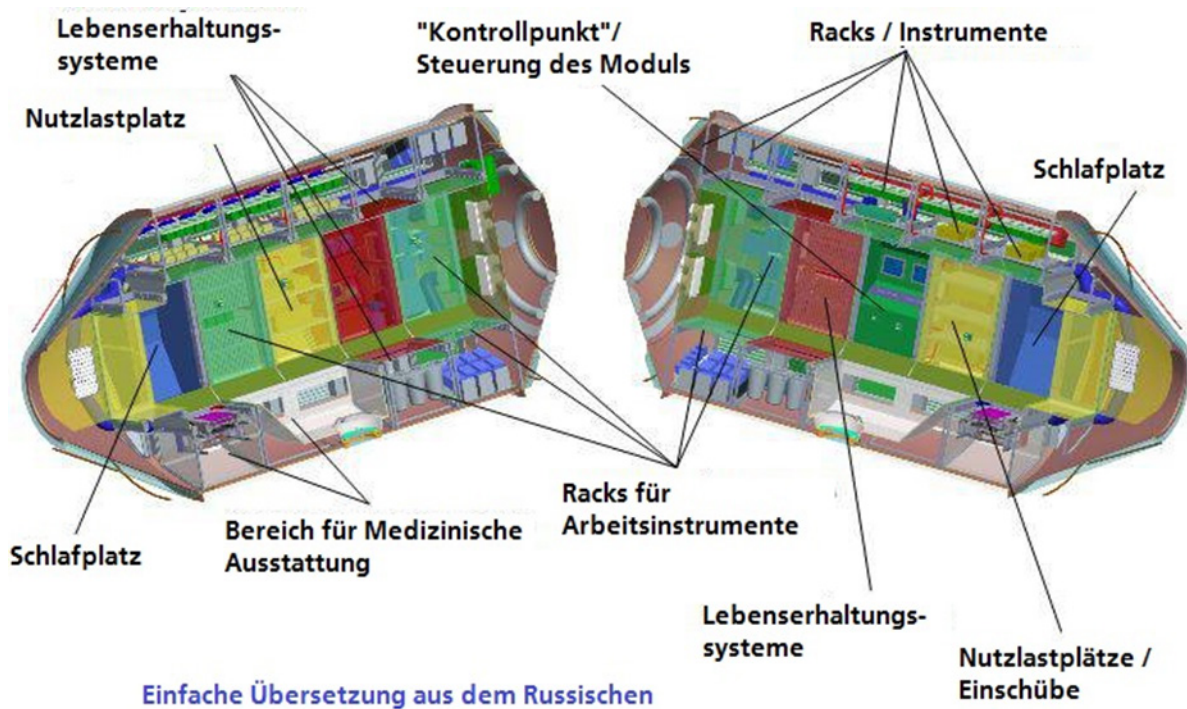


Abbildung 22 Russischer OKA-T Free Flyer - Nutzungsraum [Quelle: RKK Energija]

Das Programm zur Erforschung des Mondes wird weiter entwickelt. Dazu gehören der Orbiter Luna Glob und die Lander Luna-Ressource. Es wird eine ganze Klasse neuer Technologien für den interplanetaren Raumflug und die Tätigkeit des Menschen auf Planetenoberflächen entwickelt. Es

soll ein zukunftsweisendes bemanntes Transportsystem entwickelt werden, das Menschen auf den Mond bringen kann.

Zusammenfassung: Die erfolgreiche Umsetzung des Gesamtprogramms soll zu einer Weiterentwicklung der russischen Raumfahrttechnik führen, ihren Einsatz im Interesse der Volkswirtschaft befördern, die Position Russlands auf dem Weltmarkt für Raumfahrttechnik und Dienstleistungen festigen, die Erfüllung der wissenschaftlichen Aufgabenstellungen zur Erforschung und Eroberung des Weltraums ermöglichen, den Zugang zum Weltraum vom Territorium Russlands garantieren und eine führende Position in der bemannten Raumfahrt erhalten.

2.3.4. Japan- JAXA und ISAS

Auf dem „Basic Plan on Space Policy“ vom 25. Januar 2013, der japanischen Raumfahrtstrategie, formuliert durch das sog. Cabinet Office, bauen die anvisierten japanischen Raumfahrtaktivitäten ab 2014 für die nächsten fünf Jahre auf. Darin werden die bisherigen Aktivitäten seit 2009 erörtert und der Fokus für zukünftige Raumfahrtausrichtungen definiert bzw. als Wunsch mit den notwendigen zu klärenden Randbedingungen festgehalten [1]:

Aufgrund der letzten Naturkatastrophen ist die Nachfrage nach sozialer und ökonomischer Sicherheit und Schutz in Japan angestiegen. Es wurde ein Raumfahrtbudget von ca. 18 Mrd€ über fünf Jahre angenommen, zusammengesetzt aus Regierungsbudgets und privatem Investment. Es konnte jedoch nicht die notwendige kommerzielle Nachfrage generiert werden, wodurch das zivile Raumfahrtbudget bei rund 2Mrd€ jährlich blieb.

Japan investierte in die ISS bis 2010 ca. 710Mrd¥ (5,1Mrd €). Dies beinhaltet die Betriebskosten und HTV. Japan nutzt 51% ihres KIBO Forschungsmoduls und 12,8% der anderen Ressourcen wie elektrische Leistung und Crewzeit. Derzeit schätzt man die ISS bezogenen Kosten auf 40Mrd¥ (291Mio€) jährlich. [1]

Japan möchte seine Raumfahrtaktivitäten basierend auf den internationalen Vereinbarungen in der Nutzung des Weltraums ausweiten. Diese Strategie basiert für Japan auf sechs Säulen:

- 1) Friedliche Nutzung des Weltraums
- 2) Verbesserung des täglichen Lebens auf der Erde
- 3) Industrieentwicklung
- 4) Gesellschaftsentwicklung
- 5) Promotion internationaler Kooperation
- 6) Umweltschutz

Dabei ist Japan vor allem die Autonomie, wie z.B. der Zugang zum Weltraum, wichtig sowie die nationale Sicherheit und der Katastrophenschutz (Navigation, Erdbeobachtung (Remote Sensing), Kommunikation). Ein weiterer Fokus liegt für Japan in der Standortsicherung ihrer Industrien und deren Verbesserung des technologischen Leistungsvermögens in der Entwicklung und Nutzung der Raumfahrttechnologien im Vergleich zu den USA und Europa sowie der Steigerung ihrer

Effizienz in der Administration von Raumfahrtprojekten. Der Erfolg soll durch verschiedene Maßnahmen und Methoden vorangetrieben werden:

- a) Starke Industriegemeinschaft, um effektive F&E zu fördern
- b) Verbesserung von Sicherheitsstrategien durch die Weltraumnutzung (Diplomatie, Aktionspläne pro Land)
- c) Promotion von Japans Infrastrukturen außerhalb des Landes, um Partner zu akquirieren
- d) Informationsmanagement
- e) Umweltbeobachtungen mit einem Blick auf nachhaltige Entwicklung und Nutzung des Weltraums
- f) Erweiterung der Raumfahrtgesetze je nach Aktivität

Um unter den Sparmaßnahmen im Raumfahrtsektor seine Ziele erreichen zu können, achtet Japan darauf, dass parallele Arbeiten im Land vermieden werden, der private Sektor mehr in die Verantwortung genommen wird, die Kooperation zwischen den Ministerien intensiviert wird, Kooperationen außerhalb Japans gestärkt und die Betriebs- und Wartungskosten gesenkt werden.

JAXAs explorative Vorhaben sind zusammengefasst in der Road Map der ISECG [2] und in [74, 76]. Derzeit sind einige Neuentwicklungen hinsichtlich bemannter Logistikvehikel für den LEO veröffentlicht. Dazu gehören kaum zukünftige Forschungsplattformen oder Nutzungspläne, die bemannte Raumfahrt erfordern.

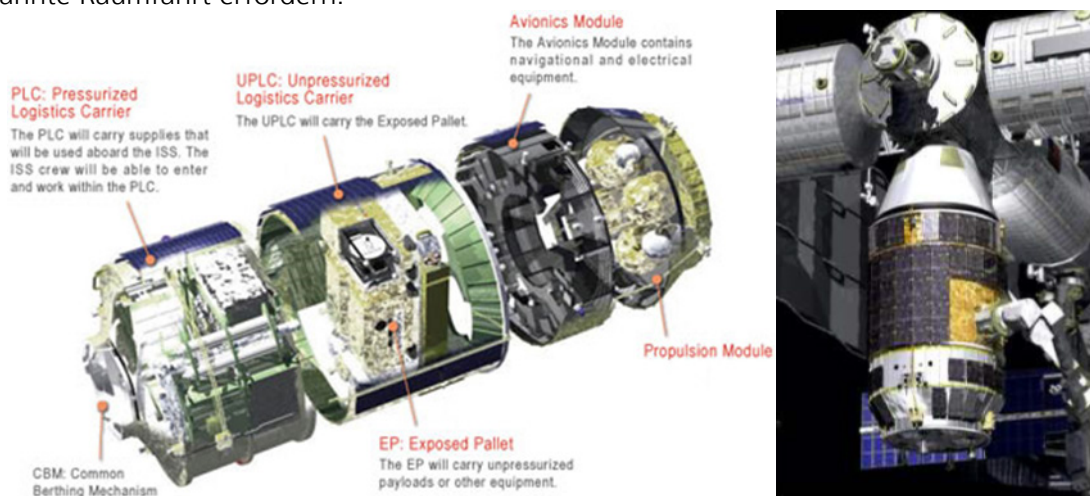


Abbildung 23: HTV-R Modulares Aufbau, 2011[74]

JAXA plant schrittweise (Abbildung 24) ein astronautisches Raumfahrzeug, welches stark von den neuen Budgetverabschiedungen abhängt.

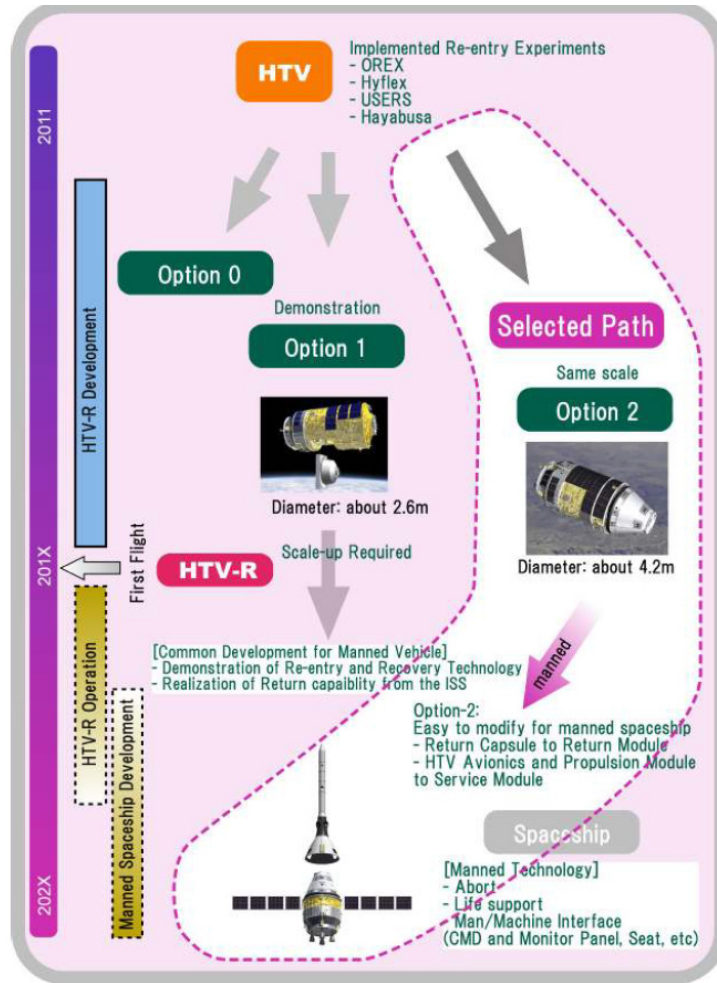


Abbildung 24: JAXAs Entwicklungswege zu astronautischen Raumfahrzeugen [74]

2.3.5. Chinesisches Raumfahrtprogramm

China veröffentlichte bisher nur Auszüge aus seiner Raumfahrtstrategie, die hier kurz zusammengefasst werden.

Neben Satellitenmissionen für Erdbeobachtung, Telekommunikation, Meteorologie und Debrisbeobachtung ist das nächste ferne Ziel eine bemannte Mission zum Mond. Dies hängt von dem angekündigten Bau einer Schwerlastversion der Langer-Marsch-Rakete ab. Für den LEO/LTO, zum Beispiel, soll eine Langer Marsch Rakete mit einer Nutzlastkapazität zwischen 10 und ca. 35t zur Verfügung stehen. Kernprogramm ist seit 10 Jahren auch die Entwicklung und der Bau einer eigenen Raumstation (siehe Abbildung 25 und Abbildung 26) [6].

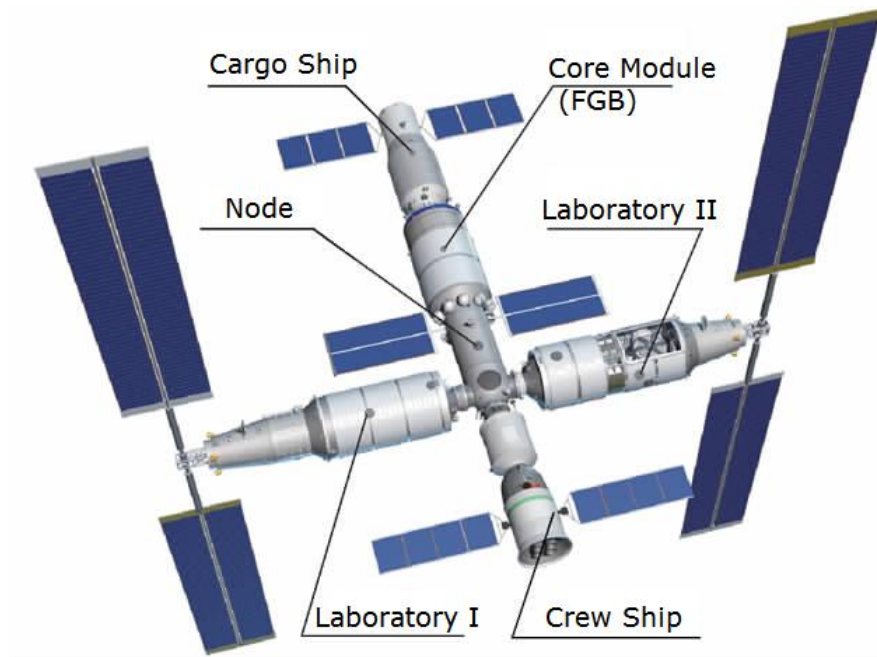


Abbildung 25: Grundkonfiguration der chinesischen Raumstation CSS

Mit der Entwicklung einer starken und wettbewerbsfähigen Asien-Pazifik-Raumfahrtindustrie will China ein ähnliches bzw. ergänzendes System zu den anderen Raumfahrtnationsvereinigungen bilden. Dabei sollen konkrete Pläne der Raumfahrtaktivitäten erstellt werden, relevante Technologien (z.B. wiederverwendbare Systeme) unter den Mitgliedsstaaten entsprechend aufgeteilt werden, um eine Spezialisierung für die programmatischen Aktivitäten der Organisation zu erzielen. Grundlagenforschung hinsichtlich Raumfahrttechnologie und ihrer Anwendungen sowie die Weiterentwicklung der erprobten Technologien sollen gefördert werden. Die Nutzung des Weltraums für den Nutzen auf der Erde durch Raumfahrttechnologien, Infrastrukturen und durch Teilen der Ressourcen (z.B. Daten der Beobachtungssatelliten) soll weiter ausgebaut werden. Auch die Kommerzialisierung z.B. der Kommunikationssatelliten (APMT- Asia-Pacific Mobile Telecommunications) soll mehr Märkte generieren und erschließen.

Aufgrund des steigenden Interesses der USA und Europas zeichnen sich erste Kooperationsbereiche für China ab:

- Astronautenflüge (ESA-China)
- Raumfahrttechnologieentwicklung und Programme für ihre Anwendung
- Bereiche: Erdbeobachtung, Katastrophen- und Umweltschutz, Kommunikations- und Navigationssatelliten
- Weltraumforschung
- Schulung und Austausch von Wissenschaftlern und Technologieexperten (z.B. SIMBOX)
- Erstellung einer zentralen Datenbank als Hilfsmittel für die Entwicklung von Programmen und zur Verbreitung der technischen und anderen Informationen bezüglich der Programme und Aktivitäten der Organisation

Die seit 2005 existierende Asia-Pacific Space Cooperation Organisation (APSCO) beginnt mit Erdbeobachtung über Satelliten. Zielplattform ist aber auch die Raumstation. APSCO orientiert sich u.a. an den ESA Statuten mit seinen optionalen und obligatorischen Programmen. Als Basis übernimmt China den Kapitalbeitrag: ist es ein optionales Programm, erhält der Teilnehmer proportional zu seinem Investment entsprechende Aktivitäten.

Zusätzlich stellt sich die Frage nach der nationalen Zuständigkeit im Weltraum - ähnlich wie auf der Erde. Das heißt hier müssen Grenzen und Gesetze definiert werden, um Kooperationen mit China zu ermöglichen (aus Chinas Sicht).

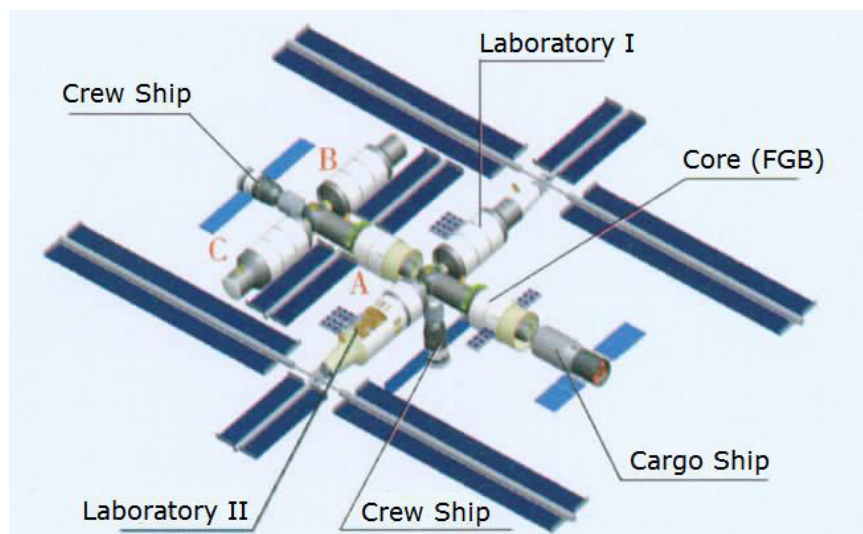


Abbildung 26: Größte bisher dargestellte Konfigurationsoption der chinesischen Raumstation CSS

3. ISS Analyse

Nachdem in Kap. 2 die ISS Aufbauphase und die Verpflichtungen der internationalen Partner dargelegt wurden, soll hier eine weitergehende Analyse der ISS Situation und Nutzung erfolgen. Große Teile der ISS befinden sich bereits seit vielen Jahren im Orbit und wurden seitdem genutzt – wenn auch zunächst erheblich eingeschränkt hinsichtlich Crew-Umfang und Experimentiermöglichkeiten. Das anfänglich große öffentliche und politische Interesse hat indes erkennbar nachgelassen – auch verursacht durch eine bislang relativ begrenzte wissenschaftliche Ausbeute. Dennoch hat die ISS in den letzten 15 Jahren wichtige ingenieurtechnische und wissenschaftliche Ergebnisse hervorgebracht, die u.a. eine Basis für die nächste Generation von bemannten Forschungsplattformen schaffen. Diese ersten Ergebnisse sind von den ISS Partnern für jede Disziplin in den letzten zwei Jahren kompakt veröffentlicht worden [26, 27] und teilweise online verfügbar. Alle ISS Partner weisen darauf hin, dass erst nach Vollendung des Aufbaus in 2011 die nominalen (verbesserten) Betriebs- und Forschungsbedingungen erreicht wurden und eine intensive Nutzung der ISS für den Zeitraum der nächsten 10 - 15 Jahre stattfindet.

3.1. Kooperationspartner und ihre Schlüsseltechnologien

Zur Diskussion von Schlüsseltechnologien aus den geflogenen Systemen der astronautischen Raumfahrt, u.a. ISS, lassen sich folgende Möglichkeiten betrachten:

- a) Technologien im ISS Projekt (Infrastruktur und Nutzung)
- b) Ergebnisse aus der ISS Forschung (hier nicht betrachtet, sondern in [26, 27])
- c) Technologien für weiterführende astronautische Infrastrukturen

Eine wichtige Begründung der Raumstation ISS besteht in ihrer Nutzung als wissenschaftliches Labor und operationelles Test- und Verifikationszentrum für komplexe Raumfahrtaufgaben und Technologien im Zusammenhang mit astronautischer Raumfahrt:

- Aufbau und Betrieb (druckbeaufschlagter) orbitaler Infrastrukturen
- Rendezvous & Docking
- Lebenserhaltung
- Grundlagenforschung (Lebenswissenschaften, Materialwissenschaften, Flüssigkeitsphysik, Fundamentalphysik usw.)
- Robotik
- Testplattform für neue Technologien (z.B. elektrische Antriebe)
- Erdbeobachtung
- Außenbordeinsatz (EVA)

und zukünftig vielleicht

- Transportknoten für weiterführende Explorationsmissionen

Besonders die russische Raumfahrtagentur sieht die Station eher als Technologie-Entwicklungsplattform für Raumfahrtsysteme zur Exploration von Mond und Mars und scheint ihr Hauptinteresse auf operationellen Betrieb zu legen – auch mit dem Gedanken an finanzielle Einnahmen durch Dienstleistungen für Partner.

3.1.1. Technologien im ISS Projekt

Die ISS verzeichnet eine funktionierende jahrzehntelange internationale Kooperation und signifikante Errungenschaften der Ingenieurwissenschaft, deren Produkte sich meist als Kompromiss aus Budget, Politik, Administration und technologisch Machbarem, realisieren. Die Komplettierung der ISS konnte nur durch außerordentliche Fähigkeiten und Einsatz von über 100000 Personen aus Regierungen, Industrie und Wissenschaft erreicht werden. Tabelle 13 zeigt im Anhang viele Elemente der MIR und ISS bei denen vor allem Europa Expertise vorweisen kann. Viele der Technologien stammen aus Vorprogrammen wie MIR und Skylab und sind teils erst später für die ISS modifiziert worden. Raumfahrt ist vor allem aus Sicherheitsgründen traditionell konservativ, und Neu-Entwicklungen fordern aufgrund der verschiedenen Rahmenbedingungen Geduld und teils Verzicht auf ‚state-of-the-art‘ Technologie. Mit der Erweiterung der Forschungsdisziplinen, dem Drang nach schnellerem Zugang im Sinne der forschenden Firmen und neuen US-Raumfahrtfirmen (traditionell: AIRBUS, BOEING, LOCKHEED) lässt sich ein Paradigmenwechsel zu mehr Innovation und Risikobereitschaft erkennen.

Eine der wichtigsten Schlüsseltechnologien ist der Zugang zum Weltraum, der die bemannte und unbemannte Versorgung der ISS ermöglicht. Hier haben von den ISS Partnern bisher nur die USA und Russland das entsprechende Know-how für bemannten Transport (hinzu kommt China als bisher nicht in das ISS Programm integrierter Partner). Durch die Ausmusterung der risikobehafteten und teuren US-Shuttle-Flotte in 2011 entsteht für die USA über Jahre ein erhebliches Problem beim bemannten Zugang zum Weltraum, so dass sie und ihre Partner hinsichtlich des kontinuierlichen Astronautentransports zur ISS vollständig von Russland abhängig sind (Kosten für einen Sitz in der russ. Sojus-Kapsel ca. 60 - 70 Mio. US\$). Entwicklung und Aufbau eines neuen bemannten Transportsystems erfordern viele Jahre und hohe Investitionen. Da auch die russischen Systeme überaltert sind, gilt ähnliches letztlich mittelfristig auch für die russischen Raumtransportkapazitäten.

**Bemannte Raumstation(en)
im LEO**

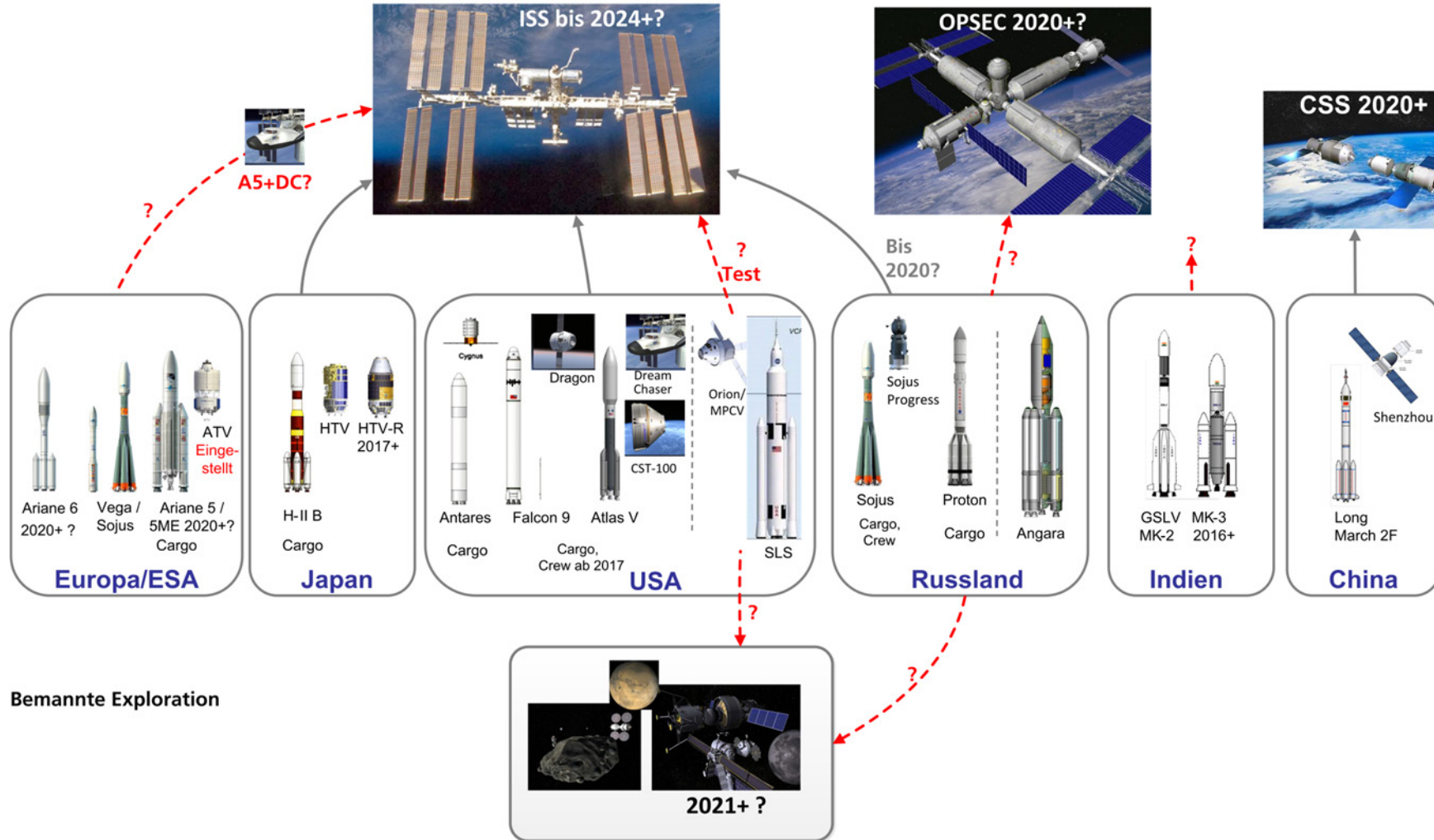


Abbildung 27: Internationale Transportkapazitäten zur ISS und darüber hinaus

NASA versucht mit seinem Aufbau-Programm COTS ('Commercial Orbital Transportation Services') für privatwirtschaftliche Unternehmen neue Wege zu beschreiten und den laufenden bzw. zukünftigen Transport zur ISS durch sogenannte Kommerzialisierung kostengünstiger zu machen (Abbildung 27). Sowohl unbemannter Nachschub (z.B. 'Antares/Cygnus, Falcon 9/Dragon') wie bemannter Transport ab ca. 2017 (z.B. 'Boeing/CST-100' und 'Sierra Nevada/Dream Chaser') sind in Entwicklung oder bereits in Erprobung. Russland bietet mit seinen bemannten Sojus- und unbemannten Progress-Fahrzeugen eine unentbehrliche Nachschub-Leistung (mit allerdings nur sehr geringer Rückführkapazität zur Erde), die durch unbemannte europäische (Ariane V/ATV) und japanische (H-IIB/HTV) Versorgungsflüge ergänzt wird. Dabei bringt ATV (Abbildung 11) die größte Nutzlastkapazität (ca. 7 t) auf, allerdings ohne Rückführmöglichkeit. Größere und schnellere Rückführmöglichkeit mit z. B. entsprechender Kapsel scheint aus wissenschaftlicher Sicht wünschenswert, Japan untersucht daher die Erweiterung seines HTV-Fahrzeuges in diese Richtung. Auch für Europa wäre diese Schlüsseltechnologie attraktiv, nicht zuletzt als Einstiegsmöglichkeit in eigenen bemannten Transport und um sich stärker von der internationalen Abhängigkeit zu lösen. Längerfristig könnten sich beim Start vom Weltraumbahnhof Kourou in Französisch-Guayana für Europa unbemannte und eventuell auch bemannte Rückkehr-Optionen ergeben (z.B. durch Erweiterung der Sojus-Kooperation oder durch Einsatz des bei der 'Sierra Nevada Corp.' in Entwicklung befindlichen 'Dream Chaser' als unbemanntes Raumfahrzeug auf der Ariane V Rakete).

Es gibt derzeit sechs ähnliche Träger aus insgesamt vier Nationen und Europa, die den Zugang zum Weltraum ermöglichen (Tabelle 6). Atlas V und Delta sind hier noch nicht einbezogen, da Dream Chaser und CST-100 noch nicht betriebsbereit sind.

Tabelle 6: Aktuelle Launcherkapazität für astronautische Plattformen am Beispiel ISS [12, 32, 37]

Eigenschaften	Ariane 5	H-IIB	Proton/ Sojus TMA	Antares/ Falcon 9*	Space Shuttle eingestellt
Schub	11400kN	5600kN	10MN/ 6000kN	3265kN/ 6000kN	34,7MN
Startmasse	746t	531t	690t/ 310t	240t/ 500t	2040t
PL-Dimensionen LEO	18t	16,5t	20,7t/ 7,1t	5,1t/ 13,1t	18,6t
GTO	10t	8t	6t/ 1,3 oder 3,2t (Kourou)	1,8t / 4,8t	-
Im ISS Betrieb seit	2008	2009	1998/ 2000	2013/ 2012	1998
Startkosten	Hoch	Mittel	Niedrig	Mittel-Hoch	
Hersteller (u.a.)	Europäische Firmen Airbus, MTAerospace	Japan Mitsubishi	Russland RKK Energija	USA Orbital Sciences / SpaceX	USA Boeing, Lockheed Martin, ATK
Ausblick für Europa	Offen (Ariane6)	-	Mitflug	Mitflug	-

*Der Nachfolger der Falcon 9, Falcon Heavy, soll zukünftig größere Lasten in den LEO (bis zu 53t) und Geo-Transferorbit GTO (bis zu 21,2t) bringen können. Der Erstflug ist für 2016 geplant. Ziel dieser Entwicklung ist nicht nur der Flug zum Mars (bis 13t Nutzlast), sondern vor allem die Startkapazitäten des Space Shuttles zu ersetzen.

Tabelle 14 zeigt im ANNEX die aktiven Versorgungsvehikel für den nominalen Betrieb der Internationalen Raumstation ISS und die Aufbau- und Versorgungsvehikel für die Chinesische Raumstation.

NASA plant mit seinem 'Space Launch System' SLS und seiner 'Orion-Kapsel' ab ca. 2021 bemannte Explorations-Flüge über den LEO hinaus (Abbildung 27).

Die wichtige Schlüsseltechnologie 'Lebenserhalt' beherrschen umfassend bei den ISS Partnern nur Russland und USA. Europa und Japan sind von ihnen abhängig, haben aber in Teilbereichen eigene Erfahrungen. Vollständig geschlossene Lebenserhaltungssysteme auf physikalisch-chemischer und/oder biologischer Grundlage sind noch nicht verwirklicht. Mit dem geplanten Start von HTV im Februar 2017 soll auch das „Advanced Closed-Loop System“ (ACLS) auf der ISS zum Einsatz kommen und Deutschland/ Europa zu einem eigenen modernen Lebenserhaltungssystem befähigen und damit eine Lücke unter den Schlüsseltechnologien im europäischen Raum schließen [86, 87].

Der Bau von Habitat-Modulen (druckfest und geschützt gegen kleinere Anteile des Weltraummülls) wird von allen ISS Partnern (u.a. TAS-I und AIRBUS, ehemals Astrium GmbH) beherrscht; Schutz vor Weltraumstrahlung ist allerdings bislang nur marginal verwirklicht, und Technologien für entfaltbare Module sind nur bei der US-Industrie ('Bigelow Aerospace') in Bearbeitung. Neben der Systemführung bei Columbus und ATV wurden zur ISS-Infrastruktur unter deutscher Führung außerdem das europäische Daten Management System für das russische Segment (DMS-R) beigestellt, sowie das „Analysing Interferometer for Ambient Air“ (ANITA).

Robotik spiegelt sich in vielen Teilen der Station wider. Robotik-Beiträge zur ISS leisten vor allem Canada und Europa/ESA mit ihren Greifarmen und haben daher auch entsprechend ausgeprägtes 'Know-how'. NASA plant mit seinem ROBONAUT die Arbeit der Astronauten zu unterstützen.

Für den Außenbordeinsatz ('Extravehicular Activity' EVA) der Astronauten gibt es auf der ISS zwei Raumanzug-Systeme:

- die 'Extravehicular Mobility Unit' EMU der Amerikaner
- den 'Orlan' Raumanzug der Russen (wird in leichter Abwandlung auch von den Chinesen benutzt)

Das amerikanische EMU-System ist seit 1981 im Einsatz und besteht aus 2 Teilen: einem oberen 'starren' Teil ('Hard Upper Torso' HUT) und einem 'weicheren' unteren Teil ('Lower Torso

Assembly' LTA). Integriert in den Anzug sind u.a. das 'Primary Life Support System' PLSS und das 'Liquid Cooling and Ventilation Garment' LCVG zur Kontrolle der Feuchtigkeit und Temperatur im Anzug. Zirkulation von kühlem Wasser durch Röhren im Anzug stabilisiert die Temperatur. Wärmeabführung erfolgt letztendlich durch Verdampfen von Wasser in den Weltraum. Der interne Druck im Anzug beträgt 4,3 psi (30 kPa), während in der Raumstation 14,7 psi herrschen. Daher muss für Weltraumspaziergänge ca. 4 Std. 'vorgeatmet' (pre-breathing') werden, um Druckausgleich herzustellen. Astronauten können im Raumanzug ca. 8-9 Std. arbeiten.

Die erste Version des russischen Raumanzugs 'Orlan' wurde 1977 eingesetzt. Der Anzug besteht aus einem Stück, ist 'halbstarr' ('solid torso+helmet, flexible arms') und wurde von NPP Swesda entwickelt. Das neueste Modell 'Orlan MK' wurde 2009 getestet und erlaubt eine Einsatzzeit von bis zu 9 Stunden. Der interne Druck beträgt 0,4 atm (5,8 psi), so dass im Vergleich zu EMU weniger Zeit zur 'Voratmung' benötigt wird.

In den USA wird gegenwärtig eine neue Generation von Raumanzügen entwickelt: 'Advanced Extravehicular Mobility Unit' AEMU - auch 'Z-Serie' (Z-1 und Z-2) genannt. Die Firma 'ILC Dover' hat in 2013 einen NASA-Auftrag in Höhe von 4,4 Mio\$ erhalten. Eine erste Version soll 2017 auf der ISS getestet werden. Durch neues Design soll der interne Druck erhöht und so die 'Voratmungszeit' reduziert werden. [89]

Europa hat im Bereich Weltraumanzüge bisher kaum technologisches 'Know-how'. Europäische Astronauten nutzen lediglich die vorhandenen Systeme der Amerikaner und Russen.

3.1.2. Technologien ISS am Beispiel Columbus

Neben ATV sowie dem Astronautentraining und -betrieb ist für Europa das Columbus-Modul⁸ von besonderer Bedeutung mit dem Fokus auf wissenschaftliche Nutzung. Es ist zylindrischer Bauart mit einem Docking-Mechanismus auf der einen und kleineren Außenplattformen auf der anderen Seite und wurde vom Hauptauftragnehmer Airbus Defence & Space in Bremen integriert. Die Struktur stellte Thales-Alenia Space bereit und baute dabei auf Erfahrungen mit Spacelab und dem Multi-Purpose Logistics Module⁹ (MPLM) auf. Columbus ist knapp 6,9 m lang und hat einen Durchmesser von ca. 4,5 m (siehe Abbildung 28) und wurde mit dem Shuttle Atlantis am 7. Februar 2008 (13 Jahre nach Beginn von Phase C) zur ISS gebracht [78]. Die Startmasse betrug 12775 kg, in denen bereits 2500 kg an Nutzlasten enthalten waren.

⁸ Vormalig auch Attached Pressurized Module (APM) oder Columbus Orbital Facility (COF)

⁹ Das Multi-Purpose Logistics Module diente als bedruckter Frachtraum der US Space Shuttles, der mithilfe des Robotorarms (Canadarm2) aus der Shuttle-Ladebuchts herausgehoben und an die ISS angedockt werden konnte.

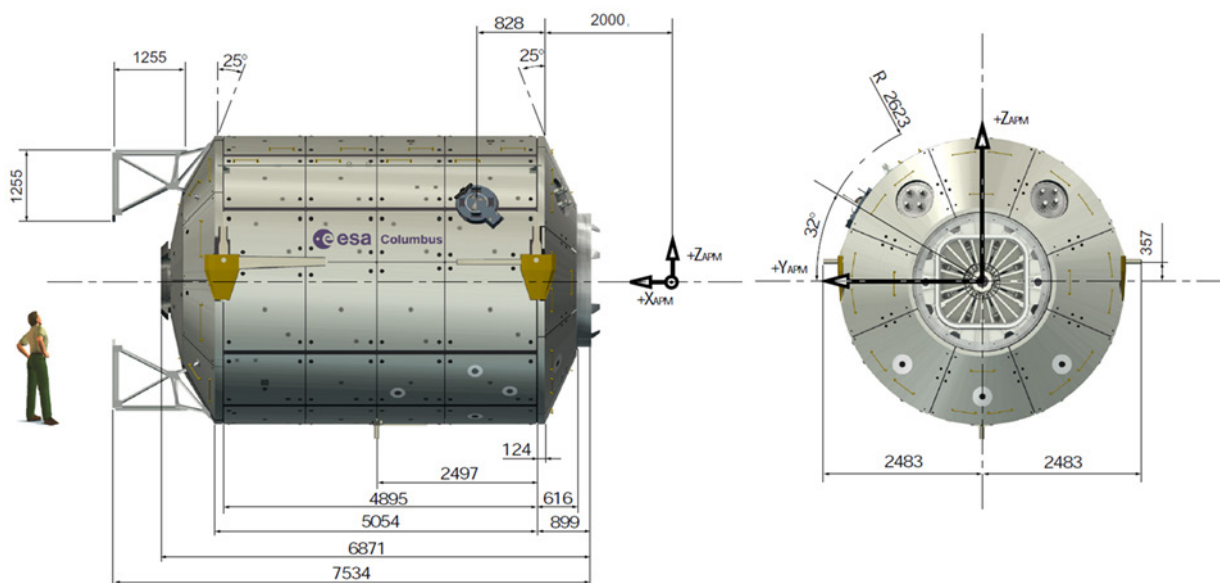


Abbildung 28: Columbus Außenstruktur [79]

Die Hülle für das bedruckte Volumen von 75 m³ besteht aus 4,8 mm starkem Aluminium. Sie ist von Außen durch ebenfalls Aluminium kombiniert mit Kevlar/ Nextel Panelen gegen Mikrometeoriten und Weltraumrückstände geschützt. Thermisch wird Columbus mit Hilfe einer aluminisierten Kapton Multi Layer Isolation abgeschirmt.

Die für drei Astronauten ausgelegten Systeme des Columbus-Moduls sind zu großen Teilen angewiesen auf die amerikanischen oder russischen Systeme wie das Lebenserhaltungssystem (noch ohne ACLS). So befinden im russischen Teil der Raumstation alle wesentlichen Systeme zur Wasser-, Luft- und Klimaversorgung zentral im Swesda-Modul („Service Module“ in Abbildung 29). Im U.S.-amerikanischen Teil befinden sich sowohl im Destiny-Modul („U.S. Laboratory Module“ in Abbildung 29) als auch im Tranquility-Modul („Knoten 3“) Anlagen zur Wasser- und Luftaufbereitung, und die Temperatur- und Feuchtigkeitsregelung werden dezentral von den meisten Modulen selbst gewährleistet (diagonal-schraffierte rote Felder in Abbildung 29).

On-Orbit ISS ECLS Hardware Distribution at Assembly Complete

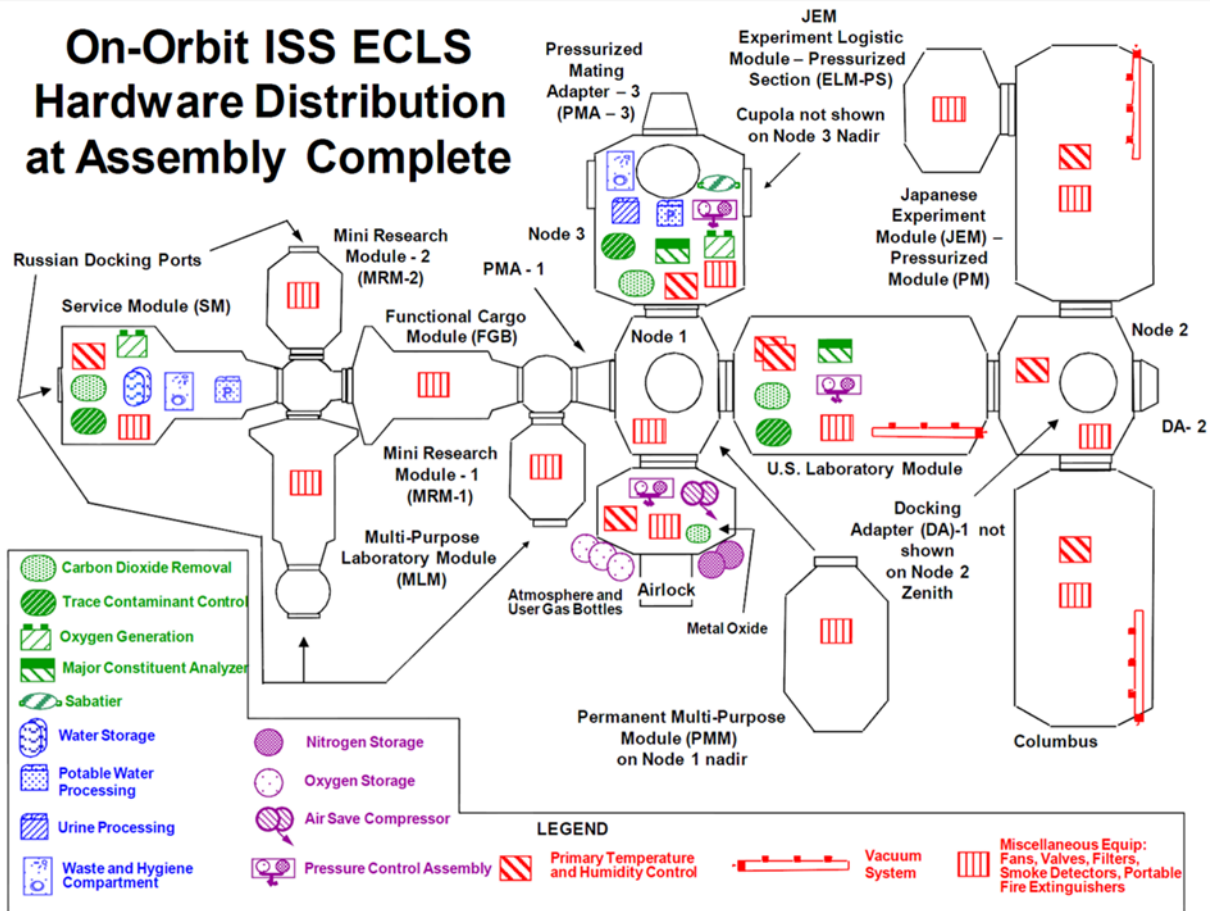


Abbildung 29: Verteilung des Lebenserhaltungssystems der ISS auf die einzelnen Module (links: russischer Teil; rechts von PMA-1: U.S.-amerikanischer Teil) [80]

Über die Verbindungsschnittstelle zwischen dem Knoten 2 (Harmony) und Columbus wird der Austausch von Luft (Inter Module Ventilation (IMV)), Stickstoff, Kondenswasser, Luftproben sowie Kühlwasser gewährleistet (siehe Abbildung 30). Außerdem gibt es eine Verbindung für Daten-, Video- und Audiosignale sowie zwei Leitungen, die für jeweils 12,5 kW Gleichstrom bei 120 V ausgelegt sind. Für Columbus stehen darüber insgesamt 20kW elektrische Leistung zur Verfügung, davon 13,5kW für die Nutzlasten, davon 5 kW für extern im freien Weltraum angebrachte Nutzlasten. Im Folgenden werden die Funktionen zur Lebenserhaltung speziell bezüglich Columbus-Modul näher aufgeschlüsselt (Tabelle 7, Tabelle 8, Tabelle 9 und Tabelle 10) [81] / [82]. Dabei ist zu erkennen, dass größere Systeme von auf Raumfahrt spezialisierten Firmen zusammengefügt werden, die dabei verwendeten Unterbaugruppen jedoch von Firmen stammen, die bereits im Bereich der terrestrischen Anwendungen etabliert sind.

Tabelle 7: Columbus Atmosphärenkontrolle und –versorgung

Funktion	Erfüllt von Columbus	Bereitgestellt durch ISS	Lieferant
Überwachung des Gesamtdruckes (97,9 bis 102,7 kPa)	✓		Thales Group (FR)
Stickstoff Nachführen		✓ (N ₂ -Zuleitung)	Ventil von MOOG (DE)
Überwachung des Sauerstoffpartialdruckes (19,5 bis 23,1 kPa)	✓		Dräger (DE)
Sauerstoff Nachführen		✓ (Frischlucht (IMV))	Ventil von Carleton Tech. Inc. (heute Cobham Life Support) (USA)/ Ventilator von Thales Group (FR)
Druckausgleich (positiv/ negativ)	✓		Carleton Tech. Inc. (heute Cobham Life Support) (USA)
Detektion plötzlichen Druckabfalls		✓	(USA)
Wiederherstellung nach plötzlichem Druckabfall		Druckausgleich mit Knoten 2	

Tabelle 8: Columbus Temperatur- und Feuchtigkeitskontrollsystem

Funktion	Erfüllt von Columbus	Bereitgestellt durch ISS	Lieferant
Überwachung der Lufttemperatur (vom Astronauten wählbar von 18,3 bis 26,7 °C)	✓		Kayser Threde (ab 1.9.14 OHB System AG) (DE)
Kühlung der Luft	✓	Kühlwasser (bei 0,6 bis 5,6 °C)	Thales Group (FR)
Reduktion der Luftfeuchtigkeit (Zielbereich: 25 bis 75 % r.F.)	✓	Kühlwasser (bei 0,6 bis 5,6 °C)	Thales Group (FR)
Abführen des Kondensats	✓	Kondensat Verarbeitung	Ventil von Moog (DE)
Luftzirkulation (0,036 bis 1,016 m/s)	✓ (59%Umluft)	50 % Frischluft (IMV)	Diffusor von Dornier (heute Airbus) (DE)

Tabelle 9: Columbus Luftaufbereitung

Funktion	Erfüllt von Columbus	Bereitgestellt durch ISS	Lieferant
Überwachung des CO ₂ -Partialdruckes (0,705 bis 1,011 kPa)	✓		Dräger (DE)
CO ₂ Entfernen		✓ (Abluft (IMV))	Ventil von Carleton Tech. Inc. (heute Cobham Life Support) (USA)/ Ventilator von Thales Group (FR)
Überwachung von gasförmigen Luftverunreinigungen		✓ (Leitung für Luftproben)	Ventil von Moog (DE)
Entfernung von gasförmigen Luftverunreinigungen		✓ (Abluft (IMV))	Ventil von Carleton Tech. Inc. (heute Cobham Life Support) (USA)/ Ventilator von Thales Group (FR)
Entfernung von Partikeln und Mikroorganismen aus der Luft	✓	Thales Group (FR)	Thales Group (FR)

Tabelle 10: Columbus Nutzlastversorgung

Funktion	Erfüllt von Columbus	Bereitgestellt durch ISS	Lieferant
Entlüftung für Nutzlasten	✓		Carleton Tech. Inc. (heute Cobham Life Support) (USA)
Vakuum für Nutzlasten	✓		Niedrigdrucksensor von Dornier (heute Airbus Group) (DE)
Stickstoff für Nutzlasten		✓ (N ₂ -Zuleitung)	Ventil von MOOG (DE)
Kühlung der Nutzlasten	Über Thermalsystem	Kühlwasser (bei 0,6 bis 5,6 °C)	nicht bekannt

Brandschutzsystem:

Zur Erkennung von Bränden ist der U.S.-Teil der Raumstation (also auch das Columbus-Modul) entsprechend der Racks in Brandabschnitte unterteilt. Daher befinden sich in jedem Rack, aber auch in den Modulen selbst und den Lüftungszu- und -ableitungen Rauchsensoren. Im Brandfall stehen den Astronauten Atemmasken und CO₂-Löscher zur Verfügung. In der Regel wird der betroffene Brandabschnitt stromlos geschaltet, sowie Luftaustausch, Sauerstoff- und Stickstoffzufuhr zu dem betroffenen Modul unterbunden. Falls erforderlich, ist auch eine Evakuierung einzelner Module möglich. [81]

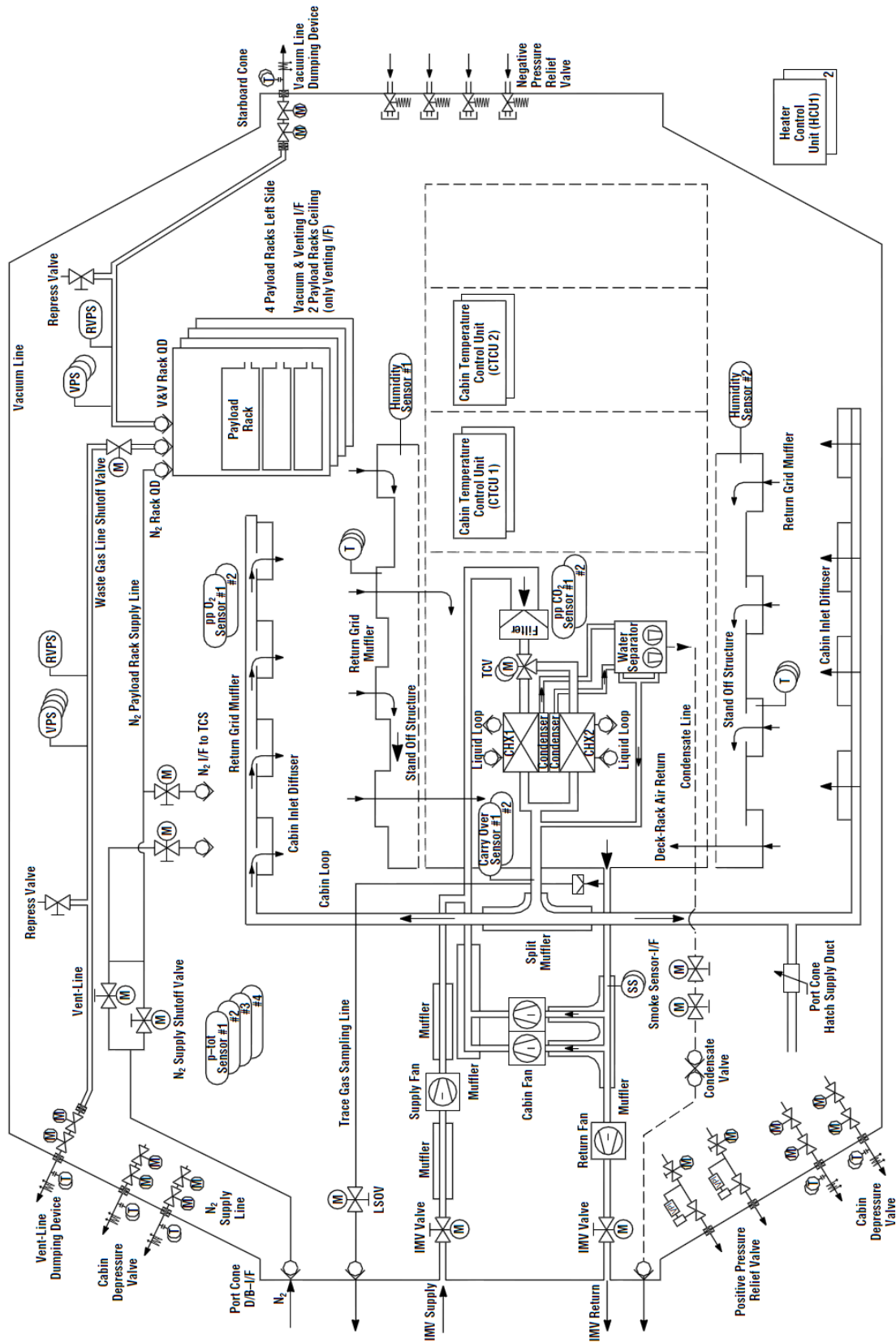


Abbildung 30: Schema des Lebenserhaltungssystems von Columbus [82]

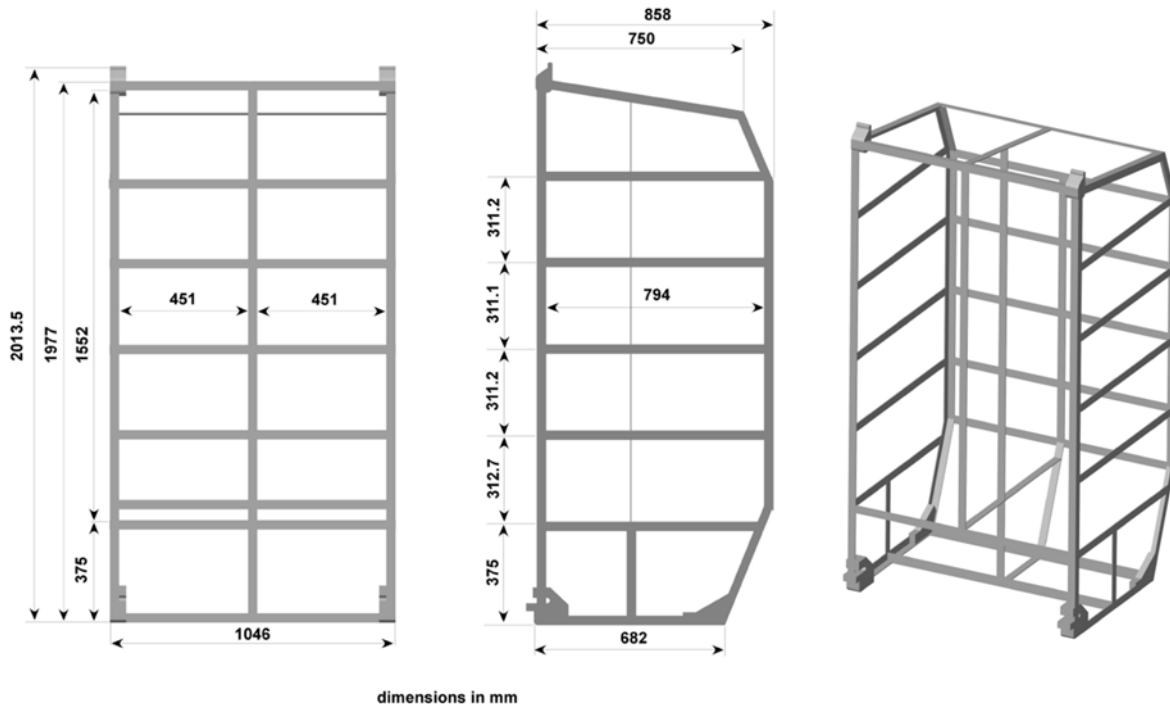


Abbildung 31: Skizze einer „6-Pfosten-Version“ vom International Standard Payload Rack (ISPR) [13]

Der größte Teil der Inneneinrichtung im U.S.-Teil der Raumstation, wie z.B. Nutzlasten, Lagerräume, die Toilette oder die Schlafkabinen, ist in den International Standard Payload Racks (ISPR) untergebracht. Diese werden an der Sekundärstruktur der Module befestigt und haben eine Normgröße von 2013,4 mm Höhe, 1046 mm Breite und 858 mm Tiefe, wobei die hinteren Ecken oben und unten abgeschrägt sind. An der Vorderseite befindet sich unten ein Scharnier, über das ein Rack zum Einbau bzw. zur Reparatur um ca. 80 ° geschwenkt werden kann. Es gibt eine Version mit 6 Pfosten (6-POST ISPR) wie in Abbildung 31 dargestellt, mit einem Nutzlastvolumen von 1,2 m³ und einer unterstützten Nutzlastmasse von 704 kg. Bei der anderen Version (4-POST ISPR) werden die Längs-Streben in der Mitte der Front- und Rückseite weggelassen. Dadurch stehen ein Nutzlastvolumen von 1,35 m³ und eine unterstützte Masse von 418 kg zur Verfügung. Die japanischen und europäischen ISPRs sind aus Aluminium hergestellt, bei U.S.-amerikanischen ISPRs kamen aber auch bereits Kohlefaserverbundstoffe zum Einsatz. ISPRs, die für eine Stromversorgung mit 3 kW ausgelegt sind, können an jeder freien Position der ISS eingebaut werden, an ausgewählten Stellen können aber auch 6 kW-Versionen installiert werden. [13]

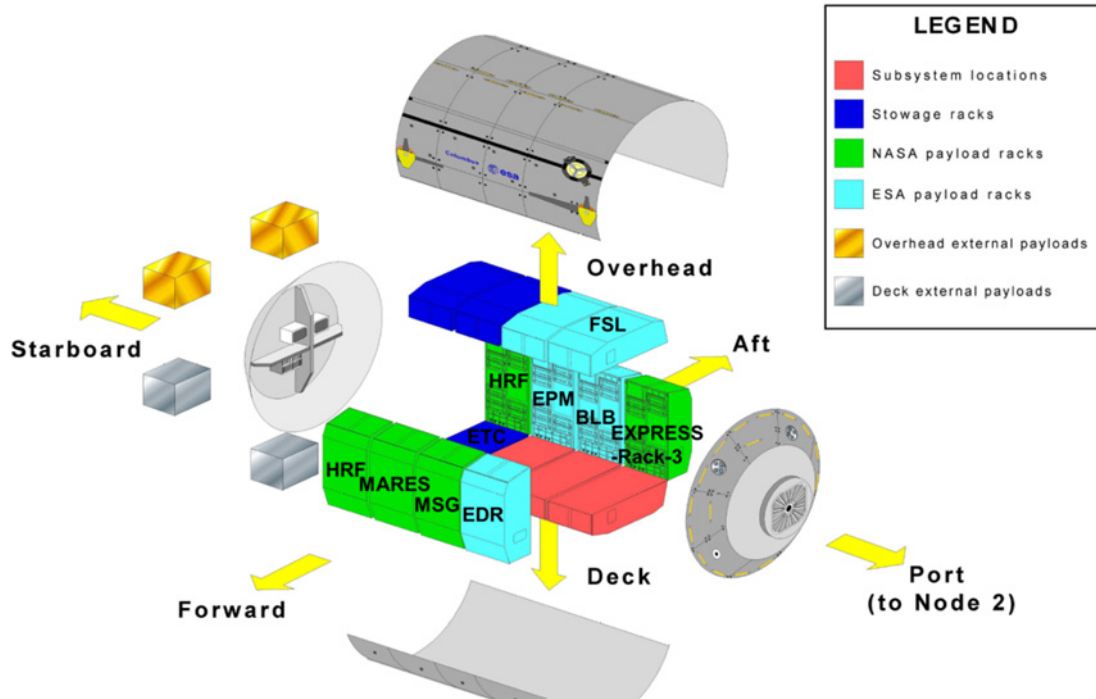


Abbildung 32: Verteilung der Racks in Columbus [13]

Der Innenausbau von Columbus besteht aus rundherum vier mal vier ISPRs. Davon dienen drei der internen Versorgung von Columbus (Kommando-/ Datenhandlung, Luft-/ Temperaturregelung, Energieversorgung), drei weitere als Stauraum, und jeweils fünf austauschbare Racks stehen NASA und ESA für Nutzlasten bzw. Experimente zur Verfügung (Abbildung 32): Biolab (BLB), European Transport Carrier (ETC), Fluid Science Laboratory (FSL), European Physiology Modules (EPM), European Drawer Rack (EDR), European Stowage Rack (ESR), Materials Science Laboratory (MSL), Microgravity Science Glovebox (MSG), 2 x Human Research Facility (HRF), Muscle Atrophy Resistive Exercise System (MARES), EXPRESS-Rack-3. So wurde z.B. die Microgravity Science Glovebox (linkes Bild, links) zuerst von Destiny nach Columbus verlegt und später wieder durch ein anderes Rack ersetzt (Abbildung 33, rechtes Bild). Des Weiteren fällt auf, dass nicht nur die ISPRs sondern auch der Innenraum selbst zunehmend als Lagerraum verwendet wird. [78]

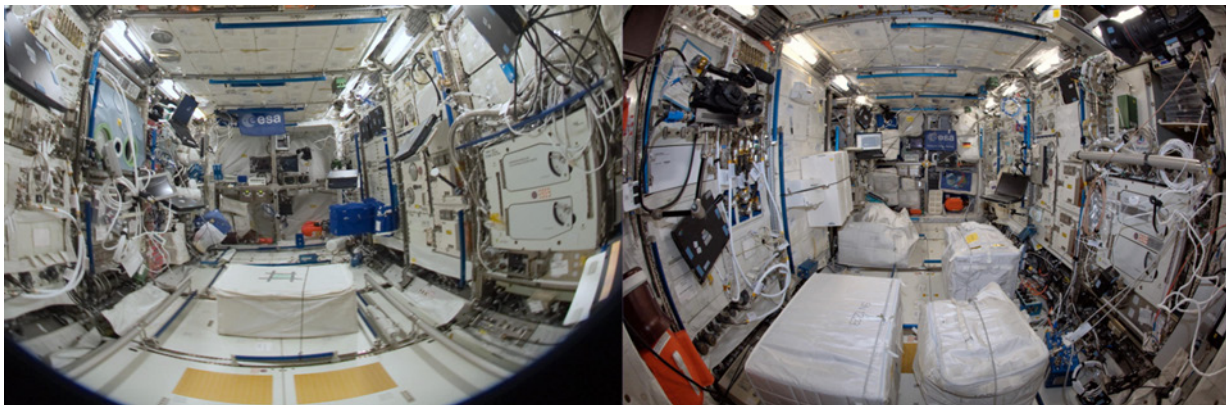


Abbildung 33: Columbus Innenansicht (links: 2009; rechts 2014) [NASA]

In Abbildung 34 und Abbildung 35 ist zu erkennen, dass im Rahmen der bemannten Raumfahrt eine Vielzahl von Kopplungsadaptern entwickelt und verwendet wurde. Dabei unterscheidet sich der innere Durchmesser aller Systeme mit russischer Beteiligung (80 cm) von rein U.S.-amerikanischen Systemen mit einem eher quadratischen Durchgang (127 cm x 127 cm). Daher ist der Transport von ISPRs beschränkt auf diejenigen Systeme, die die größeren Kopplungsadapter verwenden (früher Space Shuttle mit MPLM, HTV, Dragon und Cygnus) im Gegensatz zu Sojus, Progress und ATV. Für ATV hatte Europa im Gegenzug für das Data Management System das Russian Docking System (RDS) zur Verfügung gestellt bekommen. Zur Zeit wird von der ESA noch ein weiterer Dockingadapter entwickelt, der Europa auch ermöglichen wird, mit allen zukünftigen U.S.-Docking Ports der ISS sowohl aktiv als auch passiv eine druckdichte und strukturelle Verbindung aufbauen zu können: Der International Berthing and Docking Mechanism (IBDM) [83]. Dieser erfüllt die Vereinbarungen, die Ende 2013 zwischen NASA, Roscosmos, ESA, CSA und JAXA getroffen wurden: Der International Docking System Standard (IDSS). Dieser soll alle zukünftigen Dockingsysteme zueinander kompatibel machen und eine internationale Kooperation auch für Explorationsmissionen vereinfachen. Für die zu verwendende Öffnung hat sich dabei der kleinere Durchmesser von 80 cm durchgesetzt. [84]

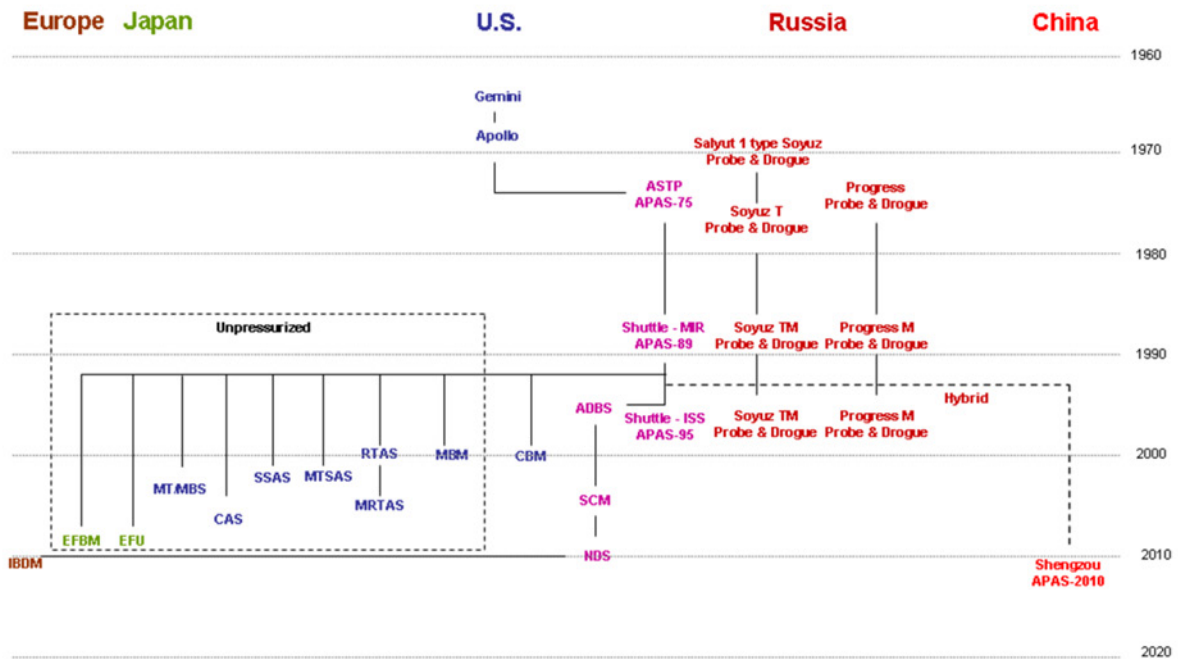


Abbildung 34: Stammbaum der Kopplungsmechanismen der Raumfahrt [85]

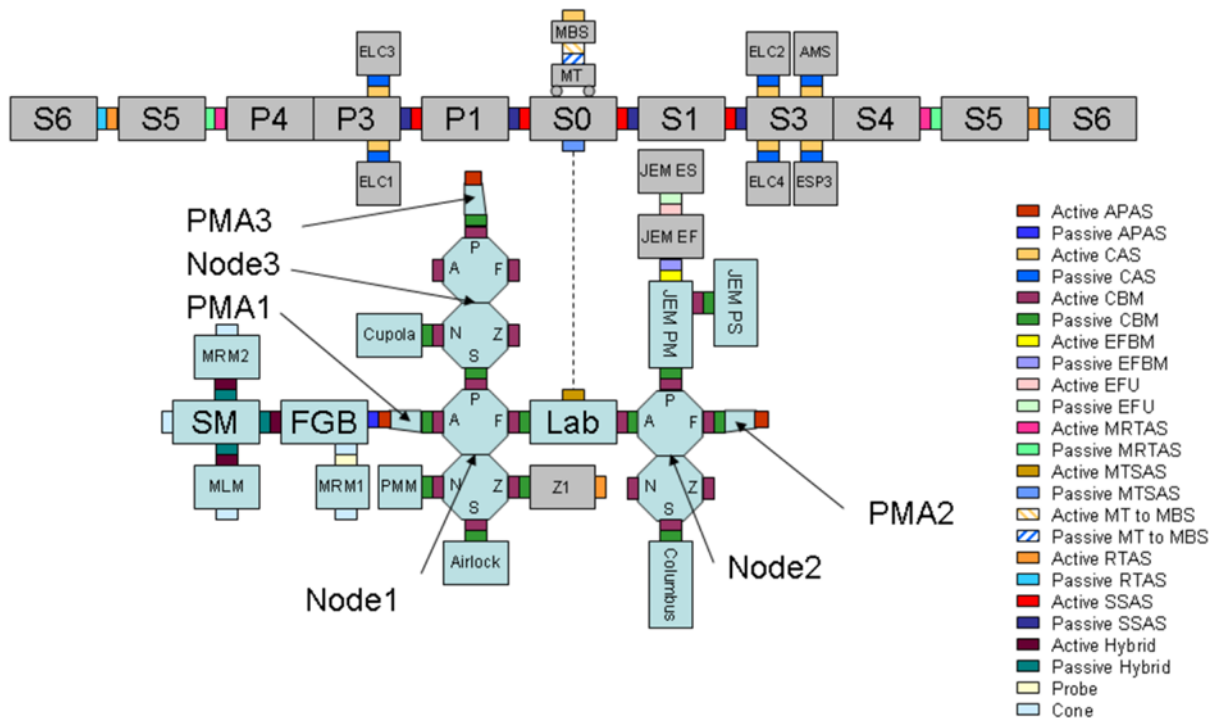


Abbildung 35: Schnittstellenübersicht der verschiedenen ISS-Module (F: Forward, A: Aft, Z: Zenith, N: Nadir, P: Portside, S: Starboard) [85]

3.1.3. Technologien für Nutzlasten (für ESA Experimente)

ISS-Astronauten führen täglich wissenschaftliche Experimente aus einer großen Bandbreite durch bzw. überwachen deren Betrieb: z.B. Humanwissenschaft, Biologie, Physik und Materialwissenschaft, Erdbeobachtung, Astronomie & Astrophysik und Technologie. Durchschnittlich sind es 100 Experimente in fünf Monaten [28]. In jedem Bereich entwickeln dazu Wissenschaftler und Firmen im Auftrag der jeweiligen ISS Partneragenturen Hardware, Software und Prozesse und Rahmenbedingungen. Der ESA ‚European Users Guide to Low Gravity Platforms‘ (2007) beschreibt viele Plattformen sowie deren Zugangs- und Betriebsprozesse [13].

Das europäische ISS Forschungsprogramm wird koordiniert von der ESA im ELIPS Programm. Die Ministerratskonferenz 2014 entscheidet u.a. über den Umfang ab 2014 bis 2020 für Europa. Eine positive Prognose basierend auf der Nachfrage zeigt einen Anstieg in Forschungsinvestitionen in Abbildung 36. Die Prognose zeigt auch, dass wissenschaftliche und technologische Kompetenzen und Nutzungsassets in fast allen Bereichen liegen. Die wissenschaftliche Relevanz der unten beispielhaft aufgeführten Experimente und ihrer resultierenden Hardware soll nicht Gegenstand dieser Studie sein.

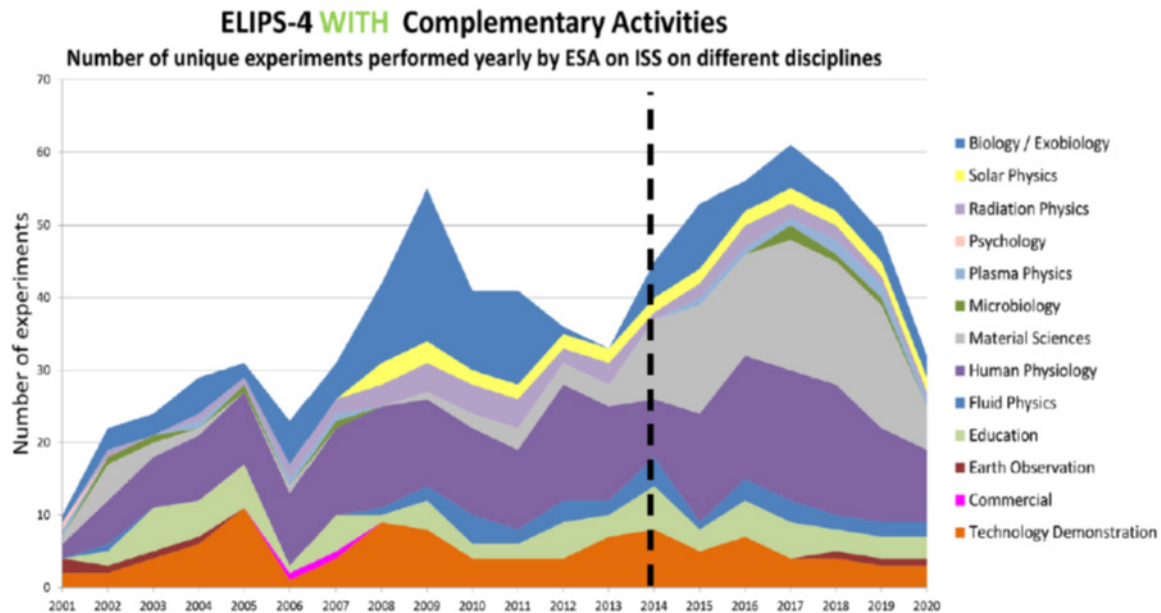


Abbildung 36: Übersicht der Anzahl der ESA ISS Experimente und Disziplinen bis 2014

Erfahrungen aus der DLR ISS Nutzergemeinschaft wurden im Nutzerworkshop vom 20. Mai 2014 ermittelt und zusammengetragen. Die Ergebnisse werden im Laufe der Studie in die Dokumentation eingefügt. Daher werden hier nur einige Bereiche und ihre Technologien der Vollständigkeit halber erwähnt.

Biologie: Die ESA Anlagen bieten Platz für Gravitationsbiologie mit variablen Parametern. Es gibt verschiedene Experimentaufbauten wie intern das EMCS (European Modular Cultivation System) im US Modul Destiny Express Rack 6 für die Zellforschung von lebenden Organismen. EMCS wurde im Auftrag der ESA von Airbus Friedrichshafen (früher: Astrium GmbH) gebaut und ist seit 8 Jahren im Einsatz. Die Anlage unterstützt Kultivierung unter kontrollierter Umgebung in Mikrogravitation (Temperatur, Atmosphäre, Wasserversorgung, Beleuchtung, Beobachtung und verschiedene g-Level).

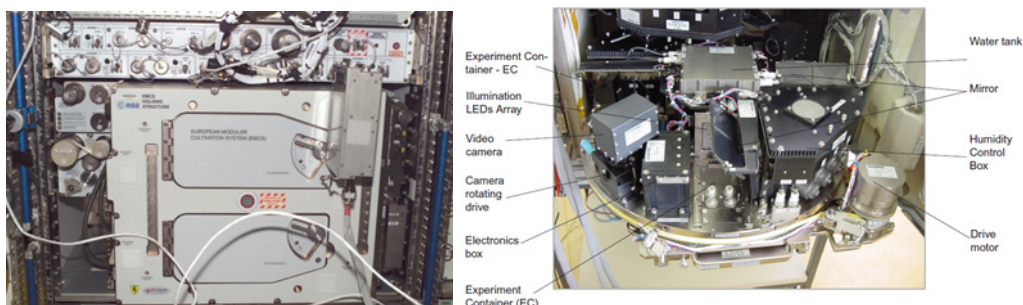


Abbildung 37: ESA Nutzlastanlage EMCS [ESA]

Außen auf dem Columbus Modul bieten die External Payload Facility (EPF) Anlagen die Möglichkeit für Langzeitexperimente für u.a. Exobiologie wie EXPOSE, Debrisforschung und Erdbeobachtung. Strom- und Datenschnittstellen sind z.B. wie bei der ehemaligen EuTEF Anlage vorhanden ebenso wie ein Thermalkontrollsystem. Es können Bakterien und Materialien über 18

Monate dem Weltraum zum Test ausgesetzt oder Schiffsbewegungen verzeichnet (Vessel ID) werden.

Für die Pflanzen- und Nagetierforschung werden inzwischen auch auf der ISS große Fortschritte durch komplexere, größere und zuverlässigere Systeme erzielt [27]. In Europa und Deutschland liegen hier viele Kompetenzen u.a. in den Bereichen: Pflanzenwachstum in kontrollierter Umgebung (Nährstoff-, Licht-, Luft-, Temperatur- und Wassermanagement), Pflanzenphysiologie, Nahrungsqualität, Gewächshausdesign und Betrieb. Eines der neuen erfolgreichen Forschungen im Bereich Biomasseforschung z.B. der NASA ist das ‚Vegetable Productions System‘ (Veggie). Ziel ist das Wachstum von unterschiedlichen Salattypen. Die Hardware bietet eine Mischung aus Licht und Nährstoffen und nutzt die Modul Umgebung für den Thermalhaushalt und als Quelle des CO₂ für das Wachstum. Es ist bisher das größte „Gewächshaus“ im All. Hier versuchen Wissenschaftler anzuknüpfen und das Biomassesystem auszuweiten. Denn nicht nur für die astronautische Langzeit-Exploration ist dies von Bedeutung, sondern auch auf der Erde werden regenerative Lebenserhaltungssysteme und ‚Kammerpflanzen‘ immer populärer bzw. notwendiger (Vertical Farming). Sinnvolle Leistungsanforderungen und den Kreislauf dieser Gewächshäuser groß oder klein zu schließen sind seit Jahrzehnten eine Herausforderung (z.B. Melissa (ESA, TAS-I), Biosphere2 [38], SVET auf MIR[39]). Modifizierte Gewächshäuser, welche z.B. in Gebieten hoher Bevölkerungsdichte (Vertical Farming) oder wüstenähnlichen Regionen eingerichtet werden könnten, sind eine Möglichkeit diese Regionen agrarwirtschaftlich nutzbar zu machen. Molecular Farming kann für die Züchtung von speziellen Heilmitteln genutzt werden.

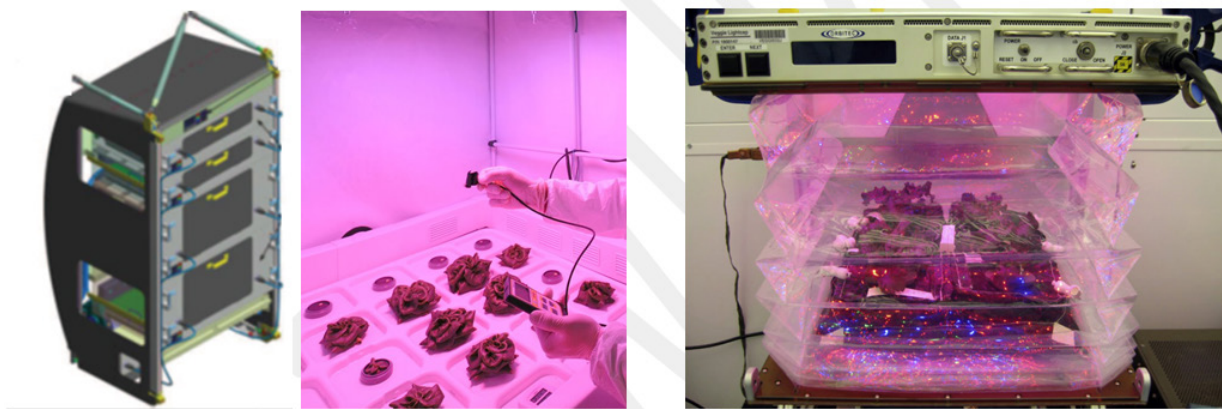


Abbildung 38: li: Vorbereitung Analog/ISS Experimente (Melissa, EDEN), re: Veggie ISS Experiment [DLR, TAS-I, NASA]

Es gibt eine große Auswahl an Racks oder freiliegenden Anlagen und Instrumenten für verschiedene Betriebsmodi, die Analysen voll oder teil-automatisiert erlauben sowie z.B. die MSG für die Analyse von gefährlicheren Proben ermöglichen.

Kleinere Experimentanlagen wie OREOCUBE können in-situ spektroskopische Messungen der Massen unter Sonnen-UV Licht untersuchen. Hierbei handelt es sich um identische 10-cm Kuben à 2 kg und jeder beinhaltet ein im UV-Bereich-NIR hochauflösendes Spektrometer sowie ein 24-Probenkaroussel. Integraler Bestandteil der Optik ist, das Sonnenlicht als Lichtquelle für die Spektroskopie zu verwenden. Jeder Kubus stellt hier zum Beispiel ein autonomes Instrument mit

entsprechender Elektronik, Mikrocontroller, und Datenspeicher dar mit Standard Strom- und Datenschnittstelle.

Human-Physiologie: Viele Untersuchungen an ISS Probanden beginnen mit Fragebögen und gehen bis zur Blut und Urinprobensammlung. Proben werden in dem speziell angefertigten Tiefkühlschrank MELFI gelagert bis sie zum Boden zur weiteren Analyse zurücktransportiert werden können. Verschieden große und kleine Anlagen wie das HRF-1 im Destiny Modul oder HRF-2 im Columbus Modul unterstützen die Arbeit mit u.a. physiologischen Instrumenten, Laptops und Kühleinheiten für Verbrauchsmaterialien mit RFID für automatisierte Inventur (Abbildung 39).

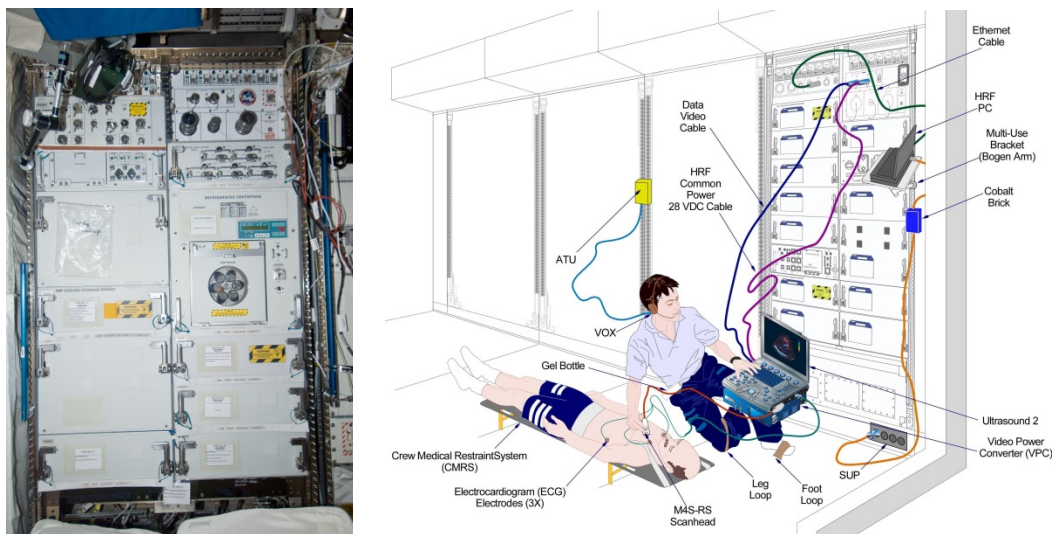


Abbildung 39 HRF-2 im Columbus Modul, Ultraschall Experimentaufbau am HRF-1 [NASA]

Im Hinblick auf Exploration bereitet man 2 Crews für den Langzeitaufenthalt in Mikrogravitation vor.

Forschung im Rahmen von Schlüsseltechnologien ist aktuell im EML hinsichtlich der Metallschmelzen zu sehen oder wenn am Astronauten Untersuchungen zum Knorpelstoffwechsel durchgeführt wird. Das sind einzigartige Datenpunkte in der Humaphysiologie, deren Anzahl an Stichproben zu gering für eine statistische Relevanz sind.

Mehr Informationen folgen in Kapitel 3.1.1 und 4.1.2, und weitere werden mit der Auswertung des Nutzerworkshops der Dokumentation beigefügt.

3.2. Logistik ISS

Astronautische Vorhaben basieren auf ähnlichen Aufbau- und Versorgungsszenarien und schlussendlich auch Entsorgungsszenarien. (Abschnitt 3.5). Die Planung der ersten Generationen von Raumstationen begann 1964 in der Sowjetunion (Saljut-1 Start 1971) und wurde mit der ersten permanent bemannten Raumstation MIR 1986 fortgesetzt. Der MIR folgte die ISS als

permanent besetzte Station und derzeit wird die chinesische Station auf eine permanente Besatzung vorbereitet.

3.2.1. Vergleich Aufbau MIR und ISS

Für den Aufbau der MIR Orbitalstruktur wurden insgesamt mehr als 40 Progress/Proton Flüge (4 Flüge/Jahr, 1986-1996) benötigt. Wohn- und Arbeitsmodule und Knoten im Orbit gehören dazu sowie zusätzlich ab 1995 das mit dem Space Shuttle transportierte Docking Modul und andere Elemente (e.g. Solarpaneele, Experimente). Mit dem Design der rückkehrfähigen Kapseln der Progress-M und den Space Shuttles konnten erste Experimente wieder für die Analyse am Boden zurück transportiert werden. Um die 20 Tonnen pro Modul konnten durch Proton K jeweils in den Orbit transportiert werden. Insgesamt dauerte es bis zur Komplettierung der Station und zum nominalen Betrieb 10 Jahre, wobei die Bandbreite der wissenschaftlichen Nutzung kontinuierlich mit jedem Modul erweitert wurde (Tabelle 11).

Tabelle 11: Zeitrahmen des MIR Aufbaus durch Proton [30]

Zeit	Modul	Launchsite	Zeit	Modul	Launchsite
Februar 1986 <small>1986 erste Besatzung</small>	DOS-7 (Kernmodul) Masse: 20,4t LxØ: 13,3m x 4,15m Ports: 6, 2 Solarpaneele Triebwerke: 2x300kg Schub	Baikonour	Mai 1990	KRISTALL Modul Masse: 19,6t LxØ: 11,9m x 4,35m Ports: 2, 2 Solarpaneele	Baikonour
März 1987	KWANT-1 Modul Masse: 20,6t LxØ: 5,3m x 4,35m Ports: 2, mit wiss. Ausrüstung, Lagekontrolle	Baikonour	Mai 1995	SPEKTR Modul Masse: 19,6t LxØ: 9,1m x 4,35m Ports: 1, 4 Solarpaneele mit wiss. Ausrüstung	Baikonour
November 1989	KWANT-2 Modul Masse: 19,6t LxØ: 12,2m x 4,35m Ports: 1, 1 Luftschleuse mit wiss. Ausrüstung	Baikonour	April 1996	PRIRODA Modul Masse: 19,7t LxØ: 9,7m x 4,35m Ports: 1, mit wiss. Ausrüstung	Baikonour

Die ISS benötigte bis 2009 ca. 40 Aufbauflüge (3-4Flüge/Jahr) mit Proton, Shuttle und Sojus, um alle Kernmodule, Knoten und andere Außen- und Innenstrukturen in den Orbit zu bringen. Insbesondere durch die Shuttle-Unfälle ergaben sich erhebliche Verzögerungen (ursprünglich geplante Fertigstellung etwa im Jahr 2004). Insgesamt dauerte es ca. 11 Jahre bis zur Komplettierung der Kernstation und dem Beginn des nominalen Nutzungsbetriebs mit voller Besatzung (6 Personen, Tabelle 12).

Tabelle 12: Auszug aus dem Aufbau des ISS-Kerns durch Proton und Space Shuttle

Zeit	Modul	Launchsite	Zeit	Modul	Launchsite
November 1998	Zarja Modul FGB Masse: 19,3t LxØ: 12,6m x 4,11m Ports: 3, 2 Solarpaneele mit wiss. Ausrüstung	Baikonour	Oktober 2007	Harmony (Knoten 2) Masse: 14,8t LxØ: 6,7m x 4,3m Ports: 6	KSC

Zeit	Modul	Launchsite	Zeit	Modul	Launchsite
Dezember 1998 [12]	Unity (Knoten 1) Masse: 11,9t LxØ: 5,7m x 4,57m Ports: 6, Racks mit LSS, Steuerung	KSC	Februar 2008	COLUMBUS Modul Masse: 19,3t LxØ: 6,9m x 4,5m Ports: 1 mit wiss. Ausrüstung	KSC
Juli 2000 2000 erste Besatzung	Zwesda Modul, DOS8 Masse: 19t LxØ: 13,1m x 4,35m Ports: 4, 2 Solarpaneele, DMS-R	Baikonour	März/Mai 2008 und Juli 2009 (EF) [31]	KIBO (+rob.Arm und Schleuse) Masse: 14,8t(PM)+4,1t(EF)+4,2t(ELM) LxØ (PM): 11,2m x 4,4m Ports(PM): 2, 1 Fenster mit wiss. Ausrüstung intern&extern	KSC
Dezember 2000	P6 mit Generatoren u Radiatoren (1 von 4) Masse: ~15,8t LxBxH: 10m x 5mx5m	KSC	Februar 2010	Tranquility (Knoten 3) Masse: 18t LxØ: 6,7m x 4,3m Ports: 6, ECLSS ISS, CUPOLA am Knoten 3 Masse: 1,8t HxØmax: 1,5m x 3m	KSC
Februar 2001 [12]	ISS, Destiny Masse: 14,5t LxØ: 8,4m x 4,2m Ports: 2, 1 Fenster mit wiss. Ausrüstung	KSC	Mai 2010 [12]	ISS, RASSWET (MRM) Startmasse: 5t LxØmax: 6m x 2,3m Ports: 1 mit wiss. Ausrüstung, Lager	KSC
Juli 2001 \$US164Mio	ISS, Quest Masse: 6t LxØ: 5,5m x 4m	KSC	Februar 2011 [12]	ISS, PMM Leonardo Masse: 4,4 bis 13,2t LxØ (PM): 6,6m x 4,5m(extern) Ports(PM): 1 (US) mit Ausrüstung und Stauraum	KSC
Sept 2001 [12]	ISS, PIRS Masse: 3,8t LxØmax: 4,9m x 2,55m				

3.2.2. Versorgung/nominaler Betrieb

Jede bemannte Station wird regelmäßig mit Gütern wie Nahrung, Sauerstoff, Treibstoff, Ersatzteilen und Experimenten versorgt und zusätzlich geleert durch rückführbare und nicht rückführbare Kapseln. Insgesamt verzeichnet die MIR 28 Besatzungen (Ø3 Personen) und seit 1995 kontinuierliche Shuttlebesuche. Für eine relativ kontinuierliche Versorgung der MIR mit Astronauten und Gütern fanden insgesamt Ø7 Flüge/Jahr statt, wobei 65 Progress Flüge und 40 bemannte Flüge für den Routineaustausch von Kosmonauten und später Astronauten mit dem Space Shuttle [29, Anhang] folgten. Die 66ste Progress M1-5 zur MIR wurde für das Deorbit Manöver genutzt (Kapitel 3.5).

Es gab von 1998 bis Juni 2014 ca. 68 unbemannte Flüge zur kontinuierlichen Versorgung der ISS sowie 76 astronautische Flüge (Shuttle und Sojus) für den Routineaustausch von Kosmonauten und Astronauten, insgesamt ca. Ø 8 Flüge/Jahr [32]. Insgesamt verweilten bis Juni 2014 40 Besatzungen auf der ISS seit 1998 [29, Anhang]. Während der Aufbauphase bis 2011 waren bis zu 8 Flüge im Jahr notwendig (Ø 5Flüge/ Jahr). Während der nominalen Betriebsphase seit 2012 und Einstellung des Space Shuttle gibt es durchschnittlich 8 unbemannte und 4 bemannte Versorgungsflüge pro Jahr. Nach Einstellung des ATV und HTV werden die neuen Vehikel der USA und die Sojus die minimale bis nominale bemannte und unbemannte Versorgung allein

übernehmen. Japan entwickelt sein HTV als Wiedereintrittskapsel HTV-R weiter, welche ca. 2016 betriebsbereit sein soll.

Tabelle 14 zeigt im ANNEX die aktiven Versorgungsvehikel für den nominalen Betrieb der Internationalen Raumstation ISS und die Aufbau und Versorgungsvehikel für die Chinesische Raumstation. Sie gibt außerdem einen Überblick zu den notwendigen Massen/Volumen einer bemannten Station mit ISS Umfang.

Die Logistikanforderungen für den Aufbau und die Versorgung einer Station sind für eine kleinere Station mit Forschungsmodulen wie der MIR von ähnlicher Größenordnung wie für eine Station mit größerem Forschungsspektrum wie der ISS. Erst bei Reduktion der Forschungsmodule und astronautischen Besuchen verringert sich auch der Aufbau- und Versorgungsaufwand merklich. Im Durchschnitt dauert der Aufbau ca. zehn Jahre. Die Raketenkapazitäten für den Aufbau umfassten bisher ca. 20t pro Start, welche ausschließlich durch die Proton, Sojus, Ariane5 und das Space Shuttle geleistet werden konnten. SLS z.B. soll zukünftig wesentlich mehr Nutzlastkapazität bieten. Die betrachteten Logistikanforderungen schließen weder den Bodenbetrieb noch den Aufbau und die Wartung der Kommunikationsarchitektur für die Stationen ein.

3.2.3. Kommunikation

Die ISS nutzt derzeit TDRS (S-Band 192kbps Downlink und 72kbps Uplink / Ku-Band 50Mbps¹⁰ für Up- und Downlink) und DRTS „KODAMA“ (Ka Band) als geostationäre Satelliten für die kontinuierliche Kommunikation (Astronauten, technischen Daten) mit den Bodenkontrollzentren. [73, 31] Zwischen der ISS und der beim EVA befindlichen Crew und zwischen z.B. Sojus-ISS-Boden wird mit UHF kommuniziert. Der sich in der Entwicklung befindende europäische Daten-Relay-Satellit EDRS soll als Columbus Kommunikationsmöglichkeit benutzt werden. Die Unterstützung der ISS Kommunikation durch EDRS ist jedoch noch offen. Insgesamt liegt die Kommunikationsabdeckung mit dem Boden bei ca. 70%.

3.2.4. Bodensegment

Aufbau und Betrieb der Raumstation und ihrer experimentellen Nutzlasten stützen sich auf eine Bodeninfrastruktur, die alle Phasen von der Entwicklung, dem Bau über den eigentlichen Missionsbetrieb inklusive Wartung der Systeme bis hin zur Rückführung von Experimenten, Proben und Flugelementen abdeckt. Gemäß der Aufgabenverteilung in dem in Toulouse beschlossenen europäischen Raumstationsprogramm sind die – im wesentlichen industriellen – Anlagen für Entwicklung, Integration, Test und logistische Unterstützung primär in Italien, Frankreich und Deutschland (Columbus Modul) angesiedelt. Ariane 5 ist im Stationszenario für Transportaufgaben und die Versorgung der Station zuständig. In Deutschland existieren zwei Kontrollzentren: GSOC in Oberpfaffenhofen (Columbus-Betrieb) und MUSC

¹⁰ Es ist geplant, die Bandbreite bis 300Mbps auszubauen.

(Nutzlastanlagenbetrieb) in Köln. MUSC stellt eine Verbindung zwischen Wissenschaftlern am Boden und der Crew im Stationslabor her. Dem Experimentator wird so die Möglichkeit der unmittelbaren Beobachtung seines Experimentes und der direkten Einflussnahme auf dessen Ablauf gegeben. Der Betrieb vom ATV wird im Kontrollzentrum in Toulouse übertragen. Das europäische Astronautenzentrum EAC in Köln übernimmt in enger Zusammenarbeit mit dem deutschen Crew-Trainingszentrum des DLR die Ausbildung, das Basistraining und die Betreuung der europäischen Astronauten.

Die ISS wird seit über 15 Jahren durch ein komplexes Netzwerk global betrieben. Dazu gehören u.a. die Versorgungsvehikel, deren Startplätze, Auffüllen des Treibstoffs, Versorgung mit Experimenten und die Wartung der Anlagen und die Entsorgung der Abfälle. Jeder der fünf ISS Partner hat hierbei seine Pflichten zu erfüllen. Abbildung 40 stellt nur einen Auszug der Aufgaben am Boden dar. Oft können Nutzer/Forscher der ISS direkt von Ihrem Standort aus ihre Experimente verfolgen. Im Jahr 2000 führte man bei NASA eine detaillierte Analyse zum Betrieb und seinen verschiedenen Facetten und den dadurch u.a. notwendigen Bodenarchitekturen, den regelmäßigen Wartungen und den Aktionen in Notfällen durch, welche u.a. in Berichten wie [33, 34, 35] der NASA zu finden sind.

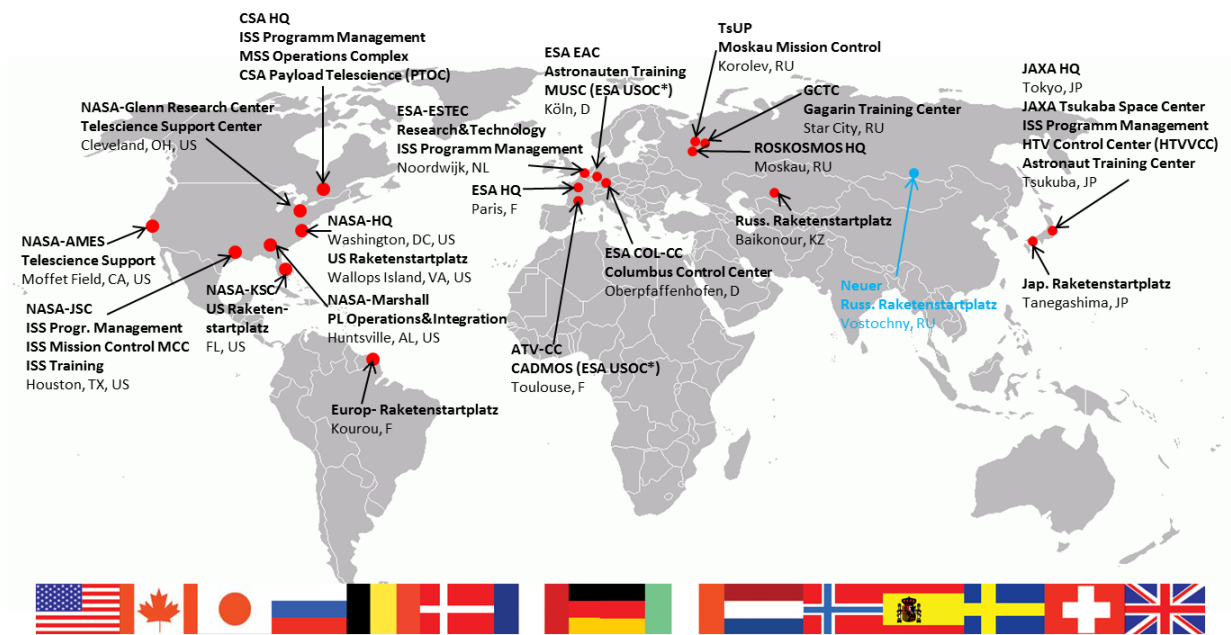


Abbildung 40: ISS Betrieb und Management (ESA USOC [36]) [12]

Am Beispiel des Columbus-Kontrollzentrums und der bisher neun Nutzerunterstützungszentren¹¹ sind die Mindestanforderungen des Betriebs dargestellt. Selbst wenn eine Auslagerung an die Wissenschaftler, wie bereits heute teils implementiert, ausgeweitet würde, würde sich der Aufwand marginal verringern. Zusätzlich sind auch die Sicherheitsanforderungen hinsichtlich der Gefahr des sogenannten „Hackens“ zu berücksichtigen. Abbildung 41 zeigt die internationale Vernetzung vor allem auch für Europa. In den letzten Jahren wurde die Architektur optimiert

bzw. wurden aufgrund des reduzierten Budgets im ISS Betriebsprogramm die Aufgaben umverteilt.

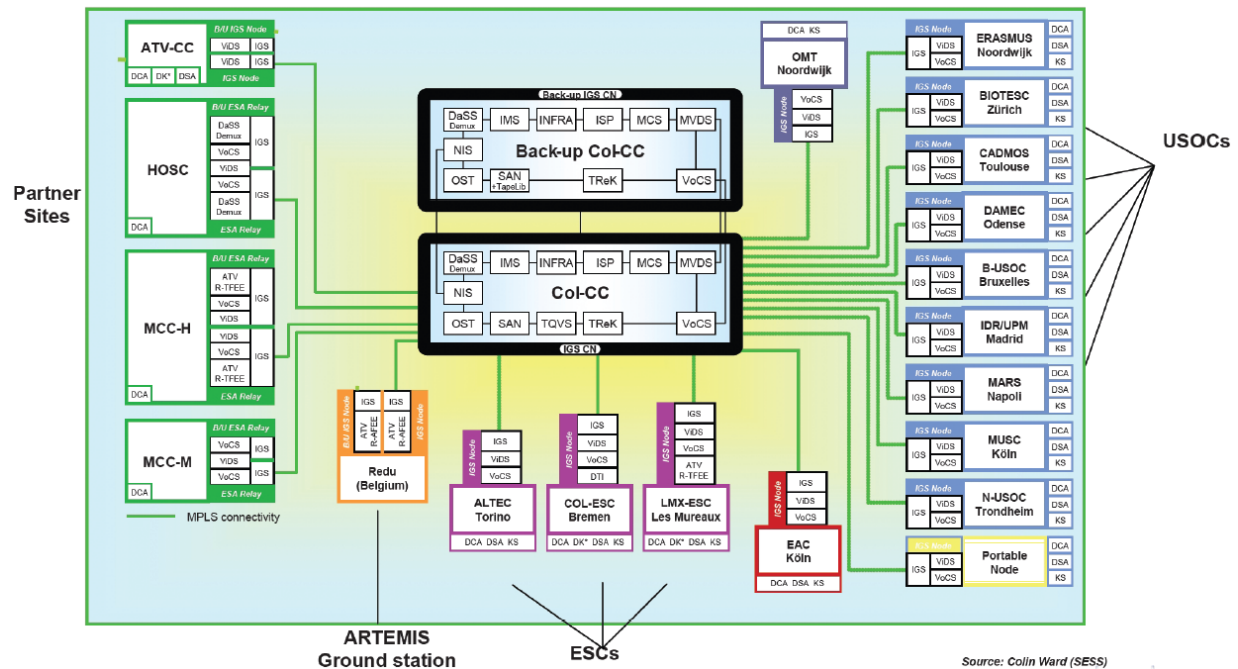


Abbildung 41: COL-CC und seine Kommunikationsinfrastruktur¹¹ [ESA]

3.3. Bewertung Nutzung und Kosten

3.3.1. Darstellung erreichter Ziele

Schon mit dem Shuttle-MIR Programm wurden vier wichtige Ziele als Orientierung zur Entwicklung des astronautischen Raumfahrtprogramms gesetzt [6, 19] und erreicht. Diese treffen auch auf die ISS zu:

- 1) Lernen wie man mit internationalen Partnern arbeitet
- 2) Risikoreduktion beim Aufbau einer Raumstation
- 3) Erfahrungssammlung für Langzeitmissionen (Kelly und Komienko bleiben von März 2015 bis März 2016 auf der ISS)
- 4) Durchführung von Wissenschaft in Schwerelosigkeit

Großes Ziel der Raumfahrt ist die Nutzbarmachung des Weltraums für die Lösungsunterstützung terrestrischer Probleme. Da die technischen Anforderungen an die Raumfahrt so hoch sind, fällt im Allgemeinen technologisches Know-how auch für ganz andere Zwecke ab. Raumfahrt ist eine Querschnittstechnologie, eine „Technik“ quer durch die verschiedenen Lebensbereiche. Ziel ist also nicht nur die Lösung abstrakter Grundlagenfragen, sondern auch die Lösung praktischer Probleme.

¹¹ Erasmus wurde im Zuge der ISS Betriebskosteneinsparung bereits geschlossen. MARS soll Ende 2014 geschlossen werden. Es gibt insgesamt ab 2015 sieben USOCs (Nutzerunterstützungszentren).

Wissenschaftliche Grundlagenforschung und Experimente wurden und werden gegenwärtig relativ intensiv im Bereich der Raumfahrtmedizin und Biologie durchgeführt. Hier konnten schon wichtige Erkenntnisse zur Gesunderhaltung von Astronauten bei Langzeitaufenthalten im Weltraum gewonnen werden. Es gibt aber noch viele offene Fragen beim Verständnis des Einflusses der Weltraumumgebung (Mikrogravitation, Strahlung, Vakuum,...) auf lebende Organismen und insbesondere auf Menschen. Zum Beispiel wurde die ISS im Rahmen der Shuttlemission STS-127 in 2009 mit von DLR und Uni Kiel entwickelten Messinstrumenten zur Erforschung der Risiken der Strahlenbelastung ausgestattet (DOSIS, DOSTEL). Allerdings wäre längerfristig auch die Untersuchung der (gefährlicheren) Strahlenbelastung außerhalb des Schutzes der Erdmagnetosphäre von großem Interesse. Insgesamt kann auch ein nützlicher wissenschaftlicher Transfer in die terrestrische Medizin/Biologie festgestellt werden. Festzuhalten bleibt, dass ein Großteil dieser Forschung dem Ziel der Gesunderhaltung der Astronauten bei Langzeitmissionen im Weltraum dient und daher letztlich einer Rechtfertigung durch andere Gründe und Ziele bedarf (z.B. Exploration), die einen Aufenthalt von Menschen im Weltraum erfordern.

Forschung unter Mikrogravitationsbedingungen auf der ISS betrifft weiterhin die Bereiche Materialwissenschaften, Flüssigkeitsphysik und Verbrennungsprozesse, sowie (neuerdings bzw. zukünftig) komplexe Plasmen, granulare oder kolloidale Systeme ('soft matter') und Fundamentalphysik (Relativitätstheorie, Gravitationsphysik, Quantenphysik). Während die ersten drei der genannten Forschungszweige bereits seit Jahrzehnten bearbeitet werden und auch eine gewisse kommerzielle Verwertung in Industrie und Wirtschaft aufweisen (z.B. Gießerei bzw. Treibstoff-Transport und -Verbrennung bei Luft-/Raumfahrzeugen), sind die restlichen relativ neu mit noch unausgeschöpftem Innovationspotenzial. Ob hier entsprechende neue Ideen (z.B. Plasmakristalle) neben Grundlagenerkenntnissen längerfristig einen Durchbruch bei Anwendungen bringen bleibt abzuwarten. Ohnehin ist die Diskussion und Polarisierung hinsichtlich Bedeutung von grundlagenorientierter gegenüber anwendungsorientierter Forschung wenig zielführend, da - insbesondere bei neuartigen Forschungsrichtungen - Verwertungsmöglichkeiten oft zufällig und in großen zeitlichen Abständen entstehen. Bisher sind in deutsch-russischer Kooperation (MPE-Garching und Russ. Akad. der. Wiss. bzw. JIHT-Moskau) zwei Plasmakristall-Experimentanlagen auf der ISS erprobt worden (PKE-Nefedov, 2001-2005 und PK-3 Plus ab 2005), eine weitere modifizierte Anlage PK-4 soll 2014 gestartet werden. Mit dem US-Shuttle Discovery (STS-128) wurde in 2009 das europäische 'Material Science Laboratory' MSL zur Raumstation gebracht zur Untersuchung von Grundlagenprozessen bei der Herstellung metallischer Legierungen und Halbleiter und zur Messung ihrer thermophysikalischen Eigenschaften. Ziel ist die Optimierung terrestrischer Produktionsprozesse. Weiterhin lieferte das 'Space Shuttle' die von CNES entwickelte und gemeinsam mit NASA zu nutzende 'Multi-User-Facility' DECLIC zur Erforschung transparenter Medien/Flüssigkeiten und ihrer kritischen Punkte.

In Kooperation des DLR mit der Akademie der Wiss. St Petersburg und Roskosmos (Russland) sollen zur Untersuchung von Erstarrungsphänomenen in den Materialwissenschaften ab 2014 das

in D entwickelte EML-Labor (elektromagnetischer Levitator zur Erzeugung berührungsloser elektrisch leitender Schmelzen) im Columbus-Modul sowie der russische Vakuum-Ofen MZEV im russischen Teil der ISS gemeinsam betrieben werden. Mit US-Partnern laufen Anträge zu ähnlichen Projekten (Ordnungsphänomene in Schmelzen, Erstarrung, Fluidodynamik) unter Nutzung des EML. Japan plant in der Zukunft den Start seines ESL-Labors (elektrostatischer Levitator zur Untersuchung der Zustände nichtleitender Materie und ihrer thermophysikalischen Eigenschaften).

Experimente zu fundamentalphysikalischen Fragestellungen (z.B. Konstanz der Fundamentalkonstanten [65]) und ihr technologischer Bezug - insbesondere Messung von Frequenz, Zeit und Beschleunigung - werden bereits auf Satelliten durchgeführt. In naher Zukunft auch die Raumstation hier als Plattform dienen. Solche Experimente können erst unter der Bedingung des freien Falls, also ohne Störungen und in Mikrogravitation, ihr volles Potenzial entfalten. Uhren auf Mikrowellenbasis sind bereits für den Einsatz in 2016 auf der Raumstation geplant ('Atomic Clock Ensemble in Space', ACES, als externe Nutzlast auf der Columbus-Plattform[66]). Viele Fragestellungen betreffen auch die Relativistik und Gravitationsphysik. Mit makroskopischen Testmassen soll das Äquivalenzprinzip auf einer Relativskala von 10^{-15} getestet werden (MICROSCOPE[67]). Steigern lässt sich solche Genauigkeit durch atomare Inertialsensoren auf Interferometriebasis (Materiewelleninterferometrie). Diese hochgenauen Sensoren haben als „Testmasse“ Ensembles von ultrakalten Atomen, die sich durch ihre reduzierte kinetische Energie sehr gut kontrollieren lassen. Als Quelle dienen im speziellen Bose-Einstein-Kondensate (BEC), die einen makroskopischen nichtklassischen Quantenzustand darstellen. Die technische Machbarkeit ist bereits am ZARM-Institut in Bremen gezeigt worden. Das Projekt QUANTUS [68] konnte ein erstes Bose-Einstein-Kondensat im Fallturm realisieren. NASA plant das Studium dieser ultrakalten Quantengase auf der ISS im vom JPL entwickelten 'Cold Atom Laboratory' CAL. Zur Grundlagenphysik gehört auch das mit signifikanter deutscher Beteiligung gebaute und als externe Nutzlast auf der ISS installierte Experiment AMS ('Alpha Magnetic Spectrometer') zur Messung der kosmischen Strahlung und Suche nach 'dunkler Materie'. Erste Anzeichen für letztere deuteten sich in Messungen bereits an.

Technisch von besonderer Bedeutung bei der ISS ist natürlich das Lebenserhaltungssystem. Hier konnten europäische Firmen (z.B. EADS Astrium Friedrichshafen) bereits durch entsprechende Technologieentwicklungen und Erfahrungen beim Einsatz wichtige Erkenntnisse gewinnen (z.B. Luft-Versorgung/-Reinigung, Sauerstoff-Recycling, Feuchtigkeits- und Thermalkontrolle), wenn auch die europäischen Raumstationskomponenten noch stark vom amerikanischen Teil abhängen. Hinzu kommen für Europa Erfahrungen beim Betrieb der Raumstation, bei der Versorgung, beim Einsatz und automatischen Andocken des ATV inkl. Bahnanhebung der ISS, vereinzelt bei EVAs ('Extravehicular Activities') und vielem mehr. Hervorgehoben wird auch oft die gewonnene Erfahrung beim Management eines so umfangreichen internationalen Großprojektes wie die ISS. Im Bereich Robotik wurden erste Experimente unter Einsatzbedingungen im Weltraum durchgeführt.

Eine kommerzielle Nutzung des Weltraumlabor unter finanzieller Beteiligung der Industrie hat bisher kaum stattgefunden. ESA und DLR haben in den Anfangsjahren der ISS auf großer Breite und mit diversen Initiativen versucht eine kommerzielle Nutzung aufzubauen [41]. Übriggeblieben sind die sog. ESA MAP-Vorhaben. Hierbei werden vor allem bei industrienahen Materialexperimenten diverse Proben und Kartuschen der forschenden Firmen mit eigenen Beiträgen bereitgestellt (z.B. von der Fa. Hydroaluminium). Da die Prozesse für geförderte Grundlagenforschung nicht zwingend auf die forschende Industrie anwendbar sind, wurde zum Beispiel in den industriellen Reviews (nicht zu verwechseln mit einem Peer Review) sowohl die ISS Laborrelevanz als auch ein Mini-Business Plan geprüft. Bonus für die Firmen hier ist eine individuelle Begutachtung der Vorhaben sowie die Zusicherung der Intellectual Property, IP. Die Kosten für die Entwicklung der HW/SW, Tests (Labor und Parabelflug), Logistik und Dokumentation liegen bei den forschenden Firmen. Im Programmvertrag mit der ESA standen bis zu 30% der Nutzungsressourcen [44] der industriegetriebenen ISS Nutzung zu. Aufgrund der harten Konkurrenz zur staatlichen Förderung der Wissenschaftsforschung im Vergleich zur erwarteten Kostenbeteiligung blieb der Erfolg gering. Außer in D (GoSpace) existiert nur noch in den USA eine nennenswerte industrie-getriebene Nutzung. Die NASA Initiative CASIS [42] wirbt seit 2011 zusammen mit kommerziellen 'Payload Integrator' [43] (z.B. Nanoracks, Orbital Sciences) bei Unternehmen mit größeren Forschungsbudgets, die ISS als erweitertes Forschungslabor für sich als Vorteil zu nutzen. Die Wirtschaft verlangt häufig „schnelle Ergebnisse“, das heißt u.a. einen schnellen Zugang. Für anwendungsnahe Forschung, innovative Ideen, sowie eine schnelle Umsetzung einer Idee hin zum Experiment, die für einen wirtschaftlichen Vorteil im Markt entscheidend sind, erweisen sich die bestehenden Prozesse und Regularien in den Agenturen als unbrauchbar und bedürfen einer teilweise sicherlich drastischen Anpassung. CASIS wirbt mit von NASA bereitgestellten Flugmöglichkeiten. NASA stellt die Onboard Ressourcen und die Kommunikationsmöglichkeiten zur Verfügung. Die Firmen tragen somit maximal die Kosten der Experimententwicklung und in wenigen Fällen die Kosten für entsprechende Qualifikation der Hardware. Will man auch in D die Industrie für eine Nutzung der ISS gewinnen, bleibt zunächst wohl nichts anderes übrig, als die Kosten für Transport, Akkommodation und Onboard Ressourcen von kommerziellen Experimenten auf der ISS durch die Agenturen tragen respektive bei der ESA auf das D-Kontingent „buchen“ zu lassen. Fraglich bleibt, ob dadurch ein deutliches Interesse der Industrie entwickelt werden kann. Fakt ist, dass es bisher nicht erkennbar ist.

Zukünftig sollen sich kommerzielle US-Unternehmen bei der unbemannten und bemannten Versorgung der Raumstation stärker in Eigenverantwortung engagieren, z.B. 'SpaceX' mit seiner 'Dragon-' und 'Orbital Sciences' mit seiner 'Cygnus-Kapsel' (Abbildung 42) sowie 'Bigelow Aerospace' mit seinen entfaltbaren Habitat-Modulen. Für Europa birgt dies zukünftig die Gefahr, dass statt 'Barter-Abkommen' mit NASA für Transport europäischer Astronauten eventuell Bargeldzahlungen an US-Unternehmen zu leisten wären.

Ziel der NASA ist es, den sogenannten kommerziellen Anbietern die Nutzung, Versorgung und teils den Betrieb der Plattformen im niedrigen Erdborbit zu überlassen. Ob sich der selbstregulierende Kreis besonders hinsichtlich der finanziellen Abdeckung schließen wird, bleibt für die NASA Manager des ISS Programms eine Herausforderung [25]. Zumindest ist erkennbar, dass es derzeit mindestens drei Unternehmen für die unbemannte Versorgung der Station gibt. 2017 will SpaceX mit einer bemannten Kapsel zur ISS also die Lücke nach der Einstellung des Shuttle Programms für die USA schließen.



Abbildung 42 Kommerzielles US- Weltraumtransport-Programm

Bisher gab es wenig signifikante Beiträge zur Erdbeobachtung oder Astronomie. Hier spielt wohl neben der Umlaufbahn auch die eingeschränkte Ausrichtgenauigkeit der Raumstation (s.o. 'Daten zur ISS') und die durch den Betrieb induzierten Störungen eine wesentliche Rolle. Dies könnte sich aber zukünftig ändern, wie erste Planungen in der Erdbeobachtung der USA andeuten. Der Start zweier Experimente 'CATS' und 'ISS-RapidScat' (Abbildung 43) ist in 2014, ein weiteres - 'SAGE-III' - in 2015 geplant.

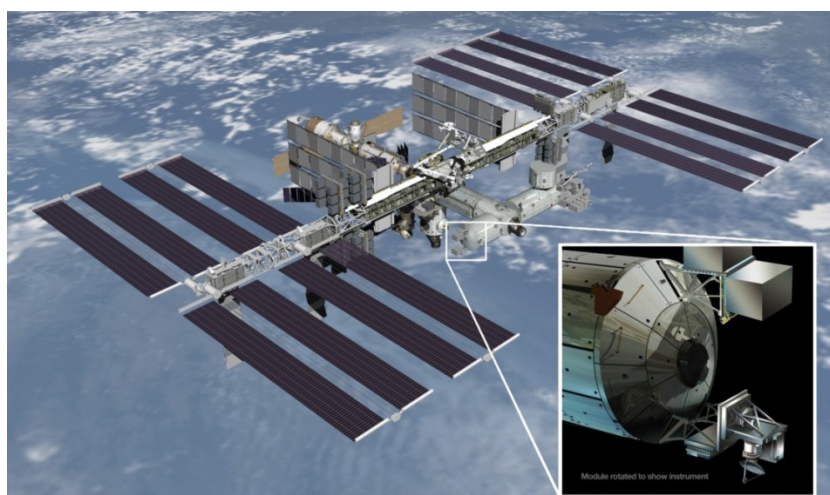


Abbildung 43 US Erdbeobachtungsinstrument RapidScat [NASA]

Andere Nutzungsbereiche prognostizieren die Kommerzialisierung von Subsystemen bzw. Technologien wie z.B. bei regenerativen Lebenserhaltungssystemen bzw. künstlichen

Pflanzensystemen (siehe Kapitel 3.1.3). Auf der ISS erweitert man nicht nur die Pflanzenforschung, sondern arbeitet vor allem an der Schließung der Lebenserhaltungssysteme in Habitaten z.B. durch ACLS. „Mit einem zusätzlich installierten Sabatier-Reaktor soll der aus dem alkalischen Elektrolyseur stammende Wasserstoff mit Kohlendioxid zu Methan reagieren, um damit Wasser bzw. Wasserstoff und Sauerstoff wieder zurückzugewinnen. Methan wird als Abfallprodukt zunächst noch in den Weltraum entsorgt, könnte aber zukünftig auch als gut lagerfähiger Treibstoff verwendet werden. Das ACLS soll im Jahr 2016 auf der ISS im Columbus-Modul installiert werden. Die Verbesserung von Lebenserhaltungssystemen, auch Habitat-Forschung bezeichnet, generiert daher – ähnlich der Ökosystemforschung auf der Erde – kollektiv nützliches Wissen, um Zusammenhänge des eigenen Lebensraums zu begreifen und um diese zu beeinflussen. Zusätzliches Ziel ist die Reduktion der Nachschubmassen. Raumfahrt-Habitat-Technologie kann als Spin-off für die Ökosystem- und Energieforschung auf der Erde verstanden werden. Stoffumsätze laufen im Vergleich zur Erde beschleunigt ab, und Einzelphänomene sind den Untersuchungen besser zugänglich. Möglichkeiten und Grenzen bei der Schließung von Stoffkreisläufen in der Raumfahrt zeigen uns den Weg für den Umgang auf der Erde mit begrenzten Ressourcen wie Sauerstoff, Wasser und Nahrung [...]“[40].

Industriepolitisch hat die ISS durch die einzigartigen komplexen Herausforderungen, die die Infrastruktur im Weltraum stellt, großen und positiven Einfluss auf die technische Weiterentwicklung und Konkurrenzfähigkeit der beteiligten Unternehmen. Nicht zuletzt ist auch die erreichte Zusammenarbeit auf internationaler Ebene zwischen verschiedenen Nationen und politischen Systemen als wichtiger Erfolg zu zählen. Auch in den Bereichen Öffentlichkeitsarbeit und Ausbildung bzw. Begeisterung vor allem der Jugend für technische und naturwissenschaftliche Fragen hat die Raumstation eine herausgehobene Bedeutung.

Die Demonstration europäischer Kompetenz in der bemannten Raumfahrt hat u.a. dazu geführt, dass Europa durch eine Beteiligung am amerikanischen Crew-Raumschiff MPCV zukünftig bei der internationalen Exploration des Weltraums eine Rolle spielen kann.

Schlussfolgerungen

Festzuhalten bleibt, dass Grundlagenforschung alleine bisher keine hinreichende Begründung für Bau und Betrieb der ISS liefert. Dies auch deswegen, weil viele der auf der ISS durchgeführten Experimente ebensogut durch unbemannte robotische Missionen realisiert werden könnten.

Hinsichtlich der weiteren Entwicklung stellt sich die Frage, ob es für den Zeithorizont 2028+ genügend wissenschaftliche, wirtschaftliche und vor allem politische Begründungen für astronautische Aktivitäten im LEO mit entsprechender Infrastruktur gibt - auch unter Berücksichtigung ergänzender Ziele darüber hinaus (cis-lunarer Raum, Lagrange-Punkte, Mond, Asteroiden, Mars). Zur Gewährleistung der Kontinuität in der astronautischen Raumfahrt - insbesondere mit Blick auf die schon geleisteten Investitionen und das erreichte 'Know-how' - ist bei allen beteiligten Nationen der politische Wille gefragt, die astronautische Raumfahrt

langfristig fortsetzen zu wollen. Dieser Wille existiert zumindest in den großen Raumfahrtnationen USA und Russland (und wohl auch in China und Indien). Bei entsprechendem Konsens könnte der Betrieb der ISS mit ausgedehnter Nutzung bis 2024 und sogar darüber hinaus sinnvoll erscheinen. Jedoch empfiehlt sich, die finanzielle Beteiligung Europas zukünftig gleichmäßiger zwischen den ESA-Partnern aufzuteilen. Dabei ist zu bedenken, dass Europa als Juniorpartner in der astronautischen Raumfahrt nahezu vollständig von den Entwicklungen in USA und Russland abhängt, da es keine eigenen bemannten Träger besitzt. Natürlich würden bei Einstellung der bemannten Raumfahrt in Europa wesentliche Teile des entsprechenden 'Know-hows' verlorengehen und müssten bei Wiederaufnahme in späteren Jahrzehnten kostenintensiv aufgearbeitet werden. Ein weiterer Ansatz wäre der der NASA: den LEO neuen Playern in der bemannten Raumfahrt zu überlassen und sich auf die neuen Missionsziele der astronautischen Exploration zu konzentrieren.

3.3.2. Kosten im Vergleich

Der Aufbau der ISS dauerte mehr als 10 Jahre. Nach ESA-Angaben (Abbildung 17) belaufen sich die internationalen Gesamtkosten für ISS-Entwicklung, -Aufbau und -Betrieb bis 2014 auf ca. 100 Mrd. €. ESA's Anteil beträgt ca. 8 Mrd. € (davon Columbus-Entwicklung/Bau ca. 1 Mrd. €, ATV-Entwicklung einschließlich der 5 Flüge ca. 3 Mrd. €), was der 8,1%igen Beteiligung am westlichen Teil der ISS entspricht. Kanada beziffert seine Kosten über die vergangenen 20 Jahre mit 1,4 Mrd. Kanadische \$. Japan hat bisher ca. 5 Mrd. \$ ausgegeben, hinzu kommen jährliche laufende Kosten von ca. 300 Mio. \$. Für die USA belaufen sich die typischen jährlichen ISS-Kosten (Betrieb und Experimente/Wissenschaft) auf ca. 3 Mrd. \$, für Europa auf ca. 300 Mio. €. Zuverlässige Angaben über Gesamtkosten der russischen Seite fehlen, sie können aber grob auf 10-20 Mrd. \$ geschätzt werden. Siehe auch Tabelle 2.

3.4. Risikoanalyse

Risikoanalyse und Risikomanagement zielen auf die möglichst systematische Erkennung, Analyse, Bewertung und Kontrolle von Risiken und Gefahren. Dabei steht die Analyse der identifizierten Gefahren mit Blick auf die Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens und ihrer möglichen Auswirkungen im Mittelpunkt. So wird Risikomanagement auch zum Sicherheitsmanagement. Risiken der verschiedenen Bereiche reichen von vernachlässigbarem bis katastrophalem Schweregrad und den daraus folgenden Kosteneinfluss. Bereiche sind z.B. [ECSS-M-00-03A]

- Design, Bau, Prüfung, Betrieb, Instandhaltung und Entsorgung inklusive deren Schnittstellen;
- Überwachung der Risikofolgen;
- Management, Kosten, Zeitplanung.

Wenn man über die 15 Jahre ISS-Aufbau und -Betriebszeit zurückschaut gibt es viele Aktivitäten, um das Risiko zu minimieren und die Sicherheit und Gesundheit der ISS Crew und Besucher zu erhöhen. Einige Schritte der ISS-Programm-Manager, -Hardware und -Software-Ingenieure, Betriebsspezialisten und Sicherheitspersonal sind im Paper von JSC [77] zusammengetragen. Erst durch die Betriebserfahrung, können viele Risiken erkannt und entsprechende vorbeugende

Maßnahmen eingeleitet werden. Im ISS Programm gab es einige Bereiche, die zunächst nicht mit den gewünschten Sicherheitsanforderungen konform waren und erst über die Zeit dem heutigen Standard entsprechen (z.B. Mikrometeoriten (siehe Abbildung 44) bzw. Orbitdebrischutz, Akustik).

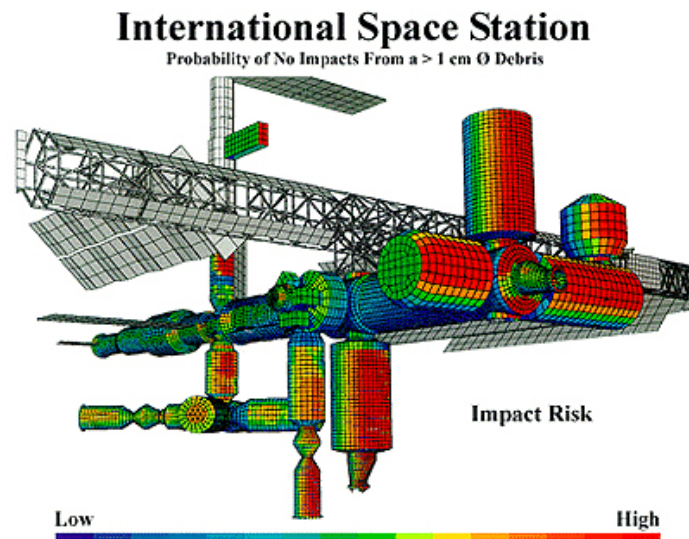


Abbildung 44: Bereiche hohen Einschlagsrisikos durch Weltraummüll nach einem Modell des NASA/JSC-Orbital Debris Program Office [63]

Abbildung 45 zeigt als Beispiel für Risikomanagement Bereiche der ISS mit hohem Einschlagsrisiko durch Weltraummüll nach einem Modell des NASA/JSC-Orbital Debris Program Office [63]. Es folgten eine Reihe von unzureichenden Entwürfen, die später optimiert wurden (z.B. Schadstofflevel von Materialien, Notfallprozeduren und – ausrüstung, Kontrolle über u.a. Leitungen durch die Modulschnittstellen ‚drag-throughs‘, Abbildung 45). In den Anforderungen steht, dass z.B. eine Schotte innerhalb von drei Minuten geschlossen sein muss. Dies stellte ein hohes Risiko besonders während der Shuttle Missionen dar, wobei besonders viel mit zusätzlichen Kabelverbindungen durch den PMA gearbeitet werden musste. Aus Zeiten der MIR Station war dies ein enormes Hindernis zur Sicherung der Station im Falle eines katastrophalen Unfalls (Feuer und Progress-Zusammenstoß).

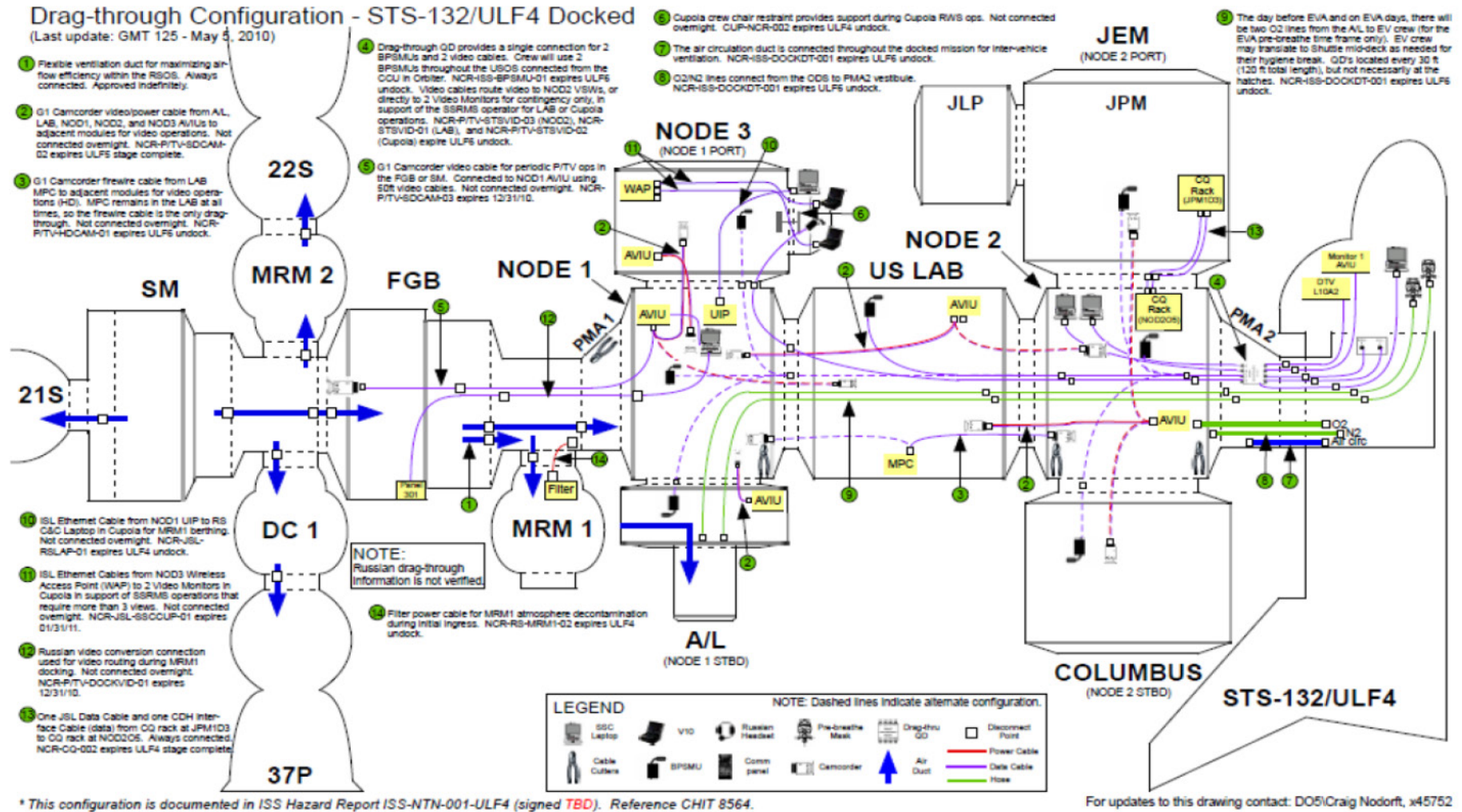


Abbildung 45 'Drag-throughs' auf ISS zu Zeiten des Shuttle

Nicht zuletzt wurden Risiken zunächst unterschätzt und erst im Laufe der Betriebszeit durch entsprechende Maßnahmen adressiert (z.B. scharfe Kanten beim EVA, ‚plasma shock hazards‘). Es kam häufig vor, dass die Handschuhe der EVA Anzüge nicht genügend Schichten hatten. Ein durchgehendes Loch einer bestimmten Größe kann zu schnellem Druckverlust führen. Daher verbesserte man über die Jahre die EVA Anzüge mit verschiedenen und mehr Schutzschichten (mehr zu EVA-Anzügen in Kapitel 3.1.1).

Die ISS befindet sich in der Höhe der Ionosphäre, welche beim Durchfliegen negative Ladungen erzeugen kann. Dies führt u.U. zu Entladungen durch Stromwege durch das Vehikel oder sogar zu Plasmabögen. Zusätzlich fand man heraus, dass bei dem Flug durch das Magnetfeld der Erde – vor allem in der Nähe der Pole – Ströme in der Struktur induziert werden. Positive und negative Potenziale wurden erhöht, je mehr TRUSS Struktur der ISS hinzugefügt wurde. Diese Potenzialunterschiede stellten ein hohes Elektroschock-Risiko für Astronauten während der EVAs dar, da sie Teil des Stromkreises werden könnten - vor allem in der Nähe der Solarpaneele. Daraufhin modifizierte man die EVA Anzüge ein weiteres Mal mit einer isolierenden Schicht. Zusätzlich können durch die Lageänderung der ISS vor einem EVA die durch den Magnetfluss induzierten Ströme auf ein akzeptableres Niveau gebracht werden. [77]

Folgende 'High-Level'-Risiken können beispielhaft bei Raumstationen identifiziert werden:

- Kollisionen mit bemannten oder unbemannten Versorgungsfahrzeugen beim (automatischen) 'Docking' oder 'Berthing' (Einfangen und Ankoppeln von Nachschubsystemen mit Roboterarm). Hier hatte es bei der MIR-Station ein schweres Unglück gegeben.
- Einschlag von Weltraummüll und Zerstörung wichtiger Systeme oder Erzeugung von Lecks in druckbeaufschlagten Modulen (relativ geringes Risiko bei größeren Bruchstücken ab ca. 10cm Durchmesser wegen der Möglichkeit von Gegenmaßnahmen durch Bahnkorrektur der Station; Zentimeter große Teilchen bilden aber ein nicht zu unterschätzendes Risiko für Lecks)
- Fehlfunktionen bei der Versorgung der Raumstation mit Atmosphäre und elektrischer Energie, bei der Kommunikation, der Thermalregelung oder bei der Steuerung der ISS (Lageregelung, Bahnanhebung)
- Feuer an Bord (auch ein Vorkommnis bei der MIR-Station)
- Druckverlust in bemannten Modulen
- Fehlfunktionen in Raumanzügen bei EVAs (Leck im Kühlkreislauf bei EVA von Luca Parmitano) [64]
- Haftung für Schäden beim Absturz zur Erde von Raumfahrzeugteilen (Raketenteile/-Stufen, Raumstationsteile bei der kontrollierten Entsorgung/Re-entry)

Im Betrieb (COL-CC) sind drei Betriebsfälle als hoch-kritisch eingestuft: Feuer, Druckverlust und überhöhte Schadstoffbelastung ‚Toxic‘. Bei einer schnellen ISS-Evakuierung müssen zahlreiche Prozeduren bzw. Protokolle durchlaufen werden, die nur von Astronauten erledigt werden können (z.B. das Schließen der Schotten, um die Module gegen Fehlerübertragungen zu isolieren). Bei einer Evakuierung wäre der Payload-Betrieb auf der ISS ohne Astronauten ist nur

sehr eingeschränkt und wahrscheinlich nur für kurze Zeit möglich. Die Raumstation wurde so designed, dass sie in der Lage ist ohne Crew im Minimalmodus/Safe Mode betrieben zu werden.

Zur Sicherheit der Astronauten sollten wie bei der ISS immer Evakuierungspläne und permanent angedockte Rückkehrsysteme (Rettungs-Kapseln) existieren.

Menschliches Versagen ist ein Risiko, das immer vorhanden und nicht vernachlässigbar ist. Es ist aber äußerst schwer abzuschätzen.

Hauptauftragnehmer wie AIRBUS (ehemals Astrium), Thales und OHB folgen standardisierten Analysetechniken (aus z.B. ECSS, ISO) für Raumstationselemente, Produkte und für Dienstleistungen. Man spricht oft von FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), einer Analyse, die im Grunde Risiken durch einen systematischen Prozess identifiziert. Im Betrieb werden zum Beispiel immer FDIR (Failure Detection, Isolation and Recovery) Untersuchungen durchgeführt und entsprechende Flugprozeduren entwickelt. Dies gilt für Satelliten, Raumstationen und ihre Nutzungselemente. Für all diese und viele weitere Risiken sollten vorab Handlungsabläufe und Prozeduren für den Ernstfall ausgearbeitet und erprobt bzw. geübt sein.

Das ursprüngliche Design der Raumstation ‚Freedom‘ zeigte ein duales Röhrensystem auf (Abbildung 9). Im Falle, dass ein/e Astronaut/in im Columbus Modul arbeitet, jedoch ein Feuer im Knoten 1 ausbricht oder es einen Debriseinschlag an einer Stelle mittendrin gibt, wäre im dualen Röhrensystem ein Fluchtweg z.B. zu Rettungssystemen immer möglich. Beim jetzigen linearen Design der ISS wäre eine Rettung im schlimmsten Falle nicht möglich. Die Rettungskapseln Sojus sind am russischen Segment angedockt und der Weg dahin wäre versperrt. Der Trade-off bestand also u.a. zwischen Budget, Sicherheit und technisch Machbarem.

Für zukünftige astronautische bzw. zeitweise astronautische Plattformen sind mehrfach (möglichst dreifach) redundante Systeme erforderlich. Dies gilt nicht nur für die Architektur der Orbitalsysteme und Bodensegmente, sondern auch für die Forschungs- und Trainingsanlagen. Im Falle des MSL (Material Science Laboratory) kam es z.B. aufgrund eines Systemfehlers zum Ausfall der gesamten Anlage und dadurch zu Verunreinigung, die durch die Astronauten gründlich beseitigt werden musste, da die automatische Reinigungsfunktion diese Art der Verschmutzung nicht beherrschte. Fehlersuche, Reinigung und Testdurchläufe dauerten einige Monate. Materialwissenschaftliche Experimente sind ein hochbegehrtes Thema, und es mangelt auch nicht an industriell relevanten Experimenten. Dafür wird während der Alexander Gerst Mission 2014 ein weiterer Schmelzofen (EML) installiert.

Systemrisiken haben sich seit den ersten astronautischen Plattformen mit zunehmender Automatisierung und Erfahrung reduziert. Robotische Systeme werden autonomer, zuverlässiger und können komplexere Aufgaben übernehmen.

Die Wahl des Orbits beherbergt andere Risiken und hängt stark zum einen von den Umgebungsbedingungen (Strahlung) ab sowie ob es Raketen mit der entsprechenden Kapazität

gibt, die den Orbit mit den schweren Bauteilen/Nutzlasten einer Station erreichen können. Im Fall der ISS in durchschnittlich 400 bis 450km Höhe ist eine periodische Orbitanhebung und somit durchschnittlich 7t Treibstoff im Jahr notwendig zusätzlich zu den DAMs (Debris Avoidance Manoeuver). Dies kann entweder durch die Versorgungsvehikel wie ATV, Sojus und Progress oder im Notfall eingeschränkt durch Triebwerke der ISS (Swesda) selbst ausgeführt werden. Gibt es zwischenzeitlich keine Versorgungsvehikel bzw. starke Startverschiebungen wegen zum Beispiel technischer Schwierigkeiten (z.B. Shuttle, HTV), müsste der ISS Treibstoff für die Anhebung genutzt werden. Dies würde wiederum einen Risikoanstieg hinsichtlich der notwendigen Lage- und Bahnreglung und bei plötzlichen Debris-Ausweichmanövern (DAM) bedeuten. Für DAMs werden immer Reserven bereitgehalten. Beim ATV wird die Betankung dem vorausberechneten Bedarf an Reboosts angepasst, d.h. bei mehr Reboost-Bedarf und damit mehr Treibstoffbedarf reduzieren sich die anderen Nutzlastanteile (z.B. Sauerstoff, Wasser, Lebensmittel, Ersatzteile). Die genaue Zusammensetzung der Nutzlast wird auf IP-Partner Ebene für jeden Flug entschieden. Als 2013 zum Beispiel dringend eine Ersatz-Wasserpumpe (80kg) gebraucht wurde, plante man entsprechend um.

Zur Vorbereitung und während der Reboost Manöver werden einige Experimentbetriebe eingestellt.

Triebwerksarten könnten verändert werden, um z.B. kritische Treibstoffe wie Hydrazin zu vermeiden (Betankungsrisiko) bzw. auch die Kosten für den Nachschub zu reduzieren. Triebwerke auf Basis von Elektrolyseantrieb können mit einfach lagerbaren Treibstoffen (Wasser) genutzt werden.

Zwei der am wenigsten vorhersagbaren aber hohen Risiken sind die politische Ausrichtung und Finanzierungsstabilität. Je nach u.a. aktueller Tagespolitik und Verständnis der Allgemeinheit für die (astronautische) Raumfahrt ändern sich Strategien und schwanken die Budgets.

Aktuell zeigte sich bei der letzten Ministerratskonferenz 2012, dass Europa/ESA sein ISS-Nutzungsprogramm einschränken musste, d.h. weniger Experimente/Entwicklungen, kleinerer Risikopuffer (Experimentwiederholung, Wartung) und Verschlankung des ISS Forschungssektors bereits im Ausschreibungsstadium für Wissenschaft und Industrie. So werden viele Arbeiten hinausgezögert und die wissenschaftlichen Erkenntnisse aufgrund voranschreitender Forschung auf der Erde teils obsolet.

3.5. Entsorgungsszenario ISS

Das vorläufige Szenario für das Betriebsende (EOL 'End of Life') der ISS sieht als einzig akzeptable Lösung einen kontrollierten Wiedereintritt in die Erdatmosphäre und Absturz ins Meer vor (z.B. Pazifik oder Indischer Ozean). Erfahrung mit Entsorgung von Weltraum-Infrastruktur gab es bereits, z.B.:

- Skylab Re-entry:
 - Unkontrollierter Absturz am 11. Juli 1979 über dem Indischen Ozean
 - 74 t, Länge 25.6 m, Ø 6.6m
- MIR Re-entry:
 - Kontrollierter Wiedereintritt in mehreren Schritten am 23. März 2001 über dem Pazifischen Ozean
 - Zunächst langsames passives Absenken der Bahn durch Restatmosphärenreibung auf ca. 220 km Höhe, dabei Überführung von MIR in 'Spin-Zustand' zur Lagestabilisierung
 - Übergang auf eine elliptische Bahn mit 165 x 220 km durch 2 aktive Bremsmanöver des letzten angedockten und modifizierten Progress M1-5 Fahrzeugs (Ladung: 2,7 t Treibstoff)
 - Finales Bremsmanöver durch Progress M1-5 (ca. 20 Min.) über dem Schwarzen Meer beim Flug über Russland und südliches Japan. Atmosphäreneintritt in 100km Höhe über Mikronesien. Die großen Module werden hier bei ca. 70-80km Höhe zerstört.

Die Gesamtmasse MIR betrug 143 t. Davon erreichten ca. 1500 Teile die Erde. Die Verteilung der Trümmer geschah auf einem Korridor von ca. 6000km Länge und 200km Breite. Es wird angenommen, dass ca. 40 Tonnen Trümmer nicht verglühten [62].

Im Oktober 2010 wurde bei einem 'Briefing' des 'Aerospace Safety Advisory Panels' – einer unabhängigen Expertengruppe, die NASA's Sicherheitsverfahren evaluiert – ein 'ISS End-of-Life Disposal Plan' von NASA's Michael Suffredini, Manager für das ISS Programm vorgestellt [54]. Ähnlich wie beim MIR 'Re-entry' würde man die ISS zunächst auf ca. 270 km Höhe absinken lassen und dann durch Absenkung des Perigäums auf einen elliptischen Orbit überführen, von dem aus man den finalen Abbremsimpuls ('EOL-burn') und Wiedereintritt starten würde. Abbildung 46 skizziert ein entsprechendes 'Disposal'-Szenario.

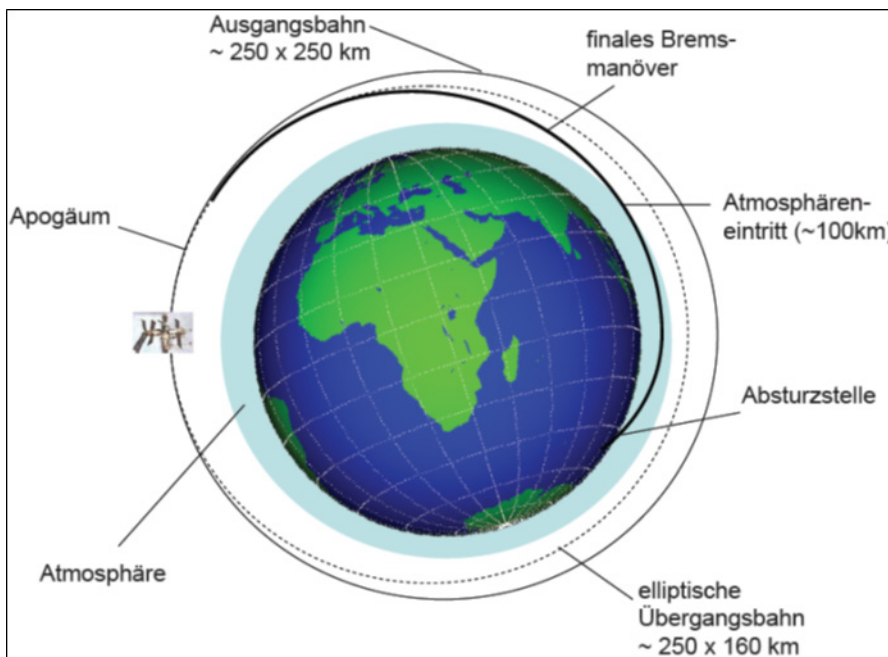


Abbildung 46 'Disposal'-Szenario für Raumstationen

Als erste Abschätzung gibt NASA 9 t Treibstoff für notwendige Abbremsmanöver an. Daher machen die Beschränkungen verfügbarer Fahrzeuge Lösungen notwendig, die entweder eine Kombination mehrerer oder den Einsatz modifizierter Fahrzeuge beinhalten:

- Modifizierte Progress-Optionen
- ATV in Kombination mit Progress Fahrzeugen
- Dediziertes 'De-orbit' Fahrzeug (Diskussionen zwischen NASA/ESA begonnen)

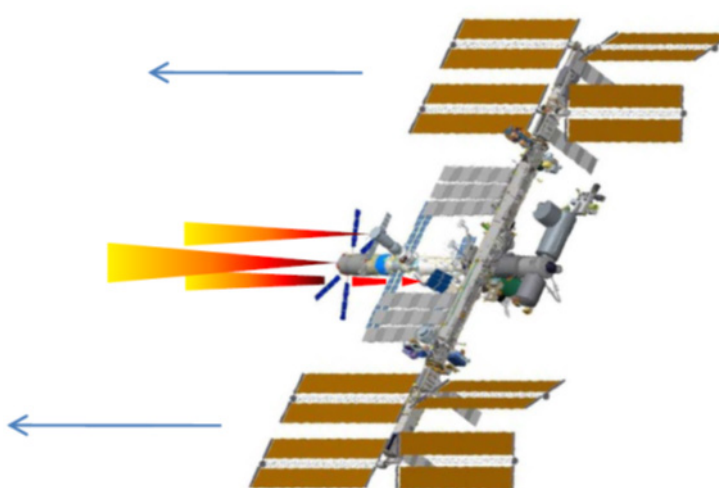


Abbildung 47 'ISS-Disposal' mittels ATV und Progress (NASA)

Zum Beispiel könnte man eine Kombination aus ATV (S/C ~20 t, ~5,5 t Treibstoff) und 1-2 Progress Raumfahrzeugen (S/C ~ 7 t, ~2 t Treibstoff) nutzen (Abbildung 47 und Abbildung 48).

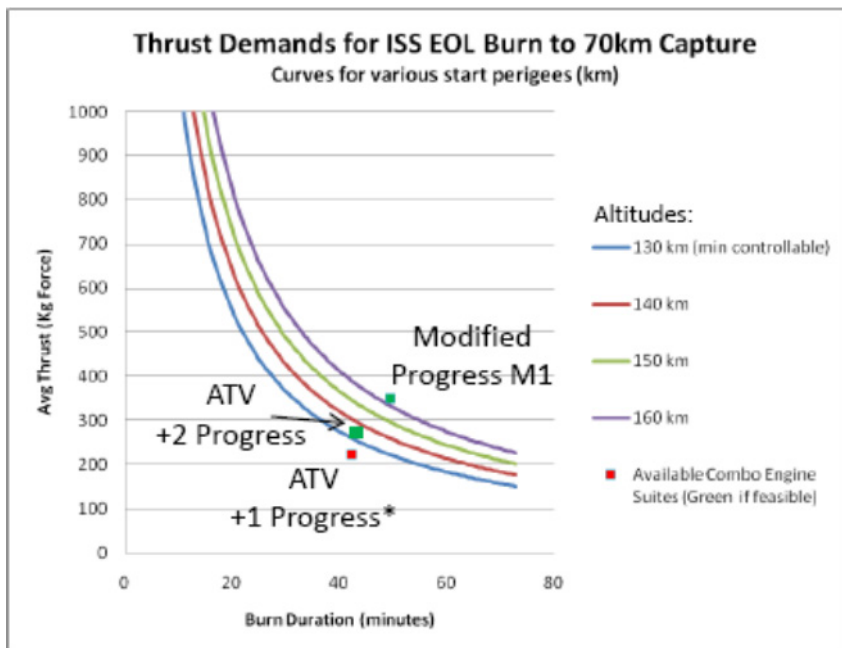


Abbildung 48 Schub- bzw. Fahrzeug-Anforderungen für 'ISS-Disposal' (NASA)

*ATV + 1 Progress scheint marginal möglich unter Einbeziehung des Luftwiderstandes

Zusammenfassend sieht NASA die Modifikation von Progress-Fahrzeugen als einfachste und kostengünstigste Option an, hat aber auch Diskussionen mit ESA über ein dediziertes 'De-orbit' Fahrzeug angestoßen.

3.6. Wiederverwendbare ISS Komponenten

Alternativ zur Entsorgung der gesamten ISS im Zeitraum 2024+ gibt es auch Vorschläge und Pläne zur Weiterverwendung von ISS-Teilen. Wie Perminov, Chef von Roscosmos, der Augustine-Kommission beim 1. öffentlichen Meeting am 17.6.2009 mitteilte, plant Russland nach Beendigung der ISS den Aufbau eines orbitalen 'Assembly-Komplexes' als Basis für weiterführende bemannte Explorationsmissionen zum Mars nach 2030 (Abbildung 49). Genannt OPSEK ('Orbital Piloted Assembly and Experiment Complex') soll die neue Raumstation auch aus russischen Modulen bestehen, die von der ISS abgedockt und wiederverwendet werden - einschließlich zukünftiger geplanter Module - [55].

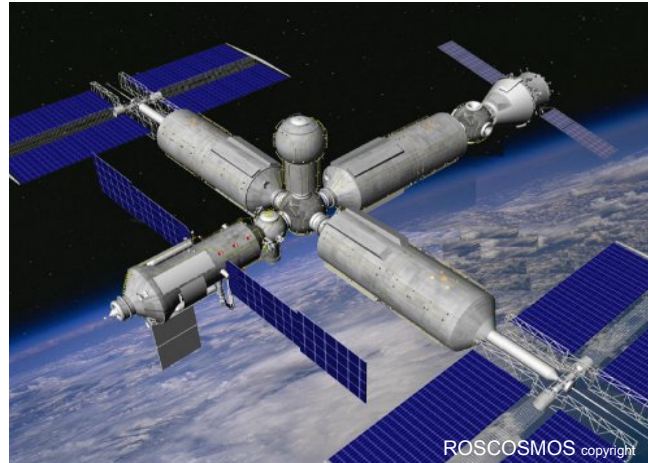


Abbildung 49: Geplante russische Raumstation 'Orbital Piloted Assembly and Experiment Komplex' OPSEK

Die ISS hat gegenwärtig 5 russische Module:

- Swesda Service Modul
- Zarja cargo block
- Pirs docking module
- Poisk (Search) research module
- Rassvet (Dawn) research module

Russland plant den Start von 4 neuen ISS-Modulen:

- Multi-purpose Laboratory Module (MLM)
- Knoten-Modul
- Zwei Science-Power Module

OPSEK soll u.a. folgende Aufgaben erfüllen:

- Zusammenbau großer Raumfahrzeuge
- Flugtests und Abflugort für Raumfahrzeuge
- Bereitstellung, Wartung und Betrieb interorbitaler Transportsysteme ('Space-tugs')
- Bereitstellung medizinischer Bedingungen für die Rehabilitation von Astronauten-Crews nach ihrer Rückkehr zur Erde von interplanetaren Expeditionen

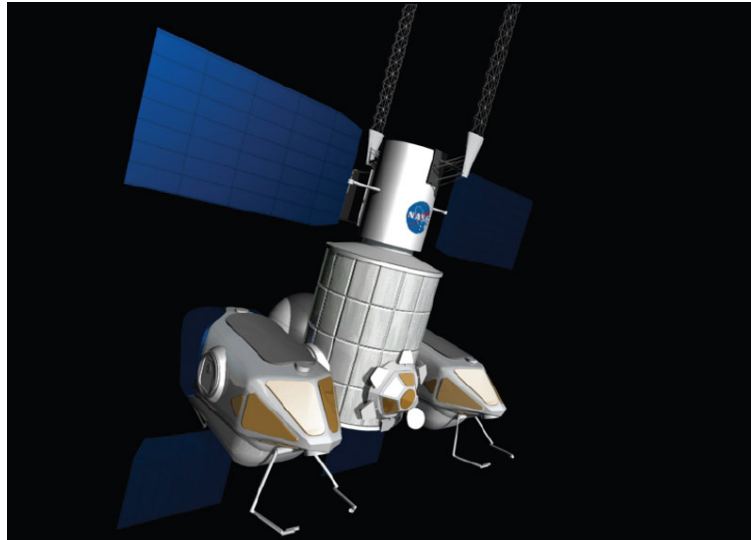


Abbildung 50 US-Konzept für eine bemannte Asteroidenmission unter Verwendung von 'Knoten 3' (Tranquility Module')

Auch in den USA und innerhalb der NASA wird über die Nutzung von ISS-Teilen nachgedacht [69]. Zum Beispiel ist eines der diskutierten NASA Konzepte die Weiterverwendung von 'Knoten 3' ('Tranquility Modul' mit 'Cupola'; enthält auch einen Großteil des ISS Lebenserhaltungssystems) in Verbindung mit zwei 'Exploration Spacecraft' für bemannte Missionen zu Asteroiden (Abbildung 50).

Europa könnte ausserdem über eine Weiterverwertung seines 'Columbus Moduls' nachdenken.

4. ISS Lessons Learnt und Nutzen

Hier sollen weder die LL der Wissenschaftshypothesen untersucht noch der Grund für eine bemannte Station bei der Wissenschaft gesucht werden. Die Lessons Learnt stellen einen Auszug aus der Analyse des ISS Programms, der Technik, des Betriebs und der Nutzung dar.

Wissenschaftliche und industrielle Nutzer einer bemannten Raumstation brauchen geeignete Laborbedingungen sowie hoch-präzise und zuverlässige funktionierende Anlagen für ihre Projekte und Experimente. Für Nutzer aus Europa bietet die ISS (Columbus) einen Kern der Raumfahrt-Forschungsaktivitäten.

Die ISS bietet nach wie vor einzigartige Merkmale für die grundlagen- und technologieorientierte Forschungswelt: Schwerelosigkeit, extreme Bedingungen und niedriger Erdorbit. Schwerelosigkeit verändert die terrestrischen Umgebungsbedingungen dramatisch und ruft erst dadurch viele Phänomene innerhalb der physikalischen und Lebenswissenschaften hervor. Extreme Hitze oder Kältezyklen, Ultra-Vakuum, atomarer Sauerstoff und hochenergetische Strahlung sowie Debris beeinflussen das Design der Raumfahrttechnologien und befördern so als 'Spin-Off' auch länger haltbare Komponenten auf der Erde. Mit einer Abdeckung von über 90% der bewohnten Erde und einem 90 Minuten Orbit wird die Station immer mehr für die Erdbeobachtung genutzt.

Die Zeit der Astronauten/Kosmonauten, die für Experimente aufgewendet werden kann, ist nicht nur kostbar sondern vor allem knapp. Jede Aktion dauert länger (typischerweise doppelt so lang) zu vergleichbaren Untersuchungen auf der Erde und lässt sich nur durch gutes Training und eine exzellente Arbeitsanweisung durch den Forscher/die Bodencrew und Systemordnung bzgl. genauer Hardwarepositionen (Lagersystem) auf der ISS minimieren. Jedoch bleibt die Motorik und Sensorik beim Menschen beeinträchtigt.

Ein Projekt von der Größe einer Raumstation fordert vor allem ungeheuren Aufwand in Kraft, Motivation, Finanzen, Überzeugungsarbeit, Wissenschaft und Technologie sowie politisches Geschick verknüpft mit interkultureller/internationaler Gewandtheit. Entwicklungen, Betrieb und oftmals vorhandene Kritik ohne vergleichbare andere Forschungsplattformen müssen stets in der Balance gehalten werden.

Die akademischen Organisationen und die Entscheidungsträger sollten bei der Planung oder Auswahl verschiedener Projekte/Nutzlasten die Missionsziele in internationaler Kooperation gemeinsam untersuchen und sie mit den verschiedenen politischen Strategien verbinden ohne dabei den internationalen Wettbewerb zu vernachlässigen. Entscheidende Themen und Kriterien für weiterführende astronautische Explorationsprojekte sind (Auszug [28, 50]):

- Nutzbarmachung des Weltraums (erweitern)
- Frage nach Bemannt versus unbemannt darf nicht im Vordergrund stehen
- Kosten-Effizienz

- Priorisierung innerhalb der internationalen und nationalen Strategie
- Effektive und ertragreiche Forschung mit effektivem Betrieb
- Diplomatie - Nutzung der Raumfahrtssysteme und des damit verbundenen Know-hows als Mittel zur Diplomatie unter Berücksichtigung der speziellen Anforderungen der einzelnen Länder (u.a. Entwicklungsländer)
- Wartung und Betrieb auf industrieller Basis
- Wettbewerbsfähigkeit der Industrien, Wettbewerbsfähigkeit in Technologie und Wissen
- Forschung in Wissenschaft & Technologie
- Verbesserte und effizientere Administration der Nutzung, der Industrie
- Verbindung der Nutzung neuer Weltraumanwendungen und der Raumfahrtindustrie
- Übernahme der Projektimplementierung durch die einzelnen Nutzer
- Erweiterung der Nutzergemeinschaft gleichzeitig mit Optimierung der Nutzerplattformen/Infrastrukturen
- Demonstrationsplattform für Schlüsseltechnologien, die von industriellen Nutzern für den Aufbau des Wettbewerbsvorteils vor allem international genutzt werden kann
- Gesetze / schriftliche Vereinbarungen als Kooperationsgrundlage
- Informationsaustausch
- Kompensationspläne für Schäden durch Objekte im Orbit. Objekte aus dem privaten Sektor und Regierungseigentum (klare Verteilung/Bestimmung der Verantwortlichkeiten zwischen privatem und Regierungssektor)
- Akzeptanz kommerzieller Hardware
- Services sollten durch den privaten Sektor übernommen werden
- Reduktion der Wartungskosten von Hallen und Hardware

4.1. Vor- und Nachteile des ISS Konzepts

4.1.1. Management und internationale Arbeitsteilung

Wie in den vorangegangenen Kapiteln bereits beschrieben, stellten Planung, Konsensfindung, vertragliche Vereinbarungen und Aufbau/Betrieb der ISS eine ungewöhnlich komplexe Aufgabe für die internationalen Partner dar. Allein die Aufteilung der Arbeiten und Verantwortlichkeiten zwischen den europäischen Teilnehmerstaaten war ein schwieriger und langwieriger Prozess. Hauptauftragnehmer EADS Astrium in Bremen koordinierte 41 Unternehmen in 14 Ländern. Die Hauptverantwortung für Columbus wurde zwischen D und I geteilt (DASA und Alenia). Diese ungewöhnliche Verantwortungsteilung auf Systemebene erforderte oft langwierige Verhandlungen zur Lösungsfindung und hat sowohl den Zeitplan wie auch die Kosten negativ beeinflusst. (eigen geschätzte Zusatzkosten bis zu 25 %). Hinzu kam die Abhängigkeit von internationalen Partnern insbesondere für Startdienste, was wegen des Shuttle-Unglücks in 2003 zu erheblichen weiteren Zeitverzögerungen und Kostensteigerungen führte.

Natürlich darf man den positiven Einfluss der internationalen Kooperation, welche die politische und wirtschaftliche Zusammenarbeit weltweit und systemübergreifend fördert, auf keinen Fall

unterschätzen. Insbesondere sind die gewonnenen Erfahrungen wichtig für zukünftige bemannte Weltraumaktivitäten, die wegen des großen Aufwands und der hohen Kosten sinnvoll wohl nur in internationaler Kooperation durchgeführt werden sollten. Mehr Partner in das astronautische Programm aufzunehmen könnte eine Verteilung der damit verbundenen Risiken und Kosten bedeuten, jedoch zeigt die Erfahrung aus dem europäischen ISS Programm, dass mehr Beteiligte auch einen exponentiellen Anstieg in Diskussionszeit unter den Partnern verursachen und somit die Gesamtkosten erhöhen und das eigentliche „Produkt“ verzögern. Auch können unverhältnismäßige Forderungen und plötzlicher Sinneswandel auftreten, wie die Entwicklung des ELIPS Programms - des ISS Kernforschungsprogramms der ESA - oder der Alleingang der Russen in Bezug auf den ISS Betrieb über 2020 hinaus zeigen. Adäquates Controlling, ein ausgeklügelter Beitragsschlüssel sowie angepasste Rahmenbedingungen sind Grundvoraussetzungen für den Erfolg.

Für zukünftige bemannte Raumfahrtaktivitäten (ISS und Post-ISS) könnte eine Einbindung weiterer Partner, z.B. von China und Indien, die ein wachsendes Interesse an der Nutzung des Weltraums und insbesondere an Raumstationen erkennen lassen, sehr hilfreich sein (sowohl aus politischen Gründen wie auch zur Kostenteilung!). Zur Kostenoptimierung sollten aber klarere Trennlinien bei den industriellen Verantwortlichkeiten auf Systemebene gezogen werden, so dass für einzelne (möglichst unabhängig definierte) Raumfahrtbeiträge kleinere industrielle Konsortien verantwortlich sind mit klaren 'Interfaces'. Dies war bei Spacelab und Columbus nicht der Fall. Man könnte in Europa auch darüber nachdenken, zukünftig komplette (Teil-)Systeme in jeweils nationaler Verantwortung zu entwickeln, um die Kosten zu minimieren, sofern die Fähigkeiten der einzelnen Länder dazu ausreichen. Dies würde allerdings die Rolle der ESA einschränken.

4.1.2. Nutzung und Nutzer

Natürlich hat eine permanent bemannte Station wie die ISS den großen Vorteil, Langzeit-Mikrogravitationsforschung zu ermöglichen, was besonders im Bereich der Medizin (Astronauten) und Biologie von Bedeutung ist. Aus Sicherheitsgründen resultiert daraus auf der anderen Seite der Nachteil langer Vorlaufzeiten für Experimente, die oft extrem aufwendig und teuer werden. Dies zeigen zumindest die bisherigen Erfahrungen. Es scheint nötig, die entsprechenden Auswahl- und Genehmigungsprozeduren zu modifizieren und effektiver zu gestalten. Das hängt aber von vielschichtigen Rahmenbedingungen der astronautischen Raumfahrt-Infrastruktur (Sicherheit, Kosten, Zeitaufwand) ab. Wissenschaftliche und industrielle Nutzer haben natürlich den Wunsch nach schnellem unbürokratischen und kostengünstigen Zugang zum Weltraumlabor für ihre Experimente. Dies leistet die ISS noch nicht.

Die Komplexität des Systems ‚Bemannte Raumstation‘ macht bestimmte Vorgaben und Voruntersuchungen notwendig: Sobald ein Experiment oder eine Technologie ausgewählt ist zur Station zu fliegen, müssen alle relevanten Anforderungen und Zwänge der Laborumgebung identifiziert werden. Es ist notwendig die Flughardware und verschiedene Flugkonfigurationen stets terrestrisch in speziellen Anlagen (Parabelflug, Fallturm, Vakuumkammer) zu prüfen, um

eventuelle Fehlfunktionen noch entschärfen zu können. Parallel dazu wird der ISS Betrieb definiert: Anlagenplatz, Prozeduren für das Experiment und u.a. auch die Crew, Zeitpläne, Validierung durch Crew Training, mögliche Fehlervorhersagen und ihre Korrekturmaßnahmen. Dieser Teil der Planung beginnt meistens 2 Jahre im Voraus und wird bis auf den Tag genauer, je näher der Starttermin rückt. Eine Reduzierung in diesem Bereich ist nur durch kleinere Plattformen, Standardisierungen sowohl in HW/SW und Abläufen oder z.B. durch weniger internationale Partner möglich. Risiken erhöhen sich auch durch komplexe Experimentanlagen, die oft fehleranfällig sind und nur mit hohem Aufwand in der Umlaufbahn repariert werden können. Das ISS Programm ist in vieler Hinsicht seit über 15 Jahren ein Balanceakt, der mit dem Beginn der Nutzungsphase ständig optimiert wird. Die frühe Forschung auf MIR und ISS zeigen eine steile Lernkurve bzgl. Betriebsoptimierung je mehr wissenschaftliche Anlagen in Betrieb genommen werden.

Die Langzeitnutzung und Vielfalt in den verschiedenen ISS Forschungsdisziplinen ermöglichte die Entwicklung von internationalen Standards (z.B. IBDM, ISPR) und einheitlicher Hardware und Software. Diese sind heute teilweise in Katalogen der jeweiligen Raumfahrtunternehmen (sogenannten „Payload Integrator“ oder „Payload Developer“) und Agenturen erfasst. Durch etablierte Systeme kann ein schnellerer Zugang zur Forschungsumgebung ISS ermöglicht werden, dies zeigen erste Erfahrungen aus der ISS Nutzungsphase der letzten drei Jahre, z.B. Plug&Play Systeme von Nanoracks und Airbus. Neuinvestitionen erweisen ihre Rentabilität daher oft erst während einer intensiven Nutzungsphase. Die Entwicklungen der Großanlagen und modularen Einschubsysteme sind meistens schon aus den Programmen bezahlt, müssen „nur“ gewartet, angepasst und weiterentwickelt werden. Bei kleineren Forschungen reduziert sich die Zeit von der Idee bis zum Experimentstart auf der ISS auf 1,5 bis 4 Jahre (unter derzeitigen administrativen Prozessbedingungen). Bei größeren Forschungsanlagen kann es jedoch bis zum Einsatz auf der ISS sogar mehr als ein Jahrzehnt dauern (z.B. EML-Experimentanlage: Vorläufer TEMPUS flog bereits im Spacelab in 1994 und 1997, die daraus abgeleitete aktuelle EML-Anlage wurde erst im August 2014 zu Raumstation ISS gebracht - ein Teil der Verzögerung ist allerdings durch das Shuttle-Unglück in 2003 und die Einstellung des Shuttle-Betriebs in 2011 bedingt). Solch lange Vorlaufzeiten sind inakzeptabel und reduzieren u.a. die Motivation der Wissenschaftler.

Die Prozesse der ISS Forschung sind heutzutage relativ klar definiert. Die Kommunikation in einem so großen und umfangreichen Projekt mit so unterschiedlichen internationalen Mitwirkenden unter den verschiedensten politischen Rahmenbedingungen ist jedoch an manchen Stellen noch deutlich verbesserungsfähig. Oft scheitern viele Aktivitäten an unterschiedlichen politischen Ansichten und Interpretationen von Einzelpersonen oder von Raumfahrtprogrammbedingungen (gerade innereuropäisch zwischen den Agenturen). Zum Beispiel hat die Vorbereitung und Durchführung der ISS-Langzeit Mission *Blue Dot* von Alexander Gerst verschiedenste „Showstopper“ gezeigt. Zum einen gibt es zu viele Überprüfungsverfahren und sie sind oft doppelt vorhanden. Jede Agentur hat ihre eigene Prozesse (z.B. Reviews): zunächst eigens für das DLR intern entwickelte Prozesse, die nächste Instanz liegt bei ESA und die finale Instanz bei NASA und

ROSCOSMOS. Da die russische Seite der Raumstation nur teilweise in die westlichen Prozesse eingebunden ist, stellt auch dies ein Risiko für den Forscher und seinen Forschungszeitplan dar. Nach über zehn Jahren an (mehrfach redundanten) Investitionen in Arbeit, Geduld, Zeit und erhöhten Finanzbedarf arbeitet man bei den ISS Partnern mit Hochdruck daran, die Prozesse zu standardisieren und forschungsspezifisch/individuell anzupassen. Für den Nutzer bedeutet das einen Gewinn, wenn er zum Beispiel nur noch ein Anforderungsdokument pro Thema auszufüllen, prüfen zu lassen und zu aktualisieren hat (nicht x drei = National, ESA, NASA/ROSCOSMOS).

Darüber hinaus müsste bei der Beurteilung der Flug- und Betriebssicherheit sicherlich eine Unterscheidung zwischen Systemen der Infrastruktur und den Nutzlasten hergestellt werden. Auch sollten Requirements neu geprüft und bewertet werden, da viele dieser Anforderungen im westlichen Bereich aus der Space Shuttle Ära stammen. Viele einfache Nutzlasten mit unkritischen Systemen werden aber nach den gleichen Regeln wie z.B. bemannte Habitate o.ä. behandelt. Hier wäre eine entsprechende Anpassung bei den Sicherheitsanforderungen von Nutzlasten mit ingenieurtechnischem Augenmaß hilfreich. Damit wäre ein Schritt in Richtung einfacherer und kostengünstigerer Zugang zur ISS gewährleistet.

In manchen Fällen zeigt sich eine Station mit Menschen an Bord als enormes Forscherrisiko. Im Falle der Materialwissenschaft oder Biologie bemängeln Forscher die störenden Schwingungen durch die täglichen Trainingseinheiten auf dem Laufband oder Fahrrad. Somit ist man von der Betriebsplanung gezwungen, die Forschungseinheiten auf die Schlafenszeiten der Astronauten zu verlagern. Die Post-ISS Studie beinhaltet daher auch ein entkoppelbare Designoption.

4.1.3. Astronauteneinsatz und -training

Die Umgebungsbedingung Mikrogravitation ist einer der Gründe, warum die ISS eine exzellente Plattform für Forscher darstellt. Jedoch bedeutet dies für den Menschen gesundheitliche Beeinträchtigung und physische Anstrengung mit 2h Training am Tag anstelle von Forschung und Exploration. Zielt man auf Langzeitmissionen im All (ab >6 Monate), sind eine Zentrifuge oder andere Systeme zur Reduzierung negativer physiologischer Effekte auch eine Möglichkeit zur Gesunderhaltung und Zeitoptimierung hinsichtlich der Nutzung solcher Plattformen durch Astronauten. Kürzere Missionen erfordern dies nicht.

Wasser, Essen und Luft sind kostbar und werden meist als selbstverständlich angesehen. Jedes Kilogramm, das transportiert werden muss, kostet viel Geld (ca. 33.000US\$/kg). Daher ist der Einsatz von Astronauten zu Forschungszwecken extrem teuer und genau zu überlegen. Das komplexe Lebenserhaltungssystem, das Daten-Managementsystem und die hochqualitative Kommunikationsarchitektur ermöglichen erst ein Leben unter den extremen Weltraumbedingungen. Viele Teams an Wissenschaftlern und Experten sind in die Planung der Missionen und in die Arbeitsvorbereitung der Astronauten eingebunden. Sie beobachten Events

auf der Station und kontrollieren teils vom Boden einzelne Experimente. Nur durch die bisher durchgängige und zuverlässige Kommunikation sind viele Aktivitäten parallel möglich.

Bereits am Boden werden die Astronauten auf Ihre Mission 3-4 Jahre vorbereitet und an die Anlagen und Gesamtstruktur gewöhnt. Experimentatoren trainieren zum Beispiel direkt mit den Astronauten die Abläufe und lehren dabei auch, worauf es bei den Experimenten ankommt, um situationsbezogen auf der Station im Falle eines Fehlers eingreifen zu können. Jeder Schritt wird genauestens geplant und immer wieder trainiert: so auch jedes EVA (Außenbordeinsatz) in großen Tauchbecken mit den darin befindlichen Nachbildungen der ISS Strukturen. Umfassende medizinische Tests und eine Menge technischer Trainings füllen die Jahre der Vorbereitung und die Zeit auf der Station. Viele Anweisungen werden heutzutage erst kurz vor den anstehenden Aktivitäten auf der ISS trainiert. Viele der Trainingsorte sind global verstreut, welches viel Zeit, körperliche Anstrengung und ein gewisses Budget für ISS Crews und Bodenunterstützungsteams bedeuten.

4.1.4. ISS als Testzentrum für neue Technologien und Anwendungen

Die ISS bietet Platz für Langzeitstudien, Tests und Qualifizierungsmessungen, um existierende Systeme und Technologiekomponenten, zum Beispiel für Satelliten oder um neu entwickelte Techniken und Geräte zu testen.

Sei es ein Hitzeschild, eine robotische Anwendung oder ein Antriebssystem – der Weltraum zwingt den Technologien und dem Betrieb von Hardware im Orbit die höchsten Anforderungen auf. Jede Hardware muss kompakt sein und hinsichtlich der extremen Bedingungen wie Vakuum, Strahlung, Temperaturschwankungen zuverlässig und präzise mehr als 15 Jahre ab den ersten Tests funktionieren. Die dafür notwendigen Materialien oder Energiequellen wurden seit den ersten Tagen der astronautischen Raumfahrt entwickelt. Leider erweisen sich diese Anforderungen manchmal auch als hinderlich hinsichtlich der Fortentwicklung der Systeme, um Technologiesprünge und damit neue Einsatzmöglichkeiten auf der Erde zu generieren (z.B. Laptops, Kommunikation).

Die ISS-Experimente und eventuell künftige Mikrogravitationsplattformen können dazu beitragen, Prozeduren verschiedener Prozess- und Herstellungsverfahren von Materialien zu verbessern. Es ist aber bisher kaum gelungen, die freie Wirtschaft (als Nutzer) für Eigeninvestitionen in astronautische Plattformen wie die ISS zu begeistern. Selbst in den USA können bisher die sogenannten kommerziellen Firmen wie SpaceX und Orbital Sciences ohne den Staat als einzigem Kunden für die Versorgung der ISS keinen geschlossenen Geschäftsplan vorweisen. Aber sie können die Start und Komponentenpreise international herausfordern. Der Nutzermarkt muss erst noch entwickelt werden.

Der bemannte und unbemannte Transport in die Erdumlaufbahn war und ist eine Schlüsseltechnologie der Raumfahrt. Kontinuität in der Expertise- und Wissenserweiterung und deren Erhalt sind Grundvoraussetzungen für neue Entwicklungen bzw. zur Fehlervermeidung. Beim bemannten Transport ist Europa bisher vollständig abhängig von internationalen Partnern bzw. privatwirtschaftlichen Firmen, bei denen zukünftig eventuell ein Mitflug gekauft werden muss. Der unbemannte Transporter ATV und die Produktion von Modulen wurden in Europa eingestellt. ESM bietet für den Erhalt des ATV Know-hows (Betrieb, Training, Produktion) keinen adäquaten Ersatz.

Aus verschiedenen Beweggründen werden in Europa zum einen die Entwicklung der Ariane 5 ME und der Ariane 6 in separaten Programmteilen verfolgt. Ob Europa sich in Zukunft am Transport für bemannte Strukturen beteiligen kann, bleibt bei Betrachtung der Ariane 6 Kapazitäten fraglich. Die Reduktion der Nutzlastmasse würde die Entwicklung astronautischer Systeme für die Ariane wohl verhindern. Ob Russland eine Startmöglichkeit von Kourou mit bemannten Trägern in Erwägung zieht ist bisher nicht bekannt.

Für die Fernerkundung der Erde bietet die ISS zum Beispiel gegenüber polaren Plattformen den Vorteil eines niedrigeren Orbits für eine detailliertere Überwachung der Oberfläche. Im Vergleich zu sonnensynchronen Orbits bietet die ISS Erdbeobachtung (EOB) zu unterschiedlichen Zeiten tags- und nachtsüber. Mit einer Inklination von $51,5^\circ$ zum Äquator ist eine Abdeckung der Gesamterdoberfläche von 85% möglich sowie 95% der bevölkerten Oberfläche. Als Technologietestplattform – für sogenannte Precursor Missionen' zu größeren EOB-Satellitenmissionen - scheint die ISS stabil genug. NASA verbesserte hierzu in den letzten Jahren die Ausrichtungsstabilität durch Dämpfung der Vibrationen, verursacht durch die aktiven Elemente der ISS (z.B. Aktuatoren, Astronauten) und baute die Datenbandbreite aus.

Wie auch schon in früheren Kapiteln erwähnt, hat die ISS nur beschränktes Potential im Hinblick auf längerfristige Ziele der bemannten Exploration:

- Keine Transportknotenfunktion (mehrfache Studien vorhanden, z.B. OTV [70])
- Einfluss der WR-Strahlung im niederen Erdorbit nur bedingt erforschbar, weil das Erdmagnetfeld wichtige Komponenten der Strahlung abschirmt
- Mit der ISS ist die Erforschung der Effekte künstlicher Gravitation vor allem auf Menschen – z.B. erzeugt durch rotierende Systeme – im z.Z. bestehenden Rahmen nicht möglich

Natürlich ist die ISS unverzichtbar für die Fortsetzung der Forschung zur Gesunderhaltung von Astronauten bei Langzeitaufenthalten im Weltraum, wie sie für zukünftige Explorationsmissionen zu Asteroiden, Mond und Mars vorgesehen sind. Die ursprünglichen Ideen zur Nutzung der Raumstation als Transportknoten für weiterführende Explorations-Missionen wurden dagegen aufgegeben, weil sowohl die entsprechenden Explorationsszenarien damals (~1970-1990) noch nicht realisierbar erschienen als auch die erwarteten Kosten die Möglichkeiten der Partner bei

weitem überstiegen. In jüngster Zeit wird diese Idee aber wieder aufgegriffen (Treibstoffdepot, Wartungs- und Aufbaustation für wieder verwendbare Transportsysteme über den LEO hinaus, siehe auch oben erwähnte russische Pläne). Diese nicht ganz neuen und schon in den 80er und 90er Jahren untersuchten Vorschläge werden aber von Experten kontrovers diskutiert und oft als unrealistisch bzw. ineffektiv angesehen, wobei bei der Beurteilung u.a. die relativ hohe Inklination der ISS eine Rolle spielt (z.B. Nutzlastreduktion beim Erdstart, Startfenster-Beschränkungen für lunare und interplanetare Abflüge).

4.2. Vergleiche (terrestrisch und unbemannt)

Zeit und Kosten ambitionierter Projekte, wie z.B. im Zusammenhang mit ursprünglichen Raumstationskonzepten und teilweise auch die ISS sind Faktoren, die heute wie damals [47] unter konstanter Kritik und in Konkurrenz zu terrestrischen Herausforderungen stehen. Wie schon oben beschrieben, gibt es neben der ISS eine Reihe von anderen Möglichkeiten und Plattformen, Experimente wie auf der ISS vorzubereiten bzw. durchzuführen, allerdings meistens nur mit kurzen Betriebszeiten und voll automatisiert ohne Eingriffsmöglichkeit (Tabelle 1). Dabei fallen wesentlich geringere Kosten an und die Vorbereitungs- bzw. Zugangszeiten sind signifikant kürzer. Dies betrifft im wesentlichen Alternativen wie suborbitale Flüge und unbemannte (Rückkehr-)Kapseln (wie die russische Foton). Zukünftig könnten dabei auch unbemannte Plattformen im Orbit eine Rolle spielen. Besonders materialwissenschaftliche und fundamentalphysikalische Fragestellungen können so kostenoptimiert durchgeführt werden. Natürlich sind dabei Experimente am und mit Astronauten ausgeschlossen. Festzustellen bleibt, dass ein Großteil der oben genannten (Grundlagen-) Forschung im Mikrogravitationsbereich auch (und oft auch billiger) auf unbemannten Trägern im orbitalen oder suborbitalen Flug durchgeführt werden kann.

4.3. Resümee der ‚Lessons Learnt‘ und Empfehlungen

Einerseits lässt sich feststellen, dass es interessante Nutzungs- und Anwendungsmöglichkeiten für Raumstationen im LEO gibt, dass jedoch andererseits - wie schon oben erwähnt - wissenschaftliche Forschung alleine nicht ausreicht, die hohen Kosten des Aufbaus und des Betriebes zu rechtfertigen. Hier bedarf es anderer Rechtfertigung, die vor allem aus gesellschafts- und wirtschaftspolitischen Bereichen kommen sollten, wie z.B. aus internationalem Wettbewerb, Prestige, Medienwirksamkeit, Bildung oder Öffentlichkeitsinteresse (Enthusiasmus)).

Im folgenden kompakt die wichtigsten 'Lessons Learnt' und daraus abgeleiteten Empfehlungen für zukünftige mögliche bemannte Raumfahrtaktivitäten im LEO:

- Internationale Kooperation scheint unverzichtbar für zukünftige astronautische Aktivitäten im LEO und darüber hinaus
- Einbindung weiterer bisher bei der ISS nicht beteiligter Partner/Staaten könnte zur Kostenteilung und politischen Rechtfertigung hilfreich sein
- Komplexe Vertrags- und Interface-Strukturen wie bei der ISS sollten vermieden, deutlich vereinfacht und durch klarere Trennlinien auf Systemebene bei den industriell Verantwortlichen ersetzt werden
- Die extremen Sicherheitsanforderungen in der bemannten Raumfahrt treiben die Kosten und verlängern die Vorlaufzeiten für Experimente auf der ISS; hier sollte eine strenge Prüfung erfolgen, ob überhaupt Astronauten für die Durchführung eines Experiments gebraucht werden (alternativ: robotische Durchführung auch auf unbemannten Plattformen) und welche Anforderungen notwendig sind
- Die zahlreichen parallelen Überprüfungs- und Auswahlprozesse von Weltraumexperimenten durch die verschiedenen verantwortlichen Raumfahrtagenturen führen zu inakzeptablen Zeitverzögerungen und Kostensteigerungen; diese Prozesse müssen vereinfacht und standardisiert werden; erste Schritte dazu sind gemacht
- Die bereits laufende Entwicklung von internationalen Standards in Raumfahrt-Hard- und Software verbessert den Zugang zur Forschung auf der ISS und sollte weiterentwickelt werden
- Die Planung des Betriebes einschließlich des Astronautentrainings ist ein kostenintensiver Faktor, der auch weiterhin optimiert werden muss (z.B. durch Fokussierung des Trainings auf möglichst wenige Standorte)
- Industrielle bzw. kommerzielle Nutzung der ISS hat bisher kaum stattgefunden; es wird im Weltraum auf absehbare Zeit auch keine "Produktionsstätten" geben
- Kommerzialisierung von Dienstleistungen (z.B. Raumtransport in den USA) geschieht bereits, ein signifikanter Markt neben staatlicher Nachfrage ist jedoch kaum erkennbar (wie z.B. Weltraumtourismus)
- Die bisher bei der ISS-Nutzung wenig in Erscheinung getretene wissenschaftliche Disziplin Erdbeobachtung könnte zukünftig eine größere Rolle spielen; hierzu sind aber noch einige Fragen (z.B. bzgl. des geeigneten Orbits, der hinreichenden Ausrichtstabilität und -

genauigkeit) zu klären; zumindest als Plattform zum Test von neu entwickelten Instrumenten scheint die ISS geeignet

- Das Potential der ISS im Hinblick auf längerfristige astronautische Exploration ist noch beschränkt; neben Strahlungssimulation und Technologieerprobung (z.B. aufblasbare Habitate, Lebenserhaltungssysteme, Antriebe) ist sie natürlich unverzichtbar zur Forschung im Hinblick auf die Gesunderhaltung von Astronauten bei Langzeitmissionen
- Im Gegensatz zu 'EURECA' waren 'Spacelab' und 'Columbus' primär politisch getriebene Raumfahrt-Infrastrukturen (Ziel: Beteiligung Europas am bemannten amerikanischen Raumfahrtprogramm) und berücksichtigten im Design kaum klare wissenschaftliche Zielstellungen und Nutzungsanforderungen. Einziger indirekter Nutzereinfluss kommt über die von ESA definierten ISPR-Anforderungen ('International Standard Payload Rack'). Die daraus resultierenden Fehlanpassungen zwischen Raumfahrzeug und Nutzlasten (z.B. die zu Beginn des Programms überhaupt nicht berücksichtigten 'externen Nutzlasten') führten zu Verzögerungen/Diskussionen und späten Modifikationen.
- Zukünftig sollte eine neu zu entwerfende Weltrauminfrastruktur von Anfang an klar definierte Missions- und Nutzungsanforderungen berücksichtigen.
- Ein frühzeitiger Dialog zwischen 'Spacecraft-' und 'Payload'-Entwickler sollte hergestellt werden bzw. durch Normung der Racks (innen) ließe sich einiges weiter vereinfachen
- Betriebskosten sind ein wichtiger und oft unterschätzter Anteil der Gesamtkosten.

Die Entwicklung der Schlüsseltechnologie Raumtransport in Europa steht vor wichtigen Entscheidungen (Ariane 5 und 6); diese sollten auch die Frage mit einbeziehen, ob und wie sich Europa an der internationalen astronautischen Raumfahrt beteiligen will und ob dazu der eigenständige Zugang zum Weltraum wünschenswert ist.

Im Verlauf des Projektes werden die Aspekte im Kapitel Lessons Learnt erweitert.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Erste Entwürfe von Raumstationen im LEO/GEO (1948-1952) [22, 14]	8
Abbildung 2: Manned Orbiting Laboratory (MOL) [90]	8
Abbildung 3: Salyut-7 Raumstation mit stirnseitig angekoppeltem Ergänzungsmodul [Cosmos 1686 TKS] ..	9
Abbildung 4: Apollo-Sojus Test Programm - Docking Adapter/Modul.....	9
Abbildung 5: NASA/MSFC orbital propellant depot concept (1971).....	10
Abbildung 6: Module MIR Raumstation (Stand: 2001) [24]	10
Abbildung 7 Spacelab in der Shuttle-Nutzlastbuch.....	11
Abbildung 8: EURECA-Plattform im Erdorbit	12
Abbildung 9: links - Power Tower Space Station Konzept der NASA mit angedockten Modulen (19.6.1985), rechts - Dual Keel Konzept vom Glen Research Center (1. April 1986)	14
Abbildung 10: MTFP mit Hermes bzw. mit Raumstation [50].....	14
Abbildung 11 ATV-5 modular [13].....	15
Abbildung 12: MPCV Modulübersicht [NASA].....	20
Abbildung 13: Internationale Raumstation ISS (Stand Mai 2011).....	21
Abbildung 14: Columbus-Modul, Columbus Orbital Facility COF.....	22
Abbildung 15: europäische ISS-Elemente im Rahmen des 'Bartering-Agreements': ATV, ERA, Data Management System, Knoten 2 und 3 'Harmony' und 'Tranquility', Cupola.....	23
Abbildung 16: The Global Exploration Roadmap (GER) of the ISECG, Stand: August 2013.....	25
Abbildung 17: ESA Raumfahrt- und Technologieprogramme und ihre Budgets [Quelle: ESA, Stand 2014]	28
Abbildung 18: SLS und MPCV Modul [NASA].....	32
Abbildung 19: links: Bigelow's Alpha Station mit 2xBA330, Rechts: BEAM Modul an ISS [Quelle: NASA, Bigelow, 2014].....	33
Abbildung 20: Russische „Aufblasbare“ Strukturen an der Bigelow-Station [Quelle: Nasaspaceflight.com]	35
Abbildung 21: Russischer OKA-T Free Flyer Phase 1 [Quelle: RKK Energija].....	35
Abbildung 22 Russischer OKA-T Free Flyer - Nutzungsraum [Quelle: RKK Energija].....	36
Abbildung 23: HTV-R Modularer Aufbau, 2011[74]	38
Abbildung 24: JAXAs Entwicklungswege zu astronautischen Raumfahrzeugen [74].....	39
Abbildung 25: Grundkonfiguration der chinesischen Raumstation CSS	40
Abbildung 26: Größte bisher dargestellte Konfigurationsoption der chinesischen Raumstation CSS	41
Abbildung 27: Internationale Transportkapazitäten zur ISS und darüber hinaus	44
Abbildung 28: Columbus Außenstruktur [79].....	48
Abbildung 29: Verteilung des Lebenserhaltungssystems der ISS auf die einzelnen Module (links: russischer Teil; rechts von PMA-1: U.S.-amerikanischer Teil) [80]	49
Abbildung 30: Schema des Lebenserhaltungssystems von Columbus [82]	52
Abbildung 31: Skizze der JAXA-Version vom International Standard Payload Rack (ISPR) [13].....	53
Abbildung 32: Verteilung der Racks in Columbus [13]	54
Abbildung 33: Columbus Innenansicht (links: 2009; rechts 2014) [NASA]	54
Abbildung 34: Stammbaum der Kopplungsmechanismen der Raumfahrt [85].....	55

Abbildung 35: Schnittstellenübersicht der verschiedenen ISS-Module (F: Forward, A: Aft, Z: Zenith, N: Nadir, P: Portside, S: Starboard) [85]	56
Abbildung 36: Übersicht der Anzahl der ESA ISS Experimente und Disziplinen bis 2014	57
Abbildung 37: ESA Nutzlastanlage EMCS [ESA].....	57
Abbildung 38: li: Vorbereitung Analog/ISS Experimente (Melissa, EDEN), re: Veggie ISS Experiment [DLR, TAS-I, NASA].....	58
Abbildung 39 HRF-2 im Columbus Modul, Ultrasound Experimentaufbau am HRF-1 [NASA].....	59
Abbildung 40: ISS Betrieb und Management (ESA USOC [36]) [12]	63
Abbildung 41: COL-CC und seine Kommunikationsinfrastruktur [ESA].....	64
Abbildung 42 Kommerzielles US- Weltraumtransport-Programm	68
Abbildung 43 US Erdbeobachtungsinstrument RapidScat [NASA].....	68
Abbildung 44: Bereiche hohen Einschlagsrisikos durch Weltraummüll nach einem Modell des NASA/JSC-Orbital Debris Program Office [63]	71
Abbildung 45 'Drag-throughs' auf ISS zu Zeiten des Shuttle	72
Abbildung 46 'Disposal'-Szenario für Raumstationen	77
Abbildung 47 'ISS-Disposal' mittels ATV und Progress (NASA).....	77
Abbildung 48 Schub- bzw. Fahrzeug-Anforderungen für 'ISS-Disposal' (NASA).....	78
Abbildung 49: Geplante russische Raumstation 'Orbital Piloted Assembly and Experiment Komplex' OPSEK	79
Abbildung 50 US-Konzept für eine bemannte Asteroidenmission unter Verwendung von 'Knoten 3' (Tranquility Module').....	80

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der verschiedenen Mikrogravitations-Plattformen und ihre Forschungsbereiche, Stand März 2014	18
Tabelle 2: Übersicht der Raumfahrtstrategien und gerundeter Budgets astronautischer Aktivitäten (soweit veröffentlicht), Stand Januar 2014 [88, 28, 50]	26
Tabelle 3: Auszug der Einzelziele für Nutzung des LEO nach ISS [Basis ISECG].....	27
Tabelle 4: Übersicht zu einigen europäischen Studien/Entwicklungen zur Zukunft der astronautischen Raumfahrt im LEO; aktuelle Entwicklungen zu Forschungsplattformen (soweit bekannt).....	30
Tabelle 5: Übersicht zu Russischen Studien/Entwicklungen zur Zukunft der astronautischen Plattformen im LEO (soweit bekannt)	34
Tabelle 6: Aktuelle Launcherkapazität für astronautische Plattformen am Beispiel ISS [12, 32, 37]	45
Tabelle 7: Columbus Atmosphärenkontrolle und -versorgung	50
Tabelle 8: Columbus Temperatur- und Feuchtigkeitskontrollsystem.....	50
Tabelle 9: Columbus Luftaufbereitung	51
Tabelle 10: Columbus Nutzlastversorgung	51
Tabelle 11: Zeitrahmen des MIR Aufbaus durch Proton [30]	60
Tabelle 12: Auszug aus dem Aufbau des ISS-Kerns durch Proton und Space Shuttle	60

Tabelle 13: Übersicht Technische Daten MIR und ISS [17, 12]..... 101
Tabelle 14: Übersicht der aktuellen Versorgungsfahrzeuge der ISS und CSS (tbc), programmatisch [Stand 2014]..... 104
Tabelle 15: Übersicht des Nutzungsprofils der ISS (Auszug aus ESA Dokumenten) [50, 28]..... 105

Literaturverzeichnis & Notizen

- [1] Strategic HQ for Space Policy, Government. (25.Jan 2013). *Basic Plan on Space Policy*. Japan.
- [2] ISECG. (August 2013). *The Global Exploration Roadmap*.
- [3] EU Council Resolution: "Global Challenges: taking full benefit of European Space systems"
- [4] Horizon2020 Workshop on Space Technology for Competitiveness, non-dependence and Innovation in Space
- [5] <http://www.washingtonpost.com/sf/national/2013/11/23/which-way-to-space/?hpid=z4> ,
<http://spaceksc.blogspot.com.au/2013/11/what-is-newspace.html>
- [6] NASASPACEFLIGHT.com
- [7] <http://www.brighthub.com/science/space/articles/53524.aspx>
- [8] Flight ATV-2 Launch and Return Manifest, November 2010
- [9] www.spacex.com
- [10] FAA, The Annual Compendium of Commercial Space Transportation: 2012, Feb. 2013
- [11] CNN.com, "Mir destroyed in fiery descent", 23.03.2001
- [12] NASA, Reference Guide to the International Space Station, November 2010
- [13] ESA ERASMUS User Centre and Communication Office (HME-HE): European Users Guide to Low Gravity Platforms, UIC-ESA-UM-001, 2005
http://www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/Human_Spaceflight_Research/European_Users_Guide_to_Low-Gravity_Platforms
- [14] Das Problem der Befahrung des Weltraums, Herman Potočnik (Noordung), Druck 1929
- [15] The British Interplanetary Society, Orbital Bases, Journal of the British Interplanetary Society, Vol.8, pp.1-19, 1949
- [16] Space Settlements – Design Study, Richard D. Johnson NASA AMES, Charles Holbrow Colgate University, SP-413
- [17] The Story of MIR Space Station, David M. Harland, ISBN 978-0-387-23011-5
- [18] MIR Aufbauschritte mit 1 Knoten (4 Ports), Wikipedia, Lee Brandon-Cremer, 1996
- [19] Benefits from the Shuttle-MIR Program, NASA, August 1998
- [20] Collier's, 22.03.1952 "Man will conquer Space Soon"
- [21] Skylab 1 Initial Flight Anomalies Report, 14.05.1973
- [22] The Skylab Program, NASA, <http://history.nasa.gov/apollo/skylab.html>
- [23] Apollo-Sojus Test Projekt, NASA, <http://history.nasa.gov/astp/index.html>
- [24] MIR Space Station Modules, www.russianspaceweb.com
- [25] Podiumsdiskussion mit W. Gerstenmaier, ISS Research and Development Conference, 2014 Chicago
- [26] ISS-Nutzung – Deutsche Forschung auf der Internationalen Raumstation, DLR, 2014
- [27] ISS Facilities – Research in Space 2013 and Beyond;
A Researcher's Guide to: International Space Station
for Technology Demonstration, Earth Observation, Plant Research, Microbial Research, Rodent Research
http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments_category/index.html

-
- [28] www.dlr.de
 - [29] Bemannte Missionen, http://www.spacefacts.de/german/d_missions.htm
 - [30] Protonraketenstarts, Wikipedia, 02.03.2014,
[http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Proton_launches_\(1990%E2%80%931999\)](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Proton_launches_(1990%E2%80%931999))
 - [31] JAXA website <http://global.jaxa.jp> , August 2009, <http://kibo.jaxa.jp/en/about/kibo/>
 - [32] Fluglisten für ISS, Wikipedia Juli 2014,
http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_spaceflights_to_the_International_Space_Station
 - [33] NASA, August 2000, International Space Station Operations Architecture Study
 - [34] NASA, Dezember 2000, International Space Station Maintenance & Repair Group (MRG) In-Flight Maintenance Book, Expedition 1 Flights
 - [35] NASA, August 2000, International Space Station Emergency Operations; and Russian Segment International Space Station Complex Operations Emergency Procedures;
 - [36] ESA Nutzerunterstützungszentren, September 2009,
http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2009/09/European_USOCs
 - [37] SpaceX, 2014, www.spacex.com
 - [38] Homepage Biosphere2, 2014, <http://b2science.org/institute>
 - [39] Last plant experiments in the "SVET" Space Greenhouse equipment onboard the "MIR" orbital station, Tania Ivanova, Svetlana Sapunova, Plamen Kostov, Ivan Dandolov, 01/2003
 - [40] IRS auf der ISS, E. Messerschmid, S. Fasoulas, F. Huber
 - [41] BmWi Anfrage an DLR RFM: „Fördervorhaben GoSpace: Industrielle Forschung in Schwerelosigkeit“, 28. Februar 2014, V. Schmid, A. Groß, C. Philpot
 - [42] CASIS Homepage, <http://www.iss-casis.org/>
 - [43] Nanoracks LLC Homepage, <http://nanoracks.com/>
 - [44] Verschiedene Dokumente aus dem PB/HME/EUB seit 2000, ESA/PB-HME/SBD(2007)42, letztes Update ESA/PB-HME(2012)20
 - [45] ISPR Beschreibung, AIAA-98-0466, 1997
 - [47] NASA Hearing bevore the subcommittee of Science, Technology and Space, 04. Dez. 1995
 - [48] Basiert auf DLR Newsletter Raumstation 3/98, PIN
 - [49] VDI Nachrichten Magazin, Juni1994, D-2 Mission: Die Ergebnisse
 - [50] www.esa.int
 - [51] <http://bigelowaerospace.com>
 - [52] The Moscow Times, M. Bodner, 14. Mai 2014, „Russian Space Program gets \$52Bln Boost“
 - [53] PLF 2014 – EXTRAIT DU BLEU BUDGÉTAIRE DE LA MISSION : RECHERCHE ET ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR, Oktober 2013
 - [54] Michael T. Suffredini, ISS End-of-Life Disposal Plan, NASA 2010
 - [55] News from Moskow, Issue 3, April 2013
 - [56] G. Reibaldi and G. Caprara, Space Base Europe – how the International Space Station is used to improve life on Earth, ESA/ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 2002
 - [57] Stratis Karamanolis, Die Internationale Raumstation – Zwischenstation einer neuen Raumfahrtepoche, Elektra Verlags-GmbH, München, 2000

-
- [58] Hermann Oberth, Rakete zu den Planetenräumen, 1923, (Nachdruck Michaels-Verlag, 1984, ISBN 3-89539-700-8)
- [59] Hermann Oberth, Wege zur Raumschiffahrt, 1929, (Nachdruck VDI-Verlag Düsseldorf, 1992, ISBN 3-18-400755-3)
- [60] Ernesto Vallerani, Italy and Space – Habitat Modules, McGraw-Hill Libri Italia srl, Milano, Italy, 1995
- [61] http://en.wikipedia.org/wiki/Space_Station_Freedom
- [62] http://en.wikipedia.org/wiki/Deorbit_of_Mir
- [63] http://en.wikipedia.org/wiki/Risk_management
- [64] Leck im EMU Kühlkreislauf während EVA, L. Parmitano Blogbeiträge, Deutsche Übersetzung, [http://www.esa.int/ger/ESA_in_your_country/Germany/Luca_Parmitano_EVA_23 -
_Grenzen_ausloten](http://www.esa.int/ger/ESA_in_your_country/Germany/Luca_Parmitano_EVA_23_-_Grenzen_ausloten)
- [65]] S. G. Karshenboim and E. Peik; “Astrophysics, Clocks and Fundamental Constants”; Lect. Notes in Phys. 648 (2004)
- [66] C. Salomon et al. “Atomic clock ensemble in space: An update”; Int. Journ. Of Mod. Phys. D; 16; 2511-2523 (2007)
- [67] P. Touboul et al.; “The MICROSCOPE space mission”; Class. Quantum Grav. 18, 2487–2498 (2002)
- [68] W. Ertmer et al., „Towards atomic Quantum Sensors in Microgravity“, Nucl. Phys. B, 166, 307-309 (2007)
- [69] <http://www.space.com/8927-part-space-station-carry-crew-asteroid-nasa.html>
- [70] Turnaround Operations Analysis for OTV, Final Report No GDSS-SP-87-018, Februar 1988
- [71] FY2013 President’s Budget Request Summary, http://www.nasa.gov/sites/default/files/659660main_NASA_FY13_Budget_Estimates-508-rev.pdf
- [72] JAXA Space Budget, <http://global.jaxa.jp/about/president/presslec/201401.html>
- [73] TDRS Website des Goddard Space Flight Centers, <http://tdrs.gsfc.nasa.gov/tdrs/Missions-Enabled.html>
- [74] JAXA paper zu HTV-R, 2011, Yusuke SUZUKI und Takane IMADA, Concept and Technology of HTV-R: An Advanced Type of H-II Transfer Vehicle
- [75] JAXA paper HTV, 2008, Hideaki Uchikawa, Tadahiko Sano, Hideo Bito and Hiroshi Sasaki. HTV cargo delivery service and role for ISS activity
- [76] Budget HTV-R. NATIONAL SCIENCE FOUNDATION TOKYO REGIONAL OFFICE. Februar 2011
- [77] Long-Term International Space Station (ISS) Risk Reduction Activities, Michael P. Fodroci, George K. Gafka, Michael G. Lutomski, Jacilyn S. Maher
- [78] G. Reibaldi, P. Manieri, H. Mundorf, R. Nasca & H. König: The European Multi-User Facilities for the Columbus Laboratory, ESA bulletin 102, May 2000
- [79] ESA ERASMUS User Centre and Communication Office (HME-HE): Columbus Fact Sheet, EUC-ESA-FSH-002, 2011
- [80] D. E. Williams, J. R. Dake, G. J. Gentry: International Space Station Environmental Control and Life Support System Status for the Prior Year: 2010 – 2011, AIAA-2012-12940; 42nd International Conference on Environmental Systems; San Diego, California, USA, July 2012
-

-
- [81] W. Ley, K. Wittman, W. Hallmann: Handbuch der Raumfahrttechnik, Haser, München, 2008 (ISBN 978-3-446-41185-2)
- [82] P.O. Wieland: Living Together in Space: The Design and Operation of the Life Support Systems on the International Space Station, NASA/TM—1998–206956/VOL1, MSFC, Alabama, USA, January 1998
- [83] ESA ERASMUS User Centre and Communication Office (HME-HE): International Berthing Docking (IBDM), ESA-HSF-COU-027, 2010
- [84] International Docking System Standard (IDSS), IDSS IDD Revision C, November 2013
- [85] J. Cook, V. Aksamentov, T. Hoffman, W. Bruner: ISS Interface Mechanisms and their Heritage, AIAA-2011-7150, AIAA Space Conference & Exposition, 27.-29. Sept., Long Beach, CL, USA, 2011
- [86] J. Graf, C. Reimers & A. Errington: ESA's Data Management System for the Russian Segment of the International Space Station, ESA-Bulletin 93, Februar 1998
- [87] K. Bockstahler, J. Lucas, J. Witt, D. Laurini: Design Status of the Advanced Closed Loop System ACLS for Accommodation on the ISS, AIAA 2011-5076, 41st International Conference on Environmental Systems 17 - 21 July 2011, Portland, Oregon
- [88] Euroconsult 2014, Profiles of Government Space Programs
- [89] http://en.wikipedia.org/wiki/Extravehicular_Mobility_Unit,
http://en.wikipedia.org/wiki/Orlan_space_suit, http://en.wikipedia.org/wiki/Z-1_Suit,
<http://www.astronautix.com/craft/orlan.htm>
- [90] http://de.wikipedia.org/wiki/Manned_Orbiting_Laboratory

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung	Abkürzung	Erklärung
ACLS	Advanced Closed-Loop System	m	Meter
ADBS	Advanced Docking Berthing System	µg	Mikro-Gravitation
AMS	Alpha Magnetic Spectrometer	MARES	Muscle Atrophy Resistive Exercise System
ANITA	Analysing Interferometer for Ambient Air	MAU	Million accounting units
AP	Arbeitspaket	MBM	Manual Berthing Mechanism
APAS	Androgynous Peripheral Attach System	MBS	Mobile Remote Servicer Base System
APM	Attached Pressurized Module (heute Columbus)	MCC	Mission Control Center
APMT	Asia-Pacific Mobile Telecommunications	ME	Mid-Life Evolution
APSCO	Asia-Pacific Space Cooperation Organisation	Mio	Millionen
ASI	Agenzia Spaziale Italiana	MIR	Übersetzung „Frieden“ oder „Welt“
ASTP	Apollo-Sojus-Test-Programm	MLM	Multipurpose Laboratory Module
ATLAS	Atmospheric Laboratory for Applications and Science	MMOD	Micrometeoroid and Orbital Debris Protection
ATV	Automated Transfer Vehicle	MOU	Memorandum Of Understanding
BAU	Billion accounting units (ECU)	MPCV	Multi-Purpose Crew Vehicle
BEAM	Bigelow Expandable Activity Module	MPLM	Multi-Purpose-Logistics Module
BIS	British Interplanetary Society	Mrd	Milliarden
BLB	Biolab	MRM	Mini-Research Module
CAS	Common Attach System (Carrier Attachment System)	MRTAS	Modified Rocketdyne Truss Attachment System
CBM	Common Berthing Mechanism	MSFC	
CCDEV	Commercial Crew Development Programm	MSG	Microgravity Science Glovebox
CFFL	Columbus-Free-Flying-Laboratory	MSL	Materials Science Laboratory
CNES	Centre national d'études spatiales	MT	Mobile Transporter
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	MTFF	Man Tended Free-Flyer
COF	Columbus Orbital Facility (heute Columbus)	MTSAS	Module to Truss Segment Attachment System
COL-CC	Columbus Control Center	MUSC	Microgravity User Support Center
COTS	Commercial-Off-The-Shelf		
CRV	Crew Return Vehicle	NASA	National Aeronautics and Space Administration
CSA	Canadian Space Agency	NDS	NASA Docking System
CST	Crew Space Transportation	NEUROLAB	Neurologisches Labor
CTV	Crew Transfer Vehicle	NO	Stickstoffmonoxid

CSS	Chinese Space Station	O ₂	Sauerstoff
D2	2. Deutsche Mission	OKA-T	Geplantes Russisches freifliegendes Weltraummodul
DASA	Erster Name: Deutsche Aerospace Aktiengesellschaft	OTV	Orbital Transfer Vehicle
DM	Deutsche Mark	PM	Pressurized Module
DMS-R	Data Management System – Russia	PMA	Pressurized Mating Adapter
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt	PLPayloadPP	Polar Plattform
DRTS	Data Relay Test Satellite	PPP	Public Private Partnership
EAC	European Astronaut Center	PRIDE	Program for Reusable In-orbit Demonstrator in Europe
ECU	Alte Eurobezeichnung	PS	Pressurized Sections
EDEN	Evolution and Design of Environmentally Closed-Nutrition Sources	RDS	Russian Docking System
EDR	European Drawer Rack	RE	Rechnungseinheit
EFBM	Exposed Facility Berthing Mechanism	RF	Raumfahrt
EFU	Exposed Facility Unit	RFM	Raumfahrtmanagement
ELC	ExPRESS Logistics Carrier	RIT	Radiofrequency Ion Thruster
ELIPS	European Life&Physical Sciences in Space	RKA	Rossijskoje Kosmitscheskoje Agenstwo (Früherer Namer der Russischen Raumfahrtagentur)
ELM	Experiment Logistics Module	RTAS	Rocketdyne Truss Attachment System
EMCS	European Modula Cultivation System	SAMPS	Science and Application Manned Platform System
EML	Electro-Magnetic Levitator	SCM	Soft-Capture Mechanism
EPM	European Physiology Modules	SLS	Space Launch System
ERA	European Robotic Arm	SMService Module Space Operation Center (Swesda)SOC	
ERNO Entwicklungstechnik	Entwicklungsring Nord GmbH	SPDM	Special Purpose Dexterous Manipulator
ESA	European Space Agency	SSAS	Segment to Segment Attachment System
ESM	Europäisches Service Modul	STS	
ESOC	European Space Operations Center	SV	Service Vehicle
ESP	External Stowage Plattform	t	Tonnen
ESR	European Stowage Rack	TAS	Thales Alenia Space
ESRO	European Space Research Organization	TDRS	Tracking and Data Relay Satellite
ETC	European Transport Carrier	TEMPUS	Tiegelfreies elektromagnetisches Positionieren unter Schwerelosigkeit
EU	Europäische Union	USA	United States of America
EUA	Earth Orbit Space Station Elements	USOC	User Support Operations Center
EURECA	European Retrievable Carrier	UV	Ultra-violett

EUTEF	European Technology Exposure Facility
FGB	Functional... Block
FSL	Fluid Science Laboratory
FSLP	First Spacelab Payload
GEO	Geostationary Orbit
GER	Global Exploration Roadmap
GSOC	German Space Operations Center
GTO	Geo-Transferorbit
HRF	Human Research Facility
HSO	Human Spaceflight Office (ESA)
HTV	H-II Transfer Vehicle
HW	Hardware
i	Inklination
IBDM	International Berthing & Docking Mechanism
IDSS	International Docking System Standard
IGA	Intergovernmental Agreement
IML	International Microgravity Laboratory
IMV	Inter Module Ventilation
ISECG	International Space Exploration Coordination Group
ISEF	International Space Exploration Forum
ISPR	International Standard Payload Rack
ISS	International Space Station
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
JEM	Japanese Experiment Module
JSC	Johnson Space Center
kpbs	Kilo-bytes per second
Kg	Kilogramm
KIBO	Übersetzung: Hoffnung
kW	Kilo-Watt
LEO	Low Earth Orbit
LTO	Lunar Transfer Orbit

ANNEX

Im Anhang befinden sich Tabellen, die Werte für die durchgeführten Analysen in den jeweiligen Kapiteln enthalten.

- 1) Übersicht Technische Daten MIR und ISS
- 2) Übersicht der aktuellen Versorgungsfahrzeuge der ISS und CSS, programmatisch
- 3) Übersicht des Nutzungsprofils der ISS

Tabelle 13: Übersicht Technische Daten MIR und ISS [17, 12]

Eigenschaften	MIR	ISS [12, 13]
Lebensdauer Geplant aktuell	unbekannt 15 Jahre	15Jahre; neu: 26Jahre Ältestes Modul: 16Jahre
Gesamtmasse	Ca. 120 Tonnen	Ca. 450 Tonnen
Dimensionen Außenmaße (BxLxH) Innenvolumen	31mx19mx27,5m 350 m ³	108mx73mx45m (ohne ATV/Progress) 910m ³
Druck	1013hPa	958-1013 hPa
Luftfeuchtigkeit		25-75%
Temperatur Thermalsystem		18-27°C [12]
Bahnmechanik Inklination Mittlerer Orbit Orbitalgeschwindigkeit Umlaufzeit Ausrichtgenauigkeit Abdeckung für EO	51,6° 354 – 380 km 7,7 km/s 91,9 Minuten unbekannt 85%	51,6° 370 – 460 km (1) 7,7 – 7,6km/s 93 Minuten 1° 85%
Variation der Höhe Reboost	Beginn: 5km/Monat Ab1993: 1/Monat Zw. 60-80Tage	100-200 m/Tag = 2km/Monat (abh. Von Atmosphäre bzw. Sonnenaktivität) Zw. 10-80 Tage ¹²
Treibstoff		Orbit und Attitude Control: Monomethyl hydrazine (TS) und Nitrogen tetroxide (Oxidator)
AOCS	MIR selbst, 12 Gyros, Progress, STS	ISS selbst oder Gyros, oder ATV, Sojus, Progress, ehem. STS

¹² 2013 gab es insgesamt 14 Reboost Manöver durch Progress und ATV-4.

Eigenschaften	MIR	ISS [12, 13]
Elektr. Leistung Insgesamt Batteries	14,5kW (28V DC) (komp. Konstellation) Ni-Cd (60Ah each)	110kW (120V DC) → 2500m ² Non-Russian: 78kW Russian: 30kW 25 – 35kW (Non-RUS)
Astronauten	3 „Standard“ Crew (4 Deutsche)	6 Standard Crew (3 Deutsche)
Partner	0	5 ISS Partner
Trägerraketen Aufbau Versorgung	Proton-K, STS (Docking Modul) Sojus/Progress/STS	4-6* Typen Proton, STS* Ariane 5, Sojus, H-2b, STS*
Verfügbare Versorger	1 (später 2)	4-6*, **
Betrieb MCC USOCs Launch Sites Bodenstationen	1 (später 2) 1 (später 2) 1 (später 2)	2 (HOU, MOS) 9 ESA (ab 2013: 8 ESA) 5 (tbc)
Forschungsmodule	2,5 ⁽²⁾ von 7	4 (inkl. RUS)
Funktionsplätze (intern) ISPR Gloveboxes MELFI	Anderes System - -	35 1 3
Funktionsplätze (extern)	2	(Truss, ELC, CEPF, JEM-EF) 18 Plätze
Habitat Schlafplätze Waschraum/Toilette Küche/Eßraum Trainingsplätze Workstations	2, später 3 ⁽³⁾ 1/2 1 2 Laufbänder, 1 Fahrrad unbekannt	6 2 2 z.B. 2 Laufbänder, 2 Fahrrad, 2 Muskelgeräte 60 Computer/1200 RT, 190 PL RT
Kern-Technologien [ref] (Auswahl) Life Support Computer EPS MSS/Robotik Spacesuits/EMUs Adapter Debris-Schutz Knotenstrukturen Schleusen Fenster Kommunikation	ECLSS (ohne CO ₂ -, MH ₄ -, Urinaufbereitung) 7 (Strela) z.B. Lyappa Arm ORLAN 1 (Shuttle to MIR) unbekannt 1 (4 Ports) 1 1 Luch (Data Relay)	ECLSS [Grafik in 12] z.B: DMS-R [Grafik in 12], MSS, ERA ORLAN, EMU verschiedene MMOD [12] 3 2 Cupola + kleinere Luch (Data Relay, RUS), S-, Ku- und Ka Band TDRS, DRTS

Eigenschaften	MIR	ISS [12, 13]
	UHF (EVA) TORU (Docking)	(J), EDRS VHF/UHF (Docking/EVA)
Experimente (ca.) Aktuell Ø Pro Inkrement Deutschland Disziplinen	unbekannt unbekannt unbekannt u.a. Biologie, Human Physiologie, Physik, Astronomie, Meteorologie	1500 50 100 u.a. Biologie, Human Physiologie, Physik, Astronomie
Automatisierung	z.B. Automatisches Docking Habitatkontrolle, Rob. Arm	verbesserte MIR Systeme und Neuentwicklungen
Entwicklungskosten	Unbekannt	100Mrd über 35 Jahre
Hersteller/ Verantwortung	Russland	Russland/USA ISS Partneragenturen: NASA, ROSCOSMOS, CSA, JAXA, ESA

*STS wurde 2011 eingestellt.

**ATV wird 2014 und HTV wird 2016/17 eingestellt.

⁽¹⁾Seit Einstellung des Shuttles wurde die Bahn auf 450km angehoben, womit die Abbremsung durch die Erdatmosphäre und somit die Anzahl der notwendigen Reboost Manöver verringert wurde.

⁽²⁾Kvant-1 diente u.a. für 2 Astrophysikalische Beobachtungsplattform. Kwant-2 und Kristall hatte einen Bereiche für interne Experimente. Spektr und Priroda boten Möglichkeit für Erdbeobachtung, Spektr selbst hatte eine Wissenschaftsschleuse für externe Experimente.

⁽³⁾NASA installierte sich im Spektr Modul einen Schlafplatz für seine Astronauten. Seit dem Druckabfall in Sprechtr durch die Progress Kollision, konnte dieses Modul nicht mehr benutzt werden. Besucher mussten Ihren Schlafsack irgendwo, wo Platz war, anbinden.



Tabelle 14: Übersicht der aktuellen Versorgungsfahrzeuge der ISS und CSS (tbc), programmatisch [Stand 2014]

	Europa	USA					Russland		China	Japan		
Versorgungsfahrzeug	ATV	Dream Chaser	CST-100*1	Dragon (CRS)	Dragon-Rider	Cygnus	Sojus-TMA	Progress-M	Shenzhou	HTV [75]	HTV-R [74]	
Träger	Ariane 5	Atlas-V*2		Falcon-9		Antares	H-IIB		Langer Marsch	H-IIB	H-IIB	
Erststart	2008	2017 bem.	2016	2010	2015	2013	2003 (Sojus 1 1967)	1989	1999	2009	2018 (tbd)	
Nutzlast	8 ISPR +Cargo +Resupply	Crew 7 Cargo	Crew 7 Cargo+ Resupply	Cargo	Crew 7 Cargo	Cargo	Crew 3 Cargo+ Resupply	Cargo+ Resupply	Crew 3 Cargo+ Resupply	bis zu 8 ISPR und HRR Racks	Groß: wie bei HTV	
Nutzlastmasse UP DOWN	7600kg [8] -	3310kg – später 6000kg			2000kg– später 2700kg		2300kg -			6000kg (1500kg (ext)) -	klein 2t; groß 6,5t klein 0,3t; groß1,6t	
Startmasse	20235kg	9000kg?	10000kg?	8000kg		3500kg	7200kg	7200kg		16500kg		
Zielorbit (LEO: 450km)	LEO	LEO und Suborbital	LEO	LEO	LEO	LEO	LEO und später Mond	LEO	LEO	LEO	LEO	
Max Orbitzeit	max 7 Monate	Tage	210 Tage	25Tage (bis 2Jahre)		30 Tage	ca. 6 Monate	ca. 6 Monate		3-4 Wochen	3-4 Wochen	
Konzept	Nicht rückkehrfähig	Rückkehrfähig				Nicht rückkehrfähig		Rückkehrfähig	Nicht rückkehrfähig	Rückkehrfähig	Nicht rückkehrfähig	Rückkehrfähig
	unbemannt	Geflügelt, Gleiter	Bemannt	Unbemannt	Bemannt	Unbemannt	Bemannt	unbemannt	beides	Unbemannt	Zunächst unbemannt	
	Vollautomatisch	SSRMS zum einfangen	Vollautomatisch	SSRMS zum einfangen	SSRMS zum einfangen	SSRMS zum einfangen	vollautomatisch		Vollautomatisch	SSRMS zum einfangen	SSRMS zum einfangen	
Entwicklungskosten	1,4Mrd€ (inkl. ATV-1)	Bisher 363,1Mio US\$	Bisher 620,9Mio US\$ (Eigenanteil unbekannt)	Ca. 871 MioUS\$ [10] (Inkl. 200MioUS\$ SpaceX-Eigenanteil, 200MioUS\$ Inv.)	Bisher 544,6Mio US\$ (tbc, Eigenanteil unbekannt)	Ca. 838MioUS\$** (inkl. 550MioUS\$ Eigenanteil)	unbekannt	unbekannt	Ca. 2,3MrdUS\$	523Mio€ (2009)	Studie ca. 50Mio¥ (365T€)	
Entwicklungszeit	10Jahre	In Entwicklung	In Entwicklung	Ca. 6Jahre	In Entwicklung (5 Jahre)	Ca. 6Jahre	unbekannt	unbekannt	11 Jahre	12 Jahre	unbekannt	
Stück pro Start	450Mio€ (ATV-2 bis5, Missionsbetrieb, Träger)	-	-	Ca. 130MioUS\$ (ab CRS-1) *1	-	237,5MioUS\$	Ca 120MioUS\$ * (Marktpreis)	Ca. 50-60MioUS\$* (externer Preis)	110MioUS\$	154MioUS\$ HTV-1 108MioUS\$ Ab HTV-2	unbekannt	
Betrieb	25Mio€	-	-	unbekannt	-	unbekannt	unbekannt	unbekannt	unbekannt	(ISS Betrieb 230-308MioUS\$)	unbekannt	
Betreiber	ESA	Boeing ?		SpaceX ? Space Florida	SpaceX	Orbital	Roscosmos	Roscosmos		JAXA	JAXA	
Starts pro Jahr	1	-	-	2 (2014 geplant 4)	-	1 (2014 geplant 3)	4	4	1	1 (geplant 2)	1	
Stück	5 (geplant 9)									7 (geplant 9)	unbekannt	
Lizenz		FAA, 2012 (Launch&Re-entry)										

*NASA kaufte 15 Sitze und 5,6Tonnen Cargo für 719Millionen US\$. Das ergibt einen Launchpreis pro Sojus von ca. 114MioUS\$ und zusätzlich 3 Progressflüge, um die 5,6Tonnen zur ISS zu fliegen. Womit sich pro Sitzplatz 38MioUS\$ ergeben. Genaue Kosten sind nicht bekannt. (Quelle: NASASPACEFLIGHT.com)

**Inklusive Trägerrakete

*1 12 Flüge für 1,5MrdUS\$ [10], Vergleich: Space Shuttle Kosten pro Start: 450MioUS\$ mit max. 10t Nutzlastkapazität

*2 CDev Trägersysteme sollen auch kompatibel mit Delta und Falcon 9 sein

Tabelle 15: Übersicht des Nutzungsprofils der ISS (Auszug aus ESA Dokumenten) [50, 28]

Wissenschaft und Forschung	Ausgewählte Forschungs-bereiche	Auswahl von Experimentanlagen	Beispiele industrieller und kommerzieller Anwendungen
Biomedizinische Forschung	<ul style="list-style-type: none"> • Herz-Kreislaufsystem • Neurowissenschaft • Muskelapparat, Skelett/Knochen und Gewebe • Gesundheit und Umwelt • Vestibularphysiologie 	<ul style="list-style-type: none"> • Biolab • European Physiology Module (EPM) • Human Research Facility Racks (HRF) • Mouse Drawe System, MDS (E) • Rodent Research Facility (US) 	<p>Besseres Verständnis der Ursachen für Krankheiten und die Entwicklung vorbeugender und therapeutischer Maßnahmen (u.a. Osteoporose, Telemedizin, Glaukom)</p>
Gravitationsbiologie	<ul style="list-style-type: none"> • Molekularbiologie • Molekulare Strukturen und physikalische Interaktionen • Zellbiologie • Entwicklungsbiologie • Organismus • Evolutionsbiologie 	<ul style="list-style-type: none"> • Aquatic Habitat (J,E) • Handschuhkasten (Glovebox, MSG) • EMCS (E) im EXPRESS Rack (US) • SAIBO mit Cell Biol. Exp. Facility, CBEF (J) • Trainingsgeräte (ARED, COLBERT, CEVIS, MARES) (US,RU,E) 	<p>Unterstützung bei Fragestellungen der biomedizinischen und biotechnologischen Forschung</p>
Greenhouse	<ul style="list-style-type: none"> • Pflanzenwachstum • Regenerative Lebenserhaltung 	<ul style="list-style-type: none"> • VEGGIE • Portable Astroculture Chamber, PASC (US) 	<p>Vertical Farming</p>
Biotechnologie	<ul style="list-style-type: none"> • Proteinkristallisation • Zell- und Gewebeforschung • Bioseparation 	<ul style="list-style-type: none"> • Biolab (E) • Express Rack • Advanced Protein Crystallisation Facility (APCF), (E) • Protein Crystallisation Diagnostics Facility (E) • Bioculture System (US) • Ryutai Experiment Rack (J) mit SCOF, PCRf, IPU) 	<p>Herstellung maßgeschneiderter Medikamente (drug design) und künstlicher Organe und Gewebe</p>
Materialwissenschaft	<ul style="list-style-type: none"> • Erstarrungsvorgänge bei Schmelzen • Phasentrennung bei der Erstarrung • Thermophysikalische Eigenschaften • Prozessmodellierung • Chemische Trennungsvorgänge • Metalle und Legierungen • Gläser und Keramiken • Organische Polymere • Kristallzüchtung 	<ul style="list-style-type: none"> • Material Science Laboratory (E) • Express Rack (E) • European Drawer Rack (EDR, E) • Material Science Laboratories (US) 	<p>Gussprodukte mit speziellen Eigenschaften z.B. für Turbinenblätter oder Lagerschalen; Leichtmetallwerkstoffe mit Partikelbeschichtung und extremer Steifigkeit; Herstellung von Kristallen (z.B. GaAs, CdTe) für neue elektronische Gerätegenerationen z.B. in der Medizin</p>
Fluidwissenschaften	<ul style="list-style-type: none"> • Komplexe Fluide • Grenzflächenprobleme • Dynamik und Instabilitäten 	<ul style="list-style-type: none"> • Fluid Science Laboratory, FSL (E) • Fluids and Combustion Facility, FIR (US) 	<p>Optimierung von Transportvorgängen bei flüssigen Stoffen; Optimierung von Verfahren zur</p>

Wissenschaft und Forschung	Ausgewählte Forschungsbereiche	Auswahl von Experimentanlagen	Beispiele industrieller und kommerzieller Anwendungen
	<ul style="list-style-type: none"> Phasenwechsel und –strömungen 	<ul style="list-style-type: none"> Boiling Experiment Facility, BXF (US) 	Energieerzeugung
Verbrennungswissenschaften	<ul style="list-style-type: none"> Druckeffekte Transportprozesse in Flammen Turbulenzen 	<ul style="list-style-type: none"> Combustion Integrated Rack, CIR (US) Fluids and Combustion Facility, FIR (US) 	Hochgenaue Modelle der Energiegewinnung und Lösungen für die Reduzierung des Treibstoffverbrauchs und der Schadstoffemissionen bei Motoren und Kraftwerken
Ingenieurwissenschaften	<ul style="list-style-type: none"> Fortschrittliche Energiespeicher (Brennstoffzelle) Dynamik großer Strukturen Kommunikations-einrichtungen Forschung zur Materialermüdung 	<ul style="list-style-type: none"> Externe Plattformen (alle) SPHERES – Synchronisierte Positionierung 	Entwicklung und Erprobung neuer Technologien für den Einsatz im Satellitenbau und für Anwendungen und Dienstleistungen auf der Erde
Grundlagenphysik	<ul style="list-style-type: none"> Tieftemperaturphysik Atomphysik Gravitationsphysik Relativitätsphysik 	<ul style="list-style-type: none"> Low Temperature Microgravity Physics (US) Externe Plattformen (US) 	Unterstützung bei Fragestellungen der anwendungsorientierten Forschung in den Bereichen neue Werkstoffe, Biotechnologie, Medizin
Weltraumwissenschaften	<ul style="list-style-type: none"> Kosmische Strahlung Weltraumwetter-Vorhersage UV- und Röntgen-Astronomie Sonnensystem 	<ul style="list-style-type: none"> Alpha Magnetic Spectrometer (E, US) Externe Plattformen (US) SOLAR (E) 	Neue Anwendungen in der Vorhersage kosmischer Phänomene (z.B. Solarwind, Magnetosphäre)
Erdbeobachtung	<ul style="list-style-type: none"> Landerkundung und –nutzung Klimawandel Atmosphärenchemie Dynamik der Atmosphäre Ozeanografie 	<ul style="list-style-type: none"> Externe Plattformen: COL (EPF), Truss (ELC), KIBO (JEM-EF), Nanoracks EF Window Observational Research Facility, WORF (US) Hexapod (E) 	Dienstleistungen, Kartografie, Katastrofenmanagement, Vogelmigration, Entwicklung neuer Sensoren
Kühleinheiten	<ul style="list-style-type: none"> Lagerung biologischer Proben (z.B. Blut, Urin, Pflanzenproben) Inkubator oder Kühler für lebende Organismen 	<ul style="list-style-type: none"> MELFI (-80°, E) GLACIER, ultra-kalt (160°, US) KUBIK (E) 	

(E) Europe, (US) NASA, (J) JAXA

Anlagen: http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/facilitiesHardware.html#Biology-and-Biotechnology