



# Automatisierungstechnologien und Robotik

## für die Raumfahrt, A&R

### Programmatische und strategische Ausrichtung

#### Zusammenfassung

Die vorliegende Roadmap dient dazu, den Technologiekorridor „**Automatisierungstechnologien und Robotik in der Raumfahrt**“ im Nationalen Programm für Weltraum und Innovation neu zu strukturieren, strategisch auszurichten und zu gestalten.

Zentral ist hierbei – wie in der „Entscheidungsvorlage über das zukünftige nationale Engagement im Bereich der Automatisierungstechnologien und Robotik“ im August 2017 angekündigt – die Fokussierung auf zwei Förderschwerpunkte: **Providing Services (PS)**, also aktive Service-Robotik, und **Receiving Services (RS)**, also Bereitstellung von Baugruppen zum Aufbau von Raumfahrtssystemen, die robotisch gewartet werden können. Um den optimalen Nutzen aus den bisher investierten Mitteln zu ziehen, bauen Einzelmaßnahmen auf den in der Vergangenheit erarbeiteten Ergebnissen auf.

Mit der Umsetzung dieser Roadmap erhalten die deutsche Raumfahrtindustrie und die deutschen Raumfahrtforschungsinstitute die Chance, sich mit Schlüsseltechnologien am Aufbau der prognostizierten und in Ansätzen bereits im Aufbau befindlichen modernen Raumfahrtinfrastruktur zu beteiligen. Zugleich sollen sich die staatlich unterstützten Aktivitäten daran orientieren, kurz- und mittelfristige Systemfähigkeit über nachhaltige, intelligente, adaptive Ansätze in der Raumfahrt-Robotik zu erreichen.



## Inhalts

Zusammenfassung .....	1
Hintergrund .....	3
Ziele der Weltraumrobotik .....	4
Konzept zum Erreichen der Zielsetzung .....	4
Neustrukturierung der Förderschwerpunkte .....	4
Baukasten-Prinzip .....	5
Übergreifende Grundprinzipien .....	6
Umsetzung der Strategie in Einzelmaßnahmen .....	7
Allgemeine Randbedingungen .....	7
Internationaler Kontext .....	7
Ressortübergreifende Abstimmung .....	8
Auswahlkriterien für Vorhaben .....	8
Konkrete Maßnahmen .....	8
1. <i>Providing Services (PS): qualifizierte Robotik-Servicing-Module aus industrieller Fertigung</i> .....	9
2. <i>Receiving Services (RS): Basisbaukastenelemente und Standard-Schnittstelle</i> .....	9
3. <i>Realisierung einer In-Orbit-Demonstration und -Verifikation (IOD/V)</i> .....	10
4. <i>Beitrag der Raumfahrtrobotik zu einer möglichen Explorationsmission</i> .....	10
Fazit .....	11

## Hintergrund

In der Raumfahrt kommt **Automation und Robotik (A&R)** als Schlüsseltechnologie zunehmend eine ebenso wichtige Rolle zu wie bereits heute in der produzierenden Industrie. A&R ist nicht mehr länger nur als verlängerter Arm und zur Unterstützung des Menschen auf der Erde oder im Weltall zu betrachten. Vielmehr wird sie zu einem integralen Bestandteil weitestgehend vernetzter technischer Systeme, auf die sich die digitalisierte Gesellschaft abstützt – entsprechend ihres revolutionären Einflusses auf den irdischen Dienstleistungsbe- reich. So werden intelligente, mit automatisierten RF-Systemen vernetzte Roboter die Zu- kunft der Raumfahrt bestimmen: Satelliten und Raumstationen wird man zukünftig maschi- nell direkt vor Ort in der Umlaufbahn inspizieren, montieren, versorgen, modernisieren und am Ende auch sicher entsorgen. Raumfahrt wird damit nachhaltiger und insbesondere wirt- schaftlicher. Robotische Systeme werden in viel größerem Maße als heute auf Planeten, Monden und Asteroiden landen, sie erkunden und damit die Erschließung des Sonnensys- tems weit über die Grenzen der für Menschen unmittelbar erreichbaren Ziele vorantreiben.

Seit Verabschiedung der High-Tech-Strategie der Bundesregierung 2009 dient die Förde- rung der Automation & Robotik im Nationalen Raumfahrtprogramm dazu, Deutschland eine federführende Rolle bei der Konzeption, der Realisierung und dem Betrieb zukünftiger Raumfahrt-Infrastrukturen zu sichern.

Inklusive der Vorgängeraktivitäten hat das Raumfahrtmanagement derartige Technologien seit 1985 mit einem Betrag von insgesamt ca. 330 Mio. Euro gefördert. Als Höhepunkt war die Durchführung der nationalen Robotikmission DEOS geplant. Diese wurde jedoch auf- grund budgetärer Schwierigkeiten abgebrochen. Auch eine nachfolgend untersuchte DLR- ESA-Mission mit dem Namen CAPTARE wurde nicht durchgeführt.

Ausgehend von der im letzten Jahr getroffenen Entscheidung, das Feld Automatisierung und Robotik aufgrund seiner sicherheits-, technologie- und industriepolitischen Bedeutung und des unbestritten vorhandenen kommerziellen Potenzials aufrechtzuerhalten und auszubau- en, ist es nun erforderlich, es unter Berücksichtigung der jüngsten Entwicklungen neu zu strukturieren und strategisch klug auszurichten.

Betrachtet man die aktuellen internationalen Entwicklungen in der Raumfahrt, dann verlangt der Trend zur nachhaltigen Kommerzialisierung der Raumfahrt, innovative Technologieberei- che im nationalen Raumfahrt-Programm signifikant zu verstärken. Wie in der o.a. Entschei- dungsvorlage ausgeführt, muss sich Deutschland angesichts der neuen privatwirtschaftli- chen, internationalen Konkurrenz aufstellen, um nicht von der derzeitigen Dynamik abgekop- pelt zu werden. Gerade die Förderung neuer Technologien und die Neu- und Weiterentwick- lung von Komponenten können dies leisten und zu einer Stärkung deutscher Unternehmen, insbesondere auch der Zulieferindustrie, auf dem kommerziellen Markt führen.

## Ziele der Weltraumrobotik

Raumfahrt-Robotik ist interdisziplinär angelegt und vernetzt Technologie-Entwicklungen aus der Elektrotechnik, dem Maschinenbau, der Materialwissenschaft, der Informations- und Kommunikationstechnologie, der Sensorik und der Mechatronik. Die Raumfahrt-Robotik schafft technische Lösungen, die extremen Umweltaforderungen genügen. Unter Beachtung der in der o.a. Entscheidungsvorlage beschriebenen Bedarfe und Interessen lassen sich die Ziele in der Weltraum-Robotik folgendermaßen formulieren:

1. **Strategische Fähigkeit ausbauen.** Robotische Fähigkeiten im Weltraum haben eine erhebliche sicherheitspolitische Dimension. Daher ist es von strategischem Interesse, das in Deutschland aufgebaute Knowhow weiter auszubauen. Hinzu kommt die prognostizierte Bedeutung der Orbitalrobotik, die neben dem sicherheitspolitischen Bedarf auch ein industriepolitisches Interesse des deutschen Staates befriedigt. Die staatlich unterstützten Aktivitäten sollen darauf abzielen, kurz- und mittelfristig Systemfähigkeit bei intelligenten, adaptiven Ansätzen in der Raumfahrt-Robotik zu erreichen und die Konkurrenzfähigkeit nationaler Einrichtungen aus Wirtschaft und Forschung auch im Wettbewerb um EU-Fördermittel zu verbessern.
2. **Nachhaltigkeit fördern.** Wartbare, intelligente und adaptive Satelliten besitzen eine längere Lebenszeit und verringern das Problem des Weltraumschrotts. Dies gewährleistet die Weltraumnutzung auf lange Sicht.
3. **Kostensparnis erreichen.** Automation und Robotik sind eine Schlüsseltechnologie, um die Kosten von Raumfahrtsystemen und deren Betrieb und somit die Kosten von Raumfahrtanwendungen zu senken. Wartbare, intelligente und adaptive Satelliten senken im Sinne des New-Space-Ansatzes die Kostenschwelle zur Nutzung des Weltraums signifikant. Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) werden eingesetzt, um betriebliche und logistische Prozesse effizienter zu gestalten.
4. **Technologietransfer verstärken.** Raumfahrt-Robotik ist eine Schlüsseltechnologie mit großem Transferpotential für die Entwicklung innovativer Hightech-Produkte auf der Erde.

Insbesondere mit Blick auf Punkt 1 ist es unerlässlich, die erarbeiteten Technologien, Verfahrensweisen und Komponenten für den Einsatz im Weltraum zu qualifizieren. Nur so werden in Deutschland mittelfristig weltraumqualifizierte Technologien zur Raumfahrtrobotik, angelehnt an Industriestandards, verfügbar - nur so können sie mittelfristig industriellen Prozessen zugeführt und die Kommerzialisierung der Raumfahrt weiter vorangebracht werden.

## Konzept zum Erreichen der Zielsetzung

Um diese Ziele zu erreichen, ist eine tragfähige Neustrukturierung erforderlich, die erreicht wird durch die Einführung eines Baukasten-Prinzips, eine Anpassung der Entwicklungs- und Qualifikationsverfahren und vor allem die Fokussierung auf zwei Förderschwerpunkte.

### Neustrukturierung der Förderschwerpunkte

Dem im letzten Jahr gefällten Entschluss zur Weiterführung des Technologiekorridors entsprechend konzentrieren sich die Aktivitäten im Bereich „Automatisierungs-Technologien und Robotik in der Raumfahrt künftig auf die folgenden beiden Förderschwerpunkte:

#### 1. *Providing Services (PS):*

Entwicklung, Qualifizierung und Herstellung von Mobilitäts-, Handhabungs-, und Montagefertigkeiten inklusive aller erforderlichen Subsysteme und Komponenten sowie deren Integration zu einem Gesamtsystem. Das Gesamtsystem **erbringt** robotisch eine Dienstleistung für den Menschen.



Konkretes Ziel ist hier, validierte Raumfahrt-Robotik-Produkte für Operationen an Zielobjekten herzustellen.

## 2. *Receiving Services (RS)*:

Entwicklung, Qualifizierung und Herstellung von Subsystemen und Komponenten, die dafür ausgelegt sind, durch robotische Systeme zu einem modularen Raumfahrt-Infrastrukturelement sowohl integriert als auch während des Betriebs gewartet und modifiziert zu werden. Die Gerätschaft **empfängt** einen robotischen Service.

Konkretes Ziel ist hier die Schaffung modular aufgebauter, wartungsfreundlicher, flexibler Raumfahrtsysteme, die aus standardisierten, qualifizierten und miteinander kombinierbaren Baugruppen bestehen. Diese Raumfahrtsysteme sollen sowohl auf den Erdumlaufbahnen als auch für die planetare Exploration genutzt werden können.

Mit dieser Neuausrichtung zukünftiger Robotik-Aktivitäten im Nationalen Programm für Welt- und Innovation wird die ursprünglich angestrebte Systemfähigkeit inhärent gesichert. Sie wird mittelbar durch die Kombination von Ergebnissen aus beiden Förderkorridoren erreicht und spiegelt sich in der Gestaltung und Ausstattung eines unten näher beschriebenen „Baukastens“ wider.

### **Baukasten-Prinzip**

Als verbindendes Element zwischen den Förderschwerpunkten PS und RS wird eine vereinheitlichte Schnittstelle eingeführt. Mit ihr werden die aus dem RS entstehenden Raumfahrt-Subsysteme und -Komponenten („Bausteine“) verbunden. Zugleich bildet sie die Grundlage dafür, die im PS entwickelten robotischen Fähigkeiten (montieren, demontieren, repositionieren etc.) bei Herstellung und Betrieb von Raumfahrtsystemen einzusetzen.

Mit der Schnittstelle entsteht ein Baukastensystem für modulare Raumfahrzeuge, seien es einzelne Satelliten oder auch komplexere Infrastrukturen. Die Ausstattung des Baukastens mit aktiven und passiven Elementen ist ein lebender und evolutionärer Prozess, der die Einbeziehung und Einführung neuer, fortschrittlicher Technologien stark erleichtert.

Durch Modularisierung und Standardisierung können Herstellungsprozesse aus der industriellen Fertigung in die Raumfahrt übertragen werden. Erstmals wird es damit möglich, Wartung und Reparaturen von Systemen im Orbit wirtschaftlich und mit überschaubarem Risiko vorzunehmen; mittels teilautonomer Roboter werden sogar Montagen direkt im Weltraum möglich. Damit eröffnen sich sowohl im Bereich der Satelliteninfrastruktur als auch mit Blick auf die Exploration neue Perspektiven (vgl. die entsprechende Bewertung in der Entscheidungsvorlage).

Umgekehrt führt eine Rückkopplung der Raumfahrtentwicklungen mit entsprechenden terrestrischen Anwendungen zur Optimierung industrieller Prozesse, verbessert die Mensch-Maschine-Interaktion, erlaubt echte Fernwartung und Reparatur terrestrischer Systeme (nicht „nur“ Re-Programmierung, so zum Beispiel im Bergbau, bei Pipelines etc.) und ermöglicht eine Unterstützung bereits beim Herstellungsprozess von sog. ‚Remote‘-Anlagen.

Mensch und Maschine arbeiten als Team in einem zentral koordinierten Prozess zusammen, von der Herstellung der Systeme über die Wartung im Betrieb bis zur Entsorgung. Damit bereitet die Neuausrichtung der Raumfahrt-Robotik die Übertragung der Industrie-4.0-Prinzipien, d.h. die extensive Vernetzung der einzelnen Prozesse im Lebenslauf eines komplexen technischen Systems, in die Raumfahrt vor.

Wie in der terrestrischen Produktion wird auch in der Raumfahrt die Diversifizierung, d. h. „individuelle“ Herstellung den zukünftigen Satellitenbau bestimmen, Entwicklung und Herstellung von Raumfahrzeugen „on demand“ wird möglich.

Über die verschiedenen Qualitätsstufen der Bausteine wird mit ein und derselben technologischen Basis ein breites Einsatzspektrum auf den verschiedenen Erdorbits und in der Exploration erschlossen. Das Baukastensystem verkürzt den Zeitbedarf für Entwurf, Konstruktion und Produktion des Raumfahrzeuges. Kosten und Risiko für Fertigung (assembly), Integration, Test und Verifikation (AIT/V) werden minimiert. Die Endmontage der Raumfahrzeuge kann klassisch am Boden oder – wie bei der Internationalen Raumstation – direkt im Weltraum erfolgen.

Die Neustrukturierung der technischen Schwerpunkte in der Raumfahrt-Robotik bietet neue Betätigungsmöglichkeiten für die Raumfahrtindustrie und die zuliefernden Branchen. Durch die qualifizierte Einführung des Baukastensystems verschiebt sich die Verteilung von Aufgabenfeldern. Systemintegratoren beziehen raumfahrtqualifizierte Baugruppen von entsprechend spezialisierten Herstellern, insbesondere aus dem KMU-Bereich. Die Eintrittsschwelle für ein Raumfahrtengagement wird für Unternehmen niedriger, da sich die Firmen innerhalb ihres Kerngeschäftsbereiches bewegen können und der zusätzliche Qualifikationsaufwand einen akzeptablen Umfang nicht übersteigt.

### Übergreifende Grundprinzipien

Grundsätzlich muss bei allen Maßnahmen zur Deckung eines entsprechenden Bundesbedarfs und bei der Umsetzung zugehöriger Fördermaßnahmen von Beginn an darauf geachtet werden, dass sie einem konsequenten Industrialisierungsansatz folgen. Die in beiden Förderkorridoren zentralen Prozesse „Entwicklung, Qualifizierung und Herstellung“ sollen dementsprechend Folgendes umfassen:

1. Entwicklung: Die mit bisher investierten Mitteln erreichten Arbeitsergebnisse sollen in größtmöglichem Umfang genutzt werden. Die Auswahl zu entwickelnder Elemente orientiert sich am möglichen Einsatz bei orbitalen bzw. planetaren Missionen, die als Leitkonzepte bei der Technologiebereitstellung dienen. Die Entwicklungen erfolgen ohne Vorgaben bzgl. einzusetzender Technologien, Methoden oder Vorgehensweisen. Es werden solche Vorschläge vorrangig umgesetzt, die ein ausgewogenes Kosten-Nutzen-Risiko-Profil und die Beachtung von sog. „time-to-market“-Kriterien nachweisen können. Dabei sollen insbesondere auch New-Space-Ansätze zum Tragen kommen. Einsatzfelder und -bereiche werden über eine rein funktionale Leistungsbeschreibung abgebildet. Es erfolgen keine Vorgaben bzgl. der einzusetzenden technischen Lösungen, um Überläufe an Kosten, Risiken und Zeitdauer zu vermeiden.
2. Herstellung: Schaffung der technologischen und produktionstechnischen Grundlagen, um die o.a. Programmziele erreichen zu können. Geeignete Spin-In's von Komponenten und Prozessen aus raumfahrtfremden Industrieunternehmen und Instituten spielen dabei eine zentrale Rolle. Welche Technologien oder Komponenten eingesetzt werden, entscheiden die ausführenden Einrichtungen in Industrie und Forschung auf Grundlage des dort vorliegenden Know-hows. So werden Zeit- und Kostenüberläufe eingedämmt und ein ausgewogenes Kosten-Nutzen-Risiko-Profil erreicht.
3. Qualifizierung: Bereitstellung raumfahrttauglicher Elemente. Industrienahes Anforderungs- und Risikomanagement, Qualifikationsmethoden und Zuverlässigkeitsnachweise für die Schlüsselemente (z. B. für Manipulator, End-Effektor, Software, iBOSS-Bausteine, Standard-Interface, etc.) finden angemessene Anwendung in der Raumfahrt. Dazu werden unterschiedliche Qualitätsgrade passend zu den Anwendungsszenarien im LEO, im GEO oder bei planetaren Missionen zugrunde gelegt. Das technische Anforderungsprofil wird hinsichtlich Kosten, Risiken, Zeitplan etc. überprüft und auf ein pragmatisch umsetzbares Level reduziert. Entlang so entstehender angemessener Qualitätssicherungsmaßnahmen wird die ECSS angepasst.
4. Demonstration: Nachweis der Systemfähigkeit und der Beherrschung aller Schlüsseltechnologien mit kommerziellem Nutzungspotential durch Umsetzung kleiner, schnell-



ler, preisgünstiger, aber dennoch repräsentativer Demonstrationen im Weltraum. Eine wichtige Rolle übernehmen dabei Unternehmen aus der freien Wirtschaft, welche die technologische Basis in weiteren Schritten sukzessive in die Nutzung überführen.

5. **Reproduktion:** Sicherstellen, dass vollständige Module oder Schlüsselkomponenten von zukünftigen Nutzern (Anwender, Entwickler, Systemintegratoren und Anbieter) über einen Zeitraum von ca. zehn Jahren ohne wesentliche Designänderung kurzfristig nachgebaut und (wieder-)beschafft werden können. Denn Einzellösungen sind nicht das Ziel, sondern gebrauchsfertige Systeme, die auf der bestehenden technologischen Basis ohne Re-Design zu überschaubaren Kosten beschafft werden können.
6. **Kommerzialisierung:** Förderung von Industrialisierungsanstrengungen zur Erschließung neuer Marktpotenziale für die RF-Industrie, KMU und raumfahrtfremde Hersteller, um die Überführung der Ergebnisse in die industrielle Nutzung voranzutreiben. Die Übertragbarkeit der zu erarbeitenden Lösungen in industrielle, terrestrische Prozesse und Produkte ist ein wesentliches Kriterium bei der Definition der Vorhaben. Sie beeinflusst von Beginn an die Auswahl einzusetzender Technologien, Komponenten, Prozesse und Verfahrensweisen.

## Umsetzung der Strategie in Einzelmaßnahmen

### Allgemeine Randbedingungen

Die strategischen Ziele der Raumfahrtrobotik sind – wie in der Entscheidungsvorlage im vergangenen Jahr dargelegt – nur über eine ausgewogene Verteilung von Verantwortung und Investitionen auf staatliche und private Akteure zu erreichen. So müssen die notwendigen Ausgaben zur Deckung staatlicher Bedarfe insbesondere in der orbitalen und explorativen Robotik genutzt werden, um die hohe Kostenschwelle überwinden zu können, die einer direkten Industrialisierung und der kommerziellen Nutzung einer robotisch unterstützten Raumfahrtinfrastruktur im Wege steht. Die sich zeitlich daran anschließenden Fördermaßnahmen werden sich darauf konzentrieren, den weiteren kommerziellen Ausbau der Infrastruktur zu unterstützen, soweit damit das zukünftige staatliche Handeln im Weltraum effektiver gestaltet werden kann.

### Internationaler Kontext

Eine wichtige Randbedingung dabei ist der internationale Kontext von „Logistik im Welt- raum“. Neben nordamerikanischen Unternehmen (gefördert von NASA und DARPA), drängen verstärkt China, japanische und südostasiatische Unternehmen mit ihren Dienstleistungen in den sich entwickelnden Markt. In Europa entstehen ebensolche, z.T. öffentlich geförderte Dienstleister und die europäische Kommission startete in ihrem Rahmenprogramm Horizon 2020 die Umsetzung einer Roadmap zur Gestaltung der ersten Generation einer robotisch unterstützten Satelliten-Infrastruktur.

Wie in der Entscheidungsvorlage problematisiert, ergibt sich aus den sich entwickelnden technischen Fähigkeiten unmittelbar die Notwendigkeit, ein internationales Regelwerk zu schaffen, das eine sichere und akzeptable Rechtsgrundlage sowohl für staatliches Handeln als auch für kommerzielle Dienstleistungen darstellt. Gegenwärtig werden Bemühungen zur Definition eines solchen Regelwerkes von den USA (DARPA) mit der CONFERS-Initiative vorangetrieben.

Deutschland muss sich aktiv und frühzeitig an der Definition und Festlegungen dieser Regularien beteiligen um sicherzustellen, dass nationale Interessen gewahrt bleiben. Die DARPA hat andere Raumfahrtationen eingeladen, sich an CONFERS zu beteiligen. Es besteht jetzt also die Möglichkeit die deutsche Position auf internationaler Ebene einzubringen.

Auf europäischer Ebene ist das deutsche Engagement zweigeteilt: Zum einen wird die regelmäßige Technologie-Harmonisierung innerhalb der ESA aktiv unterstützt. Zum anderen sollen die mit dem Strategic Research Cluster „Space Robotics“ im EU-Forschungs-Rahmenprogramm Horizon 2020 begonnenen Aktivitäten, an deren Koordinierung das DLR-Raumfahrtmanagement im Rahmen der sog. Program Support Activity PERASPERA maßgeblich beteiligt ist, fortgeführt werden. Ziele sind hier, die begonnenen Entwicklungs- und Qualifikationsmaßnahmen abzuschließen und die o. g. Roadmap bis 2030 fortzuschreiben. Dabei soll letztere um einen Maßnahmenkatalog zur Erarbeitung einer europäischen Position bzgl. des o. e. internationalen Regelwerks zum Servicing zukünftiger Satelliten erweitert werden.

Angesichts des vorgesehenen Ausbaus der Zusammenarbeit von Deutschland und Frankreich im Bereich technologischer Innovationen und vor dem Hintergrund der Etablierung kommerzieller europäischer On-Orbit-Services, wie z. B. des Space-Tug von Airbus, ist die bilaterale Abstimmung der Positionen beider Länder im Vorfeld der Diskussion im europäischen Rahmen zu empfehlen.

Neben Frankreich zeigt Spanien verstärkt Interesse an der Zusammenarbeit mit deutschen Firmen und Forschungseinrichtungen. Dies gilt insbesondere für die Einführung industrieller Lösungen im Bereich RS. Somit empfiehlt sich auch hier die bilaterale Abstimmung von Interessen und Positionen.

### **Ressortübergreifende Abstimmung**

Das Bundeswirtschaftsministerium hat das Interesse, allen Bedarfsträgern in Wirtschaft und öffentlicher Hand (z. B. BMVg, BMVI, BMBF, BMI) mit der Entwicklung von Automatisierungstechnologien und Robotik für die Raumfahrt wirkungsvolle Instrumente zur Verfügung zu stellen, um ihre jeweiligen Aufgaben besser und effizienter erfüllen zu können. Die konkrete Umsetzung des Förderprogramms soll daher in enger Abstimmung mit diesen Bedarfsträgern erfolgen.

### **Auswahlkriterien für Vorhaben**

Vorhaben und Einzelmaßnahmen orientieren sich an den oben definierten Förderschwerpunkten, wobei ein ausgewogenes Verhältnis angestrebt wird. Die Bewertung zur Auswahl von Einzelmaßnahmen wird davon allerdings nicht getrieben und erfolgt unabhängig von Technologie-Reifegrad.

Es werden folgende Kriterien zur Auswahl angewendet:

- Wird auf in Deutschland vorhandenes Know-how oder eine bereits existierende Schlüsseltechnologie aufgesetzt?
- Handelt es sich um eine Schlüsseltechnologie, die aus strategischen oder industriepolitischen Gründen in Deutschland verfügbar gemacht werden soll?
- Welches technische und wirtschaftliche Potential zur Weiterentwicklung besitzt die Technologie?
- Ist die Technologie vielfältig in der Raumfahrt verwendbar? Für welche unterschiedlichen Einsatzszenarien in der Exploration und bei orbitalen Anwendungen ist sie geeignet?
- Besteht Transferpotenzial in terrestrische Anwendungen?

### **Konkrete Maßnahmen**

Auf dieser Basis ergeben sich bis 2022 die folgenden Schritte zur Herstellung und Qualifikation von Teilsystemlösungen und der Vorbereitung einer späteren Integration in operationelle Raumfahrtsysteme:



### 1. Providing Services (PS): qualifizierte Robotik-Servicing-Module aus industrieller Fertigung

Hier sollen raumfahrttaugliche Robotik-Servicing-und-Assembly-Module (RSM) inklusive aller erforderlichen Komponenten wie Energieversorgung, Sensoren, Steuerungssoftware, Lageregelung, relative und absolute Navigation, Kommunikation etc. entstehen. Diese RSM's können als eigenständige Komponenten mit standardisierten Schnittstellen auf unterschiedlichen Raumfahrzeugen eingesetzt werden.

Aufgebaut werden die Module unter weitgehender Verwendung und ggf. Modifikation industriell verfügbarer Bauteile.

Die für die Qualifikation erforderlichen Prozesse sollen mit Verfahrensweisen der terrestrischen Roboterindustrie kompatibel sein. Am Ende jedes Qualifizierungsprozesses steht die Spezifikation des zukünftigen Einsatzspektrums.

Die Raumfahrttauglichkeit und der Zuverlässigkeitsnachweis erfolgen unter Nutzung von Fluggelegenheiten (u. a. Experimente auf der ISS). Hierzu wird auf Basis der entwickelten Module ein Flugmodell (FM) hergestellt.

Die Entwicklung und Qualifizierung bis zum sog. Flight Readiness Review soll innerhalb von drei Jahren vollständig abgeschlossen sein. Sie folgt einem strikten Design-To-Cost-Ansatz und ist auf einen maximal einjährigen Verifikationseinsatz ausgerichtet. Ziel des Verifikationseinsatzes ist es, mindestens 10.000 Betriebszyklen des Gerätes unter Welt-raumbedingungen nachzuweisen.

Der erste Einsatz eines solchen in Deutschland hergestellten RSM ist beim Space-Tug der Firma Airbus DS denkbar. Hier kann unmittelbar auf die in DEOS und CAPTARE erarbeiteten Ergebnisse aufgesetzt werden. Ein Vorschlag zur Integration des RSM auf der ausgewählten Satellitenplattform liegt vor. Eine Qualifikationsmission könnte in direkter bilateraler Zusammenarbeit mit Frankreich erfolgen. Grundsätzlich und unabhängig von einer solchen von beiden Seiten gewünschten Zusammenarbeit, muss das bei Airbus DS Deutschland (Bremen) entwickelte RSM-Modul technisch und rechtlich uneingeschränkt auch für Plattformen anderer Hersteller verfügbar und adaptierbar sein.

### 2. Receiving Services (RS): Basisbaukastenelemente und Standard-Schnittstelle

Hier sollen raumfahrttaugliche Basis-Bausteine, z. B. abgeleitet aus dem iBOSS-Konzept, in unterschiedlichen Qualitätsstufen entstehen.

Ein funktionaler Basis-Baustein ist gekennzeichnet durch eine Grundstruktur inkl. einer steuerungstechnischen Grundausstattung und einer (mehrerer) vereinheitlichten Schnittstelle(n). Er dient der Aufnahme von Raumfahrzeugsystemen oder -komponenten. Die Basis-Bausteine sind im Design derart ausgelegt, dass ihre Montage und Demontage sowohl automatisiert, z. B. durch Manipulatoren, als auch manuell durch einen Menschen erfolgen kann.

Die Standardschnittstelle zur mechanischen, elektrischen, thermischen und datentechnischen Verkopplung ist hierbei von besonderer Bedeutung. Ihre Verwendung soll nicht auf die Nutzung innerhalb des Baukastensystems beschränkt bleiben. Durch ihr breites Anwendungspotenzial soll sie vielmehr als Instrument zur Einführung und zur Verbreitung des aus New Space abgeleiteten Modularitäts- und Standardisierungsprinzips eingesetzt werden.

Aufgebaut werden die Basis-Bausteine und die Schnittstelle auch hier unter weitgehender Verwendung und ggf. Modifikation industriell verfügbarer Bauteile.

Die für die Qualifikation erforderlichen Prozesse sollen mit Verfahrensweisen der terrestrisch produzierenden Industrie kompatibel sein. Am Ende jedes Qualifizierungsprozesses steht die Spezifikation des zukünftigen Einsatzspektrums.



Die Raumfahrttauglichkeit und der Zuverlässigkeitsnachweis erfolgen unter Nutzung von Fluggelegenheiten (u.a. zur ISS). Zur Herstellung der dafür notwendigen Flugmodelle werden die Basis-Bausteine mit entsprechend qualifizierten Baugruppen wie z. B. Kamerasysteme, Lageregelungseinheiten, Rechentechnik, Kommunikationseinheiten etc. ausgestattet.

Die Entwicklung und Qualifizierung bis zum sog. Flight Readiness Review soll innerhalb von drei Jahren vollständig abgeschlossen sein. Sie folgt einem strikten Design-To-Cost-Ansatz und ist auf einen maximal einjährigen Verifikationseinsatz ausgerichtet. Ziele des Verifikationseinsatzes sind:

- Nachweis einer Systemfunktionalität eines aus der Kombination mehrerer Bausteine entstandenen Systems.
- Zuverlässigkeitsnachweis der Schnittstelle durch mindestens 10.000 Betriebszyklen unter Weltraumbedingungen.

Der Bau eines ersten, modularen Test-Satelliten kann auf die seit 2010 im Projekt i-BOSS geförderten Bausteine „iBLOCKs“ und die multifunktionale, raumfahrttaugliche Schnittstelle „iSSI“ aufsetzen. Ein Vorschlag zur Herstellung der Plattform und ihrer Verifikation im Weltraum liegt vor. Konkret sind also die Phasen C, D zur Herstellung der Bausteine, sog. iBLOCKs mit multifunktionaler Schnittstelle iSSI, umzusetzen, um sie der Qualifikation im Weltraum zuzuführen. Dies soll über eine schlanke Demonstrationsmission unter Einbeziehung von Unternehmen aus der freien Wirtschaft geschehen, welche die technologische Basis sukzessive in die kommerzielle Nutzung überführen.

### 3. Realisierung einer In-Orbit-Demonstration und -Verifikation (IOD/V)

Die Definition einer Demonstration/Verifikation im Weltraum erfolgt sodann abhängig vom erreichten Entwicklungsstand in PS und RS.

Über kleine, schnelle und kostengünstige Technologiedemonstrationen sollen dann flugtaugliche Lösungen für die konkrete weitere industrielle Nutzung bzw. für die Deckung staatlicher Bedarfe bereitgestellt werden. Die Realisierung kann unter Nutzung einer Mitfluggelegenheit erfolgen oder auch, um z. B. Gesamtsystemfähigkeit nachzuweisen, als eigenständige Mission, national, bilateral oder im Rahmen eines ESA- oder EU-Programmes.

Die Ergebnisse der so mit staatlicher Unterstützung erfolgten Qualifikationsmaßnahmen sollen (unter Berücksichtigung möglicher Sicherheitsfragen, gerade hinsichtlich der PS-Technologien) einem breiten potentiellen Anwenderkreis zur Verfügung stehen. So werden bereits bei der Entwicklung neuer Bausteine und Komponenten Duplizierungen vermieden und die Risiken gesenkt.

Zugleich eröffnet diese Vorgehensweise die Möglichkeit, ggf. weitere Partner, insbesondere aus dem Kreise der KMU's und der Zulieferer für die Raumfahrt, zu erschließen. Die im Allgemeinen als hoch empfundenen Hürden bei der Entwicklung und Qualifikation raumfahrttauglicher Komponenten kann man so reduzieren und potentiellen Anbietern ein neues Geschäftsfeld eröffnen.

### 4. Beitrag der Raumfahrtrobotik zu einer möglichen Explorationsmission

Mit der langjährigen Förderung innovativer Raumfahrtrobotik-Technologien hat sich Deutschland zu einem kompetenten Partner entwickelt, der wesentliche Beiträge zur robotischen Exploration liefern kann.

Ein durch die Wissenschaft getriebenes Szenario für robotische Aktivitäten auf der Mondoberfläche wird derzeit in Definitionsstudien der ESA untersucht. Die Entscheidung über ein europäisches Mondforschungsprogramm mit robotischen Elementen eingebettet in eine internationale Kooperation mit NASA, JAXA und CSA soll in der nächsten



ESA-Ministerkonferenz getroffen werden. Zu den Forschungsthemen, die im besonderen Interesse deutscher Forscher stehen, wird das DLR-RfM zum Jahresende 2018 einen nationalen Workshop durchführen.

Im Nationalen Programm für Weltraum und Innovation soll ein Leitkonzept erarbeitet werden, an dem sich sowohl Technologieentwicklungen als auch die Qualifikationsmaßnahmen orientieren können.

Es wird erwartet, dass sich daraus unmittelbar wertvolle Effekte ergeben für die terrestrische Nutzung in Sonderbereichen (Kraftwerksrückbau, Tiefseebergbau etc.), aber auch im Sinne der Industrie 4.0 Konzepte. KI-Lösungen aus der Raumfahrt, d. h. Roboter-Autonomie gepaart mit fortschrittlichen Lernverfahren, werden direkt von der Raumfahrt in die Wirtschaft transportiert.

## Fazit

Die vorliegende Roadmap dient dazu, den Technologiekorridor „Automatisierungs-Technologien und Robotik in der Raumfahrt“ im Nationalen Programm für Weltraum und Innovation neu zu strukturieren, strategisch auszurichten und festzulegen. Der Grad ihrer Umsetzung ist abhängig von der aktuell laufenden Priorisierungsdiskussion zwischen DLR-RfM und BMWi. Dabei greift sie dieser nicht vor, sondern bildet hierfür eine fachliche, programmatische und strategische Grundlage.

Um einen optimalen Nutzen aus den bislang investierten Mitteln zu ziehen, bauen Einzelmaßnahmen auf in der Vergangenheit erarbeiteten Ergebnissen auf bzw. setzen eine, an die Neuausrichtung des Programmkorridors Raumfahrt-Robotik angepasste, Weiterführung laufender Aktivitäten/Entwicklungen um und integriert die aktuellen Entwicklungen Künstlicher Intelligenz (KI).

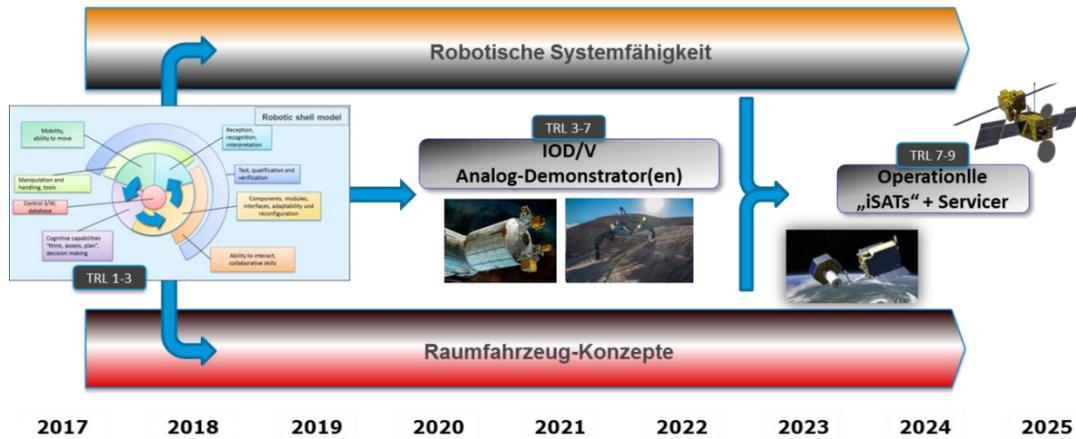
Die Roadmap berücksichtigt dabei das wachsende Interesse der deutschen und europäischen Raumfahrtindustrie an der orbitalen Automatisierung & Robotik und greift die Entwicklungen hinsichtlich New-Space-Geschäftsmodellen auf. So hat z. B. Airbus DS ein im Wesentlichen mit eigenen Mitteln finanziertes Geschäftsmodell zum Einsatz eines sogenannten Space-Tug („Weltraum-Schlepper“, im Prinzip ein robotischer Servicing-Satellit) untersucht und positiv bewertet. Die sich anschließende Designphase wird bis zum Herbst dieses Jahres mit einem Preliminary Design Review abgeschlossen. Danach wird der Konzern über das weitere Vorgehen entscheiden.

Im Bereich der Grundlagenforschung laufen gegenwärtig die oben erwähnten und durch das BMWi vorab freigegebenen Vorhaben mit Laufzeiten von 2-4 Jahren. Zusätzlich liegen dem RfM weitere Vorhabenanträge vor, die sich ebenso an den fachlichen Notwendigkeiten zur Grundlagensicherung im Fachgebiet orientieren. Sie lassen sich den in der Roadmap dargestellten Einzelmaßnahmen zuordnen und führen zu eigenständigen Ergebnissen. Die dafür erforderlichen Mittel sind in der aktuellen Haushaltsplanung des Raumfahrtmanagements berücksichtigt.

Die Planung von Vorhaben zur Technologie-Weiterentwicklung und zur (Sub-) Systemdemonstration umfassen Herstellung und Qualifikation einzelner Schlüssel-Baugruppen und -Komponenten. Im Bereich „Receiving Services“ können bis 2021 die im Projekt iBOSS begonnenen Aktivitäten zu den *Basisbaukastenelementen und der Standard-Schnittstelle* bis zur Flugreife geführt werden.

Im Bereich „Providing Services“ ist die Förderung eines „qualifizierten „*Robotic Servicing Module, RSM, aus industrieller Fertigung*“ vorgesehen. Für das Schlüsselement Manipulator kann nach heutiger Planung die Flugreife bis 2022 erreicht werden.

Die Vorbereitung der IOD-Maßnahmen in den genannten Bereichen beginnt 2019. Sie zielt auf eine Missionsdurchführung 2021/22 ab. Die so demonstrierten Flugmuster stehen danach unmittelbar für die industrielle, operationelle Nutzung zur Verfügung.



Mit der Umsetzung dieser Roadmap erhalten die deutsche Raumfahrtindustrie und die deutschen Raumfahrtforschungsinstitute die Chance, sich mit Schlüsseltechnologien am Aufbau der prognostizierten und in Ansätzen bereits im Aufbau befindlichen modernen Raumfahrtinfrastruktur zu beteiligen. Zugleich sollen sich die staatlich unterstützten Aktivitäten daran orientieren, kurz- und mittelfristige Systemfähigkeit in der Raumfahrt-Robotik zu erreichen.