



BÜRO FÜR TECHNIKFOLGEN-ABSCHÄTZUNG
BEIM DEUTSCHEN BUNDESTAG

New Space – neue Dynamik in der Raumfahrt



Sonja Kind
Tobias Jetzke
Lukas Nögel
Marc Bovenschulte
Jan-Peter Ferdinand



New Space – neue Dynamik in der Raumfahrt



Büro für Technikfolgen-Abschätzung
beim Deutschen Bundestag
Neue Schönhauser Straße 10
10178 Berlin
Telefon: +49 30 28491-0
E-Mail: buero@tab-beim-bundestag.de
Web: www.tab-beim-bundestag.de

2020

Gestaltung: VDI/VDE-IT
Umschlagbild: 3DSculptor/iStock
Papier: Circleoffset Premium White
Druck: Systemedia GmbH, Wurmberg
ISSN-Print: 2702-7252
ISSN-Internet: 2702-7260

Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) berät das Parlament und seine Ausschüsse in Fragen des wissenschaftlich-technischen Wandels. Das TAB wird seit 1990 vom Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) betrieben. Hierbei kooperiert es seit September 2013 mit dem IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH sowie der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH.



Inhalt

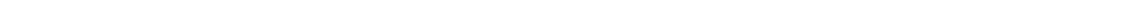
Zusammenfassung	5
1 Einleitung	13
2 Raumfahrt auf dem Weg ins Zeitalter von New Space	15
2.1 Traditionelle Raumfahrt – der erste Wettlauf in den Weltraum	15
2.2 New Space – neue Impulse für die Raumfahrt	17
2.3 Wettlauf zwischen New Space und traditioneller Raumfahrt?	18
3 Die Rolle nationaler Raumfahrtagenturen	21
3.1 Etablierte und neue Raumfahrtnationen	21
3.2 Ziel- und Programmvierfalt der Raumfahrtagenturen	22
3.3 Unterstützung einer Kommerzialisierung der Raumfahrt	25
4 Das deutsche Raumfahrt- und New-Space-Ökosystem	29
4.1 Zuständigkeiten für Raumfahrt und New Space in Deutschland	29
4.2 Förderstrukturen	30
4.2.1 EU-Ebene	30
4.2.2 National	32
4.2.3 Bundesländer	35
4.3 Schwerpunktstandorte von New-Space-Aktivitäten	35
5 Weltraummarkt mit Wachstumsaussichten	39
6 Anwendungs- und Geschäftsfelder von New Space	45
6.1 Etabliert mit weiterem Potenzial	46
6.1.1 Mikrosatelliten und -konstellationen	46
6.1.2 Zugang zum Weltraum: Trägersysteme und Raumfahrzeuge	49
6.1.3 Dienstleistungen und Systeme: Kommunikation, Navigation und Erdbeobachtung	50
6.2 In Entwicklung	58
6.2.1 Weltraumtourismus	58
6.2.2 Serviceaufgaben im Orbit	59
6.2.3 Entsorgung von Weltraumschrott	61



6.3	Prospektiv	64
6.3.1	Produktion im Weltraum	64
6.3.2	Weltraumbergbau	66
6.3.3	Erschließung von Weltraumhabitaten	68
7	Trends, Treiber und Barrieren	71
7.1	Wirtschaft	71
7.1.1	Steigende Gründungsdynamik und Investitionen	71
7.1.2	Schwerer Zugang zu Finanzierung	74
7.1.3	KMU noch nicht im Fokus der direkten Förderung	76
7.1.4	Transfer in Nichtraumfahrtbranchen	76
7.2	Technik	78
7.2.1	Wiederverwendbare Systemkomponenten sparen Ressourcen	79
7.2.2	Serienfertigung steigert die Kosteneffizienz	81
7.2.3	Verwendung von Standardkomponenten spart Zeit und Geld	81
7.2.4	Miniaturisierung senkt die Startkosten	82
7.3	Politik und Recht	82
7.3.1	Schaffung eines sichereren Weltraumrechtsrahmens steht aus	83
7.3.2	Haftungsobergrenzen setzen Standortanreize	88
7.3.3	Vermeidung von Weltraumschrott als Voraussetzung für eine sichere Raumfahrt	89
7.3.4	Fragen zum Datenschutz durch künftige internationale Erdbeobachtungsmissionen	91
7.3.5	Staatliche Raumfahrtagenturen als zentrale Treiber für Technologieentwicklung	92
8	SWOT-Analyse und Handlungsfelder	95
8.1	Stärken	95
8.1.1	Wirtschaft	95
8.1.2	Technik	96
8.1.3	Politik und Recht	97
8.2	Schwächen	97
8.2.1	Wirtschaft	97
8.2.2	Politik und Recht	97



8.3	Chancen	98
8.3.1	Wirtschaft	98
8.3.2	Technik	100
8.3.3	Politik und Recht	100
8.4	Risiken	101
8.4.1	Wirtschaft	101
8.4.2	Technik	101
8.4.3	Politik und Recht	102
8.5	Handlungsfelder	103
8.5.1	Rechtssicheren Rahmen schaffen	103
8.5.2	Innovationsfördernde und -unterstützende Maßnahmen umsetzen	104
8.5.3	New Space als innovative Industrie befördern	105
9	Interviewpartnerinnen und -partner	107
10	Literatur	109
11	Anhang	125
11.1	Abbildungen	125
11.2	Tabellen	125





Zusammenfassung

Ziele und Vorgehen

Die TAB-Kurzstudie gibt einen Überblick über aktuelle Entwicklungen und zukünftige Perspektiven der zivilen deutschen Raumfahrtforschung und -industrie. Im Mittelpunkt steht die durch die zunehmende Kommerzialisierung der Raumfahrt induzierte Entwicklungs- und Gründungsdynamik, auch New Space genannt.

Raumfahrt auf dem Weg ins Zeitalter von New Space

New Space steht für eine Kommerzialisierung der Raumfahrt, die zunehmend von Unternehmen, darunter auch immer mehr Start-ups, geprägt wird. Seit 2000 wurden ca. 22 Mrd. US-Dollar in Raumfahrt-Start-ups investiert, davon rund zwei Drittel allein in den vergangenen 4 Jahren.

Kommerzielle Akteure sorgen mit der Entwicklung neuer Technologien und Geschäftsmodelle für eine Innovationsdynamik in der Raumfahrt. Diese Entwicklung ist insofern neu, als Raumfahrt zuvor fast ausschließlich von staatlichen Akteuren finanziert und von nur wenigen etablierten Unternehmen wie The Boeing Company, Airbus SES oder Lockheed Martin Corp. sowie u. a. Northrop Grumman Corp. umgesetzt wurden. Die zu beobachtenden Kommerzialisierungstendenzen laufen jedoch nicht entkoppelt von staatlichen Aktivitäten. Nach wie vor besteht eine enge Verknüpfung zwischen Staat und Unternehmen. In Europa ist die Europäische Weltraumorganisation (European Space Agency – ESA)¹ einer der wichtigsten Auftraggeber, und auch in den USA ist die National Aeronautics and Space Administration (NASA) für zahlreiche New-Space-Unternehmen ein wichtiger, für viele der wichtigste Kunde.

Auch wenn New Space auf völlig neue Entwicklungen hindeutet, lässt sich keine klare Grenze zwischen „Old Space“ und „New Space“ ziehen. Langjährig etablierte Unternehmen sind genauso wie Start-ups in jenen Bereichen aktiv, die New Space zugeordnet werden. New-Space-Unternehmen agieren einerseits in den angestammten Geschäftsfeldern der traditionellen Raumfahrtindustrie, z. B. Kommunikation, Navigation und Erdbeobachtung, erschließen andererseits aber völlig neue Tätigkeitsfelder, wie etwa die private bemannte Raumfahrt, Weltraumservices inklusive der Entsorgung von Weltraumschrott, Weltraumbergbau und -produktion oder streben gar die Erschließung neuer Weltraumhabitate an.

¹ Bei der ESA handelt es sich um eine eigenständige Organisation und nicht um eine Behörde der Europäischen Union. Die ESA kooperiert aber eng mit der EU.



Angetrieben werden die Entwicklungen durch Innovationen vor allem in den Feldern Miniaturisierung, 3-D-Druck, Robotik und künstliche Intelligenz (KI), die u. a. in stetig sinkenden Kosten für den Raumtransport resultieren und neue Anwendungen ermöglichen.

In den Medien ist das Thema New Space seit Jahren sehr präsent. Besonders umfangreich und medienwirksam wird über die Vorhaben von drei in den USA lebenden Milliardären berichtet, die auch maßgeblich die Entwicklung von New Space vorantreiben. Dabei handelt es sich um den Gründer von Amazon, Jeff Bezos, den als Tesla-Chef bekannt gewordenen Elon Musk sowie dem Gründer der Virgin Group, Richard Branson. Alle drei haben ihre eigenen Raumfahrtunternehmen (Blue Origin Enterprises, L.P., SpaceX – Space Exploration Technologies Corp. und Virgin Galactic, LCC) gegründet, deren Ziel es ist, Menschen ins All zu befördern, dort Infrastrukturen aufzubauen bzw. neue Habitate zu erschließen.

Ein Wettlauf zwischen New Space und traditioneller Raumfahrt?

Vielfach wird mit Blick auf New Space von einem zweiten Wettlauf ins Weltall gesprochen, indem Bezug auf die Entwicklungen der traditionellen Raumfahrt in den 1950er und 1960er Jahren und dem von den USA und der Sowjetunion inszenierten Wettkampf um die Technologieführerschaft und staatlich-militärische Vormachtstellung im Weltraum genommen wird.

Auch gegenwärtig ist eine Art Wettlauf zu beobachten, der sich jedoch vielfältig darstellt und nicht mehr auf den Wettstreit zwischen Nationen beschränkt ist. Obwohl die heutige zivile Raumfahrt durch enge Kooperationsbeziehungen und komplementäre Vorhaben auf staatlicher Ebene gekennzeichnet ist, drängen immer mehr Nationen mit eigenen Aktivitäten in den Weltraum. Gleichzeitig wächst die Konkurrenz zwischen etablierten und neuen Akteuren, die mit vergleichbaren Produkten und Dienstleistungen vermehrt um staatliche und private Aufträge konkurrieren.

Die Rolle nationaler Weltraumagenturen

Die Zahl der Länder mit Raumfahrtagenturen und nationalen Raumfahrtprogrammen ist in den vergangenen Jahren stetig gestiegen. Dabei zählen die NASA, die russische State Space Corporation ROSCOSMOS, die Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) und die ESA zu den schon lange etablierten Akteuren. Mit China, Indien und Korea gewinnt die asiatische Raumfahrt zunehmend an Bedeutung. Aber auch Australien, Brasilien, Neuseeland, Iran, die Vereinigten Arabischen Emirate oder Südafrika unterstreichen ihre jeweiligen Ambitionen durch die Gründung nationaler Raumfahrtagenturen.



Lange Zeit waren die Vergabestrukturen von Aufträgen durch die staatlichen Raumfahrtbehörden mittels detaillierter Vorgaben und Spezifikationen so gestaltet, dass kleinere Unternehmen kaum Chancen bei der Vergabe hatten. Das jedoch zunehmend eingelöste Versprechen der New-Space-Unternehmen, Raumfahrt innovativer, effizienter und effektiver durchzuführen, führt mittlerweile dazu, dass staatliche Weltraumagenturen verstärkt auf die Zusammenarbeit mit privaten Anbietern setzen. Die gelockerten Regularien bzw. Vorgehensweisen einiger Weltraumbehörden beförderten die Entwicklung von New-Space-Unternehmen – und in Konsequenz die Verfügbarkeit innovativer Produkte und Dienstleistungen.

Das deutsche Raumfahrt- und New-Space-Ökosystem

Die ansässige Luft- und Raumfahrtindustrie gilt als wichtiger Innovationstreiber und Technologieentwickler für die europäische Raumfahrt. Das Raumfahrt-Ökosystem – bestehend aus der Gesamtheit der Akteure innerhalb einer Branche – hat sich in den letzten Jahren auch in Deutschland verändert. So entwickeln neben den etablierten Zulieferern und Herstellern zunehmend Start-ups innovative Lösungen für unterschiedliche Fragestellungen. Wie vielfältig die Akteurslandschaft in der Raumfahrt in Deutschland ist, zeigt der Katalog deutscher Raumfahrtakteure (KaRA). Darin werden insgesamt rund 600 Akteure mit Raumfahrtbezug dargestellt, wovon rund 60% Unternehmen sind (rund 360), von denen wiederum fast 80% den Status von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) haben (rund 290). Rund 100 Unternehmen sind jünger als 10 Jahre. Im Vergleich der Bundesländer sind die meisten der im DLR-Katalog erfassten Start-ups in Bayern verortet, gefolgt von Berlin, Baden-Württemberg, Bremen, Nordrhein-Westfalen und Hessen. Für Start-ups besonders relevant sind die Standorte der ESA Business Incubation Centres (ESA BIC) in Bayern, Baden-Württemberg und Hessen. Vier bestehende Clusterinitiativen und Branchennetzwerke tragen zur regionalen Vernetzung von Akteuren aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik bei: bavAIRia e.V., AVIASPACE BREMEN e.V., Cluster Verkehr, Mobilität und Logistik der Wirtschaftsförderung Land Brandenburg GmbH (WFBB) sowie BodenseeAIRia der Wirtschaftsförderung Bodenseekreis GmbH (WFB).

Prosperierender Weltraummarkt

Der globale Markt für weltraumbezogene Wirtschaft wuchs kontinuierlich zwischen 2005 und 2017 mit einer durchschnittlichen Wachstumsrate von 6,7% p. a. Machten Unternehmen in der Raumfahrtindustrie 2005 noch ca. 175 Mrd. US-Dollar Umsatz, steigerte sich dieser nach Berechnungen von Bryce Space and Technology bis 2019 auf insgesamt 366 Mrd. US-Dollar. Für 2040 existieren aktuell drei Prognosen: Während Analysten von Goldman Sachs Group, Inc. und Morgan Stanley & Co. LLC konsistent von einer Marktgröße von ca. 1 Billion US-Dollar ausgehen, übersteigt die Prognose der Bank of America Merrill Lynch mit einem



Wert von über 3 Billionen US-Dollar diese Annahmen deutlich. Nach der letztgenannten Prognose würde sich der Weltraummarkt bis 2040 verzehnfachen.

In der Raumfahrtindustrie wird zwischen Upstream- und Downstreamsektoren unterschieden. Dem Upstreamsektor werden diejenigen Aktivitäten zugeordnet, die Objekte in den Orbit bringen sowie dort betreiben sollen (z.B. Satellitenproduktion, Trägersysteme, Raumfahrzeuge). Dem Downstreamsektor wird im Wesentlichen die kommerzielle Nutzung von Produkten und Dienstleistungen auf der Erde in den Bereichen satellitenbasierte Kommunikation, Navigation und Erdbeobachtung zugeschrieben. Laut einer 2018 erschienen Studie von Strada/Sasanelli (2018) entfiel 2016 mit rund 177 Mrd. US-Dollar (53 %) der größte Anteil des Umsatzes der weltweiten Raumfahrtindustrie auf den privaten Downstreamsektor, gefolgt von rund 77 Mrd. US-Dollar (24 %) im privaten Upstreamsektor. Die übrigen 76 Mrd. US-Dollar (23 %) stellen demnach staatliche Budgets. Der überwiegende Teil der Raumfahrtaktivitäten wird also von privaten Unternehmen vorrangig im Downstreambereich getätigt. Umsatzentwicklungen im Bereich Upstream und Downstream befördern sich gegenseitig positiv und steigern die Dynamik der New-Space-Märkte.

Zahlreiche neue Anwendungen werden durch die New-Space-Aktivitäten ermöglicht und wirtschaftlich tragfähig, weil z.B. Raketenstarts immer preiswerter oder kleine, kostengünstige Satelliten(konstellationen) eingesetzt werden. Zunehmend entstehen neuartige Geschäftsmodelle sowie Produkte und Dienstleistungen, die ihre Wirkung nicht nur innerhalb der Raumfahrt, sondern auch in Nichtraumfahrtindustrien entfalten. Neben Satellitennavigationssystemen, die heute Bestandteil aller Smartphones sind, gibt es auch Beispiele für Materialverbesserungen (z.B. bezüglich Hitzebeständigkeit), Wasseraufbereitungssysteme oder Luftreinigungstechnologien.

Aktuell sind weitere Weltraummärkte in der Entwicklung begriffen, deren Marktpotenziale aufgrund der zum Teil sehr weit in die Zukunft weisenden Anwendung nur sehr vage zu bestimmen sind, darunter Weltraumtourismus oder -bergbau. In den Medien liegt ein besonderer Fokus auf der Darstellung dieser neuen, prospektiven Weltraummärkte. Die Aufmerksamkeit, die diese Themen erfahren, spiegelt jedoch nicht die gegenwärtigen Kommerzialisierungsmöglichkeiten wider. Aktuelle Marktpotenziale liegen vielmehr in der Anwendung von Mikrosatelliten, Trägersystemen und Dienstleistungen in den Bereichen Kommunikation, Navigation und Erdbeobachtung, die schon heute weitgehend implementiert sind, aber dank New Space noch deutliche Impulse erfahren können und weitere Entwicklungspotenziale bieten. Der Weltraumtourismus wird momentan erprobt und ist auf dem Sprung in Richtung Kommerzialisierung. Andere Anwendungsbereiche wie Produktion, Montage, Reparatur oder Entsorgung im All sind Entwicklungsfelder, die größerer technologischer Fortschritte bedürfen. Insbesondere die Erschlie-



ßung von Ressourcen im Weltraum und deren Weiterverarbeitung vor Ort oder deren Rücktransport zur Erde müssen auf ihre Umsetzbarkeit hin getestet werden. Noch weiter in die Zukunft weisend und mit sehr ungewissem Kommerzialisierungspotenzial verbunden ist die Vision, auf Raumstationen bzw. Planeten zu leben und zu arbeiten.

Trends, Treiber und Barrieren

Die Raumfahrtbranche und die Entwicklungen rund um New Space werden durch verschiedene Trends sowie durch fördernde, aber auch hemmende Faktoren bestimmt. Dabei lassen sich drei wesentliche Einflussphären unterscheiden: Wirtschaft, Technik sowie Politik und Recht.

Im wirtschaftlichen Bereich spielen vor allem die Gründungen von New-Space-Start-ups, die Verfügbarkeit von Finanzierungsmitteln, das noch unausgeschöpfte Innovationspotenzial von KMU sowie die Entwicklung von auf Daten und Technologien aus der Raumfahrt basierenden Geschäftsmodellen in Nichtraumfahrtbranchen eine wichtige Rolle.

Mit Blick auf die Technik bieten Innovationen wie Miniaturisierung oder Serienfertigung die Möglichkeit zur Kostenreduktion und somit einer immer preiswerteren Raumfahrt.

Die Schaffung eines sicheren Rechtsrahmens, die Klärung von Fragen zur Haftung und Versicherung sowie verbindliche Regeln zur Vermeidung von Weltraumschrott stellen wichtige Voraussetzungen für die Raumfahrt dar. Schließlich ist auch die Rolle der Raumfahrtagenturen entscheidend, denn insbesondere die NASA befördert durch das Eingehen von öffentlich-privaten Kooperationen mit Unternehmen die Kommerzialisierung neuer Produkte und Services.

SWOT-Analyse und Handlungsfelder

In der Gesamtschau zeigt sich, dass die deutsche Raumfahrt- und New-Space-Akteurslandschaft mit ihrer leistungsfähigen Raumfahrtforschung und -entwicklung vielfältig und im Bereich technischer Komponenten und deren Fertigung international gut anschlussfähig ist. Auch in Deutschland sind Gründungen neuer Unternehmen zu verzeichnen und speziell für die frühen Gründungsphasen sind zahlreiche Fördermaßnahmen verfügbar. Da der Raumfahrtmarkt substanziell wächst, verspricht dieser auch für deutsche Unternehmen lukrative Marktchancen.

Allerdings stehen den potenziell vielversprechenden Entwicklungsmöglichkeiten diverse Innovationsbarrieren gegenüber, wie ein Mangel an Risikokapital (besonders in der Wachstumsphase von Start-ups), ein für kleinere Akteure tendenziell



schwer zugängliches Fördersystem sowie Rechtsunsicherheiten, die eine wettbewerbsfähige Entwicklung der Raumfahrt bremsen. Insgesamt wird in Deutschland im internationalen Vergleich eher wenig in die Raumfahrt investiert, was im Wettbewerb zu einer schlechteren Ausgangsposition führt. Eine entscheidende und zu überwindende Hürde besteht ferner in der Entwicklung von auf Daten und Technologien aus der Raumfahrt basierenden Geschäftsmodellen in anderen Branchen, damit sich die vielversprechenden Potenziale für Anwendungen, insbesondere im Downstreamsegment, erschließen können.

Es ergeben sich daraus im Wesentlichen drei Handlungsfelder: in den Bereichen Rechtssicherheit, innovationsbefördernde Maßnahmen sowie Unterstützung von New Space als innovative Industrie.

Die Anpassung des Rechtsrahmens, d.h. des bisher geltenden Weltraumrechts, erfolgt derzeit durch die Ausgestaltung eines nationalen Weltraumgesetzes unter Berücksichtigung von Lizenzierungsverfahren, Haftung, Zugang und Nutzung von Weltraumressourcen sowie Umgang mit Weltraumschrott. In Hinblick auf die ständig wachsenden Datenmengen, die durch Erdbeobachtungsmissionen von

Abb. 1 Zusammenfassung der Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken (SWOT)

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none">• vielfältige Akteurslandschaft und gut entwickeltes New-Space-Ökosystem• leistungsfähige Raumfahrtforschung und -entwicklung• teilweise weltweite Spitzenstellung in der Forschung (Sensor, Radar, Miniaturisierung)• sich entwickelnde New-Space-Start-up-Szene• gut ausgebautes Fördersystem für die Frühphasenförderung von Start-ups• in Deutschland 3 von 9 ESA-Zentren• 4 Clusterinitiativen und Netzwerke mit Raumfahrtbezug	<ul style="list-style-type: none">• Die mangelnde Verfügbarkeit von Wagniskapital ist eine Wachstumsbremse.• Im internationalen Vergleich fallen, gemessen am BIP, die Ausgaben von Deutschland für Weltraumprogramme gering aus.• KMU profitieren im Fördersystem eher indirekt.• Deutsche Weltraumstrategie von 2010 ist nicht mehr aktuell.• Vielfältige Potenziale der Raumfahrt bzw. von New Space erschließen sich der Bevölkerung kaum.
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none">• wachsender Raumfahrtmarkt• Anwendungen von Erdbeobachtungsdaten mit besonderem Wachstumspotenzial, hier könnten auch Marktführerschaften erreicht werden• Upstream- und Downstreamsektor bieten gleichermaßen Chancen.• Zeitnahe Entwicklung von Geschäftsmodellen im Bereich Weltraumservices, wie z.B. Entsorgung von Weltraumschrott• positive Entwicklung der Zulieferindustrie durch Ausnutzung der Stärken im Maschinen- und Anlagenbau• Deutschland baut seine starke Positionierung in Richtung Vermittler zwischen Raumfahrtnationen weiter aus.	<ul style="list-style-type: none">• Substantielle Marktanteile könnten außerhalb von Deutschland und Europa liegen, weil etablierte bzw. neue US-amerikanische Plattformunternehmen den Markt dominieren.• Weltweiter Wettbewerb nimmt zu, Subventionspolitik der USA fördert die Marktdominanz US-amerikanischer Unternehmen.• Anwendungspotenziale für Nichtraumfahrtunternehmen erschließen sich nur langsam.• Kosteneinsparungen durch den Einsatz standardisierter Bauteile realisieren sich nicht.• Eine internationale Einigung zu Fragen des Weltraumrechts und Datenschutz verzögert sich oder gelingt nur unzureichend.



einer Vielzahl von Akteuren erzeugt werden, stellt sich die Frage, wie durch internationale Abkommen der Datenschutz gewährleistet und die unrechtmäßige Auswertung wettbewerbsrelevanter Daten, insbesondere Unternehmen betreffend, verhindert werden kann.

Mit Blick auf innovationsfördernde Maßnahmen wäre vonseiten der Politik zu prüfen, ob für die Verbesserung des Zugangs zu Finanzierung speziell auf New Space ausgerichtete Finanzierungsinstrumente, wie z.B. ein bei der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) angesiedelter deutscher Weltrauminnovationsfonds, wünschenswert ist oder ob die Wachstumsunterstützung von Hochtechnologie-Start-ups und innovativen KMU insgesamt weiterentwickelt werden soll. Auch hinsichtlich des Fachkräftemangels könnte geprüft werden, ob es raumfahrtspezifischer Programme für die Gewinnung von Talenten und zur Sicherung des wissenschaftlichen Nachwuchses bedarf oder ob diese Fragestellung vorzugsweise allgemein im Rahmen von innovationsunterstützenden Maßnahmen adressiert werden soll.

Deutsche KMU in der Raumfahrt werden ohne eine zielgruppenspezifische Ausrichtung der Förderinstrumente auch weiterhin primär eher indirekt von der Raumfahrtförderung profitieren, indem sie an Projekten als Unterauftragnehmer oder Zulieferer größerer Akteure beteiligt werden. Hier wäre eine stärkere Ausrichtung zukünftiger Förderprogramme etwa durch eine Quote für Start-ups und KMU oder ausschließlich auf Start-ups und KMU ausgerichtete Unterstützungsmaßnahmen abzuwägen, um die Innovationskraft der Raumfahrtindustrie noch besser auszuschöpfen.

Es könnte ferner geprüft werden, ob sich, wie in den USA üblich, ein Wettbewerb von kommerziellen Anbietern um Aufträge mit spezifizierten Fähigkeitsanforderungen („high level requirement“) auch für Europa bzw. Deutschland anbietet. Aufgrund der aktuellen Dynamik im New-Space-Markt böte es sich für Deutschland – auch im Rahmen des ESA-Engagements – an, ambitionierte Public Private Partnerships einzugehen, um damit zum Wachstum des Raumfahrtsektors beizutragen und gleichzeitig die gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Wirkungen der Raumfahrtaktivitäten zu stärken.

Hinsichtlich der im internationalen Vergleich relativ geringen staatlichen Mittel wäre zu überprüfen, ob die investierte Summe angesichts des zu erwartenden wirtschaftlichen Potenzials von raumfahrtbezogenen Produkten und Dienstleistungen (substanziell) erhöht werden sollte. Damit deutsche Unternehmen auf dem wachsenden Raumfahrtmarkt wettbewerbsfähig bleiben können, sind Maßnahmen zu entwickeln, mit denen die Wettbewerbsfähigkeit gesichert bzw. gesteigert werden kann.



Der in den letzten Jahren kostengünstiger gewordene Zugang zum Weltraum bietet erhebliche wirtschaftliche Chancen für eine Vielzahl an Branchen. Damit diese Chancen, insbesondere die Nutzung von Produkten und Dienstleistungen des Downstreamsegments in Nichtraumfahrtbranchen, genutzt werden können, ist die Raumfahrtindustrie gefordert, geeignete Anwendungen und Geschäftsmodelle für die Nichtraumfahrtindustrien zu entwickeln. Dazu böte es sich an, flankierend zur zukünftigen Raumfahrtstrategie die Nutzung von Weltraumtechnologien stärker auch in der Industriestrategie der Bundesregierung und in anderen strategischen Maßnahmen zu verankern, sodass der Anschluss zu New Space stärker mitgedacht wird.

Deutschlands starke Rolle in der europäischen Raumfahrt und auch die Beteiligung an internationalen Projekten wie der International Space Station (ISS) sowie bei der Erstellung des European Service Module (ESM)² für die zukünftigen bemannten Raumfahrzeuge der USA können als guter Ausgangspunkt für Folgeprojekte genutzt werden (DLR Raumfahrtmanagement o.J.b; ESA 2018d).

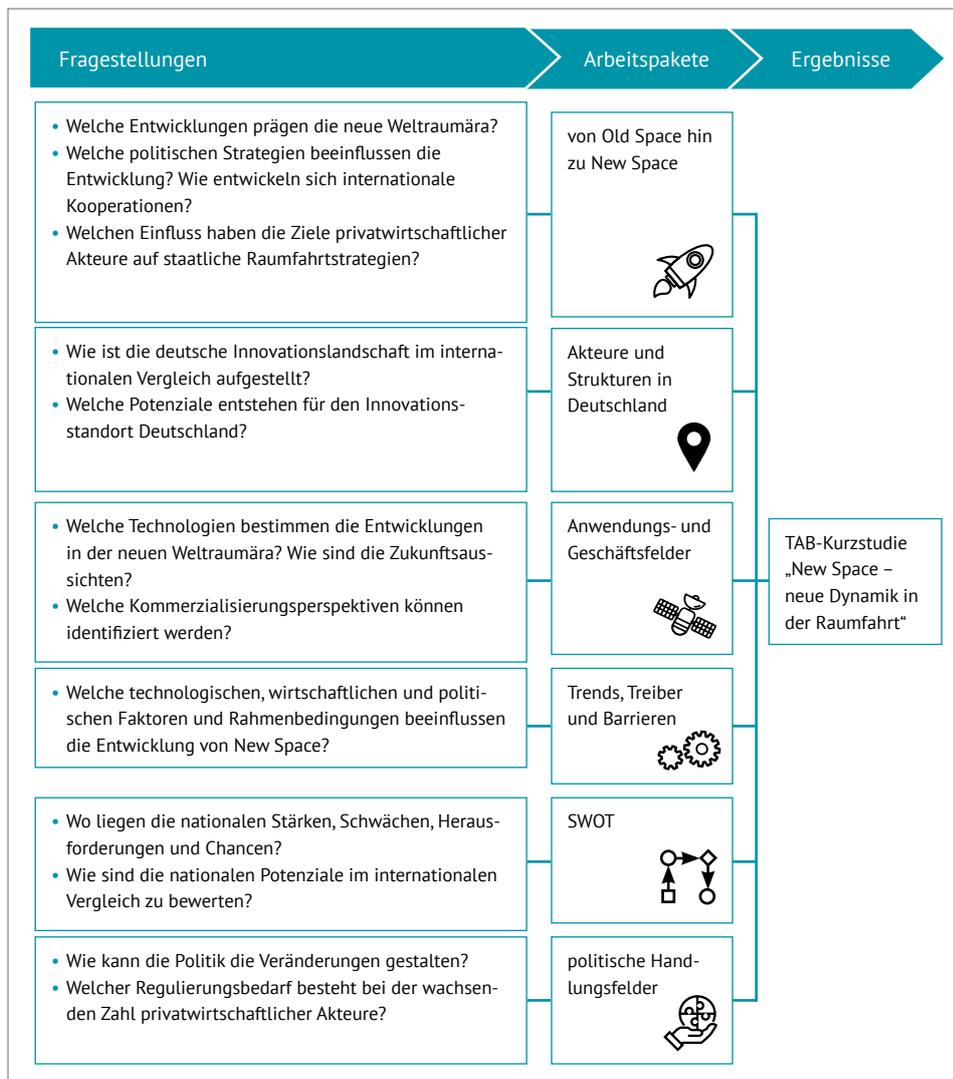
2 Das von einem europäischen Industriekonsortium entwickelte Modul ist Bestandteil der nächsten Mondlandefähre Orion und umfasst das Haupttriebwerk, Solarpaneele zur Stromerzeugung, Treibstoff-, Sauerstoff- sowie Wasservorräte und die Lebenserhaltungssysteme für bis zu vier Astronautinnen und Astronauten auf ihrem Weg zum Mond (DLR Raumfahrtmanagement o.J.d).



1 Einleitung

Die Kurzstudie gibt einen Überblick über aktuelle Entwicklungen und zukünftige Perspektiven der zivilen deutschen Raumfahrtforschung und -industrie mit Fokus auf New Space. Im Mittelpunkt stehen neue durch die zunehmende Kommerzialisierung der Raumfahrt induzierte Entwicklungs- und Gründungsdynamiken. Für eine adäquate Bewertung des Themas New Space wurden die Aktivitäten in Deutschland im Kontext internationaler Entwicklungen betrachtet. Neben nationalen Strategien zur Förderung der Raumfahrt und der Positionierung der großen Raumfahrtorganisationen bilden die Ambitionen neuer Akteure – speziell privatwirtschaftliche Unternehmen und Start-ups – einen besonderen Schwerpunkt der Studie.

Abb. 2 Kernfragen der TAB-Studie





In einem ersten Schritt wurde ein Mapping aktueller technologischer und politischer Trajektorien für bemannte und unbemannte Raumfahrt erstellt. Auf Basis dieses Mappings wird die Entwicklung der Raumfahrt auf dem Weg ins Zeitalter von New Space nachgezeichnet und es wird erläutert, welche Rolle nationale Raumfahrtagenturen einnehmen. Aus dem Mapping leiten sich ferner ein Überblick über den Weltraummarkt und das deutsche Raumfahrt- und New-Space-Ökosystem sowie die Darstellung der für New Space relevanten Anwendungs- und Geschäftsfelder ab. Im Anschluss werden im Rahmen einer anwendungsfeldübergreifenden Analyse die absehbaren direkten und indirekten Effekte der identifizierten Entwicklungen in den Bereichen Wirtschaft, Technik sowie Politik und Recht beschrieben und eingeordnet. Neben technologischen, ökonomischen und rechtlichen Faktoren geht es bei der Darstellung der Trends, Treiber und Barrieren u. a. darum, die Leit- und Zukunftsbilder der beteiligten Akteure zu skizzieren, Innovationshürden und mögliche Interessenkonflikte sowie Kommerzialisierungsperspektiven zu benennen. Außerdem wird auf offene Fragen zum Rechtsrahmen hingewiesen. Hiernach folgt eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse – orientiert an den Fragestellungen einer SWOT-Analyse – sowie abschließend die Beschreibung von Handlungsfeldern.

Eingesetzte Methoden waren Literatur- und Quellenstudium sowie 23 Interviews mit Stakeholdern aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik inklusive Interessenvertretungen wie Verbände (Kap. 9).

Danksagung

Wir bedanken uns sehr herzlich bei den Expertinnen und Experten, die mit ihrem Engagement für Interviews zur Verfügung standen. Ein ebenso herzlicher Dank geht an Dr. Christoph Revermann und Dr. Arnold Sauter für die Durchsicht des Berichtsentwurfs und hilfreiche Verbesserungsvorschläge sowie an Brigitta-Ulrike Goelsdorf für das Lektorat.



2 Raumfahrt auf dem Weg ins Zeitalter von New Space

Die Geschichte der Raumfahrt gipfelte in den 1960er Jahren in dem konkurrierenden Wettlauf zwischen den USA und der Sowjetunion, als erste Nation einen Menschen sicher zum Mond und wieder zurück zu befördern. Die heutige zivile Raumfahrt ist viel stärker durch Kooperationsbeziehungen und komplementäre Vorhaben auf staatlicher Ebene gekennzeichnet. Zugleich drängen immer mehr Nationen mit eigenen Weltraumaktivitäten in den Weltraum. Insofern gestaltet sich der heutige Wettlauf vielfältiger und ist kein Wettstreit einzelner Nationen mehr. Er ist vielmehr dadurch gekennzeichnet, dass etablierte und neue Akteure mit vergleichbaren Produkten und Dienstleistungen zunehmend um staatliche und private Aufträge konkurrieren.

New Space steht für eine zunehmende Kommerzialisierung der Raumfahrt. Private Akteure treiben die kommerzielle Nutzung des Weltraums voran. Nach wie vor sind zwar große Raumfahrtagenturen die Hauptauftraggeber für die Unternehmen, doch immer mehr Start-ups werden gegründet und werben Risikokapital ein. Start-ups wie auch etablierte Unternehmen entwickeln Geschäftsmodelle für neue Anwendungen in der Raumfahrt.

2.1 Traditionelle Raumfahrt – der erste Wettlauf in den Weltraum

Die Entwicklung der Raketentechnik während und nach dem Zweiten Weltkrieg ermöglichte erstmals den Transport größerer Lasten in Erdumlaufbahnen. Der erste 1957 von der Sowjetunion ins All gebrachte Satellit stellte einen zentralen Meilenstein in der Raumfahrt dar und bewirkte in den USA den sogenannten Sputnikschock. Bis zur ersten bemannten Mondlandung am 20. Juli 1969 lieferten sich die USA und die Sowjetunion einen Wettlauf um die Vorherrschaft im All. Wenngleich mit dem Apollo-Soyuz-Testprojekt 1975 (Andocken einer Apollo-Kapsel an eine Soyuz-Raumfähre) eine erste Kooperation zwischen den beiden Weltmächten stattfand, wurden weitere kooperative Projekte erst mit Ende des Kalten Krieges zwischen den USA und Russland realisiert (Chaikin 2007). Davor waren beide Nationen zunächst unabhängig voneinander bestrebt, eine permanente Präsenz im Weltraum mithilfe einer Raumstation zu erreichen. Das Skylab (1973–1974) der NASA folgte auf die von Russland betriebene Raumstation Saljut 1 (1971; Grahn 2008). Letztlich stellten die russische Station Mir (1986–2001) zusammen mit Skylab und Saljut 1 wichtige technologische Schritte für die danach gemeinsam entwickelte und betriebene ISS dar (1998 bis voraussichtlich 2024) (Russian Space Web o.J.).

Die USA und die Sowjetunion prägten den ersten Wettlauf in den Weltraum.



Durch den Einsatz wiederverwendbarer Raumfähren im US-amerikanischen Space-Shuttle-Programm der NASA (1981–2011; 135 Missionen) und die Fortführung des russischen Soyuz-Programms wurde der regelmäßige Besuch des Erdorbits möglich. Der Betrieb der Raumstation Mir und die Konstruktion der ISS wären ohne dauerhaften Zugang zum Erdorbit nicht realisierbar gewesen. Auch die Instandhaltung von Satelliten und Weltraumteleskopen zählt zu den Erfolgen der Shuttleära. Jedoch kennzeichneten auch zwei katastrophale Rückschläge – die Explosionen der Raumfähren Challenger 1986 und Columbia 2003 – sowie die vergleichsweise hohen Betriebskosten das Programm. Letztlich führten 2011 sowohl budgetäre als auch sicherheitstechnische und strategische Gründe zu einer Einstellung des Space-Shuttle-Programms.

Seit 2011 ist die NASA bei der bemannten Raumfahrt auf eine Kooperation mit Russland angewiesen.

Als Folge verfügt die NASA seit 2011 nicht mehr über die Kapazität, Astronauten³ ins Weltall zu befördern, sondern ist auf die Kooperation mit der ROSCOSMOS und das immer noch laufende Soyuz-Programm angewiesen, um bemannte Raumfahrten durchführen und insbesondere die ISS betreiben zu können (Foust 2016). Neben ROSCOSMOS beteiligen sich auch die Weltraumagenturen JAXA (Japan), Canadian Space Agency/Agence spatiale canadienne (CSA/ASC Kanada) und ESA (Europa) am Betrieb der Raumstation. Durchschnittlich sechs Astronauten bzw. Kosmonauten leben und arbeiten permanent auf der ISS. Die ESA hat hier zuletzt mit dem deutschen Astronauten Dr. Alexander Gerst und dem französischen Kollegen Thomas Pesquet einen auch in der Öffentlichkeit stark beachteten Beitrag geleistet.⁴

Die Raumfahrt und ihr Nutzen für die Gesellschaft werden in der Bevölkerung grundsätzlich positiv wahrgenommen, auch wenn die Kosten für Raumfahrt häufig als sehr hoch angesehen und die Raumfahrtaktivitäten deshalb zum Teil auch kritisiert werden. Insgesamt verdeutlicht eine aktuelle europaweite Befragung der ESA eine große Zustimmung der Bevölkerung zur Raumfahrt. Von 5.000 befragten Personen aus den fünf bevölkerungsreichsten Ländern (Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Italien und Spanien) bewerten 91 % die Weltraumaktivitäten als wichtig (Harris Interactive 2019).

3 Neben der Bezeichnung Astronaut wird im Text gelegentlich auch die russische Bezeichnung Kosmonaut verwendet. Die chinesischen Raumfahrer werden als Taikonauten bezeichnet.

4 Inzwischen waren ca. 600 Personen im Weltall, davon etwa 60 Frauen. Aus Deutschland waren es 11 Astronauten, aber bislang noch keine Astronautin. Mit der privat finanzierten Initiative „DieAstronautin.de“ wurde zwischen 2016 und 2017 eine Frau gesucht, die für Deutschland ins All fliegt. Eine erste deutsche Astronautin wird sich voraussichtlich 2021 für ca. 10 Tage auf der ISS aufhalten.



2.2 New Space – neue Impulse für die Raumfahrt

New Space steht für einen neuen Boom in der Raumfahrt, der primär von Unternehmen, darunter zunehmend Start-ups, geprägt wird. Kommerzielle Akteure sorgen mit neuen Technologien und Geschäftsmodellen dafür, dass Innovationen in der Raumfahrt an Dynamik gewinnen. Diese Entwicklung ist insofern neu, als Raumfahrt zuvor fast ausschließlich von staatlichen Akteuren finanziert und von wenigen etablierten Unternehmen, wie Boeing, Airbus oder Lockheed Martin sowie u. a. Northrop Grumman, betrieben wurde.

New Space steht für eine zunehmende Kommerzialisierung der Raumfahrt.

Seit knapp 2 Jahrzehnten spielen kommerzielle Anbieter eine immer wichtigere Rolle, was der Anstieg privater Investitionen verdeutlicht. Allein seit 2000 wurden ca. 22 Mrd. US-Dollar in Raumfahrt-Start-ups investiert, davon rund zwei Drittel zwischen 2015 und 2019 (Bryce Space and Technology 2020a) (Kap. 5).

Start-ups wie etablierte Unternehmen engagieren sich in der modernen Raumfahrt gleichermaßen.

Die Grenzen zwischen New Space und traditioneller Raumfahrt sind allerdings fließend. Auch langjährig etablierte Unternehmen, wie das europäische Unternehmen Airbus, die deutsche OHB System AG und viele KMU der deutschen Raumfahrtbranche, sind in jenen Bereichen aktiv, die New Space zugeordnet werden. Auch wenn immer mehr Start-ups die Entwicklungen von New Space prägen, lässt sich letztlich keine klare Grenze zwischen Old Space und New Space ziehen.

New-Space-Unternehmen agieren einerseits in den angestammten Geschäftsfeldern der traditionellen Raumfahrtindustrie, z. B. der satellitenbasierten Kommunikation, Navigation und Erdbeobachtung, erschließen andererseits aber völlig neue Tätigkeitsfelder, wie etwa die private bemannte Raumfahrt, Weltraumservices inklusive der Entsorgung von Weltraumschrott, Weltraumbergbau und -produktion, oder sie streben gar die Erschließung neuer Weltraumhabitate an. Angetrieben werden die Entwicklungen durch Innovationen, vor allem in den Feldern Miniaturisierung, 3-D-Druck, Robotik und künstliche Intelligenz (KI), die u. a. in stetig sinkenden Kosten für den Raumtransport resultieren und neue Anwendungen ermöglichen.

In den Medien ist das Thema New Space seit Jahren sehr präsent. Besonders umfangreich und medienwirksam wird über die Vorhaben von drei in den USA lebenden Milliardären berichtet, die auch maßgeblich die Entwicklung von New Space vorantreiben. Dabei handelt es sich um den Gründer von Amazon, Jeff Bezos, den als Tesla-Chef bekannt gewordenen Elon Musk sowie dem Gründer der Virgin Group, Richard Branson. Alle drei haben ihre eigenen Raumfahrtunternehmen gegründet, deren Ziel es ist, Menschen ins All zu befördern, dort Infrastrukturen aufzubauen bzw. neue Habitate zu erschließen:

Die Wahrnehmung von New Space wird wesentlich durch drei Milliardäre und deren Unternehmen geprägt.



- SpaceX (Elon Musk): Das 2002 gegründete Unternehmen verfolgt u. a. langfristig die Kolonisierung des Mars und noch weiter entfernt liegender Planeten. Schon heute werden die von SpaceX entwickelten Falcon-Raketen und das Dragon-Raumschiff für die Versorgung der ISS und Transporte von Satelliten eingesetzt. SpaceX wird somit zu großen Teilen durch Aufträge der NASA finanziert.
- Blue Origin (Jeff Bezos): Dieses 2000 gegründete Unternehmen entwickelt primär auch Raketen für die Erschließung der Erdumlaufbahn und den weiteren Weltraum. Diese sollen, genau wie jene von SpaceX, wiederverwendbar sein.
- Virgin Galactic (Richard Branson): Das Unternehmen möchte vorwiegend Flüge für Touristen anbieten, bei denen die Grenze zum Weltraum (Kármán-Linie in 100 km Höhe) zwar erreicht wird, ein Eintritt in eine Umlaufbahn um die Erde jedoch nicht erfolgt. Perspektivisch sollen aber auch Raumflugzeuge für wissenschaftliche Missionen in der Erdumlaufbahn entwickelt werden.

Das Versprechen von New Space lautet, die Raumfahrt schneller preiswerter und einfacher zu machen.

Darüber hinaus investieren weitere rund 25 Milliardäre aus den USA in die Raumfahrt, darunter Bill Gates (Microsoft), Marc Zuckerberg (Facebook), Peter Thiel (PayPal), Sergey Brin und Larry Page (Google Alphabet) sowie die Milliardäre Ma Huateng aus China und Ricardo B. Salinas aus Mexiko (Bryce Space and Technology 2018; Schneider 2018b, S. 18). Allen gemeinsam ist das Ziel, den Weltraum leichter zugänglich zu machen, indem die Raumfahrt preiswerter und einfacher wird.

2.3 Wettlauf zwischen New Space und traditioneller Raumfahrt?

Der Wettbewerb der Nationen nimmt zu, denn immer mehr Länder entwickeln eigene Raumfahrtambitionen.

In den Medien wird mit Blick auf New Space vielfach von einem zweiten Wettlauf ins Weltall gesprochen, indem Bezug auf die Entwicklungen der traditionellen Raumfahrt in den 1950er und 1960er Jahren und dem von den USA und der Sowjetunion geführten Wettkampf um die Technologieführerschaft und staatlich-militärische Vormachtstellung im Weltraum genommen wird. Zwischen den raumfahrenden Nationen, dort ansässigen Raumfahrtagenturen und privatwirtschaftlichen Akteuren bestehen jedoch zunehmend komplexe Wechselbeziehungen, die sich nicht länger nur auf einen bilateralen Wettstreit der zwei größten Weltraumnationen USA und Russland reduzieren lassen. Der neue Wettlauf in die Weltraumära des 21. Jahrhunderts ist nicht mehr eindeutig als ein Rennen zwischen einzelnen, wenigen Akteuren zu charakterisieren. Vielmehr handelt es sich um einen Wettbewerb um das Erreichen bestimmter technologischer Meilensteine sowohl zwischen Nationen als auch kommerziellen Anbietern.

Zwar ist die heutige zivile Raumfahrt überwiegend durch Kooperationsbeziehungen und komplementäre Vorhaben auf staatlicher Ebene gekennzeichnet und



internationale Kooperationen sind mittlerweile üblich, verlaufen jedoch nicht ohne Zwischenfälle. Die Annexion der Krim störte das Verhältnis zwischen den USA und Russland auch im Hinblick auf gemeinsame Raumfahrtaktivitäten. Als Folge der Unruhen auf der Krim stellte die NASA vorübergehend die bilaterale Kooperation mit ROSCOSMOS ein (Kramer 2014). Gemeinsame Unternehmungen zwischen China und den USA sind hingegen gar nicht möglich, denn ein Kooperationsverbot – das zurückgeht auf Gesetze zur Kontrolle des Handels mit Waffen, Rüstungs- und Verteidigungsgütern –, untersagt die Zusammenarbeit zwischen der NASA und der China National Space Administration (CSNA) (Stofan 2017). Die sinkende Hürde für einen Zugang ins Weltall aufgrund niedrig werdender Transportkosten motivieren zunehmend Länder, die bislang keine eigenständigen Raumfahrtaktivitäten realisieren konnten, erste (bisweilen große) Schritte zu wagen und in den Wettbewerb mit den angestammten Akteuren zu treten. Exemplarisch sind hier die Fortschritte der chinesischen Raumfahrt zu nennen; aber auch Israel oder Indien treten zunehmend als relevante Raumfahrtnationen in Erscheinung (Kap. 3.1).

So nehmen seit fast 2 Jahrzehnten die nationalen Anstrengungen, das Weltall zu erreichen, tendenziell zu. Gründe hierfür sind u. a. der Wunsch nach Unabhängigkeit beim Zugang zum Weltraum und der dort betriebenen Satellitentechnik und – meist damit verbunden – der Beweis der technologischen Vormachtstellung gegenüber anderen Nationen. Beispiele sind Chinas Pläne zur Errichtung eigener Raumstationen⁵ im Erdorbit oder Indiens Test einer Anti-Satelliten-Waffe im Jahr 2019, bei der ein eigener Satellit zerstört wurde (dpa 2019b; ntv.de/mau/AFP/dpa 2019). Trotz intensiverer Kooperationsbemühungen scheint der Weltraum nach wie vor eine Arena für politische Machtdemonstrationen und den Wettbewerb zwischen Staaten zu sein (Bockel 2018).

Der Weltraum ist und bleibt eine Arena für Machtdemonstrationen und Wettbewerb zwischen Staaten.

New Space ist im Vergleich zur traditionellen Raumfahrt stärker durch kommerzielle Interessen charakterisiert. Dieser Wandel wurde in den 1980er Jahren in Europa mit der Gründung des privatwirtschaftlichen Unternehmens Arianespace SA durch die ESA eingeleitet. Mit Ende des Kalten Krieges wurden ferner in den USA der Markt für Weltraumtransporte dereguliert und in Russland staatliche Hersteller von Weltraumtechnologie anteilig privatisiert. In diesem Zusammenhang wurde erstmals auch unternehmerischen Akteuren der Zugang zu Raketenstarts ermöglicht, was den Boden für die New-Space-Entwicklungen bereitet hat, z. B. den Start von kommerziellen Satellitensystemen.

5 Wesentliche Technologien wurden anhand zweier kleinerer Module getestet. Tiangong 1 und 2 wurden 2011 und 2016 gestartet. Tiangong 2 wurde 2019 gezielt im Meer versenkt. Die Arbeiten an einer neuen Raumstation werden laufend fortgesetzt.



Die Kommerzialisierung der Raumfahrt läuft jedoch nicht entkoppelt von staatlichen Aktivitäten. Vielmehr gibt es eine enge Verknüpfung zwischen Staat und Unternehmen (Kap. 7.3.4). In Europa ist die ESA einer der wichtigsten Auftraggeber und auch in den USA ist die NASA für zahlreiche New-Space-Unternehmen ein wichtiger, für viele gar der wichtigste Kunde.

Private Anbieter konkurrieren zunehmend um staatliche sowie private Aufträge und ändern mit neuen Geschäftsmodellen die Marktlandschaft.

Demnach lässt sich nicht nur auf nationaler, sondern auch auf wirtschaftlicher Ebene von einem Wettlauf sprechen. Hier konkurrieren nicht nur bereits etablierte Unternehmen mit vergleichbaren Produkten und Dienstleistungen zunehmend um staatliche und private Aufträge, überdies verändern neue Unternehmen mit innovativen Geschäftsmodellen die bestehende Marktlandschaft. Während also die zivile Raumfahrt in politischer Hinsicht überwiegend eine kooperative Anstrengung mit vereinzelt wettbewerblichen Tendenzen darstellt, wird sich das gesamte Ausmaß eines neuen Wettlaufs in wirtschaftlicher Hinsicht erst noch zeigen müssen, denn bislang sind privatwirtschaftliche Akteure noch in hohem Maße von staatlichen Aufträgen abhängig. Insofern können zum jetzigen Zeitpunkt die vielfältigen Kommerzialisierungsperspektiven in der Raumfahrt erst in ihren Grundzügen beschrieben und ihre Entwicklungsrichtungen nur vermutet werden, auch wenn sich jetzt schon abzeichnet, dass der nicht zuletzt durch die staatlichen Aufträge der USA induzierte Wettbewerb zu einer Marktdominanz der USA führen dürfte (Kap. 7.3.4). Für die Politik besteht die Herausforderung, eine sich wandelnde, zunehmend kommerzialisierte, internationale Raumfahrtindustrie zu verstehen und die sich abzeichnenden Veränderungen – auch im Sinne einer jeweiligen nationalen Perspektive – vorausschauend zu gestalten.



3 Die Rolle nationaler Raumfahrtagenturen

Raumfahrt ist traditionell eine primär staatliche Aufgabe. Nationale Raumfahrtagenturen prägen mit ihren strategischen Zielen und Aktivitäten die Raumfahrt bis heute. Sie sind dabei von den jeweiligen staatlichen Interessen gelenkt. Die eigenständige Durchführung nationaler Raumfahrtaktivitäten dient oftmals der Sicherstellung staatlicher Unabhängigkeit: Vor allem bei der Telekommunikation, aber auch angesichts der zunehmenden Etablierung globaler, satellitenbasierter Navigationssysteme besteht das Ziel vieler Staaten darin, ihre Abhängigkeit von Systemen zu verringern, die unter der Kontrolle anderer Staaten stehen. Zumindest ein Teil der jüngsten staatlichen Raumfahrtaktivitäten ist darauf zurückzuführen, Souveränität in den Bereichen Kommunikation und Navigation zu erlangen. Die Kommerzialisierungstendenz und damit die Entstehung eines New-Space-Ökosystems gehen nicht zuletzt auf gezielte Maßnahmen der verschiedenen Raumfahrtagenturen zurück.

3.1 Etablierte und neue Raumfahrtnationen

Die Zahl der Länder mit Raumfahrtagenturen und die Zahl der Staaten mit nationalen Raumfahrtprogrammen haben in den vergangenen Jahren stetig zugenommen. Mit Aktivitäten in China (CNSA), Indien (Indian Space Research Organisation – ISRO), Japan (JAXA) und Südkorea (Korea Aerospace Research Institute – KARI) hat die Raumfahrt auch im asiatischen Raum zunehmend an Bedeutung gewonnen. Ebenso unterstreichen Australien, Brasilien, Neuseeland, Iran, die Vereinigten Arabischen Emirate oder Südafrika ihre Ambitionen durch Gründung nationaler Raumfahrtagenturen.

Die eigenständige bemannte Raumfahrt wurde bislang jedoch ausschließlich von den USA, Russland und China betrieben. Indien plant im Rahmen seiner Raumfahrtaktivitäten, Ende 2021 eine erste bemannte Mission durchzuführen (Kunhikrishnan 2019).

Schließlich vereint die ESA die Aktivitäten ihrer 22 Mitglieder⁶ und bildet einen wichtigen Knotenpunkt internationaler Kooperationen. Als transnationale Raumfahrtagentur sind die Missionen der ESA in der Regel Kooperationen zwischen internationalen Partnern. Dabei weist die Entwicklung von Raumfahrtsystemen (beispielsweise Raumsonden oder Module für die ISS) einige Besonderheiten auf: Da alle Mitgliedstaaten das Budget der ESA gemeinsam zur Verfügung stellen, jedoch unterschiedliche Anteile daran haben, wird auch die Beschaffung

Bemannte Raumfahrt wurde bislang ausschließlich von den USA, Russland und China betrieben.

⁶ Mitgliedstaaten: Belgien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Großbritannien, Irland, Italien, Luxemburg, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Spanien, Tschechische Republik und Ungarn (ESA o.J.b).



so aufgeteilt, dass Aufträge nach dem Prinzip des geografischen Mittelrückflusses (Geo-Return) vergeben werden (ESA o. J.e). Dies bedeutet, dass abhängig vom budgetären Anteil an einer spezifischen Mission, z.B. die Entwicklung der neuen Ariane-6-Rakete, auch anteilig Aufträge an die im jeweils beteiligten Land ansässigen Unternehmen vergeben werden.

3.2 Ziel- und Programmvietfalt der Raumfahrtagenturen

Neue staatliche Akteure können etablierte Gleichgewichte in der Raumfahrt verschieben, bestehende Kooperationsbeziehungen verändern und neue Interessenkonflikte auslösen. Etablierte Raumfahrtagenturen sind dabei keine starren Konstrukte, sondern unterliegen ebenfalls Veränderungsprozessen. Diese werden einerseits innenpolitisch getrieben, andererseits jedoch in hohem Maße auch von internationalen Verflechtungen und Vereinbarungen bzw. gemeinsamen Zielen beeinflusst. Anhand einiger prominenter Beispiele von nationalen Raumfahrtprogrammen und deren Zielen sowie daraus resultierenden internationalen Wechselbeziehungen wird dies deutlich:

Als Nachfolgeprojekt zur ISS ist das Lunar Gateway im Mondorbit geplant.

- Die US-amerikanische Raumfahrt ist in vielerlei Hinsicht weltweit führend. Allerdings sah sich die NASA in der Vergangenheit immer wieder mit budgetären Restriktionen, wechselnden politischen Maßgaben und Rückschlägen in der Technologieentwicklung konfrontiert. Momentan agiert die NASA auf Basis der von US-Präsident Trump am 11. Dezember 2017 unterzeichneten „Space Policy Directive-1“ und der daraus weiteren abgeleiteten „Directives“ (The White House 2017, 2018a, 2018b u. 2019). Primärer Fokus ist die Explora-

Abb. 3 Visualisierung des Lunar Gateways



Quelle: NASA (<https://www.nasa.gov/gateway>; 1.12.2020)



tion des Sonnensystems mittels unbemannter und bemannter Raumfahrt. Die NASA hat beschlossen, bis spätestens 2024 aus der Finanzierung der ISS auszusteigen. Als Nachfolge der ISS planen die USA eine neue, jedoch nicht ständig bemannte Raumstation, die den Mond umkreisen soll (Zabel 2018). Das Lunar Gateway soll im Wesentlichen von der NASA in Kooperation mit anderen Weltraumagenturen wie ESA, ROSCOSMOS, JAXA und CSA/ASC sowie durch private Investoren, z. B. den Hotelunternehmer Jeff Bezos, finanziert werden (AS/dpa/dpa 2018; Lindinger 2017; Schadwinkel/Schneider 2019; Schneider 2018b, S. 151). Von der bis 2024 aufzubauenden Raumstation sollen vor allem Erkundungsflüge zum Mond oder Mars gestartet werden (Northon 2018; Zabel 2018).

Ein weiteres, schon länger verfolgtes Ziel der NASA ist die Entwicklung von bemannten Raumfahrzeugen. Damit soll die 2011 durch die Einstellung des Space-Shuttle-Programms entstandene Lücke geschlossen und die seither bestehende Abhängigkeit von Russlands Soyuz-Programm verringert werden. Um dieses Ziel zu erreichen, hat die NASA ihre Beschaffungsstrategie geändert und Möglichkeiten für privatwirtschaftliche Unternehmen geschaffen (Kap. 7.3.4).

Schließlich stellt sich, genau wie für alle an der ISS beteiligten Raumfahrtagenturen auch, für die NASA die Frage nach einem Weiterbetrieb der ISS. Eine Fortsetzung der Mission über 2024 hinaus soll auf der ESA-Ministerkonferenz im November 2019 erörtert werden (Bundesregierung 2019). Es wird erwogen, den Betrieb an privatwirtschaftliche Akteure für Zwecke der kommerziellen Forschung zu übertragen (AS/dpa/dpa 2018; Foust 2018d).

- Russlands Raumfahrt hat in den vergangenen Jahren tiefgreifende Veränderungen erfahren. ROSCOSMOS als nationale Raumfahrtagentur wurde in der existierenden Form erst 2016 etabliert, da der gleichnamige Vorläufer aufgrund technischer Fehlschläge, von Korruptionsvorwürfen und anderer Krisen umstrukturiert wurde. Die Erneuerung ging einher mit der Verstaatlichung und Integration ehemals privater Unternehmen in die Raumfahrtagentur. Heute ist ROSCOSMOS als Staatsunternehmen mit der Durchführung des russischen Raumfahrtprogramms beauftragt. Primäre Ziele sind neben der Modernisierung von Weltraumhardware (Trägersysteme etc.) der dauerhafte Betrieb eines neuen Weltraumbahnhofs für den Start bemannter Raketen auf russischem Staatsgebiet (im Gegensatz zum bisher einzigen russischen Weltraumbahnhof in Baikonur, Kasachstan), die Konstruktion einer russischen Raumstation als Nachfolge der ISS im Erdorbit (Holland 2016; ZEIT ONLINE 2015) sowie die Mondlandung von Kosmonauten bis 2030 (Berger 2019; BMWi 2008). Ähnlich wie die USA, hat auch Russland bereits Pläne für eine kommerzielle Nutzung der ISS formuliert. Diese legen den Fokus aber gegenüber den US-amerikanischen Plänen auf Weltraumtourismus (Der Standard 2018; FOCUS Online o.J.).

Die USA streben in Zusammenarbeit mit kommerziellen Anbietern daran, ihre Unabhängigkeit in der bemannten Raumfahrt zurückzugewinnen.

ROSCOSMOS agiert seit 2016 als russisches Staatsunternehmen und zielt u.a. auf einen Weltraumbahnhof auf russischem Gebiet sowie eine eigene Raumstation.

Auch China arbeitet an einer eigenen Raumstation und strebt die wirtschaftliche Nutzung des Weltraums an.

- Die chinesische Regierung versteht Raumfahrt als integralen Bestandteil der nationalen Industrie- und Innovationspolitik. Dementsprechend soll die chinesische Raumfahrt langfristig zur Schaffung von Wohlstand beitragen (Goswami 2019). Daher dienen chinesische Raumfahrtmissionen zwar primär der Exploration des Weltraums, wie durch die Raumsonde Chang'e 4 und deren Landung im Januar 2019 auf der abgewandten Seite des Mondes demonstriert (SpacePolicyOnline.com 2019), jedoch können diese und weitere Missionen als Schritte zu einer wirtschaftlichen Nutzung des Weltraums und seiner Ressourcen verstanden werden. Bereits jetzt verfügt China beispielsweise über mehr aktive Satelliten im Erdorbit als Russland (Koren 2017). Auch in der bemannten Raumfahrt haben chinesische Taikonauten seit 2003 bereits beachtliche Erfolge erzielen können. Zurzeit arbeitet China an einer eigenen, modularen Raumstation als Nachfolger zu den beiden Raumlaboren Tiangong 1 und Tiangong 2, die ab 2022 ständig bemannt sein und ähnlich wie das Lunar Gateway der NASA als Ausgang für Missionen zum Mond oder Mars dienen soll (Hegmann 2016a). Weitere Ziele sind die Exploration anderer Objekte im Sonnensystem sowie die Konstruktion nukleargetriebener Raumschiffe (Wall 2019).

Indien verfügt über eigene Trägertechnologien und hat Ambitionen in Richtung bemannte Raumflüge.

- Die Raumfahrt Indiens blickt zwar auf eine mittlerweile 50-jährige Geschichte zurück, hat aber vor allem im vergangenen Jahrzehnt mit ambitionierten und erfolgreichen Missionen international Aufsehen erregt. So konnte bereits 2014 mit dem ersten Versuch eine erfolgreiche Marsmission realisiert werden (Greene 2017). Im Februar 2017 wurden mit einer einzigen Trägerrakete 104 Kleinsatelliten in den Erdorbit befördert. Im März 2019 erregte Indien dadurch Aufmerksamkeit, dass ein eigener Satellit im Rahmen eines indischen Anti-Satelliten-Raketentests abgeschossen wurde (dpa 2019b; ntv.de/mau/AFP/dpa 2019). Zurzeit verfolgt die Indian Space Research Organisation (ISRO o.J.) vielfältige Missionen unter dem übergeordneten Ziel einer nationalen Entwicklung. So ist z.B. die zunächst eher vorsichtig verfolgte bemannte Raumfahrt (Bagla 2016) zuletzt verstärkt in Angriff genommen worden. Erste bemannte Raumflüge sollen 2022 stattfinden (PTI 2018).

Japan will mithilfe von Unternehmen den Weltraum erforschen und besiedeln.

- Die Anfänge der japanischen Raumfahrt liegen ebenfalls schon in den 1950er Jahren. In jüngerer Vergangenheit haben mehrere Reorganisationen der japanischen Raumfahrtbehörden stattgefunden, aus denen 2015 schließlich die Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) in ihrer heutigen Form hervorging. Einhergehend mit neuen strategischen Aufgaben, wurde das sogenannte Space Exploration Innovation Hub Center ins Leben gerufen mit dem Ziel, die Erforschung und Besiedlung des Weltraums auch unter Einbeziehung privatwirtschaftlicher Akteure voranzutreiben (JAXA 2018). Angestrebt wird der Einsatz bestehender Technologien, die auf spezielle Anforderungen hin weiterentwickelt werden und auch zu neuen Märkten auf der Erde führen sollen. Als einer der letzten großen Erfolge kann die Raumsonde Hayabusa (2003–2010) angese-



hen werden, die erfolgreich Partikelproben vom Asteroiden (25143) Itokawa zur Erde zurückgeführt hatte.⁷ Die Nachfolgemission Hayabusa 2 startete 2014 unter deutscher Beteiligung zum Asteroiden (162173) Ryugu und endete Ende 2020.

- Europas Raumfahrt in Gestalt der ESA und der Förderprogramme der europäischen Kommission zeichnet sich durch vielseitige Kooperationen aus (EK 2016). Die Beteiligung an der ISS ist nur eines von vielen Beispielen. Genau wie die anderen Raumfahrtnationen verfolgt auch der Staatenbund Europa eigenständige Ziele. Allen voran steht die Komplettierung des europäischen Satellitennavigationssystems Galileo (ESA/EK 2002) sowie der Betrieb des Erdbeobachtungsprogramms Copernicus.⁸ 2016 hat die ESA zusammen mit der EU-Kommission ein gemeinsames Memorandum „The future of European space“ unterzeichnet, um die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Raumfahrtindustrie zu stärken. Diese Zielsetzung wurde durch die ESA-Resolution von 2016 „Towards Space 4.0 for a United Space in Europe“ bekräftigt (ESPI 2019).

Wichtige Ziele der ESA sind die Komplettierung des Satellitennavigationssystems Galileo und der Betrieb des Erdbeobachtungsprogramms Copernicus.

3.3 Unterstützung einer Kommerzialisierung der Raumfahrt

Die Vergabestrukturen von Aufträgen durch die staatlichen Raumfahrtbehörden waren mittels detaillierter Vorgaben und Spezifikationen lange Zeit so gestaltet, dass kleinere Unternehmen kaum Chancen auf Aufträge hatten. Daher fokussierte sich die technologische Kompetenz auf immer weniger Unternehmen, was schließlich zu Monopolen bzw. Oligopolen führte. In den USA zählten Lockheed Martin oder Boeing dauerhaft zu den wichtigsten bzw. nahezu einzigen Vertragspartnern der US-Regierung für Raumfahrtaufträge (Bockel 2018). Diese monopolhaften Strukturen führten zu geringen Anreizen in Bezug auf Innovation und Kostensenkung bei den Vertragspartnern.

Staatliche Weltraumagenturen setzen mittlerweile jedoch verstärkt auf die Zusammenarbeit mit neuen privaten Anbietern. Die inzwischen gelockerten Regularien bzw. Vorgehensweisen einiger Weltraumbehörden befördern die Entwicklung von New-Space-Unternehmen und in der Konsequenz die Verfügbarkeit innovativer und kosteneffizienter Produkte und Dienstleistungen.

Um die Kommerzialisierung von Raumfahrtaktivitäten weiter zu steigern, sind in den letzten Jahren vielfältige Maßnahmen und Programme von Weltraumagenturen entwickelt worden. Die folgenden Beispiele vermitteln einen Eindruck der Bandbreite an Maßnahmen, durch die es privatwirtschaftlichen Akteuren ermöglicht werden soll, sich als Teil der internationalen Raumfahrt zu etablieren.

⁷ <http://hayabusa.jaxa.jp/e/index.html> (2.11.2020)

⁸ <https://www.copernicus.eu/de> (2.11.2020)

Seit dem 2010 von der NASA initiierten CCDev-Programm können Unternehmen Raumfahrttechnologien eigenständig entwickeln und vermarkten.

- Die NASA hat mit Blick auf die Einstellung des Space-Shuttle-Programms 2011 bereits ein Jahr zuvor das „Commercial Crew Development Program“ (CCDev) initiiert und verfolgt seitdem das Ziel, eigenständig und unabhängig von anderen Nationen Astronauten in den Weltraum zu befördern. Der im CCDev gewählte Ansatz unterscheidet sich fundamental von der bis dahin etablierten Vorgehensweise zur Entwicklung bemannter Raumfahrzeuge (NASA o.J.a) und den geltenden Beschaffungsprozessen (Vernile 2017, S. 1 ff.). So wurde erstmals die Möglichkeit geschaffen, dass privatwirtschaftliche Unternehmen eigenständig Technologien entwickeln und vermarkten können. Die Technologieentwicklung basiert dabei auf den NASA-Anforderungen, jedoch verbleiben die entwickelten Technologien im Besitz der Unternehmen und können von diesen weiter vermarktet werden. In dem mehrjährig angelegten Programm sind derzeit SpaceX und Boeing aktiv. SpaceX absolvierte mit dem Raumschiff Crew-Dragon Anfang März 2019 einen ersten unbemannten Testflug, 2020 folgte ein erfolgreicher bemannter Flug zur ISS (BR24 2020; Foust 2019). Der CST-100 Starliner von Boeing befindet sich aktuell ebenfalls in der finalen Testphase (Boeing.com 2019).

Abb. 4 SpaceX Crew Dragon dockt an ISS an



Quelle: NASA (https://images.nasa.gov/details-KSC-20190225-PH_SPX01_0001.html; 2.11.2020)

Auch bei der zukünftigen Erforschung des Mondes setzt die NASA auf die Innovationskraft privatwirtschaftlicher Akteure. Im „Commercial Lunar Payload Services“ (CLPS) werden ausgewählte Unternehmen aufgefordert, Nutzlasten wie z.B. Rover für die Mondoberfläche zu entwickeln und zu kommerzialisieren (NASA 2018b).



Die NASA hat durch diese und weitere Programme vor allem die Technologieentwicklung von Startsystemen vorangetrieben, sodass beispielsweise ein Unternehmen wie SpaceX heute in der Lage ist, seine Startdienstleistungen weltweit anzubieten. Mit 21 Raketenstarts ist SpaceX das Unternehmen mit den meisten Starts pro Jahr (Stand 2018; OECD 2019).

Die NASA hat das privatwirtschaftliche Angebot von Startsystemen durch SpaceX maßgeblich vorangetrieben.

Abb. 5 Boeing CST-100 Starliner



Quelle: NASA (https://images.nasa.gov/details-KSC-20180719-PH_BOE01_0001.html; 2.11.2020)

- Die europäische Entwicklung der Kommerzialisierung von Raumfahrtanwendungen – zumindest mit Blick auf die Entwicklung von Trägersystemen – wird oftmals als verzögert gegenüber den US-amerikanischen Kommerzialisierungsschritten charakterisiert (Vernile 2017, S.11 ff.). Dennoch hat auch die ESA in den letzten Jahren Maßnahmen initiiert, um die internationale Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Raumfahrtindustrie zu stärken und insbesondere New-Space-Akteuren Marktchancen zu eröffnen. Dies geschieht u.a. durch finanzielle und technologische Unterstützung der in ganz Europa verorteten ESA Business Incubation Centres (ESA-BIC) (Kap. 4.2.1) und durch Programme wie „ESA Business Applications“⁹. Ferner ist die ESA Partner des deutschen Innovationswettbewerbs „INNOspace-Masters“¹⁰. Ziele dieser ESA-Aktivitäten sind die Entwicklung raumfahrtbasierter Anwendungen und die Zusammenführung verschiedener Akteure auch aus dem Nichtraumfahrtbereich. Weiterhin versucht die ESA, mit der Entwicklung der Ariane-6-Trägerrakete (Erstflug für das zweite Quartal 2022 geplant) eine wettbewerbsfähige europäische Lösung für einen unabhängigen Zugang zum Weltraum zu präsentieren, die gegenüber ihren Vorgängerinnen nur halb so hohe Startkosten aufweisen soll und der zunehmenden Konkurrenz auf Augenhöhe begegnen kann (ESA o.J.a ; Henry 2018).

Neue Initiativen der ESA wie ESA-BIC unterstützen New-Space-Akteure und treiben den Transfer in Nichtraumfahrtbereiche voran.

⁹ <https://business.esa.int> (2.11.2020)

¹⁰ <https://www.innospace-masters.de/> (2.11.2020)

In China entwickelt sich auch eine Start-up-Szene im Bereich New Space.

- New-Space-Aktivitäten in China haben besonders seit 2014 zugenommen. Sie gehen einher mit dem Bestreben, die Raumfahrtindustrie des Landes effizienter und weltweit wettbewerbsfähig zu gestalten (Curcio/Lan 2018). Zwar sind dezidierte Informationen über einzelne Maßnahmen und Programme kaum verfügbar, allen Anzeichen nach scheinen sich aber bis zu 80 verschiedene Start-ups in verschiedenen Bereichen entwickelt zu haben, von denen zumindest jene in den Bereichen Startdienstleistungen bzw. Trägersystementwicklung auch international Aufmerksamkeit erregen (Jones 2019). Allerdings ist auch der New-Space-Sektor in China auf private Investoren angewiesen, die bislang ebenso wie in Europa zögerlich agieren, weil die Entwicklungen in der Raumfahrt bzw. im Bereich New Space sowie die zu erwartenden Rückflüsse mit großen Unsicherheiten behaftet sind (Ge/Hongpei 2019).

Japan fördert besonders die Gründungs- und Wachstumsphase von New-Space-Unternehmen.

- Die japanische Regierung hat 2017 mit der Veröffentlichung der „Space Industry Vision 2030“ das Ziel formuliert, die Größe der heimischen Raumfahrtindustrie in etwas mehr als 10 Jahren zu verdoppeln und zu Europa bzw. den USA aufzurücken (Goh 2018). In der Strategie wird die Raumfahrtindustrie als ein wesentlicher Treiber der vierten industriellen Revolution identifiziert. Durch vereinfachten Zugang zu Satellitendaten soll die Entwicklung datenbasierter Anwendungen verstärkt und neue Geschäftsmodelle etabliert werden. Hierzu fördert Japan speziell die Gründungs- und Wachstumsphasen neuer Unternehmen mit Maßnahmen wie Ideenwettbewerben und Vernetzungsaktivitäten (zwischen Investoren und Unternehmen sowie zwischen Unternehmen), aber auch durch Finanzierungsmaßnahmen und die Bereitstellung technischer Expertise für Gründungsunternehmen (Takakura 2018, S.27). Weiterhin schuf die japanische Regierung einen regulatorischen Rahmen (CAO-GO o.J.), in dem vor allem Anpassungen der rechtlichen Grundlagen, die Starts und Steuerung von Satelliten sowie die Nutzung von Satellitendaten betreffend, vorgenommen wurden (Takakura 2018, S.24). Ob diese Maßnahmen die gewünschten Effekte erzielen und die japanische Raumfahrt auf ein mit Europa oder den USA vergleichbares Niveau heben, ist jedoch umstritten (Uchino 2019).

Russland geht den umgekehrten Weg und verstaatlicht seine Raumfahrtaktivitäten.

- Im Vergleich zu den Kommerzialisierungstendenzen der zuvor beschriebenen (und anderer hier nicht weiter dargestellten) Raumfahrtagenturen hat die ROS-COSMOS einen entgegengesetzten Weg eingeschlagen und ihre verschiedenen Aktivitäten und zuvor privatwirtschaftlich auftretende Akteure verstaatlicht (Kap. 3.2). Dementsprechend weist die russische Raumfahrt kaum Anzeichen einer Kommerzialisierung auf. Die aktuell verfolgte Verstaatlichungsstrategie wird im internationalen Vergleich als Rückschritt bewertet, der die russischen Akteure vor große Herausforderungen im internationalen Wettbewerb stellt (McClintock 2017).



4 Das deutsche Raumfahrt- und New-Space-Ökosystem

Die deutsche Raumfahrt blickt auf eine langjährige Tradition zurück, die ihren Anfang mit ersten Raketenstarts schon vor dem Zweiten Weltkrieg genommen hat: Wernher von Braun und Hermann Oberth gelten als wegweisende, jedoch aufgrund ihrer Rolle während des Zweiten Weltkriegs nicht unumstrittene Pioniere der Raumfahrt.

Heute ist Deutschland ein Schlüsselakteur in der ESA, und deutsche Unternehmen und Forschungseinrichtungen leisten als Partner bei Weltraummissionen umfassende Beiträge. Die hiesige Luft- und Raumfahrtindustrie gilt als wichtiger Innovationstreiber und Technologieentwickler für die europäische Raumfahrt (BMW 2017, S.8). Zu den bedeutenden Erfolgen mit deutscher Beteiligung zählt neben dem ISS-Kommando von Alexander Gerst die erfolgreiche Landung einer Sonde auf dem Kometen Tschurjumow-Gerassimenko im November 2014 (BMW 2017, S.8). Dabei ist das Leitmotiv „Für die Erde ins All“ seit 2010 handlungsleitend für die Bundesregierung (BMW 2017, S.8). Die Weiterentwicklung der Raumfahrttechnologie soll konkrete Nutzen für den Menschen und für (neue) Märkte erzeugen.

Auch das deutsche Raumfahrt-Ökosystem hat sich in den letzten Jahren verändert. So entwickeln neben den etablierten Zulieferern und Herstellern zunehmend Start-ups innovative Lösungen für unterschiedliche Fragestellungen. Beide Akteursgruppen tragen maßgeblich zur Entwicklung der kommerziellen Raumfahrtindustrie in Deutschland bei. Ebenso zentral im Raumfahrt- und New-Space-Ökosystem sind politische Akteure und Intermediäre wie Verbände oder Cluster-managements, die verantwortlich für die Technologieförderung und das Innovationsmanagement auf EU-, Bundes- und Länderebene sind.

4.1 Zuständigkeiten für Raumfahrt und New Space in Deutschland

In Deutschland übernimmt das im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) angesiedelte Raumfahrtmanagement im Auftrag der Bundesregierung eine zentrale Rolle.¹¹ Es konzipiert das deutsche Raumfahrtprogramm, führt es durch und integriert alle deutschen Raumfahrtaktivitäten auf nationaler und europäischer Ebene. Hierzu zählen das „Nationale Programm für Weltraum und Inno-

Das DLR-Raumfahrtmanagement koordiniert die deutschen Raumfahrtaktivitäten. Federführendes Ministerium ist das BMWi.

11 Die Übertragung der Aufgaben auf das Raumfahrtmanagement werden durch das Gesetz zur Übertragung von Verwaltungsaufgaben auf dem Gebiet der Raumfahrt (Raumfahrtaufgabenübertragungsgesetz – RAÜG) geregelt. Mit dem RAÜG wird dem DLR-Raumfahrtmanagement die Befugnis erteilt, Verwaltungsaufgaben auf dem Gebiet der Raumfahrt im eigenen Namen und in den Handlungsformen des öffentlichen Rechts wahrzunehmen.



vation“ sowie die Beiträge zur ESA und für die Europäische Organisation zur Nutzung meteorologischer Satelliten (EUMETSAT). Zudem gestaltet und betreut das Raumfahrtmanagement das Thema Raumfahrt im jeweiligen Europäischen Rahmenprogramm für Forschung und Innovation. Federführend für das Raumfahrtmanagement ist das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Zusätzlich arbeitet es mit allen anderen mit Raumfahrt befassten Ressorts zusammen, insbesondere mit dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur sowie dem Bundesministerium der Verteidigung in den Anwendungsbereichen Erdbeobachtung, Navigation und Satellitenkommunikation (DLR Raumfahrtmanagement o. J.a). Mithilfe des im Bundesministerium für Wirtschaft und Energie angesiedelten Koordinators für Luft- und Raumfahrt koordiniert die Bundesregierung ihre Aktivitäten zur Stärkung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Luft- und Raumfahrt in den Bereichen Forschung und Entwicklung.

4.2 Förderstrukturen

Die Raumfahrt hat als Schlüsseltechnologie eine hohe strategische Bedeutung für den Wissenschafts- und Wirtschaftsstandort Deutschland; ihre Bedeutung wird auch in der „Nationalen Industriestrategie 2030“ des BMWi (2019a) betont. Raumfahrttechnologien sollen Antworten auf gesellschaftlich relevante Fragen geben und zentrale Herausforderungen wie Klimaschutz, Mobilität, Kommunikation und Sicherheit adressieren (BMWi o. J.).

4.2.1 EU-Ebene

Deutschland war 2019 mit 927 Mio. Euro nach Frankreich der zweitgrößte Beitragszahler der ESA.

Deutschland beteiligte sich 2019 mit 927 Mio. Euro¹² an der ESA und ist nach Frankreich der zweitgrößte Beitragszahler. Das Gesamtbudget der ESA lag 2018 bei rund 5,6 Mrd. Euro (ESA 2018b). Im Vergleich zur NASA fällt es eher gering aus: Deren geschätztes Jahresbudget liegt bei 19,1 Mrd. US-Dollar (entspricht rund 17 Mrd. Euro). Deutschlands Anteil am ESA-Budget könnte zukünftig noch ansteigen, so wurde nach einer Berechnung von 2018 davon ausgegangen, dass nach dem Austritt des Vereinigten Königreichs aus der Europäischen Union der Wegfall der britischen Beiträge kompensiert werden muss (und zwar um 8,4% bzw. mindestens 77,3 Mio. Euro (WD 2018a). Mittlerweile ist der Brexit vollzogen, Großbritannien soll Partner der ESA bleiben, doch es ist noch offen, wie hoch die Beteiligung Großbritanniens an der ESA ausfallen wird. Verhandlungen dazu beginnen 2021 (Wörner 2020).

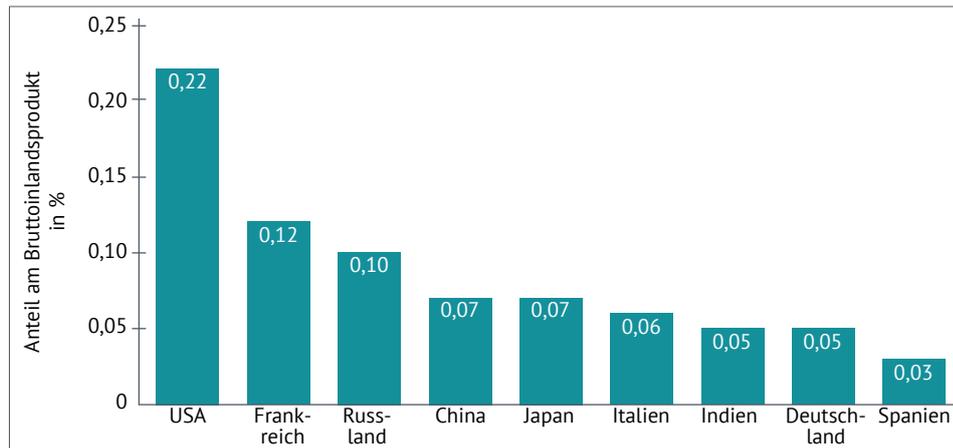
Welchen Stellenwert Weltraumprogramme derzeit in den Ländern haben, wird am Anteil der Ausgaben am Bruttoinlandsprodukt (BIP) deutlich. Die USA inves-

12 Davon stammen rund 861 Mio. Euro vom BMWi (siehe auch Kap. 4.2.2).



tieren mit rund 0,22 % des BIP am meisten und damit im Vergleich rund viermal so viel in Weltraumaktivitäten wie Deutschland.

Abb. 6 Anteil der Ausgaben für Weltraumprogramme am BIP nach Ländern weltweit 2017



Quelle: Statista GmbH 2019

Die Raumfahrt in Europa wird über die Europäischen Forschungsrahmenprogramme unterstützt.¹³ Innerhalb von Horizon 2020 ist Raumfahrt eine der geförderten Technologien des Einzelziels „Führende Rolle bei grundlegenden und industriellen Technologien“ mit einem Gesamtbudget von 1,48 Mrd. Euro über die Laufzeit von 2014 bis 2020. Neben der Satellitennavigation und Erdbeobachtung mit Galileo bzw. Copernicus werden speziell Weltraumtechnologien zur Steigerung der europäischen Wettbewerbsfähigkeit, Weltraumexploration und -wissenschaft sowie der Schutz europäischer Einrichtungen vor Bedrohungen im und aus dem Weltraum gefördert (DLR Raumfahrtmanagement o.J.c).

Die Vorhaben zur Satellitennavigation (Galileo) und Erdbeobachtung (Copernicus), Erkennung von Gefahren aus dem Weltraum („space situational awareness“ – SSA) sowie das Projekt zur Etablierung eines Satellitenkommunikationsnetzwerks für öffentliche Behörden in der EU (GovsatCom) bilden die Flaggschiffe der europäischen Raumfahrtaktivitäten. Diese werden im Rahmen von Horizon Europe im Zeitraum von 2021 bis 2027 mit voraussichtlich 16 Mrd. Euro (ca. 2,28 Mrd. Euro p.a.) gefördert. Die Forschung im Raumfahrttechnologiebereich wird im Cluster „Digital, Industry and Space“ der Säule II („Global Challenges and European Industrial Competitiveness“) angesiedelt sein. Das Budget für den Raumfahrtbereich ist bislang noch nicht beziffert (Bundesregierung 2019).

¹³ Weitere Programme, in denen teilweise raumfahrtbezogene Förderung stattfindet, sind „Competitiveness of Enterprises and Small and Medium-Sized Enterprises“ (COSME) und die Europäischen Strukturfonds. Für alle relevanten Akteure und Programme siehe EIB (2019, S.56).



Seit 2003 unterstützt die ESA die Gründung von Start-ups in 17 europäischen Regionen.

Unterstützungsangebote der ESA für New-Space-Akteure gibt es in Form der 20 europäischen Business Incubation Centres (ESA BIC) in 17 europäischen Regionen, darunter zwei in Deutschland.¹⁴ Ziel ist es, Gründerinnen und Gründer in der Raumfahrt bei der Umsetzung ihrer Ideen zu unterstützen und mit etablierten Akteuren der Branche zusammenzubringen. Die ESA hat seit dem Start der BIC im Jahr 2003 über 700 Start-ups gefördert (ESA o.J.c), darunter 200 in Deutschland (Bundesregierung 2017 u. 2018a). Der Finanzierungsbetrag pro Start-up liegt bei rund 50.000 Euro in Form von Zuschüssen sowie nichtfinanzieller Unterstützung (EIB 2019, S.62) und ist wegen der geringen Summe vor allem für Unternehmen in der Startphase geeignet. Jährlich wurden bis jetzt rund 7 Mio. Euro ausgegeben. Im Vergleich zum Gesamtbudget der ESA sind die bisher investierten Mittel für die Gründungsunterstützung damit vergleichsweise gering.

Eine wichtige Anlaufstelle in Deutschland für Fördermöglichkeiten und Ausschreibungen für Raumfahrt auf EU-Ebene ist die Nationale Kontaktstelle Raumfahrt, welche im Auftrag des BMWi tätig ist. Diese wurde 2002 als Teil des DLR Raumfahrtmanagements (o.J.e) eingerichtet. Zu den Aufgaben zählen die Information und Beratung von deutschen Antragsstellenden zu den Fördermöglichkeiten und Ausschreibungen sowie die Beratung der nationalen Ministerien und der Europäischen Kommission.

Es wird die Einrichtung eines EU-Investitionsfonds für die Raumfahrt erörtert.

Bei den derzeitigen (öffentlichen wie privaten) Unterstützungsangeboten für New-Space-Unternehmen innerhalb der EU fehlt es vor allem gemäß einer Analyse der Europäischen Kommission und der Europäischen Investitionsbank (EIB 2019; ESA 2018b) an Finanzierungs- und Förderinstrumenten, die die Kommerzialisierung von Raumfahrttechnologien und die Nutzung der in diesem Sektor getätigten Forschungs- und Entwicklungsinvestitionen ermöglichen (EIB 2019; ESA 2018b). Gerade die vergleichsweise geringe Verfügbarkeit privaten Kapitals erschwert nach Experteneinschätzung die Entwicklung der New-Space-Akteure in Deutschland und Europa (Interviews Straube, PTScientists; Kap. 7.1.2). Zur Unterstützung junger Unternehmen bemüht sich die ESA in Kooperation mit der Europäischen Investmentbank deshalb um die Etablierung neuer Investitionsmöglichkeiten. Seit 2018 wird auf europäischer Ebene die Einrichtung eines Investitionsfonds für die Raumfahrt erörtert (Bundesregierung 2018a, Interview Wörner).

4.2.2 National

Die Raumfahrtstrategie von 2010 ist noch heute handlungsleitend für die Raumfahrtförderung.

Spezifiziert sind die Raumfahrtaktivitäten der Bundesregierung in der Raumfahrtstrategie vom November 2010, in den Leitlinien und Handlungsfelder der Aktivitäten der Bundesregierung – jedoch noch ohne speziellen Fokus auf New Space – skizziert werden. Die Raumfahrtstrategie folgt den Prinzipien der Be-

¹⁴ ESA BIC Hessen & Baden-Württemberg sowie ESA BIC Bavaria (Kap. 4.3).



darfsorientierung und Nachhaltigkeit und strebt dabei eine intensive europäische und internationale Zusammenarbeit an (BMW i 2012).

Umgesetzt wird die Raumfahrtstrategie durch das „Nationale Programm für Weltraum und Innovation“, die deutsche Beteiligung an der ESA und die Aktivitäten der Raumfahrtforschung und -technologieentwicklung des DLR. Die Haushaltsmittel für die Umsetzung des Programms, die deutsche ESA-Beteiligung sowie den Betrieb und Investitionen des DLR liegen in der Verantwortung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMW i). Auch die in der Verantwortung des BMBF liegende Hightech-Strategie 2025 räumt der Raumfahrt einen besonderen Stellenwert als Schlüsseltechnologie ein. New Space findet hierin als ein Handlungsfeld Erwähnung (BMBF 2018).

Das BMW i zielt darauf, die Potenziale von New Space aufzugreifen, und hat dazu eine Studie zu Geschäftsmodellen an der Schnittstelle von Raumfahrt und digitaler Wirtschaft in Auftrag gegeben (SpaceTec Partners/BHO Legal 2016). In der Studie wurden weltweite New-Space-Entwicklungen und zugrundeliegende Geschäfts- und Finanzierungsmodelle analysiert sowie Handlungsempfehlungen für die zukünftige deutsche Raumfahrt ausgesprochen. Laut einer Antwort der Bundesregierung (2017) auf eine Kleine Anfrage von Bündnis 90/Die Grünen ist eine grundlegende Überarbeitung der Raumfahrtstrategie vorerst nicht geplant.

Die Bundesregierung unterstützt die Luft- und Raumfahrt in Deutschland 2019 planmäßig mit rund 1,9 Mrd. Euro an Fördermitteln, untergliedert in Luftfahrt (344 Mio. Euro), nationale Weltraumforschung und Weltraumtechnik (671 Mio. Euro) sowie Mittel für die ESA (861 Mio. Euro) (BMBF o.J.).^{15,16} Seit 2009 sind die Ausgaben stetig gestiegen: Von ca. 1,25 Mrd. Euro auf 1,82 Mrd. Euro in 2018. Im Bereich der nationalen Weltraumforschung und Weltraumtechnik entfielen 2019 planmäßig rund 285 Mio. Euro auf das „Nationale Programm für Weltraum und Innovation“ (BMBF o.J.). Darin werden Aktivitäten zur Entwicklung und zur Bereitstellung von Raumfahrtsystemen (Transportsysteme, Satelliten, Raumstation) sowie Experimente und Instrumente für die grundlagen- und anwendungsorientierte Forschung gefördert.¹⁷ Ziel der Förderung ist es, in ausgewählten Technologiebereichen internationale Exzellenz in Forschung und Entwicklung zu befördern. Das „Nationale Programm für Weltraum und Innovation“ wie auch die Aktivitäten im Rahmen der deutschen Beteiligung an den Programmen der ESA konzentrieren sich auf die Schwerpunkte:

Die Bundesregierung fördert die Raumfahrt mit rund 1,9 Mrd. Euro p.a.

15 Sollwerte für 2019, letzte Aktualisierung April 2019.

16 Laut Pressemitteilung des BMW i (2019b) vom 26.6.2019 sollen neue Mittel für die Fortsetzung der deutschen Beteiligung an der ESA bereitgestellt und damit der Ansatz auf jährlich ca. 850 Mio. Euro verstetigt werden. Darüber hinaus soll sich die Förderung des DLR um 57,4 Mio. Euro jährlich erhöhen. Damit wird der Beschluss aus dem parlamentarischen Verfahren 2019 umgesetzt, sechs neue DLR-Institute zu gründen.

17 <https://www.foerderdatenbank.de/FDB/DE/Home/home.html> (2.11.2020)



- Wissenschaft (Bau und Betrieb von Satelliten, Raumsonden und Höhenforschungsraketen)
- Infrastruktur (Entwicklung von Transporttechnologien, Raumtransportsystemen und Satelliten- und Betriebstechnologien sowie europäische Beteiligung an der ISS)
- Nutzung (ausgerichtet auf Anwendungs- und Marktorientierung. Hierbei rücken zunehmend kommerzielle Raumfahrtaktivitäten in partnerschaftlicher Durchführung von öffentlicher Hand und Privatwirtschaft in den Vordergrund)

An dem durch das BMWi geförderten Raumfahrtforschungsprogramm des DLR sind mehr als 20 DLR-Institute beteiligt. Das DLR-Forschungsprogramm Raumfahrtforschung und -technologie orientiert sich an den forschungspolitischen Vorgaben, die mit den verschiedenen Fördermittelgebern für einen mehrjährigen Zeitraum abgestimmt sind (WD 2018a).

Es werden zunehmend anwendungsorientierte Projekte gefördert.

Über die Jahre lässt sich ein zunehmender Fokus der Förderung auf anwendungs- und marktorientierte Projekte beobachten. Dieser zeigte sich bereits 2010 in dem in der Raumfahrtstrategie der Bundesregierung formulierten Handlungsfeld „Neue Märkte erschließen“ sowie in einzelnen Initiativen und Wettbewerben. So ist beispielsweise das Ziel der Initiative „INNOspace“ des DLR, Anreize für Innovationen und Technologietransfer zwischen der Raumfahrt und anderen Branchen zu setzen. Maßnahmen sind vor allem Fachtagungen, Workshops, Innovations- und Transferprojekte sowie der Ideenwettbewerb „INNOspace Masters“. Ziel des Wettbewerbs ist es, innovative und transferorientierte Projekte aus Weltraumforschung und Entwicklung zu unterstützen (Bundesregierung 2018a).

Das in Deutschland verfügbare breite Angebot für die Gründungs- und Frühphase eignet sich auch für New-Space-Start-ups.

Neben den technologiespezifischen Förderprogrammen sind für New-Space-Akteure auch die technologieoffenen Angebote der Gründungs- und Frühphasenförderung relevant. Grundsätzlich gibt es in Deutschland ein gut ausgebautes Frühphasen-Unterstützungssystem für die ersten unternehmerischen Schritte im Bereich New Space (z.B. „EXIST“), Businessplanwettbewerbe („European Satellite Navigation Challenge“, „Copernicus Masters“ oder „Münchener Businessplan Wettbewerb“ (SpaceTec Partners/BHO Legal 2016). In den im Rahmen dieser Kurzstudie geführten Interviews wurde in diesem Zusammenhang jedoch die Überbrückung zwischen wissenschaftlicher Forschung und E und kommerzieller Verwertung in der Raumfahrtforschung und -entwicklung als besonders kritisch eingeschätzt. Es gebe zwar in Deutschland bereits etablierte Instrumente, die diese Lücke adressieren, wie verschiedene Innovationsfonds (z.B. KfW, High-Tech-Gründerfonds), doch falle es den New-Space-Unternehmen besonders in der Wachstumsphase schwer, eine Finanzierung für ihre Vorhaben zu erhalten (Kap. 4.2.1).



4.2.3 Bundesländer

Auf Landesebene gibt es verschiedene öffentliche Angebote monetärer und nicht-monetärer Unternehmensunterstützung, die sich auch für New-Space-Gründer und junge New-Space-Unternehmen anbieten. Hier sind vor allem regionale Innovationsfonds der Länder zu nennen, die jungen Unternehmen Beteiligungskapital zur Verfügung stellen (z.B. Bayern Kapital, Bayerische Beteiligungsgesellschaft, Technologiegründerfonds Sachsen). Aber auch technologieorientierte Förderprogramme mit direkten Zuschüssen oder Darlehen für technologische Innovationsvorhaben werden in vielen Bundesländern als Instrument genutzt und sind für New-Space-Gründungen relevant (so das Förderprogramm „ProFIT“ in Berlin).

Hinzu kommen Förderinstrumente, die vor allem auf den Aufbau regionaler Innovationsökosysteme zielen und eher nichtmonetäre Angebote für junge New-Space-Unternehmen schaffen. Hier ist vor allem die Netzwerk- und Clusterförderung zu nennen (Kap. 4.3). In Berlin z. B. ist New Space einer der Themenschwerpunkte der Clusterinitiative Verkehr, Mobilität und Logistik. Das Clustermanagement unterstützt die regionalen Akteure innerhalb der Themenschwerpunkte mit Beratungsangeboten und der Organisation von Vernetzungsveranstaltungen und schafft somit ein für Gründungen förderliches Umfeld. Auch in Bayern wird mit der Clusterinitiative bavAIRia die regionale Vernetzung der Luft- und Raumfahrtakteure vom Land gefördert.

Eigene Strategien für das Thema Raumfahrt auf Landesebene sind selten. In Bremen ist das Thema Luft- und Raumfahrt in die Clusterstrategie des Landes eingebettet (Freie Hansestadt Bremen o. J.). Einzig Bayern hat mit der Weltrauminitiative „Bavaria One“ eine eigene dezidierte Weltraumstrategie. Allerdings bleibt die Umsetzung der Aktivitäten mit rund 30 Mio. Euro für 2019 und 2020 deutlich hinter den anfänglich angekündigten 700 Mio. Euro zurück (FAZ 2019).

Auf Landesebene werden New-Space-Gründungen mit Fördermitteln und nichtmonetären Maßnahmen unterstützt.

Einzig Bayern verfügt über eine dezidierte Raumfahrtstrategie auf Landesebene.

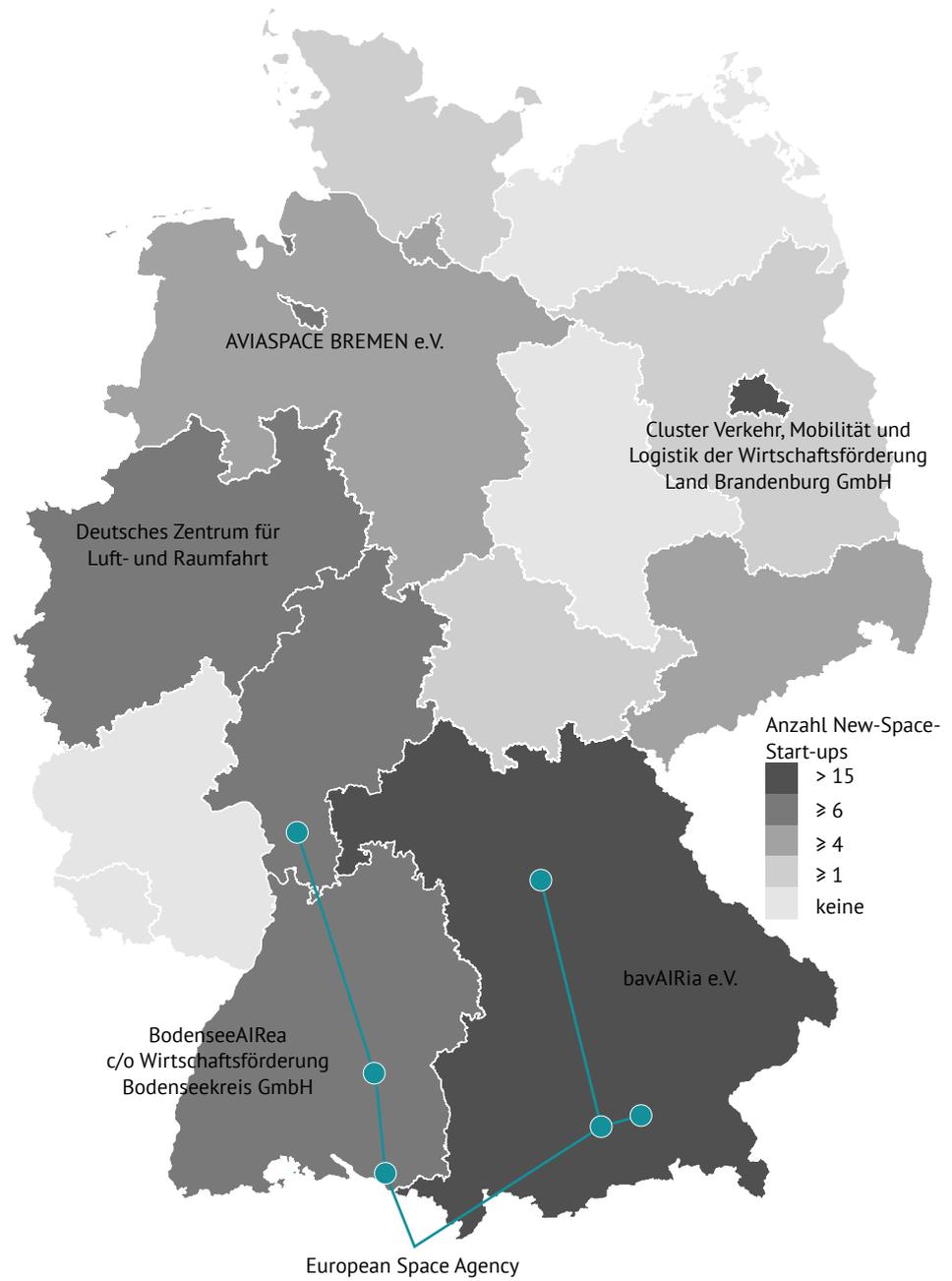
4.3 Schwerpunktstandorte von New-Space-Aktivitäten

Raumfahrttechnologien entfalten immer mehr ihre Bedeutung als Schlüsseltechnologie für eine moderne Industrie- und Informationsgesellschaft. Beispiele sind die heute schon selbstverständlich gewordenen Produkte durch die Nutzung von Satellitentechnik zur Telekommunikation, Navigation und zunehmend auch der Erdbeobachtung etwa zur Wettervorhersage oder Frühwarnung von Naturkatastrophen.

Neben ihrem technologischen Gewicht hat die Raumfahrt in Deutschland deshalb auch eine wichtige ökonomische Bedeutung. Insgesamt sind deutschlandweit rund 110.000 Menschen in der Luft- und Raumfahrtindustrie beschäftigt, davon sind mit rund 9.000 allerdings ein deutlich kleinerer Anteil in der Raumfahrt aktiv. Von



Abb. 7 Akteurslandschaft New Space



Quelle: nach DLR Raumfahrtmanagement o. J.b



40 Mrd. Euro Umsatz für die gesamte Luft- und Raumfahrtbranche in Deutschland entfielen 2017 rund 3 Mrd. Euro auf die Raumfahrt (BDLI 2018; BMWi 2018).

Wie vielfältig die Akteurslandschaft in der Raumfahrt in Deutschland ist, zeigt der Katalog deutscher Raumfahrtakteure (DLR Raumfahrtmanagement o. J. b). Darin werden 2019 insgesamt rund 600 Akteure mit Bezug zur Raumfahrt dargestellt, wovon rund 60 % Unternehmen sind (ca. 360), davon wiederum fast 80 % KMU (ca. 290). Rund 100 Akteure sind Start-ups, d. h. jünger als 10 Jahre.

Rund 600 Akteure sind in Deutschland in der Raumfahrt aktiv, darunter mindestens 100 Start-ups.

Abbildung 7 zeigt die Verteilung der im DLR-Katalog erfassten New-Space-Start-ups. Im Vergleich der Bundesländer sind die meisten der New-Space-Start-ups in Bayern verortet (insgesamt 37 Unternehmen), gefolgt von Berlin (17), Baden-Württemberg (8), Bremen (8), Nordrhein-Westfalen (7) und Hessen (6).

Die meisten New-Space-Start-ups sind in Bayern verortet, gefolgt von Berlin, Baden-Württemberg, Bremen, Nordrhein-Westfalen und Hessen.

Technologieorientierte New-Space-Start-ups entstehen vor allem im Umfeld von Hochschulen und Forschungsinstitutionen sowie bestehenden Unternehmen. Prägend für den New-Space-Standort Deutschland sind daher insbesondere die Regionen mit Standorten der ESA (Darmstadt, Köln und Oberpfaffenhofen) sowie Standorte mit ESA Business Incubation Centres (ESA BIC) in den Bundesländern Bayern (Oberpfaffenhofen, Ottobrunn und Nürnberg), Baden-Württemberg (Friedrichshafen, Stuttgart, Reutlingen) sowie Hessen mit dem Europäischen Satellitenkontrollzentrum (Darmstadt).

Darüber hinaus sind für das deutsche New-Space-Ökosystem die Standorte des DLR relevant. Das DLR beschäftigt an seinen 20 Standorten in Deutschland rund 8.000 Mitarbeitende im Bereich Luft- und Raumfahrt.

Hinzu kommen vier Clusterinitiativen und Branchennetzwerke, in denen sich regionale Akteure aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik vernetzen und die auch die regionalen Branchen- und Technologieschwerpunkte widerspiegeln:

Vier deutsche Cluster und Netzwerke fokussieren auf Raumfahrt und New Space.

- In Bayern ist der bavAIRia e. V. von der Bayerischen Staatsregierung mit dem Management des Clusters Aerospace beauftragt. Schwerpunkte der Akteure in der Region liegen laut Angaben des Clustermanagements im Bereich Satellitensysteme (Solargeneratoren, Antennen, Elektronik), Raumfahrtantriebe, Erdbeobachtungsinstrumente und -satelliten sowie Zulieferungen für die europäischen Programme Galileo und Copernicus.¹⁸
- In Bremen ist der AVIASPACE BREMEN e. V. angesiedelt. Es handelt sich um ein Netzwerk von Unternehmen und anwendungsorientierten Forschungsinstituten der Luft- und Raumfahrt in Bremen und Umgebung. Technologieschwer-

¹⁸ <http://www.bavairia.net/> (2.11.2020)



punkte des Netzwerks sind Materialentwicklung, Hochauftrieb, Konstruktion, Fertigungstechnologie, Erdbeobachtung und Robotik.¹⁹

- In Berlin-Brandenburg gibt es das Cluster Verkehr, Mobilität und Logistik der Wirtschaftsförderung Land Brandenburg GmbH (WFBB). Dieses verbindet im Branchenschwerpunkt Luft- und Raumfahrt Akteure in den Bereichen Triebwerksentwicklung und -fertigung, Leichtflugzeugbau, Flugzeugwartung und -instandhaltung, Produktion von Kleinsatelliten und -subsystemen, entwicklungs- und produktionsbezogene Dienstleistungen, Forschung und Entwicklung sowie Anwendung von unbemannten Flugsystemen (Drohnen); darüber hinaus explizit New Space.²⁰ Im Cluster ist die Technische Universität Berlin mit ihrem Institut für Luft- und Raumfahrt ein zentraler Akteur im New-Space-Geschehen. Keine andere technische Universität weltweit betreibt mehr eigene Satelliten.²¹
- In der BodenseeAIRea haben sich auf Initiative der Wirtschaftsförderung Bodenseekreis in der Region ansässige Unternehmen, Hochschulen und Forschungseinrichtungen zu einem regionalen Branchennetzwerk zusammengeschlossen. Technologische Schwerpunktthemen sind IT-Anwendungen/Unternehmenssoftware, Leichtbau und Satellitennavigation.²²

19 <https://www.aviaspace-bremen.de/> (2.11.2020)

20 <https://mobilitaet-bb.de/de/branchen/luft-und-raumfahrt> (2.11.2020)

21 <https://www.raumfahrttechnik.tu-berlin.de/tubsat/> (2.11.2020)

22 <https://www.clusterportal-bw.de/clusterdaten/clusterdatenbank/clusterdb/Clusterinitiative/show/clusterinitiative/bodenseeairea/> (2.11.2020)



5 Weltraummarkt mit Wachstumsaussichten

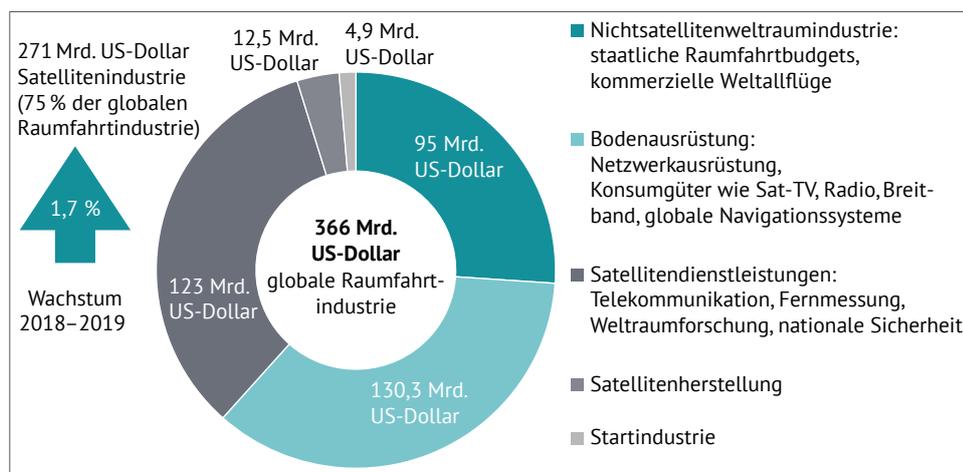
Der globale Markt für weltraumbezogene Wirtschaft ist zwischen 2005 und 2017 mit einer durchschnittlichen Rate von 6,7% p.a. kontinuierlich gewachsen. Machten Unternehmen in der Raumfahrtindustrie 2005 noch ca. 175 Mrd. US-Dollar Umsatz, steigerte sich dieser nach Berechnungen von Bryce Space and Technology (2020b) bis 2019 auf insgesamt 366 Mrd. US-Dollar. In den nächsten 20 Jahren sollen die Umsätze mit ca. 5% p.a. weiter steigen (Berrisford 2018, S. 6).

Rund 75% des Marktes (271 Mrd. US-Dollar) repräsentieren kommerzielle Anwendungen im Bereich der Satellitendienstleistungen und Bodenausrüstung, während 26% (95,3 Mrd. US-Dollar) auf regierungsnahe Aktivitäten und die kommerzielle bemannte Raumfahrt entfallen (Bryce Space and Technology 2020b). An der Abbildung 8 lässt sich ablesen, dass der Bodenausrüstungssektor inklusive Zubehör für Netzwerke und Produkten für Verbraucher mit 130,3 Mrd. US-Dollar den größten Marktanteil hat, gefolgt von Satellitendienstleistungen – dies umfasst in der von Bryce Space and Technology (2020b) gewählten Zuordnung beispielsweise die satellitengestützte Telekommunikation, Fernmessung oder Weltraumforschung sowie der Satellitenherstellung (12,5 Mrd. US-Dollar) und der kommerziellen Startindustrie (4,9 Mrd. US-Dollar), wobei die beiden letzteren im Vergleich kleinere Marktsegmente darstellen.

Für 2040 existieren aktuell drei Prognosen: Während Analysten von Goldman Sachs und Morgan Stanley konsistent von einer Marktgröße von ca. 1 Billion US-Dollar ausgehen, übersteigt die Prognose der Bank of America Merrill Lynch mit einem Wert von über 3 Billionen US-Dollar diese Annahmen deutlich (Ed-

Raumfahrtumsätze für 2040 liegen geschätzt zwischen 1 und 3 Billionen US-Dollar.

Abb. 8 Globaler Raumfahrtmarkt (Umsätze 2019)

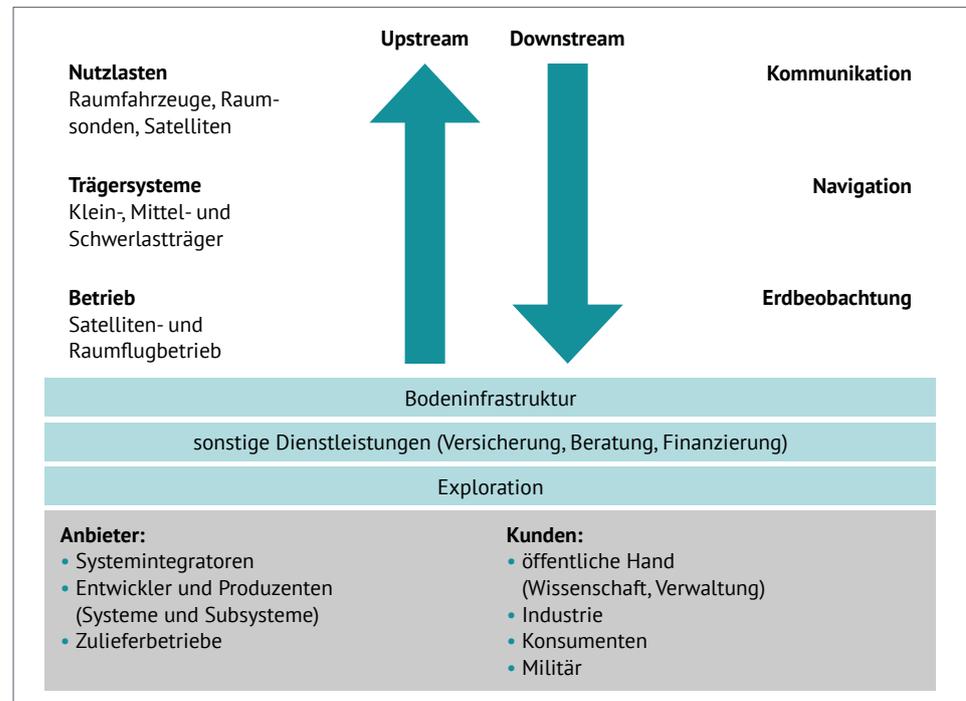


Quelle: nach Bryce Space and Technology 2020b



wards 2017; Foust 2018c). Nach der letztgenannten Prognose würde sich der Weltraummarkt bis 2040 verzehnfachen.

Abb. 9 Upstream- und Downstreamsektoren in der Weltraumindustrie



Quellen: nach Bockel 2018; Euroconsult 2017; Strada/Sasanelli 2018

In der Raumfahrtindustrie wird zwischen Upstream- und Downstreamsektoren (Abb. 9) unterschieden. Upstream umfasst alle Aktivitäten und Infrastrukturen, die erforderlich sind, um Objekte in den Orbit zu bringen inklusive des dortigen Betriebs (z.B. Satellitenproduktion, Trägersysteme, Raumfahrzeuge). Der Downstreambereich beschreibt im Wesentlichen die kommerzielle Nutzung von Produkten und Dienstleistungen auf der Erde in den Bereichen Kommunikation, Navigation und Erdbeobachtung (EIB 2019; Strada/Sasanelli 2018).²³

Das Segment „Bodeninfrastruktur“ ist nicht völlig trennscharf zuzuordnen und wird in verschiedenen Studien mal im Upstream- und mal im Downstreamsektor verortet. Die weiteren hier aufgeführten Sektoren „Exploration“ und „sonstige Dienstleistungen“ sind ebenfalls nicht eindeutig upstream oder downstream. Die Exploration bzw. Erforschung des Weltraums dient weniger der Kommerzialisierung als vielmehr dem Erkenntnisgewinn über das Universum und dessen

²³ Mitunter wird zusätzlich Midstream als ein dritter Bereich zwischen Upstream und Downstream differenziert. Hierzu wird z.B. der Betrieb von Satelliten gezählt.



Bestandteile sowie über grundlegende Gesetzmäßigkeiten. Mittels Exploration werden jedoch wichtige Voraussetzungen für eine Kommerzialisierung von Upstream- und Downstreamaktivitäten geschaffen. Zusätzlich stellen die sonstigen Dienstleistungen in den Bereichen Versicherung, Beratung und Finanzierung wichtige flankierende Maßnahmen für die Entwicklung und Vermarktung von Produkten und Dienstleistungen entlang der Raumfahrtwertschöpfungskette dar.

Mit Blick auf Kundengruppen lassen sich im Wesentlichen vier Zielgruppen unterscheiden: Neben dem Militär und der öffentlichen Hand (Wissenschaft und Verwaltung) sind dies vor allem Industriekunden und Konsumenten. Anbieter sind Entwickler und Produzenten, Systemintegratoren²⁴ und Zulieferbetriebe.

Zwischen Upstream- und Downstreamsektoren besteht eine enge positive Wechselwirkung. Beide Bereiche befördern sich in ihrer Entwicklung gegenseitig. Denn mit der zunehmenden Verbreitung von Informations- und Kommunikationstechnologien ist gleichzeitig die Nachfrage nach Weltraumsatelliten zur Nachrichten- und Rundfunkübertragung, Erdbeobachtung oder Navigation und damit auch der Bedarf für Trägerraketen zum Transport von Nutzlasten gestiegen.

Die Marktpotenziale der Upstream- und Downstreamsektoren wurden in einer Studie von Strada/Sasanelli (2018) ausgewiesen. Nach deren Berechnung entfällt mit rund 177 Mrd. US-Dollar (53 %) der größte Anteil auf den privaten Downstreamsektor, gefolgt von rund 77 Mrd. US-Dollar (24 %) im privaten Upstreamsektor. Eine Summe von 76 Mrd. US-Dollar (23 %) beziehen sich auf staatliche Budgets.²⁵ In Tabelle 1 sind die verschiedenen Marktsegmente im Upstream- und Downstreamsektor kurz skizziert.

24 Systemintegratoren sind Unternehmen, die Teilsysteme zu Gesamtsystemen zusammenschließen, also beispielsweise unterschiedliche Komponenten (Triebwerk, Stromversorgung etc.) zu einem vollständigen Satelliten.

25 Berechnungsgrundlage waren die nach der US-amerikanischen Space Foundation (2017) dargestellten Marktdaten von 2016 und dem damals geschätzten globalen Weltraummarkt von 329 Mrd. US-Dollar.



Tab. 1 Beschreibung der Marktsegmente im Upstream und Downstream

Upstream-sektor	
Nutzlasten	<p>Nutzlasten sind die Komponenten eines Raumflugsystems. Sie dienen z.B. der Erdbeobachtung, Wetterbeobachtung, Kommunikation, Navigation, planetaren Erkundung und Exploration sowie der bemannten Raumfahrt. Planetare Erkundung und Exploration werden üblicherweise mittels Raumsonden durchgeführt:</p> <ul style="list-style-type: none">• Satelliten verfügen in der Regel über Antriebssysteme, Temperaturregelung, Energieversorgung, Lageregelung, spezifische Nutzlastkomponenten (Kamerasysteme, Transponder, Spektrografen etc.) sowie Antennen für die Kommunikation zwischen Erde und Satellit.• Raumsonden sind unbemannte Raumflugkörper, die zur Exploration des Welt-raums eingesetzt werden und beispielsweise andere Planeten oder deren Monde, aber auch Asteroiden und Kometen anfliegen. Sie dienen vor allem wissenschaftlichen Zwecken.• Raumfahrzeuge werden einerseits als unbemannte Frachtkapseln zur Versorgung der Besatzung auf Raumstationen eingesetzt. Andererseits können sie auch für den Transport von Menschen eingesetzt werden, wenn sie zusätzlich mit Lebenserhaltungssystemen ausgestattet sind. Zu den bekanntesten Raumfahr-zeugen gehören die US-amerikanischen Apollo-Kapseln und das Space Shuttle sowie die russische Soyuz-Kapsel.
Trägerraketen	<p>Mittels Trägerraketen werden die Nutzlasten zu ihren Zielen befördert. Die Trägerraketen bestehen aus mehreren Baugruppen wie Raketenstufen mit ihren Haupt- und Hilfstriebwerken, den zugehörigen Treibstoffbehältern, einem Instru-mentenabteil (Navigations- und Steuerungsinstrumente, Lageregelungssysteme, Stufentrennsysteme, Flugdatenerfassung und -übermittlung) sowie Nutzlastadap-tern und Nutzlastverkleidung.</p> <p>Die Trägerraketen werden anhand verschiedener Kriterien unterschieden. Eine Systematisierung ist die Anzahl der Raketenstufen. So werden Raketensysteme in Einstufer und Mehrstufen unterteilt. Einstufer erreichen in der Regel einzelne Umlaufbahnen, während Mehrstufen mehrere unterschiedliche Orbits durch höhere Schubkraft und die Abtrennung ausgebrannter Stufen erreichen können. Einzelne Stufen können entweder wiederverwendbar oder zur einmaligen Nutzung kon-struiert sein.</p> <p>Je nach eingesetzten Treibstoffen lassen sich Feststoff- bzw. Flüssigtriebwer-ke unterscheiden. Unter Umständen werden beide Treibstoffarten miteinander kombiniert (Hybridtriebwerke). In Feststofftriebwerken werden Verbrennungskom-ponenten miteinander vermischt und brennen nach der Zündung kontinuierlich ab. Flüssiger Raketentreibstoff wird in getrennte Tanks gefüllt und erst in einer Brennkammer zusammengeführt.</p> <p>Ein weiteres wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist die Nutzlastkapazität von Trägerraketen: Es wird zwischen Klein- (300–4.500 kg), Mittel- (1.200–10.000 kg) und Schwerlastträgern (2.600–24.400 kg) differenziert.</p>
Betrieb	<p>Der Betrieb von Raumfahrzeugen, Raumsonden und Satelliten wird mittels der Bodeninfrastruktur gewährleistet. Zum Betrieb gehören auch vorbereitende Akti- vitäten, wie die Missionsplanung, die Kommunikationsaktivitäten (Austausch von Telemetriedaten und im Falle bemannter Raumfahrzeuge die Sicherstellung der audiovisuellen Kommunikation) über den gesamten Missionsverlauf.</p>



Downstream-sektor	
Kommunikation: Rundfunk, Telefonie und Internet	<p>Satellitenbasierte Kommunikation gilt als der am stärksten kommerziell genutzte Bereich von Raumfahrtanwendungen. Telekommunikationsunternehmen gehörten zu den frühesten wirtschaftlichen Anwendern von Raumfahrttechnologie. Durch die satellitenbasierte Übertragung von Hörfunk und Fernsehen sowie Satellitentelefonie eröffneten sich zunehmend neue Geschäftsfelder.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Die Übertragung von Hörfunk und Fernsehen wurde ab den späten 1970er Jahren vorbereitet und Mitte der 1980er Jahre realisiert. Technische Innovationen sorgten dafür, dass seitdem Haushalte Satelliten-TV empfangen können. • Satellitentelefonie stellt ein weiteres Anwendungsgebiet satellitenbasierter Kommunikationstechnologien dar. Vor allem in Regionen ohne Mobilfunknetze bieten mobile Satellitentelefone die Möglichkeit zur Kommunikation, ohne die Notwendigkeit, kostspielige Infrastruktur für erdgebundene Systeme bereitzustellen zu müssen. • Mit der Etablierung des Internets als weltumspannendes Datennetz entstand auch das Bestreben, alternative Zugänge zu diesem zu ermöglichen, ohne auf den langwierigen und kostenintensiven Ausbau erdgebundener Infrastrukturen (z.B. Glasfaserkabel) angewiesen zu sein. Satellitenbasiertes Internet ermöglicht ähnlich wie Satellitentelefonie insbesondere in dünn besiedelten Regionen Zugangsmöglichkeiten zum Breitbandinternet.
Navigation	<p>Satellitenbasierte globale Navigationssysteme (GPS, Galileo, das russische GLO-NASS und das chinesische Beidou) ermöglichen mit Positions- und Geschwindigkeitsdaten eine sehr detaillierte Routenplanung und gestatten Rückschlüsse auf Verkehrsbewegungen und Infrastrukturauslastung. Während das US-amerikanische GPS der militärischen Kontrolle und die Navigationsdaten damit eingeschränkter Nutzung unterliegen, bietet das europäische Galileo-System unter staatlicher Kontrolle zusätzlich zu nichtoffenen Nutzungsbereichen einen offenen Zugang für eine kostenlose Nutzung.</p>
Erdbeobachtung	<p>Die satellitenbasierte Erdbeobachtung (auch als Fernerkundung bezeichnet) dient dazu, die Erdoberfläche und -atmosphäre bzw. deren physikalische, chemische und biologische Eigenschaften mittels geeigneter technischer Systeme (Radar, Infrarotkameras etc.) zu untersuchen. Die gesammelten Daten sind vor allem für die Meteorologie, die Wettervorhersage, die Geodäsie bzw. Kartierung, die Klimaforschung, die Erforschungen von Veränderungen in der Landnutzung, die Messung von Biodiversität und auch die Verkehrs- und Lärmforschung von Bedeutung.</p>
weitere Sektoren	
Bodeninfrastruktur	<p>Voraussetzung für den Einsatz von Trägerraketen sind entsprechende Startanlagen auf sogenannten Weltraumbahnhöfen als Teil der Bodeninfrastruktur (z.B. Kennedy Space Center/Cape Canaveral (USA.), Baikonur (betrieben von Russland in Kasachstan), Raumfahrtzentrum Guyana in Französisch-Guyana in Südamerika (ESA).*</p> <p>Zuletzt wurden neue Weltraumbahnhöfe in Betrieb genommen: 2016 wurde das Kosmodrom Wostotschny in Russland eröffnet, ebenso wie Anlagen in China und Neuseeland. Weitere Weltraumbahnhöfe sind beispielsweise in Großbritannien in Planung.</p> <p>Der Raumflugbetrieb ist ohne eine entsprechende bodengebundene Infrastruktur nicht möglich. Dazu gehören Konstruktionsanlagen für Raumfahrttechnologien, Testbetriebsstände sowie Kommunikationssysteme, Beobachtungssysteme und Einrichtungen für die Datenverarbeitung.</p>



sonstige Dienstleistungen	Rund um die Raumfahrtindustrie werden Dienstleistungen in den Bereichen Versicherungen, Beratung oder Finanzierungen geboten. Dies umfasst z.B. die Absicherung von Risiken verbunden mit dem Transport und Betrieb von Nutzlasten, Ingenieurleistungen für die Konstruktion oder die Finanzierung von kommerziellen Vorhaben.
Exploration	Weltraumagenturen betreiben bemannte und unbemannte Raumfahrt mit dem Ziel, Forschungsfragen zu beantworten. <ul style="list-style-type: none">• Zu den unbemannten Missionen der jüngeren Vergangenheit zählen u.a. die Landung der Marssonde InSight, die New-Horizons-Mission zum Zwergplaneten Pluto und zu noch weiter entfernten Zielen oder die Landung der chinesischen Sonde Chang'e 4 auf der erdabgewandten Seite des Mondes. Unbemannte Explorationsmissionen werden in der Regel entlang sehr spezifischer Forschungsziele entwickelt, sodass wirtschaftliche Interessen hier eine untergeordnete Rolle spielen.• Die bemannte Raumfahrt reicht derzeit nur bis in den niedrigen Erdborbit, wo mit der ISS ein permanenter Außenposten zur Durchführung wissenschaftlicher Experimente zur Verfügung steht. Bemannte Raumfahrt dient primär der Erkenntnisgewinnung über die physiologischen und psychologischen Effekte längerer Aufenthalte im Weltraum, der Durchführung wissenschaftlicher Experimente aus unterschiedlichsten Disziplinen und der Durchführung von Aufgaben, die robotische Systeme nicht oder nicht vollständig ausführen können.

- * Die geografische Lage von Weltraumbahnhöfen ist ein wichtiger Aspekt: Je näher die Anlagen sich am Äquator befinden, desto leichter können Raketen die gewünschten Umlaufbahnen erreichen. Zudem sollten sie in dünn besiedelten Gebieten liegen und/oder an Meeresflächen angrenzen, sodass startende Raketen bei eventuellen Unfällen nur ein Minimum an Gefährdung darstellen.

Quellen: Albat et al. 2011, S.168 ff.; Ball et al. 2007; BMVI et al. 2014; Feuerbacher 2011, S.505 ff.; Holland 2019; Holsten 2011, S.131; Lassmann/Obersteiner 2011, S.132 ff.; Maini/Agrawal 2014, S.174 ff.; NASA o.J.c; Wittmann/Hanowski 2011, S.51 ff.



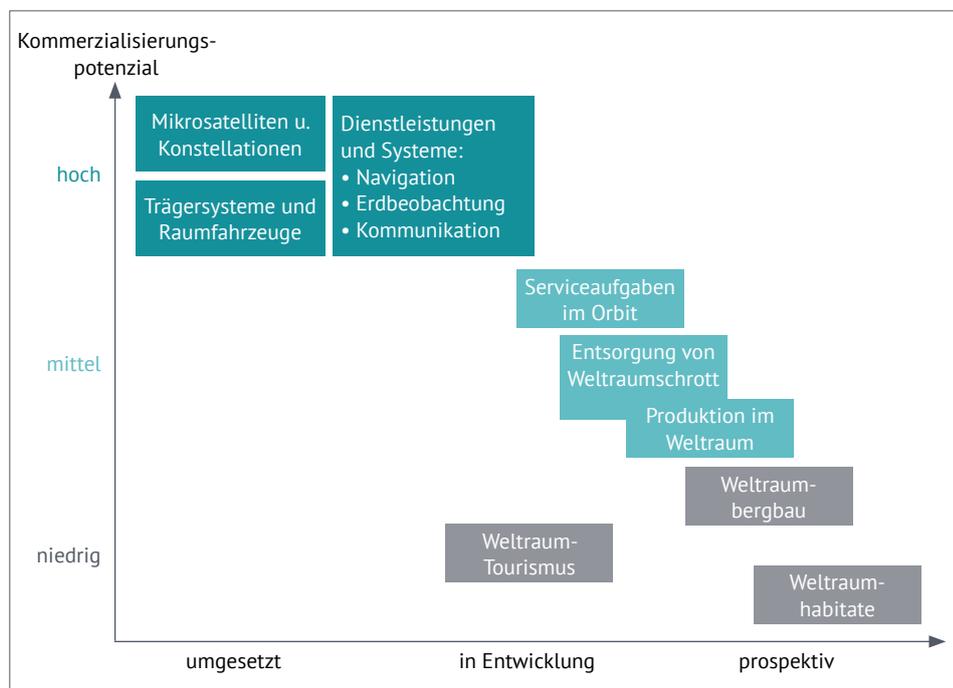
6 Anwendungs- und Geschäftsfelder von New Space

Durch das Aufkommen der kommerziellen Raumfahrt und die neuen unternehmerischen Akteure wird die traditionelle Raumfahrt stark beeinflusst. Zahlreiche neue Anwendungen wurden durch die New-Space-Aktivitäten erst ermöglicht und wirtschaftlich tragfähig, weil z.B. Raketenstarts immer preiswerter oder kleine, kostengünstige Satelliten(konstellationen) eingesetzt werden. In der Folge entstehen zunehmend neuartige Geschäftsmodelle, Produkte und Dienstleistungen, die ihre Wirkung nicht nur innerhalb der Raumfahrt, sondern immer mehr auch in Nichtraumfahrtindustrien entfalten.

Derzeit sind völlig neuartige Weltraummärkte in der Entwicklung, deren Marktpotenziale aufgrund der zum Teil sehr weit in die Zukunft weisenden Anwendung aus heutiger Sicht nur sehr vage zu bestimmen sind, wie z.B. Weltraumtourismus oder Weltraumbergbau (Abb. 10). In den Medien liegt ein besonderer Fokus auf der Darstellung dieser neuen, prospektiven Weltraummärkte. Die Aufmerksamkeit, die diese Themen erfahren, spiegelt jedoch nicht die gegenwärtigen Kom-

Völlig neuartige Weltraummärkte sind in der Entwicklung.

Abb. 10 Anwendungsbereiche und Geschäftsfelder von New Space



Eigene Darstellung basierend auf Bockel 2018; SpaceTec Partners/BHO Legal 2016



Kommerzialisierungspotenziale liegen aktuell vor allem in den schon stark etablierten Bereichen.

merzialisierungsmöglichkeiten wider. Diese liegen vielmehr in der Anwendung von Mikrosatelliten, Trägersystemen und Dienstleistungen in den Bereichen Kommunikation, Navigation und Erdbeobachtung, die schon heute weitgehend implementiert sind, aber dank New Space noch deutliche Impulse erfahren können und weitere Entwicklungspotenziale bieten. Das neue Geschäftsfeld Weltraumtourismus wird aktuell erprobt und ist auf dem Sprung in Richtung Kommerzialisierung. Andere Anwendungsbereiche, wie die Produktion, Montage, Reparatur oder Entsorgung im All sind Entwicklungsfelder, die noch größerer technologischer Fortschritte bedürfen. Insbesondere die Erschließung von Ressourcen im Weltraum und deren Weiterverarbeitung vor Ort oder Rücktransport zur Erde müssen noch auf ihre Umsetzbarkeit hin getestet werden. Noch weiter in die Zukunft weisend und mit ungewissem Kommerzialisierungspotenzial verbunden ist die Vision, auf Raumstationen bzw. Planeten zu leben und zu arbeiten.

Im Folgenden werden die Anwendungs- und Geschäftsfelder von New Space beschrieben und – soweit es die Quellenlage erlaubt – deren Kommerzialisierungspotenzial erläutert.

6.1 Etabliert mit weiterem Potenzial

6.1.1 Mikrosatelliten und -konstellationen

Circa 2.800 Satelliten, betrieben von 80 Ländern, umkreisen die Erde.

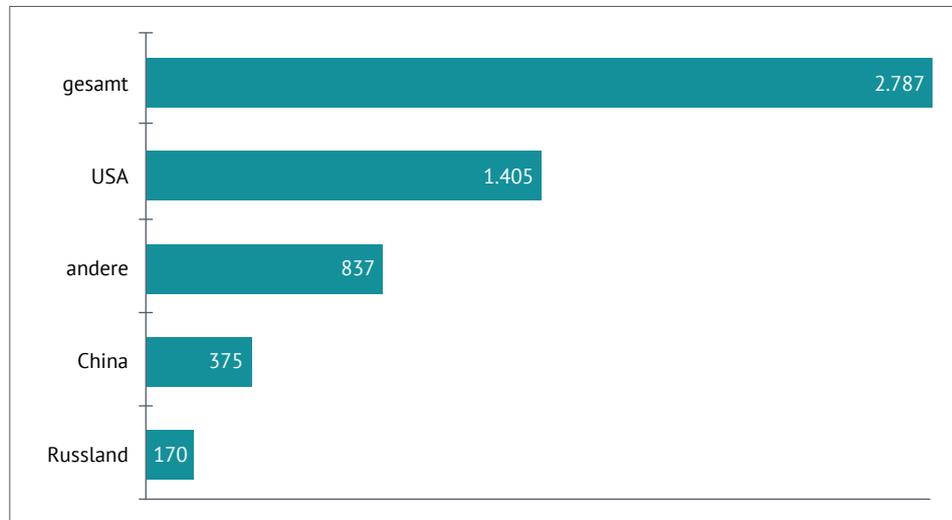
Aktuell umkreisen ca. 2.800 Satelliten die Erde (UCS 2005; Stand 1.8.2020). Die häufigsten Verwendungszwecke sind Kommunikation (privatwirtschaftlich und staatlich), Erdbeobachtung sowie Forschung und Entwicklung. Die meisten Satelliten gehören den USA (1.405), gefolgt von China (375) und Russland (170). Insgesamt verfügen weltweit 80 Länder über mindestens einen Satelliten (Brandt 2019; OECD 2019) (Abb. 11). Deutschland verfügt über 29 Satelliten im Erdorbit und ist darüber hinaus in internationalen Kooperationen am Betrieb weiterer Satelliten beteiligt (Wood 2019).

Satelliten werden entsprechend ihrer Mission in verschiedene Orbits gebracht. Satelliten im niedrigen Erdorbit (Low Earth Orbit – LEO) umkreisen die Erde schneller, als die Erde rotiert. Satelliten werden aufgrund ihrer Nähe zur Erde (ca. 150 bis 800 km) häufig für die Erdbeobachtung genutzt. Mehr als 50% der wichtigsten Klimadaten werden schon heute über Satelliten erfasst (OECD 2019). Für eine globale Abdeckung sind aufgrund des niedrigen Orbits allerdings viele hundert Satelliten erforderlich.

Die geostationären Satelliten (Geostationary Orbit – GEO) bewegen sich synchron zur Erdrotation in einer Höhe von 36.000 km. In diesem Orbit befinden sich die meisten Kommunikations- und Wettersatelliten. Drei Satelliten in dieser Höhe reichen aus, um die gesamte Erde mit Signalen zu versorgen.



Abb. 11 Anzahl aktiver Satelliten im Erdorbit



Eigene Darstellung nach UCS 2005 (Stand 1.8.2020)

Der mittlere Erdorbit (Medium Earth Orbit – MEO) liegt zwischen GEO und LEO und stellt häufig einen Kompromiss zwischen dem Energieaufwand für das Erreichen eines spezifischen Orbits und der dort erreichbaren Signalabdeckung dar. GPS-Satelliten umkreisen die Erde im MEO und können mit 32 Satelliten einen weltweit verfügbaren Service leisten.

Bis 2020 werden vier globale Satellitennavigationssysteme (USA, Russland, Europa, China) und drei regionale (Indien, Japan, Südkorea) in Betrieb sein. Mehr als 60% der mobilen IT-Geräte weltweit können heute mindestens ein Navigationssystemsignal erfassen; neue Mobiltelefone sind mittlerweile fast vollständig in der Lage, Informationen zur Position, Navigation und Zeitangabe zu verarbeiten (OECD 2019).

Die meisten Satelliten befinden sich im LEO (74,5%), gefolgt von GEO (20,5%), wo sich die teuersten und größten Satelliten bewegen. Eine kleinere Satellitenzahl bewegt sich im MEO (5%).

Die Mehrzahl der Kommunikationssatelliten wiegt ca. 1.000 kg, doch sehr spezialisierte Satelliten, wie z.B. das Hubble-Teleskop, sind mehr als 10 t schwer. Dank des Einsatzes standardisierter Bauteile, sowie durch Miniaturisierung und Serienfertigung (Kap. 7.2) werden die Satelliten immer kleiner und preiswerter. Die neueren Kleinsatelliten, auch Minisatelliten oder Cube-Sats genannt, wiegen weniger als 100 g bis max. 500 kg und finden vor allem Anwendung im LEO, weil sie dort trotz ihrer vergleichsweise schwachen Sensoren und Solarzellen ihre Aufgaben noch gut erfüllen können. Da die Satelliten nicht in den höheren geo-

Bis 2020 werden vier globale Satellitennavigationssysteme und drei regionale in Betrieb sein.

Die Mehrzahl der Satelliten (rund 2.000) befindet sich im LEO.



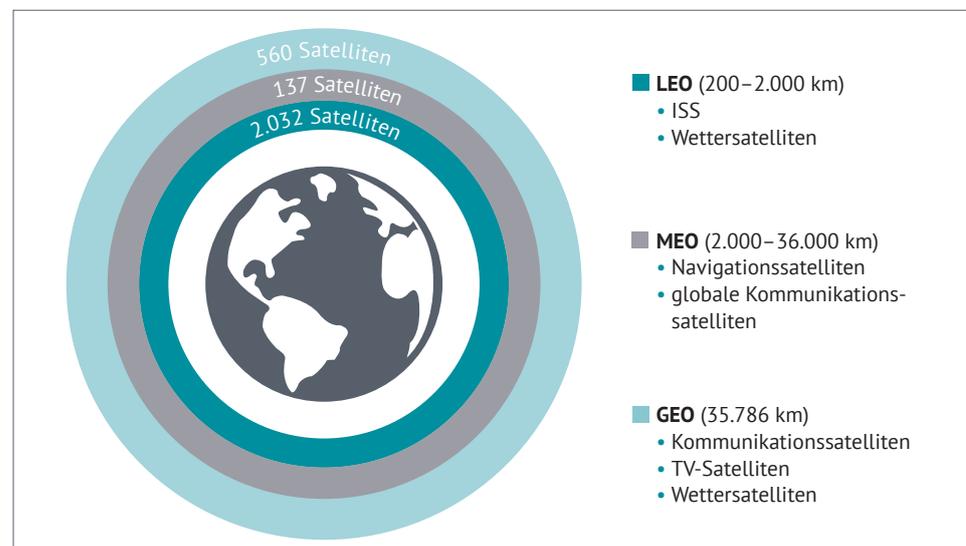
stationären Orbit gebracht werden müssen, fallen auch die Kosten für den Transport geringer aus. Über die große Stückzahl kann eine höhere Leistungsfähigkeit bei gleichzeitiger Redundanz im System erreicht werden. Der geostationäre Orbit hingegen wird weiterhin den robusteren, größeren und teureren Satelliten vorbehalten bleiben (Schneider 2018b, S. 249 ff.)

Die Zahl der Satellitenstarts steigt exponentiell.

New-Space-Start-ups zielen darauf, größere Satellitenkonstellationen im Orbit zu positionieren.

In den letzten 5 Jahren war ein exponentielles Wachstum von Satellitenstarts zu verzeichnen, mit allein fast 900 Satellitenmissionen von 2014 bis 2018. Stellten Satelliten früher eher Unikate dar, ist es das Ziel der Satelliten-Start-ups, größere Satellitenkonstellationen in den Orbit zu bringen. OneWeb Satellites – ein Gemeinschaftsunternehmen der französischen Airbus Defence and Space und dem britischen Telekommunikationsunternehmen OneWeb, Ltd. – plant, innerhalb weniger Jahre rund 900 Satelliten im Orbit zu platzieren. SpaceX strebt mit seinem Projekt „Starlink“ ein Satellitennetzwerk aus rund 12.000 Satelliten bis 2025 an (Hegmann 2018; Lorenzen 2019). Mit der Realisierung von Satellitenschwärmen im All steigt auch die Menge des erwartbaren Weltraumschrotts und die Notwendigkeit, diesen wieder zu beseitigen oder ihn durch entsprechende technologische und rechtliche Vorkehrungen möglichst zu vermeiden (Kap. 6.2.3 u. 7.3.3).

Abb. 12 Objekte in Erdumlaufbahnen und deren Entfernung von der Erde

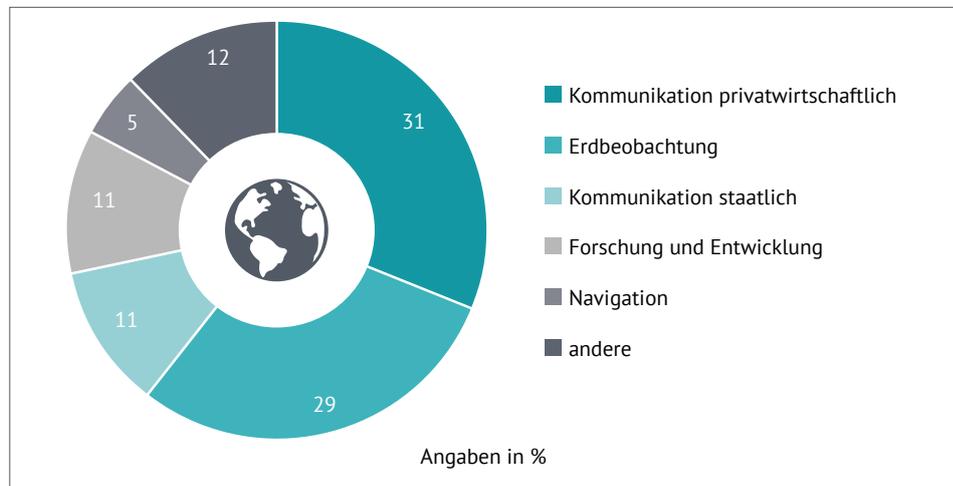


Quelle: nach Comparison satellite navigation orbits (<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16891766>; 2.11.2020); Anzahl der Satelliten aus UCS 2005 (Stand 1.8.2020).

Vor dem Hintergrund dieser Entwicklungen planen einige europäische Länder (Großbritannien, Italien und Portugal) sogenannte Micro-Space-Ports, von denen aus Trägerraketen mit kleineren Lasten von ca. 150 kg in den Orbit transportiert werden. Diese könnten für europäische New-Space-Kleinsatellitenvorhaben



Abb. 13 Verwendungszwecke von Satelliten



Quelle: Brandt 2019

interessante Startstandorte sein und komplementär zum bisher einzigen europäischen Raumfahrtbahnhof (Raumfahrtzentrum Guyana in Französisch-Guyana, Südamerika) gesehen werden (BDI 2019).

6.1.2 Zugang zum Weltraum: Trägersysteme und Raumfahrzeuge

Den wichtigsten Zugang zum Weltraum bieten bis heute Trägerraketen. Die New-Space-Aktivitäten haben vor allem in diesem Bereich mit den Raumfahrtunternehmen SpaceX, Blue Origin und Virgin Galactic zugenommen (Kap. 2.3). Diese und andere New-Space-Unternehmen tragen mit ihren Entwicklungen maßgeblich dazu bei, dass innovative Trägersysteme bzw. Raumfahrzeuge zur Verfügung stehen und die Kosten für Raketenstarts auf der Berechnungsgrundlage Kosten per kg stetig sinken (Kap. 7.2).

Während die durchschnittlichen Startkosten zwischen 1970 und 2000 ca. 18.500 US-Dollar/kg für einen Transport in den niedrigen Erdorbit (LEO) betragen, konnte SpaceX mit seiner Falcon-9-Rakete dies 2010 auf 2.720 US-Dollar/kg reduzieren. 2018 gelang dann mit der Falcon-Heavy-Rakete sogar eine Reduzierung auf 1.410 US-Dollar/kg (Jones 2018).

Die durchschnittlichen Kosten pro kg, um Ladung in den Weltraum zu befördern, sind die wichtigste wirtschaftliche Kennzahl für den Betrieb von Raketen. Eine Herausforderung besteht dabei in dem Verhältnis der Nutzlast zum erforderlichen Energieaufwand, der notwendig ist, um die Nutzlast auf ihren Zielorbit zu transportieren. Nutzlasten machen bei einem Raketenstart nur zwischen 1 bis 5 % der Startmasse des Trägersystems aus (Holsten 2011, S.132). Vor 10 Jahren

Raketentechnologie bleibt langfristig zentral für potenzielle Anwendungen und Kommerzialisierungsmöglichkeiten.



kostete der Nutzlasttransport in den geostationären Orbit noch ca. 20 Mio. Euro/t, heute 15 bis 16 Mio. Euro (Bundesregierung 2017). Zur Senkung der Kosten wurde in den letzten Jahrzehnten stetig versucht, die Treibstoffeffizienz chemischer Antriebe zu erhöhen; doch sowohl hinsichtlich des Designs der Antriebe als auch bezüglich der eingesetzten Materialien werden die Leistungsgrenzen erreicht (Albat et al. 2011, S. 191).

Ansätze für eine weitere Kostensenkung, die von New-Space-Akteuren genutzt werden, bestehen aktuell in der Wiederverwendbarkeit der Raketen bzw. von Komponenten, dem Einsatz von Standardbauteilen, einer Serienfertigung und Miniaturisierung (Kap. 7.2).

Zur weiteren Ausschöpfung von Kostensenkungen werden – zum Teil seit Jahrzehnten – alternative Konzepte zu Raketen entwickelt. Von den drei alternativen Konzepten „Schienenantriebe“ (rampenförmige Konstruktion, auf der Nutzlasten mittels Linearmotor auf Fluchtgeschwindigkeit gebracht werden), „Weltraumaufzüge“ (Kabelsysteme, die bis in 36.000 km Höhe reichen, um an ihnen Lasten auf und ab zu befördern) und „Raumflugzeuge“ konnte allein beim letztgenannte Konzept die technische Machbarkeit nachgewiesen werden: Raumflugzeuge sind analog zu Flugzeugen für horizontale Starts und Landungen konzipiert. Über Jahrzehnte hat es Dutzende solcher Entwicklungen gegeben, ohne dass sich Raumflugzeuge, wie z.B. das Space Shuttle, bislang als ernsthafte Alternative zu Trägerraketen etabliert haben. Ein besonderer Vorteil der Raumflugzeuge soll darin bestehen, dass die Triebwerke den Sauerstoff aus der Atmosphäre nutzen können und dies zur Treibstoffeinsparung führt. Raumflugzeuge können entweder eigenständig starten und landen oder aber sie werden zunächst von Trägerflugzeugen in entsprechende Höhenlagen transportiert, wo dann die Triebwerke des Raumflugzeugs gestartet werden, um den Weltraum zu erreichen oder suborbitale Flüge durchzuführen. Auch New-Space-Unternehmen treiben die Technikentwicklung voran. Jüngstes Beispiel für derartige Entwicklungen ist das SpaceShipTwo, das von Virgin Galactic entwickelt wird, um Touristen an die Grenze zum Weltraum zu befördern (Kap. 6.2.1).

Wenngleich die Innovationspotenziale von Raketen begrenzt scheinen, bleiben sie bis auf Weiteres der einzige Zugang zum (tiefen) Weltraum. Für New-Space-Akteure bedeutet dies, dass die Raketentechnologie langfristig zentral für potenzielle Anwendungen und Kommerzialisierungsmöglichkeiten bleiben wird.

6.1.3 Dienstleistungen und Systeme: Kommunikation, Navigation und Erdbeobachtung

New Space übt nicht nur auf den Upstream, sondern auch auf den Downstreamsektor einen Einfluss aus. Angetrieben werden die Entwicklungen durch Inno-

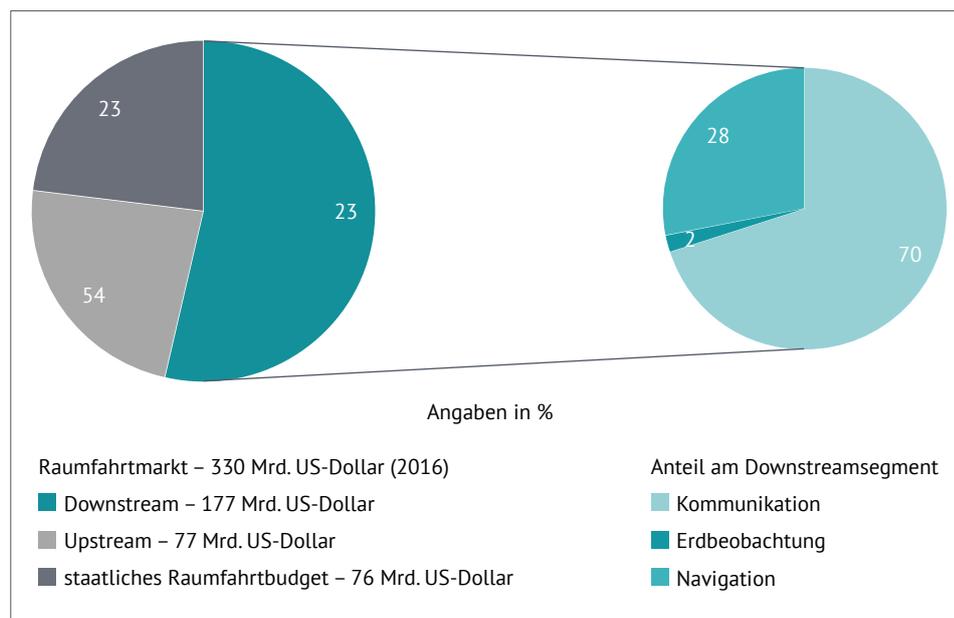


vationen vor allem in den Feldern Miniaturisierung, 3-D-Druck, Robotik, optische Technologien, Big Data oder KI, die u. a. in stetig sinkende Kosten für den Raumtransport resultieren oder generell neue Anwendungen ermöglichen. Das Downstreamsegment lässt sich in drei Hauptgruppen unterteilen: satellitenbasierte Kommunikation, Navigationssatellitensysteme und Erdbeobachtung zählen zu den Bereichen, die zum Teil schon seit Jahren kommerziell genutzt werden, die jedoch durch New-Space-Aktivitäten noch weiteren Schub erhalten werden.

Impulse sind zukünftig insbesondere für den Bereich Erdbeobachtung zu erwarten, der momentan nur einen sehr kleinen Anteil von 1,65% am Downstreamsektor einnimmt, während Anwendungen basierend auf satellitenbasierter Kommunikations- und Navigationssysteme im Verlauf der vergangenen Jahrzehnten mit 70% respektive 28% bereits eine substanzielle Marktgröße erreicht haben (Strada/Sasanelli 2018) (Abb. 14).

Zukünftig sind wichtige Marktimpulse im Bereich Erdbeobachtung zu erwarten.

Abb. 14 Anteile am Downstreamsegment



Quelle: basierend auf Marktzahlen von 2016 nach Strada/Sasanelli 2018

Nachfolgend wird beschrieben, wo Potenziale für neue oder verbesserte Anwendungen innerhalb der Downstreamsektoren bestehen können.



Satellitenbasierte Kommunikation

Die satellitenbasierte Kommunikation nimmt zwar mit 70% bereits den größten Umsatzanteil am Downstreamsegment ein, birgt aber auch zukünftig noch Wachstumspotenziale etwa in den Bereichen Rundfunkausstrahlung, Satellitentelefonie und Internetzugang).

Die satellitenbasierte Kommunikation hat bereits den größten Marktanteil, wird aber noch weitere Umsatzpotenziale erschließen können.

Es stellt sich zunehmend die Frage, ob die Schaffung bodengebundener Infrastrukturen (Glasfaserkabel, Übertragungsmasten) gegenüber der Entwicklung satellitengestützter Kommunikationssysteme noch wirtschaftlich ist. Insbesondere beim Ausbau der globalen Internetinfrastruktur und der Umstellung auf den neuen 5G-Standard stellen Satellitenkonstellationen eine ernst zu nehmende Alternative dar. Dennoch bleiben die Kosten für die Einrichtung und den Erhalt (geostationärer) Satellitensysteme sowie technologische Nachteile von satellitenbasierten Kommunikationssystemen gegenüber erdgebundenen Systemen, wie z.B. Verzögerungen bei der Signalübertragung (Latenz), begrenzte Frequenzbänder oder Störeinflüsse durch kosmische Strahlung, abzuwägen.

Die durch New Space bzw. (Mikro-)Satellitenkonstellationen zu erwartenden Kostenreduktionen werden auch die traditionellen Bereiche der satellitenbasierten Kommunikation der Rundfunkausstrahlung und der Telefonie weiter beflügeln. Mittels satellitenbasierter Kommunikationssysteme sollen nicht nur bislang vom Internet nicht oder kaum erschlossene Regionen an das World Wide Web (WWW) angeschlossen werden, sondern auch die Netzabdeckung in Gebieten mit bereits existierender Infrastruktur erhöht werden.

Ein weiteres Kommerzialisierungspotenzial wird im Bereich von Industrie 4.0 bzw. dem Internet der Dinge erwartet. Vor dem Hintergrund einer zunehmenden Vernetzung von Geräten ist der Ausbau einer leistungsfähigen Infrastruktur ein wichtiger Treiber der weiteren Kommerzialisierung des Anwendungsfeldes.

Die Satellitenkommunikation ist seit 40 Jahren das Kerngebiet der Raumfahrt und wird es wohl auch bleiben.

Die Satellitenkommunikation war in den letzten 4 Jahrzehnten das ökonomische Kerngebiet der Raumfahrt und wird es mit großer Wahrscheinlichkeit auch bleiben (Goldman Sachs 2017). Das zukünftige Angebot von großen Satellitenkonstellationen aus seriengefertigten kleinen bzw. Kleinstsatelliten wird die Kosten weiter senken (Bockel 2018). Das daraus resultierende gewisse Überangebot und die damit verbundenen Kostensenkungen werden voraussichtlich zu einer weiteren Stimulation der Nachfrageseite im Downstreamsektor führen (Poponak et al. 2017).

Heutige und zukünftige Anwendungsfelder im Bereich satellitenbasierter Kommunikation umfassen (ESA o.J.f; Rakyat 2016; Strada/Sasanelli 2018):



- Rundfunkausstrahlung (Broadcasting): Satelliten-TV und -Radio ermöglichen ein erweitertes Spektrum zu terrestrischen Angeboten in hoher Sendequalität.
- Satellitentelefonie: Sie bietet schon heute eine Alternative zu terrestrischen Lösungen. Sie kann auch unter extremen Wetterbedingungen etwa in Wüsten oder in der Arktis/Antarktis betrieben werden. Satellitentelefone werden aufgrund ihrer Unabhängigkeit von einer terrestrischen Technologie auch nach Naturkatastrophen oder in Kriegsgebieten eingesetzt. Zukünftig sollen die Systeme noch an Sicherheit, Störungsfreiheit und Übertragungsgeschwindigkeit gewinnen.
- Internetzugang: Satellitenbasierte Kommunikationssysteme können als Alternative zu terrestrischen Lösungen Internetzugang in der (kommerziellen) Schifffahrt, dem Überlandverkehr (Kraftfahrzeuge/Züge) und auch in der Luftfahrt ermöglichen. Für den letztgenannten, speziellen Anwendungsfall entwickelt die ESA derzeit IRIS, ein satellitengestütztes bodenkontrolliertes Kommunikationssystem als Ersatz für Radarsysteme für eine sichere Luftverkehrsüberwachung, das bis spätestens 2028 in Betrieb gehen soll. Dieses bietet neben der Flugüberwachung auch den Betrieb von Internet oder die Kreditkartennutzung im Flugzeug. Das Angebot einer satellitenbasierten elektronischen Zahlung ist beispielsweise auch das Ziel der Indonesischen Bank, die zu diesem Zweck seit 2016 einen Satelliten betreibt, um Bankgeschäfte auf den zahlreichen Inseln des Landes zu tätigen.
- Industrie 4.0: Die Vernetzung von Geräten und eine Maschine-zu-Maschine-Kommunikation im Sinne eines Internet der Dinge können durch eine satellitenbasierte Kommunikation mit Blick auf Verfügbarkeit und Abhörsicherheit verbessert werden.
- Bildung und Gesundheit: Eine satellitenbasierte Kommunikation lässt sich für Bildungsangebote (z.B. Videunterricht) oder die Unterstützung telemedizinischer Anwendungen (insbesondere in entfernt gelegenen Regionen) einsetzen.

Navigationssatellitensysteme

Eine sich stetig verbessernde Positionsbestimmung und fallende Kosten sind zwei wesentliche Treiber für den globalen Markt von Navigationssatellitensystemen. Dieser nimmt immerhin fast 30% am gesamten Downstreamsektor ein. Kommerzielle Einsatzmöglichkeiten ergeben sich aus der kontinuierlichen Verfügbarkeit präziser Informationen über den Ort eines Objekts für verschiedene Anwendungsfälle.



Navigationen-
wendungen, speziell LBS,
bleiben ein Wach-
tumsmarkt.

GPS-Anwendungen (Global Positioning System) werden bereits millionenfach von Unternehmen oder Konsumenten genutzt und haben seit 2015 ein starkes Wachstum von durchschnittlich 20% p. a. erfahren. Dazu beigetragen haben besonders Anwendungen der standortbezogenen Dienste („location-based services“ – LBS). Die Routenplanung auf der Straße und das LBS-Segment werden das Feld in den nächsten Jahren – gemessen an Umsätzen – weiterhin deutlich dominieren und speziell durch autonom gesteuerte Fahrzeuge weiter an Bedeutung gewinnen. So wird im Downstreamsektor für Navigationssysteme ein weiteres Wachstum erwartet, wenngleich nicht mehr so stark wie in den Vorjahren (bis 2025 wird ein Rückgang auf ca. 9,5% Wachstum p. a. prognostiziert) (GSA 2018).

Heutige und zukünftige Anwendungsfelder im Bereich Navigationssysteme umfassen (BDI 2019; Strada/Sasanelli 2018):

- Verkehr: Satellitenbasierte Navigation eignet sich für den motorisierten Individualverkehr genauso wie für den öffentlichen Nahverkehr oder für Fußgänger. Zukünftig sollen Routen mit Blick auf Zeit, Treibstoffverbrauch, Schnelligkeit, Sicherheit (z. B. Kollisionswarnungen) oder Emissionen optimiert werden.
- Logistik: Nicht nur der Standort von Fahrzeugen, sondern auch die Position einzelner Objekte (z. B. Frachtcontainer) kann per GPS bestimmt werden. Zukünftig sollen zusätzlich zur Routenoptimierung noch bessere Aussagen zur Standzeit oder unautorisierten Bewegungen ermöglicht werden.
- Autonome Fahrzeuge: Eine wichtige Voraussetzung für die zukünftige Autonomie von Fahrzeugen (Autos, Flugzeuge, Schiffe) ist deren zuverlässige Positionsbestimmung in Echtzeit.
- Standortbezogene Dienste: Unzählige Webanwendungen nutzen bereits heute die in Smartphones integrierte GPS-Technologie. Beispiele sind Karten- und Navigations-Apps, Standortmitteilungen innerhalb von Apps, Tracking- und Training-Apps in der Sport- und Fitnessbranche mit Anwendungspotenzialen für Amateure und Profis, Parkschein-Apps, Instorenavigation, mHealth, Taxi- und Carsharing-Apps etc. Diese Dienste werden weiter ausgebaut und optimiert werden.
- Landwirtschaft: Mittels GPS in Kombination mit Erdbeobachtung wird eine Präzisionslandwirtschaft möglich (siehe auch Erdbeobachtung).
- Energiewirtschaft: Die präzise Zeiterfassung von Satellitennavigationssystemen ermöglichen die synchrone Steuerung dezentraler Energienetze.



Erdbeobachtung

Mit der heutigen Satellitentechnik lassen sich Gegenstände, die kleiner als 1 m sind, aus 800 km Entfernung/Höhe erkennen und verschiedene Parameter erfassen, wie Wasser- und Luftzusammensetzung, der Zustand von Feldfrüchten und Wäldern genauso wie Bewegungen des Bodens bzw. Erdreichs im Millimeterbereich. Standen ursprünglich primär wissenschaftliche Interessen bei der Nutzung von Erdbeobachtungsdaten im Vordergrund, so haben sich mit der zunehmenden Datenverfügbarkeit auch wirtschaftliche Verwertungsperspektiven eröffnet (Poponak et al. 2017). Potenziale ergeben sich in diversen Bereichen, die von Wetter- und Klimabeobachtung, Präzisionslandwirtschaft und -forstwirtschaft, Raum- und Stadtplanung, Krisen- und Schadensmanagement bis in den Gesundheitsbereich reichen (BMVI et al. 2014; DLR 2013). In den letzten Jahren sind zwar Wachstumsraten bei kommerziellen Anwendungen von Erdbeobachtungsdaten zu verzeichnen, doch trotz der zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten ist der Marktanteil für Erdbeobachtung mit knapp 2 % am Downstreamsektor sehr gering.

Der geringe Marktanteil der vielversprechenden Erdbeobachtung deutet auf noch ungenutzte Potenziale.

Heutige und zukünftige Anwendungsfelder im Bereich Erdbeobachtung umfassen (BMVI et al. 2014; DLR 2013):

- **Kartierung:** Eine direkte Anwendung der Erdbeobachtung resultiert in der Erstellung von Karten. 3-D-Landschaftsmodelle haben eine wichtige Bedeutung, z.B. für die Hochwassermodellierung oder die Planung von Bauwerken. Digitale Karten sind auch eine wichtige Voraussetzung für die Navigation.
- **Raum- und Stadtplanung:** Satellitendaten können für die Planung von Verkehrswegen, Leitungen, Trassen und für die Verwaltung von Flächen, Gebieten und Regionen genutzt werden. Mittels hochauflösender Bilder können ferner Baufortschritte überwacht werden. Für die Planung und Realisierung von Bauvorhaben bieten sich so neue Möglichkeiten der Projektsteuerung. Anwendung im Bereich der Raum- und Stadtplanung umfassen die Kartierung von Landoberflächen, Bevölkerungsentwicklung und -verteilung, die Konstruktion von 3-D-Stadtmodellen und die Identifizierung von Temperatur- oder Verschmutzungszonen bis hin zur Vermessung der Bodenabsenkung.
- **Wald-, Land- und Forstwirtschaft:** Waldbestände und landwirtschaftlich genutzte Flächen lassen sich inventarisieren, hinsichtlich ihrer Zustände beurteilen und für die Erstellung von Ernteprognosen analysieren. In Afrika beispielsweise liefert die Erdbeobachtung oft die einzigen zuverlässigen Daten, um die Größe der kultivierten Fläche zu kartieren. Vor allem in Entwicklungsländern erleichtert die Verknüpfung mit meteorologischen Messungen (zu Niederschlags- oder Dürreperioden) eine rechtzeitige Prognose zukünftiger Erntesituationen.



- **Präzisionslandwirtschaft:** Die Präzisionslandwirtschaft („precision farming“) profitiert von Erdbeobachtungsdaten, aus denen sich Rückschlüsse über optimalen Düngemitelesatz, Bewässerung, Ausbringung von Saatgut sowie Schädlingsbekämpfungsmitelesatz ziehen lassen. Das Pflanzenwachstum und der Pflanzenzustand können bestimmt werden und bei der Feldarbeit kann ein mit GPS gesteuertes Fahrzeug automatisiert Dünger oder Wasser nach Bedarf ausbringen. Beobachtungen über mehrere Jahre erlauben Aussagen zur Bodengüte.
- **Bodenschätze und Bergbau:** Es können neue Bodenschätze wie seltene Erden, Öl- und Gasvorkommen oder auch unterirdische Wasserquellen in Wüstenregionen entdeckt werden. Gleichzeitig lassen sich Absenkungen oder Einbrüche im Zusammenhang mit früheren Bergbauaktivitäten beobachten und dokumentieren.
- **Business Intelligence:** Erdbeobachtungsdaten können auch für die Wettbewerberanalyse genutzt werden. Ein Beispiel dafür ist das Angebot der US-amerikanischen Orbital Insight, Inc., welche die Anzahl der geparkten Autos auf Parkplätzen, z. B. vor Supermärkten, oder den Umschlag von Containern erfasst. Dies gibt Einblick in die Geschäftsentwicklung der Wettbewerber. Ein anderes Beispiel ist das US-amerikanische Start-up Urso Space Systems Inc., das Informationen über die Reserven in Öldepots etwa von Ölfirmen oder Häfen gibt. Diese Informationen können für Investoren interessant sein, besonders wenn die Datenlage über Wettbewerber – etwa über den chinesischen Markt – gering ist.
- **Umwelt- und Naturschutz:** Satelliten messen Stoffe in der Atmosphäre, überwachen die Ozonschicht oder die Veränderung der polaren Eiskappen und liefern Daten aus der Umgebung, sodass z. B. Ölfilme auf dem Meer entdeckt und Driftprognosen erstellt werden können. Naturschutzflächen, versiegelte oder agrarsubventionierte Flächen können in regelmäßigen Abständen erfasst werden. Im Meer können Oberflächentemperatur, Salzgehalt, Eisbedeckung und Wellenhöhe sowie Konzentrationen von Algen erfasst werden.
- **Risiko- und Krisenmanagement:** Erdbeben, Stürme, Überflutungen, Vulkanausbrüche und Brände lassen sich mittels Satelliten beobachten. Aus den Beobachtungen können Rückschlüssen auf die jeweiligen Ursachen gezogen werden. Die Daten bilden eine wichtige Grundlage für die Planung und Durchführung von Nothilfemaßnahmen, wie z. B. die Lokalisierung von Brandherden. Ziel ist es auch, Frühwarnsysteme etwa für Erdbeben zu etablieren, indem tektonische Verschiebungen per Radarinterferometrie²⁶ präzise erfasst werden.

²⁶ Die Radarinterferometrie ermöglicht im Gegensatz zum einfachen Radar dreidimensionale Bilder. Damit können Höhenmodelle berechnet und Verschiebungen im Zentimeterbereich detektiert werden.



- **Luftqualität und Gesundheit:** Die Luftqualität kann beobachtet und vorhergesagt werden. Maßnahmen wie Fahrverbote können in ihrer Wirkung gemessen werden. Zusätzlich können Vorhersagen zu Pollenflug, UV-Strahlung und Temperatur gemacht werden. Neben der Information über die Luftqualität ist so auch eine Verbesserung der Luftreinhaltung möglich, wenn die Maßnahmenwirksamkeit Steuerungsimpulse auslöst.
- **Wettervorhersage:** Es lassen sich zahlreiche Wetterdaten neben Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit genauso wie Luftschwebstoffe, Ozonwerte, Sturm- und Gewittervorkommen, Pollenflug oder die Wellenbewegung auf See erheben. Satelliten ermöglichen auch die Erhebung von Wetterdaten für schwer zugängliche Gebiete wie Wüsten und Urwälder. Eine besondere wirtschaftliche Bedeutung haben Wettervorhersagen für die Planung von Wind- und Sonnenkraftwerken, um ideale Standorte zu identifizieren.
- **Überwachung des Klimawandels:** Der Kohlenstoffkreislauf der Erde (Austauschprozesse von Kohlenstoff zwischen Atmosphäre, Hydrosphäre, Lithosphäre, Biosphäre und Pedosphäre) lässt sich mittels Satelliten global beobachten. Die gewonnenen Erkenntnisse tragen zum Verständnis des Klimawandels bei. Die Beobachtungsinstrumente der Satelliten können auch die häufig bewölkten Tropen untersuchen. Die Daten helfen dabei, Klimamodelle zu verbessern, und können auch die Wirkung von Umweltschutzmaßnahmen, etwa durch die Messungen von Stickstoffdioxid, das vor allem durch Verbrennungsprozesse in Kraftwerken und im Straßenverkehr entsteht, nachweisen.
- **Sichere und effizientere Schifffahrt:** Besonders die Handelsschifffahrt profitiert von präzisen Wettervorhersagen, Prognosen von Wellenbewegungen sowie Eis, denn Containerschiffe können so bzw. vor Kollisionen geschützt werden. Zudem kann durch Routenoptimierung Kraftstoff eingespart werden. Hoचाuflösende Aufnahmen helfen, havarierte Container, größeres Treibgut oder auch Piraterieversuche zu erkennen und tragen zum Schutz vor Zwischenfällen bei.
- **Versicherungs- und Schadensmanagement:** Der Versicherungssektor profitiert von der Erdbeobachtung insofern, als Daten für Risikomodellierungen verwendet werden: Schäden an Gebäuden oder anderen Infrastrukturen (Straßen, Brücken, Bahngleisen etc.) können erfasst und bewertet werden. Bildaufnahmen, die den Zustand vor einem Schadensfall dokumentiert haben, helfen bei der Regulierung von Schadensansprüchen.



6.2 In Entwicklung

6.2.1 Weltraumtourismus

Touristische Fahrten sollen in den suborbitalen Raum, in den Orbit oder zum Mond gehen.

Die in den Medien sehr präsenten kommerziellen Anbieter wie SpaceX, Blue Origin und Virgin Galactic versprechen, den Weltraum für einen breiteren, wenn gleich immer noch kleinen Kundenkreis zugänglich zu machen. Angebote umfassen etwa kurzfristige Aufenthalte im erdnahen (suborbitalen) Raum mit einer Entfernung von rund 100 bis 160 km von der Erde oder längerfristige Aufenthalte im Erdorbit zwischen 200 und 36.000 km. Als wesentliche Attraktion der orbitalen Flüge gelten der Panoramablick auf die Erde, der Rundumblick in den Weltraum und der Aufenthalt auf einer Raumstation selbst. Bei den suborbitalen Flügen erleben die Touristen zwar nur für ca. 4 bis 6 Minuten Schwerelosigkeit, können dabei aber einen spektakulären Blick auf Sterne und die Erde genießen (O’Kane 2020; Schneider 2018b, S. 144).

Kommerzielle Projekte für suborbitale Flüge werden bislang im Wesentlichen von Virgin Galactic sowie Blue Origin verfolgt (Foust 2018b). Mit dem Raumflugzeug SpaceShipTwo will sich Virgin Galactic als erster Anbieter für suborbitale Flüge etablieren. 2010 kommunizierte das Unternehmen, dass 1.000 Personen eine Anzahlung von jeweils 20.000 US-Dollar für einen Flug in den suborbitalen Raum geleistet haben, dessen Preis im Einzelnen bei rund 250.000 US-Dollar liegen soll (Virgin Galactic 2010). Dieses Vorhaben konnte jedoch bis heute nicht realisiert werden, weil die Entwicklung des Raumflugzeugs bislang nicht abgeschlossen ist. Blue Origin beabsichtigte 2019, mit dem Ticketverkauf für eine Reise mit der – sich allerdings noch in Entwicklung befindenden – Rakete New Shepard zu beginnen (Preis bislang nicht bekannt) (Foust 2018b).

Vorhaben mit dem Ziel, längerfristige touristische Aufenthalte im Weltraum zu bieten, sind bislang im Vergleich zu den bereits genannten Vorhaben weniger weit realisiert. Bislang konnte nur sehr wenigen Menschen ein Aufenthalt auf der ISS ermöglicht werden. Am 28. April 2001 flog Dennis Tito als erste Privatperson zur ISS. Bis 2009 waren zwischenzeitlich sieben weitere Personen, davon eine zweimal, zur Raumstation geflogen. Bei den ISS-Besuchenden – darunter eine Frau – handelte es sich um äußerst wohlhabende Personen (Skaar 2007, S. 16). Die Kosten der ca. 7- bis 10-tägigen Reise zur ISS lagen bei geschätzt 20 bis 40 Mio. US-Dollar pro Flug (Skaar 2007, S. 16; WIRED Staff 2018). Die US-amerikanische Raumfahrtbehörde hat für jeden einzelnen Platz in einer russischen Soyuz-Kapsel rund 80 Mio. US-Dollar bezahlen müssen, um Astronautinnen und Astronauten einen Flug zur ISS zu ermöglichen (WIRED Staff 2018). Es ist anzunehmen, dass vergleichbare Kosten für den Transport von Touristen mit Soyuz-Raumfähren zur ISS entstehen werden. Neben der Zahlungskräftigkeit mussten die Weltraumtouristen im Vorfeld eine gute körperliche Fitness mit-



bringen und ein intensives mehrwöchiges Weltraumtraining absolvieren (Skaar 2007).

Die touristischen Flüge zur ISS wurden von der US-amerikanischen Space Adventures Ltd. durchgeführt, die dazu mit der ROSCOSMOS kooperierte. 2009 wurden die touristischen Flüge zur ISS jedoch eingestellt. Dies liegt im begrenzten Raumangebot der Raumschiffe begründet, denn seitdem der Betrieb der Space Shuttle 2011 eingestellt wurde, erfolgen die Flüge zur ISS ausschließlich mit den russischen Soyuz-Raumschiffen, in denen nur Platz für bis zu drei Personen ist. Die Plätze bleiben seitdem professionellen Astronauten und Kosmonauten der ständigen sechsköpfigen Besatzung der ISS vorbehalten.

Private Raumfahrten, insbesondere von Unternehmen, könnten perspektivisch ein Nachnutzungskonzept der ISS darstellen.

Neben dem Angebot von Flügen arbeiten mehrere Firmen an der Entwicklung von sogenannten Weltraumhotels für einen längerfristigen Aufenthalt im All. Ein Beispiel ist die Bigelow Space Operations, LLC des US-Hotelunternehmers Robert Bigelow, deren entfaltbare Module nach aktueller Planung bis 2021 fertiggestellt werden sollen (WIRED Staff 2018).²⁷ Letztlich soll es sich dabei aber weniger um ein Hotel im eigentlichen Sinne als um eine preiswerte Raumstation handeln, in der sich nicht nur Touristen aufhalten, sondern Staaten genauso wie Unternehmen Räumlichkeiten für ihre Forschung mieten können (Schneider 2018b, S. 150). Ähnliche Projekte verfolgen die US-amerikanischen Firmen Axiom Space, Inc. und Orion Span Inc., die genauso wie die russische RSC Energia kommerzielle Konzepte für die zukünftige Nachnutzung der ISS entwickeln bzw. mit Hotelmodulen an diese andocken wollen (Orion Span Inc. 2018; Raschke 2018) (Kap. 6.3.3).

In der Gesamtschau erweist sich der Flug in den Weltraum als technisch derart anspruchsvoll, dass sich eine Kommerzialisierung aufgrund von Entwicklungsschwierigkeiten immer wieder verschiebt. Die Reisen in den Orbit, z. B. zu Raumstationen bzw. Weltraumhotels, werden mit Kosten von ca. 20 bis 80 Mio. US-Dollar veranschlagt, die in den suborbitalen Raum mit ca. 250.000 US-Dollar. Ob und wann der Weltraumtourismus ein kommerziell tragfähiges Geschäftsmodell darstellen kann, ist daher weitgehend unklar.

6.2.2 Serviceaufgaben im Orbit

Im Orbit entsteht durch die steigende Zahl an Satelliten und durch den Betrieb an (privaten) Raumstationen ein zunehmender Bedarf für Servicefunktionen wie Instandhaltung, Modernisierung oder Wartung. Serviceaufgaben im Weltraum („on-orbit servicing“ – OOS oder auch „in-orbit servicing“) sind zwar kein vollständig neues Anwendungsfeld der Zukunft – vielmehr werden diese seit vielen

²⁷ <http://www.spaceref.com> (2.11.2020)



Jahrzehnten sukzessive fortentwickelt. Fortschritte in der Robotik haben zuletzt jedoch zu deutlichen Entwicklungssprüngen geführt. Die Bereitstellung von Serviceleistungen im Weltraum stellt für die Zukunft ein Kernelement für die weitere Erschließung des Weltraums und den Aufbau und Erhalt der dafür notwendigen Infrastruktur dar.

Servicefunktionen wie Reparatur oder Instandhaltung von Objekten im Weltraum stellen langfristig eine wichtige Voraussetzung für profitable Missionen dar.

Zu den Serviceaufgaben gehören z.B. die Inspektion und Untersuchung von im Orbit befindlichen Objekten in Bezug auf Schäden und Funktionsfähigkeit. Im Schadensfall könnten Objekte geborgen und zu einer anderen Stelle transportiert oder direkt vor Ort betankt oder repariert werden. Ziel ist es, die Lebensdauer von Satelliten zu verlängern, indem beispielsweise der Treibstoffvorrat aufgefüllt oder verschlissene Subsysteme ausgetauscht werden. Neben der Lebensdauerverlängerung bietet sich auch ein Flottenmanagement durch gezieltes Positionieren von Objekten auf die stets optimale Position zur Erde an. Solche Serviceaufgaben können von Servicesatelliten mit Greifarmen übernommen werden. Ein erster erfolgreicher robotischer Serviceeinsatz an einem Satelliten wurde 2007 von der Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) mit dem Programm „Orbital Express“ unternommen (Davis et al. 2019). Frei fliegende Inspektionssysteme – etwa zur Wartung der ISS – wurden bislang aber noch nicht realisiert (Hirzinger et al. 2011, S. 612 ff.).

Experten beschreiben in einer Studie der NASA von 2010 den Markt für OOS zur Instandhaltung und Wartung von Satelliten im Weltraum noch als hoch risikoreich, da dieser mit hohen Eintrittskosten verbunden sei und es noch nicht genügend Kunden für ein profitabel durchzuführendes Geschäft gebe. Grundsätzlich lohne sich dieser Service zwar für große und teure Satelliten, gleichzeitig konkurriere ein auf Verlängerung der Lebensdauer von Satelliten basierendes Geschäftsmodell mit den bisher etablierten Geschäftsmodellen, ausgediente bzw. alte Satelliten durch neue zu ersetzen. Ein einsatzverlängernder Service für alte Satelliten wäre nur dann profitabel, wenn die Kosten weniger als 50% im Vergleich zu einem Ersatzsatelliten betragen würden (NASA 2010).

In den vergangenen Jahren hat die Serienfertigung von Satelliten deutliche Fortschritte gemacht, und künftige Satellitenmissionen zielen eher auf ganze Satellitenflotten denn auf Unikate. Ein Ausfall einzelner Satelliten kann somit einfacher kompensiert werden, was den Bedarf für Serviceaufgaben im Orbit prinzipiell einschränkt. Dennoch ist davon auszugehen, dass Satellitenbetreiber grundsätzlich an einer langen Lebensdauer ihrer Produkte interessiert sein dürften. Dies zeigt auch das konkrete Projekt des luxemburgischen Satellitenbetreibers SES S.A. (2017) in Zusammenarbeit mit der auf Raumfahrtrobotik spezialisierten MDA Space Missions – ein Tochterunternehmen der kanadischen MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd. – zum Wiederbetanken von Satelliten. Vor dem



Hintergrund zunehmender funktionsloser Objekte im Weltraum wäre eine durch Wartung verlängerte Lebensdauer von Satelliten eine nachhaltigere Strategie.

So scheint der Markt für Serviceaufgaben im Orbit an einem Wendepunkt zu stehen und möglicherweise bald profitabel zu werden. So arbeiten immer mehr kommerzielle Unternehmen an Servicekonzepten, wie z.B. die Airbus Group (Division Airbus Defence and Space mit Sitz in Deutschland), Effective Space Solutions Ltd. (Vereinigtes Königreich) oder Made in Space, Inc. und Northrop Grumman (USA) ebenso wie der Projektverbund „iBoss“ (Intelligenter Baukasten für das On-Orbit-Satellite-Servicing) (Deutschland) (Davis et al. 2019). Marktdaten lassen sich nur sehr vereinzelt finden. Der Satellitenspezialist Northern Sky Research erwartet im OOS von Satelliten eine Entwicklung des Marktvolumens ausgehend von 2019 bis 2028 kumulierte Umsätze von rund 4,5 Mrd. US-Dollar (NSR 2019).

6.2.3 Entsorgung von Weltraumschrott

Im erdnahen Weltraum steigt die Zahl an umherfliegenden künstlichen Teilen, die eine steigende Gefahr für die Raumfahrt darstellen. Die ESA stellt fest, dass sich inzwischen schwerwiegende Risiken für den Betrieb von Satelliten ergeben (ESA o.J.i). Noch sei die Ausgangssituation zwar nicht als höchstkritisch zu beurteilen, jedoch sei davon auszugehen, dass das Risiko einer Kollision mit Trümmerteilen rasch ansteigt (ESA o.J.i). Das Entfernen des Weltraumschrotts stellt demzufolge eine immer wichtigere Aufgabe für eine sichere Raumfahrt dar. Bei der Entsorgung von Weltraumschrott handelt es sich um eine spezielle Form an Serviceaufgaben. Defekte, manövrierunfähige Satelliten können beispielsweise mittels eines Transporters in eine erdnahe Umlaufbahn befördert werden, um in die Erdatmosphäre einzutreten und dort zu verglühen (De-Orbiting), oder Teile werden im Sinne einer Weltraummüllabfuhr eingesammelt.

Die Entfernung von Weltraumschrott ist eine spezielle Serviceaufgabe.

Konkret handelt es sich bei Weltraumschrott um künstliche, unbrauchbar gewordene Objekte wie nicht mehr aktive Satelliten oder ausgebrannte Raketenstufen bzw. Trümmerteile von diesen (DLR 2009). Auch verlorengegangene Werkzeuge, Schrauben oder Lackteilchen bewegen sich im Orbit. Aktuell umkreisen schätzungsweise knapp 30.000 Objekte größer 10 cm die Erde, davon sind lediglich 1.000 Teile Raketen zuzuordnen; der Rest stammt aus anderen Quellen. Überdies wird geschätzt, dass sich weitere 500.000 Teile in einer Größe von 1 bis 10 cm und mehr als 10 Mio. 1 cm große Teile im Orbit bewegen (ESA o.J.i; NASA o.J.b). Wird die erfasste Größe noch weiter auf 1 mm reduziert, ergeben sich rund 170 Mio. umherfliegende Teilchen terrestrischen Ursprungs im All (ESA o.J.i). Zusammengefasst handelt es sich um fast 8.000 t Weltraumschrott (ESA 2017).

Bis zu einem gewissen Grad erfolgt eine Selbstreinigung des Orbits, denn Teile in niedrigen Erdumlaufbahnen verglühen in der Regel vollständig beim Eintritt



Abb. 15 Weltraumschrott im niedrigeren Erdorbit



Quelle: ESA (https://www.esa.int/spaceinimages/Images/2008/03/Debris_objects_in_low-Earth_orbit_LEO2; 2.11.2020)

Trümmerteile in höheren Erdumlaufbahnen sind sehr beständig und gefährden die bemannte und unbemannte Raumfahrt.

in die Erdatmosphäre. Nur in seltenen Fällen stürzen Gegenstände aus niedrigen Umlaufbahnen auf die Erde. Demgegenüber weisen Trümmer in höheren Erdumlaufbahnen ein höheres Gefährdungspotenzial auf. Schon kleinste Teile von nur 1 cm Größe entwickeln aufgrund ihrer hohen Geschwindigkeit von rund 40.000 km/h eine verheerende Wirkung und vermögen bei einem Aufprall Satelliten zu zerstören. Selbst Einschläge von noch kleineren Partikeln im Millimeterbereich können Nutzlasten im All empfindlich beschädigen oder Raumanzüge perforieren. Weltraumschrott stellt daher nicht nur eine Gefahr für unbemannte Objekte wie Satelliten dar, sondern auch für bemannte Systeme wie die ISS. Diese ist zwar gegen kleinere Teile durch Prallplatten und Gewebematten geschützt, muss jedoch bei einer drohenden Kollision mit Objekten größer als 10 cm Ausweichmanöver durchführen (DLR 2009; WELT.de 2014).

Die zunehmende Zahl an Satelliten im Weltraum lässt eine wachsende Menge an Weltraumschrott erwarten.

Problematisch in diesem Zusammenhang ist auch der sogenannte Kesslereffekt. Dieser beschreibt eine Kettenreaktion, die eintritt, wenn ein Trümmerteil auf ein Objekt trifft und in einer Kaskade weitere Trümmer erzeugt (Seidler 2017). Die Trümmerteile sind zudem sehr beständig, denn der Schrott verweilt abhängig von der Höhe des Orbits mitunter sehr lang. Während die Lebensdauer in 400 km Höhe mit einem Jahr noch vergleichsweise kurz ist, steigt sie in 1.000 km bereits auf rund 1.000 Jahre an (DLR 2009). Die kommerzielle Nutzung des niedri-



gen Erdorbits vor allem durch große Satellitenkonstellationen ist infolge durch Weltraumschrott gefährdet. Für die Entstehung von Weltraumschrott gibt es verschiedene Ursachen. Neben Überresten durch Raketenstarts entstehen die meisten Trümmer durch Kollisionen im Orbit, entweder versehentlich, wenn etwa ein Trümmerteil auf einen Satelliten trifft, oder auch absichtlich durch den gezielten Abschuss durch Raketen. Schon 1985 hat ein amerikanischer F-15-Kampfflugzeug den Forschungssatelliten Solwind P78-1 mit einer Rakete abgeschossen (Becker 2007) und 2007 beschloss China die Zerstörung des Wettersatelliten Fengyun-1C mithilfe einer bodengestützten Mittelstreckenrakete. Dies wurde als Machtdemonstration der Volksrepublik gewertet, um zu zeigen, dass eine Kollision im All aktiv herbeigeführt werden kann (Becker 2007; Mrasek 2007). Es entstanden 800 Fragmente ab einer Größe von 10 cm. Hinzu kamen fast 40.000 Trümmer zwischen 1 und 10 cm und rund 2 Mio. Teile von bis zu 1 mm. Im März 2019 wurde ein Satellit im Rahmen eines indischen Raketentests abgeschlossen. Das Flugobjekt befand sich zwar nur in relativ geringer Höhe von 300 km, doch laut Jim Bridenstine, Chef der NASA, wurde die ISS durch die erzeugten Trümmer stark gefährdet. So wurden rund 60 Trümmerteile mit einer Größe von mindestens 10 cm geortet, davon kamen 24 Trümmerteile in die Nähe der Raumstation und es drohten Ausweichmanöver (dpa 2019b; ntv.de/mau/AFP/dpa 2019).

Eine potenzielle Zunahme an Weltraumschrott ist ferner durch Satellitenprojekte zu erwarten, wie jene von OneWeb oder SpaceX (Kap. 6.1.1.), weil davon auszugehen ist, dass es innerhalb der geplanten Satellitenkonstellationen, die nicht auf maximale Leistungsfähigkeit ausgelegt sind, zu Ausfällen einzelner Satelliten kommen wird. Schließlich entsteht Weltraumschrott auch durch natürliche Vorgänge wie Sonneneruptionen und umherfliegende elektrisch geladene Teilchen, die Satelliten im Erdorbit beschädigen.

Die umherfliegenden Teile werden laufend mittels Überwachungssysteme lokalisiert. Weltweit werden derzeit drei Überwachungssysteme betrieben, die in der Verantwortung der USA, von Frankreich und Russland liegen. Das vom US-Militär schon 1957 gegründete und betriebene Space Surveillance Network (Weltraumüberwachungsnetzwerk) beobachtet Objekte im All, um Kollisionen vorherzusehen und Gefahren für die Raumstation und Satelliten zu berechnen. Dafür werden alle künstlichen Objekte in den verschiedenen Umlaufbahnen katalogisiert. Das Ursprungsland der Trümmer kann identifiziert und das Risiko einer Kollision vorhergesagt werden. Der US-amerikanische Katalog für Weltraumrückstände ist sehr genau und erfasst Objekte ab 10 cm Durchmesser (U.S. Space Command 2012). Das französische Ministère de la défense (Verteidigungsministerium) betreibt seit 2005 das Überwachungssystem Graves. Mit diesem Radarsystem können Objekte in einer Höhe zwischen 400 und 1.000 km Höhe geortet werden (The Agility Effect 2017). Zukünftig soll ein gemeinsames Überwachungssystem für Europa betrieben werden. Die ESA und ihre Mitgliedstaaten wollen ein eigenes

Überwachungssysteme lokalisieren ständig die umherfliegenden Teile und warnen vor möglichen Kollisionen.



unabhängiges europäisches „Space Surveillance and Tracking System“ entwickeln, um Objekte größer als 15 cm im geostationären Orbit (36.000 km über der Erde) zu erkennen (ESA o.J.h).

Die wichtigste Maßnahme gegen Weltraummüll ist, ihn gar nicht erst entstehen zu lassen. Hierfür existieren neben regulatorischen Bemühungen (Kap. 7.3.3) verschiedene technologische Vermeidungsstrategien. Beispiele dafür sind: Gefahrenquellen für unbeabsichtigte Explosionen beseitigen (etwa Treibstoffreste aus Tanks entleeren) oder Raumfahrzeuge nicht absichtlich zerstören (DLR Raumfahrtmanagement o.J.f). Eine andere Möglichkeit besteht darin, den einmal entstandenen Weltraumschrott wieder zu entfernen.

Lösungen zur Entfernung von Weltraummüll bieten zeitnah interessante Geschäftsoptionen.

Dafür wird an Lösungen zur Beseitigung von Trümmerteilen gearbeitet, um vergleichbar mit einer Weltraummüllabfuhr die umherfliegenden Objekte einzusammeln und zu beseitigen. Dies umfasst verschiedene technologische Systeme, etwa Robotersysteme, die große Trümmerteile entsorgen, indem sie diese in die Erdatmosphäre befördern, Netz- oder Harpunensysteme zum Einsammeln von Teilen oder „space tugs“, eine Art Weltraumschlepper, die zusätzlich zur Entsorgung noch weitere Aufgaben übernehmen können. (Airbus 2018; Aslanov/Yudintsev 2018; dpa/ESA/NASA 2017; Maier 2018). Schon heute wird im Monitoring und in der Entfernung von Weltraumschrott ein wachsender Markt gesehen (Interview Wörner). Research and Markets (2018) zufolge sollen, ausgehend von 598 Mio. US-Dollar für 2017, im Jahr 2022 bereits 2,9 Mrd. US-Dollar in diesem Sektor erzielt werden. Aktuelle Schlüsselakteure in dem Feld sind Airbus (Europa), Astroscael Holdings Inc. (Japan), Boeing/Lockheed Martin/Northrop Grumman (USA) und RSC Energia (Russland) (Research and Markets 2018).

6.3 Prospektiv

6.3.1 Produktion im Weltraum

Mittels einer Produktion im Weltraum lassen sich Produkte am Ort des Bedarfs herstellen.

Mittels Produktionsstätten im Weltraum sollen Produkte außerhalb der Erdatmosphäre hergestellt oder zusammengebaut werden. Die Weltraumproduktion umfasst verschiedene Stufen, ausgehend von der Produktion über die Montage bis hin zur Integration von Bauelementen. Dies schließt auch die Durchführung von Tests, die Bereitstellung, Wartung, Reparatur, Upgrades oder Recycling (Skormorohov et al. 2016) mit ein. Aktuell anvisierte Anwendungen beziehen sich auf eine (Vor-)Fertigung oder den 3-D-Druck von Bauteilen für Subsysteme, z.B. Solarpanele, Trägerelemente, Antennen, Temperaturkontrollsysteme, Spiegel, Strahlenschutz oder Antriebssysteme (Skormorohov et al. 2016).

Die Vorteile einer möglichen Weltraumproduktion bestehen im Wesentlichen darin, Produkte am Ort des Bedarfs im Weltraum herzustellen, die aufgrund ihrer



Größe nicht in den Weltraum transportiert werden können bzw. deren Transport aufgrund ihres Gewichts sehr kostspielig wäre. Beispielsweise könnten sehr große Teleskope oder Satelliten im Orbit zusammengesetzt werden. Ferner wird durch die Produktion im Weltraum eine hohe Flexibilität in der Verfügbarkeit von Bauteilen bzw. Produkten für die Raumfahrt ermöglicht, d. h., Werkzeuge, Ersatzteile oder Treibstoffe könnten im Weltraum produziert oder auch recycelt werden, wodurch sich die Anzahl von Transportflügen von der Erde aus reduziert und sich das Potenzial für Raumfahrten über lange Distanzen erhöht. Ein noch visionäres Ziel ist es, Weltraumstationen oder auch Fabriken zukünftig im All (autark) zu betreiben. Dazu könnten mittels Weltraumbergbau (Kap. 6.3.2) Ausgangsstoffe von Asteroiden oder von Planeten zu Bauteilen verarbeitet werden (Piskorz/Jones 2018). Im europäischen Rahmenprogramm gab es mit dem von 2015 bis 2017 geförderten Vorhaben „RegoLight“ bisher allerdings nur ein einziges Projekt, in dem sich konkret mit einer Weltraumproduktion, in diesem Fall 3-D-Druck auf der Grundlage von Mondgestein, befasst wurde. Ferner wird seit einigen Jahren eine angewandte Grundlagenforschung für die Extraktion flüchtiger Stoffe (z. B. Wasserstoff und Sauerstoff) aus Mondregolith gefördert, und die ESA prüft aktuell die Machbarkeit einer europäischen Mission zur Gewinnung von Wasserstoff oder Sauerstoff auf dem Mond (Bundesregierung 2019).

Dies erhöht die Chance auf Raumfahrt über lange Distanzen.

Eine weitere Facette der Weltraumproduktion betrifft die Produktion von Materialien und Gerätschaften für den Gebrauch auf der Erde, welche nur in nahezu völliger oder zumindest in leichter Schwerelosigkeit produzierbar sind.²⁸ So können Produkte unter atmosphärischen Bedingungen hergestellt werden, welche auf der Erde nur mit Mühe oder gar nicht zu erreichen sind, etwa im Zustand der Mikrogravität (Zustand der Fastschwerelosigkeit an Bord von Raumstationen) (Boyd et al. 2017).

Der Umstand, dass bereits 1977 eine alle 2 Jahre stattfindende „Space Manufacturing Conference“ ins Leben gerufen wurde, zeigt, dass das Thema Weltraumproduktion an sich nicht neu, sondern schon seit mehr als 40 Jahren ein Forschungsthema ist.²⁹ Die ersten Versuche einer Produktion bzw. Montage im Weltraum reichen mit Experimenten zum Schweißen bis 1969 zurück und wurden seitdem kontinuierlich weiter fortgeführt. Auch die ISS kann als ein Beispiel für eine Montage im Orbit dienen, denn die einzelnen Module der Raumstation wurden getrennt voneinander auf der Erde hergestellt und erst in der Erdumlaufbahn nach und nach zusammengesetzt (Piskorz/Jones 2018). Langfristig soll die Montage und später auch die Produktion im Weltraum weitgehend autonom per Robotik erfolgen oder allenfalls aus der Ferne gesteuert werden (Boyd et al. 2017; Piskorz/Jones 2018).

²⁸ z. B. die Veredelung von Kohlenstoffnanoröhrchen oder Siliziumhalbleiterrohlingen (Wafer)

²⁹ <https://space.nss.org/space-manufacturing-princeton-conference-abstracts/> (2.11.2020)



In Bezug auf Marktpotenziale lassen sich momentan keine Aussagen treffen. Die Produktion von Bauteilen per 3-D-Druck, die Montage von auf der Erde produzierten Bauteilen im Weltraum (Piskorz/Jones 2018) sowie eine Produktion von Materialien und Gerätschaften in der Schwerelosigkeit scheinen zurzeit am vielversprechendsten. Erste erfolgreiche Anwendungen gibt es durch das US-amerikanische Unternehmen Made in Space.³⁰ 2014 stellte das Unternehmen im 3-D-Druck das erste im Weltraum gefertigte Material her und noch im selben Jahr auf der ISS das erste Werkzeug. Ähnlich wie beim Weltraumbergbau sind für eine Produktion im Weltraum noch wesentliche technologische Entwicklungen und damit verbunden, hohe Investitionen zu leisten.

6.3.2 Weltraumbergbau

Rohstoffe im Weltraum könnten als Ausgang für Baumaterialien oder Treibstoffe dienen.

Mittels Weltraumbergbau sollen neue Quellen für die Rohstoffversorgung erschlossen werden. Damit – so die Vision – könnte einerseits der steigende Bedarf seltener Rohstoffe, insbesondere für elektronische Bauteile, langfristig gedeckt werden (Hahn 2016). Andererseits könnten die Rohstoffe aus dem Weltraum als Ausgangsmaterial für die Errichtung von Infrastruktur oder Treibstoff von Raumstationen oder Expeditionen zum Mars dienen. Dazu müssen die gewünschten Rohstoffe zunächst im All mittels Sonden identifiziert werden. Unbemannte Flugkörper mit Robotern sollen die Rohstoffe automatisiert abbauen und diese dann entweder direkt vor Ort im Weltraum weiterverarbeiten oder zu einer Raumstation bzw. zurück zur Erde transportieren (BDI 2018b; Lee 2012).

Derzeit gelten Asteroiden als potenziell vielversprechendste Quellen für Rohstoffe wie Edelmetalle, da auf ihrer Oberfläche relevante Rohstoffe in zum Teil sehr hoher Konzentration zu finden sind. Etwa 700.000 Asteroiden befinden sich im Asteroidengürtel zwischen den Umlaufbahnen von Mars und Jupiter. Diese sind somit weit von der Erde entfernt (durchschnittlich 450 Mio. km) und nur mit sehr hohem Energieaufwand zu erreichen. Doch es sind auch rund 17.000 Asteroiden in Erdnähe bekannt, die aufgrund ihrer Position mit deutlich geringerem Treibstoffbedarf erreicht werden könnten (BDI 2018b, S. 6; Hahn 2016). Der Mond soll ebenfalls reich an Rohstoffen wie Aluminium, Eisen, Magnesium und möglicherweise auch Wasser sein (McLeod/Krekeler 2017).

Kernziel des Weltraumbergbaus liegt demzufolge darin, zukünftige Langzeitraumfahrtmissionen mit extraterrestrischen Ressourcen zu versorgen (Rapp 2018). Die Forschung geht daher primär in Richtung des Zusammenbaus von Bauteilen vor Ort im Sinne von Produktionsprozessen mit geschlossenen Stoffkreisläufen. Beispielsweise könnten die im Weltraum gewonnenen Rohstoffe auf Raumstationen weiterverarbeitet werden, etwa für eine vor Ort benötigte Infrastruktur oder

³⁰ <https://madeinspace.us/about/> (2.11.2020)



Treibstoffe (Schneider 2018b). Beim Weltraumbergbau geht es demnach weniger um die Erschließung von Ressourcen für die Erde, sondern vielmehr darum, Rohstoffe im Weltraum zu nutzen und dort geschlossene Stoffkreisläufe für eine Zivilisation im Weltraum aufzubauen (Schneider 2018b, S. 195).

Mittels Weltraumbergbau ließen sich vor allem Rohstoffe für die weitere Verarbeitung zu Baumaterialien oder Treibstoffen gewinnen.

Erste kommerzielle Aktivitäten im Bereich Weltraumbergbau wurden bereits 2012 mit der US-amerikanischen Planetary Resources Inc. (vormals Arkyd Astronautics) ins Leben gerufen, die von Peter Diamandis, Eric Anderson sowie Chris Lewicki gegründet und von dem damaligen Google-CEO Eric Schmidt, Google-Gründer Larry Page, Regisseur James Cameron und Charles Simonyi unterstützt wurde (ZEIT ONLINE/dpa 2012). Das Unternehmen plante, 2020 die erste Sonde Richtung Asteroidengürtel zu senden. Für die Umsetzung warb das Unternehmen bereits über 50 Mio. US-Dollar von Investoren ein, u. a. von Richard Branson (Boyle 2019; Foust 2018a; Schneider 2018b, S. 192). Im Oktober 2018 wurde das Unternehmen von der US-amerikanischen ConsenSys Software Inc. aufgekauft und hat den Fokus auf die Entwicklung blockchainbasierter Kollaborationsplattformen für Raumfahrtanwendungen gerichtet. Nichtsdestotrotz zielt eine ganze Reihe weiterer privater Unternehmen auf den Weltraumbergbau (z.B. Asteroid Mining Corporation Ltd [Vereinigtes Königreich], Aten Engineering Inc. [USA], Bradford Space Group [Niederlanden], Deep Space Industries (USA), Moon Express Inc. [USA], SpaceFab.US, Inc. [USA], Trans Astronautice Corp. [USA]).³¹

Für die Realisierung eines Weltraumbergbaus sind jedoch noch einige Hürden zu überwinden. Neben der Umsetzung einer international gültigen gesetzlichen Regulierung (Kap. 7.3.1) liegt die wesentliche Herausforderung für eine Realisierung vor allem in der technischen Umsetzung. Für den Rohstoffabbau im Weltraum sind zahlreiche Technologien erforderlich. Dies umfasst beispielsweise Weltraumsonden zur Erkundung von Asteroiden, Weltraumrobotik, Analytik, Sensorik oder Transportsysteme (BDI 2018a). Insgesamt ist noch ungewiss, nach welchen technischen Verfahren ein Weltraumbergbau erfolgen kann und wie die dabei auftretenden Schwierigkeiten, auch der Umgang mit anfallendem Weltraumschrott, bewältigt werden können (Hahn 2016).

Für eine Umsetzung des Weltraumbergbaus sind neben gesetzlichen Fragen noch zahlreiche technische Hürden zu überwinden.

Die Chancen für eine sich wirtschaftlich lohnende Gewinnung von Rohstoffen aus dem Weltraum sind aus heutiger Perspektive sehr gering. Die profitable Nutzung von solchen Rohstoffen auf der Erde hängt sehr stark von der Entwicklung der Kosten für den Abbau im All und von der knappen Verfügbarkeit von Rohstoffen auf der Erde bzw. deren Preisen ab (BDI 2018b; Bertemes 2017; Hahn 2016). Laut Bundesregierung (2018b u. 2019) existieren aktuell weltweit noch

³¹ Die kommerziellen Akteure ergänzen die staatlichen Aktivitäten zur Erkundung verschiedener Asteroiden durch die NASA. 2016 startete z.B. die Raumsonde OSIRIS-REx zur Erkundung des Asteroiden (101955) Benu. Eine Erkundungsmission zum Asteroiden (16) Psyche ist für 2022 geplant.



keine konkreten Erschließungsprojekte für Rohstoffe, auch liegen keine Kenntnisse zur Rentabilität des Weltraumbergbaus vor. Die bisherigen Bemühungen dienten ausschließlich Forschungszwecken und waren öffentlich finanziert. Insgesamt fehle es noch an den technologischen Voraussetzungen, solche Vorhaben durchzuführen. Mittel- bis langfristig steht die Nutzung von Ressourcen auf dem Mond im Mittelpunkt. Aus diesen Ressourcen soll vor allem Treibstoff gewonnen werden, der dann für andere Missionen – beispielsweise Erkundungsmissionen zur Entdeckung extralunarer Rohstoffquellen – genutzt werden kann (Bundesregierung 2018b u. 2019).

6.3.3 Erschließung von Weltraumhabitaten

Eine reine Vision ist die Erschließung von Wohnraum bzw. neuen Habitaten außerhalb der Erde. Bewohnt und besiedelt werden könnten Raumstationen auf Himmelskörpern wie Mars oder Mond genauso wie im freien Weltraum. Je nach Entfernung zur Erde werden fünf Stufen einer möglichen Besiedelung des Weltraums, auch Weltraumkolonisierung genannt, unterschieden:

Die erste Stufe umfasst eine Exploration des erdnahen Raumsystems, bei der beispielsweise auf Raumstationen im Orbit wie der ISS, des geplanten Lunar Gateways oder Stationen auf dem Erdmond gelebt wird. Im nächsten Schritt (Stufe 2) wird auf die Kolonisierung des inneren Sonnensystems und eine Exploration der Planeten wie Mars, Merkur und Venus mit ihren Monden und der Asteroidengürtel gezielt. Trotz aller Widrigkeiten, in einer lebensfeindlichen Umwelt zu überleben, verfolgen Elon Musk von SpaceX und Jeff Bezos von Blue Origin die heute noch eher abwegig erscheinende Vision, Kolonien auf dem Mond oder dem Mars zu gründen. Die Überlegungen gehen dahin, beispielsweise auf dem Mars mit den dort vorhandenen Ressourcen ein künstliches, für Menschen bewohnbares Habitat zu schaffen.

Noch utopischer erscheint die Vorstellung, das äußere Sonnensystem (Stufe 3) oder gar den interstellaren bzw. intergalaktischen Raum zu kolonialisieren (Stufe 4 u. 5). Noch sind für die Realisierung der Weltraumexploration bzw. -kolonisierung zahlreiche technologische Fragestellungen mit Blick auf logistische Versorgung und benötigte Technologien bzw. Infrastrukturen im Orbit zu lösen. Im Kern geht es darum, wie die Missionen, ausgehend von der Erde oder von Zwischenstationen im Orbit mit einer entsprechenden Weltrauminfrastruktur, wie Raumhäfen oder Transportsysteme, versorgt werden können. Bis heute ist lediglich der Aufenthalt auf erdnahen Raumstationen technisch machbar.

Abgesehen von der technischen Machbarkeit ist auch die Wirtschaftlichkeit einer Kolonisierung noch nicht abzusehen. Allenfalls der Aufenthalt auf der ISS für kommerzielle Zwecke bietet ein absehbares Kommerzialisierungspotenzial.



Die NASA beabsichtigt, die ISS für unternehmerische Zwecke zu öffnen (AS/dpa/dpa 2018; Northon 2019; Schneider 2018b, S. 151).³² Bereits ab 2020 soll es Unternehmen zweimal jährlich möglich sein, ihre eigenen Astronauten bis zu 30 Tage auf die ISS zu senden. Dies soll im Rahmen des „Commercial Crew Program“ der NASA z.B. mit der Crew Dragon von SpaceX ermöglicht werden, dessen Ziel es war, Raumfahrzeuge zu entwickeln, die einerseits Astronautinnen und Astronauten zur ISS transportieren können und andererseits auch für die kommerzielle Nutzung zur Verfügung stehen (NASA 2020; Northon 2019). Auch sollen Unternehmen weitere Module an die Raumstation andocken dürfen (Kap. 6.2.1). Die Kosten pro Nacht lägen bei rund 35.000 US-Dollar zuzüglich Transport und Vorbereitungstraining der Astronauten, sodass sich die Gesamtkosten auf mehrere 10 Mio. US-Dollar pro Fahrt summieren. Da die zukünftigen privaten Astronauten ausgewählt und vorbereitet werden müssen, könnte dies auch für den ESA-Standort zur Astronautenausbildung in Köln eine neue Geschäftsmöglichkeit bieten.

Ab 2020 werden Unternehmen voraussichtlich ihre eigenen Astronauten zur ISS senden können.

Die Kolonisierung des Weltraums wird aufgrund der zahlreichen Unwägbarkeiten kontrovers diskutiert und bis heute vor allem von einzelnen Visionären wie Elon Musk oder Jeff Bezos ernsthaft erwogen. Die Befürworter argumentieren, dass es um das Überleben der Menschheit im Falle einer planetaren Katastrophe ginge. Zudem könnte die Menschheit durch eine Besiedelung des Weltraums und der dort verfügbaren Ressourcen weiter expandieren (Menn 2016; Worrall 2017). Die Kritiker stellen die Sinnhaftigkeit und Machbarkeit einer Weltraumkolonisierung per se in Frage. Es handele sich um ein Utopie, die primär Marketingzwecken diene, die aber die mit einer Kolonisierung verbundenen technischen Schwierigkeiten und Herausforderungen für den Menschen vernachlässige (Slobodian 2015). Inwieweit Menschen physisch und psychisch überhaupt außerhalb der Erde über längere Zeiträume überleben können, ist unklar und müsste erst noch erforscht werden.

Die Kolonisierung des Weltraums ist heute Utopie. Der Gedanke beflügelt aber seit jeher die Menschheit.

32 Ein Grund für den Ausstieg aus dem Engagement zur ISS sind die hohen Kosten für den Betrieb der Raumstation, die sich laut Angaben der NASA auf etwa 3 Mrd. US-Dollar (2,2 Mrd. Euro) pro Jahr belaufen. Insgesamt sind bereits über 100 Mrd. US-Dollar in die ISS investiert worden (AS/dpa/dpa 2018; Hegmann 2016b).





7 Trends, Treiber und Barrieren

Die Raumfahrtbranche und die Entwicklungen rund um New Space werden durch verschiedene Trends sowie fördernde, aber auch hemmende Faktoren bestimmt. Dabei lassen sich drei wesentliche Einflussphären unterscheiden: Wirtschaft, Technik sowie Politik/Recht. Im wirtschaftlichen Bereich spielen vor allem die Gründungen von New-Space-Start-ups, die Verfügbarkeit von Finanzierungsmitteln, das noch unausgeschöpfte kreative Potenzial von KMU sowie der Transfer in Nichtraumfahrtbranchen eine wichtige Rolle. Mit Blick auf die Technik bieten Innovationen im Bereich der Miniaturisierung, die Anwendung handelsüblicher Bauteile oder eine Serienfertigung die Möglichkeit zur Kostenreduktion und damit einer immer preiswerteren Raumfahrt.

Die Schaffung eines sicheren Rechtsrahmens, die Klärung von Fragen zur Haftung und Versicherung sowie verbindliche Regeln zur Vermeidung von Weltraumschrott stellen wichtige Voraussetzungen für die Raumfahrt dar. Mit Blick auf den Einfluss der Politik ist auch die Rolle der Raumfahrtagenturen entscheidend, denn insbesondere die NASA befördert durch das Eingehen von öffentlich-privaten Kooperationen mit Unternehmen die Kommerzialisierung neuer Produkte und Services.

7.1 Wirtschaft

New Space ist ein wesentlicher Treiber für die positive Entwicklung des Weltraummarktes. Die prosperierende Weltraumindustrie spiegelt sich insofern auch in einer kontinuierlich steigenden Gründungs- und Innovationsdynamik von New-Space-Start-ups wider. Der Markt wird zwar bislang von den USA dominiert, doch auch in Europa und in Deutschland sind zunehmend New-Space-Unternehmensgründungen zu verzeichnen. Allerdings ist der Zugang zu Finanzierung für europäische Start-ups erschwert.

Speziell im Bereich Erdbeobachtung scheint es vielversprechende Ansätze für eine kommerzielle Nutzung zu geben, doch nicht nur in diesem Bereich ist noch ein stärkerer Transfer von der Raumfahrtindustrie in Nichtraumfahrtbranchen zu leisten, damit sich Potenziale entfalten können. Zu beobachten ist ferner, dass KMU in der direkten Forschungsförderung noch unterrepräsentiert sind und sich direkte Fördermittel vor allem auf große Unternehmen und Forschungseinrichtungen fokussieren.

7.1.1 Steigende Gründungsdynamik und Investitionen

Die in den letzten Jahren deutlich gestiegene Zahl von Gründungen im New-Space-Sektor stellt einen prägenden Treiber und Trend der Raumfahrtindustrie

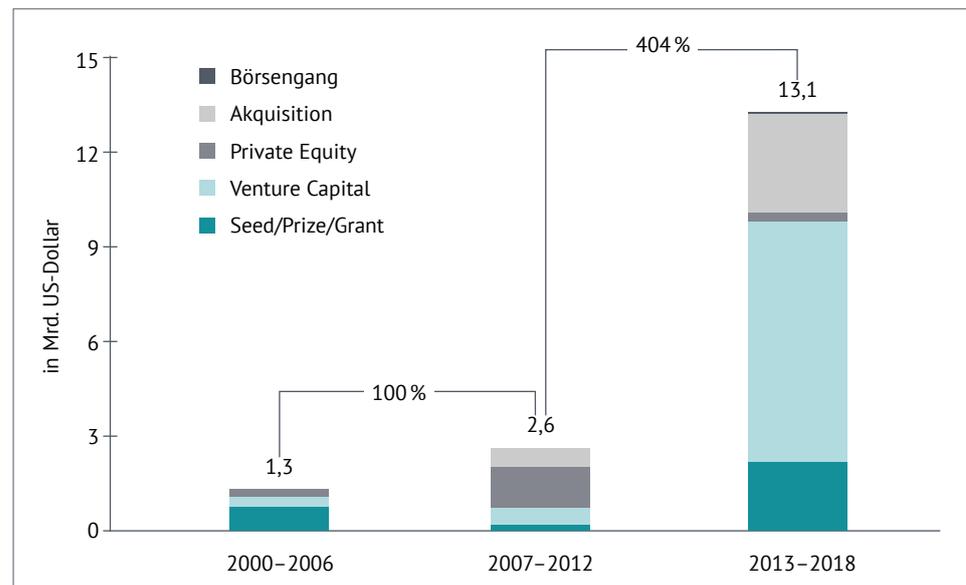


dar. Die steigenden Kapitalinvestitionen in New-Space-Start-ups sind ein deutlicher Indikator für zunehmende Gründungsaktivitäten:

Seit 2000 wurden ca. 21,8 Mrd. US-Dollar in Raumfahrt-Start-ups investiert, davon der Großteil in den letzten 6 Jahren.

Seit 2000 wurden kumuliert ca. 17 Mrd. US-Dollar in Raumfahrt-Start-ups (inklusive Darlehen, also Fremdkapital: 21,8 Mrd. US-Dollar) investiert (Bryce Space and Technology 2020a). Zwei Drittel der Investments wurden allein im Zeitraum der letzten 6 Jahre getätigt (Bryce Space and Technology 2020a):

Abb. 16 Investitionen in New-Space-Start-ups zwischen 2000 und 2018



Als Investitionen fließen ein: Gründerpreise und Zuwendungen, Risikokapital, privates Beteiligungskapital, Erlöse aus Akquisitionen und Börsengängen. Kreditfinanzierung (Fremdkapital) wurde nicht berücksichtigt.

Eigene Darstellung auf Grundlage der Daten von Bryce Space and Technology 2020a

Immer mehr Investments fließen in Geschäftsmodelle der Datenerfassung und -auswertung im Downstreamsektor.

Der Investmentfokus liegt eindeutig auf Start-ups mit Geschäftsmodellen für Produkte und Dienstleistungen in den Bereichen Raketenstarts, die zum Upstream zählen, sowie in Anwendungen zur Erfassung und Auswertung von Satellitendaten (Downstream). Zusammen fallen 93% der Finanzierungen in diese Bereiche. Während Raketen-Start-ups die höchsten Summen akquirieren, entfallen die meisten Investmentrunden auf Satelliten-Start-ups (Space Angels 2019). Es ist zu erwarten, dass die Bedeutung von Geschäftsmodellen rund um Datenerfassung und -auswertung zukünftig eine immer wichtigere Rolle für Investoren spielen wird. US-amerikanische Unternehmen wie OneWeb, Tarana Wireless, Inc., Swarm Technologies, Inc. oder Isotropic Systems, Inc. konnten beträchtliche Summen Wagniskapital akquirieren, da sie Geschäftsmodelle entlang der Wertschöpfungskette für aus dem Weltraum erhobene Daten betreiben – indem sie entweder kleine



erdbeobachtende Satelliten entwickeln und betreiben oder die durch sie gesammelten Daten auswerten. Kommerzielle Anbieter von Raketenstarts wie SpaceX ermöglichen über ihre Transportdienstleistungen überhaupt erst die daraus folgende Wertschöpfung (Space Angels 2019).

Während die Upstreamsektoren sehr stark von US-amerikanischen Unternehmen dominiert werden, wird im Downstreamsektor auch für europäische Start-ups großes Potenzial gesehen, in diesem Feld neue raumfahrtbasierte Anwendungen zu entwickeln (z. B. Satellitennavigation in der Landwirtschaft, Wettervorhersage, Satelliten-TV, Notfallschutz). Dies spiegelt sich in den Schwerpunkten der über 150 ESA-BIC-Gründungsunternehmen (Kap. 4.3) wider, die sich auf Softwarelösungen, Apps und digitale Anwendungen konzentrieren, insbesondere in den Bereichen Navigation, Kommunikation und Bildverarbeitung (Bundesregierung 2017). Damit sich das Potenzial jedoch entfalten kann, bedarf es an Investitionen in den Downstreamsektor, die in Europa insgesamt noch gering ausfallen. Vielmehr wird vorwiegend in sehr stark auf Technologieentwicklungen fokussierte Start-ups investiert, die ihre Wurzeln in der universitären Forschung haben. Diesbezüglich wird ab 2019 jedoch eine Trendwende bei den europäischen Investoren erwartet, deren Investmentfokus mehr in Richtung Anwendungen gehen könnte. Begründet wird dies mit den geringer werdenden Kosten für Satelliten und den dadurch immer mehr verfügbaren auszuwertenden Daten (Milne 2019).

Zukünftig ist davon auszugehen, dass der Wettbewerb zwischen den Unternehmen zunimmt und auch die Wahrscheinlichkeit für Unternehmenszusammenführungen und -übernahmen steigt, sodass sich der Markt entsprechend konsolidieren wird. Dies ist speziell im Feld der Satelliten-Start-ups mit seinen hohen Gründungszahlen und zahlreichen Investitionsrunden zu erwarten (Bryce Space and Technology 2017, S. 39 u. 2019, 2020a; Foust 2018c; Poponak et al. 2017, S. 61).

Die genaue Zahl aktiver New-Space-Start-ups lässt sich nur schwer bestimmen. So kommen verschiedene Berichte zu unterschiedlichen Einschätzungen. Dies erklärt sich u. a. dadurch, dass verschieden lange Zeiträume betrachtet werden. Auch erhalten nicht alle jungen Unternehmen eine Wagnisfinanzierung und sind daher in der Statistik nicht erfasst. Seit 2010 wurden laut Bryce Space and Technology (2020a) mehr als 220 Raumfahrtunternehmen gegründet und mit privaten Investitionen finanziert, die meisten davon (63%) operieren von den USA aus. Lag die jährliche Anzahl finanzierter Start-ups Anfang der 2000er Jahre bei durchschnittlich vier Unternehmen, waren es in den letzten 6 Jahren durchschnittlich knapp 21 neu gegründete Start-ups pro Jahr. Auch der britische Venture-Capital (VC)-Investor Seraphim Capital (2019) hat für 2018 rund 250 New-Space-Unternehmen identifiziert, die innerhalb der vergangenen 1,5 Jahre Wagniskapital erhalten haben. Space Angels (2019) zählt mit 435 deutlich mehr Start-ups, die 2019 weltweit privat finanziert sein sollen. In Europa konnten vom European

Potenziale für europäische Start-ups liegen besonders im Downstreamsektor.

Die Zahl weltweiter VC-finanzierter Start-ups rangiert – je nach Quelle – zwischen 220 und 435.



Space Policy Institute (ESPI 2019) im Zeitraum 2014 bis 2018 113 privat finanzierte Start-ups identifiziert werden. In Deutschland gibt es ebenfalls eine aktive junge Szene in der Raumfahrt. Der 2018 veröffentlichte Katalog der Deutschen Raumfahrtakteure des DRL Raumfahrtmanagement (o.J.b) führt rund 100 junge Unternehmen (nicht älter als 10 Jahre) auf, die Produkte und Dienstleistungen für die Raumfahrt anbieten.³³

Inwieweit sich die Gründungsdynamik auch auf Arbeitsplatzzahlen im Bereich New Space auswirkt, ist aufgrund der vielfältigen Verflechtungen in andere Branchen und der nicht trennscharfen Abgrenzung, was zu New Space zählt, schwer zu fassen. Herausforderungen zeichnen sich schon heute in der Personalgewinnung ab. Als Hightech-Branche ist die Raumfahrt in Deutschland vor allem von Ingenieur- und Technikberufen dominiert. Diese Berufsgruppen sind vom Nachwuchsmangel betroffen, sodass es auch für die hochtechnologisierten Raumfahrtunternehmen vor dem Hintergrund des zu erwartenden Wachstums zunehmend schwerer fallen dürfte, Personal zu gewinnen (OHB SE 2019). Einen alternativen Zugang stellt die Rekrutierung ausländischer Fachkräfte dar, die jedoch die Unternehmen vor administrative Herausforderungen stellt (Interview PTScientists).

7.1.2 Schwerer Zugang zu Finanzierung

Die Angebote für eine Gründungsunterstützung in der Frühphase sind vielfältig.

Grundsätzlich gibt es in Deutschland sehr viele Angebote einer Unterstützung für die frühe Gründungsphase von Unternehmen (Kap. 4.2). New-Space-Gründerinnen und -Gründer stehen vor allem technologieoffene Angebote auf Bundes- und Länderebene offen. Auch die raumfahrtspezifischen Förderinstrumente nehmen verstärkt New-Space-Akteure in den Blick (Kap. 4.2.2).

Problematisch ist der Zugang von Wagniskapital in der Wachstumsphase. Hier mangelt es an Investoren.

Nichtsdestotrotz wurde in den im Rahmen dieser Studie geführten Interviews mehrfach auf das „Valley of Death“ hingewiesen, in das viele New-Space-Gründerinnen und -Gründer geraten (Interviews Straube, PTScientists). Hiermit ist gemeint, dass vor allem in der Wachstumsphase der Raumfahrtunternehmen der fehlende Zugang zu Risikokapital dazu führt, dass unternehmerische Aktivitäten abgebrochen werden müssen (SpaceTec Partners/BHO Legal 2016). Dies ist jedoch keine Besonderheit von New-Space-Start-ups, wenngleich Kapitalgeber bei Investitionen in Raumfahrthardware aufgrund der langen Entwicklungszeiten und hohen Risiken sowie fehlender Expertise anscheinend besonders zurückhaltend sind. Mehr Mut zeigen sie bei Investitionen in Entwicklungen von Anwendungen im Downstreamsektor, da diese weniger risikoreich sind (EIB 2019). Im Vergleich zu den USA ist die Investorenszene in Deutschland und Europa deutlich weniger entwickelt – auch im Bereich Raumfahrt.

³³ Definition: nicht älter als 10 Jahre. Es ist nicht bekannt, ob und wie viele davon mit Wagniskapital finanziert worden sind.

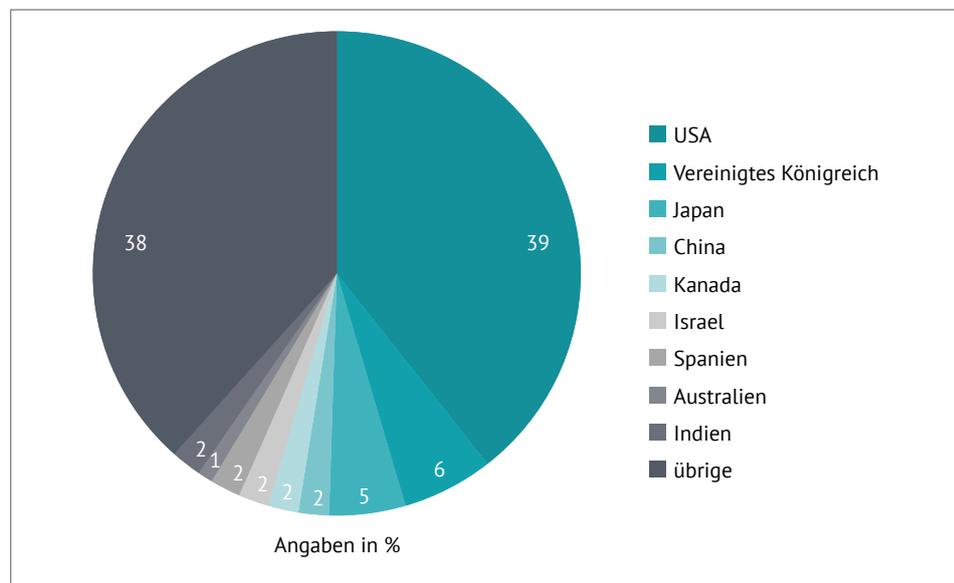


Für eine zukünftig größere Verfügbarkeit von Wagniskapital spricht jedoch, dass die Investorenszene ein Wachstum zu verzeichnen hat. Weltweit wurden im Bericht von Bryce Space and Technology (2018) mehr als 700 Investoren gezählt, die sich mehr oder weniger auf Raumfahrt spezialisiert haben.³⁴ Im Vergleich zum Vorjahr (555) ist das ein Anstieg von 26%. VC-Unternehmen zusammen mit Business Angels machen mit ca. 70% den größten Anteil der Investoren für New-Space-Unternehmen aus. Der eindeutige Fokus der New-Space-Investoren liegt allerdings in den USA, wo 39% der Kapitalgeber (global 382) angesiedelt sind. Auch fließen rund zwei Drittel der Investmentsumme in US-amerikanische Unternehmen. Dennoch ist eine leichte Verschiebung zugunsten anderer Herkunftsländer zu verzeichnen, denn 2017 waren statt 70% wie im Vorjahr nur noch 60% aller New-Space-Investoren in den USA zu verorten (Bryce Space and Technology 2018 u. 2019). Die übrigen 315 Investoren verteilen sich auf 37 Länder, mit Großbritannien an der Spitze (60), gefolgt von Japan (50), China (39), Kanada (22), Israel (19), Spanien (17), Australien (12) und Indien (10) (Abb. 17). Im Vergleich ist die europäische VC-Szene im Bereich Raumfahrt also eher klein (Bryce Space and Technology 2019). Deutschland wird in der zitierten Studie nicht aufgeführt.

Die VC-Investments werden von den USA dominiert. Europa ist im Vergleich eher gering entwickelt.

Zu einer davon abweichenden Einschätzung kommt die EU (2018). Sie führt ca. 50 Investoren in Europa auf, darunter immerhin 16 Kapital- und Fördermittelgeber aus Deutschland, die bereits in New-Space-Start-ups investiert haben. Auf-

Abb. 17 Verteilung der VC-Investoren weltweit (382 gesamt)



Quelle: Bryce Space and Technology 2019

34 Hierbei handelt es sich um Investoren, die seit 2000 mindestens eine Investition getätigt haben.



grund der unterschiedlichen Datenlage ist eine eindeutige Quantifizierung der Investorenszene nicht möglich.

7.1.3 KMU noch nicht im Fokus der direkten Förderung

KMU profitieren in der Förderung eher indirekt als Unterauftragnehmer oder Zulieferer.

KMU profitieren von den Fördermitteln eher indirekt. Im „Nationalen Programm für Weltraum und Innovation“ ist der Anteil an direkten Fördermitteln für KMU mit 10% sehr gering, auch wenn der Anteil von KMU unter den industriellen Empfängern bei immerhin 75% lag. Dies begründet sich dadurch, dass größere Entwicklungsaufträge in der Raumfahrt zumeist von wenigen größeren Unternehmen durchgeführt und KMU in den Fördervorhaben als Zulieferer und Unterauftragnehmer beteiligt werden, somit also nicht direkt gefördert werden (Bundesregierung 2018a). KMU stellen also kaum eigene Förderanträge und sind damit, obschon vermutlich in die Gestaltung der Förderanträge involviert, verstärkt von den großen Akteuren und deren Ideen und Zielen abhängig. Es ist anzunehmen, dass die Innovationskraft von KMU dadurch unausgeschöpft bleibt.

Dass die Förderung eher an größere Institutionen fließt, zeigt auch eine Auswertung der Fördermittelflüsse in der nationalen Weltraumforschung und Weltraumtechnik (Tab. 2). Der Großteil der Förderung für die Raumfahrt in Deutschland geht an etablierte Akteure aus der Wissenschaft (insbesondere DLR, Max-Planck-Institute, Universitäten) sowie einzelne, größere Unternehmen (hier allen voran Airbus Defence and Space GmbH, Tesat-Spacecom GmbH & Co. KG, ArianeGroup GmbH).

Zwischen 2011 und 2018 waren ca. 465 deutsche Unternehmen an geförderten Raumfahrtvorhaben beteiligt. Das Engagement fand innerhalb der 1.539 geförderten Vorhaben des „Nationalen Programms für Weltraum und Innovation“ und im Rahmen der deutschen ESA-Beteiligung statt. Dabei hat der Anteil von neu beteiligten Unternehmen zugenommen, seit 2006 haben im Programm ca. 80 Unternehmen erstmalig eine Förderung erhalten (Bundesregierung 2017). Zwar ist der Anteil der Förderneulinge mit 17,2% ähnlich hoch wie bei anderen Technologieförderprogrammen des BMWi,³⁵ vermutlich gäbe es aber noch Potenzial für das Engagement weiterer Unternehmen, die bislang noch nicht in Raumfahrtprojekten involviert waren.

7.1.4 Transfer in Nichtraumfahrtbranchen

Viele Branchen, in denen raumfahrtbezogene Anwendungen zusätzliche Wertschöpfung erzeugen können, hatten bislang wenige bis keine Berührungspunkte

³⁵ Es wurden Vergleichsdaten aus verschiedenen Evaluationen von sechs Technologieförderprogrammen herangezogen, darunter z.B. ELEKTRO POWER I und II, ATEM, LuFo.



Tab. 2 Top-20-Fördermittelempfänger Bundesfördermittel im Förderschwerpunkt IB – Nationale Weltraumforschung und Weltraumtechnik (2014–2019)

Institution (ausführende Stelle)	Fördersumme in Euro
Airbus Defence and Space GmbH	173.817.724
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Planetenforschung	46.594.963
Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung	30.356.807
Tesat-Spacecom GmbH & Co. KG	17.630.631
Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) – Teilinstitut Hannover	17.071.579
ArianeGroup GmbH	11.278.110
Leibniz Universität Hannover – Fakultät für Mathematik und Physik – Institut für Quantenoptik	9.141.639
Max-Planck-Gesellschaft, vertreten durch das Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik	8.745.268
Universität Bremen – Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation	8.489.112
Universität Stuttgart – Fakultät 6 Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie – Institut für Raumfahrtssysteme	6.663.471
Max-Planck-Gesellschaft, vertreten durch das Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung	6.461.447
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum	6.284.159
Laser Zentrum Hannover e.V.	6.187.503
Humboldt-Universität zu Berlin – Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät – Institut für Physik	5.489.374
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel – Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät - Sektion Physik – Institut für Experimentelle und Angewandte Physik	5.464.507
Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH – Robotics Innovation Center	5.345.328
Technische Universität Berlin – Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme – Institut für Luft- und Raumfahrt – Fachgebiet Raumfahrttechnik	5.118.542
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Forschungsgruppe Komplexe Plasmen	4.874.304
Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg – Zentrum für Astronomie – Astronomisches Rechen-Institut Heidelberg	4.750.847
Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik	4.694.728

Eigene Auswertung basierend auf Daten im Förderkatalog (<https://foerderportal.bund.de/foekat/jsp/SucheAction.do?actionMode=searchmask>), gefiltert nach Fördernehmern (ausführende Stelle) seit 2014 im Förderschwerpunkt IB – Nationale Weltraumforschung und Weltraumtechnik



mit der Raumfahrt. Ein Transfer von Technologien und Daten verspricht die Realisierung zusätzlicher wirtschaftlicher Potenziale.

Dass ein Technologietransfer in der Vergangenheit schon gut gelungen ist, zeigen drei Beispiele, die sich aus der 1990 gestarteten Röntgen-Satelliten-Mission „ROSAT“ ableiten: der Schliff von Gläsern für individuell angepasste Gleitsichtbrillen³⁶, der sich aus der Poliertechnik von Weltraumspiegeln herleitet, die Entwicklung des Materials Zerodur, das in Cerankochfeldern verwendet wird, sowie Software, die ursprünglich zum Scannen des Himmels verwendet wurde und heute im Handgerät für die Früherkennung von Hautkrebs eingesetzt wird (BDI 2019). Die NASA berichtet von über 2.000 Produkten und Services, die von Raumfahrttechnologien profitiert haben.³⁷

Die Entwicklung datenbasierter Geschäftsmodelle steht hingegen noch am Anfang: Wie sich bei der Beschreibung des Downstreamsektors Erdbeobachtung (Kap. 6.1.3) gezeigt hat, ist der Marktanteil für Erdbeobachtungsdaten trotz der zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten mit knapp 2% noch sehr gering. Bis heute ist die öffentliche Hand der mit Abstand wichtigste Kunde für Erdbeobachtungsdaten. Die vorhandenen Anwendungspotenziale von Erdbeobachtungsdaten müssen für viele nichtöffentliche bzw. privatwirtschaftliche Kunden erst noch erschlossen werden.

Mit attraktiven Angeboten muss noch ein Transfer in Nichtraumfahrtbranchen erfolgen, um den Downstreamsektor zu stimulieren.

Sowohl der Technologietransfer als auch die Entwicklung datenbasierter Geschäftsmodelle kann nicht einseitig nur von Raumfahrtunternehmen vorangetrieben werden. Zwar können sie das Bewusstsein für die Potenziale von Raumfahrttechnologien und -daten steigern, aber Unternehmen in Nichtraumfahrtbranchen müssen diese Potenziale auch zu nutzen wissen. Gelingt dies, können sie im Sinne einer positiven Rückkopplung wiederum in Innovationen bei Raumfahrttechnologien führen und in verbesserte Produkte und Services im Downstreamsektor münden (Strada/Sasanelli 2018).

7.2 Technik

Durch zahlreiche Innovationen können die Kosten für den Transport in den Weltraum stetig gesenkt werden.

Vor ca. 15 bis 20 Jahren war der Markt für Trägersysteme ein rein von öffentlichen Institutionen – also von Staaten und großen Raumfahrtagenturen – organisierter Markt. Mit der Entwicklung von Schwerlastträgern, die zur Beförderung von Telekommunikationssatelliten eingesetzt wurden, begann eine Kommerzialisierungstendenz, die bis heute anhält und auf den gesamten Bereich der Trägersysteme und Nutzlasten übergegriffen hat.

36 <https://www.dlr-innospace.de/innospaceexpo/G&E/Home/content/grossmutter.html> (2.11.2020)

37 <https://spinoff.nasa.gov/about.html> (2.11.2020)



In den vergangenen Jahren konnten durch zahlreiche technische Innovationen bei Trägersystemen und Nutzlasten Kostensenkungen und damit Wettbewerbsvorteile erzielt werden. Diese wurden sowohl von etablierten als auch von neuen Akteuren realisiert. Kostensenkungspotenziale ergeben sich primär durch wiederverwendbare Raketen, Serienfertigung, Verwendung handelsüblicher Bauteile und Miniaturisierung.

7.2.1 Wiederverwendbare Systemkomponenten sparen Ressourcen

In den letzten Jahren hat vor allem die Entwicklung wiederverwendbarer Systemkomponenten bis hin zu ganzen Raketenstufen an Bedeutung gewonnen (Lassmann/Obersteiner 2011, S. 147 ff.; Stirn 2016). Ziel dabei ist, die technischen Komponenten von Trägersystemen so zu gestalten, dass sie mehrfach verwendet werden können. Dies setzt voraus, dass die Komponenten eine hohe Zuverlässigkeit aufweisen, einen geringen Wartungs- bzw. Instandhaltungsbedarf haben und darüber hinaus auch leicht genug sind, um die Energieeffizienzpotenziale für Start und Landung zu realisieren (Kopp et al. 2017). Wiederverwendbare Trägersysteme müssen zusätzlich zum Start auch eine Landung bewältigen können, d. h., dafür müssen entsprechende Baugruppen (Bremsraketen, Landebeine, Fallschirme, Kontrollsysteme, Hitzeschilde etc.) und weiterer Treibstoff integriert werden. Trägersysteme können entweder vollständig, teilweise oder nur komponentenweise wiederverwendbar sein. Letztgenannter Fall betrifft beispielsweise Raketentriebwerke, die im Testbetrieb mehrfach wiederverwendet werden können. Weitere teilweise wiederverwendbare Systeme können einzelne Stufen der Rakete oder das Raumfahrzeug sein.

Bekanntestes Beispiel für ein teilweise wiederverwendbares System ist der US-amerikanische Space Shuttle, mit dem zwischen 1981 und 2011 insgesamt 135 Missionen durchgeführt worden sind. Das Space-Shuttle-Programm stand jedoch angesichts der vergleichsweise hohen Kosten und langen Instandsetzungszeiten dauerhaft in der Kritik.

SpaceX hat mit der Falcon-9-Rakete erfolgreich die Wiederverwertbarkeit von Raketen nachgewiesen.

Trotz der mit dem Space-Shuttle-Programm gemachten ambivalenten Erfahrungen werden aktuell erneut Ansätze vollständig wiederverwendbarer Trägersysteme erprobt. Besonders erfolgreich war in den letzten Jahren SpaceX mit der Entwicklung der Falcon-9-Rakete. Erstmals gelang SpaceX 2017 der Zweitflug einer zuvor gelandeten Raketenstufe (dpa 2017). Zwischen Herbst 2018 und Frühjahr 2019 konnten mehr als 15 Flüge mit bereits zuvor eingesetzten Raketenstufen durchgeführt werden (SpaceX 2019, S. 2). Die Falcon-9-Rakete weist eine wiederverwendbare erste Stufe auf, die nach erfolgreicher Abtrennung der zweiten Stufe unter Einsatz des verbleibenden Treibstoffs Bremsmanöver ausführt und mittels Steuerflossen kontrolliert auf einen Landepunkt zusteuert. Infrage kommen dazu

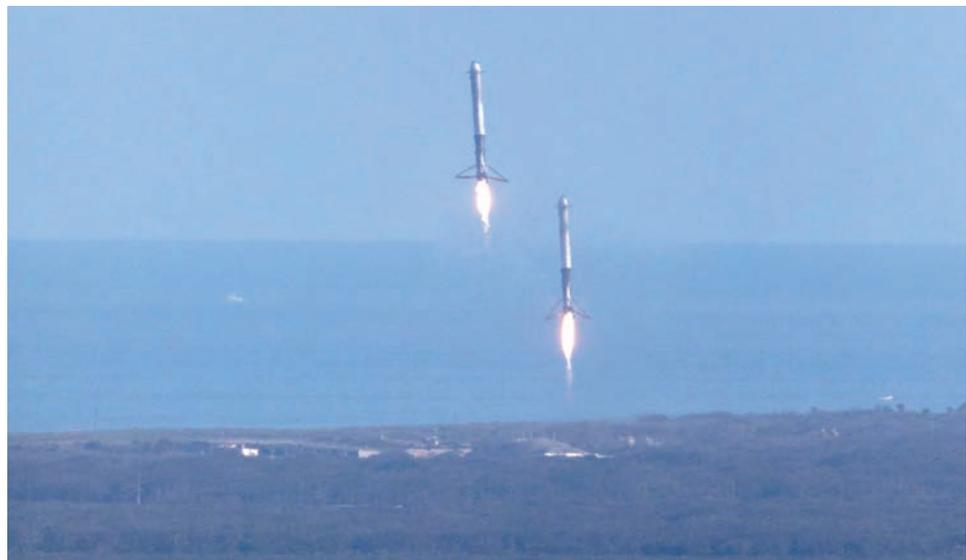


entweder stationäre Landezonen oder mobile Systeme wie automatisierte Schiffe zur Landung auf See.

Neben der Wiederverwendbarkeit der ersten Stufe arbeitet SpaceX auch daran, weitere Komponenten des Trägersystems wiederverwendbar zu gestalten. Zuletzt wurden Versuche unternommen, die Nutzlastverkleidungen mit Steuertriebwerken und Fallschirmen beim Wiedereintritt in die Erdatmosphäre zu bremsen und in Netzen aufzufangen. Die Idee, die zweite Stufe der Rakete ebenfalls wieder landen zu lassen, wurde aufgrund ihrer hohen Geschwindigkeit jedoch verworfen. Für das Abbremsmanöver wäre eine unverhältnismäßig hohe Menge zusätzlicher Treibstoff notwendig. Ein weiterer Vorteil des Einsatzes wiederverwendbarer Raketenstufen ist, dass jeder Flug Daten zu möglichen Effizienzsteigerungspotenzialen liefert und die Komponenten sukzessive verbessert werden können.

Das Konzept der Wiederverwendbarkeit wird aktuell auch von Indien getestet (Ponnappan 2018). Anders als die Falcon-9-Rakete verfügt das teilweise wiederverwendbare Trägersystem Reusable Launch Vehicle Technology Demonstrator (RLVTD) über einen geflügelten Nutzlasttransporter – vergleichbar mit dem Space Shuttle. Nach ersten Tests 2016 sind für 2019 weitere Erprobungen geplant (ISRO 2016).

Abb. 18 SpaceX Falcon Heavy Demo Flug – Landung



Quelle: NASA (https://images.nasa.gov/details-KSC-20180206-PH_KLS02_0253.html; 2.11.2020)



Diskussionen um die Entwicklung wiederverwendbarer Trägersysteme finden zwar auch in Europa statt, doch mit der Entwicklung der Ariane 6 wurde bewusst die Entscheidung gegen ein wiederverwendbares Trägersystem getroffen. Demzufolge gibt es in Europa bzw. Deutschland nur wenige private Unternehmen, die an der Wiederverwendbarkeit von Trägersystemen arbeiten, wenngleich wiederverwendbare Systeme auch in der zukünftigen europäischen Raumfahrt eine Rolle spielen sollen (ESA 2019b).

Mit der Entwicklung der Ariane 6 hat sich Europa gegen wiederverwendbare Trägersysteme entschieden.

Insgesamt ist die Entwicklung wiederverwendbarer Systeme jedoch nicht unumstritten (Childress-Thompson et al. 2016, S.2). Ein bestimmender Faktor ist die Frage nach der Amortisation der Entwicklungs- und Instandhaltungskosten, denn wiederverwendbare Raketen sind in der Regel nur dann gegenüber einmal verwendeten Raketen im Vorteil (in Bezug auf Startkosten), wenn eine ausreichend hohe Startzahl erreicht wird (Henry 2018).

7.2.2 Serienfertigung steigert die Kosteneffizienz

Eine Serienfertigung gilt gemeinhin als kosteneffizienter als die Fertigung von Einzelstücken. Allerdings ist sie nur dann ökonomisch sinnvoll, wenn auch hinreichend große Stückzahlen produziert werden. Während die Serienfertigung beim Bau von Trägerraketen nur schwer zu erreichen ist, kann sie bei der Fertigung großer Mengen an Kleinsatelliten für Satellitenkonstellationen hingegen leichter realisiert werden. Bislang finden sich allerdings nur wenige Beispiele für Akteure, die Satelliten oder Raketentriebstufen in Serienfertigung herstellen. Neben den US-amerikanischen Firmen OneWeb, SpaceX oder auch der deutschen Berlin Space Technologie GmbH ist hier vor allem der deutsche Satellitenproduzent OHB System zu nennen (Ziegler 2014). Diese Unternehmen nutzen die Serienfertigung, um baugleiche Kleinsatelliten herzustellen. SpaceX wendet die Serienfertigung auch auf die Produktion von Komponenten seiner Raketen an. So werden alle Hauptstufen der Falcon-9-Rakete von zehn baugleichen Merlin-Triebwerken angetrieben. In den vergangenen Jahren hat die Firma mehr als ein Triebwerk pro Woche gebaut, was vor dem Hintergrund der Komplexität einer Raketenproduktion als Serienfertigung bezeichnet werden kann (Calandrelli 2016; Clark 2016; Wunderlich-Pfeiffer 2016).

Potenziale für die Serienfertigung liegen vor allem im Bau von Kleinsatelliten.

7.2.3 Verwendung von Standardkomponenten spart Zeit und Geld

Üblicherweise werden ausschließlich spezielle, für den Weltraum qualifizierte Bauteile oder Eigenentwicklungen eingesetzt. Jedes einzelne Bauteil durchläuft komplexe Design- und Qualifizierungsprozesse, bis es schließlich in ein Gesamtsystem integriert wird. Demgegenüber können Standardkomponenten, die nicht originär für die Raumfahrt konzipiert wurden, eine preiswerte Alternative bieten. Derartige Handelsprodukte aus dem Regal („commercial off-the-shelf“ oder

Der Einsatz handelsüblicher Bauteile, bei denen auf die sonst üblichen Qualifizierungsprozesse verzichtet wurde, verspricht Kosteneinsparungen.



„components off-the-shelf“ – COTS³⁸) (Schneider 2018b, S.219) umfassen in der Regel elektrische, elektronische und elektromechanische Bauteile (EEE-Bauteile). Durch den Einsatz solcher Bauteile versprechen sich die Hersteller von weltraumtauglicher Hardware erhebliche Kosteneinsparungen. Jedoch sind Einschränkungen bei der Verlässlichkeit dieser Standardbauteile zu erwarten. In der Praxis bedeutet dies, dass auch COTS zunächst auf ihre Weltraumtauglichkeit geprüft werden müssen, sodass nur in Einzelfällen Zeitersparnisse bei der Durchführung von Prüfprozessen erreicht werden dürften. Letztlich ist die Entscheidung für COTS und die damit erzielten Zeit- und Kostenersparnisse abhängig von den spezifischen Zielen und Bedingungen der jeweiligen Weltraummission.

Mit der Öffnung der Raumfahrtagenturen gegenüber neuen kommerziellen Anbietern von Weltraumhardware – insbesondere durch die NASA mit ihrem seit 2010 implementierten „Commercial Crew Program“ (CCP) (NASA o.J.a) – hat der Einsatz von COTS an Dynamik gewonnen. Im Rahmen derartiger Programme wird es Unternehmen ermöglicht, innovative Lösungen auch unter Verwendung von COTS zu entwickeln (EK 2018).

7.2.4 Miniaturisierung senkt die Startkosten

Eine Miniaturisierung wurde bereits erfolgreich in Form von Kleinsatelliten realisiert.

Ein weiterer Weg zur Reduzierung von Kosten ist eine zunehmende Miniaturisierung von Nutzlasten. Diese bietet sich insbesondere im Bereich von Satelliten an. Weil durch die Miniaturisierung entweder mehrere Nutzlasten mit einem Trägersystem transportiert oder kleinere Trägersysteme eingesetzt werden können, sinken die Startkosten. Bei dem Transport mehrerer Nutzlasten in einem großen Trägersystem verteilen sich die anteiligen Startkosten auf mehrere Akteure und die individuellen Kosten sinken. Wenn kleine Trägersysteme verwendet werden, sind die Startkosten aufgrund des geringeren Gesamtgewichts ebenfalls geringer. Die Miniaturisierung wird bisweilen erst durch die Verwendung handelsüblicher Bauteile möglich (Schneider 2018b, S.220). Seit Ende der 1990er Jahre sind sogenannte CubeSats, mit standardisierten Bauteilen hergestellte Kleinsatelliten, technisch machbar und bereits in vielfältiger Form eingesetzt worden (National Academies 2016). (Kap. 6.1.1).

7.3 Politik und Recht

Die zunehmende Kommerzialisierung der Raumfahrt führt aktuell zu Rechtsunsicherheiten. Rechtliche Anpassungsbedarfe gibt es insbesondere in Bezug auf den Zugang und die Nutzung von Ressourcen im All sowie mit Blick auf Haftungsfragen. Im Standortwettbewerb um die Ansiedlung von New-Space-Unternehmen

³⁸ Nicht zu verwechseln mit „Commercial Orbital Transportation Services“ (COTS), ein Programm der NASA, in dem kommerzielle Lösungen für den Frachttransport in den Erdorbit entwickelt werden sollten.



spielen hohe staatliche Haftungsgrenzen eine immer wichtigere Rolle. Ein weiterer relevanter Regulationsbereich besteht in der Vermeidung und Entfernung von Weltraumschrott, der aufgrund der zunehmenden Zahl an Satelliten im Weltraum weiter anwachsen wird und wegen seiner hohen zerstörerischen Wirkung eine steigende Gefährdung bestehender und künftiger Weltraumaktivitäten darstellt.

7.3.1 Schaffung eines sichereren Weltraumrechtsrahmens steht aus

Der rechtliche Rahmen für die Raumfahrt ist komplex und insbesondere hinsichtlich innovativer Nutzungs- und Verwertungskonzepte nicht eindeutig. Zudem bestehen Unterschiede zwischen Bestimmungen auf verschiedenen Governanceebenen (internationales und nationales Recht). Die historische Entwicklung der Weltraumgesetze der letzten 6 Jahrzehnte ist von politischen und militärischen Bestrebungen einerseits und technologischen Fortschritten andererseits geprägt. In den 1960er/1970er Jahren wurde der Rechtsrahmen international festgelegt. Durch den Wandel von der rein staatlichen hin zu einer privaten und kommerziellen Raumfahrt wird nun eine Anpassung des Rechtsrahmens angemahnt (Interview Hobe). Dies scheint eine wesentliche Voraussetzung, um Investitions- und Rechtssicherheit für nichtstaatliche Raumfahrtaktivitäten zu schaffen.

Die zunehmende Kommerzialisierung der Raumfahrt führt zu Rechtsunsicherheiten.

Der Weltraumvertrag³⁹ (Outer Space Treaty) von 1967 beinhaltet alle wesentlichen Grundsätze des Weltraumrechts und wird durch das Weltraumrettungsübereinkommen⁴⁰ von 1968, das Weltraumhaftungsübereinkommen⁴¹ von 1972, das Weltraumregistrierungsübereinkommen⁴² von 1976 und den Mondvertrag⁴³ (Moon Treaty) von 1979 ergänzt. Zusätzlich zu den völkerrechtlich bindenden Gesetzen wurden vom Ausschuss für die friedliche Nutzung des Weltraums der Vereinten Nationen (Committee on the Peaceful Uses of Outer Space – COPUOS) weitere Resolutionen zu Einzelthemen entwickelt. Sie behandeln z.B. die Fernerkundungsprinzipien, die Nutzung nuklearer Energiequellen, die Registrierungspraxis und Empfehlungen zur nationalen Weltraumgesetzgebung. Diese Resolutionen sind jedoch nicht völkerrechtlich bindend (DGLR) 2017).

39 Vertrag über die Grundsätze zur Regelung der Tätigkeiten von Staaten bei der Erforschung und Nutzung des Weltraums einschließlich des Mondes und anderer Himmelskörper (Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, including the Moon and Other Celestial Bodies)

40 Übereinkommen über die Rettung und die Rückführung von Raumfahrern sowie die Rückgabe von in den Weltraum gestarteten Gegenständen (Agreement on the Rescue of Astronauts, the Return of Astronauts and the Return of Objects Launched into Outer Space)

41 Übereinkommen über die völkerrechtliche Haftung für Schäden durch Weltraumgegenstände (Weltraumhaftungsübereinkommen – WHÜ/Convention on International Liability for Damage Caused by Space Objects)

42 Übereinkommen über die Registrierung von in den Weltraum gestarteten Objekten (Convention on Registration of Objects Launched into Outer Space)

43 Übereinkunft über die Aktivitäten von Staaten auf dem Mond und anderen Himmelskörpern (Agreement Governing the Activities of States on the Moon and Other Celestial Bodies)



Der Weltraumvertrag von 1967 ist noch heute gültig und regelt die Tätigkeiten von Staaten.

Der Weltraumvertrag ist die erste und grundlegende völkerrechtliche Vereinbarung des Weltraumrechts zur Regelung von Tätigkeiten im Weltraum. Der Vertrag wurde von 107 Nationen, darunter Deutschland, ratifiziert (AA 2019; bpb 2013; UNODA 1967). Wesentliche Regelungen des Weltraumvertrags sind zur Völkergewohnheit erstarkt, sodass diese auch Nichtvertragsstaaten binden (WD 2018b). Neben der Begrenzung einer militärischen Nutzung des Weltraums, die insbesondere im historischen Zusammenhang des Kalten Krieges von geopolitischer Relevanz war, geht der Weltraumvertrag von dem „gemeinsamen Interesse der gesamten Menschheit an der fortschreitenden Erforschung und Nutzung des Weltraums zu friedlichen Zwecken“ aus (Präambel). Der Weltraum, der Mond und andere Himmelskörper werden in Artikel II außerdem zum Gemeingut der Menschheit erklärt, was die internationale Forschungszusammenarbeit befördern soll, gleichzeitig aber die vollständige oder teilweise Inbesitznahme von Himmelskörpern durch einzelne Staaten ausschließt (bpb 2013). Der Weltraumvertrag ist als ein sogenannter Rahmenvertrag mit allgemeinen Formulierungen, gleichwohl stark auslegungs- und konkretisierungsbedürftig und richtet sich ausschließlich an Staaten. Die möglichen Eigentumsrechte von Privatpersonen oder die kommerzielle Nutzung durch Unternehmen ist nicht explizit geregelt (WD 2018b; Wolfrum 1984).

Mögliche Eigentumsrechte durch Privatpersonen oder die kommerzielle Nutzung durch Unternehmen sind nicht explizit geregelt.

Der Mondvertrag von 1979 regelt die Nutzung von Weltraumressourcen und schließt auch Unternehmen mit ein.

Das Mondvertrag regelt die Nutzung des Mondes und eine eventuelle Ausbeutung seiner Naturschätze (AA 2019). Der Mondvertrag bezieht sich jedoch nicht allein auf die Nutzung der Mondressourcen, sondern umfasst überdies den Umgang mit Weltraumressourcen im Allgemeinen (DGLR 2017). Während der Weltraumvertrag sich vor allem auf Staaten bezieht, schließt der Mondvertrag auch Unternehmen und Privatpersonen ein. Der Mondvertrag sieht vor, dass eine militärische Präsenz im Weltraum unterbleibt, dass bei einem Abbau von Ressourcen ein Vorteilsausgleich zwischen Nationen erfolgen soll und dass Aktionen in Bezug auf Himmelskörper bei der UNO anzumelden und vom Generalsekretär genehmigen zu lassen sind (WD 2018b). Der Mondvertrag legte damit bereits 1979 die Grundlage für einen Ressourcenabbau, solange Art. II des Weltraumvertrags davon nicht berührt wird. Der Mondvertrag verbietet ausdrücklich die staatliche oder gar private Aneignung des Mondes oder von dessen Teilen (WD 2018b; Wolfrum 1984).

Er wurde jedoch von nur sehr wenigen Staaten ratifiziert.

Bislang haben den Mondvertrag nur 18 – darunter zahlreiche in der Raumfahrt eher unbedeutende – Staaten ratifiziert (COPUOS 2018). Deutschland ist nicht dabei. Gründe für die Zurückhaltung der Bundesregierung sind die bislang fehlende wirtschaftliche Perspektive, die ungelösten technologischen Herausforderungen sowie auch die Zurückhaltung anderer Länder, welche zwar über technische Kapazitäten zum Abbau von Weltraumbodenschätzen (USA und Russland) verfügen, die ihrerseits den Mondvertrag aber nicht ratifiziert haben (WD 2018b, Interview Schrogl/Bohlmann). Insbesondere Staaten, die zum damaligen Zeitpunkt bereits



in Weltraumforschung und -entwicklung investiert hatten, weigerten sich, einer internationalen Regulierung zuzustimmen, die kommerzielle Verwertungsambitionen prinzipiell untersagt (Nelson 2011). Erste Schritte in Richtung einer internationalen Lösung zeichnen sich jedoch ab. 2017 wurden erstmals rechtliche Fragen im Rechtsunterausschuss des COPUOS mit Blick auf „exploration, exploitation and utilization“ von Weltraumressourcen erörtert. Seitdem werden Möglichkeiten diskutiert, den allgemeinen Rechtsrahmen des Weltraumvertrags durch spezifische internationale Regelungen und Standards über den Abbau von Rohstoffen im Weltraum zu ergänzen und zu konkretisieren (Bundesregierung 2018b).

Auf nationaler Ebene haben mittlerweile etwa 20 Staaten eigene Weltraumgesetze erlassen: Neben europäischen Staaten wie Belgien, Finnland, Niederlande, Norwegen, Österreich, Spanien, Schweden, Frankreich und Großbritannien zählen dazu die USA, Japan, Russland und Australien (BDI 2018b). Die nationalen Weltraumgesetzgebungen befassen sich mit der nationalen Mitwirkung zur Umsetzung der internationalen Verpflichtungen auf innerstaatlicher Ebene, insbesondere gegenüber nichtstaatlichen Betreibern von Weltraumaktivitäten. So soll sichergestellt werden, dass die internationalen Verpflichtungen eingehalten werden. Die nationalen Weltraumgesetzgebungen beinhalten im Wesentlichen Lizenzierungsverfahren und Mitwirkungspflichten sowie Fragen zur Pflichtversicherung und zu Regelungen im Schadensfall privater Raumfahrtaktivitäten. Es können auch Fragen zum Abbau von Rohstoffen enthalten sein (DGLR) 2017). In der Praxis erhalten nationale Gesetzgebungen Relevanz, wenn beispielsweise private Akteure Satelliten ins All bringen. Hierfür benötigen die privaten Firmen eine Lizenz, was nur national geregelt werden kann (Welty 2019).

Einige Staaten zielen auf ein investitionsfreundliches Klima für potenzielle Nutzer und erteilen nationale Genehmigungen für den Abbau von Weltraumressourcen. Luxemburg und die USA haben zu diesem Zweck nationale Weltraumbergbaugesetze erlassen, Japan und die Arabischen Emirate könnten demnächst folgen (BDI 2018b; Mokler 2018, Interview Hobe; Mokler 2018). Das von Luxemburg 2017 verabschiedete Weltraumressourcengesetz⁴⁴ wurde im Rahmen der übergreifenden Regierungsinitiative „Space Resources“⁴⁵ initiiert, die einerseits Forschung und Innovation zu Technologien im Kontext von Ressourcenabbau im All strategisch ausbauen will, andererseits aber auch die rechtlichen Rahmenbedingungen definiert, unter denen Unternehmen entsprechende Anwendungen kommerziell verwerten können (SpaceTec Partners/BHO Legal 2016, S. 141f.). Zuvor hatten 2015 die USA mit dem „U.S. Commercial Space Launch Competitive-

Nationale Weltraumgesetze stellen sicher, dass nichtstaatliche Betreiber von Weltraumaktivitäten internationale Verpflichtungen einhalten.

Luxemburg und die USA haben als erste Nationen eigene Weltraumbergbaugesetze verabschiedet.

44 Loi du 20 juillet 2017 sur l'exploration et l'utilisation des ressources de l'espace (Gesetz vom 20. Juli 2017 über die Erforschung und Nutzung von Weltraumressourcen)

45 <https://space-agency.public.lu/en/space-resources.html> (2.11.2020)



ness Act“ ein vergleichbares Gesetz verabschiedet, das die kommerzielle Nutzung von Ressourcen aus dem Weltraum erlaubt (Kannenberg 2015). Die USA sehen es als völkerrechtlich gegeben an, dass Weltraumressourcen privat genutzt werden können (WD 2018b). Weiterhin haben Luxemburg und die USA im Mai 2019 eine Absichtserklärung zur bilateralen Förderung der kommerziellen Nutzung des Weltraums unterzeichnet (dpa 2019a).

Die privatwirtschaftliche Rohstoffnutzung im Weltraum wirft einige Fragen auf und bedarf noch einer internationalen Regelung.

Nach Ansicht der Bundesregierung handelt es sich beim Abbau von Rohstoffen im Weltraum um eine „völkerrechtlich grundsätzlich zulässige Nutzung, die im Einklang mit den anwendbaren Grundsätzen des Weltraumvertrags von 1967, allgemeinen Regelungen des Völkerrechts und sonstigen weltraumrechtlichen Vorgaben und Standards zu erfolgen hat“ (Bundesregierung 2018b). Hierbei ist jedoch zu unterscheiden und im Einzelfall zu urteilen: Die Entnahme von Proben und deren Aneignung sind seit Beginn der Raumfahrt eine akzeptierte Praxis (z.B. Apollo-Missionen), und auch die Entnahme von Ressourcen zum Erhalt einer Raumstation auf Himmelskörpern gilt prinzipiell als unkritisch und mit dem Weltraumvertrag vereinbar. Eine nationale Lizenzierung, die privaten Unternehmen ein Weltraumbergbau erlaubt, stünde hingegen im Widerspruch zum Aneignungsverbot des Weltraumvertrags (DGLR 2017, Interview Hobe). Die Rohstoffausbeutung im privatwirtschaftlichem Interesse bedarf deshalb nach Auffassung der Bundesregierung international zu vereinbarenden Regelungen und Standards (multilateraler Ansatz) (AA 2019; Bundesregierung 2018a u. 2018b; Schwedes 2019; WD 2018b).

Das luxemburgische Weltraumbergbaugesetz wird durch den Luft- und Weltraumrechtsexperten Prof. Hobe als völkerrechtswidrig bewertet. Der Abbau von Weltraumressourcen an sich sei zwar nicht unzulässig, eine solche nationale Gesetzgebung zur Aneignung von Weltraumressourcen hätte aber international koordiniert werden müssen (IISL 2015). Eine entsprechende Gesetzgebung könne ausschließlich international auf der Ebene der Vereinten Nationen erfolgen (Welty 2019). Die dazu erforderliche Diskussion zum Umgang mit nationalen Rechtssetzungsbefugnissen zur Weltraumnutzung hat bei den Vereinten Nationen – wie zuvor erwähnt – zwar bereits vor einigen Jahren begonnen, eine völkerrechtliche Einigung zur Teilhabe an Weltraumressourcen steht aber noch aus (DGLR 2017; WD 2018b; Welty 2019) (Kap. 6.3.2). Auf der nächsten Tagung des zuständigen Rechtsunterausschusses 2020 wird über die Einrichtung einer Arbeitsgruppe zur Ausarbeitung internationaler Prinzipien von Ressourcen auf Himmelskörpern entschieden (Bundesregierung 2019).

Im Zusammenhang mit der Nutzung von Weltraumressourcen werden Parallelen mit den hoheitsfreien Räumen im Seevölkerrecht gezogen. Das Seerechtsüberein-



kommen der Vereinten Nationen⁴⁶ (SRÜ) von 1982 könnte als Vorlage für die Ressourcennutzung im Weltraum dienen. Es regelt die Nutzung des Meeresbodens und dessen Untergrund auf hoher See außerhalb von Gewässern mit nationaler Hoheitsbefugnis. Der Tiefseeboden und seine Ressourcen gelten nach Art. 136 SRÜ als das „gemeinsame Erbe der Menschheit“. Dies bedeutet, dass sich nach Art. 137 Abs. 1 SRÜ Staaten Teile des Meeresbodens und seine Ressourcen nicht aneignen dürfen. Eine Nutzung ist jedoch unter Verleihung von Nutzungsrechten möglich, für deren Zuteilung die Internationale Meeresbodenbehörde mit Sitz in Kingston, Jamaika, verantwortlich zeichnet. In Anlehnung an das Meeresbodenregime des SRÜ könnte die Nutzung des gemeinsamen Menschheitserbes kooperativ und zugunsten der gesamten Menschheit erfolgen (Interview Schrogl/Bohlmann 2019; DGLR 2017).

Das UN-Seerechtsübereinkommen von 1982 könnte als Vorlage für die Ressourcennutzung im Weltraum dienen.

Deutschland hat bislang noch kein eigenes nationales Weltraumgesetz. Zwar gab es in der vergangenen Legislaturperiode bereits einen Entwurf für ein Weltraumgesetz, jedoch wurde es nicht mehr verabschiedet. Eine Weiterverfolgung wurde im Koalitionsvertrag zwischen CDU/CSU und SPD vereinbart. Die Bundesregierung plant, in der zweiten Hälfte der Legislaturperiode einen neuen Gesetzentwurf vorzulegen, in dem die Genehmigungs-, Überwachungs- und Haftungsverpflichtungen und voraussichtlich auch Umweltschutzbestimmungen mit Blick auf Weltraumschrott konkretisiert werden. Haftungsgrenzen (Kap. 7.3.2) sollen nicht höher als in anderen europäischen Staaten ausfallen (Tagesspiegel 2019). Zur Vorbereitung des Gesetzes soll im Laufe des Jahres 2019 ein Diskussionsprozess mit Verbänden, Industrie und der weiteren Fachöffentlichkeit beginnen. Das geplante Gesetz soll die bestehenden internationalen Verpflichtungen speziell aus den UN-Weltraumverträgen umsetzen (Bundesregierung 2019).

Auch dem Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. (BDI) ist das Thema ein Anliegen. Der Verband hat hierzu ein Positionspapier (BDI 2018b) veröffentlicht und formuliert darin, dass in einer nationalen Weltraumgesetzgebung, die auch den Weltraumbergbau regelt, eine wichtige Chance für die deutsche Industrie liegt. Nach Auffassung der Bundesregierung bedarf es zuvor jedoch der Schaffung spezifischer internationaler Regelungen (Bundesregierung 2018b).

Die Industrie vertreten durch den BDI fordert einen sicheren Rechtsrahmen in Form eines nationalen Weltraumgesetzes.

46 United Nations Convention on the Law of the Sea



7.3.2 Haftungsbergrenzen setzen Standortanreize

Startstaaten haften unbegrenzt für Schäden auf der Erde und im Weltraum.

Regelungen zur Haftung finden sich bereits im Weltraumvertrag von 1967. In Artikel VII des Weltraumvertrags ist festgeschrieben, dass jeder Vertragsstaat (auch Startstaat genannt), der einen Gegenstand in den Weltraum starten lässt bzw. von dessen Hoheitsgebiet oder Anlagen aus ein Gegenstand gestartet wird, völkerrechtlich für jeden Körper- und Sachschaden unbegrenzt haftet, den ein solcher Gegenstand oder dessen Bestandteile einem anderen Staat oder dessen Bevölkerung zufügen (UNOOSA 1966). Die Haftung gilt für alle Schäden, die auf der Erde, im Luftraum oder im Weltraum verursacht werden (AA 2019). Die Startstaaten haben zudem die Aufgabe, entweder durch Genehmigung oder durch ständige Aufsicht der Weltraumtätigkeiten nichtstaatlicher Akteure sicherzustellen, dass eine privatwirtschaftliche Nutzung des Weltraums im Einklang mit dem Völkerrecht steht (Bundesregierung 2019).

1978 stürzten radioaktive Teile des sowjetischen Satelliten Cosmos 954 über Kanada ab. Gegen Ende seiner Laufzeit sollte dessen Reaktorkern in einer höheren Parkumlaufbahn entsorgt werden, doch durch einen technischen Fehler kam es zu einem vollständigen Absturz des Satelliten und Überreste fielen auf die Erde. Daraufhin musste ein sehr großes Gebiet in Kanada abgesucht werden, um möglichst viele der radioaktiven Trümmerteile zu bergen (DER SPIEGEL 1978; Haaf 1978). Als Entschädigung musste die Sowjetunion nach dem Weltraumhaftungsübereinkommen eine Summe von ca. 3 Mio. kanadische Dollar an Kanada zahlen (JAXA 1981).

Relevant in diesem Kontext ist das Weltraumregistrierungsübereinkommen. Es verpflichtet Startstaaten, die einen Weltraumgegenstand in eine Erdumlaufbahn (oder darüber hinaus) bringen, diese in einem eigenen Register zu erfassen. Zusätzlich führen die UN ein separates Register, in dem Pflichtangaben (z. B. Umlaufbahn, Startdatum, Verwendungszweck) von den Vertragsstaaten erfasst werden. Ziel des Registers ist es, im Schadensfall die Weltraumgegenstände zu identifizieren und Haftungsfragen nach dem Weltraumhaftungsübereinkommen zu klären. Sind mehrere Staaten beteiligt, muss festgelegt werden, welcher Staat die Registrierung im Weltraumregister vornimmt (Interview Hobe). Die genauen Haftungsvoraussetzungen für Schäden, die durch Weltraumgegenstände verursacht werden, regelt das Weltraumhaftungsübereinkommen.

Die Startstaaten sind nach jetziger Gesetzeslage vollständig für die Aktivitäten privater Akteure haftbar.

Startstaaten haften also sowohl für staatliche als auch für nichtstaatliche Rechtsträger unbegrenzt für den Fall, dass ein Weltraumkörper auf die Erde fällt und dort Schäden verursacht. Dies schließt eventuelle Folgeschäden (z. B. Strahlungsschäden) mit ein. In diesem Zusammenhang wird von einer Gefährdungshaftung gesprochen. Der Staat muss einspringen, weil bereits durch den Start eine allgemeine Gefährdung erzeugt wird. Dies ist zu unterscheiden von der Ver-



schuldenshaftung: Wenn z.B. zwei Satelliten im All zusammenstoßen, dann ist zu klären, wer für die Kollision verantwortlich ist. Aus der bisherigen Gesetzeslage lässt sich somit keine private Haftung für private Akteure ableiten, sondern lediglich eine staatliche Haftung (Mokler 2018).

Alle nichtstaatlichen Stellen benötigen für ihre Aktivitäten im Weltraum eine Starterlaubnis, ferner müssen alle Vorhaben vom betreffenden Staat überwacht werden. Damit ist sichergestellt, dass keine von einer Staatenverantwortung losgelösten Weltraumaktivitäten durchgeführt werden (DGLR 2017). Die Startstaaten fordern überdies von den privatwirtschaftlichen Akteuren eine Pflichtversicherung als Voraussetzung für eine Startgenehmigung (Interview Hobe). Die etablierten Regelungen zur Haftung und Pflichtversicherung scheinen sich jedoch mitunter als praktische Hürde für viele New-Space-Projekte zu erweisen (Schneider 2018a), weil diese nicht auf Klein- oder Kleinstsatellitenmissionen, sondern auf große, steuerbare, geostationäre Satelliten ausgerichtet sind. Versicherungsprämien können demzufolge die Projektkosten deutlich übersteigen.

Aus diesem Grund wäre für private Akteure eine niedrige Haftungsobergrenze attraktiv, bis zu der sie sich versichern müssen. Liegt die Schadenshöhe darüber, springt der Staat ein. Frankreich etwa versucht, Standortvorteile zu erreichen, indem es für private Raumfahrtunternehmen eine vergleichsweise niedrige Haftungsbegrenzung von derzeit 60 Mio. Euro definiert hat (Interview Hobe, Tagespiegel 2019). Einige Länder reagieren auf die Haftungsfrage mit einer Anpassung ihrer nationalen Weltraumgesetze. Sie bestimmen beispielsweise, dass universitäre oder auch kommerzielle Betreiber von Klein- und Kleinstsatelliten von den Haftungs- und Versicherungspflichten ausgeschlossen sind oder geringere Haftungs- und Versicherungssummen zahlen (BDI 2018b). So profitieren New-Space-Unternehmen beispielsweise in den USA davon, dass der Staat für eventuelle Schäden vollständig aufkommt, was sich entsprechend positiv auf die Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit insbesondere von kleinen und mittleren Unternehmen auswirkt. Die Frage nach der Haftungsobergrenze wird vor allem zukünftig an Bedeutung gewinnen, wenn die Transporte in den Weltraum zunehmen und dieser in einem höheren Maße kommerziell genutzt wird.

7.3.3 Vermeidung von Weltraumschrott als Voraussetzung für eine sichere Raumfahrt

Wie in Kapitel 6.2.3 beschrieben, stellt die zunehmende Zahl an umherfliegenden künstlichen, nicht mehr funktionsfähigen Teilen im Weltraum eine steigende Gefahr für die Raumfahrt dar.

Verschiedene internationale Gremien erarbeiten aktuell Regeln für die Vermeidung von Weltraummüll. Hierzu zählen u.a. die Internationale Organisation für

Startstaaten verlangen von kommerziellen Anbietern jedoch bis zu einer Haftungsobergrenze eine Pflichtversicherung.

Der Trend zu einer vollständigen oder überwiegenden Übernahme der Haftung für kommerzielle Anbieter durch den Staat führt zu einem Wettbewerb unter den Startstaaten.



Normung (ISO), der COPUOS sowie das Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (IADC). Letzteres ist ein internationaler Zusammenschluss von 13 Raumfahrtagenturen mit dem Ziel, Forschungsergebnisse auszutauschen und Vermeidungsmaßnahmen zu entwickeln.

Eine internationale
Regelung zum Umgang
mit Weltraumschrott
steht noch aus.

Seit 2002 wurden IADC Space Debris Mitigation Guidelines und der European Code of Conduct zur Eindämmung von Weltraumschrott auf europäischer Ebene entwickelt (ESA o.J.h). Ferner spielt der 2011 festgelegte ISO-Standard 24113 zu den Anforderungen an die Trümmerbeseitigung („debris mitigation requirements“) eine wichtige Rolle. Auch wenn in einigen Ländern schon Maßnahmen getroffen wurden, steht dies auf internationaler Ebene noch aus. COPUOS konnte zwar einen Konsens zu Empfehlungen im Umgang zur Vermeidung mit Weltraummüll erzielen (ESA o.J.g), alles in allem handelt es sich jedoch lediglich um nichtverbindliche Leitlinien (Interview Hobe).

Die ESA spielt eine wichtige Rolle dabei, andere Nationen beim Thema Weltraummüll zu sensibilisieren und diesen zu reduzieren. Die Organisation engagiert sich u.a. in den oben genannten internationalen Gremien. Zuletzt unterzeichneten die ESA und das United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA/Büro

Abb. 19 Roboterarm fängt einen funktionsuntüchtigen Satelliten ein (eDeorbit's robotic arm)



Quelle: ESA (http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2017/01/e.Deorbit_s_robotic_arm; 2.11.2020)



der Vereinten Nationen für Weltraumfragen) am 24. Mai 2019 eine gemeinsame Erklärung in Paris. Ziele der Vereinbarung bestehen darin, weltweit ein besseres Verständnis und eine höhere Aufmerksamkeit für das Thema Weltraummüll zu schaffen, über Forschungsergebnisse zu informieren, die Umsetzung bestehender Richtlinien zur Reduzierung von Weltraumschrott zu stärken und internationale Bemühungen zur Reduzierung von Weltraummüll zu unterstützen (UNOOSA 2019). Darüber hinaus hat sich die ESA einem Projekt des Weltwirtschaftsforums und verschiedener US-Organisationen angeschlossen, um weltweit ein erstes Nachhaltigkeitsranking der Raumfahrtakteure zu erstellen. Ferner soll mittels der ESA-Initiative „Clean Space“ sichergestellt werden, dass zukünftige Satellitenmissionen keinen Müll hinterlassen.⁴⁷ In diesem Kontext sollen auf der ESA-Ratstagung im November 2019 neue Initiativen im Rahmen des ESA-Programms zur Weltraumsicherheit vorgestellt werden. Dazu zählt u. a. die Absicht, sämtliche ESA-Missionen bis 2020 müllneutral zu konzipieren und den Aufbau von Industriekapazitäten zur Durchführung von Dienstleistungen im Orbit zur Entfernung von Weltraumteilen zu unterstützen (ESA o. J.c).

7.3.4 Fragen zum Datenschutz durch künftige internationale Erdbeobachtungsmissionen

Die von den Erdbeobachtungssatelliten aufgenommenen Bilder werden kontinuierlich hochauflösender. Mit der zu erwartenden Zunahme der Satelliten und der verbesserten Qualität werden zugleich immer mehr Daten erfasst. Die in Kapitel 6.1.3 aufgeführten Beispiele zur Erdbeobachtung zeigen, dass diese Daten sehr vielfältig sind und für die verschiedensten Zwecke genutzt werden können. Es können Wege von Schiffen, Flugzeugen, Zügen, Autos genauso erfasst werden wie die Umschlagdauern von Containern in Häfen, der Ölstand in Tanks oder der Besuch von Supermärkten.

Ebenso lässt sich im Ackerbau die Qualität und Quantität der Ernte oder die Ansammlung von Menschen bei Demonstrationen beobachten. Hieraus lassen sich politische und wettbewerbsrelevante Informationen ableiten. Mithilfe der Fortentwicklung KI-basierter Software werden die immensen Datenmengen immer schneller und besser ausgewertet werden können. Die fotografierten Objekte werden erfasst, ohne dass dies den Eigentümern bekannt ist. Auch wenn die Erfassung solcher Daten prinzipiell nicht neu ist, stellt sie aufgrund ihrer angestrebten Lückenlosigkeit und Echtzeiterfassungsmöglichkeiten eine neue Qualität dar und wirft Fragen nach dem Datenschutz auf. Für Deutschland regelt das Satellitendatensicherheitsgesetz⁴⁸ die Nutzung von Daten bei Erdbeobachtungs-

Vereinbarungen zum Umgang mit sicherheits- und wettbewerbsrelevanten Daten müssen auf internationaler Ebene erfolgen.

47 https://www.esa.int/Our_Activities/Space_Safety/Clean_Space/cleansat (2.11.2020)

48 Gesetz zum Schutz vor Gefährdung der Sicherheit der Bundesrepublik Deutschland durch das Verbreiten von hochwertigen Erdfernerkundungsdaten (Satellitendatensicherheitsgesetz – SatDSiG) (2007)



missionen. Der Staat kontrolliert, welche der von privaten Satelliten gewonnenen Daten weitergegeben werden dürfen. Allerdings gilt dies nur für von Deutschland aus gestartete und betriebene Satelliten. Auch kann es möglich sein, Daten auf nicht legale Weise in einem anderen Land zu erwerben. Generell wird die Nutzung sicherheitsrelevanter Daten durch nationale Gesetze reguliert, die sich an US-amerikanischen Vorschriften orientieren. International bindende Abkommen sind bislang nicht getroffen worden.

7.3.5 Staatliche Raumfahrtagenturen als zentrale Treiber für Technologieentwicklung

New-Space-Akteure stellen eine große Herausforderung für die etablierte Raumfahrtindustrie dar, die es zuvor gewohnt war, exklusiv für die staatlichen Raumfahrtagenturen zu arbeiten, und nun mit preiswerter anbietenden und effizienteren Unternehmen um Aufträge konkurrieren muss. Vor allem der Erfolg von SpaceX ist ein Zeugnis dafür, dass neue Akteure im Wettbewerb mit etablierten Unternehmen wie Boeing, Ariespace oder Airbus SE (vormals European Aeronautic Defence and Space – EADS) erfolgreich bestehen können.

Neben dem Beweis für die Konkurrenzfähigkeit neuer Raumfahrtakteure hat SpaceX auch den „proof of concept“ für die Markt- und Kommerzialisierungspotenziale von New Space erbracht (Dillow 2016). Erstmals gelang es dem Unternehmen 2017, mit insgesamt 17 Weltraumflügen den europäischen Konkurrenten Ariespace (11 Weltraumflüge) als weltgrößten Satellitentransporteur abzulösen (Schubert 2018).

Die kommerzialisierte Raumfahrt ist wesentlich von staatlichen Aufträgen und öffentlicher Förderung abhängig.

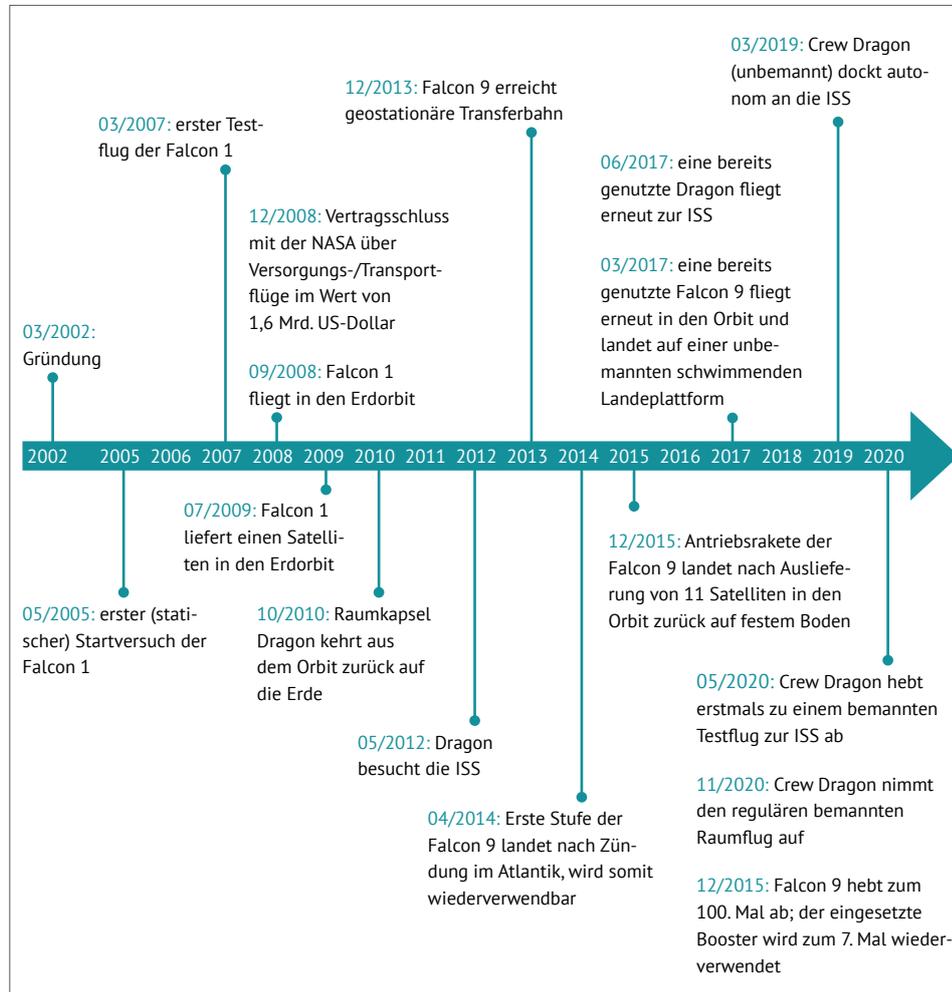
Bis heute sind private Raumfahrtaktivitäten jedoch wesentlich von staatlichen Aufträgen und öffentlicher Förderung abhängig, was die wichtige Rolle von Raumfahrtagenturen für die Entwicklung der New-Space-Ökonomie unterstreicht. Insbesondere bei der Entwicklung der Raketentechnologie besteht aufgrund der hohen Kosten und Risiken eine starke Abhängigkeit zwischen staatlichen und privaten Akteuren. Am Beispiel der NASA und deren Kooperation mit SpaceX lässt sich dies gut nachzeichnen (Vernile 2017, S. 6 ff.). Wie eng beispielsweise der Erfolg von SpaceX an die Zusammenarbeit mit der NASA gekoppelt war und ist, zeigen die Meilensteine in der Entwicklung des Unternehmens (Abb. 21).

SpaceX konnte allein durch hochdotierte Rahmenverträge mit der NASA seine Technologien entwickeln.

2008 schloss die NASA mit SpaceX einen Rahmenvertrag über 1,6 Mrd. US-Dollar über Versorgungs- und Transportflüge zur ISS. Im Februar 2019 wurde ein weiterer Rahmenvertrag abgeschlossen. Das Unternehmen erhält von der US-Regierung rund 300 Mio. US-Dollar für den Transport von drei Satelliten in ihren Zielorbit (DOD 2019). Damit bezahlt die US-Regierung an SpaceX ca. 100 Mio. Euro pro Flug auf dem heimischen Markt. Diese Rahmenverträge mit der NASA ermöglichten SpaceX, seine Technologie und Angebote kontinuierlich weiterzu-



Abb. 20 Zentrale Meilensteine SpaceX



Die Auswahl der Meilensteine basiert auf der Selbstdarstellung des Unternehmens. Nicht berücksichtigt sind hier die vereinzelt Fehlstarts und -landungen, von denen SpaceX im Verlauf der letzten Jahre immer wieder betroffen war.

Eigene Darstellung auf Grundlage von spacex.com

entwickeln und dadurch auch für kommerzielle Auftragsflüge günstiger zu werden (Tartar/Qiu 2018). Das Unternehmen bietet mittlerweile seine Trägertechnologie auf dem internationalen bzw. europäischen Markt jedoch mit nur rund 50 Mio. statt 100 Mio. US-Dollar pro Flug an, was zu einem Wettbewerbsdruck im europäischen Markt führt (BDI 2019).

Doch nicht nur im Bereich der Transportdienstleistungen spielt eine enge Kooperation zwischen Raumfahrtagenturen und Unternehmen eine wichtige Rolle. Dies zeigt das Beispiel der auf Erdbeobachtung spezialisierten US-amerikanischen



Planet Labs Inc., die 2015 die deutsche BlackBridge AG bzw. deren Satellitenkonstellation RapidEye aufkaufte. Auch für Planet Labs ist die NASA der wichtigste Kunde, welcher die durch die Kleinsatelliten erfassten Erdbeobachtungsdaten nutzt (Foust 2015; Marshall 2018).

Eine staatliche Subventionspolitik nach dem Vorbild der NASA ist durch die ESA nicht vorgesehen.

Für US-amerikanische New-Space-Unternehmen ist der Staat somit häufig der wichtigste Auftraggeber. Sowohl im Bereich der Trägertechnologien als auch im Bereich Downstream unterstützt die Raumfahrtbehörde die Entwicklung durch substanzielle Investitionen und fungiert als Ankerkunde für neue Systeme und Dienstleistungen (SpaceTec Partners/BHO Legal 2016). Diese Form der Finanzierung bzw. Absicherung der unternehmerischen Risiken nach dem Vorbild der US-amerikanischen Subventionspolitik, bei der der Staat als Ankerkunde fungiert, gibt es in Deutschland nicht und ist auch durch die ESA nicht vorgesehen (Bundesregierung 2018a u. 2019).

Eine weitere Aufgabe für europäische Raumfahrtunternehmen besteht darin, dass die ESA unterschiedliche nationale Interessen und industriepolitische Strategien ausgleichen muss. Am Beispiel der Entwicklung von der Ariane 6 sowie dem Nachfolgermodell Ariane NEXT lässt sich dies verdeutlichen: Frankreich strebt bereits jetzt die Entwicklung der Nachfolgerakete Ariane NEXT an, während Deutschland zunächst auf die langfristige Nutzung der Ariane 6 setzt (Hartbricht 2019). Diese unterschiedlichen Ziele beruhen auf verschiedenen Einschätzungen zur Konkurrenzfähigkeit der Ariane-Raketen gegenüber kommerziellen Anbietern wie SpaceX. Europäische kommerzielle Satellitenbetreiber könnten auf die preisgünstigeren Angebote aus den USA zurückgreifen und die europäische Trägerindustrie unter Druck setzen. Die Herausforderung für die ESA besteht vor diesem Hintergrund darin, einen unabhängigen europäischen Zugang ins All zu gewährleisten und Innovations- und Effizienzpotenziale der europäischen Raketenhersteller zu stimulieren.



8 SWOT-Analyse und Handlungsfelder

In der Gesamtschau zeigt sich, dass die deutsche Raumfahrt- und New-Space-Akteurslandschaft mit ihrer leistungsfähigen und vielfältigen Raumfahrtforschung und -entwicklung im Bereich technischer Komponenten und deren Fertigung international gut anschlussfähig ist. Dem internationalen Trend folgend sind auch in Deutschland Gründungen neuer Unternehmen zu verzeichnen, die speziell in den frühen Gründungsphasen mit zahlreichen Fördermaßnahmen unterstützt werden. Da der Raumfahrtmarkt substantiell wächst, verspricht dieser auch für deutsche Unternehmen lukrative Marktchancen.

Allerdings stehen den potenziell vielversprechenden Entwicklungsmöglichkeiten diverse Innovationsbarrieren gegenüber, darunter ein Mangel an Risikokapital (besonders in der Wachstumsphase von Start-ups), ein für kleinere Akteure tendenziell schwer zugängliches Fördersystem sowie Rechtsunsicherheiten, die eine wettbewerbsfähige Entwicklung der Raumfahrt bremsen. Insgesamt investiert Deutschland im internationalen Vergleich gemessen am BIP eher wenig in die Raumfahrt, wodurch sich im Wettbewerb eine schlechtere Ausgangsposition ergibt. Eine entscheidende und zu überwindende Hürde besteht ferner in der Entwicklung von auf Daten und Technologien aus der Raumfahrt basierenden Geschäftsmodellen in anderen Branchen, damit sich die vielversprechenden Potenziale für Anwendungen – insbesondere im Downstreamsektor – erschließen können.

Aus den Innovationsbarrieren ergeben sich im Wesentlichen drei Handlungsfelder in den Bereichen Rechtssicherheit, innovationsbefördernde Maßnahmen sowie Unterstützung von New Space als innovative Industrie.

8.1 Stärken

8.1.1 Wirtschaft

Die deutsche Raumfahrt entfaltet schon heute ein großes ökonomisches Potenzial. Es werden mit ca. 9.000 Arbeitskräften rund 3 Mrd. Euro Umsatz pro Jahr erwirtschaftet (Stand 2017). Die vielfältige Akteurslandschaft in Deutschland wird durch mindestens 600 Institutionen mit Raumfahrtbezug konstituiert. So stehen leistungsfähige Forschungseinrichtungen und Unternehmen, darunter gemäß DLR-Katalog deutscher Raumfahrtakteure (und eigener Berechnung) ca. 100 Start-ups, für ein gut entwickeltes Ökosystem in der Raumfahrt. Dabei sind New-Space-Start-ups genauso wie etablierte Unternehmen entscheidend für die Entfaltung von New-Space-Aktivitäten.

Deutschland hat ein gut entwickeltes Raumfahrt- und New-Space-Ökosystem.



Deutschland ist ein Schwerpunktstandort für Institutionen der ESA und beherbergt drei von insgesamt neun Zentren: das Europäische Raumflugkontrollzentrum (European Space Operations Centre – ESOC) in Darmstadt, das Europäische Astronautenzentrum (European Space Agency – EAC) in Köln und das Columbus-Kontrollzentrum (Col-CC) für die Steuerung des Columbus-Moduls der ISS in Oberpfaffenhofen). Die ESA-Zentren stellen durch ihr technisches und institutionelles Know-how sowie die Bereitstellung von Infrastrukturen wichtige Partner und Impulsgeber für die deutschen Raumfahrtakteure dar.

In Deutschland gibt es in sieben Bundesländern Schwerpunkte für New Space.

Die deutsche New-Space-Akteurslandschaft ist an mehreren Standorten mit Schwerpunkten in Bayern, Berlin-Brandenburg, Baden-Württemberg, Bremen, Nordrhein-Westfalen und Hessen verortet. Besonders prägend sind Regionen mit Standorten der ESA bzw. ES BIC, darüber hinaus haben sich auch an weiteren Standorten New-Space-Schwerpunkte gebildet (z.B. Berlin-Brandenburg, Bremen, Bodenseeregion). Durch die verschiedenen New-Space-Standorte ergibt sich eine gute Anbindung an regionale Wirtschaftsräume. Die New-Space-Akteure werden in einigen Regionen zudem durch raumfahrtbezogene Clusterinitiativen und Netzwerke unterstützt (bavAIRia e.V., AVIASPACE BREMEN e.V., Cluster Verkehr, Mobilität und Logistik der WFBB GmbH, BodenseeAIRia der WFB GmbH). Diese befördern die Entwicklung branchenspezifischer (regionaler) Strukturen und helfen bei der Vernetzung mit Partnern aus Wirtschaft und Wissenschaft.

8.1.2 Technik

Die deutsche Raumfahrt fußt auf einer auch im internationalen Vergleich leistungsfähigen Raumfahrtforschung und -entwicklung.

Die deutsche Raumfahrtindustrie hat eine langjährige Tradition und fußt auf einer auch im internationalen Vergleich sehr leistungsfähigen Raumfahrtforschung und -entwicklung, wodurch eine wichtige Voraussetzung für internationale Wettbewerbs- und Kooperationsfähigkeit erfüllt wird.

Überdies nimmt Deutschland im weltweiten Vergleich bei der optischen Kommunikation (Übertragung von Daten mit Hilfe von Licht) sowie der satellitengestützten Erdbeobachtung in der Entwicklung innovativer Verfahren sowohl im Sensorbereich als auch in der Radartechnik eine Spitzenstellung ein. Stärken liegen ferner in der Miniaturisierung von Bauteilen und der Serienfertigung von Satelliten (z.B. durch OHB). Die Technische Universität Berlin ist Vorreiter für diese Entwicklungen und der weltweit größte universitäre Betreiber von Kleinsatelliten.

Die ESA hat ein gut etabliertes Kooperationsgeflecht zu Forschungseinrichtungen und Unternehmen in ganz Europa und Deutschland aufgebaut.



8.1.3 Politik und Recht

New-Space-Unternehmen können von einem vielfältigen Förderangebot profitieren. In Deutschland gibt es eine Vielzahl an Unterstützung für die frühe Phase von Gründungen. Darüber hinaus stehen New-Space-Unternehmen auch viele technologieoffene Angebote auf Bundes- und Länderebene zur Verfügung und auch die raumfahrtspezifischen Förderinstrumente nehmen New-Space-Akteure zunehmend in den Blick. Überdies wird der Raumfahrt über die spezifische Raumfahrtförderung hinausgehend auch in der Hightech-Strategie 2025 ein besonderer Stellenwert als Schlüsseltechnologie eingeräumt.

New-Space-Unternehmen steht ein vielfältiges Förderangebot zur Verfügung.

8.2 Schwächen

8.2.1 Wirtschaft

Der Zugang zu Wagniskapital in Deutschland und Europa ist im Vergleich zu den USA erschwert. Besonders in der Wachstumsphase der Raumfahrtunternehmen mangelt es an der Verfügbarkeit von Risikokapital, was zu Wachstumseinschränkungen führt oder Vorhaben gänzlich verhindert. Die Entwicklungsfähigkeit und die damit verbundene Wettbewerbsfähigkeit des deutschen bzw. europäischen Raumfahrt-Ökosystems werden dadurch nicht nur kurzfristig, sondern vor allem mittel- und langfristig eingeschränkt. Im internationalen Vergleich wird bei den in Europa getätigten Investments zudem weniger auf Anwendungen als vielmehr auf technologienahe Start-ups mit Wurzeln in der universitären Forschung fokussiert.

Die mangelnde Verfügbarkeit von Wagniskapital ist eine Wachstumsbremse.

Im internationalen Vergleich fallen gemessen am BIP die Ausgaben von Deutschland für Weltraumprogramme (0,05%) gering aus und liegen noch hinter Italien und Indien auf Rang 8 (USA: 0,22%, Frankreich 0,12%, Italien: 0,06%; Stand 2017).

Im bestehenden Fördersystem gelingt es vor allem großen Unternehmen, substanzielle Fördermittelsummen einzuwerben. KMU profitieren in diesem System eher indirekt, indem sie über Unteraufträge eingebunden werden. Hierdurch wird die Innovationskraft im Fördersystem teilweise begrenzt, weil die Forschungsvorhaben (Quantität und Qualität) fast ausschließlich von großen Institutionen geprägt werden.

8.2.2 Politik und Recht

Die deutsche Weltraumstrategie stammt aus dem Jahr 2010 und ist vor dem Hintergrund der hohen Dynamik in der Weltraumindustrie und den sich daraus ergebenden Anforderungen zumindest in Hinblick auf die durch New Space induzierten Herausforderungen nicht mehr aktuell.

Die deutsche Weltraumstrategie stammt noch aus 2010 und hat Aktualisierungsbedarf.



Die staatlichen Ausgaben für die Raumfahrt stehen unter einem hohen Legitimationsdruck. Grundsätzlich steht die Bevölkerung Raumfahrtaktivitäten positiv gegenüber. Es ist daher wahrscheinlich, dass auch New-Space-Aktivitäten positiven Rückhalt finden, sofern der gesellschaftliche Nutzen deutlich wird. Indes erschließen sich die vielfältigen Potenziale der Raumfahrt bzw. New Space für die Bevölkerung bisher kaum.

Obwohl sich eine Standortkonzentration von Raumfahrtakteuren auf Bundeslandebene zeigt, spiegelt sich dies nicht gleichermaßen in länderpolitischen Strategien und Zielsetzungen wider. So existieren eher nur vereinzelt eigene Strategien auf Bundeslandebene für das Thema Raumfahrt, das eher nur eine vergleichsweise geringe Bedeutung spielt. Das Land Bremen hat das Thema in seine Clusterstrategie eingebettet, Bayern verfolgt mit „Bavaria One“ eine dezidierte Weltrauminitiative.

8.3 Chancen

8.3.1 Wirtschaft

Potenziale ergeben sich für Anwendungen im Upstream- und Downstreamsektor.

Marktchancen bieten sich für Deutschland sowohl im Upstream- als auch im Downstreamsektor. Es werden zahlreiche neue Märkte für RaumfahrtDienstleistungen in den Bereichen Business to Business (B2B) und Business to Customer (B2C) entstehen. In Bezug auf die im Upstreamsektor verorteten Trägertechnologien sind die Entwicklungen in Europa vor allem auf die Airbus Group fokussiert – hier arbeitet die ArianeGroup mit ca. 200 Zulieferern aus ganz Europa zusammen. Bislang sind die Aktivitäten jedoch fast ausschließlich staatlich und nicht kommerziell geprägt. Zukünftig ist davon auszugehen, dass der Upstreamsektor noch mehr Potenzial für deutsche Unternehmen bieten kann. Diese ergeben sich primär für Zulieferer. Deutsche Unternehmen können hier ihre Stärken, insbesondere mit Blick auf die in der Raumfahrt erforderliche Innovativität, hohe Qualität und Zuverlässigkeit ausspielen. Im Downstreamsektor ergeben sich für deutsche Akteure Potenziale in den drei großen Anwendungsfeldern Kommunikation, Navigation und Erdbeobachtung. Speziell die Verwertung von Erdbeobachtungsdaten in Verbindung mit Geolokalisierung bietet Möglichkeiten für neue Geschäftsmodelle. Erdbeobachtungsdaten können beispielsweise mit entsprechenden Analysemethoden zu interessanten Anwendungen für Industrie und Verbraucher entwickelt werden, z.B. Präzisionslandwirtschaft, Wettbewerberanalyse, Smart City, Internet im Flugzeug, individuelles Gesundheitsmonitoring. Hieraus ergeben sich vielversprechende Transferpotenziale sowohl innerhalb der raumfahrtnahen als auch in raumfahrtferne Branchen. Allerdings sind die Anwendungsmöglichkeiten im Wachstumsmarkt Erdbeobachtung für kommerzielle und private Kunden in der Breite noch nicht erschlossen. Die öffentliche Hand ist in Deutschland zurzeit noch der wichtigste Kunde.



Abgesehen vom Technologie- und Marktführer Alphabet Inc., der mit seinen Angeboten stark auf die Nutzung von raumfahrtbezogenen Anwendungen setzt (Google Earth, Google Maps), gibt es mit Blick auf Anwendungen von Erdbeobachtungsdaten noch Raum sowohl für neue Marktführerschaften als auch für die Entwicklung neuer Plattformtechnologien. Unter Nutzung des Erdbeobachtungsprogramms „Copernicus“ der EU bieten sich für die deutsche (und europäische) Industrie Chancen, attraktive Services für Wirtschaft und Verbraucher zu entwickeln und dabei ggf. auch eine Marktführerschaft zu erlangen. Schon heute wird bei zahlreichen Unternehmensgründungen in Deutschland auf den vielversprechenden Downstreamsektor fokussiert. Dies zeigt sich auch bei den Schwerpunkten der rund 200 ESA BIC-Gründungen in Deutschland, die auf Softwarelösungen, Apps und digitale Anwendungen in den Bereichen Kommunikation, Navigation und Bildverarbeitung liegen. Förderlich für die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle ist die zunehmende Verfügbarkeit von Navigations- und Erdbeobachtungsdaten im Rahmen von Open-Access-Strategien. Die ESA ermöglicht beispielsweise seit 2017 den Zugriff auf Bilder und Daten im Rahmen ihrer Open-Access-Strategie mittels freier Creative-Commons-Lizenzen, die auch kommerziellen Anbietern für die Entwicklung von Geschäftsmodellen zur Verfügung stehen.

Neue Anwendungen bieten auch für deutsche Unternehmen die Chance auf Marktführerschaft.

Mit Blick auf zukünftige Weltraummärkte werden sich die Potenziale für deutsche Akteure weniger in den Bereichen Weltraumtourismus oder Weltraumkolonisierung, sondern vielmehr in den Bereichen Entsorgung von Weltraumschrott sowie Serviceaufgaben ergeben. In diesen Bereichen kann die deutsche Industrie an ihre bestehende Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit im Sinne von Industrie 4.0 im Weltraum (Space 4.0) anknüpfen. Die zunehmende Sicherheitsproblematik durch Weltraummüll und die in der Folge zu erwartenden regulativen Bestrebungen, diesen zu vermeiden bzw. zu beseitigen, werden kurzfristig Chancen für neue Geschäftsmodelle eröffnen. Auch die Produktion von Materialien unter Bedingungen der Mikrogravität ist vielversprechend. Hingegen liegt die Produktion von Baumaterialien für Infrastrukturen bzw. die Herstellung von Treibstoffen genauso wie der Weltraumbergbau eher noch in weiterer Ferne.

Die neuen Weltraummärkte bieten Chancen für neue Geschäftsmodelle.

Auch aus der ab 2020 zu erwartenden Öffnung der ISS für kommerzielle Zwecke dürften sich neue Geschäftsmöglichkeiten, z. B. für den Kölner ESA-Standort zur Astronautenausbildung, ergeben, da die potenziellen privaten Raumfahrerinnen und Raumfahrer entsprechend vorbereitet werden müssen.

Kurzfristig gilt dies insbesondere für die Entsorgung von Weltraummüll.

Die zunehmende Nutzung cloudbasierter Serverinfrastrukturen für die Datenverarbeitung, von Breitbandnetzen für die Datenübertragung und von hochauflösenden Sensoren für die Datenerfassung macht den Zugang zu und die Verarbeitung von Daten aus dem Weltraum immer leichter und kostengünstiger. Dadurch eröffnen sich auch für deutsche Unternehmen neue Geschäftsoptionen. Die ste-



tig sinkenden Kosten für Raketenstarts ermöglichen es sowohl Start-ups als auch etablierten Unternehmen, immer kostengünstigere und vielfältigere Produkte und Dienstleistungen zu entwickeln. Infolgedessen wird der Weltraummarkt durch die von New Space induzierten Entwicklungen in den nächsten Jahren weiter wachsen.

8.3.2 Technik

Deutschlands Stärken im Maschinen- und Anlagenbau bzw. Automatisierung und Robotik lassen Spill-over-Effekte erwarten.

Die deutsche Industrie gehört insbesondere in den Bereichen Komponenten und Subsysteme für Satelliten zu den weltweit führenden Anbietern und stellt international eine wichtige Zulieferindustrie dar. Der Maschinen- und Anlagenbau als eine Kernkompetenz der deutschen Wirtschaft ist von großer Bedeutung für die Raumfahrt, bei der es im hohen Maße um innovative Lösungen genauso geht wie um Qualität, Präzision und Zuverlässigkeit. Gerade in diesem Sektor können die deutschen Stärken im Bereich der Automation und Robotik ihr Potenzial entfalten. Im Zusammenspiel mit neuen Möglichkeiten der KI ergeben sich Anwendungspotenziale für intelligente autonome und teilautonome Systeme, die für extraterrestrische Missionen immer wichtiger werden. Der gegenwärtig bestehende Wandlungsdruck in der Zulieferkette im Automotivbereich (Umstellung auf – langfristig autonome – Elektromobilität) wird voraussichtlich zu Spill-over-Effekten führen.

Die zunehmende Verwendung standardisierter Bauteile (COTS) für Raumfahrtanwendungen bietet auch Potenziale für deutsche Unternehmen, einerseits für raumfahrtfremde Hersteller in Form zusätzlicher Absatzwege und andererseits in Form von Kostensenkungen für Hersteller von Raumfahrttechnologie, die dadurch ihre internationale Wettbewerbsfähigkeit steigern können.

8.3.3 Politik und Recht

Ein in den USA typischer Wettbewerb von kommerziellen Anbietern um Aufträge mit spezifizierten Fähigkeitsanforderungen an zu entwickelnde Produkte und Services („high level requirement“) ist in Deutschland bzw. Europa noch eher unüblich. Diese Vorgehensweise könnte eine Chance darstellen.

Deutschland hat ein starkes Gewicht in der politischen Diskussion zur europäischen Raumfahrtstrategie und setzt traditionell auf transatlantische Kooperationen. Die deutsche Politik kann zukünftig ihre Rolle in der Raumfahrt als Vermittler weiter ausbauen und notwendige Interessenausgleiche zwischen (neuen) Raumfahrtnationen schaffen, bestehende Kooperationen stärken und neue Kooperationsbeziehungen anbahnen.



Zunehmend fokussiert die Förderung auf anwendungsnahe- und marktorientierte Projekte mit dem Ziel eines Technologietransfers zwischen Raumfahrt und anderen Branchen (z.B. INNOSpace-Initiative des DLR). Dadurch ergibt sich eine Öffnung der vormals primär staatlichen Zwecken dienenden Raumfahrt, indem privatwirtschaftlichen Akteuren Entwicklungs- und Vermarktungsmöglichkeiten geboten werden. Diese Vorgehensweise kann kurz- und mittelfristig Unternehmen dazu bewegen, raumfahrtbasierte Geschäftsoptionen sowohl in raumfahrt-nahen als auch raumfahrtfernen Branchen zu entwickeln oder zu nutzen.

Ein Weltraumgesetz mit einer möglichen Regelung von Haftungsfragen könnte für nichtstaatliche Akteure zu mehr Rechtssicherheit führen und aufgrund niedriger Haftungsobergrenzen die Wettbewerbsfähigkeit stärken.

8.4 Risiken

8.4.1 Wirtschaft

Trotz der aussichtsreichen Marktchancen im Downstreamsektor besteht ein nicht unerhebliches Risiko für die deutsche Wirtschaft dahingehend, dass die darin liegenden Potenziale für Anwendungen primär von etablierten bzw. neuen US-amerikanischen Unternehmen genutzt werden könnten. Substanzielle Marktanteile lägen in der Folge außerhalb von Deutschland und Europa.

Wie auch andere Branchen betrifft die Raumfahrtbranche der Fachkräftemangel. Raumfahrtunternehmen im Downstreambereich konkurrieren mit anderen Unternehmen, deren Geschäftsmodelle ebenfalls datenbasiert sind.

Ein Risiko besteht zudem, dass es in Deutschland und Europa nur langsam gelingt, die Akteure in der Raumfahrtwertschöpfungskette mit Nichtraumfahrtbranchen zu vernetzen, sodass sich die Anwendungspotenziale insbesondere im Bereich der Erdbeobachtungsdaten gegenüber Nordamerika oder Asien nur verzögert erschließen.

Es bedarf noch eines stärkeren Technologietransfers zwischen Raumfahrt und anderen Branchen.

Durch die Vergaben von Aufträgen zur Förderung der Raumfahrt durch die US-amerikanische Regierung an private Unternehmen werden diese in ihrer Wettbewerbsfähigkeit immer mehr gestärkt. Insgesamt nimmt der weltweite Wettbewerb zu, US-amerikanische Unternehmen bauen dadurch ihre Marktdominanz aus.

8.4.2 Technik

Es ist noch ungewiss, ob sich die mit dem Einsatz von handelsüblichen Bauteilen verbundenen Erwartungen mit Blick auf Weltraumtauglichkeit und Kos-



teneinsparungen erfüllen werden. Unter Umständen ist die Verlässlichkeit der Standardbauteile genauso wie die Zeitersparnis beim Prüfprozess auf Weltraumtauglichkeit zu gering. Gegen ihren Einsatz könnte zudem sprechen, dass die möglicherweise geringere Zuverlässigkeit der Bauteile dem zu erwartenden Anspruch an Vermeidung von Weltraummüll entgegenläuft. Demzufolge könnten sich COTS nur für Spezialfälle eignen und die erhofften Entwicklungspotenziale für Unternehmen in nur geringem Maße erfüllen.

Offen ist noch, inwieweit wirtschaftlich tragfähige Technologien entwickelt werden können, um den zunehmenden Weltraumschrott zu entfernen.

8.4.3 Politik und Recht

Es sind offene Rechtsfragen auf internationaler Ebene zu klären.

Die Entwicklungen von New Space induzieren einen Anpassungsbedarf des Rechtsrahmens des bisher geltenden Weltraumrechts. Der Weltraumvertrag richtet sich ausschließlich an Staaten. Eigentumsrechte von Privatpersonen oder die kommerzielle Nutzung durch Unternehmen sind nicht explizit geregelt. Fragen zum Zugang und zur Nutzung von Ressourcen, zur Vermeidung von Weltraumschrott genauso wie zur Haftung sind klärungsbedürftig. Sollte zu diesen Fragen keine Einigung erzielt werden und eine international abgestimmte Vorgehensweise durch nationale Bestrebungen konterkariert werden, stellt dies eine prosperierende und nachhaltige Marktentwicklung infrage.

Die Höhe der Haftungsobergrenze ist zu klären.

Einige Länder wie die USA oder Frankreich bieten als Startstaaten attraktive, d.h. niedrige Haftungsobergrenzen für kommerzielle Anbieter, wodurch sie Standortvorteile gegenüber Deutschland erreichen. Niedrige Haftungsobergrenzen sind ein Vorteil im Wettbewerb um die Ansiedlung von Unternehmen. Gleichzeitig besteht das Risiko eines Unterbietungswettlaufs und der Abwälzung unternehmerischer Risiken auf den Staat.

Durch die zu erwartende Zunahme von Satellitenschwärmen, die der Erdbeobachtung dienen, werden immer mehr Daten von Objekten und Personen erfasst, die im Rahmen von Business-Intelligence-Analysen für wettbewerbliche Zwecke genutzt werden können. Es entstehen sowohl für Unternehmen als auch für Bürgerinnen und Bürger neue Fragen zum Datenschutz, wenn beispielsweise die Erhebung personenbezogener Daten (z.B. Bewegungsdaten) zunehmend auf Satellitentechnologien basiert.

Ein übergeordnetes Risiko besteht darin, dass in Europa über die Sicherstellung eines unabhängigen Zugangs zum Weltall nicht immer Konsens besteht. Dies kann dazu führen, dass europäische Trägersysteme wirtschaftlich nicht konkurrenzfähig zu US-amerikanischen Trägerraketen sind und Unternehmen, die auf



Zugang zum Weltraum angewiesen sind, nicht länger auf europäische Trägerraketen setzen.

8.5 Handlungsfelder

8.5.1 Rechtssicheren Rahmen schaffen

Mit den Entwicklungen des New Space entsteht ein Bedarf zur Anpassung des Rechtsrahmens des bisher geltenden Weltraumrechts, insbesondere mit Blick auf Vermeidung von Weltraumschrott, Zugang und Nutzung von Ressourcen sowie Haftungsfragen im Weltall. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für einen prosperierenden und nachhaltigen Markt für nichtstaatliche Akteure in der Raumfahrt.

Die Bundesregierung plant, noch in dieser Legislaturperiode ein nationales Weltraumgesetz vorzulegen und dabei die im Mai 2019 vom COPUOS beschlossenen Richtlinien zur Nachhaltigkeit von Weltraumaktivitäten zu berücksichtigen. Ein Weltraumgesetz böte die Möglichkeit, Lizenzierungsverfahren und Mitwirkungspflichten sowie Fragen zur Pflichtversicherung und Regelungen im Schadensfall privater Raumfahrtaktivitäten zu klären. Ferner könnte die Nutzung von Weltraumressourcen und – zusätzlich zu einem internationalen Abkommen – der Umgang mit Weltraumschrott in der nationalen Gesetzgebung formuliert werden (z.B. Vorgaben für Qualitätsstandards durch private Raumfahrtakteure). Durch einen rechtssicheren Rahmen würden sich die Chancen für die deutsche Industrie verbessern. Beispielsweise sind deutsche Unternehmen in Entwicklungen zur Beseitigung von Weltraumschrott maßgeblich involviert. Diese könnten sie in Geschäftsmodelle für Produkte und Dienstleistungen überführen.

Ein nationales Weltraumgesetz würde zur Rechtssicherheit beitragen.

Staatliche Haftungsgrenzen sind förderlich, um insbesondere für KMU ein attraktives Umfeld für Investitionen zu bieten. Die Übernahme von Haftungsansprüchen für universitäre oder kommerzielle Raumfahrtaktivitäten könnte die Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit, insbesondere von KMU stärken. Einige Staaten bieten deutlich niedrigere Haftungsgrenzen an, was zu einem Ungleichgewicht der Nationen im Wettbewerb um Ansiedlung von New-Space-Akteuren führt. Laut Bundesregierung (2019) ist geplant, sich zukünftig an den Haftungsgrenzen anderer europäischer Länder zu orientieren.

Mit Blick auf die Zunahme von Bildmaterial durch Erdbeobachtungsmissionen in Verbindung mit Positionsbestimmung stellt sich die Frage, wie durch internationale Abkommen ein Datenschutz gewährt und die unerlaubte Nutzung wettbewerbsrelevanter Daten von Unternehmen verhindert werden kann.



8.5.2 Innovationsfördernde und -unterstützende Maßnahmen umsetzen

Für die frühen Phasen in der Entwicklung von Start-ups steht zwar eine Vielzahl an öffentlichen Fördermöglichkeiten zur Verfügung, für die Wachstumsphase ist der Zugang zu Wagniskapital jedoch aufgrund der zurückhaltenden Investitionsbereitschaft der Finanziere erschwert. Ohne entsprechende Finanzierungsmöglichkeiten stellt der Übergang von Forschung und Entwicklung zur Kommerzialisierung deshalb eine Barriere dar. Die Herausforderung des Zugangs zu Finanzierung ist ein generelles Problem für Start-ups in Deutschland und für die Raumfahrt nicht spezifisch. Ähnlich wie in der Medikamentenentwicklung scheuen die Kapitalgeber aufgrund der hohen Risiken, die mit der Entwicklung von Trägersystemen und Raumfahrzeugen verbunden ist, insbesondere Investitionen in den Upstreamsektor.

Die Schaffung speziell auf New Space ausgerichteter Finanzierungsinstrumente vs. Weiterentwicklung etablierter Instrumente der Wachstumsunterstützung junger Unternehmen wäre zu prüfen.

Hier wäre vonseiten der Politik zu prüfen, ob speziell auf New Space ausgerichtete Finanzierungsinstrumente, wie z. B. ein bei der KfW angesiedelter deutscher Weltrauminnovationsfonds, wünschenswert sind, oder ob die Wachstumsunterstützung von Hochtechnologie-Start-ups und innovativen KMU allgemein weiterentwickelt werden soll. Der zurzeit angedachte Investitionsfonds für die Raumfahrt, den die ESA in Kooperation mit der Europäischen Investmentbank plant, geht bereits in die Richtung einer spezialisierten Unterstützung. Zusätzlich könnte die Agentur für Sprunginnovationen wichtige Impulse für Raumfahrtentrepreneure setzen und den Transfer von Innovationen in den Markt beschleunigen.

In ähnlicher Weise wie der Zugang zu Finanzierung ein allgemein für Start-ups zutreffendes Problem ist, trifft dies auf den Fachkräftemangel zu. Diesbezüglich sollte geprüft werden, ob es raumfahrtspezifische Programme für die Gewinnung von Talenten und Sicherung des wissenschaftlichen Nachwuchses bedarf, oder ob diese Fragestellung vorzugsweise allgemein im Rahmen von innovationsunterstützten Maßnahmen adressiert werden soll. Die Begeisterung von Mädchen und Frauen für das Thema Raumfahrt könnte weitere Potenziale bieten.

Deutsche KMU in der Raumfahrt werden ohne eine zielgruppenspezifische Ausrichtung der Förderinstrumente auch weiterhin primär indirekt von der Raumfahrtförderung profitieren, indem sie in Projekten als Unterauftragnehmer oder Zulieferer größerer Akteure beteiligt werden. Dies beschränkt die Innovationskraft der Raumfahrtindustrie. Hier wären eine stärkere Ausrichtung zukünftiger Förderprogramme auf KMU, etwa durch eine Quote für Start-ups und KMU, oder ausschließlich auf Start-ups und KMU ausgerichtete Unterstützungsmaßnahmen abzuwägen.



Es könnte ferner geprüft werden, ob sich, wie in den USA üblich, ein Wettbewerb von kommerziellen Anbietern um Aufträge mit spezifizierten Fähigkeitsanforderungen auch für Europa bzw. Deutschland anbietet. Es könnten auch pilothaft neue Instrumente der Technologieentwicklung und Innovationsförderung ausprobiert werden, mit dem Ziel, die internationale Wettbewerbsfähigkeit zu stärken. Bisherige Beispiele auf europäischer Ebene sind die Businessinkubatoren oder das „ESA Business Applications programme“ bzw. in Deutschland die Initiative „INNOspace“ des DLR.

Raumfahrtagenturen werden auch künftig ein zentraler Treiber für die Entwicklung von Produkten und Dienstleistungen in der Raumfahrt sein. Sie agieren zunehmend als Schnittstelle zwischen der etablierten Raumfahrtindustrie einerseits und neuen branchenfremden Akteuren andererseits. Aufgrund der aktuellen Dynamik im New-Space-Markt böte es sich für Deutschland – auch im Rahmen des ESA-Engagements – an, ambitionierte Public Private Partnerships einzugehen, um damit zum Wachstum des Raumfahrtsektors beizutragen und gleichzeitig die gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Wirkungen der Raumfahrtaktivitäten zu stärken. Die kostenlose Nutzung von Daten, wie dies schon bei den Copernicus-Erdbeobachtungsdaten praktiziert wird, Abnahmegarantien über längere Zeiträume oder ausgewählte Anfangsinvestitionen in für den Staat wichtige strategische Projekte könnten die Geschäftsentwicklung unterstützen und Planungssicherheit schaffen.

Neue Instrumente der Auftragsvergabe und Nutzung von PPP könnten sich anbieten.

8.5.3 New Space als innovative Industrie befördern

Deutschland investiert im internationalen Vergleich in Relation zum BIP wenig (Mittel) in die Raumfahrt. Hier wäre zu überprüfen, ob die bislang investierte Summe angesichts des zu erwartenden wirtschaftlichen Potenzials von raumfahrtbezogenen Produkten und Dienstleistungen angemessen ist. Vor dem Hintergrund der sich abzeichnenden Aufteilung des Marktes von raumfahrtbezogenen Applikationen unter US-amerikanischen Technologieunternehmen gilt es für Deutschland, sich rechtzeitig gut zu positionieren.

Der in den letzten Jahren kostengünstiger gewordene Zugang zum Weltraum bietet erhebliche wirtschaftliche Chancen für eine Vielzahl an Branchen. Damit diese Chancen, insbesondere die Nutzung von Produkten und Dienstleistungen des Downstreamsektors in Nichtraumfahrtbranchen, genutzt werden können, ist die Raumfahrtindustrie gefordert, geeignete Anwendungen und Geschäftsmodelle für die Nichtraumfahrtindustrien zu entwickeln. Dazu böte es sich an, flankierend zur zukünftigen Raumfahrtstrategie die Nutzung von Weltraumtechnologien stärker auch in der Industriestrategie der Bundesregierung und in anderen strategischen Maßnahmen zu verankern, sodass der Anschluss zu New Space stärker mitgedacht wird. Initiativen zu Themen wie Industrie 4.0, Zukunft der Mobilität,

New Space könnte stärker auch in anderen Innovationsstrategien mitgedacht werden.



aber auch Nachhaltigkeit, Landwirtschaft und Ernährung etc. können durch New Space neue Impulse erhalten und innovative Anwendungsfelder eröffnen.

Deutschlands starke Rolle in der europäischen Raumfahrt und auch die Beteiligung an internationalen Projekten wie der ISS sowie bei der Erstellung des ESM für die zukünftigen bemannten Raumfahrzeuge der USA können als guter Ausgangspunkt für Folgeprojekte genutzt werden. Das ESM wird unter deutscher Federführung durch Airbus Defence and Space erstellt (DLR Raumfahrtmanagement o.J.d). Schon heute ist die Beteiligung der ESA an dem von der NASA initiierten Lunar Gateway geplant, das ab 2023 konstruiert werden soll. Bei diesen und ähnlich gelagerten Projekten könnte sich Deutschland als wichtiger Partner erneut gut positionieren.



9 Interviewpartnerinnen und -partner

Name	Organisation
Eva-Maria Aicher	Hensoldt Sensors GmbH
Robert Boehme	PTScientists
Dr. Ulrike M. Bohlmann	European Space Agency
Paul Feddeck	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Dr. Juliane Haupt	Berlin Partner for Business and Technology; Cluster Verkehr, Mobilität und Logistik der WFBB GmbH
Prof. Dr. Dr. h.c. Stephan Hobe	Institut für Luftrecht, Weltraumrecht und Cyberrecht; Universität zu Köln
Andreas Hoerkens	ArianeGroup GmbH
Rainer Horn	SpaceTec Consultancy
Thomas Jarzombek	Mitglied des Deutschen Bundestages der CDU/CSU-Fraktion; Koordinator der Bundesregierung für Luft- und Raumfahrt
Torsten Kriening	PTScientists
Jörg Plaß	Airbus Defence and Space GmbH
Dr. Stephan Recher	SCISYS Deutschland GmbH
Thorsten Rudolph	European Space Agency – Business and Incubation Centre (ESA BIC Bavaria)
Dr. Sebastian Scheiding	Astro- und Feinwerktechnik Adlershof GmbH
Michael Scheiding	Astro- und Feinwerktechnik Adlershof GmbH
Prof. Dr. Kai-Uwe Schrogl	European Space Agency
Dr. Mathians Spude	ArianeGroup GmbH
Sebastian Straube	Interstellar Ventures
Timo Stuffer	OHB System AG
Nicole Thalsofer	Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie e.V.
Sabine von der Recke	OHB System AG
Prof. Dr. Jan Wörner	European Space Agency
Dr. Frank Zimmermann	Telespazio VEGA Deutschland GmbH

Die Interviews fanden im Zeitraum Januar bis März 2019 statt.





10 Literatur

- ▶ AA (Auswärtiges Amt) (2019): Weltraumrecht. 13.12.2019, www.auswaertiges-amt.de/de/aussenpolitik/themen/internationales-recht/einzelfragen/weltraumrecht (13.1.2021)
- ▶ Airbus S.A.S. (2018): On-Orbit-Services. 20.6.2018, www.airbus.com/newsroom/press-releases/de/2018/06/RemoveDEBRIS-spacecraft-launched-from-ISS-with-Airbus-space-debris-capture-removal-technology.html (13.1.2021)
- ▶ Albat, D.; Haidn, O.; Langel, G. (2011): Antriebssysteme. In: Ley, W.; Wittmann, K.; Hallmann, W. (Hg.): Handbuch der Raumfahrttechnik. München, S.167–192
- ▶ As; dpa; dpa (2018b): Trump findet ISS zu teuer: Naht jetzt das Ende der Raumstation? FOCUS Online, 18.2.2018, www.focus.de/wissen/weltraum/raumfahrt/us-regierung-will-aus-der-finanzierung-aussteigen-naht-das-ende-der-raumstation-iss_id_8479642.html (13.1.2021)
- ▶ Aslanov, V.; Yudintsev, V. (2018): Motion Control of Space Tug During Debris Removal by a Coulomb Force. In: Journal of Guidance, Control, and Dynamics 41(7), S. 1476–1484
- ▶ Bagla, P. (2016): Suit, Craft Ready, But India's Space Odyssey Gets A Go Slow Signal. NDTV, 4.8.2016, www.ndtv.com/india-news/suit-craft-ready-but-in-dias-space-odyssey-gets-a-go-slow-signal-1439992 (13.1.2021)
- ▶ Ball, A.; Garry, J.; Lorenz, R.; Kerzhanovich, V. (2007): Planetary landers and entry probes. Cambridge
- ▶ BDI (Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (2018a): Weltraumbergbau: Aufbruch zu neuen Sternen. BDI, 26.7.2018, <https://bdi.eu/artikel/news/weltraumbergbau-aufbruch-zu-neuen-sternen/> (4.1.2019)
- ▶ BDI (2018b): Weltraumbergbau: Potenziale und Handlungsempfehlungen. Nr. 79, Berlin
- ▶ BDI (2019): Zukunftsmarkt Weltraum. Handlungsempfehlungen der deutschen Industrie. Berlin
- ▶ BDLI (Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie e.V.) (2018): Branchendaten der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie. 2017, www.bdli.de/sites/default/files/2018-04/Branchendaten_final.pdf (13.1.2021)
- ▶ Becker, M. (2007): Waffen im All: China rüstet für den himmlischen Krieg. SPIEGEL Online, 19.1.2007, www.spiegel.de/wissenschaft/weltall/waffen-im-all-china-ruestet-fuer-den-himmlischen-krieg-a-460829.html (13.1.2021)
- ▶ Berger, E. (2019): Russia's passive-aggressive reaction to SpaceX may mask a deeper truth. ars Technica, 7.3.2019, <https://arstechnica.com/science/2019/03/with-dragon-russian-critic-says-roscosmos-acting-left-behind/> (13.1.2021)
- ▶ Berrisford, C. (2018): Longer Term Investments. Space (Berrisford, C.). UBS, 30.11.2018, www.ubs.com/content/dam/WealthManagementAmericas/documents/space-p.pdf (18.1.2021)



- ▶ Bertemes, J.-P. (2017): Neue Dynamik im Weltall. Weshalb Space Mining plötzlich möglich scheint. science.lu, 8.5.2017. www.science.lu/de/neue-dynamik-im-weltall/weshalb-space-mining-ploetzlich-moeglich-scheint (13.1.2021)
- ▶ BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2018): Forschung und Innovation für die Menschen – Die Hightech-Strategie 2025. Berlin
- ▶ BMBF (o.J.): Tabelle 1.1.5 – BMBF Daten-Portal. Letzte Aktualisierung: 09/2020, www.datenportal.bmbf.de/portal/de/Tabelle-1.1.5.html (13.1.2021)
- ▶ BMF (Bundesministerium der Finanzen) (2019): Die Struktur des Bundeshaushaltes. www.bundeshaushalt.de/#/2019/soll/ausgaben/funktion/090168332.html (13.1.2021)
- ▶ BMVI (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung); BMU (Bundesumweltministerium); BMI (Bundesministerium des Innern); DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.) (2014): Erdbeobachtung für Mensch und Umwelt. Ergebnisbericht. www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz_um_13_91_185_erdbeobachtung_bf.pdf (13.1.2021)
- ▶ BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie) (2008): National Data Security Policy for Space-Based Earth Remote Sensing Systems. 15.4.2008, www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/satdsig-hintergrund-en.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (13.1.2021)
- ▶ BMWi (2012): Für eine zukunftsfähige deutsche Raumfahrt. Die Raumfahrtstrategie der Bundesregierung. Berlin, www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Technologie/zukunftsfaeheige-deutsche-raumfahrt.pdf?__blob=publicationFile&v=8 (13.1.2021)
- ▶ BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) (2017): Bericht der Koordinatorin für die Deutsche Luft- und Raumfahrt. Innovation und Hochtechnologie für eine Welt im Wandel. Berlin, www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Technologie/bericht-der-koordinatorin-lur.pdf?__blob=publicationFile&v=20 (13.1.2021)
- ▶ BMWi (2018): Luft- und Raumfahrt. www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/luft-und-raumfahrt.html (13.1.2021)
- ▶ BMWi (2019a): Nationale Industriestrategie 2030. Strategische Leitlinien für eine deutsche und europäische Industriepolitik. Berlin, www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/industriestrategie-2030.pdf?__blob=publicationFile&v=20 (13.1.2021)
- ▶ BMWi (2019b): Altmaier: BMWi-Haushalt 2020 stärkt Künstliche Intelligenz, Digitalisierung sowie Luft- und Raumfahrt. 26.6.2019, www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2019/20190626-altmaier-bmwi-haushalt-2020-staerkt-kuenstliche-intelligenz-digitalisierung-luft-und-raumfahrt.html (13.1.2021)



- ▶ BMWi (o.J.): Die Raumfahrtstrategie der Bundesregierung. www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Technologie/raumfahrtstrategie-bundesregierung.html (13.1.2021)
- ▶ Bockel, J.-M. (2018): ESC 2018 General report – The Future of the Space Industry. NATO Parliamentary Assembly, 19.10.2018, www.nato-pa.int/download-file?filename=%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2F2018-12%2F2018%20-%20THE%20FUTURE%20OF%20SPACE%20INDUSTRY%20-%20BOCKEL%20REPORT%20-%2020173%20ESC%2018%20E%20fin.pdf (13.1.2021)
- ▶ Boeing.com (2019): Take a Load Off. Starliner structural testing complete. 11.2.2019, www.boeing.com/features/2019/02/starliner-testing-02-19.page (20.6.2019)
- ▶ Boyd, I.; Buenconsejo, R.; Piskorz, D.; Lal, B.; Crane, K.; De La Rosa Blanco, E. (2017): On-Orbit Manufacturing and Assembly of Spacecraft. IDA Science and Technology Policy Institute, Washington, D.C., www.ida.org/idamedia/Corporate/Files/Publications/STPIPubs/2017/P-8335.ashx (13.1.2021)
- ▶ Boyle, A. (2019): One year after Planetary Resources faded into history, space mining retains its appeal. GeekWire, 4.11.2019, www.geekwire.com/2019/one-year-planetary-resources-faded-history-space-mining-retains-appeal/ (13.1.2021)
- ▶ Bpb (Bundeszentrale für politische Bildung) (2013): Der Weltraumvertrag und andere Vereinbarungen. <https://sicherheitspolitik.bpb.de/m7/articles/m7-14> (13.1.2021)
- ▶ BR24 (2020): Erster bemannter SpaceX-Flug zur ISS gestartet. 31.5.2020, www.br.de/nachrichten/wissen/spacex-erster-bemannter-flug-mit-der-crew-dragon-am-start,Rzzecny (13.1.2021)
- ▶ Brandt, M. (2019): Fast 2.000 Satelliten im Erdorbit. Statista GmbH, 20.3.2019, <https://de.statista.com/infografik/5592/satelliten-im-all/> (13.1.2021)
- ▶ Bryce Space and Technology (2017): Start-Up Space. Update on Investment in Commercial Space Ventures. https://brycetech.com/reports/report-documents/Bryce_Start_Up_Space_2017.pdf (13.1.2021)
- ▶ Bryce Space and Technology (2018): Start-Up Space. Update on Investment in Commercial Space Ventures. https://brycetech.com/reports/report-documents/Bryce_Start_Up_Space_2018.pdf (13.1.2021)
- ▶ Bryce Space and Technology (2019): State of the Satellite Industry Report. <https://brycetech.com/reports/report-documents/SSIR-2019-2-pager.pdf> (13.1.2021)
- ▶ Bryce Space and Technology (2020a): Global Space Economy at a Glance. https://brycetech.com/reports/report-documents/Bryce_2019_Global_Space_Economy.png (13.1.2021)
- ▶ Bryce Space and Technology (2020b): State of the Satellite Industry Report. June 2020. https://brycetech.com/reports/report-documents/SIA_SSIR_2020.pdf (13.1.2021)



- ▶ Bundesregierung (2017): Beitrag der zivilen Raumfahrt für Klimaschutz und Innovation. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Dieter Janecek, Anja Hajduk, Kai Gehring, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN – Drucksache 18/12662 –. Deutscher Bundestag, Drucksache 18/13078, Berlin
- ▶ Bundesregierung (2018a): Ziele und Zeitplan des angekündigten Weltraumgesetzes und weiterer Vereinbarungen im Bereich Raumfahrt. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Dieter Janecek Anja Hajduk, Kai Gehring, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN – Drucksache 19/3296 –. Deutscher Bundestag, Drucksache 19/3745, Berlin
- ▶ Bundesregierung (2018b): Völkerrechtliche Regelung des Weltraumbergbaus. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Roman Müller-Böhm, Stephan Thomae, Grigorios Aggelidis, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der FDP – Drucksache 19/5687 –. Deutscher Bundestag, Drucksache 19/6326, Berlin
- ▶ Bundesregierung (2019): Weltraumbergbau und Privatisierung der Rohstoffe im Weltall. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Fabio De Masi, Klaus Ernst, Christine Buchholz, weiterer Abgeordneter und der Fraktion DIE LINKE – Drucksache 19/11748 –. Deutscher Bundestag, Drucksache 19/12385, Berlin
- ▶ Calandrelli, E. (2016): OneWeb will mass-produce historic number of satellites with new Florida factory. Techcrunch, 19.4.2016, <http://techcrunch.com/2016/04/19/oneweb-will-mass-produce-historic-number-of-satellites-with-new-florida-factory/> (13.1.2021)
- ▶ CAO-GO (Cabinet Office – Government of Japan) (o.J.): Space Policy. <https://www8.cao.go.jp/space/english/index-e.html> (20.6.2019)
- ▶ Chaikin, A. (2007): A man on the moon. The voyages of the Apollo astronauts. New York
- ▶ Childress-Thompson, R.; Thomas, D.; Farrington, P. (2016): A framework for assessing the reusability of hardware (reusable rocket engines). NASA, <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20170000606> (13.1.2021)
- ▶ Clark, S. (2016): Florida factory to mass-produce satellites at record pace. Spaceflight Now, 19.4.2016, <https://spaceflightnow.com/2016/04/19/florida-factory-to-mass-produce-satellites-at-record-pace/> (13.1.2021)
- ▶ COPUOS (United Nations – Committee on the Peaceful Uses of Outer Space) (2018): Status of International Agreements relating to activities in outer space as at 1 January 2018. Nr. A/AC.105/C.2/2018/CRP.3, Wien, www.unoosa.org/documents/pdf/spacelaw/treatystatus/AC105_C2_2018_CRP03E.pdf (13.1.2021)
- ▶ Curcio, B.; Lan, T. (2018): Analysis | The rise of China's private space industry. SpaceNews, 25.5.2018, <https://spacenews.com/analysis-the-rise-of-chinas-private-space-industry/> (13.1.2021)



- ▶ Davis, J.; Mayberry, J.; Penn, J. (2019): On-Orbit Servicing: Inspection, Repair, Refuel, Upgrade, And Assembly of Satellites in Space. Center for Space Policy and Strategy, https://aerospace.org/sites/default/files/2019-05/Davis-Mayberry-Penn_OOS_04242019.pdf (13.1.2021)
- ▶ DER SPIEGEL (1978): RAUMFAHRT: Strahlendes Treibgut. In: DER SPIEGEL 5, 1978, S. 171–172
- ▶ Der Standard (2018): ISS könnte eigenes Touristenmodul erhalten. <https://derstandard.at/2000073456472/ISS-koennte-eigenes-Touristenmodul-erhalten> (13.1.2021)
- ▶ DGLR (Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt – Lilienthal-Oberth e. V.) (2017): Weltraumrecht. www.dglr.de/?id=2466 (13.1.2021)
- ▶ Dillow, C. (2016): VCs Invested More in Space Startups Last Year Than in the Previous 15 Years Combined. Fortune, 22.2.2016, <http://fortune.com/2016/02/22/vcs-invested-more-in-space-startups-last-year/> (13.1.2021)
- ▶ DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.) (2009): Ist Weltraumschrott gefährlich? https://www.dlr.de/content/de/downloads/news-archiv/2009/20090824_ist-weltraumschrott-gefaehrlich-_18916.pdf?__blob=publicationFile (13.1.2021)
- ▶ DLR (2013): Erdbeobachtung. Unseren Planeten erkunden, vermessen und verstehen. Bonn, www.dlr.de/rb/PortalData/38/Resources/dokumente/broschueren-pdf/Erdbeobachtung_280313_web_72dpi.pdf (13.1.2021)
- ▶ DLR Raumfahrtmanagement (o.J.a): Das DLR Raumfahrtmanagement. www.dlr.de/rd/desktopdefault.aspx/tabid-2099/3053_read-4706/ (13.1.2021)
- ▶ DLR Raumfahrtmanagement (o.J.b): Deutsche Raumfahrtakteure. Bundesländer – Organisation – Raumfahrt – raumfahrtbasierte Anwendungen. DLR, Köln/Bonn, <https://www.dlr.de/rd/PortalData/28/Resources/dokumente/publikationen/KatalogDeutscheRaumfahrtakteure.pdf> (13.1.2021)
- ▶ DLR Raumfahrtmanagement (o.J.c): Nationale Kontaktstelle Raumfahrt. Beratungsstelle für Raumfahrt im EU-Forschungsrahmenprogramm. www.dlr.de/rd/desktopdefault.aspx/tabid-2119/3050_read-4707/ (13.1.2021)
- ▶ DLR Raumfahrtmanagement (o.J.d): Europäisches Servicemodul (ESM). DLR, www.dlr.de/rd/desktopdefault.aspx/tabid-2277/3405_read-41694/ (13.1.2021)
- ▶ DLR Raumfahrtmanagement (o.J.e): Nationale Kontaktstelle Raumfahrt. Beratungsstelle für Raumfahrt im EU-Forschungsrahmenprogramm. DLR, www.dlr.de/rd/desktopdefault.aspx/tabid-2119/3050_read-4707/ (13.1.2021)
- ▶ DLR Raumfahrtmanagement (o.J.f): Weltraummüll-Forschung. www.dlr.de/rd/desktopdefault.aspx/tabid-2265/3376_read-5091 (13.1.2021)
- ▶ DOD (U.S. Department of Defense) (2019): Contracts for February 19, 2019. www.defense.gov/Newsroom/Contracts/Contract/Article/1760766/ (18.1.2021)
- ▶ Dpa (Deutsche Presse-Agentur) (2017): Erste Recycling-Rakete ins All geschossen. NWZonline, 1.4.2017, https://www.nwzonline.de/panorama/erste-recycling-rakete-ins-all-geschossen_a_31,2,3120472832.html (13.1.2021)



- ▶ Dpa (2019a): Weltraum-Bergbau: USA und Luxemburg wollen im All verdienen. ZEIT ONLINE, 10.5.2019, www.zeit.de/news/2019-05/10/usa-und-luxemburg-wollen-im-all-verdienen-190510-99-167485 (18.1.2021)
- ▶ Dpa (2019b): Weltraumschrott gefährdet ISS: Nasa-Chef nennt indischen Satelliten-Abschuss »furchtbar«. ZEIT ONLINE, 2.4.2019, www.zeit.de/news/2019-04/02/nasa-chef-nennt-indischen-satelliten-abschuss-furchtbar-190402-99-650619 (18.1.2021)
- ▶ Dpa; ESA; NASA (2017): Putztag im All: Clean Space sagt dem Weltraumschrott den Kampf an. Euronews, 21.4.2017, <https://de.euronews.com/2017/04/21/putztag-im-all-clean-space-sagt-dem-weltraumschrott-den-kampf-an> (13.1.2021)
- ▶ EK (Europäische Kommission) (2016): Neue Raumfahrtpolitik der Kommission soll spürbare Verbesserungen im Alltag bringen und Europa wettbewerbsfähiger machen. Pressemitteilung vom 26.10.2016, http://europa.eu/rapid/press-release_IP-16-3530_de.htm (20.6.2019)
- ▶ EK (2018): Space-COTS. Investitionsprojekt EIPP-20180614. <https://ec.europa.eu/eipp/desktop/de/projects/project-9638.html> (20.6.2019)
- ▶ Edwards, J. (2017): Goldman Sachs: space-mining for platinum is »more realistic than perceived«. Business Insider, 6.4.2017, www.businessinsider.de/goldman-sachs-space-mining-asteroid-platinum-2017-4?r=UK&IR=T (13.1.2021)
- ▶ EIB (European Investment Bank) (2019): The future of the European space sector. How to leverage Europe's technological leadership and boost investments for space ventures. (de Concini, A.; Toth, J.). Luxemburg
- ▶ ESA (European Space Agency) (2017): Viel Weltraumschrott und viele Ideen. www.esa.int/ger/ESA_in_your_country/Germany/ESA_Euronews_Viel_Weltraumschrott_und_viele_Ideen (13.1.2021)
- ▶ ESA (2018b): ESA budget 2018. www.esa.int/spaceinimages/Images/2018/01/ESA_budget_2018 (13.1.2021)
- ▶ ESA (2019a): ESA und UN-Kooperation zur Reduzierung von Weltraummüll. www.esa.int/ger/ESA_in_your_country/Germany/ESA_und_UN-Kooperation_zur_Reduzierung_von_Weltraummuell (13.1.2021)
- ▶ ESA (2019b): Space Rider: Europe's reusable space transport system. www.esa.int/Our_Activities/Space_Transportation/Space_Rider_Europe_s_reusable_space_transport_system (13.1.2021)
- ▶ ESA (o. J.a): Ariane 6. www.esa.int/Our_Activities/Launchers/Launch_vehicles/Ariane_6/ (13.1.2021)
- ▶ ESA (o. J.b): Die ESA: Fakten und Zahlen. www.esa.int/ger/ESA_in_your_country/Germany/Die_ESA_Fakten_und_Zahlen (13.1.2021)
- ▶ ESA (o. J.c): ESA Business Incubation Centres. www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/Business_Incubation/ESA_Business_Incubation_Centres (13.1.2021)
- ▶ ESA (o. J.d): European Service Module. www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Orion/European_Service_Module (13.1.2021)



- ▶ ESA (o.J.e): Industrial policy and geographical distribution. www.esa.int/About_Us/Business_with_ESA/How_to_do/Industrial_policy_and_geographical_distribution/ (13.1.2021)
- ▶ ESA (o.J.f): Iris for aviation. www.esa.int/Our_Activities/Telecommunications_Integrated_Applications/Iris_for_aviation (13.1.2021)
- ▶ ESA (o.J.g): Mitigating space debris generation. www.esa.int/Our_Activities/Space_Safety/Space_Debris/Mitigating_space_debris_generation (13.1.2021)
- ▶ ESA (o.J.h): SST-Weltraumüberwachung: Ein Katalog für die gefährlichsten Schrottteile. www.esa.int/ger/ESA_in_your_country/Germany/SST_Weltraum_ueberwachung_Ein_Katalog_fuer_die_gefaehrlichsten_Schrottteile/ (13.1.2021)
- ▶ ESA (o.J.i): Wie gefährlich ist der Schrott? www.esa.int/ger/ESA_in_your_country/Germany/Wie_gefaehrlich_ist_der_Schrott (13.1.2021)
- ▶ ESA, EK (2002): Galileo. Das europäische Programm für weltweite Navigationsdienste. ESA Publications Division (Hg.), Noordwijk
- ▶ ESPI (European Space Policy Institute) (2019): Space Venture Europe 2018. Entrepreneurship and Private Investment in the European Space Sector (Donati, A.; Cappella, M.; Shar, M.). ESPI-Report Nr. 67, Wien, <https://espi.or.at/publications/espi-public-reports/send/2-public-espi-reports/412-space-venture-europe-2018> (13.1.2021)
- ▶ Euroconsult (2017): Satellite Value Chain: Snapshot 2017. Key Trends and Indicators on Supply & Demand of the World Commercial Satellite Industry. Paris u. a. O.
- ▶ FAZ.NET (2019): Söders Raumfahrtprogramm. Kaum Geld für »Bavaria One«. 7.4.2019, www.faz.net/aktuell/wirtschaft/bavaria-one-kaum-geld-fuer-soeders-raumfahrtprogramm-16129106.html (7.5.2019)
- ▶ Feuerbacher, B. (2011): Raumfahrtnutzung. In: Ley, W.; Wittmann, K.; Hallmann, W. (Hg.): Handbuch der Raumfahrttechnik. München, S. 501–520
- ▶ FOCUS Online (o.J.): Spektakulärer Plan: Das haben die Russen mit der Raumstation ISS vor. www.focus.de/wissen/weltraum/weltraum-tourismus-spektakulaerer-plan-das-haben-die-russen-mit-der-raumstation-iss-vor_id_8407427.html (4.1.2019)
- ▶ Foust, J. (2015): Planet Labs Buying BlackBridge and its RapidEye Constellation. SpaceNews, 15.7.15, <https://spacenews.com/planet-labs-buying-black-bridge-and-its-rapideye-constellation/> (13.1.2021)
- ▶ Foust, J. (2018a): Asteroid mining company Planetary Resources acquired by blockchain firm. SpaceNews, 31.10.2018, <https://spacenews.com/asteroid-mining-company-planetary-resources-acquired-by-blockchain-firm/> (13.1.2021.)
- ▶ Foust, J. (2018b): Blue Origin plans to start selling suborbital spaceflight tickets next year. SpaceNews, 21.6.2018, <https://spacenews.com/blue-origin-plans-to-start-selling-suborbital-spaceflight-tickets-next-year/> (13.1.2021)



- ▶ Foust, J. (2018c): A trillion-dollar space industry will require new markets. SpaceNews, 5.7.2018, <https://spacenews.com/a-trillion-dollar-space-industry-will-require-new-markets/> (13.1.2021)
- ▶ Foust, J. (2018d): NASA Inspector General skeptical of ISS commercialization plans. SpaceNews, 31.7.2018, <https://spacenews.com/nasa-inspector-general-skeptical-of-iss-commercialization-plans/> (13.1.2021)
- ▶ Foust, J. (2019): Almost Ready: SpaceX has work to do before Dragon is ready to carry crew. SpaceNews, 21.3.2019, <https://spacenews.com/crew-dragon-finally-makes-it-to-space-but-theres-work-to-do-before-its-ready-to-carry-crew/> (13.1.2021)
- ▶ Freie Hansestadt Bremen (o.J.): Clusterstrategie 2020 für nachhaltiges Wachstum und Beschäftigung. Integrierte Landesstrategie zur Entwicklung der Innovationscluster Luft- und Raumfahrt, Windenergie und Maritime Wirtschaft/Logistik. <https://www.wirtschaft.bremen.de/sixcms/media.php/13/Clusterstrategie2020%20FINAL.pdf> (13.1.2021)
- ▶ Ge, H.; Hongpei, Z. (2019): China's commercial space sector poised for take off, but investors remain concerned over commercialization. Global Times, 6.1.2019, www.globaltimes.cn/content/1134791.shtml (13.1.2021)
- ▶ Goh, D. (2018): Japan looks to space industry to stimulate stagnant economy. SpaceTech Asia, 1.2.2018, www.spacetechnasia.com/japan-looks-to-space-industry-to-stimulate-stagnant-economy/ (20.6.2019)
- ▶ Goswami, N. (2019): China's Get-Rich Space Program. The Diplomat, 28.2.2019, <https://thediplomat.com/2019/02/chinas-get-rich-space-program/> (13.1.2021)
- ▶ Greene, K. (2017): Why India is investing in space. It isn't just about the country's rising nationalism. Slate, 17.3.2017, www.slate.com/articles/technology/future_tense/2017/03/why_india_is_investing_in_space.html (13.1.2021)
- ▶ GSA (European Global Navigation Satellite Systems Agency) (2018): GNSS Downstream Market. 19.6.2018, www.gsa.europa.eu/market/gnss-market (27.5.2019)
- ▶ Haaf, G. (1978): Strahlender Schrott aus dem All. In: DIE ZEIT Archiv 6, 3.2.1978, www.zeit.de/1978/06/strahlender-schrott-aus-dem-all (2.11.2020)
- ▶ Hahn, R. (2016): Aufbruch zu den Schätzen des Alls. FAZ.NET, 11.11.2016, www.faz.net/aktuell/wissen/weltraum/aufbruch-zu-den-schaetzen-des-alls-14512037.html (4.1.2019)
- ▶ Harris Interactive (2019): Europeans and space activities. A Harris interactive study for ESA. http://esamultimedia.esa.int/docs/corporate/European_and_space_activities_Harris_results.pdf (13.1.2021)
- ▶ Hartbricht, I. (2019): Start ins Ungewisse. In: VDI Nachrichten 26/27, S. 12–13
- ▶ Hegmann, G. (2016a): Tiangong 2: China schickt Taikonauten zum »Himmelspalast« ins All. WELT.de, 17.10.2016, www.welt.de/wissenschaft/weltraum/article158813896/China-schickt-Taikonauten-zum-Himmelspalast-ins-All.html (13.1.2021)



- ▶ Hegmann, G. (2016b): ISS: 2,50 Euro – zu viel für den Außenposten der Menschheit? WELT.de, 24.11.2016, www.welt.de/wirtschaft/article159719461/2-50-Euro-zu-viel-fuer-den-Aussenposten-der-Menschheit.html (13.1.2021)
- ▶ Hegmann, G. (2018): Starlink-Projekt: Mit seinem Weltraum-Internet denkt Musk in neuen Dimensionen. WELT.de, 19.2.2018, www.welt.de/wirtschaft/article173748065/Starlink-Projekt-Musk-plant-Weltraum-Internet-mit-12-000-Satelliten.html (13.1.2021)
- ▶ Henry, C. (2018): Ariane 6 is nearing completion, but Europe’s work is far from over. SpaceNews, 15.8.2018, <https://spacenews.com/ariane-6-is-nearing-completion-but-europes-work-is-far-from-over/> (13.1.2021)
- ▶ Hirzinger, G.; Landzettel, K.; Kaiser, C. (2011): Neue Technologien und Robotik. In: Ley, W.; Wittmann, K.; Hallmann, W. (Hg.): Handbuch der Raumfahrttechnik. München, S. 597–619
- ▶ Holland, M. (2016): Nach Ende der ISS: Roskosmos setzt auf neue internationale Weltraumstation. Heise online, 30.3.2016, www.heise.de/newsticker/meldung/Nach-Ende-der-ISS-Roskosmos-setzt-auf-neue-internationale-Weltraumstation-3157354.html (13.1.2021)
- ▶ Holland, M. (2019): Chinas Sonde Chang’e 4. Mehr Bilder und Videos von der Rückseite des Mondes. Heise online, 14.1.2019, www.heise.de/newsticker/meldung/Chinas-Sonde-Chang-e-4-Mehr-Bilder-und-Videos-von-der-Rueckseite-des-Mondes-4272958.html (13.1.2021)
- ▶ Holsten, H. (2011): Trägersysteme. In: Ley, W.; Wittmann, K.; Hallmann, W. (Hg.): Handbuch der Raumfahrttechnik. München, S. 131
- ▶ IISL (International Institute of Space Law) (2015): Position Paper on Space Resource Mining. Adopted by consensus by the Board of Directors on 20 December 2015, 20.12.2015, <http://iislwebo.www.nlss1.a2hosted.com/wp-content/uploads/2015/12/SpaceResourceMining.pdf> (13.1.2021)
- ▶ ISRO (Indian Space Research Organisation) (2016): RLV-TD. www.isro.gov.in/launcher/rlv-td (13.1.2021)
- ▶ ISRO (Indian Space Research Organisation) (o.J.): Vision and Mission Statements. www.isro.gov.in/about-isro/vision-and-mission-statements (13.1.2021)
- ▶ JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) (1981): 3-2-2-1 Settlement of Claim between Canada and the Union of Soviet Socialist Republics for Damage Caused by »Cosmos 954« (Released on April 2, 1981). www.jaxa.jp/library/space_law/chapter_3/3-2-2-1_e.html (13.1.2021)
- ▶ JAXA (2018): Business Overview. Support Program for starting up Innovation Hub on the National Research and Development Agency.
- ▶ Jones, A. (2019): Q&A | China’s OneSpace ready for first orbital launch attempt. SpaceNews, 26.3.2019, <https://spacenews.com/qa-chinas-onespace-ready-for-first-orbital-launch-attempt/> (13.1.2021)
- ▶ Jones, H. (2018): The Recent Large Reduction in Space Launch Cost. 48th International Conference on Environmental Systems, 8-12 July 2018, Albu-



- querque, https://ttu-ir.tdl.org/bitstream/handle/2346/74082/ICES_2018_81.pdf?sequence=1&isAllowed=y. (13.1.2021)
- ▶ Kannenberg, A. (2015): Neues US-Gesetz erlaubt kommerzielle Ausbeutung von Asteroiden. Heise online, 12.11.2015, www.heise.de/newsticker/meldung/Neues-US-Gesetz-erlaubt-kommerzielle-Ausbeutung-von-Asteroiden-2919400.html (13.1.2021)
 - ▶ Kopp, A.; Sippel, M.; Stappert, S.; Darkow, N.; Gerstmann, J.; Krause, S.; Stefaniak, D.; Beerhorst, M.; Thiele, T.; Gülhan, A.; Kronen, R. et al. (2017): Forschung an Systemen und Technologien für wiederverwendbare Raumtransportsysteme im DLR-Projekt AKIRA. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, 5.–7.9.2017, DGLR, Bonn
 - ▶ Koren, M. (2017): China's Growing Ambitions in Space. The Atlantic, 23.1.2017, www.theatlantic.com/science/archive/2017/01/china-space/497846/ (13.1.2021)
 - ▶ Kramer, M. (2014): NASA Suspends Most Cooperation With Russia; Space Station Excepted. Space.com, 3.4.2014, www.space.com/25339-nasa-suspends-russia-cooperation-ukraine.html (13.1.2021)
 - ▶ Kunhikrishnan, P. (2019): India's Human Spaceflight Programme: Gaganyaan. Präsentation zur 56. Session der STSC-UNCOPUOS in Wien, U R Rao Satellite Centre, www.unoosa.org/documents/pdf/copuos/stsc/2019/tech-47E.pdf (13.1.2021)
 - ▶ Lassmann, J.; Obersteiner, M. (2011): Gesamtsysteme. In: Ley, W.; Wittmann, K.; Hallmann, W. (Hg.): Handbuch der Raumfahrttechnik. München, S. 132–149
 - ▶ Lee, R. (2012): Law and Regulation of Commercial Mining of Minerals in Outer Space. Space Regulations Library 7, Dordrecht
 - ▶ Lindinger, M. (2017): Raumfahrtziele 2.0: Zurück zum Mond. FAZ.NET, 12.2.2017, www.faz.net/aktuell/wissen/weltraum/raumfahrtziele-2-0-zurueck-zum-mond-14860391.html (13.1.2021)
 - ▶ Lorenzen, D. H. (2019): Verzögerte Pläne für Internet-Konstellation: Warten auf Hunderte OneWeb-Satelliten. Deutschlandfunk, 8.1.2019, www.deutschlandfunk.de/verzoegerte-plaene-fuer-internet-konstellation-warten-auf.732.de.html?dram:article_id=437556 (13.1.2021)
 - ▶ Maier, Y. (2018): Mit Netz und Harpune auf Jagd nach Weltraumschrott. BR24, 29.11.2018, www.br.de/nachrichten/wissen/mit-netz-und-harpune-auf-jagd-nach-weltraumschrott,R8WMLJE (13.1.2021)
 - ▶ Maini, A.; Agrawal, V. (2014): Satellite technology. Principles and applications. Engineering professional collection, Chichester
 - ▶ Marshall, W. (2018): NASA Enters Into Blanket Purchase Agreement with Planet. Planet, 3.10.2018, www.planet.com/pulse/nasa-blanket-purchase-agreement/ (3.6.2019)
 - ▶ McClintock, B. (2017): The Russian Space Sector: Adaptation, Retrenchment, and Stagnation. In: Space & Defense 10(1), S. 3–8
 - ▶ McLeod, C.; Krekeler, M. (2017): Sources of Extraterrestrial Rare Earth Elements: To the Moon and Beyond. In: Resources 6(3), S. 40



- ▶ Menn, A. (2016): SpaceX-Chef: Wie Elon Musk den Mars besiedeln will. WirtschaftsWoche, 28.9.2016, www.wiwo.de/technologie/forschung/spacex-chef-wie-elon-musk-den-mars-besiedeln-will/14611136-all.html (13.1.2021)
- ▶ Milne, G. (2019): The Space Tech VC View: What Does 2019 Hold For European Startups? Forbes, 17.1.2019, www.forbes.com/sites/gemmamilne/2019/01/17/the-space-tech-vc-view-what-does-2019-hold-for-european-startups/?sh=3a6021a59231 (13.1.2021)
- ▶ Mokler, F. (2018): Raumfahrt: »Asteroidenbergbau ist nicht ausdrücklich verboten«. 24.10.2018, www.spektrum.de/news/asteroidenbergbau-das-welt-raumrecht-regelt-nicht-eindeutig-wer-im-all-bergbau-betreiben-darf/1602302 (13.1.2021)
- ▶ Mrasek, V. (2007): Chinas Waffentest: Satelliten-Abschuss steigert Crash-Gefahr im All. SPIEGEL Online, 29.1.2007, www.spiegel.de/wissenschaft/welt/all/chinas-waffentest-satelliten-abschuss-steigert-crash-gefahr-im-all-a-462728.html (13.1.2021)
- ▶ NASA (National Aeronautics and Space Administration) (2010): On-Orbit Satellite Servicing Study. Project Report. NASA, Greenbelt, https://sspd.gsfc.nasa.gov/images/NASA_Satellite_Servicing_Project_Report_2010A.pdf (18.1.2021)
- ▶ NASA (2018): NASA Announces New Partnerships for Commercial Lunar Payload Delivery Services. <https://solarsystem.nasa.gov/news/774/nasa-announces-new-partnerships-for-commercial-lunar-payload-delivery-services/> (18.1.2021)
- ▶ NASA (2020): Crew Dragon – Commercial Crew Program. Letzte Aktualisierung: 10.11.2020, <https://blogs.nasa.gov/commercialcrew/tag/crew-dragon/> (18.1.2021)
- ▶ NASA (o.J.a): Commercial Crew Program – Essentials. Letzte Aktualisierung: 14.8.2019, www.nasa.gov/content/commercial-crew-program-the-essentials/#.VjOJ3berRaT (18.1.2021)
- ▶ NASA (o.J.b): Frequently Asked Questions: Orbital Debris. Letzte Aktualisierung: 2.9.2011, www.nasa.gov/news/debris_faq.html (18.1.2021)
- ▶ NASA (o.J.c): Mars InSight Mission. <https://mars.nasa.gov/insight/> (13.1.2021)
- ▶ National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2016): Achieving Science with CubeSats. Thinking Inside the Box. Washington, D.C.
- ▶ Nelson, T. (2011): The Moon Agreement and Private Enterprise: Lessons from Investment Law. In: ILSA Journal of International & Comparative Law 17(2), Article 6
- ▶ Northon, K. (2018): NASA Unveils Sustainable Campaign to Return to Moon, on to Mars. NASA, www.nasa.gov/feature/nasa-unveils-sustainable-campaign-to-return-to-moon-on-to-mars (18.1.2021)
- ▶ Northon, K. (2019): NASA Opens International Space Station to New Commercial Opportunities, Private Astronauts. NASA, Pressemitteilung 19-044 vom 7.6.2019, letzte Aktualisierung: 16.3.2020 www.nasa.gov/press-release/



- nasa-opens-international-space-station-to-new-commercial-opportunities-private (18.1.2021)
- ▶ NSR (Northern Sky Research) (2019): NSR Report Forecasts \$ 4.5 Billion in Cumulative Revenues from In-Orbit Satellite Services by 2028. Cambridge, www.nsr.com/nsr-report-forecasts-4-5-billion-in-cumulative-revenues-from-in-orbit-satellite-services-by-2028/ (18.1.2021)
 - ▶ Ntv.de, mau; AFP; dpa (2019): Weltraumschrott erbobt NASA-Chef: Indischer Satelliten-Abschuss gefährdet ISS. 2.4.2019, www.n-tv.de/wissen/Indischer-Satelliten-Abschuss-gefaehrdet-ISS-article20943637.html (18.1.2021)
 - ▶ O’Kane, S. (2020): SpaceX will launch private citizens into orbit. The Verge, 18.2.2020, www.theverge.com/2020/2/18/21142137/spacex-tourism-orbit-earth-private-citizens-dragon-space-flight (18.1.2021)
 - ▶ OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) (2019): The Space Economy in Figures. How Space Contributes to the Global Economy. Paris, www.oecd-ilibrary.org/docserver/c5996201-en.pdf?expires=1567008823&id=id&accname=ocid53028146&checksum=F0F0C223B3636CC74003D1607241CF19 (18.1.2021)
 - ▶ OHB SE (2019): »Willst Du dabei gewesen sein ...«: Raumfahrtkonzern OHB startet Employer Branding Kampagne. Pressemitteilung vom 17.6.2019, Bremen, www.presseportal.de/pm/69441/4298810 (18.1.2021)
 - ▶ Orion Span Inc. (2018): Orion Span announces the world’s first ever luxury space hotel. 5.4.2018, Houston, www.orionspan.com/orion-span-announces-space-hotel (18.1.2021)
 - ▶ Piskorz, D.; Jones, K. (2018): On-orbit assembly of space assets: A path to affordable and adaptable space infrastructure. The Aerospace Corporation, https://aerospace.org/sites/default/files/2018-05/OnOrbitAssembly_0.pdf (18.1.2021)
 - ▶ Ponnappan, R. (2018): The technology behind India’s Reusable Launch Vehicle. Spacetechnasia.com, 20.6.2019, www.spacetechnasia.com/technology-behind-indias-reusable-launch-vehicle/ (18.1.2021)
 - ▶ Poponak, N.; Porat, M.; Bishop, M.; Hallam, C.; Feldman, B.; Terry, H.; Lee, A.; Wood, S.; Laphorn, P.; Parsons, G.; Correa, T. et al. (2017): Space – The Next Investment Frontier. The Goldman Sachs Group Inc., Profiles in Innovation 8, New York
 - ▶ PTI (2018): Gaganyaan mission to take Indian astronaut to space by 2022. The Hindu, 15.8.2018, www.thehindu.com/news/national/gaganyaan-mission-to-take-indian-astronaut-to-space-by-2022-pm-modi/article24695817.ece (18.1.2021)
 - ▶ Rakyat, B. (2016): Indonesia’s BRIsat Satellite to Launch Next Week. Indonesia Investments, 1.6.2016, www.indonesia-investments.com/news/todays-headlines/bank-rakyat-indonesia-s-brisat-satellite-to-launch-next-week/item6876 (18.1.2021)



- ▶ Rapp, D. (2018): Use of Extraterrestrial Resources for Human Space Missions to Moon or Mars. Cham
- ▶ Raschke, M. (2018): Tourismus im Weltraum: 55 Millionen Euro für zehn Tage Schwerelosigkeit – was Touristen im All erwartet. Handelsblatt, 2.9.2018, www.handelsblatt.com/arts_und_style/lifestyle/tourismus-im-weltraum-55-millionen-euro-fuer-zehn-tage-schwerelosigkeit-was-touristen-im-all-erwartet/22901364.html?ticket=ST-205510-iK7b3E1nXNeoIJTxMycg-ap4 (18.1.2021)
- ▶ Research and Markets (2018): Global Space Debris Monitoring and Removal Market 2018-2022, Technavio, www.researchandmarkets.com/research/p8gts7/global_space?w=5 (13.6.2019)
- ▶ Russian Space Web (o. J.): Mir Space Station. www.russianspaceweb.com/mir.html (18.1.2021)
- ▶ Schadwinkel, A.; Schneider, P. (2019): Lunar Orbital Platform-Gateway: Bis zum Mond und noch viel weiter. ZEIT ONLINE, 30.1.2019, www.zeit.de/wissen/2019-01/lunar-orbital-platform-gateway-nasa-raumstation-mond (18.1.2021)
- ▶ Schneider, P. (2018a): New Space – Die jungen Wilden im Weltall. WirtschaftsWoche, 20.5.2018, www.wiwo.de/erfolg/gruender/newspace-die-jungen-wilden-im-weltall/22580566.html (18.1.2021)
- ▶ Schneider, P. (2018b): Goldrausch im All. Wie Elon Musk, Richard Branson und Jeff Bezos den Weltraum erobern – Silicon Valley, New Space und die Zukunft der Menschheit. München
- ▶ Schubert, C. (2018): Satellitentransport: Space X läuft Arianespace den Rang ab. FAZ.NET, 9.1.2018, www.faz.net/aktuell/wirtschaft/unternehmen/space-x-von-elon-musk-schlaegt-arianespace-15382755.html (18.1.2021)
- ▶ Schwedes, L. (2019): Bundesregierung will 2020 Entwurf für Weltraumgesetz vorlegen. Heise online, 31.1.2019, www.heise.de/newsticker/meldung/Bundesregierung-will-2020-Entwurf-fuer-Weltraumgesetz-vorlegen-4295537.html (18.1.2021)
- ▶ Seidler, C. (2017): Weltraumschrott: »In 100 Jahren könnte es zu gefährlich sein, ins All zu fliegen«. SPIEGEL Online, 20.4.2017, www.spiegel.de/wissenschaft/weltall/weltraumschrott-experte-donald-kessler-zu-den-gefahren-a-1143864.html (18.1.2021)
- ▶ SES (2017): Refuelling On-Orbital Satellites. 30.6.2017, www.ses.com/blog/refuelling-orbital-satellites (18.1.2021)
- ▶ Skaar, R. (2007): Commercialisation of space and its evolution. Will new ways to share risks and benefits open up a much larger space market? ESPI, Report Nr. 4, Wien
- ▶ Skormorohov, R.; Welch, C.; Hein, A. (2016): In-orbit Spacecraft Manufacturing: Near-Term Business Cases Individual Project Report. Research Report Nr. hal-01363589, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01363589> (18.1.2021)
- ▶ Slobodian, R. (2015): Selling space colonization and immortality: A psychosocial, anthropological critique of the rush to colonize Mars. In: Acta Astronautica 113, S. 89–104



- ▶ Space Angels (2019): Space Investment Quarterly. Q1 2019, <https://www.spaceangels.com/post/space-investment-quarterly-q1-2019> (18.5.2019)
- ▶ Space Foundation (2017): The space report 2017: the authoritative guide to global space activity. Colorado Springs
- ▶ SpacePolicyOnline.com (2019): China's Chang'e-4 lands on lunar farside, early January 2019. 2.1.2019, <https://spacepolicyonline.com/events/chinas-change-4-lands-on-lunar-farside-early-january-2019/> (18.1.2020)
- ▶ SpaceTec Partners; BHO Legal (2016): NewSpace. Geschäftsmodelle an der Schnittstelle von Raumfahrt und digitaler Wirtschaft. Chancen für Deutschland in einer vernetzten Welt. www.spacetec.partners/wp-content/uploads/2019/04/bmwi-new-space-geschaeftsmodelle-an-der-schnittstelle-von-raumfahrt-und-digitaler-wirtschaft.pdf (18.1.2021)
- ▶ SpaceX (Space Exploration Technologies Corp.) (2019): Falcon User's Guide. https://queenslake.net/_documents/marina_test/falcon_users_guide.pdf (18.1.2021)
- ▶ Statista GmbH (2019): Anteil der Ausgaben für staatliche Weltraumprogramme am Bruttoinlandsprodukt ausgewählter Länder im Jahr 2017. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/991551/umfrage/anteil-der-ausgaben-fuer-weltraumprogramme-am-bip-nach-laendern-weltweit/> (18.1.2021)
- ▶ Stirn, A. (2016): Die Mehrweg-Rakete. In: Technology Review Special, S. 62
- ▶ Stofan, E. (2017): When We Explore Space, We Go Together. Leaving Earth requires international collaboration. Slate, 7.3.2017, www.slate.com/articles/technology/future_tense/2017/03/space_exploration_requires_international_collaboration.html (18.1.2021)
- ▶ Strada, G.; Sasanelli, N. (2018): Growing the Space Economy: The Downstream Segment as a Driver. www.piar.it/report09today/Strada2018.pdf (18.1.2021)
- ▶ Tagesspiegel (2019): Endliche Weiten. Wettlauf um innovative Space Firmen: Auch die Bundesregierung will einsteigen und ein nationales Weltraumgesetz auf den Weg bringen. In: Tagesspiegel 23721, S. 24
- ▶ Takakura, H. (2018): Recent Trends in Japan's Space Policy – Centered on Promoting the Space Industry. The Future of Space as Global Commons. In: Japan SPOTLIGHT 6, S. 24–27
- ▶ Tartar, A.; Qiu, Y. (2018): The New Rockets Racing to Make Space Affordable. Bloomberg Businessweek, 26.7.2018, www.bloomberg.com/graphics/2018-rocket-cost/ (18.1.2021)
- ▶ The Agility Effect (2017): Renovierungsmaßnahmen am GRAVES-Radar. 3.4.2017, www.theagilityeffect.com/de/article/renovierungsmaßnahmen-graves-radar/ (18.1.2021)
- ▶ The White House (2017): Space Policy Directive–1 of December 11, 2017. Reinvigorating America's Human Space Exploration Program. Presidential Documents, Federal Register 82(239), S. 59501–59502
- ▶ The White House (2018a): Space Policy Directive-2, Streamlining Regulations on Commercial Use of Space. Presidential Memoranda, 24.5.2018, www.white



- house.gov/presidential-actions/space-policy-directive-2-streamlining-regulations-commercial-use-space/ (18.1.2021)
- ▶ The White House (2018b): Space Policy Directive-3, National Space Traffic Management Policy. Presidential Memoranda, 18.6.2018, www.whitehouse.gov/presidential-actions/space-policy-directive-3-national-space-traffic-management-policy/ (18.1.2021)
 - ▶ The White House (2019): Text of Space Policy Directive-4: Establishment of the United States Space Force. Presidential Memoranda, 19.2.2019, www.whitehouse.gov/presidential-actions/text-space-policy-directive-4-establishment-united-states-space-force/ (18.1.2021)
 - ▶ U.S. Space Command (2012): Space Surveillance. 4.1.2012, www.au.af.mil/au/awc/awcgate/usspc-fs/space.htm (13.6.2019)
 - ▶ Uchino, T. (2019): How should Japan's space agency foster NewSpace? The Space Review, 7.1.2019, www.thespacereview.com/article/3631/1 (18.1.2021)
 - ▶ UCS (Union of Concerned Scientists) (2005): UCS Satellite Database. 8.12.2005 (Letzte Aktualisierung: 1.8.2020), www.ucsusa.org/resources/satellite-database (2.11.2020)
 - ▶ UNODA (United Nations Office of Disarmament Affairs) (1967): Disarmament Treaties Database: Outer Space Treaty. Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, including the Moon and Other Celestial Bodies. http://disarmament.un.org/treaties/t/outer_space (18.1.2021)
 - ▶ UNOOSA (United Nations Office for Outer Space Affairs) (2019): UNOOSA and ESA join forces to address the space debris challenge. Pressemitteilung vom 24.5.2019, www.unoosa.org/oosa/en/informationfor/media/2019-unis-os-510.html (19.8.2019)
 - ▶ UNOOSA (United Nations Office for Outer Space Affairs) (1966): Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, including the Moon and Other Celestial Bodies. Resolution adopted by the general assembly. www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/spacelaw/treaties/outerspacetreaty.html (18.1.2021)
 - ▶ Vernile, A. (2017): The Rise of Private Actors in the Space Sector. Executive Summary. European Space Policy Institute, Wien
 - ▶ Wall, M. (2019): China Just Landed on the Moon's Far Side – and Will Probably Send Astronauts on Lunar Trips. Space.com, 5.1.2019, www.space.com/42914-china-far-side-moon-landing-crewed-lunar-plans.html (18.1.2021)
 - ▶ WD (Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages) (2018a): FuE-Ausgaben für Luft- und Raumfahrtforschung. Dokumentation. Deutscher Bundestag, WD 8 - 3000 - 062/18, Berlin
 - ▶ WD (2018b): Privatwirtschaftliche Nutzung von im Weltraum abgebauten Ressourcen nach dem Weltraumvertrag. Sachstand. Deutscher Bundestag, WD 2 - 3000 - 077/18, Berlin



- ▶ WELT.de (2014): Weltraumschrott zwingt »ISS« zu Ausweichmanöver. 28.10.2014, www.welt.de/wissenschaft/weltraum/article133728727/Weltraumschrott-zwingt-ISS-zu-Ausweichmanoever.html (18.1.2021)
- ▶ Welty, U. (2019): Warum Deutschland ein Weltraumgesetz braucht. Stephan Hobe im Gespräch mit Ute Welty. Deutschlandfunk Kultur, 23.1.2019, www.deutschlandfunkkultur.de/raumfahrt-warum-deutschland-ein-weltraumgesetz-braucht.1008.de.html?dram:article_id=439090 (18.1.2021)
- ▶ WIRED Staff (2018): Das erste Weltraumhotel nimmt Reservierungen an. 21.2.2018, <https://www.gq-magazin.de/auto-technik/articles/bigelow-nimmt-jetzt-reservierungen-fuer-weltraumhotel-an> (18.1.2021)
- ▶ Wittmann, K.; Hanowski, N. (2011): Raumfahrtmissionen. In: Ley, W.; Wittmann, K.; Hallmann, W. (Hg.): Handbuch der Raumfahrttechnik. München, S.42–55
- ▶ Wolfrum, R. (1984): Die Internationalisierung staatsfreier Räume. Beiträge zum ausländischen öffentlichen Recht und Völkerrecht 85, Berlin/Heidelberg
- ▶ Wood, J. (2019): The countries with the most satellites in space. World Economic Forum, 4.3.2019, www.weforum.org/agenda/2019/03/chart-of-the-day-the-countries-with-the-most-satellites-in-space/ (18.1.2021)
- ▶ Wörner, J. (2020): Brexit and a Bridge over Troubled Water. 2.2.2020, <https://blogs.esa.int/janwoerner/2020/02/02/brexit-and-a-bridge-over-troubled-water/> (18.1.2021)
- ▶ Worrall, S. (2017): Die Menschheit überlebt nur, wenn sie den Mars kolonisiert. National Geographic, 5.3.2018, www.nationalgeographic.de/wissenschaft/2018/03/die-menschheit-ueberlebt-nur-wenn-sie-den-mars-kolonisiert (18.1.2021)
- ▶ Wunderlich-Pfeiffer, F. (2016): Satelliteninternet: Wie großensinnig ist SpaceX? Golem.de, 18.11.2016, www.golem.de/news/satelliteninternet-wie-groessenwahn-sinnig-ist-spacex-1611-124556.html (18.1.2021)
- ▶ Zabel, M. (2018): Alternative zur ISS: Die NASA plant eine Raumstation im Mondorbit. Aio – das Magazin für die Mobilität der Zukunft, <https://aiomag.de/alternative-zur-iss-die-nasa-plant-eine-raumstation-im-mondorbit-9908> (7.1.2019)
- ▶ ZEIT ONLINE (2015): Internationale Raumstation ISS: Russland baut eigene Raumstation. 25.2.2015, www.zeit.de/wissen/2015-02/iss-russland-raumstation (18.1.2021)
- ▶ ZEIT ONLINE/dpa (2012): Raumfahrt: Goldsucher im Weltall. 21.4.2012, www.zeit.de/wissen/2012-04/weltall-rohstoffe (18.1.2021)
- ▶ Ziegler, P.-M. (2014): Raumfahrt mit System: Wie ein Galileo-Navigationssatellit entsteht. C't magazin für computer technik, 2.10.2014, www.heise.de/ct/ausgabe/2014-22-Wie-ein-Galileo-Navigationssatellit-entsteht-2405536.html (18.1.2021)



11 Anhang

11.1 Abbildungen

Abb. 1	Zusammenfassung der Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken (SWOT)	10
Abb. 2	Kernfragen der TAB-Studie	13
Abb. 3	Visualisierung des Lunar Gateways	22
Abb. 4	SpaceX Crew Dragon dockt an ISS an	26
Abb. 5	Boeing CST-100 Starliner	27
Abb. 6	Anteil der Ausgaben für Weltraumprogramme am BIP nach Ländern weltweit 2017	31
Abb. 7	Akteurslandschaft New Space	36
Abb. 8	Globaler Raumfahrtmarkt (Umsätze 2019)	39
Abb. 9	Upstream- und Downstreamsektoren in der Weltraumindustrie	40
Abb. 10	Anwendungsbereiche und Geschäftsfelder von New Space	45
Abb. 11	Anzahl aktiver Satelliten im Erdorbit	47
Abb. 12	Objekte in Erdumlaufbahnen und deren Entfernung von der Erde	48
Abb. 13	Verwendungszwecke von Satelliten	49
Abb. 14	Anteile am Downstreamsegment	51
Abb. 15	Weltraumschrott im niedrigeren Erdorbit	62
Abb. 16	Investitionen in New-Space-Start-ups zwischen 2000 und 2018	72
Abb. 17	Verteilung der VC-Investoren weltweit (382 gesamt)	75
Abb. 18	SpaceX Falcon Heavy Demo Flug – Landung	80
Abb. 19	Roboterarm fängt einen funktionsuntüchtigen Satelliten ein (eDeorbit's robotic arm)	90
Abb. 20	Zentrale Meilensteine SpaceX	93

11.2 Tabellen

Tab. 1	Beschreibung der Marktsegmente im Upstream und Downstream	42
Tab. 2	Top-20-Fördermittelempfänger Bundesfördermittel im Förderschwerpunkt IB – Nationale Weltraumforschung und Weltraumtechnik (2014–2019)	77



