

# WELTRAUM

Trendbericht über die Nutzung  
durch den Menschen und die  
Auswirkungen auf die Umwelt

Für Mensch & Umwelt

Umwelt   
Bundesamt

# Impressum

## Herausgeber:

Umweltbundesamt  
FG I 1.1 Grundsatzfragen, Nachhaltigkeitsstrategien und  
-Szenarien, Ressourcenschonung  
Postfach 14 06  
06813 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
bürgerservice@uba.de  
Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

 /umweltbundesamt

 /umweltbundesamt

## Autorinnen und Autoren:

Gideon Hussels, Ulrike Knörzer, Benno Keppner,  
Lena Domröse  
(adelphi research gGmbH, Berlin)

Stephan Richter, Tobias Hungerland  
(Institut für Innovation und Technik [iit] in der VDI/VDE  
Innovation + Technik GmbH, Berlin)

Mitarbeit von: Helin Aras, Karina Rudi, Tobias Andreas Stolz  
(adelphi research gGmbH, Berlin)

## Redaktion:

Sylvia Veenhoff, Fachgebiet I 1.1: Grundsatzfragen,  
Nachhaltigkeitsstrategien und -szenarien,  
Ressourcenschonung

## Satz und Layout:

Tilman Zastrow, adelphi

## Publikationen als pdf:

[www.umweltbundesamt.de/publikationen](http://www.umweltbundesamt.de/publikationen)


## Bildquellen:

Titelbild: Jeremy Thomas/unsplash

S. 14 Daniel Olah/unsplash, S. 18 spacex/unsplash,  
S. 21 Daniel Olah/unsplash, S. 31 Actionvance/unsplash,  
S. 34 President Lyndon B. Johnson and USSR Ambassador  
Anatoly Dobrynin shaking hands at the Signing Ceremony  
for the Outer Space Treaty, January 27, 1967. Courtesy of the  
National Archives and Records Administration./Digital pub-  
lic library of america, S. 43 NASA/unsplash, S. 51 NASA/uns-  
plash, S. 55 Juskteez Vu/unsplash, S. 59 Weltraumschrott/  
(European Space Agency (ESA) 2019b) S. 61 Casey Horner/  
unsplash, S. 70 SpaceX/unsplash, S. 75 Scott Evans/uns-  
plash, S. 77 Lumin Osity/unsplash, S. 79 Daniel Olah/uns-  
plash, S. 82 Ben Wicks/unsplash, S. 87 NASA Hubble Space  
Telescope/unsplash, S. 93 NASA/unsplash, S. 93 Planet  
Volumes/unsplash, S. 97 Kyle Goetsch/unsplash, S. 98  
Kazuend/unsplash, S. 117 Simon Delalande/unsplash

Stand: März 2024

ISSN 2363-832X



**WELTRAUM -  
TRENDBERICHT ÜBER DIE  
NUTZUNG DURCH DEN  
MENSCHEN UND DIE  
AUSWIRKUNGEN AUF DIE  
UMWELT**



# Inhalt

<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>6</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>7</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>8</b>
<b>Weltraum - Trendbericht über die Nutzung durch den Menschen und die Auswirkungen auf die Umwelt</b> .....	<b>12</b>
<b>Abstract: Space – trend report on human use and the impact on the environment</b> .....	<b>13</b>
<b>Nutzung des Weltraums im Wandel</b> .....	<b>14</b>
<b>Ziel und Vorgehensweise</b> .....	<b>18</b>
<b>Weltraumnutzung: Begriffsverständnis und Rahmenbedingungen</b> .....	<b>21</b>
3.1 Nutzung des Weltraums: Was umfasst das eigentlich?.....	22
3.2 Ein Thema von wachsender Relevanz.....	29
3.3 Ökologisch nachhaltige Nutzung des Weltraums – aktuelle Diskussion und Systemgrenzen im Bericht.....	39
<b>Raumfahrt und Umwelt: Auswirkungen der technischen Systeme</b> .....	<b>43</b>
4.1 Technische Systeme zur Erschließung des Weltraums.....	44
4.2 Umweltauswirkungen technischer Systeme auf der Erde und im Weltraum.....	54
<b>Aktuelle und zukünftige Entwicklungen: Potenziale und Risiken für die Umwelt</b> .....	<b>61</b>
5.1 Zugang zum Weltraum.....	62
5.2 Satellitennavigation und -kommunikation.....	71
5.3 Erdbeobachtung.....	78
5.4 Abbau von Rohstoffen im Weltraum.....	86
<b>Der Weltraum – Ein Thema für das Umweltressort? Fazit, politische Ansatzpunkte und Forschungsfragen</b> .....	<b>97</b>
6.1 Prinzipien der Umwelt- und Nachhaltigkeitspolitik anwenden.....	100
6.2 Politische Regulation stärken und ausweiten.....	107
6.3 Nachhaltigkeit von Infrastruktur und technischen Systemen.....	111
6.4 Umgang mit Weltraumschrott.....	114
<b>Ausblick</b> .....	<b>117</b>
<b>Quellenverzeichnis</b> .....	<b>120</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	
<b>Aufbau der Atmosphäre mit Übergang zum Weltraum und Temperaturverlauf in logarithmischer Darstellung entlang der Höhe über dem Meeresspiegel.....</b>	<b>23</b>
Abbildung 2	
<b>Überblick über Raumfahrtagenturen .....</b>	<b>27</b>
Abbildung 3	
<b>Volumina der vier Marktsegmente in Mrd. US-Dollar für das Jahr 2021.....</b>	<b>32</b>
Abbildung 4	
<b>Entwicklung des weltweiten institutionellen Raumfahrtbudgets zwischen 2016 und 2021 (in Mrd. US-Dollar).....</b>	<b>33</b>
Abbildung 5	
<b>Ausgaben der Bundesministerien<sup>5</sup> für Raumfahrt von 2019 bis 2023.....</b>	<b>37</b>
Abbildung 6	
<b>Ausgaben der Bundesministerien für Raumfahrt von 2019 bis 2023, aufgeteilt nach einzelnen Posten.....</b>	<b>38</b>
Abbildung 7	
<b>Kleinträger .....</b>	<b>46</b>
Abbildung 8	
<b>Mediumträger.....</b>	<b>47</b>
Abbildung 9	
<b>Schwerlastträger.....</b>	<b>48</b>
Abbildung 10	
<b>Erdumlaufbahnen und deren Nutzung .....</b>	<b>53</b>
Abbildung 11	
<b>Anzahl weltweiter Raketenstarts seit 2010 .....</b>	<b>62</b>
Abbildung 12	
<b>Anzahl aktiver Satelliten im Erdorbit seit 2010 und prognostizierte Entwicklung bis 2028.....</b>	<b>63</b>
Abbildung 13	
<b>Lage aktiver und geplanter Weltraumbahnhöfe und Raketenstartplätze .....</b>	<b>64</b>
Abbildung 14	
<b>Übersicht der Handlungsempfehlungen für das Umweltressort.....</b>	<b>98</b>

# Tabellenverzeichnis

Tab. 1

**Merkmale von Raumfahrtagenturen** ..... 26

# Abkürzungsverzeichnis

5G	5. Generation
ACR	Asteroid Capture and Return
AIT	Austrian Institute of Technology
Art.	Artikel
BDI	Bundesverband der Deutschen Industrie
BDLI	Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BMEL	Bundesministerium für Landwirtschaft und Ernährung
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BMVg	Bundesverteidigungsministerium
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CalTech	California Institute of Technology
CCDev	Commercial Crew Development program
CDR	Carbon Dioxide Removal
CDU	Christlich Demokratische Union Deutschlands
cm	Zentimeter
CNES	Centre national d'études spatiales
CNSA	China National Space Administration
Col-CC	Columbus Control Centre
CONFERS	Consortium For Execution Of Rendezvous And Servicing Operations
COPUOS	Committee on the Peaceful Uses of Outer Space
COSPAR	Committee on Space Research
CRI	China Radio International
CSA	Canadian Space Agency
CSCEM	Committee on the Scientific Context for Exploration of the Moon
CST	Crew Space Transportation
CSU	Christlich-Soziale Union in Bayern
d. h.	das heißt
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EAC	European Astronaut Centre
EIB	European Investment Bank

ELDO	European Launcher Development Organisation
ESA	European Space Agency
ESOC	European Space Operations Centre
ESPI	European Space Policy Institute
ESRO	European Space Research Organisation
et al.	und andere
EU	European Union
FAA	Federal Aviation Agency
FDP	Freie Demokratische Partei
Fraunhofer INT	Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik
GEO	Geostationary orbit
GFZ	Deutsches GeoForschungsZentrum
GLONASS	Globalnaja nawigazionnaja sputnikowaja sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GOSA	German Offshore Spaceport Alliance
GPS	Global Positioning System
HD	High Definition
HPS	High Performance Space Structure Systems
IAEA	International Atomic Energy Agenc
IASS	Institute For Advanced Sustainability Studies
IEA	International Energy Agency
IMF	Institut für Methodik der Fernerkundung
IoT	Internet of Things
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISECG	International Space Exploration Coordination Group
ISRO	Indian Space Research Organisation
ISRU	In-situ resource utilization
ISS	International Space Station
IT	Information Technology
ITA	Institut für Technikfolgen-Abschätzung
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
KARI	Korea Aerospace Research Institute
kg	Kilogramm
KI	Künstliche Intelligenz
km	Kilometer
LCA	Life Cycle Analysis

## Abkürzungsverzeichnis

LEO	Low Earth Orbit
LIDAR	Light Detection And Ranging
LIST	Luxembourg Institute of Science and Technology
LKW	Lastkraftwagen
LOX	Liquid Oxygen
LSA	Luxembourg Space Agency
LTE	Long Term Evolution
m	Meter
Mbit/s	Megabit pro Sekunde
MEO	Medium Earth Orbit
Mio.	Millionen
MOXIE	Mars Oxygen ISRU Experiment
Mrd.	Milliarden
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NEO	Near-Earth-Object
NEPA	National Environmental Policy Act
NTN	Non-Terrestrial Networks
OSIRIS-Rex	Origins Spectral Interpretation Resource Identification Security – Regolith Explorer
PA	Precision Agriculture
PNT	Position, Navigation & Timing
PV	Photovoltaik
RADAR	Radio Detection And Ranging
rd.	rund
s.	siehe
s. u.	siehe unten
SBSP	Space-Based Solar Power
SDG	Sustainable Development Goal
SETI	Search for Extraterrestrial Intelligence
SIA	Satellite Industry Association
SLS	Space Launch System
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
SpaceX	Space Exploration Technologies Corporation
SPD	Sozialdemokratische Partei Deutschlands
SRM	Solar Radiation Management
SSMS	Small Spacecraft Mission Service
SVHC	Substances of Very High Concern
THG	Treibhausgas
u. a.	unter anderem
UBA	Umweltbundesamt
UK	United Kingdom
UN	United Nations

UNODA	United Nations Office for Disarmament Affairs
UNOOSA	United Nations Office For Outer Space Affairs
UVPG	Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil

## Weltraum - Trendbericht über die Nutzung durch den Menschen und die Auswirkungen auf die Umwelt

Die Nutzung des Weltraums durch den Menschen hat sich seit ihren Anfängen rasant entwickelt. Das enorme Wachstum in diesem Bereich, die Verlagerung der Raumfahrt in den privatwirtschaftlichen Bereich und die bereits eingetretenen und zu erwartenden Umweltauswirkungen machen die Frage der Nachhaltigkeit immer drängender. Der vorliegende Trendbericht, der im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) erstellt wurde, gibt einen Überblick über alle Trends der Raumfahrtnutzung und untersucht diese sowohl auf zukünftige Potenziale als auch auf mögliche Probleme für die Umwelt auf der Erde und im Weltraum.

Der technologische Fortschritt ermöglicht es immer mehr staatlichen und nicht-staatlichen Akteuren, im Weltraum aktiv zu werden und führt zu einem rasanten Anstieg der Nutzungszahlen. Darüber hinaus eröffnen Innovationen neue Möglichkeiten für Erdbeobachtung, Satellitennavigation und Satellitenkommunikation. Auch der Abbau von Rohstoffen im Weltraum wird in Zukunft möglich sein. Der Bericht untersucht diese Entwicklungen im Hinblick auf ihre Hintergründe, Trends und die damit verbundenen Risiken und Potenziale für die Umwelt. Einerseits bieten sich umweltrelevante Anwendungsfelder wie z.B. die Überwachung internationaler Abkommen durch Erdbeobachtung, die Steuerung von Verkehrsströmen, eine umfassendere Datenerhebung über die Auswirkungen des Klimawandels und damit eine Unterstützung umweltpolitischer Entscheidungen. Andererseits bergen diese Aktivitäten Risiken für Schutzgüter auf der Erde und im Weltraum, die sich mit zunehmender Nutzung des Weltraums zu potenzieren drohen. Der vorliegende Bericht widmet sich daher auch den Umweltrisiken der Raumfahrt in Form von chemischen (z.B. Treibhausgase und Luftschadstoffe) und physikalischen Belastungen (z.B. Lärm, Ressourcenverbrauch durch Produktion, Betrieb und Entsorgung). Sowohl die Infrastruktur am Boden als auch die technischen Systeme (Trägerraketen, Raumfahrzeuge, Satelliten und Raumsonden, Antriebe und Treibstoffe) und Weltraumrückstände werden hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen untersucht.

Abschließend werden Handlungsoptionen für die Umweltpolitik vorgestellt und diskutiert. Bei der zukünftigen Nutzung des Weltraums sollten umwelt- und nachhaltigkeitspolitische Prinzipien angewandt, politische Regulierungen verstärkt und ausgeweitet, technische Systeme nachhaltiger gestaltet und das Thema Weltraumschrott in den Fokus gerückt werden.

## Abstract: Space – trend report on human use and the impact on the environment

Human use of space has evolved rapidly since its beginnings. The enormous growth in this sector, the shift of space activities to the private sector, and the environmental impacts that have already occurred and are to be expected make the question of sustainability ever more urgent. This trend report, commissioned by the German Federal Environment Agency (UBA), provides an overview of all the trends in space use and examines them in terms of their future potential and potential problems for the environment on Earth and in space.

Technological progress is enabling more and more state and non-state actors to become active in space and is leading to a rapid increase in the number of users. In addition, innovations are opening up new opportunities for Earth observation, satellite navigation and satellite communications. In the future, it will also be possible to mine resources in space. The report analyses these developments in terms of their background, trends and associated risks and opportunities for the environment. On the one hand, there are environmentally relevant applications such as monitoring international agreements through Earth observation, controlling traffic flows, collecting more data on the effects of climate change and thus supporting environmental policy decisions. On the other hand, these activities pose risks to protected assets on Earth and in space, which are likely to increase as the use of space expands. This report therefore also addresses the environmental risks of space travel in terms of chemical (e.g. greenhouse gases and air pollutants) and physical impacts (e.g. noise, resource consumption in production, operation and disposal). Both the ground infrastructure and the technical systems (launchers, spacecraft, satellites and space probes, propulsion systems and fuels) and space debris are analysed in terms of their environmental impact.

Finally, environmental policy options are presented and discussed. In the future use of space, environmental and sustainability policy principles should be applied, policy regulations should be strengthened and extended, technical systems should be made more sustainable, and the issue of space debris should be brought into focus.

# 1

## Nutzung des Weltraums im Wandel



*„Den meisten Akteuren im Weltraum, Raumfahrtbehörden und kommerziellen Satellitenbetreibern, [ist] heute klar, dass unsere Nutzung des Weltraums seit 1957 im Hinblick auf ihre Nachhaltigkeit eher nachlässig war. Man könnte die Situation mit der des 19. und 20. Jahrhunderts in Bezug auf die Seeschifffahrt und die Ausbeutung der Ressourcen der Ozeane vergleichen, wo man die negativen Auswirkungen der Umweltverschmutzung vorsätzlich ignorierte und eine allgemeine Blindheit gegenüber den langfristigen Auswirkungen der Überfischung zeigte.“*

(Gérard Brachet 2016; Übersetzung der Autor\*innen)

Der Weltraum hat schon seit jeher das Interesse und den Forschungsgeist der Menschheit geweckt. Von astronomischen Artefakten wie der Himmelsscheibe von Nebra aus der frühen Bronzezeit vor 4000 Jahren, bis hin zur Entwicklung der ersten Teleskope im 17. Jahrhundert und schließlich zum Start des James Webb-Weltraumteleskops im Jahr 2021 – die Beobachtung des Weltraums durch den Menschen hat eine enorme Entwicklung vollzogen. Während früher die Reise zum Mond allenfalls in Science-Fiction-Romanen wie Jules Vernes „Von der Erde zum Mond“ zu finden war, bringen uns heute neueste Technologien sogar dem Bereisen anderer Planeten immer näher.

Mit den technischen Errungenschaften der Moderne wurde es möglich, Raumfahrtmissionen durchzuführen und Teile des Weltraums für die Menschheit zugänglich zu machen. Die ersten Schritte in den Weltraum wurden von der Öffentlichkeit mit großer Faszination verfolgt: Ende der 1950er Jahre der Start von Sputnik 1, der erste Flug ins All durch Juri Gagarin im Jahr 1961, der erste Weltraumspaziergang im Jahr 1965 und die Mondlandung im Jahr 1969. Sowohl die Technologie zur Beobachtung des Weltraums als auch die Raumfahrttechnologie haben sich seit ihren Anfängen erheblich fortentwickelt. Die theoretischen und technischen Grundlagen sind auf Wissenschaftler\*innen aus verschiedenen Nationen zurückzuführen.

Der Ursprung der Raumfahrt ist im militärischen Bereich zu finden: Der Raketentechniker Werner von Braun entwickelte im Zuge des nationalsozialistischen Raketenprogramms im Jahr 1942 mit der Rakete „Aggregat 4“ (besser bekannt unter dem Namen „V2“) die erste funktionsfähige Großrakete. Nach dem

Ende des Zweiten Weltkriegs entwickelte von Braun dann Trägerraketen für die US-amerikanische National Aeronautics and Space Administration (NASA), s. auch Kapitel 3.1.2. Erste Erfolge der Raumfahrt waren während des Kalten Krieges zugleich auch als militärische Machtdemonstration anzusehen. Gegen Ende des 20. Jahrhunderts trat eine Phase der verstärkten internationalen Kooperation in der Raumfahrt ein, z. B. durch den kooperativen Bau und die gemeinsame Nutzung der Internationalen Raumstation (ISS). Dies öffnete das Feld der Raumfahrt für internationale Forschungsprojekte.

Im 21. Jahrhundert ist schließlich eine Verschiebung der Raumfahrt von staatlicher Führung hin zum privaten Sektor festzustellen. Im Jahr 2020 führte das Unternehmen SpaceX zum ersten Mal einen bemannten Raumflug für die NASA zur Internationalen Raumstation ISS durch. Die steigende Anzahl von Missionen durch Privatunternehmen zeigt einen Trend zur Fokussierung auf den wirtschaftlichen Nutzen des Weltraums. Durch private Raumfahrtakteure wie Elon Musks SpaceX, Jeff Bezos' Blue Orbit, Richards Bransons Virgin Galactic oder Airbus, sowie durch neue Raumfahrt-Dienstleistungen, ist es sogar mittelständischen Unternehmen finanziell möglich, neue Satelliten ins All zu befördern (Seidemann 2022).

Diverse Dienstleistungsunternehmen sind an der Positionierung ihrer Kommunikations-, Navigations- oder Wettersatelliten im All interessiert. Elon Musk plant mit seinem Unternehmen SpaceX, mithilfe von 40.000 Satelliten (unter dem Namen Starlink) das Internet überall auf der Erde verfügbar zu machen (Seidler 2019). Schon heute befinden sich derart viele Satelliten in der Erdumlaufbahn, dass Weltraumbehörden vermehrt Ausweichmanöver einzelner Satelliten planen müssen, um Kollisionen zu vermeiden (Seidemann 2022). Bald sollen auch Flüge von Privatpersonen ins All, beispielsweise zu einem Urlaub im Weltraumhotel „Voyager Station“ (Above: Space Development Corporation o.J.), keine Seltenheit mehr sein: 2021 wurde durch die erste rein touristische Raumfahrtmission „Inspiration4“ der Grundstein für den Weltraumtourismus gelegt (Inspiration4 2021).

Die Nutzung des Weltraums hat jedoch Umweltauswirkungen auf der Erde und im Weltraum selbst zur Folge und bringt Probleme und Risiken mit sich, wie beispielsweise eine Ansammlung von Weltraum-

schrott oder eine chemische Belastung der Erdatmosphäre (Westram 2021). Bisherige Weltraummissionen wurden oftmals ohne Berücksichtigung möglicher Umwelteinwirkungen und einer potenziellen Übernutzung des Weltalls durchgeführt. Mit steigender Nutzung ist zunächst von einer Verschärfung dieser Probleme auszugehen. Wie eingangs erwähnt, ähnelt dieses Vorgehen dem menschlichen Umgang mit den Weltmeeren in der Vergangenheit. Es besteht erneut die Gefahr unabsehbarer und massiver Umweltfolgen, wenn die Nutzung des Weltraums nicht unter Berücksichtigung ihrer Auswirkungen auf die Umwelt betrachtet und reguliert wird. Neben dem Schutz von Mensch und Erde und Sicherheitserwägungen ist hierbei auch grundsätzlich zu hinterfragen, in welchem Umfang eine Nutzung des Weltraums durch den Menschen überhaupt im Sinne von Mensch und Umwelt ist – und ob nicht der Weltraum selbst vor Veränderungen durch den Menschen geschützt werden sollte, er also selbst ein Schutzgut darstellt.

Selbst die Anwendung von Weltraum-Technologien, die dem Kampf gegen den Klimawandel zuträglich sein können (z. B. Erdbeobachtungssatelliten), geht mit schädlichen Umweltwirkungen einher, z. B. CO<sub>2</sub>-Emissionen, Schadstoffen in der Erdatmosphäre, dem Verbrauch endlicher Ressourcen und der Erzeugung von Weltraumschrott. Erdbeobachtungssatelliten bieten die Möglichkeit, den Wandel des Erdklimas zu verfolgen und Auswirkungen zu identifizieren (Yang et al. 2013). Solche Datengrundlagen fließen auch in Erdsystemmodelle mit ein, die Klimaauswirkungen prognostizieren. Diese Kombination aus Chancen und Risiken für die Umwelt macht die Nutzung des Weltraums zu einem zweiseitigen Schwert.

Die Europäische Kommission hat mit Destination Earth ein Projekt initiiert, bei dem auf verschiedenen Skalen Auswirkungen auf unsere Erde in digitalen Zwillingen simuliert werden und für Entscheidungsträger aufbereitet werden sollen (European Commission 2022). Weltweit wird zu umweltfreundlicheren Antriebsstoffen sowie zu Rückholaktionen und Wiederverwendung technischer Systeme geforscht (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) 2023; Klapetz 2023). Insgesamt werden die Raumfahrt und die Erschließung der Erdumlaufbahn bislang nicht breit als Umwelt- oder Nachhaltigkeitsthema,

sondern eher unter den Gesichtspunkten von Innovation und wirtschaftlicher Entwicklung diskutiert.

Aufgrund des frühen Stadiums der kommerziellen Nutzung des Weltraums gibt es erst wenige Regularien von Seiten der Politik, die geeignet sind, dem Anstieg der Nutzung und Akteure gerecht zu werden und eine Überfüllung sowie Kollisionen von Satelliten- und Schrottteilen im erdnahen Raum zu vermeiden (Landwehr 2021). Den Handlungen privater Akteure werden derzeit lediglich durch nationale Kontrollen rechtsverbindliche Grenzen gesetzt. In den USA wurde 2021 erstmals eine Klage gegen Elon Musks Starlink erhoben, da die Satellitenkonstellationen potenziell astronomische Beobachtungen stören und damit gegen das Umweltrecht des National Environmental Policy Act (NEPA) verstoßen könnten (O’Callaghan 2021). Auf politischer Ebene stellen die „Guidelines for the Long-Term Sustainability of Outer Space Activities“ des COPUOS (Ausschuss für die friedliche Nutzung des Weltraums) der Vereinten Nationen einen Versuch dar, ein Nachhaltigkeitsprinzip für die Nutzung und Erforschung des Weltraums zu formulieren (United Nations Office For Outer Space Affairs (UNOOSA) 2018b). Der Erdborbit wird darin als endliche Ressource bezeichnet, mit dem im Sinne des Vorsorgeprinzips sorgsam umgegangen werden muss. Auch andere Wissenschaftler\*innen betonen, dass Ressourcen im All begrenzt sind und Weltraumschrott eine Verschmutzung darstellt (Newman und Williamson 2018; Galli und Losch 2019; Kramer 2020).

Der exponentielle Anstieg des Nutzungsinteresses sowie die immer lauter werdenden Diskussionen über neue Anwendungsfelder wie den Weltraumtourismus oder des extraterrestrischen Ressourcenabbaus werfen Fragen über mögliche Zukunftspfade der Weltraumnutzung auf. Die Rolle von Nachhaltigkeitsabwägungen und damit die Antwort auf die Frage, ob man die gleichen Fehler, die zur Ausbeutung und Verschmutzung der Ozeane führten, im All wiederholen wird – wovon das Eingangszitat des vorliegenden Berichts eindrücklich warnt – oder rechtzeitig gegensteuern kann, steht im wahrsten Sinne des Wortes in den Sternen.

Die vorliegende Studie will Lücken der Umweltbewertung schließen und Möglichkeiten einer nachhaltigen Nutzung des Weltraums aufzeigen. Im Rahmen der Strategischen Vorausschau wird ein Blick auf ak-

tuelle Trends und künftige Entwicklungen geworfen, um einen umfassenden Überblick sowohl über negative Umweltauswirkungen als auch Chancen für die Umwelt zu gewinnen. Angesichts dieser Entwicklungen gilt es auszuloten, inwiefern sich Umweltpolitik nur auf terrestrische Umwelt konzentrieren oder der Weltraum als weiteres Schutzgut in den Fokus rücken sollte.

# 2

## Ziel und Vorgehensweise



Dieser Trendbericht nimmt die folgenden Entwicklungen zum Ausgangspunkt für eine kritische Prüfung:

- ▶ Inwiefern entstehen durch die technischen Systeme der Raumfahrt Umweltbeeinträchtigungen?
- ▶ Welche Potenziale und Risiken bestehen für Umweltforschung und Umweltpolitik durch Trends der Raumfahrt?
- ▶ Welche Rolle kann das Umweltressort einnehmen?

Der Trendbericht nimmt insbesondere den erdnahen Weltraum in den Blick, beschreibt vereinzelt aber auch darüber hinaus gehende Sachverhalte und Technologien. Es werden globale Trends und Entwicklungen beschrieben, ein besonderer Fokus liegt auf der Europäischen und Deutschen Raumfahrt. Die militärische Nutzung des Weltraums ist nicht Gegenstand des Berichts.

Im Rahmen dieser Studie wurde mit einer Methode aus dem Repertoire der Zukunftsforschung – der Trendanalyse – gearbeitet. Vorrangiges Ziel der Trendanalyse ist es, dem Umweltressort einen Überblick und damit eine Informationsbasis zu den neuesten Entwicklungen und ihrem Umweltbezug zu geben, auf deren Grundlage möglichst frühzeitig und proaktiv politische Gestaltungsansätze und Maßnahmen entwickelt werden können. Neben der detaillierten Beschreibung zentraler Entwicklungen, wie sich die Nutzung des Weltraums derzeit verändert und künftig potenziell weiter verändern wird, enthält der Bericht einen Überblick über bereits existierende und künftig mögliche Umwelteinwirkungen, identifiziert Chancen sowie Risiken und formuliert weitere Forschungsbedarfe und erste politische Gestaltungsoptionen.

Die Studie richtet sich jedoch nicht ausschließlich an das Umweltressort. Vielmehr soll auch die (Fach-) Öffentlichkeit dafür sensibilisiert und informiert werden, welche Umweltwirkungen mit der zunehmenden Nutzung des Weltraums einhergehen. Die Studie möchte einen Beitrag leisten, der in verschiedenen (fach-)öffentlichen Diskursen, weiteren Studien und Prozessen aufgegriffen und fortgeführt werden kann.

Für den Trendbericht ergibt sich daraus folgende Gliederung:

- ▶ In **Kapitel 3** werden wichtige Hintergrundinformationen aufbereitet. Einleitend wird zunächst eine Definition des Weltraumbegriffs aufgestellt und durch die Erläuterung der historischen Entwicklung der Raumfahrt sowie ihrer gesellschaftlichen Relevanz ergänzt. Die ökonomische Perspektive verdeutlicht in diesem Kapitel sowohl die Interessenverteilung verschiedener Staaten und privaten Akteure als auch die Innovationskraft der Weltraumforschung. Die wichtigsten Entwicklungen im rechtlichen und politischen Rahmen der Weltraumnutzung werden dargestellt, und die Notwendigkeit der Beachtung von Umweltauswirkungen auf der Erde und im All beleuchtet.
- ▶ In **Kapitel 4** wird ein Blick auf die technischen Systeme zur Erschließung und Nutzung des Weltraums in der Gegenwart und der nächsten Zukunft geworfen. Anhand der Herstellungsverfahren und Lebenszyklen der Systeme werden die daraus resultierenden Auswirkungen auf die Umwelt dargestellt.
- ▶ In **Kapitel 5** werden vier aktuelle und zukünftige, besonders umweltrelevante Entwicklungen der Raumfahrt in den Blick genommen: die sinkenden Hürden, den Weltraum zu erreichen, Trends im Bereich der Erdbeobachtung sowie in der Satellitennavigation und -kommunikation und der mögliche Abbau von Ressourcen. Untersucht wird jeweils, welche Potenziale und Risiken für die Umwelt damit einhergehen. Innerhalb jeder dieser vier Entwicklungen werden Phänomene mit besonderem Veränderungspotenzial für die Zukunft in den Blick genommen, beispielsweise die Besiedlung des Mondes.
- ▶ In **Kapitel 6** werden genaue Ansatzpunkte für politische Handlungsempfehlungen ausgeführt. Zudem werden weitergehende Forschungsfragen formuliert und ein Fazit gezogen.

Die in Kapitel 5 diskutierten Entwicklungen wurden mit dem Ziel ausgewählt, die Bandbreite der Diskussion abzubilden. Dazu gehören sowohl solche Aktivitäten, die bereits umgesetzt werden (wie Erdbeobachtung), sich aber derzeit in einer hochdynamischen

Entwicklungsphase befinden, als auch solche, die bisher nur Zukunftsvisionen darstellen (wie der Ressourcenabbau im All).

Zur Beantwortung der eingangs formulierten Fragen wurde die aktuelle, relevante Forschungsliteratur umfassend recherchiert und ausgewertet. Neben der Herleitung und Beschreibung des Status Quo lag dabei ein starker Fokus auf der Abschätzung zukünftiger Entwicklungen und Trends bei der Nutzung des Weltraums. Diese Prognosen wurden mit Fachwissen zu Umweltwirkungen unterfüttert, welches nicht nur in der Fachliteratur, sondern auch in Workshops mit externen Expert\*innen und Sachverständigen aus dem UBA und BMUV erarbeitet und gesammelt wurde.

Es ist klar, dass der vorliegende Bericht für die Diskussion dieser Fragen nur ein Startpunkt sein kann, insbesondere wenn die künftige Nutzung des Weltraums sich noch weiter und vielleicht auch anders als gegenwärtig angenommen entwickelt. Eindeutig ist aber auch, dass eine Diskussion darüber geführt werden muss, wie Chancen für die Umwelt systematisch genutzt werden können und wie den Umweltschäden, die sich aus den verschiedenen Entwicklungen der Weltraumnutzung ergeben, begegnet werden kann – auch wenn sie Umwelt- und Klimaschutz Zwecken dienen. Der Bericht verdeutlicht, wie wichtig es ist, die Fehler der Vergangenheit im Umgang mit der Umwelt nicht zu wiederholen, z. B. durch das Ignorieren von Umweltaspekten zugunsten wirtschaftlicher Aspekte, wie bei der eingangs erwähnten Seeschifffahrt (Brachet 2016). Unter dem Strich bleibt die Mahnung, entsprechend des Vorsorgeprinzips jetzt zu handeln, bevor sich die im Bericht beschriebenen oder auch weitere, noch unabsehbare Probleme manifestieren.

# 3

## Weltraumnutzung: Begriffsverständnis und Rahmen- bedingungen



## 3.1 Nutzung des Weltraums: Was umfasst das eigentlich?

### 3.1.1 Begriffsdefinition

Der Weltraum bezeichnet den dreidimensionalen Raum zwischen Sternen, Planeten und anderen astronomischen Objekten (Howell 2022). Der Weltraum lässt sich unterteilen in den erdnahen, den interplanetaren, den interstellaren und den intergalaktischen Raum sowie die sogenannten „Voids“, Leerräumen zwischen Galaxien (Carroll und Ostlie 2017; S. 1038ff.). Wo – von der Erde aus betrachtet – der Weltraum beginnt, ist nicht eindeutig definiert. Eine gängige Grenze zwischen Luftraum und Weltraum ist die sogenannte Kármán-Linie, die 100 km über dem Meeresspiegel den Bereich markiert, in dem Luftfahrt nicht mehr möglich ist, da die Erdatmosphäre dort nicht mehr für dynamischen Auftrieb bei Flugzeugen ausreicht (Freistetter 2015).

Der Weltraum ist nicht leer, sondern ein nahezu perfektes Vakuum gefüllt mit Gasen, kosmischem Staub und Elementarteilchen und durchzogen von elektrischen und magnetischen Feldern, Gravitationsfeldern und elektromagnetischen Wellen (Hawking 1988; S. 67ff.; Herrmann 2005; S. 168ff.). Die Durchschnittstemperatur des Weltraums beträgt gegenwärtig  $-270,3^{\circ}\text{C}$ . Die Temperatur der im Weltraum befindlichen Materie und Strahlung variiert sehr stark in Abhängigkeit der jeweiligen Gegebenheiten (Moore 2013; S. 109). Überall im Weltraum wirkt die Gravitationskraft, die dazu führt, dass sich Objekte gegenseitig anziehen. Schwerelosigkeit tritt auf, wenn die Schwerkraft nicht durch Gegenkräfte behindert wird und das Objekt in eine beschleunigte Bewegung versetzt wird (Herrmann 2005; S. 58ff.).

Aufgrund der enormen Distanzen ist eine Erforschung des interstellaren und intergalaktischen Weltraums mittels bemannter oder unbemannter Raumfahrt bislang kaum zu leisten. Stattdessen erfolgt sie entweder mit Radio- oder optischen Teleskopen von der Erde aus oder mit Weltraumteleskopen wie beispielsweise dem Hubble-Weltraumteleskop oder dem James-Webb-Weltraumteleskop (Space Telescope Science Institute (STScI) 2023a; Space Telescope Science Institute (STScI) 2023b).

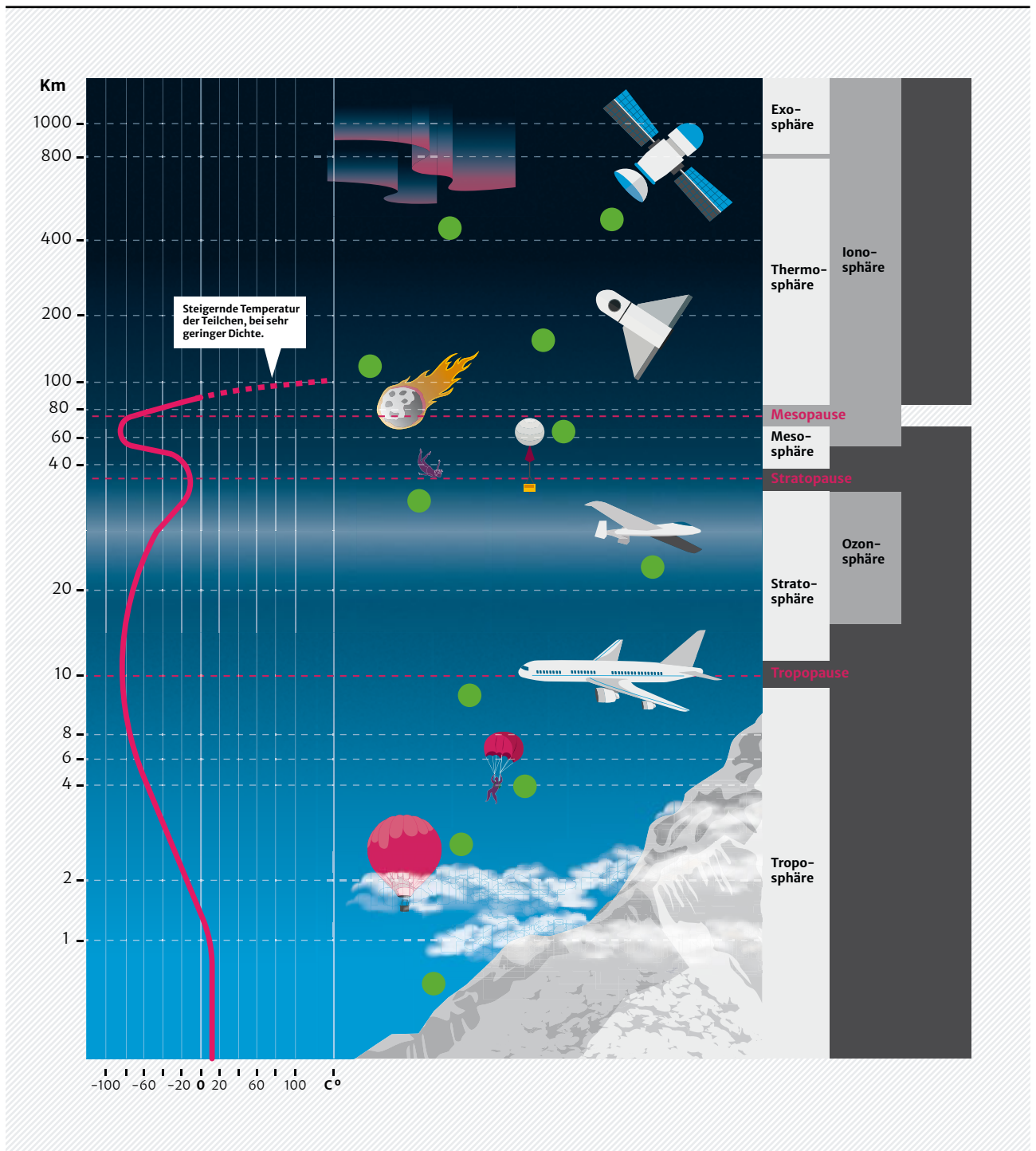
Die Raumfahrt ist bislang auf den interplanetaren Raum innerhalb unseres Sonnensystems beschränkt. Einzig die beiden 1977 gestarteten Raumsonden „Voyager 1“ und „Voyager 2“ haben als menschengemachte Objekte das Sonnensystem verlassen und den interstellaren Raum erreicht (Voyager 1 im Jahr 2012 und Voyager 2 im Jahr 2018; NASA Jet Propulsion Laboratory o.J.). Innerhalb unseres Sonnensystems haben unbemannte Missionen den Zwergplaneten Pluto erreicht, die Jupitermonde erforscht, die Venus erkundet und insbesondere dem erdnächsten Planeten Mars zahlreiche Besuche abgestattet. Nicht zu vergessen: die sechs bemannten Mondlandungen der USA im Rahmen des Apollo-Programms zwischen 1969 und 1972. Vor allem jedoch spielt sich Raumfahrt – insbesondere die bemannte Raumfahrt – im erdnahen Weltraum ab.

Der erdnahe Weltraum umfasst den Bereich bis ungefähr 36.000 km über dem Meeresspiegel. Raumfahrzeuge und Menschen sind dort im fast perfekten Vakuum besonderen Bedingungen ausgesetzt (Wittmann 2011; S. 57):

- ▶ Es herrscht Mikrogravitation, also annähernde Schwerelosigkeit.
- ▶ Restatmosphäre, in der Raketen, Raumfahrzeuge und Satelliten vom Strömungswiderstand gebremst werden und die dazu führen kann, dass Weltraumobjekte im erdnahen Orbit langsam, aber sicher abstürzen, wenn die Umlaufbahn nicht mit Triebwerken korrigiert wird.
- ▶ Partikelstrahlung und hochenergetische elektromagnetische Strahlung, die im Strahlungsgürtel um die Erde eine Gefährdung für elektronische Bestandteile und die menschliche Gesundheit darstellen, weswegen der Strahlenschutz eine besondere Bedeutung in der Raumfahrt hat.
- ▶ Temperaturverhältnisse, die abhängig vom Aufenthaltsort eines Raumschiffes oder Satelliten, z. B. im Sonnenlicht, einen Temperatúrausgleich erforderlich machen, der mittels technischer Subsysteme bewerkstelligt wird (siehe Kapitel 4.1.4).

Abbildung 1

**Aufbau der Atmosphäre mit Übergang zum Weltraum und Temperaturverlauf in logarithmischer Darstellung entlang der Höhe über dem Meeresspiegel**



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf BR 2023

### 3.1.2 Historische Einordnung und aktuelle Entwicklungen

#### Raumfahrt im Zeichen des Kalten Krieges

Die Ursprünge der Raumfahrt liegen im frühen zwanzigsten Jahrhundert, als die theoretischen und technischen Grundlagen für die Raketentechnik u. a. von Konstantin Ziolkowski (Russland), Robert Goddard (USA), Herman Oberth (Österreich/Deutschland) und Wernher von Braun (Deutschland) sukzessive entwickelt wurden (Osterhage 2021; S. 34ff.). Die ersten flugfähigen Raketen („V2“) wurden im Laufe des Zweiten Weltkriegs in Deutschland entwickelt (Fischer et al. 2019).

Die deutsche Raumfahrtforschung wurde zunächst zwischen Kriegsende 1945 und dem Inkrafttreten der Pariser Verträge 1955 durch die vier Besatzungsmächte untersagt. Anschließend erfuhr sie trotz allem schnell Auftrieb, da unter westdeutscher Beteiligung 1962 die European Space Research Organisation (ESRO) und die European Launcher Development Organisation (ELDO) gegründet wurden, die eine europäische Trägerrakete entwickeln sollten (Reinke und Müller 2010; Fischer et al. 2019). Bereits 1969 konnte mit einer amerikanischen Rakete der erste deutsche Forschungssatellit Azur in die Erdumlaufbahn geschickt werden (Fischer et al. 2019).

Nach Kriegsende wurde ein Großteil der am national-sozialistischen Raketenforschungsprogramm beteiligten Wissenschaftler\*innen von den Alliierten in die USA geholt, um das dortige Forschungsprogramm mitzugestalten. Auch die Sowjetunion bemühte sich nach Kriegsende, die eigene Raketenforschung stärker voranzutreiben, was schließlich im ersten künstlichen Satelliten „Sputnik“ (Oktober 1957) mündete (Richers 2019). Im Kalten Krieg begann ein Wettlauf um den Zugang und die Erforschung des Weltraums, der in der ersten bemannten Mondlandung am 20. Juli 1969 durch die US-amerikanische „Apollo 11“-Mission seinen vorläufigen Höhepunkt fand. Der Wettstreit um die Vorherrschaft im Weltraum war nicht nur ein technologischer, sondern insbesondere auch einer der politischen Systeme. Dies schlug sich auch in der Geschichte der deutschen bemannten Raumfahrt nieder: Am 26. August 1978 wurde Sigmund Jähn, Bürger der DDR, der erste Deutsche im All. Sein Flug führte ihn zur sowjetischen Raumstation Salut 6 (European Space Agency (ESA) o.J. b). Am 28. November 1983 folgte mit Ulf Merbold der erste Bundesbürger. Er nahm am Jungferflug des europäischen Raumlabors Spacelab teil und gehörte zur ersten ESA-Astronautengruppe (European Space Agency (ESA) o.J. c).

#### Kooperation im Weltraum

Während die Anfangszeit der Raumfahrt (ab 1957) von Wettbewerb und Rivalität zwischen den USA und der Sowjetunion geprägt wurde und ein Kampf um die Vorherrschaft im Weltraum tobte (Spillmann 1988; S. 24), kristallisierte sich in Europa bereits Anfang der 60er Jahre die Bereitschaft zur internationalen Zusammenarbeit heraus. Den westeuropäischen Staaten wurde schnell bewusst, dass sie mit den beiden Supermächten allein durch nationale Projekte weder konkurrieren noch mithalten konnten (Weyer 1993). Infolgedessen entstanden die Organisationen ELDO (European Launch Development Organisation) und ESRO (European Space Research Organisation), die schließlich im Jahr 1975 zur ESA fusionierten (European Space Agency (ESA) o.J. k). 1998 wurden die bis dahin noch teilweise national organisierten europäischen Astronautengruppen mit dem ESA-Astronautenteam zum ESA-Astronautenkörper vereint, um die Koordination unter den Astronaut\*innen zu verbessern und die begrenzten Ressourcen optimal zu nutzen (European Space Agency (ESA) o.J. d).

Auch die USA und die Sowjetunion näherten sich in Fragen der Raumfahrt im Laufe der Zeit an und begannen eine verstärkte Zusammenarbeit. Ein Wendepunkt in der Ausrichtung ihrer Raumfahrtprogramme war das Apollo-Sojus-Test-Projekt (ASTP) im Jahr 1975, das als Meilenstein für die Kooperation der beiden Nationen gilt und den Wettbewerbsgedanken ihrer Weltraumprogramme durchbrach

(Kilian 2019). Der Hintergrund dieses Projekts bestand einerseits darin, analog zur Seenotrettung durch ein Ankoppelungsmanöver der namensgebenden Raumschiffe beider Nationen im Bedarfsfall gegenseitige Hilfe leisten zu können (Kowalski 2015). Der Flug von Apollo 13 im Jahr 1970, der beinahe katastrophal endete, hatte deutlich vor Augen geführt, wie riskant Weltraumflüge sein können: Das Raumfahrzeug wurde durch eine Explosion schwer beschädigt, und die Astronauten konnten nur knapp gerettet werden (Lorenzen 2020). Andererseits sollte der Handschlag zwischen russischen und amerikanischen Astronauten im Weltraum als Symbol für die Zusammenarbeit in der Raumfahrt dienen, trotz einer angespannten politischen Situation (Logar 1976).

Global gesehen stellt die ISS das bemerkenswerteste Beispiel für anhaltende internationale Zusammenarbeit im Bereich der Raumfahrt dar. Am Anfang, in den 1980er Jahren, entstand durch die US-Amerikaner\*innen die Idee der ISS; ab 1998 wurden die ersten Module in internationaler Kooperation ins All geschickt, um die Raumstation zu errichten (Banner 2021). Gegenwärtig sind 15 Nationen im Rahmen von fünf Raumfahrtprogrammen an der ISS beteiligt (Hall o.J.), und 269 Menschen aus 21 Ländern haben die ISS bereits besucht<sup>1</sup> (Garcia o.J.).

Einen Einschnitt in die internationale Zusammenarbeit stellt der russische Angriffskrieg gegen die Ukraine seit Februar 2022 dar: Die Kooperation zwischen der ESA und Roskosmos, der Weltraumorganisation der Russischen Föderation, im Rahmen des ExoMars-Projekts wurde ausgesetzt (European Space Agency (ESA) 2023), das DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) hat sämtliche Projekte in Zusammenarbeit mit russischen Einrichtungen gestoppt (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) 2022). Auch die Nutzung russischer SOJUS-Raketen durch internationale Partner wurde im Rahmen der gegen Russland verhängten Sanktionen erheblich zurückgefahren (Jones 2023b). Lediglich im Rahmen der ISS wird die Kooperation zwischen Russland und den westlichen Raumfahrtnationen weiterhin fortgesetzt: Nach zwischenzeitlichen Meldungen über einen beabsichtigten Ausstieg Russlands nach 2024 (tagesschau.de 2022) wurde die Zusammenarbeit im April 2023 bis 2028 verlängert (Liverpool 2023).

Auf internationaler Ebene wurden die Potenziale einer zivilen Nutzung des Weltraums schon früh erkannt: Bereits 1965 wurde der kommerziell genutzte Kommunikationssatellit „Intelsat I“ auf eine geostationäre Umlaufbahn gebracht (Fischer et al. 2019). Seitdem ist die Satellitenkommunikation vielfach –meist unbewusst – mit dem Alltag verwoben und heute nicht mehr aus der modernen Gesellschaft wegzudenken. Neben der Telekommunikation wurde auch die Übertragung von Fernsehsignalen in den späten sechziger und frühen siebziger Jahren erstmals realisiert, zunächst in der ehemaligen Sowjetunion (Whalen 2010). Im April 1960 wurde von den USA zudem der weltweit erste Wettersatellit in Betrieb genommen (TIROS I). Er ermöglichte Forscher\*innen erstmals, großflächige Wetterphänomene aus dem Weltraum zu beobachten (National Air and Space Museum (NASM) o.J.).

### **Raumfahrt nach dem Kalten Krieg: Intensivierung und Phase der Kooperation**

Mit dem Ende des Kalten Krieges intensivierte sich eine Phase der internationalen Kooperation, insbesondere zwischen den USA und Russland. Wenngleich diese nicht immer spannungsfrei blieb, so darf insbesondere die 1998 begonnene Konstruktion und der andauernde Betrieb der Internationalen Raumstation ISS als maßgeblicher Meilenstein gesehen werden. Heute ist Raumfahrt eine weltweit betriebene Unternehmung, an der immer mehr Staaten teilnehmen bzw. eine Partizipation anstreben.

<sup>1</sup> Die Zahl umfasst sowohl ausgebildete Astronaut\*innen als auch private „space flight participants“.

Tab. 1

**Merkmale von Raumfahrtagenturen**

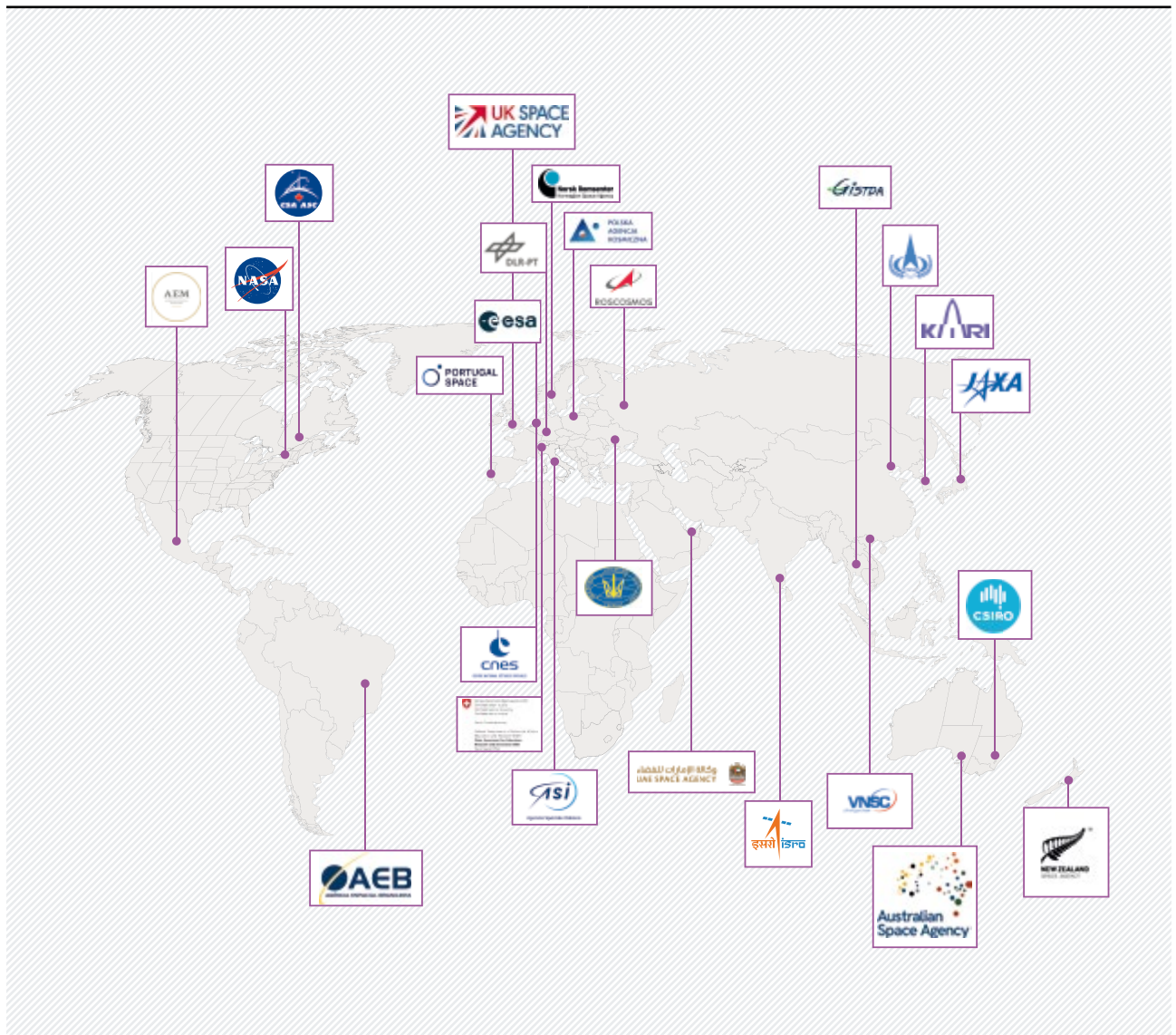
Name	Akronym	Gründungsjahr	Land
National Aeronautics and Space Administration	NASA	1958	USA
Indian Space Research Organisation	ISRO	1969	Indien
Europäische Weltraumorganisation/European Space Agency	ESA	1975	Europa <sup>2</sup>
Korea Aerospace Research Institute	KARI	1989	Südkorea
Nationale Raumfahrtbehörde Chinas/China National Space Administration	CNSA	1993	China
Japan Aerospace Exploration Agency	AXA	2003	Japan
New Zealand Space Agency		2016	Neuseeland
Roskosmos		2016 (gleichnamiger Vorgänger gegründet 1992)	Russland

Im Jahr 2018 haben fünf Länder eigene Raumfahrtagenturen neu gegründet: Luxemburg, Saudi-Arabien, Griechenland, Australien und Zimbabwe (Moranta et al. 2020; S. 129); 2019 kamen weitere vier Länder hinzu (Ägypten, Portugal, Türkei und die Philippinen); 2020 außerdem El Salvador und die supranationale Latin America and Caribbean Space Agency, zu deren Mitgliedsstaaten Mexiko, Argentinien, Bolivien, Ecuador, Paraguay sowie als Beobachter Kolumbien und Peru zählen. So führen nunmehr 88 Nationen weltweit Raumfahrtaktivitäten durch bzw. planen dies zu tun (Moranta et al. 2021; S. 140). Dementsprechend vielfältig sind Ziele und Programme der staatlichen Raumfahrt.

<sup>2</sup> Mitgliedsstaaten: Belgien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Italien, Luxemburg, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Spanien, Schweden, Schweiz, Tschechische Republik, Ungarn, Vereinigtes Königreich. Assoziierte Mitglieder: Kanada, Bulgarien, Lettland, Litauen, Malta, Slowakische Republik und Slowenien.

Abbildung 2

## Überblick über Raumfahrtagenturen



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf International Space Exploration Coordination Group (ISECG 2022)

### Aktuelle Entwicklungen: Präsidentschaft der USA und Chinas Engagement

Die Jahre 2020 und 2021 waren von zahlreichen Veränderungen geprägt: Der Wechsel in der Präsidentschaft in den USA hatte unmittelbare Konsequenzen für die Budgets und die programmatischen Schwerpunkte der NASA (Foust 2020; Roulette 2021; Space.com 2021; Davenport 2021). Bereits erkennbar ist, dass an dem Ziel des vorherigen Präsidenten Donald Trump, im Jahr 2024 eine Frau und einen Mann auf den Mond zu schicken, an welchem unter der neuen Präsidentschaft weitestgehend festgehalten wird – auch wenn mittlerweile erst das Jahr 2025 für eine bemannte Landung realistisch erscheint (Foust 2021).

Als weiterer, wichtiger Akteur hat sich China in den letzten Jahren zu einer raumfahrenden Nation entwickelt, die nicht nur in der Lage ist, bemannte Raumfahrt durchzuführen, sondern im November 2022 mit der Tiangong Space Station zudem eine eigene Raumstation im Erdorbit fertigstellte (Jones 2023c). Die chinesische Raumfahrt entwickelt sich seit 1992, seit der Verabschiedung des bemannten Raumfahrtprogramms (Wu 2016), rasant. So ist beispielsweise die Zahl erfolgreicher Raketenstarts von 6 Starts im Jahr 2010 auf 64 im Jahr 2022 gestiegen, und 2023 sollen über 200 Raumfahrzeuge und Satelliten in den Weltraum transportiert werden (Jones 2023a). Alle fünf Jahre veröffentlicht die chinesische Regierung ein White Paper zum aktuellen Stand, sowie den Zielen der kommenden fünf Jahre in der Raumfahrt, im Zuge des Fünfjahresplans. Auch nach Fertigstellung der eigenen Raumstation werden ambitionierte Ziele wie die weitere Erforschung des Mondes, eine Mission zur Probenrückführung vom Mars sowie die Erforschung des Jupiter-Systems verfolgt (Jones 2021a).

Schließlich ist mit Indien ein weiterer ambitionierter Akteur auf der internationalen Bühne aktiv, der u. a. plant, in den nächsten Jahren indische Astronaut\*innen in den Weltraum sowie unbemannte Missionen zur Venus und zum Mars zu schicken (Goswami 2021). Am 24. August 2023 gelang es Indien als vierter Nation der Welt, erfolgreich eine unbemannte Raumsonde auf dem Mond zu landen. Die Raumsonde Chandrayaan-3 landete in einer bisher wenig erkundeten Region am Südpol des Erdtrabanten (Schwerin 2023). An Bord befindet sich ein Rover, der die Zusammensetzung der Mond-Oberfläche untersuchen und wichtige Erkenntnisse für die Wissenschaft liefern soll (Indian Space Research Organisation (ISRO) o.J.).

### **Raumfahrt in Zukunft: Private Unternehmen kommerzialisieren Raumfahrtaktivitäten**

Private Unternehmen sind seit Beginn des Raumfahrtzeitalters mit staatlichen Raumfahrtagenturen eng verbunden. Im Zuge der erhöhten Innovationsfähigkeit und Kostensenkungen haben Raumfahrtagenturen wie NASA und ESA begonnen, nicht länger nur mit lang etablierten Unternehmen wie Lockheed Martin oder Boeing zusammen zu arbeiten, sondern auch junge Unternehmen wie die 2002 von Elon Musk gegründete Firma Space Exploration Technologies

Corporation (kurz: SpaceX) durch geänderte Beschaffungsprozesse und Entwicklungsförderung zu unterstützen (Kind et al. 2020; S. 25ff.). Durch die finanzielle Unterstützung der NASA gelang es SpaceX, in den vergangenen 20 Jahren zu einem der führenden Anbieter für Startdienstleistungen zu werden; 2021 hat das Unternehmen 31 erfolgreiche Raketenstarts durchgeführt, 2022 folgten bis Anfang Dezember bereits 61 Starts (Statista GmbH 2023b).

Ein anderer Bereich, in dem zunehmend Raumfahrtaktivitäten durch private Unternehmen betrieben und damit kommerzialisiert werden, ist die Satellitenkommunikation. Drei Unternehmen – SpaceX mit dem bereits operativen Starlink-Projekt, Amazon mit dem geplanten Projekt Kuiper (Berger 2022) und OneWeb mit dem gleichnamigen Projekt – bemühen sich, sogenannte „Megakonstellationen“, also Schwärme bestehend aus Tausenden von Kleinsatelliten, zur weltweiten Breitbandinternetversorgung im Erdorbit zu errichten (siehe Kapitel 5.2.2).

Zudem gewinnen auch Geschäftsmodelle, die auf der Verarbeitung von im Weltraum gesammelten Daten basieren, zunehmend an Bedeutung. Hierzu werden Daten von Erdbeobachtungs- und Navigationssatelliten aufbereitet, welche vor allem für Unternehmen in Anwendungsbereichen jenseits der Raumfahrtindustrie von Interesse sind, beispielsweise für die Landwirtschaft, die Logistik oder auch das Risiko- und Krisenmanagement (siehe Kapitel 5.2.3).

## 3.2 Ein Thema von wachsender Relevanz

### 3.2.1 Gesellschaftliche Aspekte

Die Nutzung des Weltraums prägt heute weite Teile des Alltags – wenn auch vielfach nicht direkt ersichtlich. Satellitengestützte Technologien wie Ortungsdienste, Wetterbeobachtung und Telekommunikation ermöglichen es, uns an unbekannte Orte navigieren zu lassen, präzise lokale Wetterprognosen zu nutzen und die beinahe verzögerungslose Kommunikation mit Menschen auf der anderen Seite der Welt. Vor diesem Hintergrund ist es wenig verwunderlich, dass der Weltraum in immer wieder in den Fokus der gesellschaftlichen Wahrnehmung rückt.

Die gesellschaftliche Auseinandersetzung mit Raumfahrt wird vor allem durch die mediale Berichterstattung geprägt. Hierbei lassen sich folgende thematische Schwerpunkte ausmachen: Zum einen der Diskurs über den Nutzen der Raumfahrt für die Erde bzw. für die Gesellschaft und die damit eng verbundene Frage zu Kosten und Nutzen. Zudem kommen in unregelmäßigen Abständen Debatten über den Nutzen bemannter Raumfahrt gegenüber unbemannter Raumfahrt (Satelliten, Fernerkundung) auf. Letztlich wird mit der medienwirksamen Verbreitung von Zukunftsvisionen, wie etwa der Besiedelung des Mars oder dem Ressourcenabbau im Weltraum sowie den öffentlichen Auftritten von Astronaut\*innen, kurzzeitig die Aufmerksamkeit der Gesellschaft sowie Spannung und Abenteuerlust erzeugt.

Raumfahrt – insbesondere die bemannte Raumfahrt – vermag zu inspirieren und zu motivieren, etwa zur Änderung des individuellen Verhaltens gegenüber Mitmenschen und Umwelt (z. B. Sagan 2011, s. Kasten unten). Die Erforschung des Weltraums generiert außerdem Erkenntnisse, die unser Verständnis des Planeten Erde und seiner Entstehung sowie des Sonnensystems, der Milchstraße und des Universums verbessern. Wissenschaftliche Erkenntnisse aus der Raumfahrt sind immer wieder Basis für Innovationen auf der Erde – allein die NASA listet auf ihrer „NASA Spinoff“-Website<sup>3</sup> über 2.000 kommerzielle Produkte, die seit 1976 aus ihrer Arbeit hervorgegangen sind (National Aeronautics and Space Administration (NASA) o.J. b). Zu den auf diese Weise entstandenen

oder entscheidend vorangebrachten Technologien zählen Smartphone-Kameras, Luftreinigung in Innenräumen und das bis heute angewandte Verfahren zur Gewährleistung von Lebensmittelsicherheit in den USA (National Aeronautics and Space Administration (NASA) o.J. a). Insbesondere im medizinischen Bereich existieren viele Synergien zwischen der Forschung für die bemannte Raumfahrt und Anwendungen auf der Erde, etwa bei der Entwicklung von neuen Werkzeugen für das Gesundheits-Monitoring und hinsichtlich eines vertieften Verständnisses von physiologischen und psychologischen Prozessen, welches Diagnostik und Behandlungen verbessern kann (European Space Agency (ESA) o.J. i).

### Faszination Weltraum – wie der Blick von „oben“ das Leben „unten“ beeinflussen kann

Der Blick aus dem Weltraum auf die Erde kann der Menschheit vor Augen führen, wie einzigartig und schützenswert ihr Planet ist. Der Blick zurück auf die Erde rief in der Vergangenheit bei Astronaut\*innen Gefühle wie Ehrfurcht, Selbsttranszendenz und ein starkes Gefühl der Verbundenheit mit der gesamten Menschheit und der Natur auf der Erde hervor (Yaden et al. 2016; Voski 2020). Auch die wahrgenommene Fragilität der Erde in ihrer Gesamtheit wurde immer wieder betont und spielte u. a. eine Rolle bei der Entstehung der Umweltbewegung (Banner 2020).

Diese Wirkung der Betrachtung der Erde „von außen“ wird als Overview Effect bezeichnet (White 1987). Sie ist auch bei der Betrachtung von aus dem Weltall aufgenommenen Aufnahmen der Erde zu beobachten (Yaden et al. 2016). Zu den bekanntesten dieser Fotografien zählen die Aufnahmen „Earthrise“ von 1968 (Aufnahme der Erde von der Mondoberfläche; Yaden et al. 2016) und „Pale Blue Dot“ von 1990 (Aufnahme der Erde von der Voyager-1-Sonde; National Aeronautics and Space Administration (NASA) 2019d). Berühmte Worte für das mit diesen Bildern verbundene Gefühl fand der NASA-Wissenschaftler Carl Sagan, der das von ihm initiierte „Pale Blue Dot“-Foto folgen-

<sup>3</sup> <https://spinoff.nasa.gov/>

dermaßen kommentierte: „Schau nochmal auf den Punkt. Das ist hier. Das ist zuhause. Das sind wir. Auf ihm hat jeder, den du liebst, jeder den du kennst, jeder, von dem du jemals gehört hast, jeder Mensch, der jemals existiert hat, sein Leben gelebt“ (Sagan 2011, Übersetzung aus Banner 2020).

Vor diesem Hintergrund ist es nicht überraschend, dass vielen Astronaut\*innen Umweltthemen besonders am Herzen liegen (Voski 2020). Manche nutzen ihre öffentliche Bekanntheit gezielt, um auf Umweltanliegen hinzuweisen, wie der französische Astronaut Thomas Pesquet, der nach seinem Aufenthalt auf der ISS aus Sorge um die Umwelt Goodwill Ambassador der FAO wurde (Blendis 2022). Auch der deutsche Astronaut Alexander Gerst postete bereits während seines Aufenthalts auf der ISS vielbeachtete Fotos von Naturkatastrophen aus dem Weltall (Tagesspiegel 2018). Nach seiner Rückkehr sendete Gerst unter anderem einen Videoappell zur Eröffnung der UN-Weltklimakonferenz 2018 (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) 2018) und warnte bei einer Ansprache vor dem Wirtschaftsausschuss des Bundestags vor den Folgen des Klimawandels (Tagesspiegel 2019).

Die Diskussion über bemannte vs. unbemannte Raumfahrt wird seit Beginn des Raumfahrtzeitalters mit variierender Intensität geführt. In der bemannten Raumfahrt ist es schon mehrfach zu Katastrophen gekommen, die Menschenleben gekostet haben. Allein bei den zwei Space-Shuttle-Katastrophen mit den Raumfähren „Challenger“ im Jahr 1986 und „Columbia“ im Jahr 2003 sind alle an Bord befindlichen Personen (insgesamt 14) gestorben (Uri 2021; Uri 2023).

Angesichts des Verlustes von Menschenleben werden unterschiedliche Argumente und Gegenargumente vorgebracht: So wird aus Nutzensicht hinterfragt, welchen Mehrwert menschliche Raumfahrer\*innen gegenüber technischen Systemen wie Satelliten, Raumsonden und robotischen Systemen bringen. Aus finanzieller Sicht lassen sich die durch bemannte Raumfahrt verursachten Kosten im Vergleich zur unbemannten Raumfahrt gegenüberstellen. Aus tech-

nischer Sicht wird erörtert, welche Technologien für bemannte Raumfahrt erforderlich sind und welche technischen Innovationen durch bemannte vs. unbemannte Raumfahrt hervorgebracht werden können, z. B. im Bereich Robotik. Aus wissenschaftlicher Perspektive geht es darum, welche Forschungen im Rahmen unbemannter oder bemannter Raumfahrt möglich sind und welchen Nutzen diese Erkenntnisse für den wissenschaftlichen Fortschritt, z. B. für medizinische Therapien oder robotische Systeme, haben können. Hinzu kommt noch die philosophische Perspektive, in der es um die Frage geht, wie die bemannte Erforschung des Weltraums die Wahrnehmung des Universums sowie das Selbstverständnis des Individuums beeinflusst (s. Kasten auf S. 27).

Es ist aber ebenso gut denkbar, dass in Phasen, in denen die bemannte Raumfahrt ohne nennenswerte Zwischenfälle und Rückschläge läuft, die Bedeutung einzelner Argumente abnimmt. Aufgrund der verschiedenen möglichen Perspektiven, der Gewichtung einzelner Argumente und der unterschiedlichen Zielsetzungen raumfahrender Nationen ist es an dieser Stelle nicht möglich, ein abschließendes Ergebnis dieser andauernden Diskussion zu formulieren. Letztlich lässt sich aus Umweltsicht festhalten, dass die Durchführung von Weltraumflügen unabhängig von der geladenen Fracht negative Umweltwirkungen nach sich zieht. Problematiken wie die steigende Anzahl von Raketenstarts durch eine Zunahme des Weltraumtourismus sind der bemannten Raumfahrt zuzuordnen, während andere Umweltwirkungen, wie die Zunahme an Weltraumschrott im Erdbereich, vor allem auf die unbemannte Raumfahrt entfallen.

Der Nutzen von Raumfahrt für den technologischen, wissenschaftlichen oder gesellschaftlichen Fortschritt – unabhängig davon, ob es sich dabei um bemannte oder unbemannte Raumfahrt handelt – wird kontinuierlich hinterfragt, wenn der Nutzen ins Verhältnis zu den Kosten gesetzt wird.

Die öffentliche Wahrnehmung der Kosten für Raumfahrt unterliegt dabei einer deutlichen Verzerrung. Eine repräsentative Umfrage<sup>4</sup> (Harris Interactive 2019) in Europa hat gezeigt, dass die jährlich aufgewendeten Steuergelder bzw. Kosten für Raumfahrt stark überschätzt werden: Während die tatsächlichen

<sup>4</sup> 5.227 teilnehmende Bewohner\*innen aus Deutschland, Frankreich, Italien, Spanien und dem Vereinigten Königreich.

Kosten bei rund 10 Euro pro Kopf pro Jahr (in Relation zur Bevölkerungszahl der befragten Länder) liegen, schätzten die Befragten in Deutschland Kosten von ca. 284 Euro pro Kopf und Jahr. Im Mittel lag die Schätzung bei ca. 245 Euro. Dieselbe Umfrage hat allerdings auch gezeigt, dass es in der Bevölkerung insgesamt dennoch eine hohe Zustimmung zur Raumfahrt gibt und Raumfahrtaktivitäten als wichtig erachtet werden (Harris Interactive 2019). Auch durch Entwicklungen wie die deutliche Erhöhung des ESA-Budgets 2022 um 17 % auf 7,15 Mrd. Euro (European Space Agency (ESA) 2022a; European Space Agency (ESA) 2022c) stiegen die Pro-Kopf-Kosten der Raumfahrt bei weitem nicht in den in der Studie geschätzten Bereich: Die für 2024 veranschlagten Haushaltsmittel für die gesamte Luft- und Raumfahrt in Höhe von 2,4 Mrd. Euro (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2023) bedeuten Kosten von 28,81 € pro Bürger\*in (Bevölkerungsdaten: Statista GmbH 2023c). Nichtsdestotrotz stellt dies eine erhebliche Steigerung der für die Raumfahrt aufgewendeten Steuergelder dar.

Das öffentliche Interesse an der Raumfahrt ist in Deutschland nicht nur durch die wirtschaftliche Bedeutung (siehe Kapitel 3.2), sondern vor allem durch medienwirksame Aktivitäten deutscher Raumfahrer und durch Erfolge in der unbemannten Raumfahrt geprägt. Insbesondere die zwei Aufenthalte des deutschen Astronauten Alexander Gerst (European Space Agency (ESA) o.J. a) auf der Internationalen Raumstation ISS (2014 und 2018) erfuhren medial großes Interesse. Mit Matthias Maurer war vom 11. November 2021 bis zum 5. Mai 2022 bereits der vierte deutsche Astronaut

auf der ISS tätig (European Space Agency (ESA) o.J. h). Von öffentlichem Interesse begleitet wurde auch die Initiative „Die Astronautin“, die auf das Engagement der Unternehmerin Claudia Kessler zurückgeht. Ziel ist es, erstmals eine deutsche Astronautin auszubilden und ihr einen Einsatz auf der ISS zu ermöglichen (Stiftung erste deutsche Astronautin 2022).

Auch in der unbemannten Raumfahrt konnten unter maßgeblicher deutscher Beteiligung in der jüngsten Vergangenheit Erfolge erzielt werden. Zu nennen ist hier unter anderem die gelungene Landung der Raumsonde „Philae“ auf dem Kometen 67P/Tschurjumow-Gerassimenko im Jahr 2014 (European Space Agency (ESA) o.J. e).

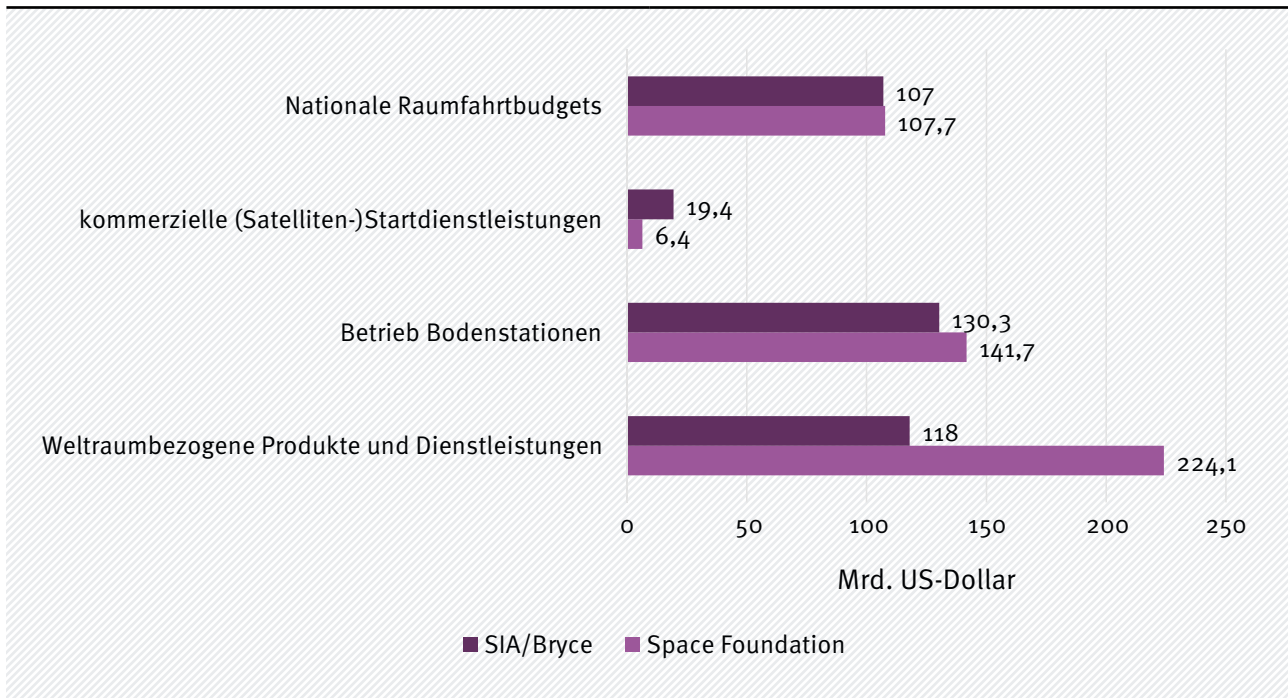
### 3.2.2 Ökonomische Aspekte

Der globale Weltraummarkt, also der industrielle Bereich, dessen Wertschöpfung mit Raumfahrtaktivitäten zusammenhängt, ist ein Wachstumsmarkt, der verschiedene Segmente umfasst: Neben den nationalen Raumfahrtbudgets zählen die Bereiche Satellitenstarts/-dienstleistungen, Bodenstationen/-dienstleistungen sowie weltraumbezogene Produkte und Dienstleistungen dazu. Wenn nachfolgend zu den einzelnen Marktsegmenten Zahlen genannt werden, ist dabei zu beachten, dass zwei verschiedene Quellen (BRYCE Space and Technology 2022; Space Foundation 2022) aufgrund unterschiedlicher methodischer Herangehensweisen zu unterschiedlichen Einschätzungen hinsichtlich der Größe der Marktsegmente kommen (Rencelj et al. 2023; S. 126).



Abbildung 3

**Volumina der vier Marktsegmente in Mrd. US-Dollar für das Jahr 2021**

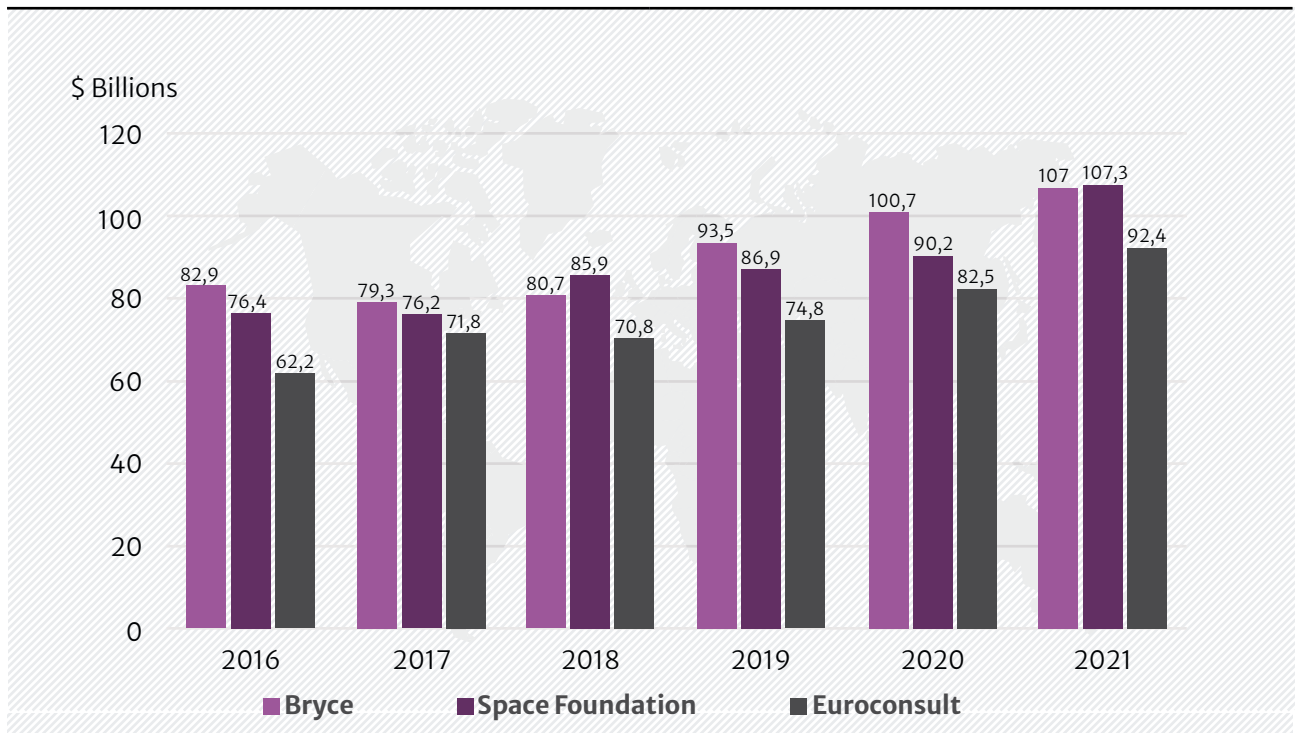


Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf Daten aus Rencelj et al. 2023, S. 125

- Mit Blick auf das erste Marktsegment, die **nationalen Raumfahrtbudgets**, zeigt sich in Abbildung 4 eine Steigerung der kumulierten, weltweiten staatlichen Ausgaben für Raumfahrt seit 2016 (Rencelj et al. 2023; S. 139). Die Spanne bewegt sich zwischen 62,2 Mrd. US-Dollar und 82,9 Mrd. US-Dollar im Jahr 2016 und 92,4 Mrd. US-Dollar und 107,3 Mrd. US-Dollar im Jahr 2021. Den größten Anteil daran hat das Budget der USA: Mit 51,8 Mrd. US-Dollar bis 54,59 Mrd. US-Dollar sind es mehr als alle anderen raumfahrenden Nationen zusammen (Rencelj et al. 2023; S. 141). Das konsolidierte Budget für die europäische Raumfahrt betrug im Jahr 2021 14,1 Mrd. Euro (Rencelj et al. 2023; S. 141). Von diesem Budget ging 2021 mit rd. 6,49 Mrd. Euro fast die Hälfte an die ESA (European Space Agency (ESA) 2021a). Die deutschen Ausgaben für den Weltraum betragen 2021 in absoluten Zahlen ca. 2,38 Mrd. Euro, also nur rund 2,5 % der weltweiten staatlichen Ausgaben (Rencelj et al. 2023; S. 141). Im Verhältnis der Ausgaben zum BIP war Deutschland 2021 weltweit aber die sechstgrößte Raumfahrtnation (USA: 0,23 % des BIP, Deutschland: 0,06 % des BIP; Rencelj et al. 2023; S. 142).
- Das zweite Marktsegment des globalen Weltraummarktes ist der Bereich **kommerzieller (Satelliten-)Startdienstleistungen** (siehe Abbildung 5). Je nach Zuschnitt dieses Marktsegments betrug dessen Volumen im Jahr 2021 zwischen 6,4 Mrd. US-Dollar und 19,4 Mrd. US-Dollar und weist nach einem Rückgang im Jahr 2019 inzwischen wieder eine steigende Tendenz auf (Rencelj et al. 2023; S. 129ff.). An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass eine enge Verknüpfung zwischen dem kommerziellen Marktsegment und dem durch öffentliche Gelder geförderten Bereich besteht. So verkauft beispielsweise das US-amerikanische Unternehmen SpaceX einen großen Teil seiner Startdienstleistungen an die NASA und wurde zum Teil auch mit öffentlichen Geldern gefördert (Kind et al. 2020).
- Ein drittes Marktsegment wird durch die mit dem **Betrieb von Bodenstationen** (z. B. Kontrollzent-

Abbildung 4

## Entwicklung des weltweiten institutionellen Raumfahrtbudgets zwischen 2016 und 2021 (in Mrd. US-Dollar)



Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf Rencelj et al. 2023; S. 139

ren, Datenverarbeitungszentren, Empfangs- und Beobachtungstationen sowie Kommunikationsinfrastruktur) verbundenen Dienstleistungen gebildet (siehe Abbildung 5). Mit einem Umsatz zwischen 130,3 Mrd. US-Dollar und 141,7 Mrd. US-Dollar stellt es eines der größten Marktsegmente dar, mit steigender Tendenz (Rencelj et al. 2023; S. 132).

4. Viertes Marktsegment sind **weltraumbezogene Produkte und Dienstleistungen** (siehe Abbildung 5). Darunter fallen beispielsweise Endkundendienste in Form von Consumer Services, z. B. TV und Radio (zwischen 42 % und 83 %), Kommunikationsdienste (zwischen 8 % und 15 %) oder auch Fernerkundung (zwischen 1 % und 2 %). Je nachdem, ob PNT-Dienstleistungen (Position, Navigation & Timing; 42 % Anteil) mitgezählt werden (in Space Foundation 2022 ja, in BRYCE Space and Technology 2022 nein), ergab sich

für 2021 ein Marktvolumen zwischen 118,3 Mrd. US-Dollar und 224,1 Mrd. US-Dollar mit einer nicht eindeutigen Entwicklungsrichtung (Rencelj et al. 2023; S. 133f.).

Der wirtschaftliche Nutzen der öffentlichen Ausgaben für die Raumfahrt wird oft in Frage gestellt (siehe Kapitel 3.2.1), jedoch zeigt eine Analyse der NASA für das Jahr 2019 (National Aeronautics and Space Administration (NASA) 2022), dass ein hoher wirtschaftlicher Nutzen erzielt werden kann. So entstand beispielsweise aus dem Budget der NASA im Jahr 2019 (21,5 Mrd. US-Dollar) eine wirtschaftliche Leistung in Höhe von 64 Mrd. US-Dollar. Mehr als 312.000 Arbeitsplätze hingen 2019 direkt von den Projekten der NASA ab. Neben diesen Effekten innerhalb der USA kooperiert die NASA zudem weltweit mit öffentlichen und privatwirtschaftlichen Akteuren, sodass noch weitere, in der genannten Quelle nicht erfasste, wirtschaftliche Effekte auftreten können.

In Deutschland erzielte die Luft- und Raumfahrtindustrie 2021 einen Umsatz von 31,4 Mrd. Euro, der zu 72 % auf Exporte entfiel; 8 % des Branchenumsatzes flossen in Forschung und Entwicklung (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2022).

### 3.2.3 Rechtliche und politische Aspekte

Grundsätzliche Aspekte des Zugangs zum Weltraum sowie seiner Nutzung und Erforschung sind international seit 1967 im Weltraumvertrag völkerrechtlich geregelt (United Nations (UN) o.J.). Der Weltraumvertrag wurde bis August 2023 von 114 Staaten ratifiziert, darunter sämtliche führende Raumfahrtnationen, und von weiteren 22 unterzeichnet (United Nations Office for Disarmament Affairs (UNODA) o.J.). Darin wird ausgeführt, dass Aktivitäten im Weltraum zum Wohle und im Interesse der Menschheit erfolgen sollen (Art. 1), dass Weltraum und Himmelskörper für alle Staaten gleichermaßen nutzbar sind und nicht Teil des Hoheitsgebietes einzelner Staaten werden können (Art. 2 und 3). Alle Staaten sind für ihre Aktivitäten im Weltall verantwortlich, genauso wie für nicht-staatliche Aktivitäten ihrer Staatsangehörigen. Nicht-staatliche Aktivitäten müssen von den Staaten autorisiert und auf die Einhaltung des Weltraumvertrags hin überwacht werden (Art. 6). Alle Staaten haften zudem für Schäden, die von ihnen in den Weltraum verbrachte Objekte anrichten (Art. 7). Alle Aktivitäten sollen unter dem Gesichtspunkt der Interessen aller Staaten der Erde ausgeführt werden. Die Staaten sind angehalten, wissenschaftliche Tätigkeiten auszuführen, um eine Kontamination des Weltalls zu vermeiden (Art. 9).



Präsident Lyndon B. Johnson und der Botschafter der UdSSR, Anatoli Dobrynin, schütteln sich die Hände bei der Unterzeichnung des Weltraumvertrags, 27. Januar 1967/ © Digital public library of america

Zusätzliche völkerrechtliche Verträge und Übereinkommen, wie das Weltraumrettungsübereinkommen (1968), das Weltraumhaftungsübereinkommen (1972), das Weltraumregistrierungsübereinkommen (1976) und der Mondvertrag (Agreement Governing the Activities of States on the Moon and Other Celestial Bodies (Übereinkommen zur Regelung der Tätigkeiten von Staaten auf dem Mond und anderen Himmelskörpern), 1979) spezifizieren die im Weltraumvertrag angelegten Punkte: Das Weltraumrettungsübereinkommen ergibt sich aus Art. 5 des Weltraumvertrags, das Weltraumhaftungsübereinkommen aus Art. 7, das Weltraumregistrierungsübereinkommen aus Art. 8 und der Mondvertrag aus dem gesamten Weltraumvertrag, in dem der Mond als Himmelskörper spezifisch und mehrfach genannt wird. Den Mondvertrag haben allerdings nur 18 Nationen weltweit ratifiziert und weitere 4 Nationen unterzeichnet, darunter keine der führenden Raumfahrtnationen – wodurch der Mondvertrag in der Praxis weitestgehend bedeutungslos ist (Schladebach 2019).

Insgesamt betrachtet, weisen die völkerrechtlichen Verträge angesichts der dynamischen – v. a. kommerziellen – Entwicklung der vergangenen Jahrzehnte große Lücken auf. Es besteht somit zusätzlicher Regelungsbedarf (Bundesregierung 2018; Bundesregierung 2019b). Vor allem folgende drei Aspekte verdeutlichen diesen Bedarf:

1. Die steigende Zahl an künstlichen Objekten im Weltraum verschärft das Problem des Weltraumschrotts (siehe Kapitel 4.2.4). Um die in den Weltraum gesandten Objekte identifizieren zu können, wurde bereits 1975 das Weltraumregistrierungsübereinkommen als Ergänzungsvertrag zum Weltraumvertrag verabschiedet (United Nations Office For Outer Space Affairs (UNOOSA) 1974; Auswärtiges Amt 2023). Diese internationale Übereinkunft verpflichtet alle Vertragspartner, die von ihnen gestarteten Objekte in einem nationalen Register zu erfassen. Zusätzlich muss dieses in das vom Büro der Vereinten Nationen für Weltraumfragen (UNOOSA) verwaltete internationale, frei zugängliche Register zur Verfügung gestellt werden. Seit 1957 wurden über 14.800 Objekte registriert (Stand 03.09.2023; United Nations Office For Outer Space Affairs (UNOOSA) 2023). Darüber hinaus existieren schätzungsweise über 100.000 Stücke Weltraumschrott, die größer als ein Zentimeter sind (36.500 größer als zehn Zentimeter; ESA Space Debris Office 2021). Die Kritik am Weltraumregistrierungsübereinkommen bezieht sich vor allem darauf, dass die Registrierung teilweise um Monate oder gar Jahre zeitverzögert erfolgt, sodass es faktische Lücken gibt, in denen nicht-registrierte Objekte im Weltraum aktiv sind, deren Position, Lebensdauer und Art anderen raumfahrenden Nationen unbekannt bleiben.
  2. Eng verknüpft mit der Problematik der zunehmenden Zahl an Objekten im Weltraum und dem daraus resultierenden Problem des Weltraumschrotts ist die rechtliche Frage nach der Haftung im Falle von Schäden, beispielsweise durch die Kollision zweier Satelliten. Die sogenannte Weltraumhaftung ist geregelt im Weltraumhaftungsübereinkommen von 1972 (United Nations Office For Outer Space Affairs (UNOOSA) 1972). Zusammen mit dem Weltraumregistrierungsübereinkommen soll im Schadensfall eine Identifikation der betroffenen Weltraumgegenstände möglich sein. Das Weltraumhaftungsübereinkommen regelt vor allem die Sicherstellung eines angemessenen Schadenersatzes im Schadensfall (Auswärtiges Amt 2023). Dabei kann zum einen derjenige Staat haftbar gemacht werden, der als Startstaat gilt oder dem der schadensverursachende Gegenstand zugeordnet werden kann. Auch der Betreiber des Weltraumgegenstands, z. B. ein Unternehmen, unterliegt einer potentiellen Haftung (Richter und Schwenke 2021; 59:00). Als Weltraumgegenstände gelten alle von Menschen geschaffenen Gegenstände, die für eine Nutzung im Weltraum vorgesehen sind.
- Zudem gab es auch andere Fälle, die zwar im Geltungsbereich des Weltraumhaftungsübereinkommens liegen, in welchen die Streitfragen jedoch auf anderen Wegen gelöst wurden (Richter und Schwenke 2021; 59:00). Beispielsweise löste der Absturz des sowjetischen Satelliten mit Nuklearantrieb „Kosmos 954“ über unbewohntem Gebiet in Kanada im Jahr 1978 einen Streit über den Schadenersatz aus. Dieser wurde zwar beigelegt (Cohen 1984; Parks 2009), verdeutlichte allerdings auch, dass Umweltschäden zu diesem Zeitpunkt nicht unmittelbar im Haftungsübereinkommen geregelt waren. Dies führte zur Verabschiedung einer UN-Resolution im Jahr 1992 sowie einer Aktualisierung und ambitionierteren Gestaltung des Weltraumhaftungsübereinkommens im Jahr 2009 in Form des sogenannten „Safety Frameworks“ (United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space Scientific and Technical Subcommittee (COPUOS) und International Atomic Energy Agency (IAEA) 2009).
- Durch nationale Gesetzgebung, die den Vorschriften des Weltraumvertrags folgt, können Staaten teilweise von ihrer unbeschränkten Haftung gegenüber privaten Raumfahrtunternehmen befreit werden. Dies dient dazu, Staaten vor den Handlungen unzuverlässig agierender Raumfahrtunternehmen zu schützen (Schladebach 2019). In Deutschland ist dies bislang nicht geregelt, während Länder wie Frankreich beispielsweise Haftungsobergrenzen für Unternehmen festlegen, bis zu denen die Unternehmen schadenersatzpflichtig sind, ehe der Staat einspringt (Sürig 2021c).
3. Ein dritter Aspekt, in dem nationale Gesetzgebung internationale Regularien ergänzt, ist die Regelung privatwirtschaftlicher Aktivitäten am Beispiel des Ressourcenabbaus im Weltraum. Zwar regeln der Weltraumvertrag, wie auch der Mondvertrag grundsätzlich, dass Territorien im Weltraum nicht von einzelnen Nationen angeeignet werden können. Die Frage des Ressourcenabbaus ist nichtsdestotrotz juristisch umstritten, da nicht abschließend geklärt ist, ob er zum Wohle der Menschheit erfolgt

oder aus kapitalistisch motivierten Partikularinteressen. Das hat dazu geführt, dass einzelne Nationen, bislang die USA, Luxemburg, die Vereinten Arabischen Emirate und Japan (Gradoni 2018; Bundesregierung 2019b; Emirates News Agency (WAM) 2020; JapanWelt 2021; Luxembourg Space Agency (LSA) 2021) zu diesem Aspekt nationale Gesetze geschaffen haben. Damit soll u. a. ein rechtssicherer Rahmen für Unternehmen geschaffen werden, die anstreben, Ressourcen im Weltraum abzubauen. Bislang gibt es noch keine praktische Anwendung des Ressourcenabbaus (siehe Kapitel 5.4), dennoch sind gesetzliche Regelungen als Anreiz für Unternehmen zu verstehen, in den genannten Ländern ihre Geschäftstätigkeiten anzusiedeln. Es ist daher erwartbar, dass auch weitere Länder nationale Gesetzgebungen auf den Weg bringen werden. Damit steigt zudem der jetzt schon ersichtliche multilaterale und bilaterale Abstimmungsbedarf, denn wie bereits angeklungen, sind nationale Alleingänge mit Blick auf die technische, wirtschaftliche und politische Komplexität im Weltraum nur schwer realisierbar. So haben beispielsweise die USA und Luxemburg im Jahr 2019 eine Absichtserklärung zur zukünftigen Zusammenarbeit beim Abbau von Ressourcen abgegeben (Die Luxemburger Regierung 2019; Zeit Online 2019). Neue Abkommen bergen hingegen die Gefahr, mit bestehenden völkerrechtlichen Regelungen in Konflikt zu geraten: Die von den USA initiierten „Artemis Accords – Principles for Cooperation in the Civil Exploration and Use of the Moon, Mars, Comets, and Asteroids for Peaceful Purposes“ (National Aeronautics and Space Administration (NASA) 2020b) stehen in der Kritik, weil sie in Abschnitt 11 unter anderem die Einrichtung von Sicherheitszonen vorsehen, in denen der ausweisende Akteur ein Vorrecht auf ungestörte Durchführung seiner Aktivitäten anmelden kann (Stirn 2020); im Weltraumvertrag ist eine derartige Aneignung von Arealen im Weltraum sowie die damit verbundene Einschränkung der Aktivitäten anderer Akteure jedoch untersagt (siehe oben; Art. 2, 3, 6). Zwar handelt es sich bei den Artemis Accords lediglich um Richtlinien ohne Rechtsverbindlichkeit; Kritiker\*innen befürchten aber, dass auf diesem Weg ein Gewohnheitsrecht im Weltraum etabliert werden soll, welches auf Dauer die bestehenden völkerrechtlichen Regelungen aufweichen soll (Stirn 2020).

In Deutschland gewinnen kommerzielle Weltraumaktivitäten an Dynamik (siehe Kapitel 3.2) und somit steigt auch hier der Bedarf an rechtlich verbindlichen Regelungen, innerhalb derer Unternehmen ihre Geschäftstätigkeiten entwickeln können. Zuvor wurde bereits angedeutet, dass im Bereich der Haftungsfragen ein Rechtsrahmen für Unternehmen fehlt: Unternehmen, insbesondere Start-ups, sehen sich mit Geschäftsrisiken konfrontiert, wenn sie gefordert sind, unbegrenzte Haftungsrisiken zu tragen. Auch der Aspekt des Ressourcenabbaus soll nach Vorstellung deutscher Raumfahrtunternehmen Bestandteil eines nationalen Weltraumgesetzes werden (Wachter et al. 2018; S. 14). Im November 2021 hat der Bundesverband der Deutschen Industrie eine New Space-Initiative gegründet, die in einzelnen Arbeitsgruppen zu verschiedenen Aspekten, so auch einem nationalen Weltraumgesetz, tätig werden soll (Sürig 2021b; Wachter 2021). Seitens der Bundesregierung ist bereits seit 2017 ein nationales Weltraumgesetz angekündigt. Eine Umsetzung ist noch nicht erfolgt (Sürig 2019; Sürig 2021c), obwohl dies im Koalitionsvertrag zwischen CDU/CSU und SPD von 2018 als Ziel erwähnt wurde (Bundesregierung 2019a; S. 58). Im Koalitionsvertrag von 2021 zwischen SPD, FDP und Bündnis 90/Die Grünen findet sich diesbezüglich dagegen kein Hinweis mehr, wenngleich Raumfahrt und New Space als Zukunftstechnologien erkannt werden (Sozialdemokratische Partei Deutschlands (SPD) et al. 2021; S. 27). Wie in Kapitel 3.2 dargelegt, ist die Erarbeitung eines Weltraumgesetzes nach Abschluss der derzeit in Bearbeitung befindlichen Weltraumstrategie der Bundesregierung geplant (Stand: 02. September 2023).

### 3.2.4 Weltraumnation Deutschland

Deutschland spielt heute für die internationale Raumfahrt und die Erforschung des Weltraums eine wichtige Rolle. Deutschland leistet nach Frankreich den zweithöchsten finanziellen Beitrag zum Budget der ESA (siehe Kapitel 3.2.2). Wichtige Standorte der ESA befinden sich in Deutschland, u. a. das Satellitenkontrollzentrum (ESOC) in Darmstadt, das Europäische Astronautenzentrum (EAC) in Köln sowie das Columbus-Kontrollzentrum (Col-CC) in Oberpfaffenhofen, von wo das europäische Modul Columbus der Internationalen Raumstation ISS gesteuert wird.

Die erste deutsche Raumfahrtstrategie wurde 2010 veröffentlicht (Bundesministerium für Wirtschaft

und Technologie (BMWi) 2012; S. 2). Eine Aktualisierung war zwar für die vergangene Legislaturperiode (2017 - 2021) vorgesehen, wurde aber nicht umgesetzt. Im Koalitionsvertrag der gegenwärtigen Bundesregierung wurde die Aktualisierung der deutschen Raumfahrtstrategie erneut als Ziel ausgegeben (Sozialdemokratische Partei Deutschlands (SPD) et al. 2021; S. 27). Auch der Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) und der Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie (BDLI) erachteten eine Fortschreibung der Strategie als notwendig, um die Position der deutschen Raumfahrt zu stärken (Thalhofer 2021; Wachter et al. 2021). Unter Mitarbeit von Vertreter\*innen aus Wissenschaft, Industrie, Behörden und Ressorts wurde der öffentliche Strategie-Konsultationsprozess im April 2023 abgeschlossen (Bundesregierung 2023; S. 3). Die Verabschiedung im Bundeskabinetterfolgte im September 2023 (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2022). Im Anschluss an die neue Raumfahrtstrategie ist die Erarbeitung eines deutschen Weltraumgesetzes vorgesehen (Bundesregierung 2023; S. 13).

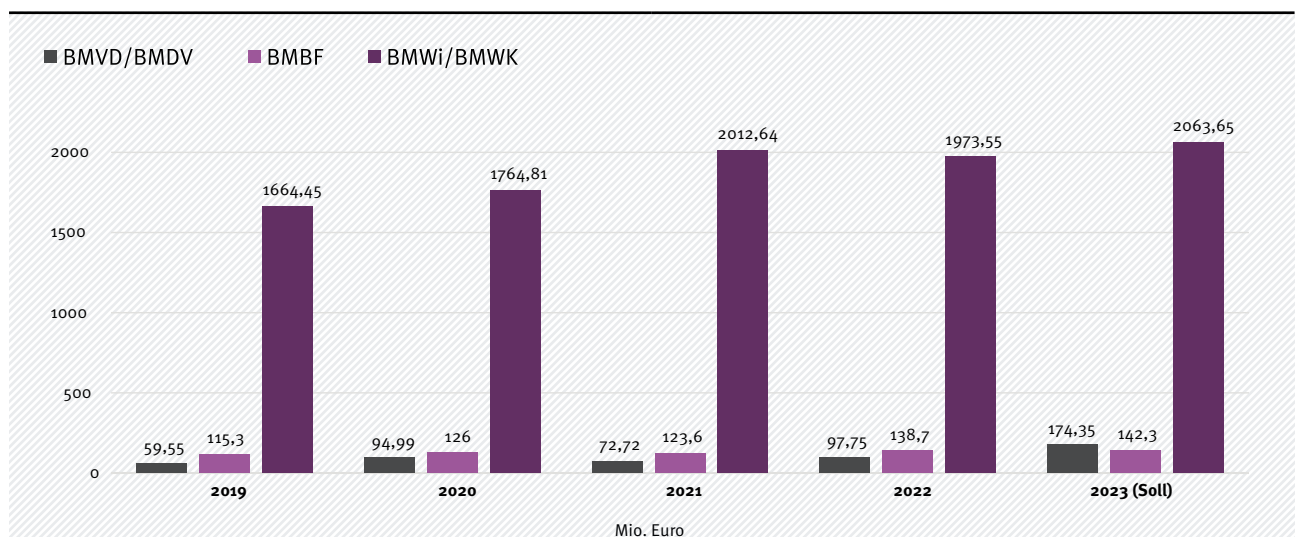
Als zusätzliches Förderprogramm soll die INNOspace-Initiative der Deutschen Raumfahrtagentur gezielt Unternehmen aus dem New-Space-Bereich unterstüt-

zen und in engen Dialog mit ihnen treten, wie beispielsweise den Entwickler\*innen kleinerer Trägersysteme (Bundesregierung 2023; S. 8).

Die geplanten öffentlichen Ausgaben für Luft- und Raumfahrt betragen für 2024 rund 2,4 Mrd. Euro, ein Anstieg von 1,75 Mrd. Euro im Vergleich zu 2009 (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2023). Ein Großteil davon liegt in der Verantwortung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), das u. a. den deutschen Beitrag zur ESA leistet (Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) o.J.), das Nationale Programm für Weltraum und Innovation finanziert sowie den Betrieb des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) fördert (Bundesministerium der Finanzen (BMF) 2021a; Bundesministerium der Finanzen (BMF) 2021b). Auch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) und das Bundesverteidigungsministerium (BMVg) beteiligen sich an der Entwicklung und dem Betrieb von Raumfahrttechnologien und an der Raumfahrtforschung (Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 2021a; Bundesministerium der Finanzen (BMF) 2020).

Abbildung 5

**Ausgaben der Bundesministerien<sup>5</sup> für Raumfahrt von 2019 bis 2023**

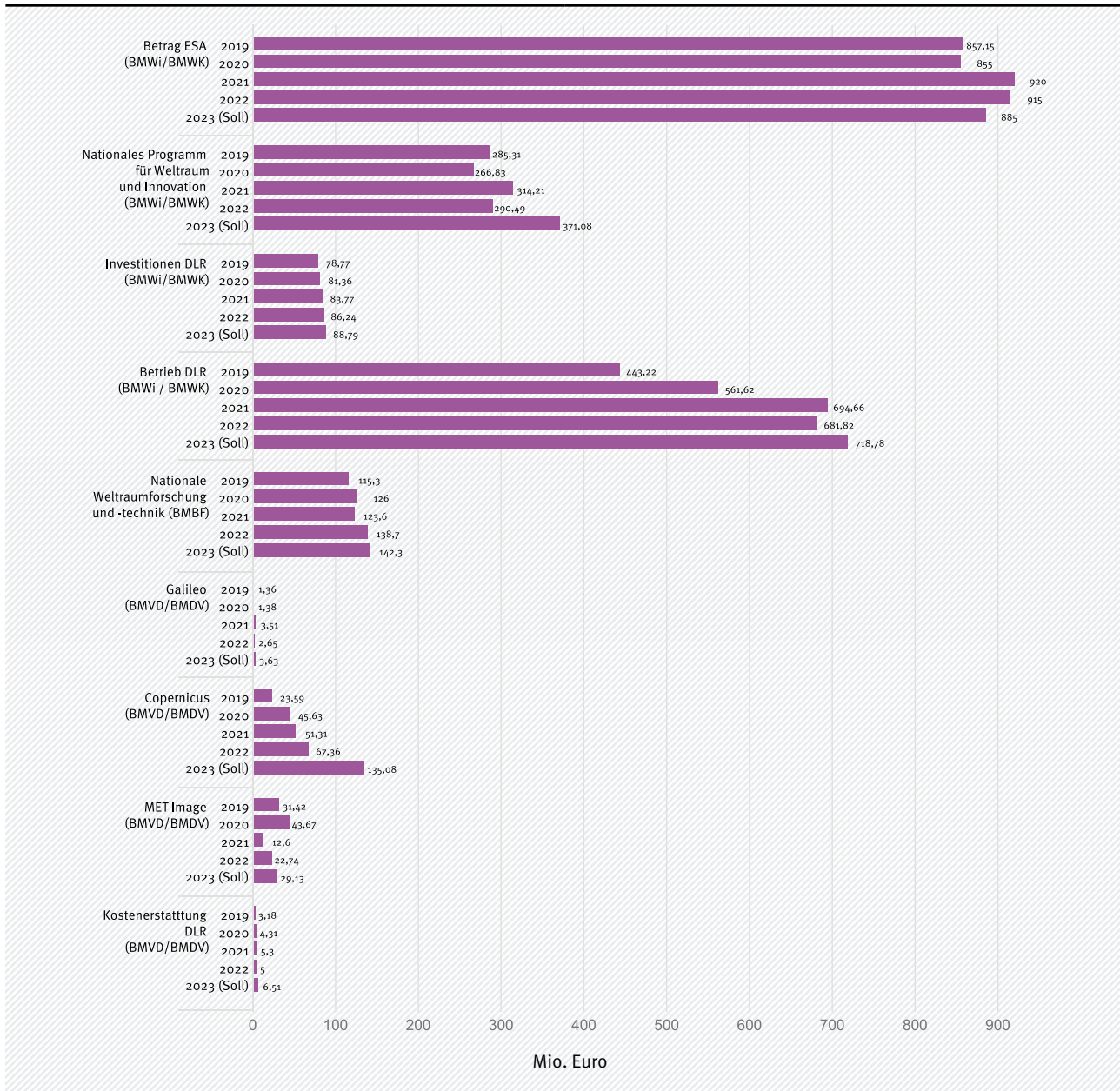


Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf Rencelj et al. 2023; S. 139

<sup>5</sup> Das Bundesverteidigungsministerium ist in der Darstellung nicht berücksichtigt, da militärische Aspekte nicht Bestandteil der Trendanalyse sind.

Abbildung 6

**Ausgaben der Bundesministerien für Raumfahrt von 2019 bis 2023, aufgeteilt nach einzelnen Posten**



Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf Daten aus: bundeshaushalt.de

Aktuell gibt es in Deutschland mehr als 600 Akteure in Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft, die direkt an der Raumfahrt beteiligt sind (Zeitler et al. 2019). Zu den bekanntesten Akteuren gehört das DLR, das den Raumfahrtbetrieb verantwortet, Raumfahrtforschung betreibt und mittlerweile 55 Institute an 30 Standorten in Deutschland unterhält (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) 2021). Innerhalb des DLR befassen sich zwei Institute besonders mit Fragen

der Raumfahrt: Zum einen vertritt die Deutsche Raumfahrtagentur die Bundesregierung in internationalen Gremien und plant und setzt die deutschen Raumfahrtaktivitäten um (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) 2021); zum anderen bilden das Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) und das Institut für Methodik der Fernerkundung (IMF) das Earth Observation Center (EOC) des DLR, welches sich mit Erdbeobachtung und ihrer Anwendung beschäf-

tigt (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) o.J.).

Deutsche Unternehmen sind Kooperationspartner bei der Entwicklung von Raumfahrttechnologien, z. B. konstruiert der Geschäftsbereich „Airbus Defence and Space“ der Airbus Group in Bremen das „European Service Modul“, das voraussichtlich im Jahr 2025 Bestandteil der Mondfähre Orion bei der Rückkehr zum Mond sein wird (Amos 2020). Ein weiterer wichtiger wirtschaftlicher Akteur ist das Unternehmen OHB SE, ebenfalls mit Sitz in Bremen, das u. a. Satelliten und Komponenten für Raumsonden fertigt, wie etwa alle 34 Satelliten für das europäische GALILEO-System (OHB SE 2023). Der „New Space“-Szene zuzurechnen sind zudem Start-Ups wie die ExoLaunch GmbH, die so genanntes Ride Sharing (das gemeinsame Nutzen einer Rakete zum Transport von Satelliten ins All durch mehrere Unternehmen) anbietet (Exolaunch 2022).

Wirtschaftliche Akteure, die im Bereich Luft- und Raumfahrt aktiv sind, sind im Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie e. V. (BDLI)<sup>6</sup> und dem Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI; Wiskow 2019) organisiert, wodurch sie ihre Interessen gegenüber der Politik vertreten. Im Jahr 2022 erzielten deutsche Unternehmen im Bereich Raumfahrt Umsätze in Höhe von ca. 2,6 Mrd. Euro und beschäftigten rund 9.000 Mitarbeitende (Statista GmbH 2023d; Statista GmbH 2023e).

Raumfahrtakteure aus Wirtschaft, Wissenschaft und dem Raumfahrtmanagement (ESA- sowie DLR-Einrichtungen zum Raumfahrtbetrieb) sind vor allem in Bayern, Bremen, Baden-Württemberg, Hessen, Berlin und Nordrhein-Westfalen angesiedelt. Für junge Unternehmen bzw. Start-Ups spielt die räumliche Nähe zu Forschungsinstituten und Inkubatoren, also Einrichtungen zur Unterstützung von Unternehmensgründungen, des ESA-Business Incubator Centre-Programms (ESA BIC) eine wichtige Rolle, um Zugriff zu Know-How sowie technische und finanzielle Unterstützung zu erlangen. Strategische Vernetzung zwischen Akteuren aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik findet auch im Rahmen von staatlich geförderten Clusterinitiativen<sup>7</sup> und Branchennetzwerken statt, von denen vier in ihrem Schwerpunkt dem Bereich Raumfahrt zuzuord-

nen sind: In Bayern der *bavAIRia e.V.*, in Bremen der *AVIASPACE BREMEN e.V.*, in Berlin-Brandenburg das Cluster Verkehr, Mobilität und Logistik sowie in Baden-Württemberg das Cluster *BodenseeAIRia* (Kind et al. 2020).

### 3.3 Ökologisch nachhaltige Nutzung des Weltraums – aktuelle Diskussion und Systemgrenzen im Bericht

#### 3.3.1 Die Ausweitung von Schutzgütern auf den Weltraum

Auf der Erde sind Schutzgüter mittlerweile klar definiert;<sup>8</sup> im Kontext der Nutzung und Erforschung des Weltraums wird die Frage nach Schutzgütern allerdings aktuell in Forschung und Praxis noch unterschiedlich beantwortet.

Konsens ist, dass zu den Schutzgütern der Mensch, seine Gesundheit und seine Umwelt auf der Erde zählen. Umwelt umfasst nach dem Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung „Tiere, Pflanzen und die biologische Vielfalt, Fläche, Boden, Wasser, Luft, Klima und Landschaft, kulturelles Erbe und sonstige Sachgüter sowie die Wechselwirkung zwischen den vorgenannten Schutzgütern“ (UVPG § 2). Uneinigkeit besteht dahingehend, ob und inwieweit auch die Umwelt des Menschen jenseits des Luftraums, also der Weltraum, zu den Schutzgütern zählt. Im Weltraumvertrag von 1967 (Outer Space Treaty, siehe Kapitel 3.2.3), dem Kernstück des internationalen Rechtsregimes zum Weltraum, steht die freie, gleiche, kooperative und friedliche Nutzung und Erforschung des Weltraums zum Wohle aller im Zentrum. Der Weltraumvertrag enthält keine Bestimmung zum Schutz des Weltraums (Newman und Williamson 2018). Die Bestimmungen des Weltraumvertrags implizieren jedoch auch, dass der Weltraum kein rechtsfreier Raum ist, sondern seine Nutzung durch Prinzipien geregelt wird (Newman und Williamson 2018).

Der Mondvertrag geht über die Bestimmungen des Weltraumvertrags hinaus. Seit dem Inkrafttreten des

<sup>6</sup> Kampagne des BDLI zum Nutzen der Raumfahrt: <https://www.die-raumfahrt.de/>

<sup>7</sup> Nähere Informationen zur Clusterpolitik von BMWK und BMBF: <https://www.clusterplattform.de/>

<sup>8</sup> Im Nachfolgenden wird der Begriff „Schutzgüter“ nicht als Rechtsbegriff verwendet, sondern um allgemein zu kennzeichnen, welche Güter als schützenswert bezeichnet werden sollten

Vertrages im Jahr 1984 ist aber keine der Weltraumnationen dem Vertrag beigetreten; die meisten der Vertragsparteien unterhalten kein eigenes Weltraumprogramm (United Nations Office for Disarmament Affairs (UNODA) 2020). Im Vertrag wurde festgehalten, dass bei der Erforschung und Nutzung des Mondes und weiterer Himmelskörper auch „die Interessen künftiger Generationen“ (Übersetzung der Autor\*innen, Art. 4 Abs. 1) beachtet werden sollen. Außerdem sollen durch die Vertragsstaaten „Maßnahmen [getroffen werden], um die Störung des bestehenden Gleichgewichts [der] Umwelt [des Mondes] zu verhindern“ (Übersetzung der Autor\*innen, Art. 7, Abs. 1). Dies könne „durch die Einführung nachteiliger Veränderungen in diese Umwelt, durch ihre Verunreinigung durch die Einführung von Stoffen, die nicht zur Umwelt gehören, oder auf andere Weise geschehen. Die Vertragsstaaten erklären sich auch bereit, Maßnahmen zu treffen, um eine Beeinträchtigung der Umwelt der Erde durch die Einführung außerirdischer Materie oder auf andere Weise zu vermeiden“ (Übersetzung der Autor\*innen, Art. 7, Abs. 1). Aufgegriffen werden dementsprechend Nachhaltigkeitsfragen der Generationengerechtigkeit sowie der Bewahrung des bestehenden Umweltgleichgewichts auch im Weltraum.

In den freiwilligen „Guidelines for the Long-term Sustainability of Outer Space Activities“ des COPUOS (Ausschuss für die friedliche Nutzung des Weltraums) der Vereinten Nationen, die 2019 durch den Ausschuss angenommen wurden, wird der Erdborbit als endliche Ressource bezeichnet (United Nations Office For Outer Space Affairs (UNOOSA) 2018b; I 1.). Hintergrund ist, dass durch menschliche Eingriffe in den Orbit Auswirkungen für die langfristige Durchführbarkeit von Raumfahrtaktivitäten entstehen könnten. Umgekehrt sind Aktivitäten im Weltraum, wie z. B. Erdbeobachtung mittels Satelliten (siehe Kapitel 5.3), wichtig für die Erreichung der Ziele der VN-Agenda 2030 für Nachhaltige Entwicklung. Nach den Guidelines ist die Kooperation der Staaten notwendig, um „Schaden für die Weltraumumgebung zu vermeiden“ (Übersetzung der Autor\*innen; United Nations Office For Outer Space Affairs (UNOOSA) 2018b; I 1.). Die Freiwilligkeit erschwert jedoch die Vermeidung von Weltraumschrott und macht dadurch eine Weiterentwicklung des Rechtsrahmens erforderlich (Schladebach 2019).

Zudem wird durch den COPUOS ein Nachhaltigkeitsprinzip für die Nutzung und Erforschung des Weltraums formuliert. Die nachhaltige Nutzung und Erforschung des Weltraums umfasst in diesem Kontext dementsprechend, „die Durchführung von Weltraumaktivitäten auf unbestimmte Zeit so aufrechtzuerhalten, dass ein gerechter Zugang zu den Vorteilen der Erforschung und Nutzung des Weltraums zu friedlichen Zwecken ermöglicht wird. Dabei sollen die Bedürfnisse der heutigen Generationen erfüllt und gleichzeitig die Umwelt im Weltraum für künftige Generationen erhalten werden“<sup>9</sup> (Übersetzung der Autor\*innen; United Nations Office For Outer Space Affairs (UNOOSA) 2018b; I 5.). Es wird hier also explizit betont, dass die „Umwelt im Weltraum bewahrt werden soll, für heutige und zukünftige Generationen“ (Übersetzung der Autor\*innen; United Nations Office For Outer Space Affairs (UNOOSA) 2018b; I 6.). Die Guidelines betreffen den Low Earth Orbit (LEO), zur Definition siehe Kapitel 4.1.4.

Verschiedene Wissenschaftler\*innen gehen über diese Fokussierung auf den Low Earth Orbit hinaus und fordern, auch den geostationären Orbit (GEO), den darüber liegenden Friedhofsorbit (also den Raum über dem GEO, der für die Entsorgung von Weltraumschrott genutzt wird; siehe Kapitel 4.1.4) sowie weitere Himmelskörper als Schutzgüter aufzunehmen (Kramer 2020). Begründet wird dies damit, dass ähnlich wie beim Low Earth Orbit, auch in weiteren Orbits Weltraummüll die Nutzung und Erforschung für zukünftige Generationen erschweren oder unmöglich machen könnte. Die Erfahrung mit der Ressourcenextraktion auf der Erde zeigt, dass diese oft mit Eingriffen in die Umwelt und Umweltauswirkungen einhergehen (Newman und Williamson 2018). Auch weitere Orbits und Himmelskörper stellen eine begrenzte Ressource dar. Menschliche Eingriffe tragen, ähnlich wie im Falle des Low Earth Orbit durch Weltraumschrott, zu ihrer Verschmutzung bei (Losch 2020). Einwirkungen durch menschliche Aktivitäten auf anderen Himmelskörpern, wie die Nutzung ihrer ebenfalls endlichen Ressourcen, können zu irreversiblen Schäden führen, was zukünftige Erforschung und Nutzung erschweren könnte (Galli und Losch 2019).

<sup>9</sup> Der englische Passus lautet: „The long-term sustainability of outer space activities is defined as the ability to maintain the conduct of space activities indefinitely into the future in a manner that realizes the objectives of equitable access to the benefits of the exploration and use of outer space for peaceful purposes, in order to meet the needs of the present generations while preserving the outer space environment for future generations.“ (United Nations Office For Outer Space Affairs (UNOOSA) 2018b, I 5.)

In diesem Trendbericht wird entsprechend der aktuellen Analysen aus der Wissenschaft die Definition von Schutzgütern genauer in den Blick genommen. Es scheint nach bisheriger Betrachtung schlüssig, dass schützenswerte Güter der Mensch und seine Gesundheit, außerdem die menschliche Umwelt auf der Erde und im Weltraum sind. Die Umwelt im Weltraum umfasst dabei sowohl den Low Earth Orbit als auch den geostationären Orbit, den Friedhofsorbit und weitere Himmelskörper. Wie die terrestrische Umwelt sollten diese Bereiche des Weltraums in ihrem Schutzbedürfnis unbedingt rechtlich verbindlich anerkannt und somit zu Schutzgütern werden.

### 3.3.2 Nutzung und Erforschung des Weltraums – Stand der Forschung und Praxis aus Umweltsicht

Vor allem ausgelöst durch das Damoklesschwert „Klimawandel“ verändert sich die Forschungslandschaft bezüglich der Nutzung des Weltraums. Die Analyse von Umweltauswirkungen der Raumfahrt bekommt zunehmend mehr Beachtung in der Forschung. Die Vereinten Nationen im Office for Outer Space Affairs (UNOOSA) setzen sich verstärkt für die nachhaltige Nutzung des Weltraums unter Berücksichtigung der Sustainable Development Goals der Vereinten Nationen (SDGs) ein: etwa durch die Verabschiedung der „Guidelines for the Long-Term Sustainability of Outer Space Activities“ (United Nations Office For Outer Space Affairs (UNOOSA) 2018b) und der am 25. Oktober 2021 von der UN-Generalversammlung verabschiedeten Resolution namens „The Space2030 Agenda: space as a driver of sustainable development“, die explizit die Nutzung des Weltraums zum Erreichen der SDGs in den Fokus rückt (siehe auch Kapitel 6.2.2; United Nations (UN) 2021).

Die Nutzung des Weltraums unter Gesichtspunkten der Nachhaltigkeit ist grundsätzlich in drei Bereiche unterteilbar:

1. die Anwendung technischer Systeme auf der Erde, z. B. für die Auswertung von im Weltraum gewonnenen Erdbeobachtungsdaten,
2. die Herstellung und Entsorgung dieser Systeme, und
3. sämtliche im Weltraum stattfindenden Handlungen (In-situ-Verfahren).

- ▶ Laut UNOOSA versprechen der Einsatz von Erdbeobachtung und verbesserter Kommunikationssysteme positive Auswirkungen auf die SDGs (United Nations Office For Outer Space Affairs (UNOOSA) 2018a). Ebenso verbessern Erdbeobachtungssysteme und Simulationen die Grundlage für weitere Umweltforschung und politische Maßnahmen, etwa zur Verringerung von Treibhausgasen (Velden 2021).
- ▶ Jene technischen Systeme, die für grundsätzlich positive Eingriffe eingesetzt werden sollen (in erster Linie Satelliten), sind allerdings durch ihre Produktion, ihre Beförderung ins All, ihren Betrieb und durch ihren Verbleib am Ende ihres Lebenszyklus mit negativen Folgen für die Umwelt verbunden (siehe Kapitel 4.2). Dies betrifft unter anderem den Abbau von für die Produktion notwendigen Ressourcen (Dallas et al. 2020b), Emissionen während des Starts (Durrieu und Nelson 2013) und den Verbleib des Satelliten als Weltraumschrott im Orbit bzw. die entstehenden Emissionen, wenn er in der Erdatmosphäre verglüht (siehe Kapitel 4.2.4). Die Fülle dieser Umweltwirkungen ist in ihrem Umfang nicht zuletzt Folge der Vernachlässigung der Nachhaltigkeitsperspektive in der bisherigen Entwicklung der Raumfahrt.

Technische Innovationen wie leichtere Trägerraketen und Satelliten (Keronite 2023) und grüne Antriebssysteme (Bilby 2019) sollen die Auswirkungen der Raumfahrt auf die terrestrische Umwelt minimieren. Die Forschung an der Wiederverwendung von Weltraumschrott soll zudem die Erdumlaufbahn vor Verschmutzung bewahren (siehe Kapitel 4.1). Obwohl die Forschung an Technologien zur Umsetzung von Nachhaltigkeitsprinzipien in der Raumfahrt in der Praxis bisher nicht stark verbreitet ist, sehen einige Unternehmen Potenzial in der nachhaltigen Nutzung des Weltraums. Dies äußert sich in der Entwicklung von Gerüstsystemen, die mehrere Kleinsatelliten gleichzeitig tragen (German Orbital Systems o.J.), der Entwicklung einer „Müllabfuhr“ für den Weltraum (ClearSpace o.J.) sowie dem Faltsegel „On Angels Wings“ zur Verlangsamung von Satelliten am Ende ihres Lebenszyklus, was das vollständige Verglühen beim Wiedereintritt in die Atmosphäre begünstigt (High Performance Space Structure Systems (HPS) o.J.).

- ▶ Ein weiteres Forschungsgebiet fokussiert sich auf Handlungen im Weltraum, sogenannte In-situ-Ver-

fahren („vor Ort“). Die Kommerzialisierung der Raumfahrt treibt beispielsweise die Forschung zur Besiedlung von Himmelskörpern voran (Kramer 2017). Als Unterkategorie der In-situ-Verfahren ermöglichen „On-Orbit Operations“ – gemeint sind Verfahren, die direkt in der Erdumlaufbahn durchgeführt werden können – die ferngesteuerte bzw. autonome Reparatur von Satelliten und Raumstationen und den Zusammenbau von technischen Systemen (Sturm 2020).

Durch den Betrieb der zugehörigen Infrastruktur während der Nutzungsdauer des Systems (s. Kapitel 4.2.1) ist eine Veränderung des Nachthimmels durch die Vielzahl leuchtender Satelliten im Erdorbit möglich (Seidler 2019). Eine Abschirmung der Reflexion soll zur Vermeidung von Lichtverschmutzung beitragen (NOIR-lab 2021).

Zudem wird am Ressourcenabbau im All geforscht. Angesichts zukünftiger langfristiger Aufenthalte im Welt- raum und größerer Distanzen können so Transportwege eingespart und weitere Marktpotenziale erschlossen werden. Die Folgen des Ressourcenabbaus vor Ort werden von Wissenschaftler\*innen als kritisch betrachtet und starke Auswirkungen auf Boden, Wasser und Klima des Himmelskörpers erwartet (Kramer 2014). Auch ohne längeren Aufenthalt können Mikroorganismen, die Astronaut\*innen unweigerlich auf sich tragen, zu unvorhergesehenen Folgen für das bestehende Ökosystem des Planeten führen bzw. die Explorationsforschung verfälschen (Johnson et al. 2017).

Bezüglich der Nutzung des Weltraums besteht ein starkes Interesse von Seiten privater und staatlicher Akteure. Allerdings befassen sich bisher vor allem staatliche Akteure mit der Nachhaltigkeit ihrer Raumfahrtaktivitäten, während die Berücksichtigung möglicher Umwelteingriffe sowie schwerwiegender Folgen bei Aktivitäten privater Unternehmen selten im Fokus steht. Das World Economic Forum prüft in Kooperation mit anderen Raumfahrtakteuren die Umweltverträglichkeit einzelner Missionen anhand eines „Space Sustainability Rating“, um eine Verhaltensänderung bei der Durchführung von Raumfahrtaktivitäten zu bewirken (World Economic Forum o.J.). Die Teilnahme am Rating ist allerdings freiwillig. Einzelne staatliche Raumfahrtorganisationen, darunter die ESA im Rahmen der Clean Space Initiative sowie die NASA, untersuchen bereits die Umweltauswirkungen von

Weltraumaktivitäten. In Belgien und Frankreich wurden Umweltverträglichkeitsprüfungen (Environmental Impact Assessments) von Raumfahrtaktivitäten durchgeführt, die auch die extraterrestrischen Folgen der Weltraumnutzung einbeziehen (vgl. die Darstellung in Mustow 2018).

Durch die zunehmende Dringlichkeit des Kampfes gegen den Klimawandel, die deshalb steigende Nachfrage nach Daten der Fernerkundung und die Notwendigkeit der möglichst umfassenden Vermeidung weiterer negativer Umweltauswirkungen, nimmt auch die Forschung zur nachhaltigen Nutzung des Weltraums zu. Der Fokus der entwickelten Innovationen liegt vorerst vermehrt auf neuen technischen Systemen zur Minimierung des Ressourcenaufwandes der Raumfahrt. Nachhaltige Strategien wie die Umweltbewertung einzelner Aktivitäten bieten Potenziale, die bisher noch wenig ausgeschöpft werden. Dies sollte in Zukunft schon vor der Etablierung von Innovationen und der weiteren Nutzung des Weltraums berücksichtigt werden bzw. sogar an erster Stelle stehen.

# 4

## Raumfahrt und Umwelt: Auswirkungen der technischen Systeme



## 4.1 Technische Systeme zur Erschließung des Weltraums

Technische Systeme, die erforderlich sind, um den Weltraum zu erschließen, umfassen

- ▶ die bodengebundene Infrastruktur, also diejenigen Systeme, die zur Steuerung und Kontrolle der Raumfahrt, zum Start von Trägersystemen, zur Kommunikation und zur Datenverarbeitung dienen (siehe Kapitel 4.1.1),
- ▶ die Trägerraketen (siehe Kapitel 4.1.2),
- ▶ Raumfahrzeuge, also bemannte und unbemannte Raumschiffe und -stationen (siehe Kapitel 4.1.3)
- ▶ sowie eine Vielzahl sonstiger sogenannter Nutzlasten, also vor allem Satelliten und Raumsonden (siehe Kapitel 4.1.3).

### 4.1.1 Die Infrastruktur am Boden

Die bodengebundene Infrastruktur ist essenziell für die Raumfahrt, denn ohne geeignete Startplätze könnten Trägerraketen den Erdboden nicht verlassen. Diese sogenannten Weltraumbahnhöfe existieren mittlerweile in wachsender Zahl (siehe Kapitel 5.1) in verschiedenen Ländern. Es kommt jedoch nicht jeder Ort auf der Erde für den Betrieb eines Weltraumbahnhofs gleichermaßen gut in Frage. Die Rotationsgeschwindigkeit der Erde kann beispielsweise genutzt werden, um einer startenden Rakete eine Grundgeschwindigkeit zu verleihen. Um geostationäre Umlaufbahnen mit effizientem Energieaufwand zu erreichen, sind Startplätze in Äquatornähe besonders gut geeignet. Der Betrieb von Weltraumbahnhöfen ist unter dem Gesichtspunkt der Unfallgefahr bei Raketenstarts mit erheblichen Risiken verbunden. Startflugbahnen der Raketen befinden sich deshalb vor allem über dünn besiedelten Küstengebieten, sodass das Gefährdungsrisiko minimiert wird. Schließlich kann die politische und wirtschaftliche Lage ebenso eine Motivation für den Aufbau und Betrieb eines Weltraumbahnhofs sein, wie auch die klimatischen Bedingungen<sup>10</sup>, unter denen ein regelmäßiger Startbetrieb möglich sein soll (Albat 2011; S. 192ff.).

Als Beispiel für die vielfältigen Anforderungen an den Standort eines Weltraumbahnhofs kann der in Kourou, Französisch-Guyana dienen, über welchen gegenwärtig der Großteil der europäischen Raumfahrt erfolgt (European Space Agency (ESA) o.J. g). Die Lage auf französischem Boden in Südamerika bietet gegenüber anderen Weltraumbahnhöfen einige Vorteile. So liegt er mit 5°3' Grad nördlicher Breite dem Äquator am nächsten (European Space Agency (ESA) o.J. g; Lorenzen 2009). Im Vergleich dazu liegt der Bahnhof in Kasachstan bei etwa 45 Grad nördlicher Breite (Nestler 2011). Je näher eine Rakete am Äquator startet, desto mehr kann sie die dort schnellere Erdrotation nutzen und damit Treibstoff sparen (Lorenzen 2009); außerdem kann mehr Fracht ins All transportiert werden (Nestler 2011). Abgesehen von der Regenzeit bietet die Nähe zum Äquator zudem stabile Wetterverhältnisse (Möthe 2010). Auch Wirbelstürme oder Erdbeben sind am Standort in Französisch-Guyana unwahrscheinlich. Durch die Küstenlage fallen Trümmerteile bei eventuellen Havarien in den Atlantik, wo sie weniger Menschen gefährden als an Standorten im Landesinneren (Zimmermann 2013).

Zur Bodeninfrastruktur gehören auch die Produktions- und Konstruktionsanlagen für sämtliche Komponenten der Trägersysteme und Nutzlasten, Ausbildungs- und Forschungszentren sowie Anlagen für den Testbetrieb von Raketentriebwerken. Diese Anlagen liegen nicht immer in unmittelbarer Nähe der Weltraumbahnhöfe, sodass Trägersystemkomponenten und Nutzlasten vor dem eigentlichen Start noch in ein Gesamtsystem integriert und getestet werden müssen.

Für bestimmte Trägersysteme, insbesondere sogenannte Microlauncher (siehe Kapitel 4.1.2), bieten sich auch mobile, schwimmende Startsysteme an, von denen ortsunabhängig Raketen gestartet werden können und die üblicherweise auf der Basis von Schiffen konstruiert werden (Albat 2011; S. 198; Etherington 2020). In der chinesischen Raumfahrt werden beispielsweise derartige Schiffe gegenwärtig genutzt, um Kleinträger in eine niedrige Erdumlaufbahn zu starten

<sup>10</sup> Zu geeigneten klimatischen Bedingungen gehören u. a. geringe Erdbebengefahr, geringe Anzahl von Gewittern oder Wirbelstürmen sowie voraussagbare Häufigkeit von Höhen-Scherwinden (Ley et al. 2011; S. 192f.).

(Clark 2022). Auch an der Verwendung mobiler Plattformen in der Luft wird geforscht. In Cornwall startete 2023 die erste Rakete aus einer modifizierten Boeing 747 in 10 km Höhe (Stoppel 2023), allerdings stürzte die Rakete nach erfolgreichem Start unkontrolliert ab; die führend beteiligte Raumfahrtfirma Virgin Orbit meldete in der Folge Insolvenz an (tagesschau.de 2023).

Neben Start und Landung von Raketenstufen werden über die bodengebundene Infrastruktur auch der Missionsbetrieb sowie die Kommunikation zwischen Boden und Raumfahrzeug mit Hilfe eines weltweiten Netzwerks aus Bodenstationen sichergestellt. Dies wird auch als Bodensegment bezeichnet (Wittmann und Hanowski 2011; S. 46f.). Auch die Verarbeitung von Daten (Kommunikations-, Navigations- und Erdbeobachtungsdaten) aus dem Weltraum ist Bestandteil des Bodensegments und wird mithilfe entsprechender Empfangs- und Übertragungsstationen sowie durch Datenverarbeitungszentren gewährleistet (sogenannte Nutzerbodenzentren; ebenda, S. 47). Während der Missionsbetrieb üblicherweise in einem Kontrollzentrum durchgeführt wird (Hindlmaier und Kuch 2011; S. 458ff.), ist das Bodenstationsnetzwerk für die Kommunikation zwischen Kontrollzentrum und Raumfahrzeug, Raumfahrstation oder Satellit notwendig. Bestandteile des Kontrollzentrums sind neben Kontrollräumen vor allem eine Rechner- und Netzwerkarbeit, die externe Datenschnittstellen, Systeme für die Datenverteilung und -prozessierung sowie die Datenvisualisierung umfasst (Hindlmaier und Kuch 2011; S. 458). Unter Rechnerarchitektur wird der generelle Aufbau von Rechnern verstanden, also Hardware, Softwarekomponenten und deren Zusammenspiel (Rüdiger und Ostler 2020). Die Netzwerkarchitektur befasst sich mit der internen und externen Kommunikation, dem Informationsfluss innerhalb der einzelnen Systeme (Risk 2021). Innerhalb der Datenverarbeitung werden die gewonnenen Rohdaten zu verwertbaren und interpretierbaren Ergebnissen aufbereitet (Kaiser o.J.). Elemente des Bodenstationsnetzwerks sind Sende- und Empfangsantennen, mit denen Funkverbindungen für die Übertragung von Telemetrie (alle vom Raumfahrzeug bzw. den Satelliten aufgenommenen Messwerte) und Telekommandos hergestellt werden können (Häusler und Wiedemann 2011; S. 468ff.). Für die Bahnbestimmung sind ebenfalls Antennen sowie Teleskope für die Laser-Entfernungsmessungen erforderlich (Montenbruck 2011; S. 87ff.). In der Regel

werden dazu weltweit vernetzte Bodenstationen verwendet (Wittmann und Hanowski 2011; S. 47).

#### 4.1.2 Trägerraketen: Vom Microlauncher bis zum Schwerlastträger

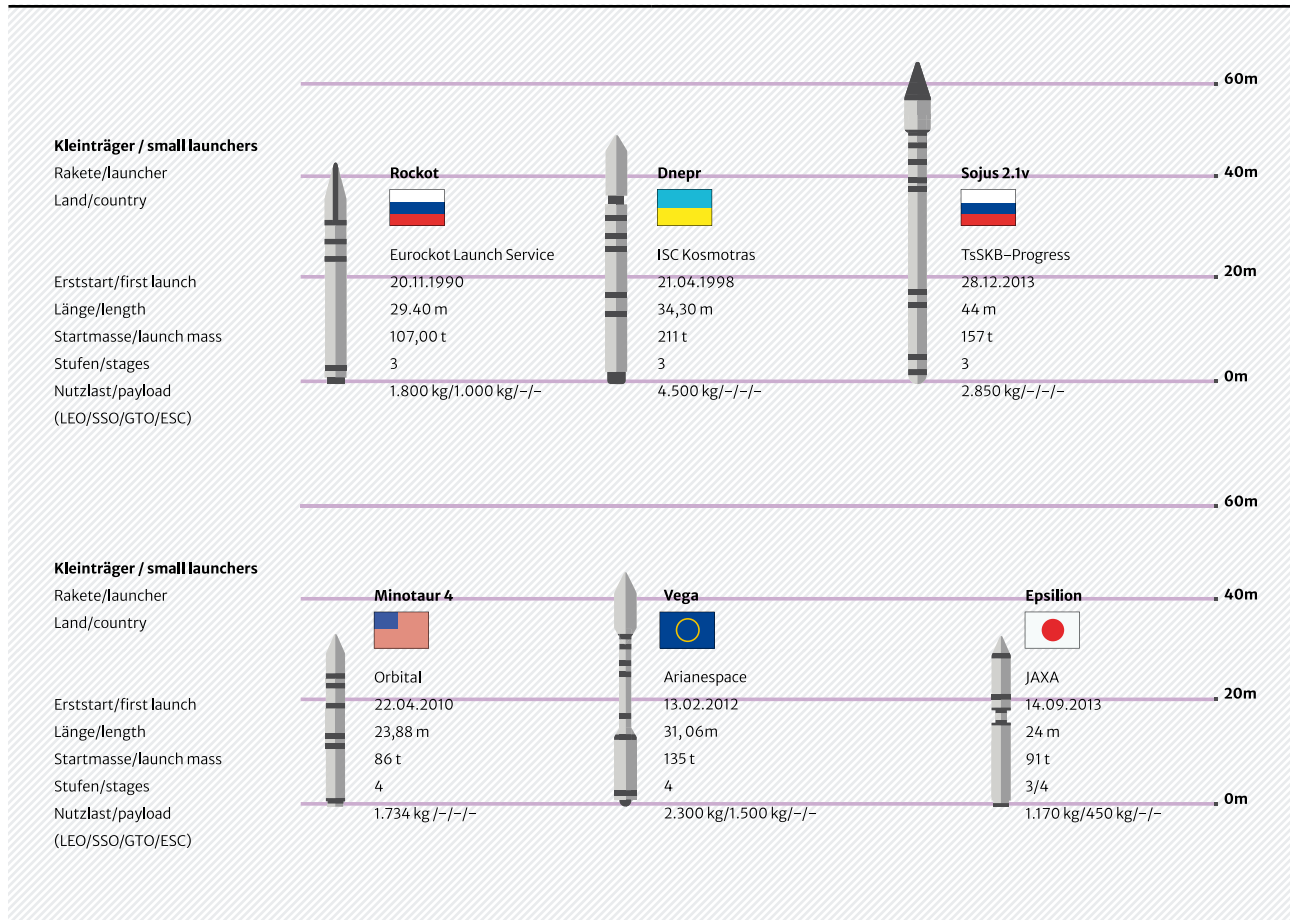
Bei der Nutzung des Weltraums werden sogenannte Nutzlasten (Raumschiffe, Satelliten oder Raumsonden; s. u.) von der Erde in den Weltraum befördert. Hierzu werden Trägerraketen eingesetzt. Trägerraketen bestehen aus mindestens einer (Einstufer), aber üblicherweise mehreren Raketenstufen (Mehrstufer). Eine Raketenstufe besteht in der Regel aus mindestens einem Triebwerk, sowie Treibstoffbehältern und einem elektronischen Steuerungssystem zur Navigation, Lageregelung und Stufentrennung (Holsten 2011; S. 131). Die einzelnen Raketenstufen können entweder zur einmaligen Nutzung oder als wiederverwendbare Systeme entwickelt werden.

Es gibt unterschiedliche Ansätze, Trägerraketen zu kategorisieren, die sich teilweise überlagern und nicht immer trennscharf sind. Eine mögliche Kategorisierung ist die Unterteilung nach der verfügbaren Nutzlastkapazität (Gewicht in kg), die von einer Rakete transportiert werden kann. Das Spektrum reicht dann vom Microlauncher bis zum Schwerlastträger. Welche Trägerrakete erforderlich ist, hängt von der Masse und Größe der Nutzlast sowie der zu erreichenden Umlaufbahn ab (Ley et al. 2011; S. 46). Einstufige Raketen haben in der Regel nicht das Geschwindigkeitsvermögen, um eine Umlaufbahn zu erreichen. Daher bestehen alle der nachfolgend aufgeführten Typen von Trägerraketen aus mehr als einer Stufe, sowie ggf. auch seitlich angebrachten Zusatztriebwerken (sog. Boostern).

Microlauncher oder Kleinträger können Nutzlasten, insbesondere Satelliten, von ca. 300 kg bis zu 4.500 kg transportieren (Lassmann und Obersteiner 2011; S. 142; Kranz und Regenbrecht 2014; S. 16f.) und in den niedrigen Erdborbit (LEO) befördern. Oftmals wurden dazu im Rahmen von Abrüstungsabkommen Interkontinentalraketen umgebaut, sodass Kleinträger aufgrund ihrer geringen technischen Komplexität für Staaten eine Einstiegsmöglichkeit in die Raumfahrt bieten (Lassmann und Obersteiner 2011; S. 138).

Abbildung 7

**Kleinträger**



Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf Kranz und Regenbrecht 2014

Medium- bzw. mittelschwere Trägerraketen sind auf die Beförderung von Nutzlasten zwischen 1.200 kg und 10.000 kg in die gesamte Breite nutzbarer Erdumlaufbahnen optimiert. Wie auch bei Kleinträgern sind hier mehrstufige Systeme bereits seit Jahrzehnten im Einsatz und werden auch weiterhin eingesetzt (Lassmann und Obersteiner 2011; S. 138). Die russische SOJUS-Rakete wurde bis 2022 von vielen Nationen als Trägerrakete für Satelliten genutzt, ihre Nutzung unterliegt aber seit Beginn der russischen Invasion in der Ukraine im Februar 2022 internationalen Sanktionen, und die Anzahl an SOJUS-Starts wurde aufgrund der geringen verbliebenen Nachfrage erheblich reduziert (Jones 2023b).

Schwerlastträger sind Trägersysteme, die hauptsächlich für den Transport von Kommunikationssatelliten in geostationäre Orbits (GEO) eingesetzt werden (Lassmann und Obersteiner 2011; S. 138). Nutzlastkapazitäten liegen zwischen 2.600 kg, die von der russischen PROTON-Rakete befördert werden können, und immerhin 24.400 kg, die das mittlerweile eingestellte Space Transportation System, mit dem das US-amerikanische Space Shuttle gestartet wurde, transportieren konnte (Lassmann und Obersteiner 2011; S. 145f.).

Leistungsstärker als die bisher genannten Raketen waren und sind diejenigen Trägersysteme, mit denen der Weltraum jenseits des Erdorbits erreicht werden soll und die für die bemannte Raumfahrt eingesetzt werden. Die US-amerikanische Saturn V-Rakete des Apollo-Programms konnte rund 50.000

Abbildung 8

## Mediumträger



Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf Kranz und Regenbrecht 2014

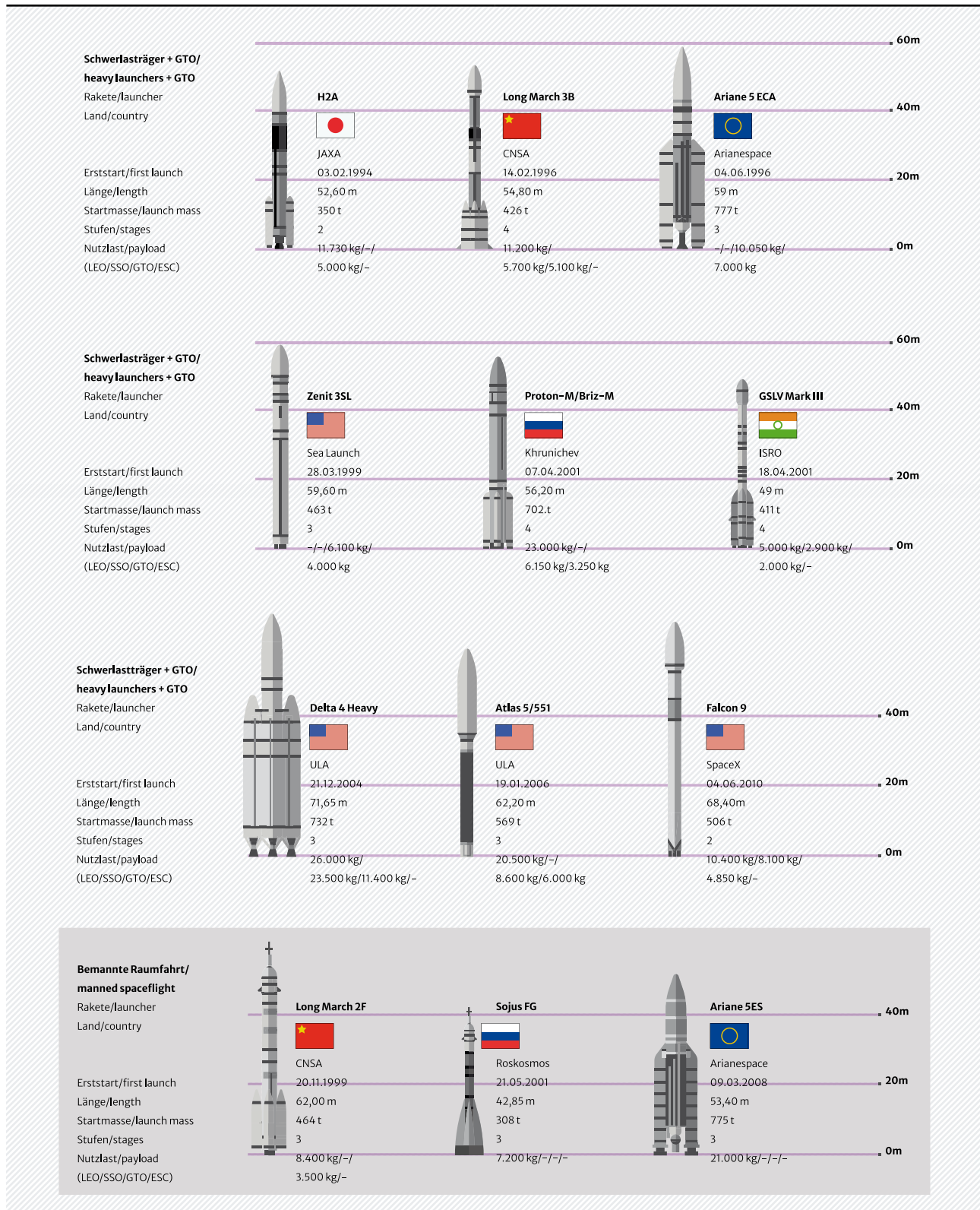
kg in den Erdorbit und letztendlich zum Mond befördern (Ulamec und Hanowski 2011; S. 559f.) und das seit 2011 entwickelte Space Launch System (SLS) mit bis zu 130.000 kg Nutzlastkapazität (National Aeronautics and Space Administration (NASA) 2011; S. 14) soll erneut einen bemannten Mondflug ermöglichen. Das wiederverwendbare Trägersystem „Starship“ des Unternehmens SpaceX soll ebenfalls über 100.000 kg in den Erdorbit und darüber hinaus befördern können (SpaceX 2020b; S. 5).

Damit sie für die bemannte Raumfahrt eingesetzt werden können, müssen Trägersysteme spezifischen Anforderungen und Sicherheitsbestimmungen gerecht werden (National Aeronautics and Space Administration (NASA) 2017). So sind beispielsweise Abbruch- und Rettungsmechanismen integriert und die auf das Raumfahrzeug wirkenden Kräfte, Vibra-

tion und Gravitation sowie Beschleunigung, müssen derart minimiert werden, dass Menschen keinen Schaden nehmen.

Abbildung 9

Schwerlastträger



Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf Kranz und Regenbrecht 2014

Trägerraketen nutzen Feststoff- bzw. Flüssigtriebwerke oder auch Hybridtriebwerke, in denen beide Treibstoffarten miteinander kombiniert werden. Feststofftriebwerke sind dadurch gekennzeichnet, dass die Verbrennungskomponenten bereits miteinander vermischt sind und nach der Zündung kontinuierlich abbrennen (siehe Kapitel 4.2.3). Sie werden daher oft als Hilfstriebwerke (Booster) genutzt. Voneinander getrennte Tanks werden für flüssigen Raketentreibstoff benötigt. Üblicherweise werden bestimmte Kombinationen aus stark gekühlten Gasen verwendet. Erst in einer Brennkammer werden die Treibstoffe zusammengeführt und reagieren miteinander. Bei Triebwerken, die bei Umgebungsdruck innerhalb der Erdatmosphäre arbeiten, werden flüssiger Sauerstoff und Kerosin (LOX/Kerosin) eingesetzt. Für Oberstufentriebwerke, die außerhalb der Erdatmosphäre arbeiten, hat sich die Kombination aus flüssigem Wasserstoff und flüssigem Sauerstoff (LOX/Wasserstoff) durchgesetzt (Albat et al. 2011; S. 168f.).

#### 4.1.3 Raumfahrzeuge: Raumschiffe und -stationen

Trägerraketen werden u. a. dafür eingesetzt, Raumschiffe sowie Raumstationen bzw. deren einzelne Komponenten in verschiedene Erdumlaufbahnen zu befördern. Aktuell werden drei unterschiedliche Arten von Raumfahrzeugen eingesetzt:

**Unbemannte Raumschiffe** versorgen Raumstationen mit Fracht und sind nicht für den Transport von Menschen ausgelegt. Mit ihnen wird die menschliche Besatzung auf Raumstationen, wie aktuell beispielsweise die ISS, im niedrigen Erdorbit mit lebenswichtigen Gütern, wie Nahrungsmitteln, Wasser, Sauerstoff, aber auch dem Material für die Durchführung von wissenschaftlichen Experimenten sowie zusätzlichem Treibstoff versorgt (Raatschen und Kern 2011; S. 425f.). Weiterhin dienen sie auch der Entsorgung von Abfällen. Dazu werden die mit Abfall beladenen Raumfahrzeuge üblicherweise in einem kontrollierten Flug in der Erdatmosphäre zum Verglühen gebracht. Aktive Raumfahrzeuge sind das russische Progress-Raumschiff, die amerikanischen Dragon2- und Cygnus-Raumschiffe, sowie das chinesische Tianzhou-Raumschiff.

**Bemannte Raumschiffe** sind Flugkörper, die auf den Transport von Menschen im Weltraum ausgelegt sind.

Als erstes bemanntes Raumschiff gilt das sowjetische Wostok-Raumschiff; danach folgten u.a. die amerikanischen Projekte Mercury und Gemini. Das sowjetische Sojus-Transportsystem, ausgelegt zur Versorgung von Raumstationen (z.B. Mir und ISS) und Beförderung von drei Personen, ist seit 1967 aktiv und diente als Vorbild für die seit 2003 aktive chinesische Shenzhou-Kapsel, die ihrerseits die chinesische Raumstation versorgt und drei Personen befördern kann (China Radio International (CRI) 2021; Osterhage 2021; S. 94). Aktiv ist des Weiteren die US-amerikanische Crew Dragon (wiederverwendbar, für bis zu vier Personen), die als Teil des Commercial-Crew-Development<sup>11</sup>-Programms (CCDev) durch das Unternehmen SpaceX für die NASA entwickelt worden ist. Seit 2020 wurden mit der Crew Dragon sieben erfolgreiche Flüge mit 26 Astronaut\*innen durchgeführt (Sheetz 2021). Aktuell noch im Bau sind zwei weitere US-amerikanische Raumschiffe: Das von Boeing ebenfalls im Rahmen des CCDev-Programms entwickelte, wiederverwendbare Raumschiff CST-100 Starliner ist bislang zwar erfolgreich unbemannt, jedoch noch nicht bemannt geflogen – bemannte Starts werden seit 2017 verschoben und mussten zuletzt im Juni 2023 ohne Nennung eines neuen Starttermins verschoben werden (Stand: 04.07.2023; Boeing o.J.). Auch das NASA-Raumschiff Orion (National Aeronautics and Space Administration (NASA) o.J. c) steht im Zuge der Artemis-Missionen vor einem ersten bemannten Flug um den Mond im Rahmen der Artemis-2-Mission, der aktuell für 2024 geplant ist (Howell 2023). Allgemein sollen bemannte Raumfahrzeuge nicht nur das Überleben der Astronaut\*innen im Weltraum sicherstellen, sondern auch eine sichere Rückkehr zur Erde ermöglichen. Daher sind Landesysteme für sowohl Wasserlandungen als auch Landungen an Land Bestandteil der Ausstattung. Üblicherweise werden die Raumfahrzeuge beim Wiedereintritt in die Atmosphäre mit Hilfe von Fallschirmen gebremst. Ein weiterer wichtiger Bestandteil ist der Hitzeschild, der das Raumfahrzeug und dessen Besatzung vor der durch Reibung entstehenden Wärme schützt (Hannemann und Longo 2011; S. 108).

**Raumstationen** sind gegenwärtig nur im niedrigen Erdorbit in Betrieb. Die Internationale Raumstation ISS wurde 1998 konstruiert und wird ausschließlich durch Sonnenenergie betrieben. Zwei Jahre nach ihrer Konstruktion beherbergte sie bereits die ersten Astronauten

<sup>11</sup> <https://www.nasa.gov/content/commercial-crew-overview>

(Osterhage 2021; S. 141ff.). Bei einer Spannweite von 109 m, einer Länge von 80 m und einer Tiefe von 88 m beträgt ihre Masse bis zu 450 Tonnen. Im Jahr 2021 begann das chinesische Raumfahrtprogramm mit dem Aufbau der eigenen bemannten Station „Tiangong-1“. Seitdem wurde das Kernmodul Tianhe um die Wissenschaftsmodule Wentian und Mengtian ausgebaut (Lorenzen 2022). Seit Anfang 2023 ist die Station offiziell in Betrieb (Moller 2023). Aktuell ist von chinesischer Seite zudem geplant, eine Raumstation in einer Umlaufbahn um den Mond zu errichten. Die NASA möchte in Kooperation mit der ESA, JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) und CSA (Canadian Space Agency) das sogenannte Lunar Orbital Platform-Gateway aufbauen, dass unter anderem als Zwischenstation für bemannte Mondlandungen dienen und bei der Erprobung von Technologien für Flüge zum Mars unterstützen soll (National Aeronautics and Space Administration (NASA) 2019a). Derzeit wird von einer Inbetriebnahme frühestens im November 2025 ausgegangen (Stand Juli 2023) (Mars 2023).

#### 4.1.4 Sonstige Nutzlasten: Raumsonden und Satelliten

Nutzlasten sind diejenigen Komponenten eines Raumflugsystems, die dazu dienen, die spezifischen Ziele von Raumfahrtmissionen zu erfüllen. Missionsziele können Erd- und Wetterbeobachtung, Kommunikation, Navigation, Technologieerprobung, Grundlagenforschung, planetare Erkundung einschließlich bemannter Raumfahrt (s. o.) sein (Wittmann und Hanowski 2011; S. 51ff.).

Die Erkundung von Planeten wird durch **Raumsonden** ermöglicht. Je nach Missionsziel lassen sich vier Typen unterscheiden, die jeweils spezifische technische Subsysteme aufweisen:

- ▶ **Vorbeiflugsonden**, wie bspw. die NASA-Sonden Voyager 1 und Voyager 2 in den 1980er Jahren sowie die New Horizons Mission, die 2015 den Zwergplaneten Pluto passiert hat, fliegen von der Erde aus andere astronomische Körper (Planeten, Monde, Asteroiden) im Sonnensystem an und sammeln im Vorbeiflug mithilfe integrierter Sensorsysteme Daten und senden diese an die Erde (Ulamec und Hanowski 2011; S. 563f.; National Aeronautics and Space Administration (NASA) 2019b). Der Vorbeiflug ermöglicht das Anfliegen mehrerer Ziele, ist aber auch dadurch bedingt, dass für Bremsma-

növer (die ein Einschwenken in eine Umlaufbahn ermöglichen) nicht genügend Treibstoff zur Verfügung steht. Ungebremst setzen diese Sonden dann ihren Weg so lange fort, wie Energie zur Verfügung steht bzw. die einzelnen Bauteile funktionsfähig bleiben. Dafür beinhalten die Sonden üblicherweise Solarzellen sowie Batterien, die notwendig werden, wenn Solarzellen aufgrund der Entfernung von der Sonne ineffizient werden.

- ▶ **Orbiter** dienen - anders als Vorbeiflugsonden - der kontinuierlichen Erforschung astronomischer Körper. Sie steuern ihre Ziele an und schwenken dort in deren Umlaufbahnen ein, wie beispielsweise der Lunar Reconnaissance Orbiter der NASA oder der ExoMars Trace Gas Orbiter der ESA in Kooperation mit Roskosmos (European Space Agency (ESA) 2020b). Mithilfe ihrer Sensoren sammeln die Sonden Daten über ihr Ziel. Von besonderer Bedeutung ist das Thermalsystem, das zum Schutz der technischen Komponenten vor den Einflüssen der niedrigen Temperaturen im Weltraum dient. Weil Orbiter unter Umständen in Regionen des Sonnensystems eingesetzt werden, in denen die Sonnenstrahlung gering ist, greift man zur Energie- und Wärmeerzeugung auf radioaktive Heizelemente (RTGs) zurück (Ulamec und Hanowski 2011; S. 567).
- ▶ **Lander** können eine Komponente von Orbitern sein und dienen der Erforschung der Oberfläche bzw. des Untergrunds von Planeten, Monden und Asteroiden im Sonnensystem. Sie können entweder an einem fixen Punkt auf der Oberfläche abgesetzt werden, wie beispielsweise während der InSight-Mission auf dem Mars, oder sich fortbewegen. In diesem Fall spricht man von Rovern. Lander, die an einem Ort verbleiben, sind mit Instrumenten ausgestattet, um die Umgebung zu erkunden. Dazu gehören beispielsweise Kameras, Sensoren zur Messung atmosphärischer Gegebenheiten wie etwa der Temperatur, dem Luftdruck etc., aber auch der Zusammensetzung einer möglichen Atmosphäre. Die Landung von Raumsonden auf anderen Planeten stellt eine besondere Herausforderung für die Raumfahrt dar. Je nach Vorhandensein einer Atmosphäre können Fallschirme in Kombination mit Bremsraketen eingesetzt werden (Ulamec und Hanowski 2011; S. 568).

Die Probenrückführung kann im Rahmen von Lander-Missionen durchgeführt werden, wie beispielsweise bei der japanischen Hayabusa-Raumsonde (Amos 2010) oder der amerikanischen OSIRIS-Rex-Mission (National Aeronautics and Space Administration (NASA) 2016). Die Rückführung dient dazu, Gesteinsproben von Asteroiden, Monden oder Planeten zu sammeln und zurück zur Erde zu befördern, um sie dort zu analysieren. Entnommene Gesteinsproben (z. B. durch Bohrung) müssen in sterile Behältnisse platziert werden, um mögliche Kontamination durch irdische Stoffe zu verhindern. Schließlich müssen die Probenbehälter wieder gestartet werden; je nach atmosphärischen Gegebenheiten müssen die Startsysteme über spezifische aerodynamische Eigenschaften verfügen, ausreichend Treibstoff für den Start und ein eventuelles Rendezvous-Manöver mit einem anderen Raumfahrzeug im Orbit sowie eine Rückkehr zur Erde mitführen (Ball et al. 2009; S. 128f.).

Raumsonden dienen sehr spezifischen wissenschaftlichen Forschungsfragen und müssen unter sehr unterschiedlichen Bedingungen funktionieren. Weil Missionen mit Raumsonden technisch und organisatorisch sehr komplex sind, dauert es oftmals mehrere Jahre bis Jahrzehnte, ehe die gewünschten Ergebnisse vorliegen.

Die mit Abstand am häufigsten transportierte Nutzlast sind **Satelliten**, also künstliche Raumflugkörper, die Planeten umkreisen. Ungeachtet ihrer spezifischen Zwecke bestehen Satelliten typischerweise aus mehreren technischen Subsystemen: der mechanischen Struktur des Satelliten, dessen Antriebssysteme, einer



© Nasa/unsplash

Temperaturregelung zum Umgang mit den Bedingungen im Weltraum, der Energieversorgung zum Betrieb und missionsspezifischen Nutzlastkomponenten wie etwa Kamerasystemen, Transpondern, Spektrographen etc. sowie Kommunikationsantennen (Maini und Agrawal 2014; S. 174ff.). Zur Erfüllung kommerzieller und wissenschaftlicher Zwecke lassen sich verschiedene Typen unterscheiden:

- **Kommunikationssatelliten** dienen der Übertragung von Funksignalen (Radio- und TV-Signale, Telefonverbindungen und Datenübertragungen) (Maini und Agrawal 2014; S. 473ff.). Um möglichst große Gebiete auf der Erde abdecken zu können, werden diese Satelliten üblicherweise in geostationären Umlaufbahnen eingesetzt. Kommunikationssatelliten empfangen Daten von einer Sendeeinheit auf der Erde und übertragen diese an eine (point-to-point) oder mehrere Empfangsstationen (point-to-multipoint). Mittels eines Transponders im Satelliten wird das Eingangssignal (uplink) verstärkt und auf einer anderen Frequenz zurück zur Erde übertragen (downlink) (Maini und Agrawal 2014; S. 475–476) und ermöglichen so auch Telefon bzw. Rundfunkempfang in sehr abgelegenen Gebieten. In den kommenden Jahren wird die Sendung der Daten an Bodenstationen zunehmend über geostationär positionierte Relay-Satelliten wie das „European Data Relay Satellite System“ (EDRS) ausgeführt werden<sup>12</sup>. Im Falle des EDRS reichen zwei geostationäre Satelliten, um eine permanente Abdeckung der Erdoberfläche und gleichzeitig eine dauerhafte Verbindung zu Bodenstationen in Europa zu bieten. Daten werden zunächst zwischen den Satelliten übertragen, bevor sie zur Erdoberfläche übermittelt werden. Dies ist z.B. sinnvoll, um unabhängig von der Nutzung der Bodenstationen anderer Staaten zu sein; zudem ermöglicht diese Technologie höhere Datenraten und eine Verteilung der Daten in „nahe Echtzeit“ (European Space Agency (ESA) o.J. f). Im Zuge der Miniaturisierung von Komponenten sowie der möglichen Serienfertigung von Satelliten werden Satellitenkonstellationen in niedrigeren Umlaufbahnen geplant, um höhere Datenübertragungsraten ohne Signalverlust realisieren zu können (Maini und Agrawal 2014; S. 516) und die heute bereits weitgehend besetzten geostationären Umlaufbahnen zu vermeiden.

<sup>12</sup> <https://artes.esa.int/edrs/overview>

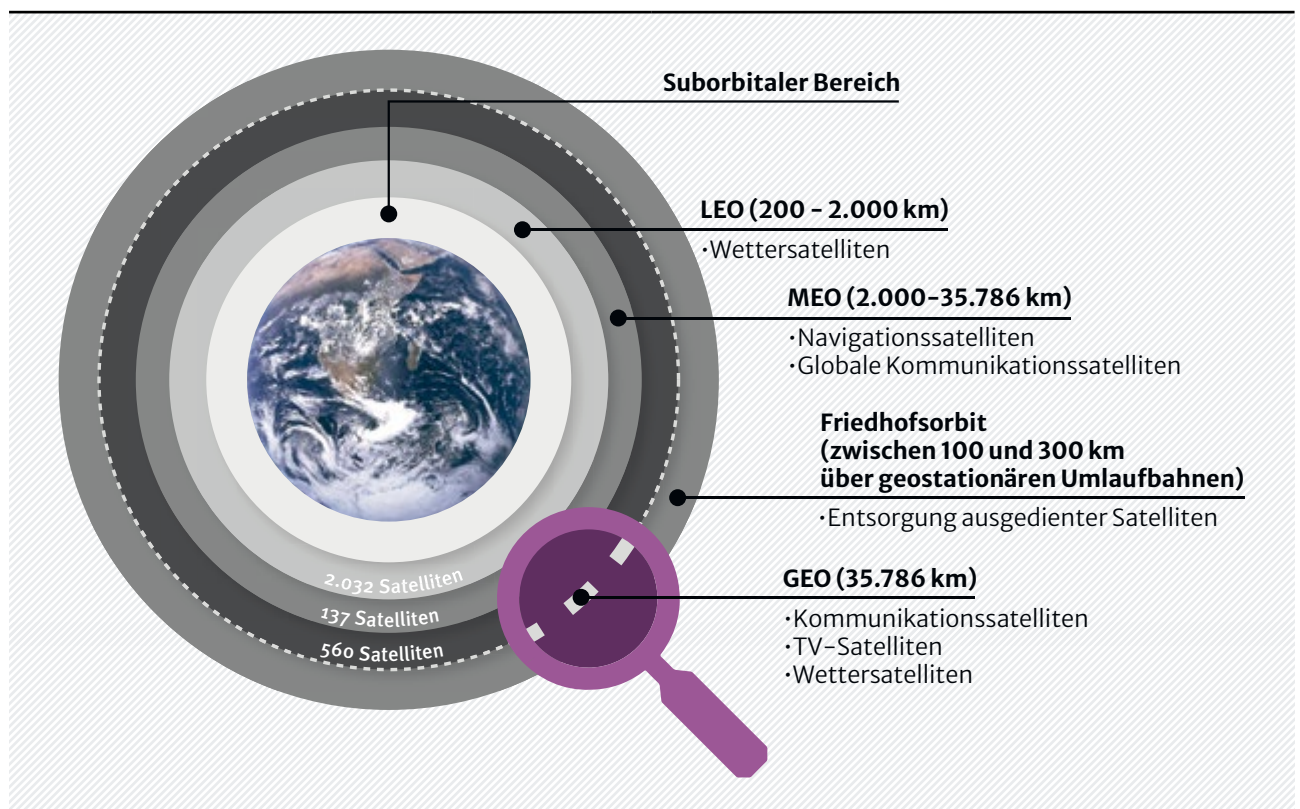
- ▶ **Erdbeobachtungssatelliten** werden eingesetzt, um Daten über die Erde zu sammeln. Dies können beispielsweise Daten über den Zustand der Atmosphäre, der Ozeane oder der Landmassen (Wälder, Schnee- und Eismengen etc.) sein, aber auch Daten, die zur Kartierung, in der Landwirtschaft oder bei der Frühwarnung vor und der schnellen Reaktion auf Naturkatastrophen genutzt werden. Dazu wird die reflektierte oder emittierte Energie der beobachteten Objekte auf verschiedenen Wellenlängen mit Hilfe von aktiven oder passiven Sensorsystemen gemessen (siehe Kapitel 5.3.1). Die gesammelten Daten werden zur weiteren Analyse zu Empfangsstationen auf der Erde übertragen.
  - ▶ **Wettersatelliten** stellen eine Unterkategorie der Erdbeobachtungssatelliten dar und dienen der Erstellung von kurzfristigen Wettervorhersagen und der Sammlung langfristiger meteorologischer Beobachtungsdaten. Sie zählen zu den ersten Anwendungen der Satellitentechnologie (Dech et al. 2011; S. 505). In der Regel befinden sie sich auf geostationären Umlaufbahnen, folgen also der Erdrotation und befinden sich somit immer über demselben Punkt und beobachten einen bestimmten Ausschnitt der Erde (Maini und Agrawal 2014; S. 587). Es gibt aber auch sogenannte polarumlaufende Satelliten, die die gesamte Erde abdecken (Herold 2021). Wichtigstes Instrument von Wettersatelliten sind Radiometer, Messgeräte zur Messung elektromagnetischer Strahlung (Licht, Infrarot und Wärme) auf speziellen Wellenlängen. Aus den Messungen werden Satellitenbilder erstellt. Andere eingesetzte aktive Sensoren beinhalten polarumlaufende RADAR- und LIDAR-Geräte (Maini und Agrawal 2014; S. 588ff.). Mittels Wettersatelliten lassen sich Wolkenbewegungen, Regenfälle, Windgeschwindigkeiten und -richtungen, aber auch Nebel, Luftverschmutzung, Meeresströmungen, Sturmgebiete usw. erkennen und Kurzfristprognosen (24 – 48 Stunden) erstellen.
  - ▶ **Navigationssatelliten** ermöglichen die Positionsbestimmung von Fahrzeugen, Flugzeugen und Schiffen (siehe Kapitel 5.2.1). Dazu werden Ort und Zeit auf Basis von vier Satelliten (drei zur dreidimensionalen Ortsbestimmung und einer zur Zeitmessung) bestimmt. Dazu müssen Satellitenbahnen präzise ausgeführt und die internen Uhren der Satelliten exakt synchronisiert werden (Sassen 2011; S. 536).
- Für den Einsatz von Satelliten kommen im Wesentlichen drei Umlaufbahnen bzw. Umlaufbahnbereiche in Frage. Außerdem gibt es noch zwei weitere, erwähnenswerte Umlaufbahnbereiche (siehe Abbildung 7):
- ▶ Auf **geostationären und geosynchronen Erdumlaufbahnen** (Geostationary Earth Orbit/GEO; 35.786 km ü. Meeresspiegel) werden vor allem Kommunikations- und Wettersatelliten eingesetzt. Geosynchrone Umlaufbahnen sind dadurch gekennzeichnet, dass die Umlaufzeit eines dort befindlichen Satelliten der Dauer der Erdrotation entspricht. Von der Erde aus betrachtet, kann ihre Position je nach Standort der/des Beobachtenden variieren. Geostationäre Umlaufbahnen sind ein Spezialfall, wobei ein Satellit immer auf einer Kreisbahn über dem Äquator steht und ebenfalls mit der Erdrotation den Planeten umläuft (Montenbruck 2011; S. 98). So kann theoretisch die gesamte Erdoberfläche mit nur drei Satelliten erfasst werden (Osterhage 2021; S. 64).
  - ▶ Deutlich mehr Satelliten werden benötigt, wenn auf einer **niedrigen Erdumlaufbahn** (Low Earth Orbit/LEO – ca. 200 bis 2.000 km ü. Meeresspiegel) Erdbeobachtung, Navigation oder Kommunikation unterstützt werden (Wittmann und Hanowski 2011; S. 44). Die Satelliten umkreisen die Erde deutlich schneller und ihre Funksignale benötigen weniger Zeit, als dies bei geostationären Satelliten der Fall ist. Zudem sind die Sensoren von Erdbeobachtungssatelliten auf die Nutzung im LEO ausgerichtet, da eine Anwendung aus erheblich größerer Höhe (z.B. im GEO) technisch erheblich schwieriger bis unmöglich umzusetzen wäre. In einem LEO in rund 400 km Höhe umkreist auch die Internationale Raumstation ISS als einziger permanent bemannter Außenposten seit dem Jahr 2000 die Erde (Robinson und Costello 2018).
  - ▶ Zwischen GEO und LEO befindet sich der **mittlere Erdborbit** (Medium Earth Orbit/MEO: 2.000 bis 35.786 km ü. Meeresspiegel). Insbesondere GPS-Satelliten werden dort eingesetzt, weil der Energieaufwand zum Erreichen des MEO deutlich geringer ist, als dies für GEO der Fall wäre (Wittmann und Hanowski 2011; S. 44f.) und verglichen mit dem

LEO sehr viel weniger Satelliten (ca. 32) notwendig sind, um die Erde komplett abzudecken.

- ▶ Ein weiterer, insbesondere bislang für den Weltraumtourismus (siehe Kapitel 5.1.2) relevanter Bereich im erdnahen Weltraum ist der **suborbitale Bereich**. Die Bahnenergie der Flugbahn eines Flugkörpers reicht nicht aus, um dem Schwerefeld der Erde zu entkommen und eine Umlaufbahn um die Erde zu erreichen, sodass ein Flugkörper nach kurzer Zeit wieder zur Erdoberfläche zurückfällt.
- ▶ Eine letzte, für die Raumfahrt im erdnahen Weltraum relevante, Umlaufbahn wird als **Friedhofsorbit oder -umlaufbahn** bezeichnet. Es handelt sich dabei um jene Umlaufbahnen, die sich zwischen 100 und 300 km über geostationären Umlaufbahnen befinden und die zur Entsorgung ausgedienter Satelliten dienen (Brieff 2011; S. 624; Warhaut 2011).

Abbildung 10

### Erdumlaufbahnen und deren Nutzung (nicht maßstäblich)



Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf Daten aus Kind et al. 2020

Aufgrund der Umgebungsbedingungen im erdnahen Weltraum (siehe Kapitel 3.1.1) haben Satelliten eine begrenzte Lebensdauer. Maßgeblich beeinflusst wird die Lebensdauer einerseits vom mitgeführten Treibstoff, der für Korrekturen der Umlaufbahnen genutzt werden kann und damit irgendwann aufgebraucht ist, andererseits aber auch von der Beeinträchtigung elektronischer Bauteile durch Strahlung. Telekommunikationssatelliten haben beispielsweise eine durch-

schnittliche Betriebsdauer von 15 bis 20 Jahren (Dodel 2011; S. 534; Maini und Agrawal 2014; S. 516), nach denen sie ersetzt werden müssen. Derzeit (August 2023) sind von den 10.550 Satelliten im All noch 8.400 in Betrieb (ESA 2023). Erdbeobachtungssatelliten, die sich in niedrigeren Umlaufbahnen befinden, sind zusätzlich atmosphärischer Reibung ausgesetzt. Der daraus resultierende orbitale Höhenverlust kann durch mitgeführten Treibstoff ausgeglichen werden. Sobald

der Treibstoff verbraucht ist, endet in der Regel die Lebensspanne des Satelliten, der von der Erdatmosphäre immer weiter gebremst wird und schließlich verglüht. Das Unternehmen Planet Labs betreibt eine Flotte von Kleinstsatelliten, die ohne Antriebssystem auskommen und ihren niedrigen Orbit durch so genannte „Differential-Drag-Steuerung“ halten können, indem die nichtrunden Satelliten durch gezielte Drehung ihren atmosphärischen Strömungswiderstand verkleinern oder vergrößern (Foster et al. 2015).

## 4.2 Umweltauswirkungen technischer Systeme auf der Erde und im Weltraum

Die vorgestellten technischen Systeme haben direkte Auswirkungen sowohl auf die Umwelt auf der Erde als auch auf die Umwelt im Weltraum. So werden für die Herstellung der technischen Systeme Ressourcen auf der Erde verbraucht, Trägerraketen verursachen Emissionen in allen Schichten der Atmosphäre und ausgediente Satelliten und Raketenteile verbleiben im Weltraum. Derzeit gibt es nur wenige Studien, die den Lebenszyklus einer kompletten Raumfahrtmission analysieren (Chanoine et al. 2017), die meisten Studien fokussieren sich auf bestimmte Treibstoffarten und deren Auswirkungen auf die Umwelt (Pettersen et al. 2016) oder einzelne Phasen, z.B. die Herstellungsphase oder die Startphase.

Aktuelle Forschungsergebnisse zeigen, dass zwei Punkte aus Umweltsicht besonders relevant sind: Zum einen die verschiedenen Emissionen der Raketentreibstoffe und wie diese die Ozonschicht in der Stratosphäre beeinflussen (siehe Kapitel 4.2.3) (Ross und Vedda 2018; Dallas et al. 2020b). Zum anderen der Weltraumschrott im Erdorbit, der, wenn er nicht aktiv entfernt wird, Aktivitäten im Weltraum erschweren oder zukünftig sogar unmöglich machen kann.

### 4.2.1 Bodeninfrastruktur

Wie bereits in Kapitel 4.1.1 erläutert, umfasst die bodengebundene Infrastruktur zahlreiche Gebäude, deren Bau und Energieverbrauch sich auf die Umweltbilanz im Verlauf des gesamten Lebenszyklus einer Raumfahrtmission auswirkt. Nicht nur die Startrampen, sondern auch die Anlagen, die Produktion und der Bau für alle Komponenten der Trägersysteme und

Nutzlasten sowie die Ausbildungs- und Forschungszentren, aber auch die Testanlagen und die Datenempfangs- und -übertragungsstationen müssen in den Ressourcenbedarf einbezogen werden, ebenso Bau und Betrieb von Bodenstationen, von denen aus Satelliten und Antennen im All gesteuert werden

So benötigt bereits die erste Phase, die Entwicklung komplexer technischer Systeme wie Trägerraketen oder Satelliten, mehrere Jahre. Daher fällt schon im Forschungs- und Entwicklungsprozess ein nicht unerheblicher Verbrauch von Strom, Gas, Wasser, Öl und anderen Ressourcen an, sei es für die Nutzung von Büros, Laboren und Versuchsanlagen oder auch für Reisen von Forschenden (Geerken et al. 2018). Die Umweltfolgen sind schon an diesem Punkt immens und schädlich, denn es fällt unter anderem Abfall an, Umweltmedien werden verschmutzt, Treibhausgase ausgestoßen und endliche Ressourcen verbraucht.

Wird ein Weltraumbahnhof gebaut und in Betrieb genommen, bedeutet das enorme Folgen für die Umwelt. Auch wenn keine genauen Zahlen veröffentlicht werden, ist beispielsweise bekannt, dass der Betrieb des europäischen Weltraumbahnhofs in Französisch-Guayana sehr viel Energie benötigt, rund die Hälfte für die Produktion der Treibstoffe (Begründung dazu siehe Kapitel 4.2.2) und die andere Hälfte, um die Gebäude am Standort zu kühlen (European Space Agency (ESA) 2020a). Bis zu einem Fünftel des gesamten Strombedarfs des Landes entfällt auf die Station, die jährlichen Stromkosten belaufen sich auf mehrere Millionen Euro (European Space Agency (ESA) 2020a). Die Klimaanlage müssen die Industriegebäude das ganze Jahr über auf einem präzisen Feuchtigkeits- und Temperaturniveau halten, denn in diesen befinden sich technische Geräte oder Satelliten im Wert von mehreren Millionen Euro, die durch die Luftfeuchtigkeit und Hitze in Guayana beschädigt werden könnten. Auch haben spezialisierte Anlagen, die Kältemittel verwenden, einen hohen Treibhausgasausstoß (Pettit 2021). Die Nutzung erneuerbarer Energien und eine verbesserte Energieeffizienz der Gebäude kann den Energieverbrauch und entstehende Treibhausgasemissionen stark reduzieren (Thiry und Chanoine 2017). Die ESA plant nun, den europäischen Weltraumbahnhof in Französisch-Guayana bis 2025 zu 90 % mit erneuerbaren Energien zu betreiben, dafür sollen zwei Fotovoltaik-Kraftwerke 2023 in Betrieb gehen und zwei weitere Biomassekraftwerke sind geplant (European Space Agency (ESA) 2020a).

Dies umfasst die Energieversorgung der Anlage, nicht die verwendeten Treibstoffe.

Weitere Umweltschutzmaßnahmen werden in Guyana bereits umgesetzt: Schiffe, die Material zum Weltraumbahnhof nach Guayana transportieren, unterliegen etwa einer speziellen Umweltschutzverordnung. So darf kein Treibstoff ins Meer abgelassen werden, es sind nur bestimmte Schiffsrouten erlaubt und das beteiligte Personal wird speziell geschult, um einen umweltschonenden Transport zu gewährleisten (Arianespace 2015; S. 17). Das Betreiberunternehmen Arianespace strebt damit eine Reduzierung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen an und evaluiert regelmäßig den diesbezüglichen Erfolg (Arianespace 2015; 17 ff.). Besonders viele Emissionen werden durch die Verbrennung von Treibstoff beim Raketenstart freigesetzt. Beim Weltraumbahnhof Französisch-Guayana werden bei jedem Start Messungen in verschiedenen Entfernungen vom Startbereich



© Juskteez Vu/unsplash

durchgeführt, darunter Konzentrationsmessungen von Chlorwasserstoff, Stickstoffdioxid, Hydrazin und Aluminiumoxid. Die Messungen zeigen, dass sich die Auswirkungen hauptsächlich auf die Nähe des Startbereichs (<2,3 km) beschränken, wo hohe Konzentrationen von Chlorwasserstoff und Aluminiumoxid gemessen wurden. In mittleren Entfernungen (bis zu 8 km) sind die Auswirkungen gering, in größeren Entfernungen von mehr als 8 km unerheblich. Die Auswirkungen auf Wasserqualität, Vegetation und Fauna werden ebenfalls überwacht, und bisher wurden keine wesentlichen negativen Auswirkungen festgestellt (Durrieu und Nelson 2013; Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) 2018).

Auf einem grundlegenden Level ist auch die Nachhaltigkeit aller im Weltraum-Sektor aktiven Unternehmen zu berücksichtigen. Hier zeigt sich, dass die begrenzte Übertragbarkeit existierender Reporting-Frameworks auf den Raumfahrt-Bereich dazu führt, dass umfassende Nachhaltigkeitsreports privater Raumfahrtunternehmen bisher nur vereinzelt veröffentlicht werden (Badalian 2023). Für eine umfassende Betrachtung der gesamten Branche muss also zunächst eine möglichst umfassende Datenbasis geschaffen werden.

#### 4.2.2 Produktion der technischen Systeme und Treibstoffe

Für Raumfahrtaktivitäten braucht es eine Vielzahl an technischen Systemen wie Satelliten, Raketen, Raumsonden und Raumstationen. Die Produktion der verschiedenen Komponenten bringt diverse Umweltbelastungen mit sich (Chanoine 2015), unter anderem einen hohen Strom- und Wärmeverbrauch. Je nach lokalem Energiemix entstehen dabei unterschiedlich hohe Treibhausgasemissionen. Auch die für die Produktion benötigten Rohstoffe für die Komponenten sind aus Umweltsicht relevant, nachfolgend werden exemplarisch einige Materialien genannt. Hierzu zählt unter anderem Germanium, das für die Produktion von Photovoltaikanlagen verwendet wird, die zum Beispiel in Satelliten und auf Raumstationen verbaut werden (European Space Agency (ESA) 2022b). Beim Abbau wird die lokale Umwelt verschmutzt, und es entstehen Treibhausgasemissionen (Vercalsteren et al. 2018). Zudem ist Germanium global nur sehr begrenzt verfügbar, und einzelne Staaten kontrollieren den Großteil des Abbaus: Über 55 % der Weltproduktion stammen aus der Volksrepublik China, gefolgt von Kanada (8,6 %)

und den Vereinigten Staaten (3,4 %) (Barazi et al. 2023; S. 54). Aufgrund der geringen weltweiten Produktionsmenge von nur rund 170 Tonnen bei gleichzeitig steigendem technologischem Bedarf ist der Marktpreis für Germanium sehr volatil (Barazi et al. 2023; S. 54). Die Nutzung von recyceltem Germanium könnte die Umweltbilanz verbessern und die genannten Schwierigkeiten abmildern (Kurstjens et al. 2018). Für Photovoltaiksysteme werden zudem Gold und Silber benötigt. Beide sind endliche Ressourcen, deren Abbau die Umwelt belastet (Maury et al. 2020). Innovative Unternehmen wie Relativity Space und das Mikrowellenplasmatechnologie-StartUp 6K wollen Umwelteinwirkungen reduzieren, indem sie Raketen aus einem aus Altmaterialien gewonnenen Materialpulver 3D-drucken und somit die Notwendigkeit des Abbaus von Ressourcen minimieren (Wheeler 2020). Der Einsatz von Kompositmaterialien aus Kork als Hitzeschutz in der Raumfahrt ist ein weiteres Beispiel für die Verwendung innovativer Materialien (Amorim Cork Composites 2020).

Als Energiequelle für Weltraummissionen werden seit 1961 häufig nukleare Radioisotopengeneratoren (Radioisotope Thermoelectric Generators, RTG) eingesetzt, da diese ohne bewegliche Teile auskommen. Daher sind sie sehr langlebig und wenig störungsanfällig. Aufgrund der hohen Zerfallshitze des häufig verwendeten Plutonium-238 (0.56 W/g) können sie kompakt gebaut werden (World Nuclear Association 2021). Aufgrund seiner Stabilität, seiner Wasserunlöslichkeit und seines hohen Schmelzpunktes von über 2.700°C ist das Risiko einer nuklearen Kontamination durch Plutonium-238 im Falle eines Fehlstarts oder Wiedereintritts in die Atmosphäre gering; bei den unfallbedingten Wiedereintritten des Wettersatelliten Nimbus-B (1968) und des Mondmoduls der Apollo-13-Mission (1970) überstanden die RTGs den Wiedereintritt und den Absturz in den Ozean unbeschadet und ohne nukleare Umweltkontamination (Siegel 2018). Doch der Einsatz nuklearer Energiequellen birgt auch Gefahren: 1977 stürzte der sowjetische Wettersatellit Kosmos 954 aufgrund einer Fehlfunktion über Kanada ab und verteilte radioaktive Trümmer in einem 600km langen Trümmerfeld (D'Agostino 2021). Die Such- und Bergungsarbeiten zogen sich über acht Monate hin und führten zu einer internationalen Auseinandersetzung zwischen Kanada und der Sowjetunion hinsichtlich des zu entrichtenden Schadensersatzes (s. Kapitel 3.2.3). Um Risiken beim Einsatz von nuklearen Systemen in

der Raumfahrt zu vermeiden, etwa im Rahmen eines Unfalls beim Start des Raumfahrtzeugs, werden Kernreaktoren erst nach dem Verlassen der Erdatmosphäre gezündet (D'Agostino 2021). Manche Raumfahrtmissionen sind nach derzeitigem Stand der Technik nur mit nuklearen Energiequellen umsetzbar, etwa weil die große Distanz zur Sonne eine Nutzung von Solarenergie unmöglich macht (D'Agostino 2021). Im Vorwort der 1992 verabschiedeten „Principles Relevant to the Use of Nuclear Power Sources in Outer Space“ des UNOOSA wird anerkannt, dass nukleare Energiequellen für manche Raumfahrtmissionen besonders geeignet oder gar unerlässlich sind. Gleichzeitig wird aber angemahnt, ihre Nutzung auf Anwendungen zu fokussieren, die besonders für die Vorteile der Nukleartechnologie geeignet sind, und den Einsatz nuklearer Technologien mit gründlichen Risiko- und Sicherheitsanalysen zu begleiten (United Nations Office For Outer Space Affairs (UNOOSA) 1992).

In Hinblick auf den prognostizierten Anstieg von Raketenstarts muss Treibstoff in großem Maßstab hergestellt werden, etwa die Flüssigtreibstoffe Wasserstoff/Sauerstoff oder Methan/Sauerstoff (Harris 2021). Im Falle der neuen Rakete Starship/SuperHeavy von SpaceX ist das ein Treibstoff aus flüssigem Sauerstoff und verflüssigtem Methan. Die Ladekapazität beträgt insgesamt 4600 Tonnen Treibstoff, nur ein Bruchteil davon wird für den Wiedereintritt reserviert (SpaceX 2022). Für die Herstellung dieses kryogenen<sup>13</sup> Treibstoffs und der Aufbereitung von Erdgas zu Methan muss eine geeignete Infrastruktur bereitgestellt und betrieben werden, dazu gehören Gaskraftwerke und Gasaufbereitungsanlagen, Gas-Pipelines, sowie weitere Anlagen, wie beispielsweise Kühltürme. Die Produktion des Treibstoffs ist energieintensiv und bringt einen hohen Wasserverbrauch, CO<sub>2</sub>-Emissionen und SO<sub>2</sub>-Emissionen mit sich (Harris 2021). In einem Testprojekt der ArianeGroup wurde Methan aus Biogasanlagen verwendet, um die Treibhausgasemissionen zu reduzieren (Dutheil und Boué 2017). Eine Herstellung in Biogasanlagen in dem erforderlichen großen Maßstab würde jedoch erhebliche Investitionen und Anlagen erfordern. Treibstoffe auf Basis von Wasserstoff werden in den meisten europäischen Raketen verwendet. Die energieintensive Herstellung von Wasserstoff setzt viel CO<sub>2</sub> frei, sofern die Energie nicht aus erneuerbaren Energien gewonnen wird, die für die Herstellung benötigt wird. Überwiegend wird derzeit jedoch sog. grauer

<sup>13</sup> Kryogene Treibstoffe sind verflüssigte Gase, die nahe an den absoluten Nullpunkt heruntergekühlt werden und aus Gründen der Energieeffizienz zum Einsatz kommen.

Wasserstoff aus Erdgas oder Kohle produziert (International Energy Agency (IEA) 2019). Sowohl die Treibstoffe aus Wasserstoff/Sauerstoff als auch diejenigen aus Methan/Sauerstoff verwenden flüssige Gase. Diese müssen unter extrem niedrigen Temperaturen von bis zu  $-251^{\circ}\text{C}$  bei flüssigem Wasserstoff oder  $-183^{\circ}\text{C}$  bei flüssigem Sauerstoff gelagert werden. Hierfür werden Treibstofflager benötigt, die einen hohen Energieverbrauch haben. Aufgrund dessen werden die flüssigen Gase für die einzelnen Raketenstarts, wenn möglich, nach Bedarf hergestellt, wobei der Herstellungsprozess für die nötige Treibstoffmenge für die Ariane-5-Rakete derzeit bereits anderthalb Monate dauert. Diese verbraucht für den Start rund 140 Tonnen flüssigen Sauerstoff und etwa 28 Tonnen flüssigen Wasserstoff (Centre Spatial Guyanais 2023).

Die von der ArianeGroup durchgeführte Lebenszyklusanalyse für den Betrieb der neuen Ariane64-Trägerrakete schätzt, dass rund 20.000 Tonnen  $\text{CO}_2$ -Emissionen während des Lebenszyklus einer zukünftigen Ariane 64-Trägerrakete entstehen werden. Der größte Teil der geschätzten Emissionen (46 %) steht im Zusammenhang mit der Herstellung und Betankung der Treibstoffe im Raumfahrtzentrum von Guayana. Die Trägerrakete wird mit flüssigem Sauerstoff und flüssigem Wasserstoff betrieben, und einem zusätzlichen Feststoffantrieb, letzterer trägt zu 1 % der  $\text{CO}_2$ -Emissionen während des Lebenszyklus bei. 30 % entfallen auf andere Aktivitäten am Boden vor und während des Fluges; 21 % auf die Herstellung und Montage der Strukturen in Europa. Die restlichen 2 % entstehen durch Tests und Transport (Arianespace 2022). Sind die Produktions- und Montagephasen und die Startorte geografisch verteilt, wie dies beispielsweise bei ESA-Raumfahrtmissionen häufig der Fall ist, müssen die Komponenten und technischen Systemen teilweise über lange Strecken transportiert werden, ob über Wasser oder über Land. Auch hier kommt es zu Treibhausgas-Emissionen, die den Raumfahrtmissionen angerechnet werden. Der Anteil ist jedoch, wie die Lebenszyklusanalyse der Ariane64-Trägerrakete zeigt, eher gering.

#### 4.2.3 Raketenantriebe und deren Emissionen

Aktivitäten im Rahmen der Startphase verursachen in besonders hohem Maße Umweltschäden (Chanoine et al. 2017). Bei Feststoff- und Flüssigtreibstoffen kommt es zu unterschiedlichen Emissionsprodukten und damit unterschiedlichen Auswirkungen auf die

Umwelt (Dallas et al. 2020b). Herausforderungen in der Bewertung der Umwelteinriffe liegen darin, dass die Emissionen je nach Messung schwanken, denn Wetterbedingungen und Tageszeiten sind hier aufgrund des chemischen Zusammenspiels verschiedener Elemente in der Atmosphäre zu berücksichtigen.

Feststofftriebwerke werden häufig für die Startphase von Raketen eingesetzt, da sie eine hohe Schubkraft haben. Die Treibstoffpaste in den Ariane 5- und Vega-Trägerraketen besteht aus Brennstoff (Aluminiumpulver), Oxidationsmittel (Ammoniumperchlorat) und einem Bindemittel (Polybutadienharz) (Centre Spatial Guyanais 2023). Bei der Verbrennung entstehen Chlorwasserstoff und Aluminiumoxid – Gase, die besonders ozonschädigend sind (Voigt et al. 2011). Die Ariane 5-Trägerrakete produziert pro Start rund 91 Tonnen Chlorwasserstoff (Arianespace 2022).

Kerosinbetriebene Raketen sowie auch Raketen mit Feststofftriebwerken setzen  $\text{CO}_2$  und Ruß direkt in der Stratosphäre frei, was aufgrund der Höhenlage zu einem größeren Strahlungsantrieb führt und Auswirkungen auf den Klimawandel hat, denn Rußpartikel und Aluminiumoxide absorbieren Wärme und erhöhen somit den Strahlungsantrieb (radiative forcing), also die Nettostrahlungsbilanz der Atmosphäre (Dallas et al. 2020b).

Treibstoffe mit flüssigem Wasserstoff und flüssigem Sauerstoff haben, neben den bereits erwähnten Umweltbelastungen bei der Produktion, eine weitere Umweltwirkung: Der Wasserdampf, der bei der Verbrennung entsteht, trägt zur Entstehung von Wolken in der Stratosphäre, aber vor allem in der Mesosphäre bei, also der Atmosphärenschicht in 50-80km Höhe über dem Meeresspiegel (Larson et al. 2017). Dies kann einen erhöhten Strahlungsantrieb hervorrufen und damit die Erderwärmung verstärken. Es besteht noch weiterer Forschungsbedarf, um die genauen Auswirkungen eines erhöhten Eintrags von Wasserdampf in die Mesosphäre und der damit verbundenen Wolkenbildung auf das Klima zu quantifizieren (Ross und Vedda 2018; Tian et al. 2023). Die Entstehung von Wolken in der Stratosphäre kommt unter natürlichen Bedingungen nur in den Polarregionen vor (sog. Polar Stratospheric Clouds, PSC); die Eispartikel in PSC tragen als Ort chemischer Umwandlungsprozesse zum Abbau der Ozonschicht bei (Tritscher et al. 2021). Eine durch Raketenstarts zunehmende Bildung von Wolken

in der Stratosphäre wäre also auch für die Ozonschicht schädlich.

Andere Treibstoffe enthalten Hydrazin oder Hydrazin-Derivate, eine instabile chemische Verbindung, die aus einer Kombination von Stickstoff- und Wasserstoffatomen besteht. Bei der Verbrennung entstehen Stickstoffoxide, die in der Mesosphäre und Stratosphäre mehrere Jahre lang bestehen bleiben, die Atmosphärenkomposition verändern und dabei Ozon abbauen. Die Herstellung von Hydrazin ist energieintensiv und die Flüssigkeit ist im unverbrannten Zustand hochgiftig (Dallas et al. 2020b). Daher steht Hydrazin seit 2011 auf der EU-Liste der besonders besorgniserregenden Substanzen (Substances of Very High Concern, SVHC) und soll möglicherweise in naher Zukunft europaweit verboten und daher zunehmend ausgetauscht werden (Kaboth und Werling 2021), so zum Beispiel bei der neuen Trägerrakete Vega E, die Leichtlasten in den Weltraum transportiert und ab 2026 eingesetzt werden soll (Arianespace 2022). Weltweit suchen Forschende nach einem umweltfreundlichen Ersatz für Hydrazin (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) 2023).

Noch wenig erforscht sind die Umwelteffekte durch einen neuen Treibstoff aus flüssigem Sauerstoff und Methan, der vermehrt in neuen Raketensystemen verwendet wird. Im Gegensatz zu kerosinbetriebenen Antriebssystemen entstehen keine Rußpartikel. Ein theoretischer Vorteil, der dem neuen Treibstoff zugeschrieben wird, ist eine potenzielle in-situ Herstellung auf dem Mars, mithilfe des atmosphärischen Kohlenstoffdioxid und Wasser aus Regolith, dem Material auf der Oberfläche des Mars. Dieses Szenario liegt jedoch noch in weiter Ferne (D'Aversa et al. 2016).

Auswirkungen auf die Ozonschicht durch die Freisetzung der verschiedenen Emissionsprodukte werden als eines der gravierendsten Probleme der Raumfahrt aus Umweltperspektive angesehen, vor allem in Hinblick auf die zukünftig zu erwartende steigende Anzahl von Raketenstarts (Dallas et al. 2020a). Im Gegensatz zu Verkehrsflugzeugen, die in niedrigeren Atmosphärenschichten fliegen, passieren Raketen die Stratosphäre, in der sich die Ozonschicht, also besonders viele Ozon-Moleküle, befinden. Bei allen Raketentreibstoffen liegt ein Schädigungspotenzial der stratosphärischen Ozonschicht vor, denn Stickstoffoxide, Hydroxide und Wasserdampf reagieren mit Ozon-Molekülen

(Ross et al. 2009). Die Feststofftriebwerke verursachen noch mehr ozonschädigende Emissionen, denn hier wird zusätzlich Chlorwasserstoff sowie Aluminiumoxid freigesetzt (Ross und Vedda 2018). Um die Datenqualität der durch Raketenstarts verursachten Eingriffe auf die Ozonschicht zu verbessern, bedarf es umfassender globaler Atmosphärenmodelle, welche bisher nur in eingeschränktem Maße vorliegen. Zu diesem komplexen Thema ist dementsprechend noch mehr Forschung nötig, um das konkrete Abbaupotenzial der Ozonschicht zu beziffern (Chanoine et al. 2017).

#### 4.2.4 Weltraumschrott

Schließlich kommt es auch am Ende des Lebenszyklus der technischen Systeme zu Umwelteingriffen bei der Raumfahrt. Bei einer zunehmenden Anzahl von Raketenstarts sowie Satellitensystemen im Weltraum kommt es zu einer hohen Masse an Material, welches in der Erdatmosphäre verglüht, aber auch Material, welches potenziell im Weltraum verbleibt.

Beim Wiedereintritt in der Atmosphäre entstehen durch die produzierte Hitze Wasserdampf und vor allem Stickstoffoxide, welche die Atmosphärenzusammensetzung verändern und zum Abbau der Ozonschicht beitragen (Larson et al. 2017; David 2022). Bei der Megakonstellation der Starlink-Satelliten wird mit zwei Tonnen an Masse gerechnet, die täglich in die Erdatmosphäre eintritt. Rechnet man weitere geplante Megakonstellationen und bereits verwendete Raketenkörper mit ein, könnten ab 2024 jährlich 2742–8114 Tonnen anthropogenes Material in die Erdatmosphäre eintreten, das hauptsächlich – und im Gegensatz zum natürlichen Material der kleinen Meteoriten, die im Vorbeifliegen in die Erdatmosphäre eintreten – aus Metallen besteht (Schulz und Glassmeier 2021). Aus Umweltsicht ist dies neben den Schäden an der Ozonschicht auch dahingehend problematisch, dass Satelliten zum größten Teil aus Aluminium bestehen, das beim Verglühen zu Aluminiumoxid abgebaut wird. Aluminiumoxid reflektiert Licht, wodurch sich die Albedo der Erdatmosphäre verändert und damit der Treibhauseffekt weiter verstärkt (Boley und Byers 2021).

Normalerweise verglühen 60 bis 90 Prozent der Masse eines Raumfahrzeugs oder anderen Nutzlasten beim Wiedereintritt. Teile, die den Wiedereintritt überstehen, landen bei einem gesteuerten Eintritt im Pazifischen Ozean zwischen Chile und Neuseeland im sogenannten Point Nemo. Point Nemo ist tausende

Kilometer von Land entfernt und wird auch als Raumschiff-Friedhof bezeichnet. Da der Punkt so weit vom Land entfernt liegt, dass der Wind kaum Nährstoffe hintragen kann, gilt er als der biologisch inaktivste Ort der Ozeane. Zudem gibt es dort Meeresströmungen, die nährstoffreicheres Wasser abhalten (D'Hondt et al. 2009). Wenn auch dieser Standort gute Voraussetzungen mitbringt, bleibt Müllentsorgung im Ozean diskussionsbedürftig, da es nicht im Sinne der Nachhaltigkeit sein kann, Umweltmedien als Mülldeponie zu nutzen. Die Gesamtmenge an Metall, die bei jedem Ariane5-Flug in den Atlantik fällt, beträgt etwa 90 Tonnen. Bei durchschnittlich sechs Flügen pro Jahr entspricht dies 540 Tonnen pro Jahr (Arianespace 2022). Eine direkte Gefahr für die Erde besteht bei ungesteuerten Wiedereintritten, wenn sich alte Satelliten beispielsweise nicht mehr steuern lassen und auf die Erde stürzen. So wie 2018, als der chinesische Satellit Tiangong im Südpazifik abstürzte und einige Teile nordwestlich von Tahiti im Pazifik landeten (Kuo 2018) oder im Fall des Wiedereintritts des Phobos-Grunt-Satelliten, der toxische Treibstoffe enthielt und daher eine Gefahr für die lokale Bevölkerung in der Absturzregion darstellte (Durrieu und Nelson 2013).

Demnach ist Weltraumschrott, also künstliche und unbrauchbare Objekte im niedrigen Erdorbit, ein signifikantes Problem. Die Anzahl von nicht mehr aktiven Satelliten, Raketenstufen und anderen Trümmerteilen, die in der Erdumlaufbahn verbleiben, steigt seit Jahren kontinuierlich an. Der erdnahe Weltraum läuft Gefahr, eine „Allmendetragedie“ zu werden, durch Übernutzung des frei verfügbaren, aber in der Gesamtheit begrenzten Erdorbits. Laut der aktuellen

Space-Debris-Studie der ESA befinden sich ungefähr 36.500 Trümmerteile in der Erdumlaufbahn, die größer als 10cm sind und 1 Millionen Trümmerteile zwischen 1cm und 10cm. Bei einer Erfassung von Teilen, die zwischen 1mm und 1cm groß sind, ergeben sich sogar rund 330 Millionen Trümmerteile (ESA Space Debris Office 2021). Zudem bewegt sich Weltraumschrott mit enormer Geschwindigkeit (etwa 28.000 km/h). Dies stellt eine Gefahr für Satelliten und Raumstationen dar, weil selbst kleine Trümmerteile bei einem Aufprall die Objekte beschädigen oder zerstören können. Bei einer zunehmenden Kaskade von Kollisionen von Weltraumschrott werden auch Ausweichmanöver häufiger, welche wiederum mehr Treibstoff verbrauchen. Und je mehr Trümmerteile im Weltraum sind, desto höher ist die Gefahr, dass die Teile untereinander kollidieren und so weitere Teile entstehen. Der Kessler-Effekt (auch Kessler-Syndrom) beschreibt das Risiko, dass die Menge an Trümmern in der Umlaufbahn eine kritische Masse erreicht, bei der jede Kollision kaskadenartig weitere Trümmerteile erzeugt, bis die Umlaufbahn für Raumfahrten nicht mehr nutzbar ist. Bereits heutzutage ist das Problem präsent: so musste die ISS seit ihrer Inbetriebnahme schon 32 Mal (Stand: Dezember 2022) ihren Kurs ändern, um eine mögliche Kollision mit Weltraumschrott zu vermeiden (NASA Orbital Debris Program Office 2022).

Die folgende Abbildung ist eine künstlerische Darstellung von Weltraumschrott sowohl in der niedrigen Erdumlaufbahn als auch in der geostationären Umlaufbahn. Die Objekte sind in der Darstellung vergrößert, damit sie sichtbar werden, die Anzahl basiert jedoch auf aktuellen Daten.



© Weltraumschrott/(European Space Agency (ESA) 2019b)

Satelliten, die in niedrigeren Umlaufbahnen positioniert werden, haben aufgrund des atmosphärischen Widerstands mit nur etwa sieben bis zehn Jahren eine geringere aktive Betriebsdauer als Satelliten in höheren Umlaufbahnen (Borthomieu 2013).

Bei einem Eintritt in die Erdatmosphäre verglüht ein Großteil der Objekte in der Regel nahezu vollständig. Je nachdem, in welcher Höhe sich die Objekte befinden, kann es jedoch sehr lange dauern, bis die nicht manövrierfähigen Satelliten und Trümmerteile aus ihrer ursprünglichen Umlaufbahn absinken und in die Erdatmosphäre eintreten. Die Verweildauer variiert aufgrund der unterschiedlich starken Bremswirkung und Erdanziehung. Bei 200 Kilometern Höhe dauert es ungefähr ein Jahr, bis ein Objekt in die Erdatmosphäre eintritt, bei 500 Kilometern Höhe kann es bis zu 25 Jahren dauern. Bei 800 Kilometern hingegen steigt die natürliche Aufenthaltsdauer auf mindestens 150 Jahre an.

Der meiste Weltraumschrott befindet sich auf einer Höhe von 800-900 Kilometern, also in Umlaufbahnen, die beispielsweise für Erdbeobachtungssatelliten genutzt werden (Metz 2021). Für die meisten der in der niedrigen Erdumlaufbahn befindlichen Trümmerteile stellt ein passives Absinken daher keine Lösung dar und sie müssen aktiv in Richtung der Erdatmosphäre bewegt werden, um dort zu verglühen. Daher sollten Satelliten über elektrische Antriebe und Triebwerke oder Schleppsegel verfügen, die die Satelliten nach Ablauf ihrer Betriebszeit absinken lassen.

Es wird empfohlen, dass Satelliten in einer niedrigen Erdumlaufbahn nach dem Ende ihres Betriebs aus ihrer Umlaufbahn entfernt werden, um das Risiko von Kollisionen zu minimieren, die Trümmer verursachen würden. Dies ist in den internationalen Richtlinien, den Space Debris Mitigation Guidelines von COPUOS (United Nations Office For Outer Space Affairs (UNOOSA) 2010a; S. 3), festgehalten, allerdings halten sich viele Betreiber nicht daran, da die Leitlinien nicht rechtlich bindend sind. In erdnahen Umlaufbahnen, in denen der atmosphärische Luftwiderstand nicht ausreicht, um die Satelliten innerhalb von 25 Jahren natürlich aus dem Orbit zu entfernen, werden von weniger als der Hälfte der Raumfahrtakteure Versuche unternommen, ihre Satelliten nachhaltig zu entsorgen (ESA Space Debris Office 2022). In der geostationären Umlaufbahn versuchen jedoch fast alle Weltraumakteure, die Objekte zu entfernen und in den Friedhofsorbit zu manövrieren.

Dieser Bereich ist inzwischen stark kommerzialisiert, was bedeutet, dass es klare finanzielle Anreize gibt, diesen Bereich von Weltraumschrott freizuhalten und für aktuelle und künftige Missionen sicher zu machen (ESA Space Debris Office 2022).

Die Europäische Weltraumorganisation ESA hat sich des Themas Weltraumschrott angenommen und bereits im Jahr 2012 die Initiative "Clean Space" ins Leben gerufen (Pettit 2021). Der ClearSpace-1-Jagdsatellit, entwickelt vom gleichnamigen Schweizer Start-Up (Mäurer 2020), funktioniert wie ein Abschleppwagen und sammelt mit seinen Greifarmen defekte Satelliten und größere Trümmer ein. So verringert er die Gefahren für aktive Satelliten. Vielversprechend ist ebenso die Forschung an Haftmaterialien (Löfken 2021). Ende 2020 erprobte man auf der Internationalen Raumstation ISS sog. „Astrobees“ – kleine fliegende Roboter –, die dank ihrer Gecko-inspirierten Haftmaterialien Schrottteile an sich kleben lassen (Kanis 2016). In der Lebensmittelindustrie ist die Gecko-Technologie im automatisierten Sortieren und Verpacken lange bekannt. Nun wird sie im All erprobt. Des Weiteren kommen, wie im NASA-Projekt Brane Craft entwickelt, extrem dünne und kugelsichere Raumfahrzeuge zum Einsatz. Diese sehen aus wie eine Folie und sie verhalten sich auch so: Weltraumschrott wird umwickelt und anschließend zum Verglühen in die Erdatmosphäre navigiert (Howell 2017). Japanische und finnische Forschende arbeiten daran, Nanosatelliten (Kleinstsatelliten) aus Holz zu bauen. Diese verglühen vollständig, vor allem wird aber ein Aluminiumeintrag in der Atmosphäre vermieden (Harper 2020; Arctic Astronautics / Kitsat 2021). Zudem entstehen, getrieben sowohl durch ESA als auch durch Start-Ups wie OKAPI:Orbits Lösungen, die die Satelliten softwareseitig so steuern, dass Kollisionen verhindert werden, damit ihre Betriebsdauer erhöht wird (Seeburg 2021).

Durch die Entwicklung neuer Methoden für den Umgang mit Weltraumschrott strebt die europäische Welt- raumbehörde die Reduzierung von negativen Umwelt- folgen an. Die Initiative CleanSpace arbeitet nicht nur an Richtlinien und Ideen, wie Weltraumschrott aus dem All entfernt werden können, sondern auch – unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit – an Lösungen, wie zukünftiger Schrott vermieden werden kann (Pettit 2021). Dies ist ein signifikanter Aspekt, um die begrenzte Ressource des Weltraums zu schützen und langfristig für uns nutz- bar zu machen (European Space Agency (ESA) 2021b).

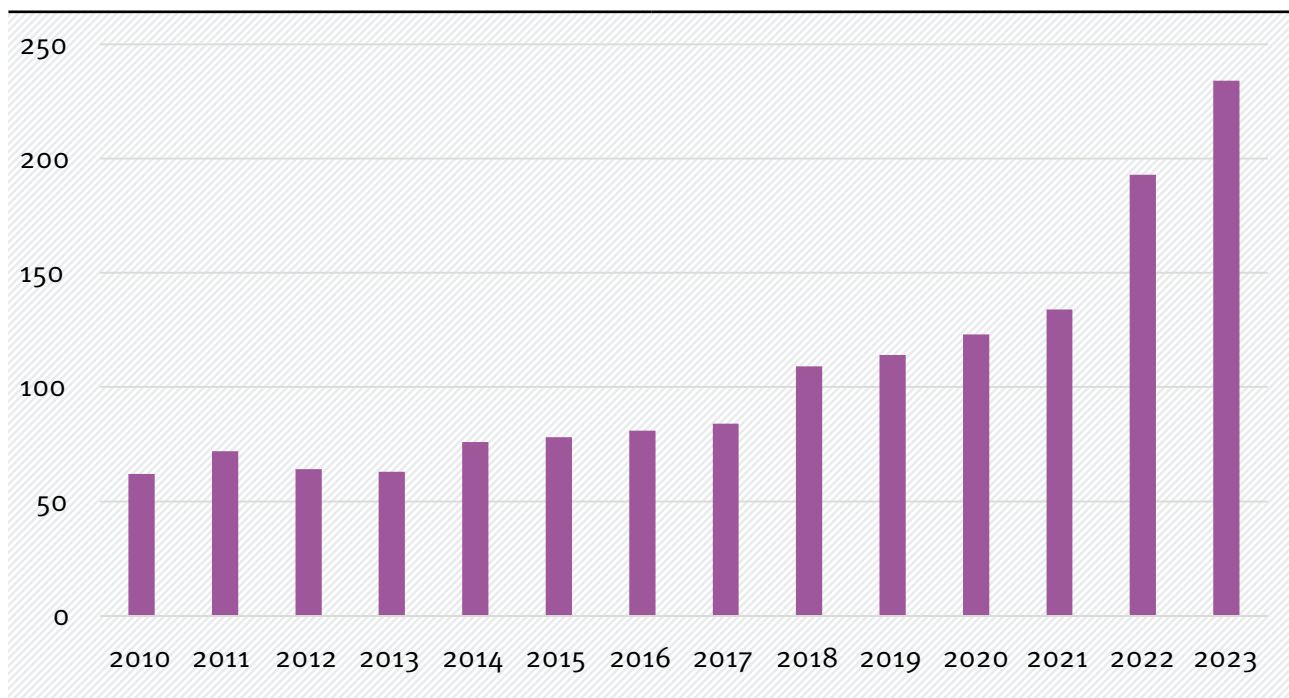
# 5

**Aktuelle und  
zukünftige  
Entwicklungen:  
Potenziale und  
Risiken für die  
Umwelt**

Die nachfolgenden vier Schwerpunktthemen sind Trends mit hoher Umweltrelevanz. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Auswirkungen auf die Umwelt bei diesen Themen künftig weiter zunehmen werden: von den wachsenden Zugangsmöglichkeiten zum Weltraum, über neue Möglichkeiten im Bereich Erdbeobachtung sowie Satellitennavigation und -kommunikation bis hin zu einem eventuellen Ressourcenabbau im Weltraum. Bei jedem dieser Themen wird jeweils in den Blick genommen, welche Umweltpotenziale und -risiken damit einhergehen können. Auch im Fokus stehen mögliche Effekte für Umweltpolitik und Umweltforschung.

Abbildung 11

### Anzahl weltweiter Raketenstarts seit 2010



Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf Daten aus <https://nextrocket.space/>

## 5.1 Zugang zum Weltraum

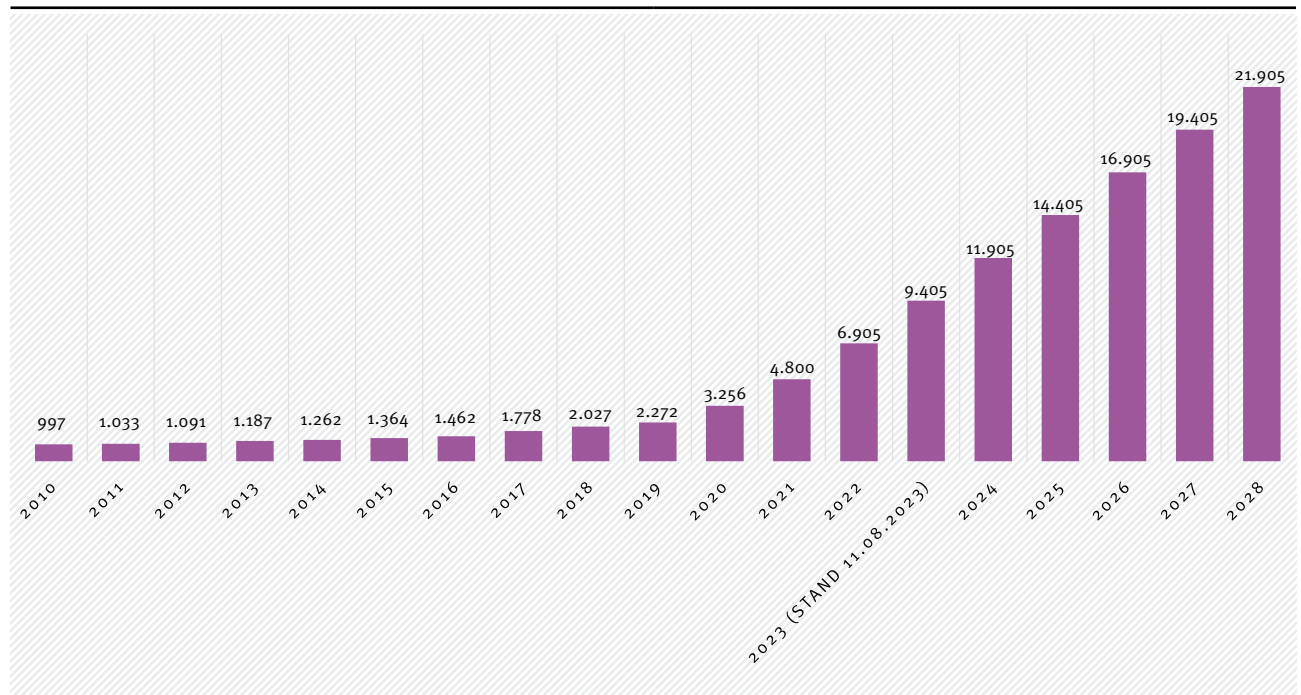
Der Zugang zum Weltraum, also die technische und institutionelle Kapazität, den Weltraum zu erreichen, ist für viele Nationen nicht nur wirtschaftlicher Faktor und Ausdruck der eigenen Innovationsfähigkeit und Technologieführerschaft, sondern auch eine Angelegenheit nationaler Souveränität oder des Prestiges.

### 5.1.1 Hintergrund und Entwicklung

Seit dem Start des russischen Sputnik-Satelliten am 4. Oktober 1957 ist der Zugang zum Weltraum immer einfacher geworden, wie z. B. die steigende Anzahl an Raketenstarts seit den 2010er Jahren zeigt (vgl. Abbildung 9). Immer mehr aktive Satelliten umkreisen die Erde: Lag ihre Zahl im Jahr 2010 noch bei 997, so ist sie bis Mitte August 2023 bereits auf ca. 8.400 gestiegen (European Space Agency (ESA) o.J. m).<sup>14</sup> Die

<sup>14</sup> Neben der Anzahl aktiver bzw. funktionsfähiger Satelliten existiert auch eine große Zahl inaktiver Satelliten (ca. 2.150), die als Weltraumschrott um die Erde kreisen. Insgesamt gibt es 34.500 Trümmerobjekte im All (Stand 11. August 2023; European Space Agency (ESA) o.J. m).

Abbildung 12

**Anzahl aktiver Satelliten im Erdorbit seit 2010 und prognostizierte Entwicklung bis 2028**

Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf Daten aus Statista GmbH 2023a, McDowell 2023, Euroconsult 2022

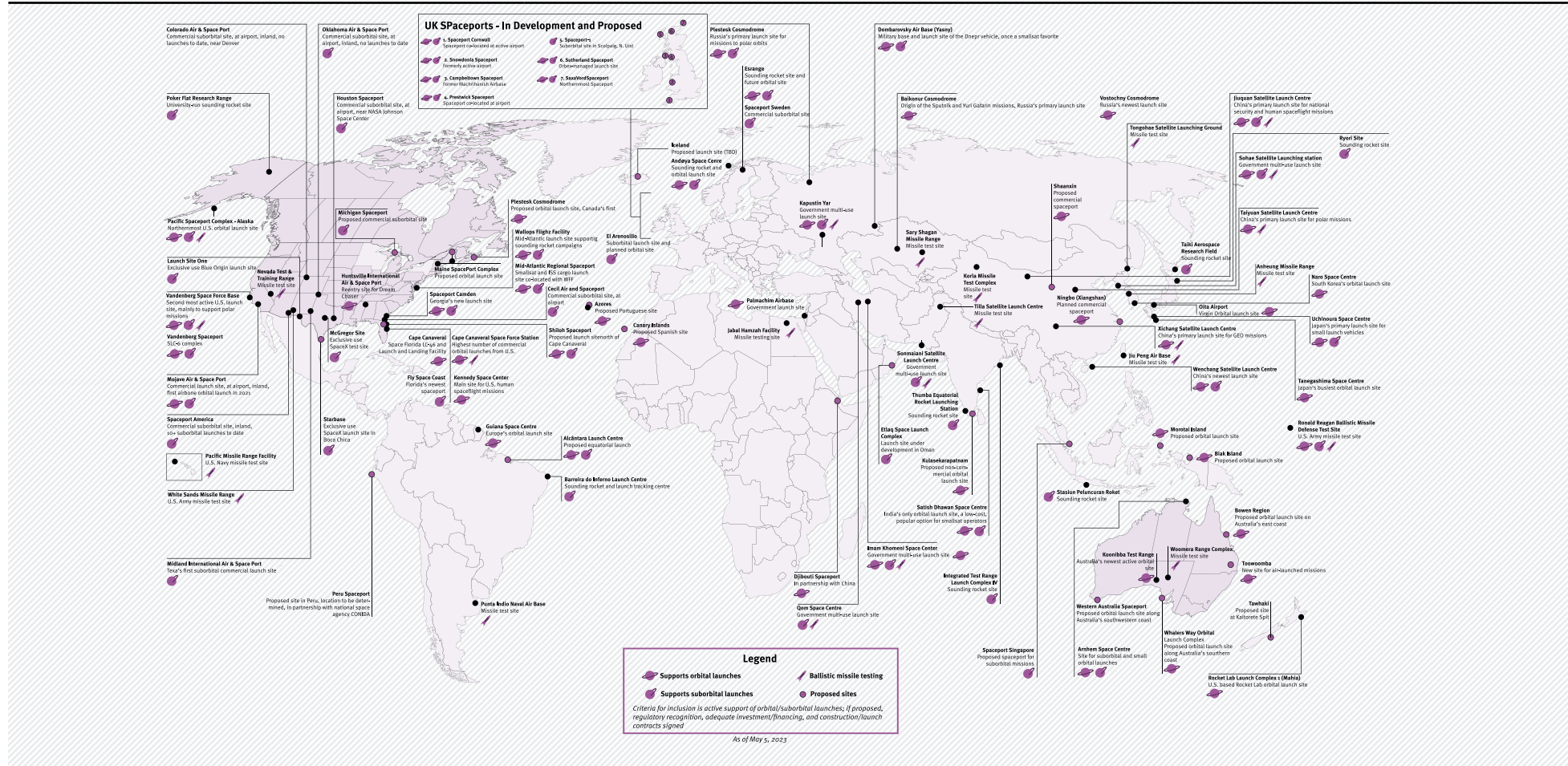
Entwicklung wird vor allem durch die Errichtung von Megakonstellationen aus Kleinsatelliten getrieben (siehe Kapitel 3.1.2). Allein SpaceX will perspektivisch 12.000 Satelliten ins All bringen (Klapetz 2023). Wie bereits dargestellt, ist die Zahl der raumfahrenden Nationen, d. h. der Länder, die in der Lage sind, mit eigenen Trägersystemen den Weltraum zu erreichen, gestiegen: 14 Nationen, darunter die EU-Staaten im ESA-Verbund, verfügen gegenwärtig über entsprechende technische und institutionelle Fähigkeiten, von weltweit ca. 90 Nationen, die ein eigenes Raumfahrtprogramm finanzieren (Moranta et al. 2021; S. 140). Allerdings benötigen Raumfahrtagenturen und -unternehmen heute nicht immer eigene Trägersysteme, um unbemannte Raumfahrt durchzuführen. So verfügt Deutschland zum Beispiel nicht über eine eigene Trägerrakete, sondern befördert u. a. über das Ariane-Programm der ESA eigene Nutzlasten in den Weltraum. Für die bemannte Raumfahrt verfügen nur wenige Staaten überhaupt über die technischen Fähigkeiten. Bislang ist es nur drei Nationen – Russland, USA und China – gelungen, Astronaut\*innen in den Weltraum und zurückzubringen. Die USA stellen

dabei zwei Drittel aller bisherigen Raumfahrer\*innen (Bocksch 2021b). Astronaut\*innen aus anderen Nationen sind daher darauf angewiesen, sich an internationalen Unternehmungen, wie beispielsweise der Internationalen Raumstation ISS, zu beteiligen.

Gegenwärtig findet weltweit ein Ausbau der für Raumfahrt erforderlichen Starteinrichtungen statt. Derzeit gibt es 28 aktive Weltraumbahnhöfe (Stand 31.01.2023, Roberts 2023). Weitere, zum Teil privat betriebene, sind in Planung (siehe Abbildung 13). Dies liegt zum einen daran, dass einzelne Nationen einen eigenständigen Zugang zum Weltraum sicherstellen wollen, wie beispielsweise Großbritannien mit einem Startplatz in Cornwall (Spaceport Cornwall o.J.), und zum anderen daran, dass bestehende Anlagen zum Teil seit Jahrzehnten genutzt werden und modernisiert oder ausgebaut werden müssen. Im Ergebnis werden Startkapazitäten erhöht, was künftig eine größere Nutzungsvielfalt beim Einsatz unterschiedlicher Trägersysteme möglich macht (siehe Kapitel 4.1.2).

Abbildung 13

Lage aktiver und geplanter Weltraumbahnhöfe und Raketenstartplätze



Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf [https://brycotech.com/reports/report-thumbnails/Bryce\\_Launch\\_Sites\\_2021.png/](https://brycotech.com/reports/report-thumbnails/Bryce_Launch_Sites_2021.png/)

Der erleichterte Zugang zum Weltraum gestattet mehr Institutionen, zum Beispiel Universitäten oder außeruniversitären Forschungseinrichtungen, an der Nutzung des Weltraums teilzuhaben. Das Interesse an einem Zugang bzw. einer Nutzung des Weltraums ist dabei vielfältiger Natur. Neben Staaten (Kommunikation, Navigation) sind vor allem Forschungsinstitutionen (Erdbeobachtung, Mikrogravitationsforschung, Weltraumexploration) und zunehmend Unternehmen (Kommunikation, Navigation, Forschung und Entwicklung, Serviceaufgaben im Orbit und perspektivisch auch Ressourcenabbau) sowie Privatpersonen (Weltraumtourismus, Kunst) in der Lage, den Weltraum zu erreichen.

### Blick in die Zukunft: ein Weltraumbahn- hof in Deutschland?

Bislang verfügt Deutschland über keinen eigenen Weltraumbahn- und kein eigenes Testgelände für Raketentriebwerke. Von einzelnen Unternehmen und Interessenvertreter\*innen wird allerdings seit Ende 2019 gefordert, dass die deutsche Regierung den Bau eines eigenen Weltraumbahn- hofs in Deutschland unterstützt. Damit ließe sich die Abhängigkeit von anderen Ländern reduzieren und ein eigener Zugang zum Weltraum sicherstellen. Dies hätte eine größere Flexibilität bei der Durchführung von Weltraumaktivitäten zur Folge (Gradwohl 2020).

Im Jahr 2020 haben sich mehrere deutsche Unternehmen, darunter OHB SE, in der German Offshore Spaceport Alliance (GOSA)<sup>15</sup> zusammengeschlossen, um den ersten Weltraumbahn- hof Deutschlands zu initiieren. Ein deutscher Weltraumbahn- hof sollte jedoch nicht in an Land entstehen, stattdessen ist ein mobiler Startplatz in der Nordsee angedacht (Handke 2020). Von dort könnten mit Microlaunchern Nutzlasten von bis zu einer Tonne in den Erdorbit befördert werden. Mehrere Unternehmen in Deutschland (ISAR Aerospace,<sup>16</sup> Rocket Factory Augsburg<sup>17</sup> und Hylmpulse<sup>18</sup>) arbeiten, unterstützt durch Forschungsförderung des BMWK, bereits an der Realisierung der entsprechenden Trägersysteme und erhoffen sich die

Erschließung neuer Marktpotenziale (Schulte und Sturm 2020).

Die Inbetriebnahme eines Weltraumbahn- hofs im Wattenmeer ist jedoch umstritten. Das hohe Schifffahrtsaufkommen und die zahlreichen Windenergieanlagen schränken eine Nutzung der deutschen Nordsee für Raketenstarts ein, zudem müsste für jeden Start der Luftraum gesperrt werden (Záboji und Plickert 2023). Auch zu erwartende Umweltfolgen von Raketenstarts und Havarien, wie Emissionen, Lärm und Schrott (s. Kapitel 4.2.3), müssten angesichts der drei Wattenmeer-Nationalparks<sup>19</sup> besonders kritisch geprüft werden. Anders als bei äquatornahen Weltraumbahn- hofen, von denen das gesamte Spektrum der Trägerraketen sämtliche Umlaufbahnen um die Erde erreichen kann, böte ein mobiler Weltraumbahn- hof in der Nordsee nur Startmöglichkeiten für Kleinträger. Von Seiten der Bundesregierung wurde die Notwendigkeit eines europäischen Weltraumbahn- hofs betont, eine Festlegung auf einen deutschen Weltraumbahn- hof in der Nordsee als Ziel angesichts der vielen Unwägbarkeiten aber abgelehnt (Küpper 2023). Noch wurde der Bau eines solchen Weltraumbahn- hofs nicht begonnen.

#### 5.1.2 Trends und Treiber

Wie oben dargestellt, deutet vieles darauf hin, dass der Zugang zum Weltraum künftig noch einfacher wird. Der Ausbau der erforderlichen technischen Infrastruktur erleichtert es, mehr Raketenstarts durchzuführen und Nutzlasten ins All zu transportieren. Auch für nicht-raumfahrende Nationen sinken die Eintrittshürden, da die Partizipation an Raumfahrtaktivitäten durch internationale Kooperationen zwischen Raumfahrtagenturen und Unternehmen vereinfacht wird. Neue Geschäftsmodelle erlauben zudem den Markteintritt neuer Akteure in den Weltraummarkt, wie zum Beispiel das 2019 gegründete US-Unternehmen Space Perspective, welches ab 2024 Raumfahrten für Tourist\*innen plant (Brinkmann 2022).

<sup>15</sup> <https://www.offshore-spaceport.de/de/>

<sup>16</sup> <https://www.unternehmertum.de/start-ups/isar-aerospace>

<sup>17</sup> <https://www.rfa.space/>

<sup>18</sup> <https://hylmpulse.de/en/>

<sup>19</sup> <https://www.nationalpark-wattenmeer.de/>

### Zunehmende Raumfahrtbeteiligungen und -kooperationen

Wie bereits mehrfach betont, ist Raumfahrt kaum ohne internationale Zusammenarbeit möglich. Allein die Komplexität einzelner technischer Systeme erfordert in der Regel die Kooperation weltweit verteilter Zulieferer. Zudem bedingt die begrenzte Anzahl an Weltraumbahnhöfen, dass internationale Vereinbarungen zu deren Nutzung geschlossen werden. So war es beispielsweise seit 2011 möglich, russische Sojus-Raketen vom von der ESA/CNES betriebenen Raumfahrtzentrum Guyana in Französisch-Guyana zu starten, zusätzlich zu den europäischen Ariane-Raketen (Seidler 2011). Diese Zusammenarbeit endete im Februar 2022 infolge der EU-Sanktionen gegen Russland wegen des Angriffskriegs auf die Ukraine (Nguyen 2022). Andere nicht-europäische Nationen, Raumfahrtagenturen und kommerzielle Kunden können Startkapazitäten über das Unternehmen Arianespace einkaufen. Seit 1979 wurden vom europäischen Weltraumbahnhof über 300 Raketen und über 1000 Satelliten ins All befördert (Arianespace o.J.).

Ein häufig genanntes Beispiel für internationale Zusammenarbeit ist die aktuell noch im Betrieb befindliche Internationale Raumstation ISS (s. Kapitel 3.1.2). Sie wurde im Rahmen einer Partnerschaft zwischen den fünf Raumfahrtagenturen NASA (USA), ESA (europäische Partnerländer), CSA (Kanada), Roskosmos (Russland) und JAXA (Japan) (National Aeronautics and Space Administration (NASA) 2015; S. 57) erbaut. 269 Menschen aus 21 Nationen haben bereits auf ihr gelebt und gearbeitet (Stand August 2023; Garcia o.J.). Die Nutzung der ISS ist also nicht nur den beteiligten Nationen vorbehalten, sondern steht auch anderen Ländern sowie Forschungseinrichtungen und Unternehmen weltweit offen. So bietet beispielsweise das Unternehmen Nanoracks<sup>20</sup> an, Mikrosatelliten (CubeSats) von der ISS zu starten. Im Rahmen des Programms KiboCube<sup>21</sup> ermöglicht die UNOOSA es nicht-raumfahrenden Nationen, eigene Mikrosatelliten von der ISS zu starten und damit unabhängige Forschung zu betreiben (United Nations Office For Outer Space Affairs (UNOOSA) 2021; S. 63). Mit ihrem Programm „Access to Space for All“ fördert die UNOOSA darüber hinaus die Beteiligung nicht-raumfahrender Nationen an Weltraumaktivitäten und

ermöglicht einen Technologie-Transfer durch ihre Unterstützung bei der Entwicklung und Erprobung von Weltraum-Hardware (United Nations Office For Outer Space Affairs (UNOOSA) 2021).

### Zunehmende Kommerzialisierung von Raumfahrtaktivitäten

Die wachsende Kommerzialisierung und Privatisierung von Raumfahrtaktivitäten – Teil des „New Space“ genannten Trends – seit der Jahrtausendwende ist eine beachtenswerte Entwicklung. Die vormals vorwiegend staatliche Finanzierung von Raumfahrtaktivitäten wird zunehmend flankiert von privatwirtschaftlichen Investitionen. Die daraus entstehenden technischen Innovationen, wie z. B. im Bereich der Navigationssysteme (siehe Kapitel 5.2) und neuen Geschäftsmodelle, wie etwa im Bereich datenbasierter Dienstleistungen, sorgen für eine zunehmende Verbreitung von Produkten und Dienstleistungen aus der Raumfahrtbranche in andere Branchen (Kind et al. 2020).

Produkte und Dienstleistungen, wie zum Beispiel die Mitnahme von Satelliten bei Raketenstarts, die im Zusammenhang mit Raumfahrtaktivitäten entstehen und zunehmend auch in Nicht-Raumfahrtbranchen diffundieren, haben sich in den letzten zwei Jahrzehnten als Wachstumstreiber für die weltweite Raumfahrtbranche erwiesen (Rencelj et al. 2023; S. 84ff.). Dementsprechend wird dem weltweiten Markt ein großes Wachstumspotenzial zugesprochen: Schätzungen zufolge umfasste das globale Marktvolumen im Jahr 2021 zwischen 374,7 Mrd. US-Dollar und 479,7 Mrd. US-Dollar. Davon entfallen etwa rund 107 Mrd. US-Dollar auf das Budget nationaler Raumfahrtagenturen (siehe Kapitel 3.2.2).

Obwohl sich das jährliche Wachstum zwischenzeitlich etwas verlangsamt hat (zwischen 1,7 % und 2,2 % im Zeitraum 2018-2019 im Vergleich zu 3,4 % und 8,1 % im Zeitraum 2017-2018; Moranta et al. 2021; S. 128), lässt sich in letzter Zeit mit einem Anstieg von 6,3 % zu 19 % von 2020 zu 2021 ein entgegengesetzter Trend feststellen (Rencelj et al. 2023; S. 138). Insgesamt wird erwartet, dass der globale Markt für raumfahrtbezogene Produkte und Dienstleistungen in den nächsten zwei bis drei Dekaden bis zu 1 Billion US-Dollar um-

<sup>20</sup> <https://nanoracks.com/products/iss-launch/>

<sup>21</sup> <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/psa/hsti/kibocube.html>

fassen könnte (Morgan Stanley 2020). Dies stößt auf großes Interesse und so haben die Anzahl und das Volumen an Investitionen in Raumfahrt-Start-ups in den letzten 20 Jahren weltweit deutlich zugenommen. Von 2000 bis 2021 wurden 52,2 Mrd. US-Dollar investiert, beteiligt haben sich dabei rd. 1.626 Investor\*innen. Allein 2021 wurden rd. 15,4 Mrd. US-Dollar in 212 Start-ups weltweit investiert, davon 69 % in Form von Wagniskapital (BRYCE Tech 2022; S. 10; S. 23). In Europa wurden im Jahr 2022 1,1 Mrd. Euro in Raumfahrt-Start-ups investiert (Rencelj et al. 2023; S. 166).

Bei Geschäftsfeldern und -modellen wird eine zunehmende Vielfalt erwartet (SpaceTec Partners und BHO Legal 2016). Zum einen werden datenbasierte Geschäftsmodelle durch die stetig wachsenden Datenmengen und Datenübertragungs- und -verarbeitungskapazitäten einfacher realisierbar und in ihrer Umsetzung gefördert, z. B. durch entsprechende Bekanntmachungen im Rahmen des europäischen Horizon 2020-Programms (Toth und Concini 2019; S. 56ff.). Zum anderen ist auch die Entwicklung von Weltraum-Hardware, wie z. B. Trägerraketen oder Kleinsatelliten, durch eine wachsende Nachfrage nach Startkapazitäten und -dienstleistungen zu einem ökonomischen Faktor geworden, der auch zukünftig Kostensenkungen ermöglicht. So sind die Kosten für einen Satellitenstart durch technische Innovationen und zunehmenden Wettbewerb bereits von rd. 200 Mio. US-Dollar auf ca. 60 Mio. US-Dollar gesunken. Zukünftig könnten Satellitenstarts sogar für nur 5 Mio. US-Dollar realisiert werden (Morgan Stanley 2020).

Letztlich bietet auch die Privatisierung von bislang öffentlich finanzierten Einrichtungen wie der Internationalen Raumstation ISS für privatwirtschaftliche Akteure die Möglichkeit, Geld in Forschung und Entwicklung zu investieren und Renditen zu erwirtschaften. Da die Internationale Raumstation ISS zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur noch bis 2024 betrieben werden soll, ihr aber eine 5 bis 6 Jahre längere Lebensdauer vorausgesagt wird, wird bereits seit mehreren Jahren diskutiert, inwiefern die vorhandene Infrastruktur teilweise privatisiert werden könnte (Martin 2018; Gohd 2021).

## Blick in die Zukunft: möglicher Zukunftsmarkt Weltraumtourismus

Der Weltraum kann eine große Faszination auf Menschen ausüben. Bislang war es allerdings nur sehr wenigen Personen vorbehalten, in den Weltraum zu gelangen. Zwischen 500 und 600 Menschen aus 38 Ländern haben Raumflüge<sup>22</sup> absolviert, wovon die meisten professionell ausgebildete Astronaut\*innen waren (Roberts 2021).

Die erste Privatperson, die in den Weltraum reiste, war der US-amerikanische Unternehmer Dennis Tito, der vom 28. April bis 6. Mai 2001 die Internationale Raumstation ISS besuchte. Dafür buchte er mit Hilfe des Unternehmens Space Adventures Ltd. einen Platz in einem russischen Sojus-Raumschiff für rd. 20 Mio. US-Dollar. Ihm folgten in den nächsten acht Jahren sechs weitere Personen, die jeweils zwischen 15 und 35 Mio. US-Dollar für einen Raumflug bezahlten.

Im Auftrag des Unternehmens Axiom Space transportierte SpaceX mit seinem CrewDragon-Raumschiff im Frühjahr 2022 (8. bis 25. April) vier Personen auf dem ersten rein kommerziellen Flug zur ISS, zu einem Preis von rund 55 Mio. US-Dollar pro Kopf (Spektrum.de 2022).

Neben Flügen zur ISS wurden bislang einige suborbitale Flüge (siehe Kapitel 4.1.4) von den Unternehmen Virgin Galactic und Blue Origin durchgeführt; eine Aufnahme der regulären Geschäftstätigkeiten steht jedoch noch aus. Zudem hat SpaceX im September 2021 erstmalig vier Privatpersonen drei Tage lang in die Erdumlaufbahn geschickt; dabei wurde eine größtenteils automatisierte Raumkapsel eingesetzt (Wall 2021).

Dem Marktsegment Weltraumtourismus wird einerseits großes wirtschaftliches Potenzial zugesprochen, andererseits konnten bislang noch keine tragfähigen Geschäftsmodelle entwickelt werden. Die Kosten pro Person bewegen sich aktuell zwischen 250.000 US-Dollar (suborbitaler Flug) bis hin zu 80 Mio. US-Dollar (längerer Aufenthalt auf der ISS), so dass diese Form des Tourismus in nächster Zukunft

<sup>22</sup> Es ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass keine eindeutige Zahl festgelegt werden kann, da es keine einheitliche Definition einer Grenze zum Weltraum gibt (siehe Kapitel 3.1.1). Daher ist auch nicht übereinstimmend geklärt, was einen Raumflug kennzeichnet und ab wann Raumfahrer\*innen als Astronaut\*innen bezeichnet werden.

hauptsächlich wohlhabenden Personen vorbehalten sein wird (Kind et al. 2020; S. 58f.). In diesem Zusammenhang muss darüber diskutiert werden, inwiefern Weltraumtourismus angesichts der im Bericht dargelegten erheblichen Umweltauswirkungen der Raumfahrt einen gesellschaftlichen Gegenwert bieten kann, der eine weitere Ermöglichung privater Reisen in den Weltraum rechtfertigt. Die ersten Weltraumtourist\*innen (so genannte „Space Flight Participants“) besuchten die ISS noch im Rahmen der routinemäßigen Crewrotation (Mars 2020) und trugen somit nur eingeschränkt zu den Umweltwirkungen der jeweiligen Mission bei. Im Kontext von rein kommerziellen bzw. privaten Raumfahrtmissionen ist die Frage nach der grundlegenden Notwendigkeit und Sinnhaftigkeit dieser Unternehmungen für die Gesellschaft umso dringender (s. auch Kapitel 6.1.4).

### Umbruch im Sektor Raketenstartdienstleistungen durch technische Innovationen

Ausschlaggebend für einen erleichterten Zugang zum Weltraum ist die Erforschung und Realisierung technischer Innovationen bei Trägersystemen und Nutzlasten. Bei den Trägersystemen sind es beispielsweise Leichtbauverfahren, die zu einer Gewichts- und somit Startkostenreduktion führen. Außerdem ist die Erprobung wiederverwendbarer Raketenkomponenten, insbesondere der einzelnen Triebwerksstufen, weit vorangeschritten und bei SpaceX bereits seit 2017 im regulären Betrieb möglich (SpaceX 2021). Durch die Wiederverwendbarkeit sollen wertvolle Ressourcen eingespart (siehe Kapitel 5.1.3) und Kosten gesenkt werden. In den letzten 60 Jahren ist der Preis pro Kilogramm Nutzlast von 177.900 US-Dollar (mittelschwere Trägerrakete Delta E im Jahr 1965) auf 1.500 US-Dollar (Schwerlastträger Falcon Heavy im Jahr 2018) gesunken (Roberts 2022). Die Wiederverwendung von Raketenstufen liefert darüber hinaus auch hilfreiche Daten, die zur Weiterentwicklung der einzelnen technischen Komponenten sowie zur Optimierung des Startvorgangs genutzt werden können.

Da zunehmend der Bedarf steigt, leichte Nutzlasten wie Kleinsatelliten (siehe Kapitel 5.3.2) zu befördern, werden nun häufiger kleinere Trägerraketen verwen-

det (European Space Agency (ESA) 2018). Rund 135 solcher sogenannten Microlauncher sind weltweit entweder bereits im Einsatz oder noch in der Entwicklung (Kulu 2021a), unter anderem von US-amerikanischen Unternehmen wie SpaceX oder Rocket Lab. Wesentliche Innovationsfaktoren hier sind neue Antriebssysteme und optimierte Treibstoffgemische (Erwin 2020) sowie neue Startkonzepte, beispielsweise jenes der Firma Zero2Infinity, bei dem zunächst ein Ballon ein dreistufiges Trägersystem bis in die Stratosphäre bringen soll, ehe die Raketentriebwerke aktiv werden (Marsiske 2016).

Mit steigender Nachfrage nach Startkapazitäten müssen neue Trägersysteme entwickelt bzw. bestehende Trägersysteme in größeren Mengen produziert werden. Im Betrieb befindliche Trägersysteme, wie beispielsweise der europäische Kleinträger Vega, können für neue Anforderungen umgerüstet werden, indem sie mit Satellitenverteilern, sogenannten „Dispensern“, ausgestattet werden. So kann eine Vega-Rakete anstelle eines einzelnen Großsatelliten viele Kleinsatelliten in den Orbit bringen und in verschiedenen Bahnhöhen aussetzen. Im September 2020 wurde erstmals ein solcher „Ride Share Flug“ mit der Vega durchgeführt; dabei wurden 53 Kleinsatelliten freigesetzt.<sup>23</sup> Der hierfür genutzte Small Spacecraft Mission Service (SSMS) Dispenser von SAB Aerospace ist aktuell für Kleinsatelliten mit einem Gewicht von 1 bis 500 kg ausgelegt.

Die vorgestellten Entwicklungen deuten darauf hin, dass Raketenstart-Dienstleistungen zukünftig günstiger werden und durch technische Innovationen der Zugang zum Weltraum noch einfacher wird. Dies könnte die Anzahl von Raketenstarts in den kommenden Jahren weiter steigen lassen.

### 5.1.3 Umweltpotenziale und -risiken

Der Zugang zum Weltraum wird erleichtert durch eine verstärkte internationale Kooperation, die zunehmende Kommerzialisierung und technologische Innovationen. Die Zunahme an Aktivitäten im Weltraum hat negative Auswirkungen auf die Umwelt im Weltraum und auf der Erde: durch Schadstoff- und Treibhausgasemissionen beim Raketenstart, die Gefährdung der Ozonschicht durch Starts und das Verglühen von Raketen und Satelliten, und durch Weltraumschrott,

<sup>23</sup> [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Transportation/Vega/Vega\\_return\\_to\\_flight\\_proves\\_new\\_rideshare\\_service](https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Vega/Vega_return_to_flight_proves_new_rideshare_service)

also nicht-wiederverwendbare, im Weltraum verbleibende Teile.

### Privatisierung von Raumfahrtaktivitäten und Umweltprüfungen

Die Vielzahl der verschiedenen Akteure mit unterschiedlichen wirtschaftlichen Interessen macht es schwieriger, verbindliche Regeln durchzusetzen. Damit verbunden ist die Herausforderung, dass Starts zwar von einzelnen Staaten oder privaten Unternehmen durchgeführt werden können, die Folgen aber potenziell weltweite Auswirkungen haben. Gleichzeitig gibt es, wie in Kapitel 3.2.3 aufgeführt, keine hinreichenden internationalen Vereinbarungen, um die Umwelteingriffe durch kommerzielle Raumfahrtaktivitäten zu messen und zu begrenzen. Expert\*innen kritisieren, dass die meisten international ratifizierten Abkommen zur Regulierung von Raumfahrtaktivitäten, die in den 1960er und 1970er Jahren unterzeichnet wurden, der heutigen Raumfahrtindustrie mit ihren zahlreichen privatwirtschaftlichen Akteuren nicht mehr gerecht werden (Rauenzahn et al. 2020).

Es braucht verbindliche Rahmenbedingungen, die innovationsfreundlich sind, gleichzeitig aber mit dem

Vorsorgeprinzip und Umwelt- und Klimazielen übereinstimmen. Im Moment sind viele der Initiativen freiwillig und basieren auf dem Ansatz, dass durch eine verstärkte Kooperation zwischen den verschiedenen privatwirtschaftlichen, wissenschaftlichen und nationalen Akteuren Potenziale für den Umweltschutz geschaffen werden. So haben sich verschiedene Unternehmen im Rahmen der „Space Safety Coalition“ und des „Consortium For Execution Of Rendezvous And Servicing Operations“ (CONFERS) zusammenschlossen und eine Reihe von bewährten Praktiken zur Verbesserung der Sicherheit im Weltraum zusammengetragen. Mittlerweile gibt es 57 Befürworter\*innen, hauptsächlich Betreiber von Raumfahrzeugen und Satelliten. Ein, wenn nicht das zentrale Thema, ist dabei der Weltraumschrott, denn dieser stellt für die Aktivitäten der Unternehmen selbst eine Gefahr dar. Durch eine verbesserte Konstruktionsweise und angepasste Betriebskonzepte sollen Kollisionen mit Weltraumschrott vermieden werden (Space Safety Coalition (SSC) 2019). Die Vermeidung von Weltraumschrott muss auch aus Umweltsicht ein Kernziel zukünftiger Weltraumaktivitäten sein (s. Kapitel 6.4), allerdings sind diese Maßnahmen freiwillig und lassen den Betreibern viel Spielraum in der Umsetzung.



© SpaceX/unsplash

Ein Konsortium von privatwirtschaftlichen und wissenschaftlichen Akteuren hat zudem zur Bekämpfung von Weltraumschrott die Entwicklung eines freiwilligen Labels vorangetrieben, das „Space Sustainability Rating“, welches im Juni 2022 veröffentlicht wurde. Das Label soll Akteure dazu motivieren, bei Planung und Umsetzung ihrer Raumfahrtmissionen nachhaltiger zu agieren. Es bewertet Raumfahrtbetreiber anhand verschiedener Faktoren: unter anderem, inwiefern ihre Satelliten leicht identifizierbar und auffindbar sind, ob sie Maßnahmen zur Vermeidung von Kollisionen getroffen haben und ob sie Pläne für die Entfernung ihrer Satelliten aus der Umlaufbahn entwickelt haben (World Economic Forum 2023).

Auf nationaler Ebene gibt es Vorschriften zur Regulierung und Prüfung von Umweltauswirkungen, die den Zugang zum Weltraum begrenzen können. Ein aktuelles Beispiel ist ein Genehmigungsverfahren, das SpaceX kürzlich für seine Starbase-Anlage durchlaufen musste. Um den neu geplanten Betrieb des Starship/Super Heavy-Programms auf dem Startplatz Boca Chica in Texas durchführen zu können, musste SpaceX eine Genehmigung vom US-amerikanischen Federal Aviation Agency (FAA) Office of Commercial Space Transportation einholen (Federal Aviation Administration (FAA) 2022). Geplant sind ungefähr zehn Raketenstarts und -landungen pro Jahr, Tanktests, statische Feuertriebwerkstests, der Ausbau des Startbereichs und der Solarfarm sowie der Bau zusätzlicher startbezogener Infrastruktur. Die Erteilung solcher Lizenzen erfordert im Sinne des National Environmental Policy Act (NEPA) eine Umweltprüfung. Dafür musste SpaceX die Umweltauswirkungen des Betriebs darlegen, unter anderem bzgl. Treibhausgasemissionen, Lärmbelastung, Luftqualität sowie Wasserqualität im Oberflächengewässer und Grundwasser, und die Effekte auf die biologische Vielfalt in der Region. Falls SpaceX Änderungen an den beschriebenen Aktivitäten vorschlägt, die über den Rahmen des geplanten Betriebs hinausgehen, muss eine zusätzliche Umweltanalyse durchgeführt werden. SpaceX musste mehr als 75 Änderungen an seinem Vorschlag für die Anlage vornehmen, um eine zusätzliche Überprüfung zu vermeiden und schließlich eine Lizenz von der FAA zu erhalten, um seine neue Starship-Rakete von diesem Standort aus in die Umlaufbahn zu bringen. Nachdem die ursprüngliche Genehmigung im Juni 2022 erteilt wurde (Hanson 2022), fiel auch eine schriftliche Neu-Evaluierung auf Grundlage

neuer Informationen im April 2023 zugunsten von SpaceX aus (Federal Aviation Administration (FAA) 2023). Auch der europäische Weltraumbahnhof in Französisch-Guyana unterliegt Regulierungen bzgl. seiner Umweltwirkungen. Das Betreiberunternehmen Arianespace erlangte 2015 die ISO-Zertifizierungen 14001 für das Umweltmanagementsystem und 50001 für das Energiemanagementsystem des Weltraumbahnhofs (Arianespace 2015).

Die ESA ist keine Regulierungsbehörde und genehmigt oder überwacht daher nicht die nationalen Raumfahrtaktivitäten ihrer Mitgliedstaaten. Sie beaufsichtigt jedoch ihre eigenen Raumfahrtmissionen. Jeder Staat ist selbst verantwortlich für alle Weltraumaktivitäten, die von seinen staatlichen, privaten oder kommerziellen Akteuren durchgeführt werden (s. Regelungen des Weltraumvertrags, Kapitel 3.2.3). In Deutschland ist das DLR auf Grundlage des Raumfahrtaufgabenübertragungsgesetzes mit der Raumfahrtplanung, der Durchführung der deutschen Raumfahrtprogramme und der Wahrnehmung von deutschen Raumfahrtinteressen gegenüber internationalen Partnern, insbesondere der ESA, betraut (Bundesministerium der Justiz (BMJ) 1998). Die ESA ist die einzige Agentur weltweit, die einen Rahmen für die Durchführung von Lebenszyklusanalysen (LCA) von Raumfahrtmissionen entwickelt hat, um die Umweltauswirkungen zu bewerten und mithilfe entsprechender Handlungsempfehlungen möglicherweise zu verringern. Die Guidelines unterscheiden eine Raumfahrtmission in fünf Phasen: Design, Herstellung, Start, Nutzung und Entsorgung. Im Rahmen der Lebenszyklusanalysen werden Bodeninfrastruktur, Trägerraketen und Nutzlasten/Raumfahrzeuge in allen fünf Phasen untersucht (Morales Serrano et al. 2022). In mehreren ESA-Verträgen sind daher Ökobilanz-Anforderungen enthalten, wie z. B. für die Ariane 6, die Copernicus-Erweiterungsmissionen und die zweite Generation von Galileo. Auch erfüllen alle laufenden ESA-Projekte die technischen Anforderungen der ESA für die Minderung von Weltraumschrott (Committee on the Peaceful Uses of Outer Space (COPUOS) 2022).

### Technische Innovationen durch privatwirtschaftliche Akteure

Die technischen Innovationen in der Raumfahrt werden mit der wachsenden Zahl an Akteuren, die durch die Privatisierung der Raumfahrtaktivitäten den Markt betreten, zunehmend vorangetrieben. Denn

der Wettbewerb mit anderen Firmen ist ein Anreiz dafür, dass insbesondere Antriebssysteme, aber auch weitere technologische Systeme, kontinuierlich effizienter werden. Blue Origin und SpaceX verwenden beispielsweise Raketenantriebssysteme, in denen eine Mischung aus Methan und flüssigem Sauerstoff verwendet wird (Erwin 2020). Der neue Treibstoff bietet Vorteile für die Raumfahrtbetreiber hinsichtlich der Wiederverwendbarkeit der Raketenstufen, der Lagerung des Treibstoffs sowie der Kosten für die Treibstoffproduktion. Aus der Umweltperspektive sind diese Treibstoffe vorteilhaft, da sie im Vergleich zu Feststofftriebwerken weniger ozonschädigende Substanzen freisetzen (siehe Kapitel 4.2.3). Auch Microlauncher haben im Vergleich zu konventionellen Systemen ein höheres Potenzial, klimafreundlicher zu werden. Die wachsende Nachfrage an kleinen Trägersystemen führt dazu, dass eine hohe Anzahl an innovativen und umweltfreundlicheren Raketen systemen entwickelt wird. So setzen Microlauncher, beispielsweise das Trägersystem Spektrum von Isar Aerospace, auf alternative Antriebssysteme basierend auf flüssigem Sauerstoff und Propan (Isar Aerospace o.J.). Weitere Vorteile ergeben sich aus der Miniaturisierung und dem Leichtbauverfahren. Dadurch, dass die Komponenten kleiner sind, werden weniger Ressourcen für die Herstellung benötigt. Und die kleinere Größe sowie das geringere Gewicht gehen mit weniger Treibstoffbedarf und verringertem Kollisionsrisiko und daraus entstehenden Trümmerteilen im Orbit einher (Vercalsteren und Holsters 2017; Maury et al. 2020).

Weitere Innovationen der letzten Jahre sind wiederverwendbare Startsysteme (Kind et al. 2020). Die eingesetzten wiederverwendbaren Raketenkomponenten sind materialeffizienter als herkömmliche Raketen teile. Außerdem sind wiederverwendbare Raketen energieeffizienter, da sie über ihren Lebenszyklus hinweg weniger primäre Energieträger und Rohstoffe benötigen. Verwendet man Raketenstufen nicht wieder, verliert man wertvolle Ressourcen – bei der Ariane-5-Rakete sind dies beispielsweise 76 Tonnen Stahl (Durrieu und Nelson 2013). Aus Umwelt- und Nachhaltigkeitssicht ist eine Wiederverwendung also in jedem Fall sinnvoll, allerdings ist auch die Wiederaufbereitung und -verwendung von Trägersystemen sehr arbeits- und somit kostenintensiv. Nur wenn eine ausreichend hohe Startzahl erreicht ist, amortisieren sich die Startkosten von wiederverwendbaren

Raketen. Sollte dieser Punkt erreicht werden, besteht durch die möglichen Kosteneinsparungen wiederum die Gefahr eines Rebound-Effekts, der durch sinkende Preise für den Transport von Nutzlasten eine Zunahme der in den Weltraum verbrachten Nutzlasten bedeuten könnte.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass Innovationen durch privatwirtschaftliche Akteure das Potenzial haben, zu wachsender Effizienz, sinkenden Kosten und positiven Umwelteffekten beizutragen. Obgleich dies wünschenswerte Entwicklungen wären, darf nicht außer Acht bleiben, dass dies auch zu einer starken Zunahme von Raumfahrtprojekten führen könnte, deren negative Umweltwirkungen letztlich die positiven Aspekte übersteigen könnten (der sogenannte Rebound-Effekt).

## 5.2 Satellitennavigation und -kommunikation

Die Raumfahrt ist heute elementarer Bestandteil einer Vielzahl technischer, gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Anwendungen. Besonders deutlich wird dies im Bereich der Navigation und Kommunikation auf der Erde, welche auf eine (wachsende) Anzahl von Satelliten angewiesen sind (siehe Kapitel 5.1). Beispiele hierfür sind das Satellitenfernsehen, der satellitengestützte Mobilfunk und die satellitengestützte Ortung. Aktuelle Entwicklungen zeigen, dass die Zahl der Satelliten, insbesondere von Kommunikationssatelliten, die im erdnahen Orbit platziert sind, deutlich wächst, während die Größe und das Gewicht der Satelliten gleichzeitig tendenziell sinkt (siehe Kapitel 5.3.2).

### 5.2.1 Hintergrund und Entwicklung

Navigationssatelliten zur Positionsbestimmung von Land-, Wasser- und Luftfahrtbewegungen operieren heutzutage auf mittleren Erdumlaufbahnen in ca. 20.000 km Höhe (siehe Kapitel 4.1.4). Die Messsysteme von Navigationssatelliten werden global für die Ausmessung der Erdoberfläche (Geodäsie), für Navigation und Zeitmessung genutzt, wie auch beispielsweise für die Synchronisation von Computernetzwerken und Mobiltelefonnetzen. Fast jedes moderne Fahrzeug, jedes Smartphone, jedes Verkehrs- und Logistikmanagement sowie jedes autonome System

ist auf funktionierende Satellitentechnik angewiesen – insbesondere dann, wenn es ortsunabhängig funktionieren soll (Stichwort: autonomes Fahren). Die Bedeutung ist nicht zu unterschätzen: So geht die Europäische Kommission davon aus, dass rund 10 % des europäischen Bruttoinlandsprodukts auf die Verfügbarkeit von Satellitennavigation angewiesen sind (Europäische Kommission 2022). Zu den vielfältigen Anwendungen zählen Navigation im Transport- und Verkehrssektor (an Land, in der Luft und auf dem Wasser) sowie z. B. die Synchronisierung von Energienetzen (European Commission 2014).

Zu den wichtigsten global ausgerichteten und hochpräzisen Navigationssatellitensystemen gehören das aus 24 Satelliten bestehende GPS (USA), das 21 Satelliten umfassende russische GLONASS-System (Langley 2017), das aus 28 Satelliten bestehende chinesische BeiDou-System (Ran 2019) und das europäische GALILEO-System, welches in seiner endgültigen Konfiguration für 30 Satelliten konzipiert ist (Sassen 2011; Maini und Agrawal 2014; Chatre und Benedicto 2019). Gegenwärtig sind bereits 22 Satelliten davon in Betrieb.

Technische Weiterentwicklungen im Bereich der Satellitennavigation und -kommunikation, etwa eine höhere regionalisierte Auflösung, die Miniaturisierung, die Serienfertigung sowie die Verwendung standardisierter Bauteile, sind Treiber für verschiedene innovative Anwendungsbereiche. Während dies bei Navigationssatelliten vor allem die Steuerung zukünftiger Mobilitätssysteme, einschließlich deren Anwendungsbereiche Transport und Logistik betreffen, sollen Kommunikationssatelliten zukünftig die weltweite Internetversorgung ermöglichen. Bisher sind Kommunikationssatelliten häufig auf geostationären Erdumlaufbahnen positioniert, wo sie eine große Rolle bei der energieeffizienten Übertragung von Funk- und Fernsehsignalen spielen. Dort eignen sie sich jedoch nur bedingt für die Übertragung von Internetsignalen. Aufgrund ihrer Entfernung zur Erde kommt es zu einer verzögerten Datenübertragung, der sogenannten Latenz, die vor allem bei modernen internetbasierten Anwendungen wie beispielsweise der Videotelefonie oder dem Streaming von audiovisuellen Inhalten als störend empfunden wird (Voelsen 2021; S. 11).

## 5.2.2 Trends und Treiber

Vor dem Hintergrund der oben geschilderten Entwicklungen ergeben sich in den nächsten Jahren für die Navigations- und Kommunikationstechnik große Potenziale, wie z. B. durch den zunehmend einfacheren Zugang zum Weltraum und der damit verbundenen steigenden Zahl an modernen Navigations- und Kommunikationssatelliten (siehe Kapitel 5.1). Dadurch lassen sich größere Datenmengen sammeln, besser nutzen (z. B. in Echtzeit) und neue datenbasierte Anwendungen etablieren (siehe Kapitel 5.2). Ein weiterer Fortschritt könnte die Etablierung einer Breitband-Internetversorgung aus dem Weltraum auf Basis von Megakonstellationen aus Kleinsatelliten sein. Zudem werden sich globale Satellitennavigationssysteme verbessern und können zukünftig mit der 5G-Technologie fusioniert werden (European Space Agency (ESA) 2021c).

### Breitband-Internetversorgung für die globale Kommunikation von morgen

Weltweit nutzen rund 63 % der Weltbevölkerung das Internet, wohingegen ca. 3 Mrd. Menschen keinen Zugang zum Internet haben (Statista GmbH 2022). Während der Ausbau der glasfaserbasierten Internetversorgung voranschreitet, haben verschiedene Unternehmen Vorhaben auf den Weg gebracht, eine Breitbandinternetversorgung mit Hilfe von Satelliten aufzubauen. In der Regel handelt es sich dabei um Megakonstellationen, also Satellitenschwärme, die aus Hunderten bis Tausenden von Kleinsatelliten bestehen (Podbregar 2021). Sie werden auf niedrigen Erdumlaufbahnen eingesetzt und ermöglichen eine flächendeckende und dauerhafte Netzabdeckung der Erde. Das Versorgungspotenzial mit schnellem Breitbandinternet bietet nicht nur wirtschaftlich wie politisch neue Möglichkeiten, sondern soll auch Privatpersonen einen besseren Zugang zu internetbasierten Produkten und Dienstleistungen ermöglichen.

Zu den aktuellen Vorhaben zählen (Voelsen 2021; S. 14ff.):

- ▶ Das Projekt Starlink des US-amerikanischen Unternehmens SpaceX, bei dem bereits 1.739 Satelliten in Betrieb sind (Stand 16.05.2022; McDowell 2022). In seiner größten geplanten Ausbaustufe könnten bis zu 42.000 Satelliten die Erde umkreisen (Gebhardt 2021). Besondere öffentliche Aufmerksamkeit erfährt Starlink seit 2022 durch den

Einsatz im Ukraine-Krieg, da es trotz der Zerstörung relevanter Infrastruktur die Aufrechterhaltung des Internets in der Ukraine ermöglicht und neben der Zivilbevölkerung auch von den ukrainischen Streitkräften genutzt wird. Im Juni 2023 schloss SpaceX einen Vertrag mit dem US-Verteidigungsministerium, um die Internetversorgung der Ukraine durch Starlink weiterhin zu finanzieren (Stone und Roulette 2023).

- ▶ Das Projekt Kuiper des US-amerikanischen Unternehmens Amazon soll ca. 3.236 Satelliten umfassen (Fuest und Hegmann 2019).
- ▶ Das britische Unternehmen OneWeb hat mit dem Aufbau einer gleichnamigen Satellitenkonstellation begonnen, die 648 Satelliten umfassen soll, wovon sich 428 bereits in der Erdumlaufbahn befinden (OneWeb 2022).
- ▶ Auch chinesische Staats- und Privatunternehmen haben entsprechende Vorhaben angekündigt, allerdings sind zu einzelnen Projekten nur wenige Informationen öffentlich zugänglich. Neben zwei staatlichen Vorhaben („Hongyun“ und „Hongyan“) gibt es auch Berichte über den chinesischen Autobauer Geely, dessen geplante Satellitenkonstellation (ca. 240 Satelliten) sowohl die Internetversorgung als auch die Positionsbestimmung für die Fahrzeuge des Unternehmens bereitstellen soll (Rixecker 2020).
- ▶ Schließlich hat auch die EU-Kommission angekündigt, ab 2023 eine eigene Satellitenkonstellation aufzubauen, bestehend aus rund 200 Satelliten im LEO (Hegmann 2020; Schmutz 2022). In das Projekt mit dem Namen Iris<sup>2</sup> (Infrastructure for Resilience, Interconnectivity and Security by Satellite) sollen bis 2027 sechs Milliarden Euro investiert werden. Dieses autonome, gegen äußere Einflüsse geschützte Satellitennetzwerk soll sichere, staatliche Internet- und Kommunikationsdienste in der EU gewährleisten (European Commission o.J. b).

Diese Bestrebungen könnten die technische Entwicklungsdynamik in der Satellitentechnik, insbesondere im Kontext der Miniaturisierung (siehe Kapitel 5.3.2), aber auch in der effizienten Bereitstellung von Trägerraketen (siehe Kapitel 4.1.2), weiter beschleunigen. Daneben führt diese Entwicklung zu einem gewissen netzpolitischen Handlungsdruck. Denn bei einer privatwirtschaftlich errichteten, globalen Internetinfrastruktur im Weltraum geht es auch um Fragen des Zugangs, der Sicherheit und der Resilienz – und nicht zuletzt um globale Machtbeziehungen. Unter diesem Gesichtspunkt sind insbesondere auch die letztgenannten Pläne der EU-Kommission einzuordnen, eine eigene Satellitenflotte aufzubauen. Eigene kontrollierte Satellitenflotten ermöglichen u. a. abhörsichere und störungsfreie Kommunikation<sup>24</sup> zwischen Regierungen, Militärs und Behörden (Stichwort: GOVSATCOM; European Union Agency for the Space Programme (EUSPA) o.J.), unabhängig von anderen Satellitennetzen oder privatwirtschaftlichen Interessen.

Die Anzahl der geplanten und bereits in der Umsetzung befindlichen Vorhaben wirft vor allem die Frage auf, inwieweit privatwirtschaftlich errichtete weltumspannende Satellitennetze regulatorisch relevant sind. Schließlich bedeutet dies für die Staaten, in denen die zuvor genannten Unternehmen ansässig sind, wachsende Kontrolle über die globale Internetinfrastruktur und somit steigende Einflussnahme. Während sich die zukünftige Entwicklung bisher nur ansatzweise abschätzen lässt, deuten sich bereits verschiedene politische Gestaltungsbereiche an (Voelsen 2021; S. 17ff.):

- ▶ Für die steigende Zahl an Satelliten müssen im Rahmen der Frequenzvergabe geeignete Verfahren gefunden werden, da die ursprüngliche Vorgehensweise für eine geringere Zahl von Satelliten ausgelegt war.
- ▶ Der Marktzugang für die Betreiber von Satellitenkonstellationen ist im Regelwerk der Welthandelsorganisation für Telekommunikationsdienstleistungen geregelt, könnte aber hinsichtlich des Betriebs von Internet-Satellitenkonstellationen

<sup>24</sup> Eine in diesem Zusammenhang genannte technologische Entwicklung sind Quantentechnologien, insbesondere Quantenkommunikation und Quantenkryptographie. Die Quantenkommunikation soll zu einer zuverlässigeren und vertrauenswürdigeren Satellitennavigation beitragen. Durch die Überlagerung von Teilchen – typischerweise Lichtphotonen für die Datenübertragung – wird eine wesentlich dichtere und zugleich sicherere Datenübertragung ermöglicht. Insbesondere im autonomen Fahren werden satellitenunterstützte Quantencomputing-Lösungen bereits erprobt (Suckau 2021).

spezifiziert werden, etwa indem den Betreibern die Prinzipien der Netzneutralität vorgeschrieben werden.

- ▶ Möglichkeiten der öffentlichen Förderung sind für Satellitenbetreiber interessant, etwa im Bereich der internationalen Entwicklungszusammenarbeit.
- ▶ Schließlich ist eine Entwicklung von Standards und Software-Protokollen erforderlich, wenn Satellitenkonstellationen, deren einzelne Satelliten immer in Bewegung sind, die Datenübertragung zwischen den Nutzern und den Satellitenkonstellationen ermöglichen sollen.

### Satellitengestützte Transport- und Logistiksteuerung

Verkehr und Logistik sind die Kernbereiche der navigations- und kommunikationssatellitengestützten Anwendungen. Schon heute wäre ohne Satellitennavigation das Logistik- und Verkehrsmanagement nicht möglich. Hierbei sind präzise Positionierungsdaten die Grundvoraussetzung für ein effizientes und nachvollziehbares Flottenmanagement, etwa für Speditionen. Ähnlich verhält es sich im Schienenverkehr, z. B. im Bereich der Zugsteuerung oder der Routenverfolgung im Güterverkehr.

Logistikunternehmen möchten zukünftig aber nicht nur ihre Waren bzw. Transporter und LKWs in Echtzeit verfolgen können, sondern darüber hinaus ihre Lieferrouten tagesaktuell ausrichten. Dies bietet sich besonders in Regionen mit dichtem Verkehr an, wie auch in Städten auf der sogenannten „letzten Meile“, also die Lieferwege zwischen regionalen Logistikzentren und Empfänger\*innen. Ziel ist es, mit Hilfe von KI-Werkzeugen zukünftige Sendungsverteilungen – also wann wie viele Pakete wo ankommen – zu prognostizieren, um die Routenplanung optimal darauf auslegen zu können. Hierfür werden unter anderem Daten über Sendungs- und Zustellinformationen sowie Verkehrsaufkommen, und Ortungsdaten und Wetterdaten ausgewertet.

Autonome Logistikkonzepte, in der Lagerhalle wie auch auf der Straße, sind ein weiteres Zukunftsfeld, das aktuell erschlossen wird. Für autonomes Fahren sind hochpräzise, zuverlässige Navigationsdaten erforderlich (Belabbas 2020). Hierbei bestimmt das

Wissen über die genaue Position von Fahrzeugen oder Drohnen, zum Beispiel auf welcher Seite der Fahrbahn und wie weit entfernt zum Fahrbahnrand sich ein Fahrzeug befindet, die Sicherheit und Einsatzfähigkeit autonomer Systeme. Erste Autobauer, z. B. Geely, haben bereits damit begonnen, eine Satellitenkonstellation aufzubauen, welche zukünftig für die autonome Steuerung von Logistik- und Autofloten genutzt werden soll (Sokolov 2022).

Aber nicht nur auf der Straße, sondern auch in der Intralogistik, also in Logistikzentren, sind Navigations- und Kommunikationssatelliten zunehmend wichtig. Eine hochgenaue Positionierung ist für die Robotik-Navigation notwendig, damit Logistikroboter autonom in der Halle ihren Weg finden.

### Satelliten-Backhaul für autonome Fabriken

Die Kombination von terrestrischem und satellitenbasiertem Internet eröffnet viele neue Potenziale, zum Beispiel in städtischen Räumen oder für smarte Fabriken. Zur Anbindung von Gebieten mit schlechter Mobilfunkabdeckung können bereits heute Kommunikationssatelliten genutzt werden, die Mobilfunkstationen miteinander vernetzen und an das Gesamtnetz



© Scott Evans/unsplash

anbinden. Hierfür wird das Kernnetz des Anbieters mit den Funkmasten via Satellit verbunden, anstelle des bislang gebräuchlichen Glasfaserkabels (Satelliten-Backhaul; Sawall 2021). Dies ist ein wesentlicher Treiber für das Ausrollen eines weltweit verfügbaren 5G-Netzes und technische Voraussetzung für autonome Fabriken. Zukünftig soll die Basisstation als Kommunikationsmediator entfallen, um das System noch resilienter zu machen. Hierfür werden Technologien entwickelt, die eine direkte Kommunikation zwischen Satelliten und 5G-fähigen Endgeräten ermöglichen (Heyn und Hofmann o.J.). So soll der Satellit selbst als Basisstation agieren können. Je nach Verfügbarkeit könnten zukünftig Maschinen in einer autonomen Fabrik über eine klassische Basisstation oder direkt über den Satelliten Daten und Informationen austauschen.

Die Verschmelzung des terrestrischen Mobilfunkstandards 5G mit satellitenbasierten Netzen wird jedoch nicht nur als Wegbereiter für zukünftige autonome Fabriken gesehen. Auch strukturschwache Regionen, in denen ein terrestrischer Ausbau des Mobilfunknetzes bislang aus Kostengründen stockt, könnten von dieser Entwicklung profitieren. In stark verdichteten, städtischen Räumen wird die Fusion von Satellitennetzwerken und 5G ebenfalls als erstrebenswert gesehen. Denn aufgrund dichter (und hoher) Bebauung besteht teils nur eine begrenzte Satellitenverfügbarkeit und eine ungünstige Satellitengeometrie. Großes Potenzial wird zudem in der spezifischen Bereitstellung für Unternehmensnetzwerke in der Produktion oder Landwirtschaft gesehen, wenn diese eine hohe 5G-Positionierungsgenauigkeit benötigen. So könnten zukünftig aus dem Weltraum gesteuerte lokale bzw. sogenannte Campus-Netzwerke für 5G auf Unternehmensgeländen für die Maschinen- und Fahrzeugsteuerung entstehen (Del Peral-Rosado et al. 2018).

Die Digitalisierung der Wirtschaft schreitet seit einigen Jahren immer schneller voran, sodass autonome Produktionsstätten in immer greifbarere Nähe rücken. Die technische Grundlage hierfür sind intelligente, digital vernetzte IoT-Systeme („Internet of things“), mit deren Hilfe eine weitestgehend selbstorganisierte Produktion umgesetzt werden kann. Damit die autonome Steuerung der zukünftigen Fabriken problemlos verlaufen kann, müssen Daten und Informationen zwischen einer Vielzahl von „Akteuren“ vernetzt, ausgetauscht und prozessiert werden; hierzu gehören

fahrerlose Transportsysteme, lernende Maschinen, Sensoren, Kameras, Drohnen sowie IT-Systeme.

In solchen autonomen Fabriken sammeln Maschinen rund um die Uhr Produktionsdaten und tauschen ebendiese vorprozessiert untereinander aus oder senden die Daten zur Auswertung über das Internet an eine Leitstelle. Mit Hilfe von KI-Werkzeugen können Probleme in der Produktion bzw. nötige Anpassungen prognostiziert werden. Auf dieser Basis wird in autonomen Produktionssystemen die Fertigung selbstständig geplant und gesteuert. Anders als bei der automatisierten Produktion, die auf einer „Wenn-Dann-Logik“ basiert, können autonome Fabriken auch auf schwer vorhersehbare, komplexe Ereignisse reagieren (Messe München GmbH 2022). Wesentliche Voraussetzung für die Koordination der Maschinen und Prozesse in der autonomen Fabrik ist eine Maschinenkommunikation in Echtzeit.

Um eine Echtzeitkommunikation der Maschinen mit minimalen Latenzzeiten zu ermöglichen, ist – ähnlich wie bei der autonomen Mobilitäts- und Logistiksteuerung – eine flächendeckende Verfügbarkeit des Mobilfunkstandards 5G Voraussetzung, da er die Übertragung hoher Datenraten bis zu 20 Gbits/s ermöglicht. Da 5G voraussichtlich, wie bereits sein Vorgänger LTE (Long Term Evolution), nicht überall auf der Erde in gleicher Qualität verfügbar sein wird (Stichwort: Abdeckung), ist das Zusammenwachsen des terrestrischen Mobilfunkstandards mit satellitenbasierten Netzen notwendig, um „Funklöcher“ zu kompensieren. So wurde die Integration von Satelliten in den Mobilfunkstandard 5G bereits bei seiner Entwicklung berücksichtigt. Solche „Non-Terrestrial Networks (NTN)“ haben keine Einschränkungen in ihrer Reichweite und Abdeckung.

### 5.2.3 **Umweltpotenziale und -risiken**

Die Bedeutung von Satelliten und die damit zusammenhängenden technischen Fortschritte der Digitalisierung, z. B. für das Internet der Dinge (IoT) oder das autonome Fahren, sind bereits heute allgegenwärtig und haben Implikationen für den Umwelt- und Klimaschutz, die angesichts der zuvor skizzierten Trends weiter an Relevanz gewinnen werden.

Durch den Einsatz digitaler Technologien (wie zum Beispiel das unter 5.3.1 beschriebene Satellitensystem GALILEO sowie u. a. Robotersysteme und autonome

Navigation) können sich eine Reihe an Potenzialen zur Steigerung der Ressourceneffizienz und Schonung der Umwelt entfalten (Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (DLG e.V.) 2018).

Neben den genannten Potenzialen, z. B. für das Internet der Dinge (IoT), für autonomes Fahren und autonome Fabriken, ergeben sich aber gleichzeitig auch Risiken. Die beschriebenen Technologien erfordern neue Hardware und den Aufbau der notwendigen Infrastruktur auf der Erde; beides geht in Herstellung und Betrieb mit Ressourcenverbrauch und Emissionen einher. Dies erstreckt sich auch auf die Satelliten selbst, deren steigende Anzahl mittelfristig zu mehr Weltraumschrott führt und den begrenzten Erdoorbit beansprucht (s. Kapitel 4.1.4 und 4.2.4). Zudem setzt die Nutzung der gewonnenen Daten (siehe Kapitel 5.1 und siehe Kapitel 5.2.1) auf der Erde eine IT-Infrastruktur für Speicherung und Verarbeitung voraus, die ebenfalls hinsichtlich ihrer Energie- und Ressourceneffizienz berücksichtigt werden muss. Nicht zuletzt ist auch das Risiko von Rebound-Effekten bei den durch Satellitenkommunikation und -navigation möglichen, grundsätzlich umweltfreundlichen Veränderungen zu berücksichtigen.

#### Effizienzgewinne und Reboundeffekte durch intelligente Steuerung des autonomen Fahrens

Durch autonomen Personen- und Güterverkehr (Automatisierung von Fahrzeugen und Schiffen) kann der Verbrauch von Treibstoff im Transportsektor re-

duziert und die Effizienz gesteigert werden. Die Automatisierung von Privattransportmitteln und von LKW-Gütertransport sowie ein verbessertes Verkehrsmanagement (wie Stauerkennung, Navigationsdienste) könnten den Straßenverkehr nicht nur effizienter (weniger Staus), sondern auch sicherer machen (weniger Unfälle durch Ausschluss menschlicher Fehler am Steuer). Zusätzlich lassen sich zum Beispiel Personalkosten und ggf. Betriebskosten (durch geringere Aufwendungen für Unfallsversicherungspolice) einsparen (Enzweiler et al. 2018). Die effizientere Fahrweise vollständig autonomer und vernetzter Fahrzeuge im Personen- und Güterverkehr zeigt sich in der Reduzierung der Brems- und Beschleunigungsvorgänge (Krail et al. 2019). Somit sind Einsparungen beim Kraftstoff und folglich ein verringerter CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu erwarten (Enzweiler et al. 2018). So kann mit positiven Folgen für die Umwelt gerechnet werden. Gleichzeitig gehen Expert\*innen davon aus, dass ein besseres satellitengesteuertes Verkehrsmanagement eine intensivere Nutzung der Verkehrswege zur Folge haben wird (Krail et al. 2019). Folglich ist autonomes Fahren eher ein Treiber für erhöhtes Verkehrsaufkommen. Die positiven Effekte, die durch die Automatisierung erzielt werden, werden somit möglicherweise wieder verringert (Enzweiler et al. 2018).

Unternehmen wie Privatpersonen können längere Fahrstrecken in autonomen Fahrzeugen mit geringerem Zeitaufwand bewältigen, da auf Menschen (und deren drohende Müdigkeit) am Steuer verzichtet



werden kann (Milakis et al. 2017). Durch die Entlastung der fahrenden Person und den ggf. höheren Nutzungskomfort steht das autonome Fahren in Konkurrenz zum öffentlichen Personen-Nahverkehr. Vermehrte Leerfahrten könnten die Folge sein (Taiebat et al. 2018). Auch hier ist das autonome Fahren eher als Treiber für ein höheres Verkehrsaufkommen zu sehen.

Der Wandel hin zum automatisierten und vernetzten Fahren im Personen- und Güterverkehr ist aus Umweltsicht nicht eindeutig positiv zu bewerten (Milakis et al. 2017). Sowohl beim autonomen Personen- als auch beim Güterverkehr gehen einige Expert\*innen davon aus, dass sich die Nutzung autonomer Fahrzeuge eher erhöhen könnte (Köllner 2019; Gensch et al. 2019). Dieser Rebound-Effekt könnte die positive Wirkung der Einspareffekte im privaten wie unternehmerischen Bereich gar konterkarieren (Krail et al. 2019). Der Betrieb autonomer Fahrzeuge erfordert erhebliche Rechenkapazitäten, und der Betrieb der benötigten Rechenzentren verursacht wiederum CO<sub>2</sub>-Emissionen: Einer Studie des Massachusetts Institute of Technology (MIT) zufolge würden im Jahr 2050 0,14 Gigatonnen CO<sub>2</sub> bereits auf den reinen Betrieb autonomer Fahrzeuge entfallen<sup>25</sup> – ohne Berücksichtigung weiterer Emissionsquellen, wie dem Betrieb der Sensoren im Fahrzeug oder der Fahrzeugproduktion (Sudhakar et al. 2023). Dies entspräche den gegenwärtigen jährlichen Emissionen eines Staates wie Argentinien (Brien 2023).

### Mehr Ressourcenschonung durch Smart Farming

Die Automatisierung landwirtschaftlicher Prozesse auf Grundlage von Satellitendaten birgt eine Reihe von Chancen für den Umweltschutz. Gleichzeitig sind die Herstellung und der Betrieb von Smart Farming-Infrastrukturen mit einem hohen Ressourcenaufwand verbunden. Hier gilt es, die positiven Umwelteffekte von Smart Farming auf Boden, Wasser, Luft und Biodiversität gegen die negativen Auswirkungen abzuwägen.

Präzisionslandwirtschaft (Precision Agriculture, PA), eine umwelt- und ressourcenschonende Landwirtschaft, wird durch den Einsatz neuester Technologien ermöglicht, z. B. für Objektidentifikation, Georeferenzierung, Messung spezifischer Parameter sowie für globale Satellitennavigationssysteme (GNSS),

Konnektivität, Datenspeicherung und -analyse, Beratungssysteme, Robotersysteme und autonome Navigation. Ziel der PA ist es, die Produktionskosten zu senken und die Nahrungsmittelproduktion zu verbessern und zu steigern. Dadurch soll es möglich werden, mit weniger Ressourceneinsatz mehr Output zu erzeugen. PA wird bereits im Ackerbau, im Gemüsebau und in der Milchproduktion eingesetzt und wird derzeit von etwa 25 % der landwirtschaftlichen Betriebe genutzt. Allerdings haben die smarten Technologien ihr volles Potenzial noch nicht ausgeschöpft, da weitere Innovationen und Anwendungsbereiche in der Landwirtschaft zu erwarten sind (Schrijver 2016).

Weitere Anwendungsbeispiele sind z. B. sensorbasierte Überwachungssysteme, Warnsysteme zum Zustand der Ernte, Ernteprognosen, Fütterungsroboter und Präzisionsmelkmaschinen (Schrijver 2016). Ebenso vielfältig wie die Anwendungsmöglichkeiten sind die ökologischen Vorteile. So lässt sich durch automatische Maschinensteuerung über GPS der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck reduzieren. Dadurch können 10 % Kraftstoff bei der Feldarbeit eingespart werden. Zudem kann die Bodenverdichtung minimiert werden, weil weniger Schwermaschinen zum Einsatz kommen. Stattdessen können leichtere Schwarmroboter eingesetzt werden, die bedarfsorientiert arbeiten (Schrijver 2016). Mit automatischer Maschinensteuerung ist zudem ein zeitgenaues Arbeiten bei günstigen Witterungen möglich. Außerdem ermöglicht PA durch automatische Spurführung und Konturanbau entlang von Höhenlinien bzw. auf unebenem Gelände einen Dauerpflanzenbewuchs an Schlüsselstellen und Feldrändern. Dadurch geht die Erosion zurück, das Hochwasserrisiko wird minimiert und weniger Oberflächengewässer und Düngemittel fließen ab (Schrijver 2016).

Dank des Internets der Dinge können physische Objekte mit der digitalen Welt und anderen smarten Geräten vernetzt werden und so unterschiedliche Steuerungsaufgaben übernehmen. Im Bereich der Landwirtschaft bieten IoT-Anwendungen eine Vielfalt an Möglichkeiten; Viehzucht wie Ackerbau können effizienter gestaltet werden. Digitale Sensoren können beispielsweise anzeigen, wie weit eine Pflanze gediehen ist und so den Stickstoffbedarf ermitteln. Anhand dieser Messungen kann dann die nötige Düngermenge bestimmt werden. So kommen weniger

<sup>25</sup> Modellannahmen der Studie: 2050 fahren 95 % aller Fahrzeuge autonom und werden im Schnitt eine Stunde täglich genutzt.

Rohstoffe zum Einsatz, und Dünger und Pflanzenschutzmittel können gezielter eingesetzt werden (Dupree 2015). Gleichzeitig muss bedacht werden, dass die für PA notwendige Technik (Sensoren, smarte Geräte und Maschinen) im Vergleich zur konventionellen Landwirtschaft einen Mehraufwand an Ressourcen für Herstellung und Betrieb bedeuten, der bei der Umweltbilanz ebenfalls berücksichtigt werden muss.

#### Ressourceneffizienz in Smart Cities

Ein weiterer Einsatzbereich von Kommunikations- und Navigationssatelliten sind Städte. Das Konzept der Smart Cities funktioniert auf Basis des IoT. Ziel ist ein intelligentes, miteinander verbundenes städtisches Netzwerk. Durch die Nutzung von Kommunikations- und Navigationssatellitendaten können Bereiche der Infrastruktur, Energie-, Wasser- und Wärmeversorgung, Müllentsorgung, Verkehrssteuerung, Infrastrukturen für Informations- und Kommunikationstechnologien und weitere städtische Bereiche smart werden. So kann beispielsweise für effizientere Strom- und Wärmeerzeugung in der Stadt gesorgt oder der Verkehr überwacht werden (Nutzer\*innen könnten in diesem Fall über eine App informiert werden), um einen reibungsloseren Fluss zu ermöglichen (Dupree 2015).

Daraus können sich Potenziale für den urbanen Umweltschutz ergeben. Der Energieverbrauch von Städten kann durch die Optimierung bestehender Infrastruktursysteme mit Hilfe von digital-vernetzten Lösungen verringert werden (Preuß et al. 2020). So werden etwa Echtzeitdaten verfügbar und können für die Sensibilisierung von Bürger\*innen für Energieeinsparungen genutzt werden. Eine Reduktion der städtischen Schadstoffbelastung ist ebenso möglich und kann durch die Förderung alternativer Mobilitätsformen wie Elektromobilität erreicht werden. Das Risiko von Rebound-Effekten besteht allerdings auch bei smarten Lösungen. So kann die Effizienzsteigerung zu einer vermehrten Nachfrage bzw. Nutzung führen. Die Umweltentlastungen durch das Smart-City-Konzept können sich dann voll entfalten, wenn Risiken berücksichtigt und günstige Rahmenbedingungen geschaffen werden, indem etwa ressourceneffiziente Technologien weiter erforscht und nachhaltige Beschaffung seitens der Kommunen gestärkt wird. Zudem müssen auf kommunaler Ebene standardisierte Prozesse für Evaluation und Monitoring der Smart-City-Maßnahmen etabliert werden (Preuß et al. 2020).

## 5.3 Erdbeobachtung

Die Beobachtung der Erdoberfläche und ihrer Atmosphäre aus wenigen hundert bis mehreren tausend Kilometern Höhe wird als Erdbeobachtung bezeichnet. Die technische Basis hierfür bilden sogenannte Erdbeobachtungssatelliten (siehe Kapitel 4.1.4). Diese werden mit Hilfe von Trägerraketen ins All gebracht, wo sie Daten sammeln und zu Kontrollzentren auf der Erde zurücksenden. In der Regel werden diese Daten erst auf der Erde ausgewertet und beispielsweise in Klimamodelle eingespeist. Es gibt jedoch auch erste Ansätze, Daten teilweise „onboard“, also noch im Weltraum, auszuwerten, um in manchen Fällen unbrauchbare Daten auszusortieren (European Space Agency (ESA) o.J. 1).



© Daniel Olah/unsplash

### 5.3.1 Hintergrund und Entwicklung

Die ersten Erdbeobachtungssatelliten haben ihren Dienst in den 1960er-Jahren aufgenommen und wurden zur Beobachtung meteorologischer Vorgänge und zur Wettervorhersage genutzt. Seitdem haben sich die Technologie für die Erdbeobachtung sowie die Anwendungsmöglichkeiten stark weiterentwickelt und diversifiziert. Heute werden Erdbeobachtungssatelliten für die Messung verschiedenster Parameter und Eigenschaften eingesetzt. So können anhand der Messdaten bestimmte chemische Stoffe, wie die Wasser- und Luftzusammensetzung gemessen werden, der Zustand von Feldfrüchten oder Wäldern abgeleitet, aber auch Bodenbewegungen im Millimeterbereich aufgezeichnet und die Oberflächentemperatur der Meere bestimmt werden (s. u.).

Grundsätzlich lassen sich zwei Arten von Erdbeobachtungssatelliten unterscheiden: solche, die geostationär in einer Höhe von rund 36.000 km über dem Äquator „stehen“, und solche, die in geringerer Distanz (zwischen 430 und 930 km Höhe) die Erde in ca. 90 bis 110 Minuten einmal umrunden. Während geostationäre Satelliten, die auf äquatorialen Positionen verteilt sind, permanent ca. 90 % der Erdoberfläche abdecken (nicht erfasst werden die Pole), benötigen die erdumlaufenden Satelliten für ein „Gesamtbild“ mehrere Umrundungen. Ihre Daten werden hingegen in einer höheren geometrischen Auflösung aufgezeichnet.

Für die Erdbeobachtung sind Satelliten mit verschiedenen Aufnahmesystemen ausgestattet, vor allem werden optische Sensoren und Mikrowellensensoren eingesetzt. Hierbei unterscheidet man aktive und passive Systeme (Maini und Agrawal 2014; 524ff.).

Passive Systeme, wie etwa Thermalkameras oder Spektrometer, empfangen Strahlung und zeichnen sie auf, beispielsweise die Eigenstrahlung der Erdoberfläche oder weiterer Objekte sowie die von Erdoberfläche oder Objekten reflektierte Sonnenstrahlung. Passive Sensoren decken dabei nicht nur den für Menschen sichtbaren Frequenzbereich ab, sondern das gesamte elektromagnetische Spektrum. Sie können daher bspw. Daten im Infrarotbereich sammeln, mit denen etwa gesunde Vegetation auf Satellitenbildern identifiziert werden kann (GISGeography 2015). Auch das Vorhandensein einzelner Spurengase in der Atmosphäre kann auf diesem Weg festgestellt werden, indem der individuelle „spektrale Fingerabdruck“ der Gase gemessen

wird, welcher einen spezifischen Teil des reflektierten Lichtspektrums blockiert.

Im Gegensatz dazu senden aktive Sensoren selbst Strahlen wie Mikrowellen, Laserstrahlen oder Radarwellen im elektromagnetischen Bereich aus und messen den reflektierten Strahlungsanteil und/oder, über den zeitlichen Abstand zwischen Aussendung und Empfang der Strahlung, die Distanz der reflektierenden Oberfläche vom Sensor. Dies ermöglicht die Erstellung präziser Höhenkarten der Erdoberfläche, z. B. im Rahmen der „Shuttle Radar Topography Mission“ der NASA, die im Jahr 2000 das erste fast vollständige Höhenmodell der Erdoberfläche aufzeichnete (NASA Jet Propulsion Laboratory 2023). Im Gegensatz zu passiven Systemen sind aktive Sensoren nicht auf Sonnenstrahlung angewiesen, d. h. sie können auch nachts eingesetzt werden. Je nach angewandter Sensortechnologie können aktive Sensoren zudem auch bei Wolken und schlechtem Wetter angewandt werden. Im Vergleich zu passiven Sensoren ist der Betrieb aktiver Sensoren allerdings energieaufwändiger (GISGeography 2015).

Erdbeobachtungssatelliten können Daten von mehreren Gigabyte pro Sekunde aufzeichnen. Zum Vergleich: Das Streamen eines Filmes in HD-Qualität verbraucht ca. 3 Gigabyte pro Stunde. Die Erdbeobachtungsdaten werden noch an Bord komprimiert und zwischengespeichert, bevor sie mit einer Datenrate von aktuell max. 320 Mbit/s zu Nutzlast-Bodensegmenten auf der Erde gesandt werden. Diese Nutzlast-Bodensegmente sind missionsspezifisch gestaltet. Insbesondere hinsichtlich der technischen Struktur bestehen Gemeinsamkeiten zu anderen Nutzlast-Bodensegmenten, etwa jenen zum Betrieb von Navigationssatelliten. Der zentrale Unterschied ist jedoch, dass Nutzlast-Bodensegmente für Erdbeobachtungssatelliten geeignet sein müssen, um große Datenmengen, also sowohl Datenraten als auch Datenvolumen, zu verarbeiten (Dech et al. 2011; S. 515). In diesen spezifischen Nutzlast-Bodensegmenten werden (1) die Daten zu höherwertigen Verarbeitungsstufen prozessiert, (2) die (Roh-)Daten archiviert und katalogisiert, (3) der Zugang zu bestehenden Daten bzw. weiterprozessierten Erdbeobachtungsprodukten für Nutzer\*innen ermöglicht und (4) das Auftragsmanagement für neu aufzunehmende Daten organisiert. Relay-Satelliten (s. Kapitel 4.1.4) erlauben den Austausch höherer Datenraten, die eine Übermitt-

lung von Daten aus dem All fast in Echtzeit möglich macht (European Space Agency (ESA) o.J. f).

Ein entscheidender Faktor für die Durchführung von Erdbeobachtungsmissionen sind die Startkosten für den Transport der Satelliten in den Orbit. Diese liegen im zwei- bis dreistelligen Millionenbereich (siehe Kapitel 3.2.2). Aufgrund dieser hohen Startkosten verkaufen Raketenbetreiber zunehmend „Mitfluggelegenheiten“. Dies reduziert die Startkosten insgesamt und ermöglicht es weiteren Akteuren, kleinere oder weniger komplexe Satelliten zur Erdbeobachtung kostengünstig in den Orbit zu bringen.

### **Erdbeobachtung: Aktuelle Anwendungsfelder**

Im Bereich der Erdbeobachtungs- und Fernerkundungsdaten gibt es bereits heute eine Vielzahl von Anwendungsfeldern für die Nutzung der gesammelten Daten. Genutzt werden diese u. a. zur Untersuchung des Klimawandels und der Zusammensetzung der Erdatmosphäre, für Landwirtschaft und Ernährung, Forstwirtschaft, Infrastruktur, Ressourcen und Verkehr sowie für die Untersuchung von Ozeanen und Gewässern. Beispiele für solche Datennutzung sind:

- ▶ **Klimawandel/Atmosphäre:** Daten über Temperatur, Temperaturentwicklungen und die Luftqualität unterstützen die langfristige Beobachtung und Analyse des Klimawandels (Yang et al. 2013). Auch Folgen des Klimawandels lassen sich auf Grundlage von Fernerkundungsdaten modellieren und analysieren, etwa das Risiko von Überflutungen durch neu entstehende Gebirgsseen in Folge von Gletscherschmelze (Furian et al. 2021). Geographisch präzise Analysen der möglichen Folgen des Klimawandels sind zudem für die Planung und Umsetzung von Anpassungsstrategien unerlässlich (s. bspw. Paul et al. 2020).
- ▶ **Landwirtschaft/Ernährung:** Daten unterstützen Vorhersagen zur Geschwindigkeit des Pflanzenwachstums, zeigen die Art der Landnutzung, tragen zu effizienter Logistik und umweltgerechter Düngung bei (Copernicus 2021a) und helfen bei der Erstellung von Wachstumskarten (s. auch Kapitel 5.2.3). Fernerkundungsdaten ermöglichen zudem beispielsweise die Kartierung von Ernteaussfällen infolge von Naturkatastrophen wie Überflutungen und unterstützen daraus folgende Prozesse, wie die Auszahlung von Versicherungen an betroffene Landwirt\*innen (Shofiyati et al. 2022).
- ▶ **Wälder/Forstwirtschaft:** Daten erlauben eine genaue räumliche Bestimmung von Trockenschäden oder speziellen Schaderregern (z. B. Borkenkäfern). Sie helfen bei der Erstellung von Maßnahmenplänen zur Abholzung oder Wiederaufforstung von Waldgebieten durch die zuständige Forstverwaltung (Seitz 2021), sowie bei der Waldbrandbekämpfung durch die Generierung von Karten mit Feuerherden (Copernicus 2021b). Sie können auch zur Kartierung illegaler Waldrodungen genutzt werden und auf diese Weise mittelbar zum Schutz der Umwelt beitragen (Mitchell et al. 2017).
- ▶ **Gewässer und Ozeane:** Daten ermöglichen die Kartierung und Überwachung des Meeresbodens, beispielsweise hinsichtlich Muschelvorkommen oder Sedimentarten (Reimers 2021), die Temperaturerfassung und die Einschätzung der Wasserqualität anhand beobachtbarer Parameter wie Sichttiefe, Trübung und Chlorophyll-Gehalt des Wassers (Deller 2021). Meeresgebiete oder Binnengewässer mit starker Algenblüte oder Schwebeteilchen können so ausgewiesen werden (ebenda; Le Traon et al. 2021).
- ▶ **Infrastruktur, Ressourcen und Verkehr:** Erkundungsdaten unterstützen bei der Analyse von Risiken durch Naturereignisse für die Infrastruktur, z. B. bei Hochwasser-Risikoanalysen (Löw 2021) oder Analysen von Bodenbewegungen, wie etwa Erdbeben (Anderssohn 2021), bei der Ermittlung der Befahrbarkeit von Seewegen durch Eisklassifikation (Rabenstein 2021), sowie der Verkehrsprognose (Hilti 2021). Auch die Identifikation und Quantifizierung von in Siedlungen und Infrastruktur verbauten Ressourcen ist mithilfe von Satellitendaten möglich (Schug et al. 2022), ebenso wie die Identifikation informeller Siedlungen (Niebergall et al. 2008) und die Konzeptionierung ihrer Wasserversorgung (Rausch et al. 2018). Im Katastrophenfall (etwa bei Erdbeben, Bränden oder Überflutungen) dienen Erdbeobachtungsdaten als Grundlage für schnelles Handeln der Einsatzkräfte (Denis et al. 2016).

### 5.3.2 Trends und Treiber

Erdbeobachtung ist ein hochdynamisches Feld. Zentrale Treiber dafür sind technische Innovationen, wie die Serienfertigung von Kleinsatelliten (CubeSats) und die Verfügbarkeit von miniaturisierten, stromsparenden und kostengünstigen Sensoren für Mini- oder Nano-Satelliten (Definition s. u.), die im erdnahen Orbit für Erdbeobachtungsanwendungen genutzt werden können. Damit einher geht die Entstehung neuer, auf datenbasierten Dienstleistungen gestützter Geschäftsmodelle, die auch für Nicht-Raumfahrtakteure relevant sind. Neue Satelliten privater und staatlicher Anbieter bieten zudem Fortschritte in der Sensortechnologie, so wird etwa die räumliche Auflösung der produzierten Bilder immer höher, die einzelnen Pixel werden kleiner. Auch die spektrale Auflösung der Daten steigt, d. h. es werden Daten in deutlicher abgegrenzten Kanälen erfasst. Dies erlaubt eine trennschärfere Klassifikation der Ergebnisse.

#### Steigende Zahl kommerzieller Kleinsatelliten für die Erdbeobachtung

Zwischen 2021 und 2030 sollen über 15.000 Satelliten in den Weltraum gebracht werden, davon bis zu 90 % Kleinsatelliten. Aktuell wird es immer günstiger, Kleinsatelliten mit speziellen, auf sie ausgelegten Trägerraketen in den Weltraum zu befördern; ansonsten sind sie als „zusätzliche Fracht“ an große Missionen gebunden (Wagner 2022).

Kleinsatelliten werden vor allem für die kommerzielle Erdbeobachtung genutzt (Funke et al. 2016). Sie sind ein wesentlicher Treiber für die prognostizierten Entwicklungen auf dem Markt für Erdbeobachtungsanwendungen. Dieser soll sich in den kommenden 10 Jahren von etwa 2,8 Mrd. Euro auf über 5,5 Mrd. Euro verdoppeln. Wesentlich ist hierbei das Segment der datenbezogenen Mehrwertdienste, die zukünftig 85 % des Markts ausmachen sollen.

Um das Marktpotenzial erschließen zu können, werden die Satelliten mit verschiedensten Sensoren ausgestattet – häufig auch solchen, die nicht speziell für Weltraumanwendungen entwickelt wurden. So werden zunehmend „Standardsensoren von der Stange“ für den Weltraum verbaut.

Kleinsatelliten werden abhängig von ihrer Masse in Minisatelliten (100 bis 500 kg), Mikrosatelliten (10 bis 100 kg), Nanosatelliten (1 bis 10 kg) und Picosatelliten (0,1 bis 1 kg) eingeteilt (Bärwald und Brieß 2011; S. 676). Eine international anerkannte, einheitliche Klassifizierung gibt es jedoch nicht, sodass die Grenzen unscharf bleiben. Die Anzahl von Kleinsatelliten im Orbit hat seit Anfang der 2010er Jahre stark zugenommen (DelPozzo et al. 2019; Bocksch 2021a). Ein Ausgangspunkt für diese Entwicklung war der 2003 von der Stanford University und der California Polytechnic State University definierte CubeSat-Standard (Funke et al. 2016). Dieser sollte Universitäten den



© Ben Wicks/unsplash

Zugang zum Weltraum erleichtern. Mittlerweile werden Kleinsatelliten jedoch zunehmend kommerziell eingesetzt, wegen ihrer Vorzüge gegenüber konventionellen Satelliten (geringe Budgetanforderungen,<sup>26</sup> kurze Entwicklungs- und Herstellungszeiten sowie kleine Nutzergemeinschaften).

Kleinsatelliten haben in den vergangenen Jahren den Schritt von der Technologiedemonstration in die kommerzielle Anwendung geschafft und bieten zudem eine Alternative für Großmissionen. In Verbänden oder Schwärmen eingesetzt, kann auch die zum Teil schlechtere Sensor-Auflösung bzw. eingeschränkte Datenrate der Kommunikationssysteme gegenüber konventionellen Satelliten wettgemacht werden. Allerdings haben Kleinsatelliten häufig eine geringere Lebensdauer, weil die miniaturisierten Elemente, wie auch viele elektronische Standardkomponenten, unter Weltraumbedingungen (Strahlung, Temperaturschwankungen) schneller versagen (siehe Kapitel 4.1.4). Kleinsatelliten müssen dementsprechend häufiger ersetzt werden. Ferner verfügen sie nicht über integrierte Antriebssysteme, sodass es keine Möglichkeiten gibt, sie nach ihrer Nutzung kontrolliert in der Erdatmosphäre verglühen zu lassen (Speicher 2014).

#### Im Downstream-Sektor entstehen neue Dienstleistungen

Durch die wachsende Anzahl an kleinen, mit hochauflösender Sensortechnologie ausgestatteten Erdbeobachtungssatelliten im Orbit stehen potenziellen Nutzer\*innen immer größere Datenmengen zur Verfügung. Diese müssen vor ihrer Nutzung zu Datenprodukten „veredelt“ werden, um sie interpretierbar zu machen. Dienstleistungen, die auf dem Austausch sowie der Weiterverarbeitung und Analyse von raumfahrtbasierten Daten aufbauen, werden dem sogenannten „Downstream-Sektor“ zugerechnet. Als Downstream-Sektor werden diejenigen Bereiche der Raumfahrtindustrie bezeichnet, in denen eine kommerzielle Nutzung von Produkten und Dienstleistungen auf der Erde erfolgt, die auf satellitenbasierter Kommunikation, Navigation und Erdbeobachtungsdaten basieren (Kind et al. 2020; S. 40).

Der Markt für Fernerkundungsprodukte und -dienstleistungen entwickelt sich aktuell sehr dynamisch und umfasste 2021 ein Marktvolumen zwischen 2,7 Mrd. US-Dollar und 3,3 Mrd. US-Dollar (s. Rencelj et al. 2023; S. 126). Neben dem wachsenden Angebot von Daten profitiert der Sektor vor allem von der immer besseren örtlichen Auflösung neuer Erdbeobachtungssatelliten. Neben staatlichen und wissenschaftlichen Akteuren spielen Unternehmen und Start-ups bei der Interpretation und Aufbereitung der Daten eine zunehmend wichtige Rolle.

Raumfahrtagenturen wie auch Raumfahrtunternehmen, Mikrosatellitenbetreiber und Start-ups haben die Verwertungspotenziale von Erdbeobachtungsdaten erkannt. Sie entwickeln Dienstleistungen, die auf Erdbeobachtungsdaten basieren und bieten diese der öffentlichen Hand, Unternehmen, der Wissenschaft, aber auch privaten Nutzer\*innen an. Eine wichtige Grundlage hierfür ist die freie Zugänglichkeit von Daten (Jordan 2021). Raumfahrtagenturen wie die ESA ermöglichen bereits einen solchen freien Zugang über die Plattformen Copernicus Open Access Hub,<sup>27</sup> EO Browser oder ESA Earth Online. Die NASA bietet dies über die Earth Data-Plattform<sup>28</sup> an. Privatwirtschaftliche Unternehmen sind häufig an einem freien Zugang interessiert. Wenn sie jedoch selbst Satelliten-Daten erheben bzw. prozessieren, sind diese oft Teil ihres Geschäftsmodells und nicht frei zugänglich.

Ein weiteres wichtiges Geschäftsfeld im Downstream-Sektor sind KI-Systeme zur Auswertung und Interpretation hochauflösender Satellitenbilder und anderer Erdbeobachtungsdaten. Hierfür werden beispielsweise Machine-Learning-Algorithmen trainiert, bestimmte Strukturen bzw. Muster zu erkennen, sodass sie diese in riesigen Datensets effizient und schnell finden können. Zum Monitoring der Landnutzung wurden beispielsweise die offenen Plattformen OpenSurface<sup>29</sup> und OneSoil<sup>30</sup> entwickelt. Sie bieten KI-Dienstleistungen an, welche auf Basis von Satellitenbildern Rückschlüsse zum Zustand von Wäldern treffen können bzw. die agrarwirtschaftliche Nutzung der Erdoberfläche abbilden.

<sup>26</sup> Missionskosten beinhalten in der Regel Material-, Personal-, Test- bzw. Qualifizierungskosten und die Startgebühren. Für eine Kleinsatelliten-Mission liegen diese Kosten bei unter 1 Million Euro pro Satellit (Funke et al. 2016).

<sup>27</sup> <https://scihub.copernicus.eu/>

<sup>28</sup> <https://earthdata.nasa.gov/>

<sup>29</sup> <https://opensurface.io/>

<sup>30</sup> <https://map.onesoil.ai>

In den kommenden Jahren wird zudem die Initiative „Destination Earth“ neue datenbasierte Erdbeobachtungs-Dienstleistungen ermöglichen (European Commission o.J. a). Die Initiative wurde 2021 von der Europäischen Kommission als Teil der Digital Strategy im Rahmen des EU Green Deals gestartet. Ziel ist es, bis 2030 ein präzises digitales Abbild der Erde zu schaffen – einen sogenannten digitalen Zwilling. Mit Hilfe von „Destination Earth“ und anderen Zwillingssimulationen, wie z. B. dem Digital Earth Project (Ruhnke et al. 2022), können zukünftig lokal hochaufgelöste Szenarien zur nachhaltigen Entwicklung, zu Extremereignissen oder zur Klimaentwicklung entwickelt und getestet werden. In das digitale Erdmodell sollen neben Erdbeobachtungsdaten weitere, für das Klimasystem relevante Daten zu menschlichen Aktivitäten integriert werden (Ulmer 2021). So kann der Einfluss des Menschen realitätsnäher simuliert werden.

### 5.3.3 **Umweltpotenziale und -risiken**

Die genaue Beobachtung der verschiedenen Umweltbereiche ermöglicht es, zielgenaue Maßnahmen zu ergreifen, um den Umweltzustand zu verbessern. Tools der Erdbeobachtung können einen wichtigen Beitrag zum Naturschutz leisten, indem sie Umweltschäden sichtbar und im Zeitverlauf nachvollziehbar machen. Die sich daraus ergebenden Potenziale sind wertvoll. Als Monitoring-Werkzeuge sind sie aus Umweltsicht aber in ihrem tatsächlichem, gegenüber den Umweltbelastungen aufzuwiegendem Nutzen stark an den Erfolg der aus den Daten abgeleiteten politischen Handlungen gekoppelt.

Die Anwendungsfelder (siehe Kapitel 5.3.1) haben vielfältiges Potenzial, positiven Einfluss auf die Umwelt zu nehmen. Zum Beispiel können Programme wie Google Earth Engine den Wandel der Erde im Zeitraffer zeigen. Mithilfe des Programms kann das Schmelzen der Gletscher, der Anstieg des Meeresspiegels und das Sterben von Wäldern seit Beginn der Aufzeichnungen 1984 beobachtet werden. Diese Visualisierungen können das öffentliche Bewusstsein für die Klimakrise und die Relevanz des Umweltschutzes weiter schärfen. Die Beobachtung durch Satelliten bietet Fakten für das Monitoring des fortschreitenden Klimawandels. Durch die Kombination aus meteorologischen und geographischen, historischen und aktuellen Daten wird der Umweltforschung sowie der -politik enormes Potenzial geboten, Handlungsnotwendigkeiten bzgl. des Klimawandels

bzw. der Überwachung von internationalen Vereinbarungen und dem Ressourcenmanagement zu identifizieren. Dies ist auch für die Umsetzung von Umweltmaßnahmen nützlich (Feddeck et al.).

Die Erzeugung von Erdbeobachtungsdaten ist jedoch mit Umweltbelastungen verbunden, da sie auf kosten- und ressourcenintensiven technischen Systemen aufbaut und zu unerwünschten Emissionen und Weltraumschrott führt (siehe Kapitel 4.2). Der Trend hin zu räumlich und zeitlich immer höher aufgelösten Erdbeobachtungsdaten führt zu einer starken Zunahme der zu verarbeitenden Datenmengen, was wiederum den ökologischen Fußabdruck der verwendeten Technologien und resultierenden Ergebnisse erhöht.

Nachfolgend werden Anwendungsbereiche ausgeführt, in denen Erdbeobachtung einen Beitrag zu Umwelt- und Klimaschutz liefern kann.

#### **Umwelt und Ökosysteme überwachen**

Erdbeobachtungsdaten können Maßnahmen gegen den Verlust der Biodiversität unterstützen. Unter anderem werden sie zur Detektion von Waldbränden (Crowley et al. 2023) und Öllecks und -teppichen auf den Weltmeeren (Jafarzadeh et al. 2021) genutzt und dienen als Grundlage für Notfallmaßnahmen zum Schutz von Mensch und Natur. Langzeitaufnahmen zeigen zudem den Verlust von Habitaten, die Verschlechterung der Boden-, Luft- und Wasserqualität und die klimatischen Veränderungen bestimmter Regionen (Kramer 2016). Diese Veränderungen führen dazu, dass Tiere und Pflanzen nicht mehr an ihre bisherigen Habitate angepasst sind und somit andere Gebiete aufsuchen müssen (Bates 2020). Satelliten haben durch die Produktion von hochauflösendem Bildmaterial z. B. das Potenzial, die Nordverschiebung der Arten zu dokumentieren. Wetterdaten, die Bodenfeuchtigkeit und der Nährstoffreichtum einer Region können das Weiterziehen oder Aussterben einer Art prognostizieren (Stoner et al. 2016).

Obwohl der Klimawandel der wichtigste Faktor der Habitat-Verschiebung ist, könnten Daten – auch wenn sie nicht zum Kampf gegen den Klimawandel selbst beitragen – helfen, regionale Maßnahmen zu treffen, um einzelne Lebewesen zu unterstützen, einen angepassten Lebensraum zu finden. Ein Beispiel hierfür ist die unterstützte Migration (Assisted Migration). Dabei werden Pflanzen aus dem bisherigen Habitat

entnommen und in einem für sie passenden Klima eingepflanzt, um ihre Überlebenschancen zu steigern (Handler et al. o.J.).

Durch den Ausbau der Infrastruktur, durch Versiegelungen und Einfriedung von Agrarland verstärkt sich die Fragmentierung von Ökosystemen. Dadurch wird es Lebewesen und Organismen erschwert, sich neue Nahrungsquellen zu suchen bzw. das volle Potenzial einer Region für sich zu nutzen (Zambrano et al. 2019). Um den Artenschutz zu gewährleisten, ist z. B. die Verbindung zwischen Habitaten durch Brücken notwendig. Hier können Erdbeobachtungsdaten vielfältig eingesetzt werden. Die Erdbeobachtung liefert Ökosystem- und Verkehrsdaten, um das gezielte Anlegen von lebenden Korridoren wie z. B. Hecken in der Landwirtschaft, ein naturunterstützendes Gehwegfundament oder Grünbrücken zu erleichtern. Schließlich können Arten besser geschützt werden, indem die Lichtverschmutzung aus dem All mit Erdbeobachtungsdaten gemessen wird. Durch das gezielte Dimmen der Lichtquellen in der Nähe von belebten Habitaten wird der Rhythmus von Lebewesen weniger gestört (Beißwenger 2021). Allerdings tragen Satelliten, v. a. geplante Megakonstellationen mit Zehntausenden Satelliten wie Starlink, massiv zur Lichtverschmutzung insbesondere in Mitteleuropa, Kanada und Zentralasien bei (Holland 2021).

Auch in der Landwirtschaft wird Erdbeobachtung vielfältig eingesetzt. Daten über Bodenfeuchtigkeit, Nährstoffe und Erntemisstände können z. B. dafür verwendet werden, ertragsarme Flächen an die Natur zurückzugeben.

### Kontrolle politischer Maßnahmen

Daten aus der Erdbeobachtung bieten großes Potential, Staaten und Institutionen bei der Kontrolle von etablierten politischen Maßnahmen und Programmen zu unterstützen. Beispielsweise können sie zum Monitoring von politischen Vereinbarungen wie der Ramsar-Konvention herangezogen werden (Leeuw et al. 2010), die den Schutz von Feuchtgebieten von internationaler Bedeutung zum Ziel hat (Ramsar Convention on Wetlands Secretariat 2023). Auch die Effektivität von Schutzgebieten hinsichtlich der ausgewiesenen Schutzziele kann unter Zuhilfenahme von Satellitendaten evaluiert werden (z.B. Geldmann et al. 2019). Damit europäische Landwirt\*innen EU-Agrarzahlingen erhalten, muss ermittelt und kontrolliert

werden, ob sie ihre Flächen korrekt bewirtschaften und damit Auflagen beispielsweise zu Umweltschutz oder zur Reduzierung der Bodenerosion eingehalten werden (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) 2019). Die Umsetzung kann mittels Erdbeobachtung erheblich vereinfacht werden.

Erdbeobachtungsdaten können durch die diversen Verknüpfungsmöglichkeiten der verschiedenen Satellitentechnologien, gepaart mit Künstlicher Intelligenz und starker Rechenleistung, zu einer sinnvollen Kontrollmethode für einzelne Staaten beitragen. Staaten können Kosten für die Überwachung der SDGs und ihrer Unterziele erheblich senken und die Berichterstattung für Regierungen, die jeweils mit begrenzten Ressourcen operieren, vereinfachen (Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) 2017). Menschenrechtsverstöße oder die Verschmutzung von Schutzgütern ließen sich durch die Echtzeitübertragung der Erdbeobachtung dauerhaft nachverfolgen.

### Umweltschäden erkennen und sanktionieren

Umweltschädliches Verhalten kann nur sanktioniert werden, wenn es nachgewiesen werden kann und die Verursachenden identifiziert werden können. Dazu kann Erdbeobachtung einen wichtigen Beitrag leisten. Denn Beobachtungssatelliten können Windverläufe und Nährstoffflüsse dokumentieren und den Vitalitätszustand von Ökosystemen anzeigen (Feddeck et al.).

Global verursachten allein Gesundheitsschäden durch Luftverschmutzung im Jahr 2016 Kosten in Höhe von 5,7 Billionen US-Dollar (The World Bank und Institute for Health Metrics and Evaluation 2016).

Bisher zeigen hauptsächlich chemische Analysen, die dem Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregister zu entnehmen sind, die negativen Auswirkungen von Industrien auf die Umwelt (Umweltbundesamt (UBA) 2021a). Während diese Zahlen sehr abstrakt sind und einzelnen Unternehmen keine spezifischen ökologischen Schäden zugeordnet werden können, könnten Satellitenaufnahmen hier eine genauere Zuordnung ermöglichen.

Durch die algorithmische Klassifizierung der Bilddaten lässt sich die genaue Herkunft chemischer Stoffe rekonstruieren. Beispielhaft zeigt der Report „En-

„Environmental Racism in Death Alley, Louisiana“ von Forensic Architecture, wie die industrielle Belastung durch die Analyse von Abgasen genau definiert werden kann (Forensic Architecture 2021). In Kombination mit Gesundheitsdaten kann das Vorhandensein von Schadstoffen bestätigt und die Luftverschmutzung durch einzelne Unternehmen bewiesen werden. Daraufhin können politische Maßnahmen wie Reparationszahlungen für die betroffenen Gebiete beschlossen werden (Taubenböck et al. 2020; Forensic Architecture 2021).

Erdbeobachtungsdaten können auch dazu beitragen, Leckagen an verlassenen oder trockenen Bohrlöchern zu finden. Dafür werden an Satelliten bildgebende Präzisionsspektrometer im sichtbaren Infrarotbereich installiert (Carbon Mapper Inc. o.J.). Rund ein Drittel aller Öl-Bohrlöcher der Erde stellen durch ihre Nähe zu Gasfeldern ein Risiko für fortlaufenden Methan-Ausstoß dar (Vielstädte et al. 2017). Durch Erdbeobachtung könnten diese Löcher entdeckt und kontrolliert versiegelt werden. Dies würde den weltweiten Methan-Ausstoß um ca. 1 % senken (Lauvaux et al. 2022). Verursachende Unternehmen könnten so potenziell für die entstehenden ökologischen Schäden, die Schäden an der Gesundheit der Bevölkerung und entstandene ökonomische Einschränkungen verantwortlich gemacht werden, wie es in anderen Fällen gefordert wird (Forensic Architecture 2021).

Darüber hinaus könnte Erdbeobachtung dabei helfen, geplante Umweltzerstörungen zu entdecken. Durch die Dokumentation von umweltgefährdenden Eingriffen mit Hilfe von Satellitenbildern kann gegebenenfalls gegengesteuert werden, bevor ein Schaden irreversibel wird. In der Vergangenheit wurde so z. B. ein unrechtmäßig geplanter flächenhafter Waldbrand in Indonesien entdeckt, der Platz für Agrarflächen der Palmindustrie schaffen sollte. Die akkurat platzierten Reihen mit Feuerholz, die über Erdbeobachtung entdeckt wurden, ließen auf Brandstiftung schließen. Laut dem Forest Stewardship Council verstieß das betreffende Unternehmen gegen die Menschenrechte indigener Völker und schadete der Biodiversität des Landes (Forensic Architecture 2020). Durch die Analyse von Bilddaten kann umweltrelevante Kriminalität frühzeitig erkannt und es können Nachverfolgungen eingeleitet werden. Zudem lassen sich Präventionsmaßnahmen für die Zukunft entwickeln (Rodriguez Lopez et al. 2016).

### Umweltprognosen erstellen

Das Projekt „Destination Earth“ soll es mit Hilfe der geplanten digitalen Zwillinge der Erde ermöglichen, Klimaanpassungsmaßnahmen gezielter einzusetzen und mögliche Auswirkungen von Maßnahmen bereits vor der Umsetzung zu erkennen (European Commission 2022). Beispielsweise können verschiedene neue Methoden der Energiegewinnung, wie die Speicherung der inneren Erdwärme, in ihren Effekten auf die Umwelt simuliert werden (European Commission 2021a).

Geplante Deichbauprojekte können in Bezug auf erwartbare zukünftige Flutereignisse überprüft und verlässlicher validiert werden. Auch Dürren, Hitzewellen oder Tsunamis können durch die Kombination von Erdbeobachtungsdaten und Simulationen vorhergesagt werden und es Landkreisen oder Gemeinden erlauben, Hilfsmaßnahmen für die Sicherheit der Bevölkerung zu testen (European Commission 2022).

Eine digitale Simulation des Planeten bietet zudem das große Potenzial für die Umweltpolitik, die Auswirkungen menschlichen Handelns auf die Umwelt technologiegestützt und im Voraus abzuschätzen (Nativi und Craglia 2020). Digitale Zwillingssimulationen der Erde können dafür genutzt werden, Anträge für Ressourcenabbau auf ihre Umweltverträglichkeit zu prüfen bzw. Empfehlungen zum Ressourcenmanagement und zu Recyclingaktivitäten auszusprechen. Auf Grundlage dieser – von der KI des digitalen Zwillings formulierten – Aussagen ließen sich politische Richtlinien erstellen, die die Begrenztheit der Ressourcen im Blick haben bzw. bestehende Maßnahmen reflektieren (European Commission o.J. a). Auch die natürlichen Ressourcen der Erde können bilanziert werden: Durch spezifische von Satelliten gemessene Spektraldaten lassen sich beispielsweise Hinweise auf Mineralvorkommen in der Erde finden. Die satellitengestützte Detektion von Rohstoffen ist deutlich zeitsparender und großflächiger anwendbar als traditionelle Felduntersuchungen. Zudem können auch unzugängliche Gebiete aus dem Weltall auf das Vorhandensein von Rohstoffen untersucht werden (siehe bspw. Mohamed et al. 2021). Präzises Wissen um die vorhandenen Ressourcen auf der Erde ist für die oben skizzierten Ansätze des Ressourcenmanagements und die Einschätzung von Umweltwirkungen bei ihrem Abbau unerlässlich.

## 5.4 Abbau von Rohstoffen im Weltraum

Der Abbau von Rohstoffen im Weltraum („Space Mining“) ist eine Zukunftsvision, die die Menschheit im Bereich der Science-Fiction schon lang begleitet. Es gibt potenziell zwei grundlegende Ziele: einerseits der Rohstoffknappheit auf der Erde zu begegnen und andererseits die Raumfahrt als solche unabhängiger von der Versorgung durch die Erde zu gestalten.

### 5.4.1 Hintergrund und Entwicklung

Der Abbau von Rohstoffen im Weltraum kann demnach aus zwei Blickwinkeln betrachtet werden:

1. Zunächst im engeren Sinne als Abbau und Nutzung von Rohstoffen für die (bemannte und unbemannte) Raumfahrt (z. B. um weiter entfernte Ziele erreichen zu können).
2. Im weiteren Sinne umfasst dies aber auch den Abbau von Rohstoffen im Weltraum und deren Nutzung auf der (bzw. für die) Erde (Institut für Technikfolgen-Abschätzung der Österreichischen Akademie (ITA) und Austrian Institute of Technology (AIT) 2018).

Für den erstgenannten Fall kommen neben Sonnenenergie und Helium-3 auch die erforderlichen Rohstoffe für Raketentreibstoff (Wasser, Sauerstoff) sowie Rohmaterialien zur Konstruktion von Weltraumhardware (Metalle, Nicht-Metalle, Mineralien) und zur Lebenserhaltung von Raumfahrenden (Wasser, Sauerstoff) in Frage.

Für den zweitgenannten Fall stehen neben Sonnenenergie auch Rohmaterialien im Fokus der Betrachtung, um der Ressourcenknappheit auf der Erde zu begegnen (Bundesregierung 2019b). Obwohl erste Diskussionen zur Nutzung von Rohstoffen aus dem Weltraum in den 1960er Jahren im Rahmen des Apollo-Programms der USA geführt worden sind, ist es bislang nicht gelungen, die technischen, regulatorischen (siehe Kapitel 3.2.3) und wirtschaftlichen Herausforderungen zu lösen.

Um Rohstoffe im Weltraum abbauen zu können, müssen sie zunächst aufgespürt werden. Rohstoffe unterschiedlicher Art werden auf den Asteroiden und Planeten des Sonnensystems vermutet. Allein 17.000 sogenannter NEOs (near-Earth objects) sind bislang bekannt: Asteroiden, Kometen und Meteoroiden, die auf ihrer Umlaufbahn der Erde sehr nahe kommen und auffindbar sind (Wachter et al. 2018). Das Aufspüren der verschiedenen Rohstoffe kann beispielsweise mithilfe von Fernerkundungsmethoden erfolgen (Elvis et al. 2017). Gegenwärtig werden Missionen durchgeführt, um Proben von Asteroiden zu entnehmen und zur Erde zu transportieren (Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) 2021; S. 3f.). Dabei stehen zwar andere Forschungsziele (z. B. die Zusammensetzung des Sonnensystems während seiner Entstehung) im Vordergrund; dies kann aber dennoch relevante Erkenntnisse für die zukünftige Suche nach Rohstoffen liefern.

Um Asteroiden erreichen zu können, muss zunächst deren exakte Umlaufbahn berechnet werden, damit Raumsonden auf korrekte Flugbahnen gebracht werden können (Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) 2021; S. 22). Naheliegender erscheint es daher, zunächst den Mond als potenzielle Rohstoffquelle ins Auge zu fassen, da dessen Nähe und Erreichbarkeit bereits mehrfach demonstriert worden ist (Byrne 2019; Chavy-Macdonald et al. 2021).



© NASA Hubble Space Telescope/unsplash

Rohstoffabbau im Weltraum gestaltet sich als technisch anspruchsvoll. Die Rohstoffe können sich auf oder unter der Oberfläche eines Asteroiden, eines Mondes oder eines Planeten befinden oder in der Oberfläche enthalten sein. Jedoch ist die Extrahierbarkeit, also die Art und Weise wie ein Abbau durchgeführt werden müsste, bislang nicht Bestandteil von Untersuchungen zu Rohstoffvorkommen (Lamboray et al. 2019; S. 7). Für die Entwicklung technischer Lösungen zum Abbau von Rohstoffen ist das Wissen aus dem Bereich Bergbau unerlässlich (Lamboray et al. 2019; S. 9). So entstand beispielsweise 2017 ein multidisziplinäres Graduiertenprogramm an der US-amerikanischen Colorado School of Mines, das sich explizit dem Thema Rohstoffe im Weltraum widmet (Heller 2021). Das Bohren auf dem Mond oder dem Mars ist nicht mit Geräten zu bewerkstelligen, die auch im Bergbau auf der Erde eingesetzt werden können, weil sowohl die Beschaffenheit des Untergrunds als auch der Umgebung, in der ein Abbau stattfindet, von der auf der Erde abweicht (Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) 2021; S. 25). Andere mögliche Arten des Abbaus sind beispielsweise die Gewinnung von Sauerstoff durch thermische Reduktion (Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) 2021; S. 16), von Wasser durch Erhitzen (Sowers und Dreyer 2019) sowie das Schürfen mit (robotischen) Schaufeln (Gilbert 2021) oder sogar ein Abbau mit Hilfe von Mikroben (Cockell et al. 2020). In jedem der genannten Fälle ist daher die Entwicklung und Erprobung spezieller Abbautechnologien erforderlich, die idealerweise ohne menschliche Kontrolle vor Ort auskommen. Robotischer bzw. unbemannter Weltraumbergbau erscheint gegenwärtig als naheliegendster Entwicklungsverlauf.

Die zentrale Hürde bei der Ressourcennutzung auf der Erde ist die Logistik, d. h. der Rücktransport der gewonnenen Ressourcen zur Erde, der je nach Abbauort sehr energie- und somit kostenintensiv sein kann. Daher wäre die Nutzung der Ressourcen vor Ort zu bevorzugen (In-situ resource utilization [ISRU], siehe Kapitel 5.4.2). Würden nun auf der Erde sehr begrenzt verfügbare Ressourcen durch den Abbau im Weltraum breiter verfügbar, würde dies die Ressourcenmärkte stark erschüttern, da das Angebot deutlich

steigen und die Preisallokation sich erheblich verändern würde (Edwards 2017).

In ihrer bis dato letzten<sup>31</sup> Antwort auf eine kleine Anfrage zum Thema Weltraumbergbau schätzte die Bundesregierung im Jahr 2019 die Chancen für eine wirtschaftlich lohnende Gewinnung von Rohstoffen aus dem Weltraum als gering ein (Bundesregierung 2019b). Als Begründung wurden die erhebliche Komplexität der Aufgabe und die dafür fehlenden technischen Voraussetzungen angeführt; zudem wurde die Vereinbarkeit mit den Klimaschutzzielen der Bundesregierung in Frage gestellt. Vor diesem Hintergrund wurde vor allem die Forschung an Technologien zur weiteren Erkundung des Weltraums in den Vordergrund gerückt.

Aktuell gewinnen die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zum Abbau von Rohstoffen im Weltraum an Dynamik. Das liegt zum einen an der wachsenden Zahl an Unternehmen (s. u.), die sich bemühen, die vermuteten wirtschaftlichen Potenziale zu heben, zum anderen aber auch an einem gestiegenen Interesse nationaler Raumfahrtagenturen, die Rohstoffnutzung zu einem Bestandteil langfristiger Raumfahrtprogramme zu machen (Blair et al. 2005; Gilbert und Bazilian 2020).

## Extraterrestrisches Leben

Die Frage, ob neben dem Leben auf der Erde weiteres Leben im Universum existiert, beschäftigt die Menschheit seit Jahrtausenden. Schon 400 v. Chr. schrieb der griechische Philosoph Metrodoros von Chios in seinem Werk „Über die Natur“, dass die Annahme einer einzelnen belebten Welt in der Unendlichkeit des Universums unnatürlich sei (Papagiannis 1985). Er nahm damit eine von zwei grundlegenden Positionen zur möglichen Existenz außerirdischen Lebens ein, die bis heute Bestand haben: entweder (1) sind die Umstände und die Entstehung des komplexen, vielzelligen Lebens auf der Erde einmalig (Rare-Earth-Hypothese, Ward und Brownlee 2000), oder (2) dieser Vorgang auf der Erde ist nicht einmalig und extraterrestrisches Leben sollte aufgrund der Ausbreitung und des Alters des Universums und der

<sup>31</sup> Bis September 2023.

hohen Anzahl an Sternen, Planeten etc. vorhanden sein (Fermi-Paradoxon, vgl. Leman 2020). Aufbauend auf dem Fermi-Paradoxon, formulierte der Astrophysiker Francis Drake eine nach ihm benannte Gleichung, die es ermöglichen soll, die Anzahl der technischen, intelligenten Zivilisationen in unserer Galaxie, der Milchstraße, zu berechnen. Da aber viele der Parameter der Gleichung gegenwärtig unbekannt sind, kann die Gleichung allenfalls als heuristisches Verfahren genutzt werden, um die mögliche Anzahl intelligenter außerirdischer Zivilisationen zu schätzen (Webb 2010; S. 19f.).

Die Suche nach extraterrestrischem (intelligentem) Leben beflügelt Wissenschaftler\*innen weltweit. Neben der gezielten Suche, wie sie beispielsweise seit 1960 im Rahmen der SETI-Forschung betrieben wird (Anton und Schetsche 2023), besteht die Möglichkeit, während der Suche und dem Abbau von Ressourcen auf extraterrestrisches Leben oder zumindest Hinweise darauf zu stoßen, dass dieses existiert: Zum einen ist es vorstellbar, dass bei der Suche nach nutzbaren Ressourcen im Weltraum die Spuren der Ressourcennutzung durch eine fremde extraterrestrische Zivilisation entdeckt werden (Forgan und Elvis 2011). Dies kann eine bereits vergangene oder eine noch andauernde Nutzung sein. Zum anderen ist es denkbar, dass die Suche nach nutzbaren Ressourcen Hinweise auf die Existenz von außerirdischem Leben selbst liefert, beispielsweise in Form organischer Verbindungen (Willis 2016).

Ob die Suche nach extraterrestrischem Leben erfolgreich ist, hängt von verschiedenen Faktoren ab, nicht zuletzt davon, wie hochentwickelt dieses Leben ist und welche Spuren es hinterlässt bzw. hinterlassen hat. Bereits 2015 formulierten führende NASA-Wissenschaftler\*innen die Erwartung, dass mikrobielles Leben in unserem Sonnensystem innerhalb der folgenden 20 bis 30 Jahre entdeckt werden würde, da man inzwischen über das notwendige Wissen und die benötigte Technologie verfüge (Calamur 2015). An der Suche nach außerirdischem Leben sind weltweit verschiedene Institute beteiligt, wie das SETI Institute in Kalifornien (Shostak 2021), das Green Bank Observatory in West Virginia (Malusky 2023), das For-

schungszentrum FAST in China (Normile 2016) und weitere internationale Forschungseinrichtungen.

#### 5.4.2 Trends und Treiber

Je länger und je mehr Menschen sich im Weltraum aufhalten, desto wichtiger werden Versorgungsfragen. Vor Ort (im All) vorhandene Ressourcen direkt nutzen zu können, könnte dabei eine wichtige Rolle spielen. Eine weitere Entwicklung, die eine nähere Betrachtung verdient, ist der Abbau von Rohstoffen im Weltraum und deren Transport auf die Erde, um der Knappheit einzelner Ressourcen zu begegnen. Letztlich zeichnet sich bereits heute ab, dass mit der steigenden Menge von Weltraumschrott auch eine Rohstoffquelle für Recycling in unmittelbarer Nähe zur Erde existiert.

#### ISRU (in-situ resource utilization)

Das Akronym ISRU steht für „in-situ resource utilization“ und bezeichnet den Abbau von Ressourcen und deren Nutzung am selben Ort (National Aeronautics and Space Administration (NASA) 2008). Für die Unterhaltung einer dauerhaften Präsenz im Weltraum, etwa in Form einer permanent bemannten Basis auf dem Mond, dürfte ISRU eine maßgebliche Rolle spielen (Stoll und Dietz 2020). Eine solche Basis müsste mit allen lebensnotwendigen Materialien versorgt werden, was wiederum logistischen Aufwand erzeugt. Um diesen Aufwand zu minimieren, ist es sinnvoll, die vor Ort vorhandenen Rohstoffe nutzbar zu machen. Dies kann u. a. die Erzeugung von Konstruktionsmaterialien, z. B. aus dem Lockermaterial Regolith,<sup>32</sup> umfassen, die mittels additiver Fertigung zum Aufbau einer Basis genutzt werden, wie beispielsweise im Forschungsvorhaben RegoLight<sup>33</sup> demonstriert werden konnte (Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) 2021; S. 14).

Weiterhin können auch volatile Stoffe wie Wasser und Sauerstoff gewonnen werden, um Atemluft und Trinkwasserversorgung für die Besatzung zu gewährleisten und um Raketentreibstoff herzustellen. So wurde im Rahmen des Projektes MOXIE (Mars Oxygen ISRU Experiment; Hecht et al. 2021) erstmals als Techno-

<sup>32</sup> Regolith bezeichnet hier das Material an der Mondoberfläche, ein feines, graues Gemisch verschiedener Bestandteile ((Meyer 2003)).

<sup>33</sup> <https://regolight.eu/>

logiedemonstration gezeigt, dass es möglich ist, aus in der Atmosphäre vorhandenem CO<sub>2</sub> Sauerstoff zu erzeugen. Zukünftig soll mit dieser Technologie in großem Umfang Raketentreibstoff hergestellt werden (siehe Kapitel 5.4.1), damit dieser zum Beispiel im Rahmen einer bemannten Marsmission für einen Rückflug vom roten Planeten zur Erde zur Verfügung steht und nicht bereits auf der Hinreise mitgeführt werden muss. Um die Masse der mitzuführenden Rohstoffe zu reduzieren, ist es Ziel derartiger Projekte, zu zeigen, dass erforderliche Ressourcen auch vor Ort in den jeweiligen Umgebungen gewonnen werden können. Die Vorhaben RegoLight und MOXIE sind nur zwei von vielen Beispielen, mit denen die Entwicklung von Technologien zum Ressourcenabbau im Weltraum vorangetrieben wird.

Von einer Kommerzialisierung ist der Weltraumbau noch entfernt, wenngleich sich gegenwärtig elf Unternehmen weltweit spezifisch mit ISRU befassen (Kulu 2021b). Sie versuchen, die ökonomischen Potenziale in diesem Feld zu steigern, beispielsweise indem Technologien zur Extraktion von Sauerstoff, Wasserstoff oder Helium-3 entwickelt werden. Auch die NASA setzt bei ihrem Ziel, eine permanente menschliche Präsenz auf dem Mond zu etablieren, auf die wirtschaftlichen Potenziale und hat im Rahmen ihres Artemis-Programms ihrerseits zehn Unternehmen ausgewählt, die Technologien entwickeln sollen, um auf dem Mond Eis abzubauen und in Sauerstoff, Wasser und Raketentreibstoff umzuwandeln (Gilbert und Bazilian 2020; Williams 2020). Insofern ist es wahrscheinlich, dass die Gewinnung von Rohstoffen und deren Nutzung vor Ort zukünftig eine wichtige Rolle in der Raumfahrt spielen wird.

### Blick in die Zukunft: Besiedlung von Mond und Mars

Eine Besiedlung von Mond oder sogar Mars setzt voraus, dass lokal vorhandene Ressourcen nutzbar gemacht werden können. Eine kontinuierliche Versorgung mit Nahrung, Sauerstoff, Wasser, Rohmaterialien, Treibstoff etc. von der Erde aus (wie es aktuell auf der ISS erforderlich ist), ist zu aufwendig und risikoreich. Derzeit gibt es verschiedene Überlegungen,

zumindest auf dem Mond eine dauerhafte menschliche Präsenz zu errichten.

Die vom ehemaligen ESA-Generaldirektor Johann-Dietrich Wörner seit 2016 propagierte Vision eines „Moon Village“ (European Space Agency (ESA) 2016) stellt eine Form von Besiedlung dar; ein Habitat, das mit Hilfe lokaler Ressourcen gebaut wird und von Astronaut\*innen bewohnt werden kann, um dort Forschung zu betreiben.<sup>34</sup> Auch das Artemis-Programm der NASA zielt auf die Errichtung und den Betrieb einer dauerhaften menschlichen Präsenz auf dem Mond ab und beinhaltet die Nutzung von Ressourcen vor Ort (National Aeronautics and Space Administration (NASA) 2020a; S. 23; National Aeronautics and Space Administration (NASA) 2020b; S. 4f.). Von Vorteil ist vor allem die vergleichsweise kurze Entfernung zur Erde, sodass in eventuellen Notfällen eine dauerhafte Versorgung von der Erde aus sichergestellt und auch zeitnahe Hilfe bereitgestellt werden könnte. Andererseits stellt sich – wie auch bei den Diskussionen um einen Weiterbetrieb der ISS oder der Erforschung des Weltraums an sich – die Frage, inwieweit überhaupt eine Besiedlung des Mondes erforderlich ist und ob nicht angesichts der Risiken und des vermuteten Aufwands auch eine Nutzung robotischer Systeme ausreichend ist.

Ein bemannter Flug zum Mars ist bislang noch nicht realisiert worden, konzeptionell allerdings bereits seit den bemannten Mondflügen in den 60er und 70er Jahren ein Thema (Portree 2001). Im Zuge der Errichtung einer dauerhaften Kolonie auf dem Mars wären enorme technische Hürden zu überwinden. Bereits der Flug zum Mars ist wegen der großen Entfernung zur Erde ein gewaltiges Unterfangen. So finden sich geeignete Startfenster von der Erde zum Mars aufgrund verschiedener Faktoren wie u. a. der Planetenkonstellation und den jeweiligen Positionen der Himmelskörper auf der Umlaufbahn um die Sonne nur rund alle 2,13 Jahre (Ulamec und Hanowski 2011; S. 566). Bei einem energieoptimalen Hohmann-Transfer – Start (Erde) und Ziel (Mars) liegen genau auf einer Strecke zur Sonne – beträgt die Reisezeit rd. 9 Monate (für Hin- und Rückflug). Aufgrund der Marsumlaufbahn um die Sonne und den damit zusammenhängenden geeigneten Startfenstern für

<sup>34</sup> Vgl. für weitere Informationen: <https://moonvillageassociation.org/>

einen solchen Flug müssen Raumfahrende einen längeren Aufenthalt auf dem Mars (ca. 500 Tage) überstehen. Um den Energieaufwand für die Reise zu reduzieren, kann dabei darauf verzichtet werden, alle nötigen Vorräte mitzuführen und stattdessen vor Ort beispielsweise Sauerstoff, Wasser und Raketentreibstoff für den Rückflug produziert werden.

Die Landung von Astronaut\*innen auf und sichere Rückreise von unserem Nachbarplaneten ist eine derzeit noch ungelöste technische, wirtschaftliche und politische Herausforderung. Die extrem lebensfeindlichen Bedingungen auf dem Mars in Verbindung mit dem erheblichen Aufwand, der für den Transport von Personal, Ressourcen und Gerätschaften nötig ist, machen die Errichtung einer Mars-Kolonie zu einem äußerst aufwendigen und risikoreichen Unterfangen. Dementsprechend mit Vorsicht zu betrachten sind öffentlichkeitswirksam angekündigte Bestrebungen einer Besiedlung des Mars, wie z. B. die Ziele des Unternehmens SpaceX (SpaceX 2020a) und das mittlerweile abgebrochene und äußerst umstrittene Medienprojekt MarsOne (Hühn 2019). Eine Besiedlung des Mars ist derzeit allenfalls eine ferne Zukunftsvision der bemannten Raumfahrt. Dennoch werden bemannte Mars-Expeditionen neben SpaceX gegenwärtig auch von der NASA (NASA Jet Propulsion Laboratory und NASA Mars Exploration Mission 2023), der russischen Raumfahrtagentur Roskosmos (TASS Russian News Agency 2020) und der nationalen Raumfahrtbehörde Chinas geplant (Jones 2021b).

### **Nutzung im Weltraum abgebauter Rohstoffe auf der Erde**

Der Rücktransport von im Weltraum abgebauten Ressourcen verursacht enormen Aufwand und ist unter den aktuellen Umständen wirtschaftlich nicht rentabel. Dennoch werden Ansätze für eine Nutzung von im Weltraum abgebauten Rohstoffen auf der Erde verfolgt, um hiesigen Ressourcenengpässen zu begegnen. Infrage kommen dabei die Versorgungen mit (Edel-)Metallen wie beispielsweise Platin, oder der Ausbau erneuerbarer Energien durch die verbesserte Nutzung von Sonnenlicht mittels weltraumbasierter Technologien.

Ausgehend von der Vermutung, dass (Edel-)Metalle, wie z. B. Eisen, Nickel, Kobalt oder Platin, auf Asteroiden der C- und der M-Klasse (kohlenstoffhaltige

bzw. metallische Asteroiden) sehr häufig vorkommen, gibt es Bemühungen, diese Vorkommen aufzuspüren, abzubauen und zur weiteren Nutzung zur Erde zu transportieren. Ein konzeptioneller Ansatz hierzu ist eine sogenannte „Asteroid Capture and Return (ACR)“-Mission, bei der eine Raumsonde einen Asteroiden einfängt und in den erdnahen Orbit befördert. So ist der Zugang zu den vermuteten Ressourcen, deren Abbau sowie deren Distribution zur Erde mit geringerem Energieaufwand möglich (vgl. für eine ausführliche Darstellung: Tantardini et al. 2012). Neben ungelösten Fragen der technischen Machbarkeit spielt vor allem der ökonomische Nutzen eine entscheidende Rolle. Während es weiterhin unbekannte Vorkommen von spezifischen Rohstoffen auf der Erde gibt, ist deren Erschließung und Nutzbarmachung mit zum Teil sehr hohen Kosten verbunden, so dass eine Gegenüberstellung zwischen den notwendigen Investitionen in den Asteroidenbergbau und den Kosten für die Erschließung neuer Minen auf der Erde sinnvoll ist. In einer Fallstudie mit dem Fokus auf Platin kommt beispielsweise die Edwards (2017) zu dem Ergebnis, dass die Einrichtung einer neuen Platinmine auf der Erde mit bis zu 1 Mrd. US-Dollar erhebliche Kosten verursacht. Allerdings wäre demgegenüber die Durchführung einer ACR-Mission mit geschätzten Kosten von rund 2,6 Mrd. US-Dollar mehr als doppelt so teuer (Tantardini et al. 2012; S. 40). Bislang ist eine solche ACR-Mission technisch noch nicht realisierbar.

Auch in ökonomischer Hinsicht erscheint die Erschließung neuer Rohstoffquellen auf der Erde vorteilhafter. Sollte allerdings – wie in der oben zitierten Fallstudie – der Zugang zu einer im Weltraum befindlichen Platinquelle realisiert werden können, so hätte dies eine erhebliche Disruption auf dem globalen Rohstoffmarkt zur Folge. Ein Überangebot von Platin würde zu einem Preissturz führen (Edwards 2017).

Eine Ressource aus dem Weltraum, die bereits auf der Erde genutzt wird, ist die Solarenergie. Es gibt Bestrebungen, die Ausbeute durch weltraumbasierte Technologien, sogenannte weltraumgestützte Solarenergie (engl. space-based solar power, SBSP), zu erhöhen (Potter 2021). Die Erdrotation führt dazu, dass Photovoltaik-Anlagen einen Teil des Tages nicht von Sonnenlicht beschienen werden. Zudem geht auch ein Teil des auf der Erde eintreffenden Sonnenlichts durch die Erdatmosphäre verloren. Es kommt also

zu Effizienzverlusten. Ein weltraumbasiertes System könnte diese Effizienzverluste zumindest teilweise ausgleichen. Die mit weltraumbasierten Reflektoren gesammelte Sonnenenergie muss anschließend umgewandelt und in Form von Mikrowellen zur Erde übertragen werden. Auf der Erde müssen geeignete Empfangsantennen errichtet werden (Wood 2014). Im März 2023 gelang es im Rahmen eines Forschungsprojekts am California Institute of Technology (CalTech), Energie mittels Mikrowellen von einem Solarmodul im Weltraum sowohl zu einem Empfängermodul im Erdorbit als auch erstmals auf die Erdoberfläche zu senden (Perkins 2023). In den 2040er Jahren plant das Vereinigte Königreich die Inbetriebnahme eines entsprechenden Systems im Erdorbit (Space Energy Initiative 2022).

Die zukünftige Entwicklung – sowohl hinsichtlich weltraumbasierter Solarenergie als auch bei der weiteren Erforschung von Technologien zum Abbau metallischer Rohstoffe – setzt nicht nur die Überwindung technischer Hürden voraus, sondern auch ökonomische Faktoren spielen eine entscheidende Rolle. Somit ist gegenwärtig unklar, ob und welche Bedeutung die Nutzung von Ressourcen aus dem Weltraum in Zukunft haben wird.

### Recycling von Weltraumschrott

Die zunehmende Menge an Weltraumschrott stellt bereits heute eine enorme Gefährdung der Raumfahrt dar (siehe Kapitel 4.2). Daher wird verstärkt nach Ansätzen gesucht, dieses Problem zu lösen. Die begrenzte Lebensdauer von Weltraumhardware (Raketentstufen, Satelliten, Nutzlastabdeckungen etc.) bedeutet, dass sie am Ende ihrer Lebensdauer aus ihrer Umlaufbahn bewegt werden muss, um keine Gefährdung für andere Weltraumgegenstände darzustellen (siehe Kapitel 4.1.4). Für Satelliten bedeutet das in der Regel einen Transfer zu einem sogenannten Friedhofsorbit (siehe Kapitel 4.1.4), auf dem der Satellit dauerhaft verbleibt, oder auf einen Wiedereintrittsorbit, der dazu führt, dass der Satellit in der Erdatmosphäre verglüht (Hirzinger et al. 2011; S. 612). Recycling ist eine weitere Möglichkeit (European Space Agency (ESA) 2019a). Ein Friedhofsorbit kann theoretisch erneut angefliegen werden, um den dort befindlichen Weltraumschrott zu recyceln. Vor allem Satelliten, die

bereits auf geostationären Umlaufbahnen eingesetzt werden, werden auf Friedhofsorbitbahnen befördert. Der dafür erforderliche Treibstoff ist in der Regel im Satellit enthalten. Für Satelliten oder auch Raketentstufen in niedrigen Erdumlaufbahnen ist der Wiedereintritt in die Erdatmosphäre vorgesehen, da dieser sich energieeffizienter durchführen lässt als der Transfer zu einem Friedhofsorbit. Bis zum Wiedereintritt von Satelliten oder Raketentstufen gibt es ein Zeitfenster, in dem sie recycelt werden können. Die Starlink-Satelliten sollen beispielsweise innerhalb eines Jahres nach Ende ihres jeweiligen Missionszeitraums in der Erdatmosphäre verglühen (Brodikin 2017). Sie müssten also vor diesem Zeitpunkt recycelt werden.

Schätzungen zufolge sind gegenwärtig rund 8.000 Tonnen Weltraumschrott im Orbit und bieten Recyclingpotenzial.<sup>35</sup> Dazu gehören inaktive Satelliten, deren Hardware-Komponenten bzw. deren metallische Bestandteile teilweise wiederverwendet werden können. Auch ausgebrannte Raketentriebwerke können recycelfähig sein, in dem bspw. das Aluminium, aus dem sie bestehen, wiederverwendet wird. Berechnungen zufolge könnten allein die 64 Ariane-Oberstufen ca. 250 Tonnen Aluminium liefern (Koch 2018). Das so gewonnene Aluminium könnte genutzt werden, um den Aufbau einer permanenten Basis auf dem Mond zu unterstützen und so den finanziellen Aufwand zu reduzieren. Außerdem kann es zum Gießen von Werkzeugen und Gegenständen, ebenfalls auf dem Mond, oder als Kraftstoffbestandteil genutzt werden (Koch 2021).

Etablierte Unternehmen, wie beispielsweise Airbus (Airbus 2021), aber auch Start-ups wie Orbit Recycling (Orbit Recycling 2023), haben die Potenziale des Recyclings von Weltraumschrott erkannt und entwickeln Technologien, um diese Potenziale zu erschließen. Dazu gehören u. a. mit robotischen Armen ausgestattete Raumfahrzeuge oder mit Harpunen ausgerüstete Satelliten, die Weltraumschrott einfangen, oder auch additive Fertigungstechnologien, die mit den metallischen Rezyklaten (recycelten Rohstoffen) arbeiten sollen (Lim 2021). Gegenwärtig laufen darüber hinaus Entwicklungsvorhaben und Technologiedemonstrationen von fünf Start-ups (Kulu 2021b) in Kooperation

<sup>35</sup> Dies bezieht sich bislang nur auf die Entsorgung intakter Satelliten durch eine Platzierung im Friedhofsorbit oder kontrollierten Absturz – für die Entsorgung kleiner Trümmerteile gibt es derzeit keine technischen Lösungen.

mit nationalen Raumfahrtagenturen bzw. der ESA (Sahba El-Shawa et al. 2021).

Das Recycling von Weltraumschrott ist nicht nur ökonomisch sinnvoll, sondern auch Bestandteil internationaler Strategien der Vereinten Nationen (United Nations Office For Outer Space Affairs (UNOOSA) 2010b) und der ESA (European Space Agency (ESA) o.J.) oder auch der USA (National Aeronautics and Space Administration (NASA) 2019c) zum Umgang mit Weltraummüll. Denn durch das Recycling von geeignetem Weltraumschrott werden wirtschaftliche Anreize geschaffen, diesen aktiv aus dem Orbit zu entfernen und aufzubereiten (Lucas-Rhimbassen et al. 2019). Dies senkt potenziell auch das Risiko von Kollisionen und die Menge des dabei entstehenden neuen Weltraumschrotts. Es kann also davon ausgegangen werden, dass diese Entwicklung zukünftig an Bedeutung gewinnen wird.

### 5.4.3 **Umweltpotenziale und -risiken**

Der Bergbau im Weltraum ist – genauso wie der Bergbau auf der Erde – mit massiven Umwelteingriffen verbunden. Zum einen kommt es durch den Abbau von Rohstoffen zu direkten Eingriffen auf anderen Himmelskörpern, zum anderen zu Umwelteingriffen durch den Transport der Rohstoffe und die Zunahme der Raketenstarts und -eintritte in die Erdatmosphäre.

Bei letzterem Punkt, den Umwelteingriffen durch Transport und Zunahme von Raketenstarts, stehen sich zwei Entwicklungen gegenüber. Einerseits



© NASA/unsplash



© Planet Volumes/unsplash

müssen Rohstoffe, wenn sie im Weltraum abgebaut und genutzt werden, nicht energieintensiv von der Erde in den Weltraum transportiert werden – mit allen Umwelteingriffen, die damit verbunden sind. Beispielsweise kann Wasser direkt auf Asteroiden oder dem Mond gewonnen und für die Lebenserhaltung im Weltraum sowie für die Herstellung von wasserstoffbasiertem Raketentreibstoff genutzt werden und muss nicht als Nutzlast von der Erde aus in den Weltraum gebracht werden. Andererseits bringt eine fortgeschrittene Weltraumbergbauindustrie letztendlich eine Zunahme an Raketenstarts mit sich: zum einen, um die dafür nötige Infrastruktur in den Weltraum zu bringen, zum anderen, um extrahierte Rohstoffe zurück auf die Erde zu transportieren. Wie in Kapitel 4 beschrieben, bringen Raumfahrtaktivitäten (in diesem Fall zur Gewinnung von extraterrestrischen Ressourcen) diverse Umwelteingriffe mit sich, etwa durch den Ressourcenverbrauch bei der Produktion der Raumfahrzeuge und -infrastruktur, die Emissionen beim Start und Wiedereintritt in die Erdatmosphäre und die schädigenden Effekte auf die Ozonschicht (Ross et al. 2009; Maury et al. 2020).

Bei Bergbaumissionen und den damit einhergehenden Umweltwirkungen gilt es, sowohl die Emissionen zu berücksichtigen, die beim Transport der Rohstoffe entstehen, als auch die direkten Eingriffe auf Oberfläche und Boden, Wasserhaushalt, Atmosphäre und Klima des Planeten, Mondes oder Asteroiden. Diese direkten Wirkungen sowie erste Gegenüberstellungen vom Bergbau auf der Erde und im Weltraum werden nachfolgend ausführlicher beschrieben.

### Umweltingriffe auf anderen Himmelskörpern

Durch extraterrestrischen Bergbau wird die Oberfläche der Asteroiden, des Mondes oder auch des Mars durch die Ressourcenextraktion dauerhaft und unwiderruflich verändert (Galli und Losch 2019). Es gibt zunehmend Stimmen, die vor einer Wiederholung der Fehler der irdischen Ressourcenextraktion und damit einer dauerhaften Schädigung der extraterrestrischen Umwelt warnen (Kramer 2017; Newman und Williamson 2018). Zwar gibt es insgesamt eine Fülle an Rohstoffen auf anderen Himmelskörpern; allerdings sind die Ressourcen dort, wie auch auf der Erde, nicht erneuerbar und somit endlich. Die Wahrscheinlichkeit, auf der Erde begangene Fehler auch im Weltraum zu wiederholen, ist somit hoch. In diesem Fall bleiben potenziell nur 400 Jahre, bis die Ressourcen im Weltraum nahezu erschöpft sind. (Elvis und Milligan 2019).

Missionen auf Mond und Mars, die das Ziel haben, Ressourcen zu extrahieren und menschliche Siedlungen zu etablieren, können nicht nur die Eigenschaften dieser unberührten Umgebungen völlig verändern. Die Eingriffe würden sich auch auf die Atmosphäre und das Klima dieser Himmelskörper auswirken (Mustow 2018). Zum einen liegt sowohl auf der Oberfläche des Mondes, als auch des Mars, Staub in hohen Konzentrationen vor. Eine Erschließung der Oberfläche und Bergbauaktivitäten können dazu führen, dass dieser aufgewirbelt und in der Atmosphäre freigesetzt wird und somit die Atmosphärenkomposition verändert. Es könnte folglich zu einer Destabilisierung des komplexen Systems eines Planeten kommen (Del Bianco et al. 2021).

Zum anderen kann die biologische Kontamination durch die Menschen Auswirkungen auf den Zustand der Himmelskörper haben. Aktivitäten auf dem Mars oder anderen Himmelskörpern, auf denen extraterrestrische Lebensformen, deren Vorläufer und Überreste erforscht werden sollen, unterliegen daher Restriktionen, durch die eine biologische Kontamination vermieden werden soll (Committee on Space Research (COSPAR) 2021). Jedoch zeigt sich, dass in der Atmosphäre des Mars bereits Kontaminationen durch terrestrische Verbindungen und ruhende Mikroorganismen von früheren (nichtastronautischen) Missionen zu finden sind (Mustow 2018). Bei zukünftigen, größer angelegten menschlichen Aktivitäten auf dem Mond muss daher die Fragilität der Atmosphären-

schicht des Mondes berücksichtigt werden (National Research Council (NRC) 2007). Anders verhält es sich auf Asteroiden, da diese keine Atmosphäre aufweisen, die durch Bergbauaktivitäten verändert werden könnte. Da davon ausgegangen wird, dass astronomische Kleinkörper im Sonnensystem aufgrund ihrer Beschaffenheit mit hoher Wahrscheinlichkeit keine Spuren ausgestorbener Lebens enthalten und auch nicht Lebensraum außerirdischen Lebens sind, unterliegen Asteroiden geringeren Restriktionen zum Schutz vor biologischer Kontamination (Committee on Space Research (COSPAR) 2021; Coustenis et al. 2023).

Weitere Probleme können durch den Abwurf oder das Zurücklassen von Hardware auf der Oberfläche oder durch einen Zuwachs an Weltraumschrott im Orbit entstehen (Paton 2017; Newman und Williamson 2018). Das gezielte Absenken von Satelliten kann beispielsweise im lunaren Orbit, im Gegensatz zum Erdborbit, nicht als eine Maßnahme zur Verringerung des Weltraumschrotts angewandt werden, da die Satelliten in der Atmosphäre des Mondes nicht vollständig verglühen würden (Williamson 2006). Die nicht verglühten Satellitenteile würden auf der Mondoberfläche auftreffen und dort zurückbleiben.

Für den Abbau von Rohstoffen wird Infrastruktur auf der Oberfläche nötig sein: beispielsweise Anlagen zur Speicherung und Aufbereitung von Wasser oder zur Verarbeitung von Regolith, Anlagen zur Energieerzeugung, sowie Lande- und Startanlagen für Raumfahrzeuge. Es muss also überlegt werden, wie mit der Infrastruktur umgegangen wird und wie man die Lernerfahrungen vom Bergbau auf der Erde nutzen kann und die Infrastruktur von vornherein nachhaltig und nach Kreislaufprinzipien ausrichtet (Kramer 2017).

Ein weiterer interessanter Aspekt, der zukünftig auch bei der in-situ-Ressourcennutzung eine Rolle spielen wird, ist, wie ISRU-gefertigte Teile, beispielsweise aus Regolith, auf der Oberfläche des Mondes oder des Mars recycelt werden können. Auch wie sich das mehrfache Recycling auf die Eigenschaften der Teile und die Verarbeitbarkeit der Materialien auswirkt, ist noch unklar (Del Bianco et al. 2021). Zu klären bleibt hierbei, inwiefern die Einrichtung einer entsprechenden Recyclinginfrastruktur vor Ort unter nachhaltigen Gesichtspunkten möglich ist.

## Blick in die Zukunft: Schutzzonen im Weltraum

Geht man von einem exponentiellen Wachstum der extraterrestrischen Ressourcennutzung aus (wie es auch bei dem Ressourcenabbau auf der Erde der Fall war), kann es potenziell nur 400 Jahre dauern, bis wir uns der Erschöpfung der Ressourcen in unserem Sonnensystem nähern (Elvis und Milligan 2019).

Ein mögliches Modell sieht vor, menschliche Aktivitäten auf einen kleinen Teil (ein Achtel) unseres Sonnensystems zu beschränken, und damit den großen Rest im Status Quo zu bewahren und für zukünftige wissenschaftliche Missionen unberührt zu lassen (Elvis und Milligan 2019). Dies, so wird argumentiert, ließe genügend Zeit, um im Hinblick auf das exponentielle Wachstum frühzeitig reagieren zu können und Maßnahmen zum Ressourcenabbau zu entwickeln.

Um die Unberührtheit bestimmter Regionen zu bewahren, wird auch vorgeschlagen, in landschaftlich diversen Regionen auf dem Mond und Mars sogenannte „planetary parks“ zu errichten, in denen Menschen keine wirtschaftlichen Aktivitäten ausüben oder Siedlungen errichten dürften (Horneck und Cockell 2010).

### Umweltpotenziale bei der Nutzung von extraterrestrischen Rohstoffen auf der Erde

Der Abbau von Mineralen und Metallen auf der Erde hat diverse negative soziale und ökologische Folgen. Kritische Rohstoffe<sup>36</sup> werden aber für eine globale Dekarbonisierung benötigt, unter anderem zur Erzeugung und Speicherung erneuerbarer Energien. Rohstoffe aus dem Weltraum könnten diesen Bedarf potenziell decken und damit den Ausbau der Technologien erleichtern (Dallas et al. 2021). Falls extraterrestrische Rohstoffe nicht zusätzlich abgebaut werden, sondern zu einem gewissen Teil irdische Rohstoffe substituieren, könnte die Nutzung von extraterrestrischen Mineralen und Metallen zukünftig den umweltschädigenden Abbau auf der Erde reduzieren. Besonders Platin, Selen und Gallium sind Rohstoffe, die für

den Abbau auf dem Mond und auf Near-Earth-Asteroiden geeignet wären, da sie in großer Fülle vorliegen. Auch Silber, Indium und Tellurium findet sich auf den Himmelskörpern, jedoch nur in geringeren Konzentrationen. Die Extraktion von Lithium und seltenen Erden ist zudem aufgrund der geringen Verfügbarkeit wenig erfolgsversprechend (Dallas et al. 2021), und die Frage des möglichen Preisverfalls (siehe Kapitel 5.4.1) bleibt bestehen.

Platin steht derzeit im Fokus der Forschung, da es im Gegensatz zur Erdkruste auf den Near-Earth Asteroiden in hoher Konzentration vorliegt und im Vergleich zu anderen Mineralen relativ leicht aufzufinden ist (Dallas et al. 2021). Der Abbau von Platin auf der Erde ist mit Umwelteingriffen verbunden, zum Beispiel einem hohen Wasser- und Energieverbrauch und starker Wasserverschmutzung (Glaister und Mudd 2010; Graedel et al. 2015). In der Primärproduktion werden derzeit circa 40 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro kg Platin freigesetzt, bei der Sekundärproduktion 2 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente (Saidani 2018). Eine erste Studie zu diesem Thema kommt zu dem Schluss, dass der Abbau von Platin im Weltraum samt Rücktransport auf die Erde weniger Treibhausgase emittiert als die Platin-Extraktion auf der Erde. Die Schwelle, ab der die Vorteile überwiegen, wird daran gemessen, wieviel Platin zur Erde zurückgebracht wird, dies sollte bei primärem Platin mindestens 0,3 % der Masse des Raumschiffs sein. Die Studie betrachtet jedoch nur die direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen, nicht die Auswirkungen der Raketenstarts auf die Stratosphäre, die Ozon-schicht oder weitere indirekte Folgen. Die geringe Verfügbarkeit von Platin auf der Erde und die damit einhergehenden hohen Kosten dieses Rohstoffs werden als ein Hemmnis für die Verbreitung bestimmter grünen Technologien genannt. Ein Beispiel sind hier Brennstoffzellen zur Energiespeicherung, die auf Platin angewiesen sind (Sealy 2008). Auch wenn aktuell an Alternativen für Platin geforscht wird, könnte eine Beschaffung von extraterrestrischem Platin den Ausbau und weitflächigen Einsatz erneuerbarer Energien tendenziell fördern, würde aber voraussichtlich gleichzeitig zu einem Preissturz von Platin auf den globalen Rohstoffmärkten führen (siehe Kapitel 5.4.2) (Dallas et al. 2021).

<sup>36</sup> Kritische Rohstoffe sind Rohstoffe, die für den technologischen Fortschritt und die Entwicklung der modernen Gesellschaft unerlässlich sind (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) 2014).

Derzeit ist auch das Potenzial, die auf der Erde extrahierten kritischen Rohstoffe besser zu recyceln, weitgehend ungenutzt. Anstrengungen beim Recycling könnten sinken, wenn die Verfügbarkeit der Rohstoffe durch den extraterrestrischen Abbau steigt. Ein nachhaltiges Ressourcenmanagement von sowohl terrestrischen als auch extraterrestrischen Rohstoffen ist daher unumgänglich (Dallas et al. 2021).

Einen großen Beitrag zur globalen Dekarbonisierung nach 2050 könnte die Nutzung von weltraumgestützter Solarenergie für die Erde leisten. Bereits jetzt werden alle Satelliten mit Sonnenenergie betrieben, weil diese im Weltraum konstant zur Verfügung steht. Die Preise für den Transport von Nutzlast in den Weltraum sowie für die Produktion von Photovoltaik-Modulen sind in den letzten Jahren drastisch gesunken. Solarenergie kann zukünftig dazu beitragen, die von erneuerbaren Energien dominierten, dekarbonisierten Netze auszugleichen und gleichzeitig den Zugang zu Energie überall auf der Welt zu ermöglichen (Bazilian et al. 2019). Potenziale für den Umweltschutz ergeben sich beispielsweise bei Schiffen auf hoher See. Hier kann Solarenergie aufgrund seines dezentralen Einsatzbereichs die fossilen Brennstoffe für den Antrieb ersetzen. Auch in abgelegenen Dörfern oder Inseln könnte Solarenergie eingesetzt werden und so den Aufbau von fossilen Energieträgern bzw. die Abhängigkeit vom Import von fossilen Brennstoffen ersetzen (Bazilian et al. 2019).

Demgegenüber stehen diverse technologische Nachteile: Etwa müssten aufgrund der relativ geringen Energieleistung jedes einzelnen Satelliten eine größere Anzahl von Satelliten verwendet werden, um eine substanzielle Menge Energie zu erzeugen. Dies würde nicht nur erhebliche Kosten, sondern auch eine Vielzahl an Startmanövern von der Erde nach sich ziehen. Zudem wäre die Übertragung der Energie auf die Erde mit Lasern oder Mikrowellen nicht bei allen Wetterbedingungen gleichermaßen möglich (wegen einer schlechteren Durchdringung der Atmosphäre bei Wolken und Regen). Und die weite Entfernung der Satelliten von der Erde würde eventuelle Reparaturen erheblich verkomplizieren (Wood 2014). Einige dieser Probleme könnten aber durch andere in diesem Bericht ausgeführten Entwicklungen mitigiert werden, z. B. könnten neue Trägerraketen mehrere Satelliten auf einmal transportieren und die Anzahl der notwendigen Raketenstarts reduzieren.

### Regulatorische Maßnahmen für den Abbau von Rohstoffen im Weltraum

Es gibt bereits Ansätze, von Beginn an verbindliche internationale Richtlinien für den nachhaltigen Abbau von Rohstoffen zu etablieren, welche ökonomische, soziale und ökologische Aspekte berücksichtigen. Folgende vier Punkte könnten in die Ausgestaltung solcher Richtlinien einfließen (Dallas et al. 2020a):

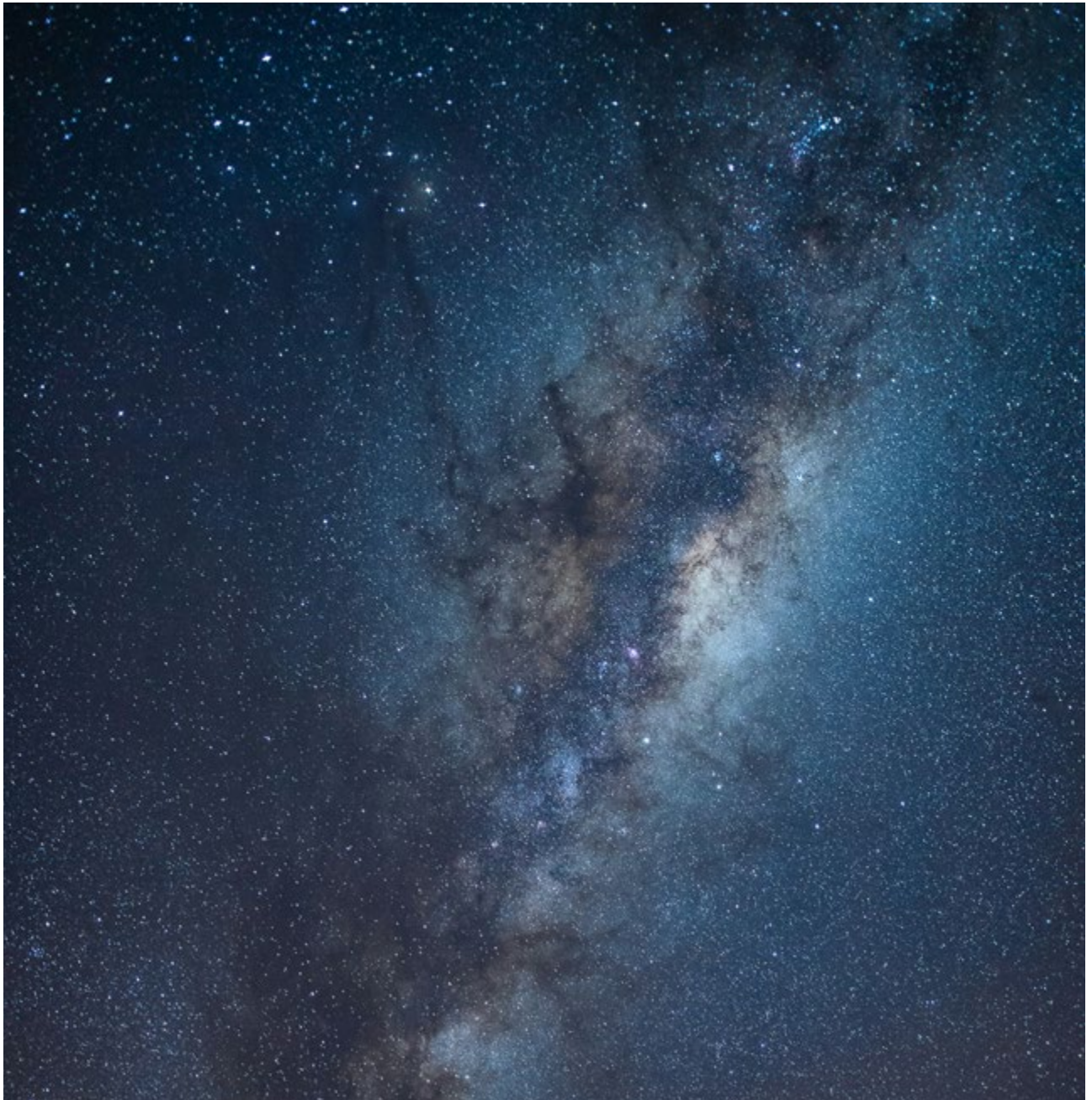
- ▶ Internationale Kooperationen zwischen Nationen, die Weltraumbergbau betreiben, und sich entwickelnden Ländern, sollte gefördert werden, um den Space Gap zu reduzieren. Der Space Gap ist die wirtschaftliche Ungleichheit zwischen Staaten, die entsteht, wenn durch das Fehlen einer nationalen Raumfahrtindustrie sozioökonomische Chancen nicht umgesetzt werden können (Way 2018). Weltraumbergbau kann diesen Space Gap potenziell noch vergrößern, da die wirtschaftlichen Erträge nur den raumfahrenden Nationen zufließen. Es sei denn es gibt zukünftig internationale Mechanismen, welche den Profit oder Teile davon auch an Staaten verteilen, die keinen Zugang und finanzielle Mittel für Weltraumaktivitäten haben.
- ▶ Die Vergabe von Bergbaugenehmigungen und deren Überwachung sollte, ähnlich wie beim Tiefseebergbau, durch eine supranationale Organisation erfolgen.
- ▶ Bei der Vergabe sollten Wirkungsanalysen der Umwelteingriffe sowohl auf der Erde als auch im Weltraum durchgeführt werden. Dabei sollte das Vorsorgeprinzip angewandt werden.
- ▶ Zivilgesellschaft und Wissenschaft sollten die Möglichkeit haben, an Entscheidungsprozessen zum Weltraumbergbau beteiligt zu sein und wissenschaftlich relevante Daten zu erhalten.

Im Sinne einer schnelleren Umsetzung von Bergbaumissionen und Klärung ausstehender rechtlicher Fragen (siehe Kapitel 3.2.3) wird auch vorgeschlagen, internationale Standards von interessierten Unternehmen selbst entwerfen und deren Umsetzung dann auch von ihnen überprüfen zu lassen (Kramer 2014). Hier besteht allerdings die Gefahr, dass die Anforderungen an den umweltverträglichen Abbau unter Gewährung des Vorsorgeprinzips wegen wirt-

schaftlichen Interessen verwässert werden könnten. Werden Bergbauaktivitäten von privaten Akteuren durchgeführt, welche die für den Abbau gewonnen wissenschaftlichen Daten als ihr Eigentum betrachten, könnte es zudem zu einer Informationsasymmetrie und zum Verlust wichtiger Daten für die wissenschaftliche Gemeinschaft kommen, beispielsweise bei astrogeologischen Untersuchungen oder Boden-/Gesteinsproben (Dallas et al. 2020a).

Der Abbau extraterrestrischer Ressourcen liegt noch in der Zukunft. Ob dieser nachhaltig erfolgen kann, ist auch eine moralische Frage. Denn der Ressour-

cenabbau bringt quasi per Definition eine dauerhafte Veränderung der Himmelskörper mit sich. Es ist daher essenziell, sich mit der Frage auseinanderzusetzen, inwieweit der Mensch überhaupt in die extraterrestrische Umwelt eingreifen sollte und welchen Stellenwert die Unversehrtheit der Himmelskörper sowohl für die Wissenschaft als auch als kulturelles Erbe der Menschheit einnehmen soll.



© Kyle Goetsch/unsplash

# 6

**Der Weltraum –  
Ein Thema für das  
Umweltressort?  
Fazit, politische  
Ansatzpunkte und  
Forschungsfragen**

Abbildung 14

### Übersicht der Handlungsempfehlungen für das Umweltressort

The infographic is set against a dark blue space background with white stars and light blue clouds at the bottom. A white rocket with grey boosters is launching upwards. Various celestial bodies are depicted: a large purple planet with white stripes in the top left, a purple ringed planet on the left, a purple comet with a long tail in the middle, and a smaller purple planet with white stripes on the right.

- ✦ **6.1 Prinzipien der Umwelt- und Nachhaltigkeitspolitik anwenden**
  - ✦ 6.1.1 Nachhaltige Nutzung des Weltraums als Leitbild
  - ✦ 6.1.2 Wahrung der Planetary Boundaries
  - ✦ 6.1.3 Vorsorgeprinzip in der Weltraumnutzung
  - ✦ 6.1.4 Den Weltraum durch Suffizienz vor dem Anthropozän schützen
- ✦ **6.2 Politische Regulation stärken und ausweiten**
  - ✦ 6.2.1 Aufbau internationaler Governancestrukturen
  - ✦ 6.2.2 Agenda 2030 und Sustainable Development Goals
  - ✦ 6.2.3 Nationales Weltraumrecht
- ✦ **6.3 Nachhaltigkeit von Infrastruktur und technischen Systemen**
  - ✦ 6.3.1 Verpflichtende Ökobilanzierung der Bodeninfrastruktur
  - ✦ 6.3.2 Entwicklung alternativer Treibstoffe
  - ✦ 6.3.3 Nachhaltige Produktionsanlagen
  - ✦ 6.3.4 Chancen und Grenzen der Weltraumkreislaufwirtschaft
  - ✦ 6.3.5 Neue Nutzungskonzepte fördern
- ✦ **6.4 Umgang mit Weltraumschrott**
  - ✦ 6.4.1 Verbot von neuem Weltraumschrott
  - ✦ 6.4.2 Weltraumschrott überwachen
  - ✦ 6.4.3 Weltraumschrott entsorgen

Quelle: Eigene Darstellung

Im Einleitungszitat dieses Berichts wird die Raumfahrt der menschlichen Nutzung der Meere und Ozeane des Planeten Erde gegenübergestellt. Meere spielten in der Menschheitsgeschichte schon früh eine entscheidende Rolle als Quelle für Rohstoffe und Nahrung, und die menschliche Besiedlung der Erde folgte den Ressourcen entlang der Küstenlinien (Rincon 2006). Meere ermöglichten Reise und Handel und waren elementarer Bestandteil der historischen Entwicklung der Menschheit (Gillis 2012). Aufgrund technologischer Limitierungen blieben die Umweltauswirkungen dieser Nutzungen lange auf lokale oder regionale Ökosysteme begrenzt – ein Zustand, der mit der Frühphase der Raumfahrt vergleichbar ist. Mit der Industrialisierung und neuen, größer skalierbaren Technologien, rasantem Bevölkerungswachstum und globalisiertem Handel nahm die menschliche Nutzung der Meere aber in einem Ausmaß zu, das die natürlichen Regenerationsmöglichkeiten der Meere übersteigt. Eine ebenfalls exponentielle, von teilweise analogen Entwicklungen getriebene Wachstumskurve ist gegenwärtig auch im Raumfahrtsektor zu beobachten (siehe Kapitel 3.2). In den Meeren führte diese Entwicklung zu einer langen Liste von Effekten, die sich negativ auf die Umwelt und den Menschen auswirken: Überfischung bedrohter Fischbestände und Dezimierung von Seevogelpopulationen, gefährdete Lebensgrundlagen in Entwicklungsländern durch die Verdrängung der heimischen Fischerei, von Plastikmüll beschädigte Korallenriffe und die Bedrohung marinen Lebens durch Ölkatastrophen sind nur einige der gegenwärtigen Probleme. Obgleich wissenschaftliche Erkenntnisse über die Auswirkungen menschlichen Handelns auf marine Ökosysteme hinreichend bekannt sind, gestalten sich die Bemühungen, der menschlichen Nutzung der Meere und Ozeane nachträglich eine nachhaltige Perspektive zu verleihen, als aufwendig und träge.

Für den Weltraum sind viele dieser Entwicklungen noch hypothetisch, manche aber auch bereits akut sichtbar (siehe Kapitel 4.2). Anders als bei der Nutzung der Weltmeere ist es aber noch möglich und auch dringend geboten, die Nutzung des Weltraums proaktiv und dem Vorsorgeprinzip folgend in nachhaltige Bahnen zu lenken – auch und insbesondere in Bereichen, in denen bisher nur wenige wissenschaftliche Erkenntnisse über mögliche Folgen der Nutzung vorliegen.

Der historische Fehler, politisches Handeln hinsichtlich der Nutzung eines Ökosystems nur an aktuellen, kurzfristigen Bedürfnissen auszurichten und den Folgen für die Umwelt kein Gewicht beizumessen, darf sich im Weltraum nicht wiederholen.

Im Folgenden werden zu sämtlichen im Bericht festgestellten Umweltwirkungen Handlungsoptionen präsentiert, die für eine nachhaltige Nutzung und Erforschung des Weltraums notwendig sind und den Weg für eine ganzheitliche umweltpolitische Regulierung ebnen sollen.

## 6.1 Prinzipien der Umwelt- und Nachhaltigkeitspolitik anwenden

### 6.1.1 Nachhaltige Nutzung des Weltraums als Leitbild

Ähnlich wie die Erkundung der Weltmeere im 15. und 16. Jahrhundert oder die Besiedlung des nordamerikanischen Westens vor allem im 19. Jahrhundert, die trotz ihrer Schattenseiten heroisiert und mit der Unterwerfung der Natur und „Zähmung der Wildnis“ konnotiert wurden, wird auch die Raumfahrt mit menschlichem Pioniergeist assoziiert.

Astronaut\*innen wird eine kulturelle „Stellvertreterposition“ zugeschrieben, die eine Gattungsleistung der Menschheit als Ganzes repräsentiert (Janich 2000; S. 161). Namen wie Yuri Gagarin und Neil Armstrong sind bis heute untrennbar mit Pionierleistungen der Raumfahrt verbunden (Williams 2015), und SpaceX-Gründer Elon Musk inszeniert sich als Vorreiter der Menschheit als interplanetare Spezies (Stirn 2019).

Ein Werbespot der Kampagne „1 %“ von Fridays for Future U.S. aus dem Jahr 2021 spielt mit diesem Framing: Mit einer ausdrucksstarken Männerstimme wird im Stil eines Tourismuswerbespots für die Übersiedlung auf den Mars geworben: „56 Millionen Quadratkilometer unberührter Natur, atemberaubende Landschaften und fantastische Aussichten“, ein Planet ohne Kriege, Kriminalität, Pandemien und Umweltverschmutzung, der die Freiheit bietet, eine neue Art des Zusammenlebens zu schaffen. Hier wird an den Abenteurergeist der Zuschauer\*innen appelliert und schließlich die Frage gestellt: „Wirst du den Rest deines Lebens auf der Erde verbringen oder wirst du zum\*zur Pionier\*in?“ Der Spot schließt mit der Wendung: „Und für die 99 %, die auf der Erde bleiben werden, sollten wir besser den Klimawandel unter Kontrolle kriegen“ (Fridays for Future U.S. 2021).

Der Soziologe Ulrich Beck zeichnete in den 1980er Jahren das Bild einer sogenannten „Risikogesellschaft“, die sich durch eine „Nichtwahrnehmbarkeit der Gefahren“, durch die „Übernationalität“ möglicher Risiken und die „Wissensabhängigkeit“ in Hinblick darauf auszeichnet (Beck 1986; S. 10). Diese „Risikogesellschaft“ wird erst durch ihre selbst produzierten Risiken reflexiv, was durch die Katastrophe von Tschernobyl im Jahr 1986 in drastischer Weise empirisch bestätigt wurde (Beck 1986; 10; 26). Im Zuge dieser Reflexion der technischen und ökologischen Risiken der Moderne war das wirkmächtige politische Leitbild der Raumfahrt in Deutschland in den 1990er Jahren eine „Raumfahrt für die Erde“, welche verwertbare Erkenntnisse für die Klima- und Umweltforschung liefern sollte.

In den letzten Jahren kam zum Paradigma „Raumfahrt für die Erde“ ein neues Paradigma hinzu, die „Raumfahrt für den Markt“ (Marsiske 2005; S. 8). Die Situation, die im Jahr 2005 mit diesen Worten beschrieben wurde, hat sich seit der Verabschiedung der deutschen Weltraumstrategie im Jahr 2010 durch ein enormes Wachstum des Sektors und immer größere Involvement der Privatwirtschaft im Zuge der New-Space-Initiative

noch weiter verschärft. Umso dringender ist es daher, einen gesellschaftlichen Diskurs über die übergeordnete Zielsetzung der Raumfahrt, insbesondere ihr Verhältnis zu Umwelt und Nachhaltigkeitszielen zu etablieren. Nachhaltigkeit ist eine Gemeinschaftsaufgabe, und gemeinsames, sektor- und länderübergreifendes Arbeiten erfordert Richtungssicherheit, Kommunikation und Kooperation aller involvierten Parteien. Richtungssicherheit bedeutet, dass alle Akteure, sowohl staatlich als auch in der Privatwirtschaft, eine gemeinsame Definition von Nachhaltigkeit im Kontext der Raumfahrt teilen müssen, auf der gemeinsame Ziele und Handlungen basieren. Die Erarbeitung und Verankerung dieses gemeinsamen Leitbilds ist für eine erfolgreiche Entwicklung hin zu einer nachhaltigen Nutzung des Weltraums unabdingbar.

### **Bildungsauftrag zu Chancen und Risiken der Raumfahrt**

Die Auflösung der vermeintlichen Trennung zwischen utopisch konnotierter Raumfahrt und dystopisch betrachteter Entwicklung auf der Erde muss zu den Kernzielen eines neuen Leitbilds der nachhaltigen Raumfahrt gehören. Um das vorherrschende Narrativ zu durchbrechen, müssen die im Bericht dargelegten Chancen und Risiken der Raumfahrt in ihrer Gesamtheit und unter Berücksichtigung der existierenden Unwägbarkeiten und Forschungslücken betrachtet werden. Einerseits muss herausgestellt werden, dass auch der Weltraum bei sorgloser Nutzung durch menschliches Handeln gefährdet wird und die scheinbare Unendlichkeit des Weltraums aus Nutzungssicht durchaus begrenzt ist. Andererseits sollten aber auch die vorhandenen Potenziale betont werden, die eine nachhaltige Nutzung des Weltraums bietet, um Herausforderungen auf der Erde zu begegnen.

Um einen informierten gesellschaftlichen Diskurs zu Risiken, Vorteilen und Umfang der Nutzung des Weltraums zu ermöglichen, müssen die verfügbaren wissenschaftlichen Fakten und Erkenntnisse in ihrer Gesamtheit der Öffentlichkeit zugänglich sein. Sie müssen informativ und für Menschen ohne Fachkenntnisse aufbereitet werden. Mögliche Ansatzpunkte reichen hierbei von der Verankerung in Lehrplänen bis hin zu öffentlichen Informationskampagnen. Auch prominente Gesichter der Raumfahrt mit verbrieftem Interesse an Nachhaltigkeit und Umweltthemen, wie der deutsche Astronaut Alexander Gerst (siehe Kapitel 3.2.1), könnten einbezogen werden, um Aufklärungsarbeit zu den Chancen und Risiken der Raumfahrt zu leisten.

### **Gesellschaftlicher Diskurs**

Der bisher fehlende Fokus auf Nachhaltigkeit führte dazu, dass sich die Nutzung des Weltraums primär auf den Aspekt der „Eroberung“ unbekannter Terrains konzentrierte und Beschränkungen nur darin bestanden, dass etwas technisch (noch) nicht machbar war. Auch für die Umweltbewegung war die nachhaltige Nutzung des Weltraums bisher kein relevantes Thema und wurde, anders als terrestrische Nachhaltigkeitsthemen, nicht forciert. Obwohl Klimawandel und Umweltschutz gesellschaftlich breit diskutierte Themen sind, bleiben die Umweltfolgen der Weltraumnutzung im öffentlichen Diskurs oft unberücksichtigt.

Die Beteiligung der Zivilgesellschaft an der öffentlichen Debatte über die künftige Nutzung des Weltraums ist von entscheidender Bedeutung. Ein transparenter Dialog mit Umweltorganisationen, Wissenschaftler\*innen und Vertreter\*innen verschiedener Interessengruppen kann dazu beitragen, umfassende und ausgewogene Entscheidungen zu treffen. Fragen zur Nachhaltigkeit, zur Vermeidung von Umweltschäden im Weltraum und zur gerechten Verteilung der Ressourcen im All sind Themen, die nicht nur von Fachleuten entschieden, sondern auch an die Zivilgesellschaft herangetragen werden sollten.

In diesem Kontext spielt der Deutsche Bundestag eine wichtige Rolle, als wesentliche Institution für die demokratische Legitimation neuer rechtlicher Rahmenbedingungen für die Raumfahrt in Deutschland. Die politischen Vertreter\*innen sind verantwortlich dafür, die Interessen und Bedenken der Bürger\*innen zu vertreten und sicherzustellen, dass Raumfahrtaktivitäten im Einklang mit den gemeinsamen Werten und Zielen der Gesellschaft stehen. Der Bundestag kann Debatten initiieren, Gesetze erlassen und politische Maßnahmen fördern, die sicherstellen, dass Raumfahrt nachhaltig und verantwortungsbewusst betrieben wird. Es ist daher unerlässlich, dass der Deutsche Bundestag eine Plattform für Diskussionen und Entscheidungsfindungen bietet, wo auch grundsätzliche Fragen zur Nutzung der Raumfahrt verhandelt werden können.

Insbesondere ist auch die Einbindung jüngerer Generationen in den Diskurs um die Zielsetzung der Raumfahrt und die Frage, inwiefern der Weltraum auch für den Umweltschutz auf der Erde bedeutsam sein kann, essentiell. Denn die zukünftige Nutzbarkeit des Weltraums für jene Generationen hängt von heutigen menschlichen Aktivitäten und Entscheidungen ab. Auch erst zukünftig relevante Nutzungsfelder des Weltraums sollten deshalb möglichst frühzeitig analysiert werden, um diese durch die heutigen Weltraumaktivitäten nicht unnötig einzuschränken. Dies bezieht sich zum Beispiel auf die Minimierung der möglichen Fenster eines Raketenstarts durch Weltraumschrott, den fehlenden Platz für notwendige Satellitensysteme im Erdorbit oder den Ressourcenabbau auf einem potenziell besiedelbaren Planeten. Rücksicht auf zukünftige Generationen könnte beispielsweise bedeuten, Jugendumweltverbände bei Forschungsvorhaben oder auch bei der Erarbeitung zukünftiger Regelungen zum Weltraum stärker mit einzubinden.

### **6.1.2 Wahrung der Planetary Boundaries**

Aktuelle Nachhaltigkeitsstrategien fokussieren sich zum großen Teil auf die endlichen Rohstoffvorräte der Erde. Laut dem Konzept des „Earth Overshoot Day“ des Global Footprint Networks (Global Footprint Network 2023) werden die theoretisch im Rahmen einer nachhaltigen Nutzung zur Verfügung stehenden Ressourcenmengen für ein Kalenderjahr jährlich schon deutlich vor dem Jahresende überschritten. Im Jahr 2023 sind nach dieser Berechnung die globalen Ressourcen am 2. August erschöpft gewesen (Global Footprint Network 2023). Dabei werden die Ressourcen, die die Natur erneuert, jenen Ressourcen gegenübergestellt, die die Weltbevölkerung verbraucht (Lin et al. 2023). Kritisiert wird, dass die

Berechnung jedes Jahr bei null beginnt, was bedeuten würde, dass alle „über-verbrauchten“ Rohstoffe der vergangenen Jahre nachgewachsen wären (Deutschlandfunk Nova 2023). Auch wenn die Methode Schwächen hat: Diese und vergleichbare Darstellungen endlicher Ressourcen haben dazu beigetragen, dass sich das Verständnis für planetare Grenzen in der Gesellschaft zunehmend etabliert hat. Nun wird mit dem Ressourcenabbau im Weltall eine Tür geöffnet, welche die bisherigen Nachhaltigkeitsanstrengungen gefährdet, weil die mühsam etablierten Grenzen scheinbar außer Kraft gesetzt werden: Wenn es im Weltraum noch genügend Ressourcen gibt, muss man sich auf der Erde (noch) nicht einschränken.

Dabei sind die im Weltraum verfügbaren Ressourcen keineswegs unbegrenzt: Laut einer Studie von Elvis und Milligan (2019) könnte es potenziell nur 400 Jahre dauern, bis wir uns der Erschöpfung der Ressourcen in unserem Sonnensystem nähern, wenn man (analog zum terrestrischen Ressourcenabbau) von einem exponentiellen Wachstum der extraterrestrischen Ressourcennutzung ausgeht (Elvis und Milligan 2019; siehe Kapitel 5.4.3). Eine Erweiterung des menschlichen Handlungsspielraums würde die Probleme, die durch die nicht nachhaltige Ausbeutung der Erd-Ressourcen entstanden sind, nicht lösen, sondern diese nur in die Zukunft verlagern. Neben den in Kapitel 5.4.3 dargelegten Auswirkungen, die ein extraterrestrischer Ressourcenabbau auf die Erde hätte, sind die Folgen des Abbaus von Ressourcen auf anderen Himmelskörpern noch weitgehend ungewiss. Der Ressourcenabbau auf der Erde führte zu der Anfeuerung der Industrialisierung und bewirkte die globale Erwärmung, Bodendegradierung sowie Luft- und Wasserverschmutzung. Ähnliche Folgen sind für den Rohstoffabbau auf anderen Planeten denkbar.

Der Abbau von Ressourcen im Weltraum ist extrem ressourcenaufwändig, was bei Kosten-Nutzen-Abwägungen nicht nur ökonomisch, sondern auch ökologisch mitbetrachtet werden muss. Ist der Abbau von extraterrestrischen Rohstoffen dennoch nachhaltig möglich, sollte die neue Ressourcenquelle Weltraum als Mittel kommuniziert werden, welches im Sinne der Klimawandelbekämpfung zu verwenden ist. Dies erfordert die Definition von legitimen Nutzungszielen der gewonnenen Ressourcen, bspw. um den Abbau äquivalenter Ressourcen auf der Erde zu minimieren und somit Ökosysteme und Bevölkerung zu schützen. Definiert werden muss auch die Masse an Rohstoffen, die abgebaut werden darf. Für eine solche Regulierung müssen Forschungen angestoßen werden, um Kennzahlen für einen Ressourcenabbau zu erarbeiten, der hinsichtlich der betroffenen Umwelt, aber auch kommender Generationen nachhaltig ist. Denkbar ist hier der Einsatz von digitalen Zwillingen, mit denen auch Simulationen von Ressourcenabbauprozessen und Liefer- bzw. Transportketten möglich wären. Nach Erreichung des angestrebten Ziels müssten die Folgen evaluiert werden, um ein weiteres, an Nachhaltigkeitsprinzipien ausgerichtetes Vorgehen festzulegen.

### 6.1.3 Vorsorgeprinzip in der Weltraumnutzung

Die Erfahrungen aus der (Über-)Nutzung der Umweltmedien auf der Erde sollten in die Richtlinien für die Exploration des Weltraums einfließen,

damit die Nutzung des Weltraums von vornherein so gelenkt werden kann, dass negative Folgen für die Umwelt und künftige Generationen weitgehend vermieden werden. Dazu ist die Beachtung des Vorsorgeprinzips unerlässlich. Das Umweltbundesamt unterscheidet bei der Definition des Vorsorgeprinzips Risikovorsorge und Ressourcenvorsorge (Umweltbundesamt (UBA) 2021b):

- ▶ Unter Risikovorsorge wird verstanden, dass „bei unvollständigem oder unsicherem Wissen über Art, Ausmaß, Wahrscheinlichkeit sowie Kausalität von Umweltschäden und -gefahren vorbeugend zu handeln [sei], um diese von vornherein zu vermeiden“ (Umweltbundesamt (UBA) 2021b). Dieser Ansatz findet sich auch in der „Rio-Erklärung über Umwelt und Entwicklung“ der Vereinten Nationen von 1992: „Drohen schwerwiegende oder bleibende Schäden, so darf ein Mangel an vollständiger wissenschaftlicher Gewissheit kein Grund dafür sein, kostenwirksame Maßnahmen zur Vermeidung von Umweltverschlechterungen aufzuschieben“ (United Nations (UN) 1992, Grundsatz 15).

In Bezug auf die Nutzung des Weltraums setzt die Einhaltung des Risikovorsorgeprinzips voraus, dass die beteiligten Akteure ihr Handeln an gesicherten wissenschaftlichen Erkenntnissen ausrichten und unregulierte Nutzung eingeschränkt wird. Nur so ist es möglich, auch aktuell noch nicht absehbare Auswirkungen der Nutzung des Weltraums möglichst gering zu halten und eine nachhaltige Nutzung zu ermöglichen. Dies würde eine Selbstbeschränkung der Menschheit im Weltraum und den Verzicht auf eine umfassende Nutzung des Weltraums bedeuten (siehe Kapitel 6.1.4), solange keine nachhaltigen Technologien zur Verfügung stehen, mit denen Umweltschäden nachweislich vermieden werden können. In diesem Kontext ist umfassendes Wissen über die Umweltwirkungen der eingesetzten technischen Systeme wichtig (siehe Kapitel 6.3), um Risikoanalysen für Raumfahrtprojekte zu erstellen und einzuschätzen, ob diese unter Einhaltung des Vorsorgeprinzips umgesetzt werden können.

- ▶ Ressourcenvorsorge bedeutet den schonenden Umgang mit natürlichen Ressourcen, um diese für die Zukunft zu erhalten (Umweltbundesamt (UBA) 2021b). In Bezug auf den Weltraum ist dies sowohl auf den begrenzten, verfügbaren Platz im Erdorbit anwendbar (siehe Kapitel 3.3.1) und macht die Vermeidung und Entfernung von Weltraumschrott notwendig (siehe Kapitel 4.2.4 und Kapitel 6.4), gilt aber gleichermaßen auch für den Ressourcenabbau im Weltraum (siehe Kapitel 5.4). Zum einen sind auch Ressourcen im Weltall letztlich nicht unendlich verfügbar, zum anderen hätte extraterrestrischer Ressourcenabbau Implikationen für den Umgang mit den verfügbaren Ressourcen auf der Erde. Um den Ressourcenverbrauch im Weltraum zu überwachen und zu begrenzen, ist die Einrichtung einer internationalen Regulationsbehörde notwendig (siehe Kapitel 6.2.1).

Als Beispiel für die Anwendung beider Prinzipien kann der Umgang mit dem Einfluss der Raumfahrt auf die Ozonschicht dienen. Die Ozonschicht in der Stratosphäre filtert den Großteil der für den Menschen und andere Lebewesen schädlichen UV-Strahlung des Sonnenlichts und ist damit für

das Leben auf der Erde existenziell (European Commission o.J. c). Wie bereits an anderer Stelle ausgeführt, haben verschiedene Raumfahrttechnologien schädlichen Einfluss auf die Ozonschicht: Bestimmte Emissionen bei der Verbrennung von Raketentreibstoffen bauen Ozon ab (siehe Kapitel 4.2.3) und das Verglühen von Weltraumschrott setzt Ozon-schädliche Stoffe frei (siehe Kapitel 4.2.4). Beide Wirkungen werden durch die direkte Einbringung der Schadstoffe in die Ozonschicht beim Raketenstart bzw. beim De-Orbiting weiter verstärkt. Die Erforschung dieser Wechselwirkungen ist allerdings noch nicht umfassend abgeschlossen (Chanoine et al. 2017). Hinsichtlich der Risikovorsorge wäre es daher angebracht, das Volumen Ozon-schädigender Weltraummissionen möglichst weit zu reduzieren und weitere Forschung zum Thema anzuregen und deren Ergebnisse zu berücksichtigen. Im Rahmen der Ressourcenvorsorge ist ein Erhalt der Ozonschicht für kommende Generationen elementar, so dass auch aus dieser Perspektive eine Einschränkung der schädigenden Verhaltensweisen notwendig ist.

Beide Komponenten des Vorsorgeprinzips müssen also bei der zukünftigen Nutzung des Weltraums Berücksichtigung finden, um sowohl bereits bekannte als auch unabsehbare Risiken der Weltraumnutzung für Umwelt und Ressourcen und somit auch für zukünftige Generationen zu minimieren.

#### **6.1.4 Den Weltraum durch Suffizienz vor dem Anthropozän schützen**

Im Jahr 2000 sprach der Nobelpreisträger für Chemie Paul J. Crutzen erstmals vom Zeitalter des Anthropozäns (Will 2021; S. 11). Dieser Begriff soll zum Ausdruck bringen, dass menschliche Aktivitäten zu einem geologischen Faktor geworden sind, der die Beschaffenheit des Planeten so stark verändert, dass diese Veränderungen ein neues Erdzeitalter eingeleitet haben. Dies ist vor allem auf die derzeitigen Produktions- und Konsummengen zurückzuführen. Die Reduktion dieser Kennzahlen ist das oberste Gebot der Suffizienz. Suffizientes Handeln zielt auf die Einsparung von Material und Energie. Es geht also nicht um eine effizientere Produktion, die durch Rebound-Effekte regelmäßig zu gesteigerter Produktion und damit zur Negierung der erreichten Ressourceneinsparungen führt, sondern es geht um tatsächliche Restriktionen (s. z.B. Bund für Naturschutz und Umwelt in Deutschland (BUND) o.J.). Dies ist ein wichtiger Grundsatz im Hinblick aufzunehmende Raumfahrtaktivitäten. Denn mit der derzeitigen, dem Nutzungsandrang nicht gewachsenen Regulierung laufen wir Gefahr, den Weltraum analog zur Erde umfassend und unwiderruflich zu verändern, bevor etwaige Folgen erforscht und absehbar sind (siehe Kapitel 6.1.3).

#### **Weltraum als Schutzgut**

Um dies zu verhindern, muss der Weltraum als Schutzgut definiert werden. Neben dem Menschen und seiner Gesundheit, den Tieren, Pflanzen, der biologischen Vielfalt, den Umweltmedien (wie Luft, Boden etc.), dem kulturellen Erbe und anderen Gütern von herausragender gesellschaftlicher Bedeutung ist auch der Weltraum ein einzigartiges, schützenswertes Gut. Der Weltraum bietet einzigartige Möglichkeiten für die wissenschaft-

liche Forschung, und seine nachhaltige Nutzung kann zur Lösung von Problemen auf der Erde beitragen. Nur wenn der Weltraum durch politische Maßnahmen geschützt wird, kann sichergestellt werden, dass auch zukünftige Generationen im gleichen Maße von den Potenzialen des Weltraums profitieren können. Der Schutz des Weltraums sollte Maßnahmen zur Erhaltung, Schadensverhütung und Wiederherstellung umfassen, um seinen unberührten Zustand weitestmöglich zu erhalten. Der Schutz des Weltraums im Sinne der gesamten Menschheit sollte hierbei klaren Vorrang vor nationalen oder privatwirtschaftlichen Interessen haben.

Zu den Schutzmöglichkeiten gehört beispielsweise, den Erdorbit von weiterem Weltraumschrott freizuhalten, welcher ohne Gegensteuerung für künftige Generationen ein erhebliches Problem bei der Nutzung des Weltraums darstellen wird (siehe Kapitel 4.2.4). Auch die Unberührtheit bestimmter Regionen im Weltraum kann geschützt werden, etwa indem sogenannte „planetary parks“ in morphologisch diversen Regionen z. B. auf dem Mond und Mars definiert werden, wo menschliche Aktivität untersagt wird (Horneck und Cockell 2010). Und auch die Erweiterung von Schutzgütern auf der Erde kann Einfluss auf die Nutzung des Weltraums haben: Die bereits existierende „Dark & Quiet Skies Initiative“ sensibilisiert für die Lichtverschmutzung auf der Erde durch Satelliten – ein Problem für Menschen, Pflanzen und Tiere – ist aber noch nicht rechtsverbindlich verankert. Derartige Ansätze würden von einer Ausweisung des Weltraums als Schutzgut im Sinne einer Richtliniensetzung profitieren, genau wie die Forschung und weiterführende Gesetzgebung zum Weltraum generell.

### **Selbstbeschränkung in der Raumfahrt**

Die Berücksichtigung des Suffizienzprinzips bedeutet zwangsläufig auch, dass hinsichtlich der Nutzung des Weltraums Grundsatzfragen verhandelt werden müssen. Die in diesem Bericht dargelegten Kosten, Ungewissheiten und Risiken der derzeitigen Raumfahrtaktivitäten stehen im Widerspruch zum Ziel der Reduzierung des Ressourcenverbrauchs. Vor diesem Hintergrund muss hinterfragt werden, inwiefern jenseits des Einsatzes nachhaltigerer Technologien und der Schaffung nachhaltigkeitsorientierter Rahmenbedingungen nicht in vielen Fällen schlicht ein Verzicht auf Raumfahrtaktivitäten geboten ist. Dies gilt umso mehr, als dass die enormen Mengen ökonomischer, menschlicher und materieller Ressourcen ebenso der Lösung irdischer Probleme zugutekommen könnten, etwa für den Schutz fragiler Ökosysteme (Regenwälder, Meere) – zumal auch diese im uns bekannten Universum einzigartig und unersetzlich sind.

Die Anwendung des Suffizienzprinzips in der Nutzung des Weltraums müsste dabei keinen vollständigen Verzicht auf die Raumfahrt bedeuten, erfordert aber eine genaue Abwägung von Kosten und Nutzen jeder einzelnen Mission – nicht nur für den Menschen, sondern auch für die Umwelt. Während insbesondere Satellitenmissionen, die z. B. der Analyse des Klimawandels dienen, in diesem Kontext weiter gerechtfertigt sein könnten, wäre bei Missionen mit größeren Kosten und Umweltwirkungen sowie unklarem Ausgang und Nutzen, wie einer Besiedlung des Mars,

eine grundlegendere Analyse der Notwendigkeit für die Menschheit angebracht.

### **Weltraumtourismus verbieten**

Besonders kritisch ist unter den genannten Maßgaben von Vorsorgeprinzip, Selbstbeschränkung und Suffizienz die Entwicklung des Weltraumtourismus zu betrachten. Denn bei dieser Variante der Raumfahrt entstehen zwar alle im Bericht ausgeführten negativen Umweltwirkungen, allerdings wird keinerlei Nutzen für die Allgemeinheit generiert, und keines der Nutzungspotenziale der Raumfahrt kommt zum Tragen. Das begrenzte Marktsegment Weltraumtourismus ist bislang mit enormen Kosten verbunden und bleibt daher einer besonders einkommensstarken Zielgruppe vorbehalten (siehe Kapitel 5.1.2). Dennoch ist auch hier mit weiterem Wachstum zu rechnen. Vor diesem Hintergrund sollte der Weltraumtourismus strengstens reguliert oder komplett verboten werden, da er im fundamentalen Widerspruch zu einer nachhaltigen Nutzung des Weltraums steht.

## **6.2 Politische Regulation stärken und ausweiten**

### **6.2.1 Aufbau internationaler Governancestrukturen**

Der Zugang zum Weltraum kann bislang nur national reguliert werden (z. B. über Auflagen bei Genehmigungsverfahren). Für staatliche Akteure gilt laut Weltraumvertrag die Freiheit der Weltraumnutzung bei Beachtung der Nichtdiskriminierung und Gleichberechtigung anderer Staaten (siehe Artikel 1 des Weltraumvertrags). Nicht-staatliche Akteure sind gemäß Artikel 6 hingegen auf eine staatliche Zulassung angewiesen, um eine Einhaltung der Regularien des Weltraumvertrags sicherzustellen. Freiwillige Labels, wie das „Space Sustainability Rating“, welches im Juni 2022 veröffentlicht wurde, sollen Akteure dazu motivieren, nachhaltiger zu agieren (World Economic Forum 2023). Nachhaltigkeitsrichtlinien für die Nutzung des Weltraums müssten jedoch rechtsverbindlich festgelegt werden, um ihre Umsetzung sicherzustellen. Nationale Maßnahmen sind in diesem Sinne zwar bezüglich der Durchführung und der Kontrolle sinnvoll, angesichts der globalen Umweltwirkungen und Implikationen der Raumfahrt sollte die Regulierung der Raumfahrt aber auf internationaler Ebene erfolgen. Dies gilt umso mehr, als dass rein nationale Regelungen Anreiz für Unternehmen sind, ihre Geschäftstätigkeiten in wenig reglementierten Staaten anzusiedeln. Ein weiterer Grund, weshalb eine internationale Übereinkunft zwingend erforderlich ist, ist die Tatsache, dass die im Weltraum vorhandenen Ressourcen von internationalem Interesse sind.

Im Weltraum hat kein einzelner Staat das Hoheitsrecht – und die bisherige internationale Regulierung werden dem steigenden Nutzungsinteresse nicht gerecht. Obwohl Staaten bereits national Verantwortung übernehmen, um Weltraumvorhaben privater Unternehmen zu regulieren,

könnte eine internationale Beschränkung der Nutzung des Weltraums die wirtschaftliche Entwicklung steuern. Die Erdumlaufbahn könnte als gemeinsames Gut der Menschheit von allen Staaten gleichberechtigt genutzt werden. Eine andere Möglichkeit liegt in einer Übereinkunft zur wirtschaftlichen Nutzung des Weltraums. So könnte die Erdumlaufbahn wirtschaftlich wie auch steuerlich als gemeinsames Gut definiert werden, das durch Vertreter\*innen aller Staaten verwaltet wird. Eine derartige Übereinkunft sollte zwingend auf einer internationalen Nachhaltigkeitsstrategie beruhen. Vorbild für die Einrichtung der hierfür notwendigen internationalen Regulationsbehörde könnte die Internationale Meeresbodenbehörde (International Seabed Authority, ISA) sein, die den Rohstoffabbau in den Weltmeeren reguliert.

UN-Generalsekretär António Guterres stellte 2021 den Report „Unsere Gemeinsame Agenda“ vor (Secretary-General of the United Nations (UNSG) 2021). Im zugehörigen Kurzdossier 7 „Für die gesamte Menschheit – Die Zukunft der Verwaltung von Weltraumaktivitäten“ werden den UN-Mitgliedstaaten zwei Optionen empfohlen, um das Potenzial des Weltraums für die Erreichung der SDGs zu nutzen und gleichzeitig Risiken zu mindern (United Nations (UN) 2023; S. 23):

- ▶ Einerseits könnte der Ausschuss für die friedliche Nutzung des Weltraums (COPUOS) ein einheitliches Regelwerk entwickeln, um die Nachhaltigkeit im Weltraum zu fördern. Dadurch könnten Transparenz, Vertrauensbildung und Interoperabilität von Weltraummissionen gestärkt werden.
- ▶ Andererseits könnte der Ausschuss für die friedliche Nutzung des Weltraums auch separate Regelungsrahmen für verschiedene Aspekte der Nachhaltigkeit im Weltraum erarbeiten. Diese Rahmenwerke würden getrennte, aber sich gegenseitig verstärkende Maßnahmen beinhalten und müssten in Kooperation mit den maßgeblichen UN-Organen erarbeitet werden. Inhaltlich sollten sie sich mit der Regulierung des Weltraumverkehrs, der Beseitigung von Weltraumschrott und dem Abbau von Weltraumressourcen befassen. Zudem wäre ein internationaler Koordinierungsmechanismus erforderlich, um die Anwendung dieser verschiedenen Regelwerke unter Berücksichtigung der bereits bestehenden Weltraumverträge der UN zu koordinieren.

Große Bedeutung wird in beiden Fällen der breiten Einbindung operationeller Interessenträger beigemessen, für deren Beteiligung eine Plattform eingerichtet werden soll. Angesichts der steigenden Relevanz nicht-staatlicher Akteure in der Raumfahrt werden die Mitgliedsstaaten zudem angehalten, eine inklusive Beteiligung von Akteuren aus Wirtschaft, Zivilgesellschaft und anderen maßgeblichen Kontexten an zwischenstaatlichen Prozessen zu erleichtern, die den Weltraum betreffen (United Nations (UN) 2023; S. 23).

Neben staatlichen und internationalen Regulierungen bieten auch Selbstverpflichtungen der Industrie eine Möglichkeit, die Raumfahrt nach-

haltiger zu gestalten. Zudem sollte eine umfassende Verpflichtung zum Nachhaltigkeits-Reporting im Raumfahrtsektor etabliert werden, dessen Akteure bisher noch zu großen Teilen bezüglich ihrer Umweltwirkungen intransparent agieren.

Internationale Zusammenarbeit sowohl in der Wissenschaft als auch in der Wirtschaft und Politik stellt die Grundlage für Nachhaltigkeitsbestrebungen bei der Nutzung des Weltraums dar. Nur unter dieser Maßgabe ist die Umsetzung der in diesem Bericht erarbeiteten politischen Ansatzpunkte im notwendigen Maße denkbar.

### 6.2.2 Agenda 2030 und Sustainable Development Goals

Ein weiterer Ansatz für die Regulation der Weltraumnutzung ist die konsequente Anwendung der Grundsätze der Agenda 2030. Das Ziel der Agenda 2030 ist es, eine nachhaltige Entwicklung weltweit zu fördern, indem ökonomische, soziale und ökologische Aspekte miteinander verknüpft werden. In der Agenda 2030 sind 17 Sustainable Development Goals (SDGs) vereinbart, die als messbare Ziele für nachhaltige Entwicklung, Zusammenarbeit und Umweltschutz angelegt sind und für alle Länder der Welt gelten.

Der Weltraum ist bisher nicht explizit in der Agenda 2030 verankert, allerdings lassen sich viele Teilaspekte der menschlichen Nutzung des Weltraums einzelnen SDGs zuordnen. Möglichkeiten der extraterrestrischen Energiegewinnung (siehe Kapitel 5.4.3) berühren beispielsweise SDG 7 (bezahlbare und erneuerbare Energie), die Überlegungen zum gerechten Zugang und stärkerer Regulierung knüpfen an SDG 16 (Frieden, Gerechtigkeit und starke Institutionen) und SDG 17 (Partnerschaften zur Erreichung der Ziele) an. Und die Ziele der SDGs 9 (Industrie, Innovation und Infrastruktur), 12 (nachhaltige/r Konsum und Infrastruktur) und 13 (Maßnahmen zum Klimaschutz) ziehen sich durch alle Aspekte des vorliegenden Berichts.

Die UN-Generalversammlung verabschiedete am 25. Oktober 2021 eine vom UNOOSA vorgelegte Resolution mit dem Titel „The ‚Space2030‘ Agenda: space as a driver of sustainable development“, die explizit die Nutzung des Weltraums zum Erreichen der SDGs in den Fokus rückt (United Nations (UN) 2021). Sie formuliert vier Kernziele:

1. Steigerung des wirtschaftlichen Nutzens der Raumfahrt und Stärkung der Rolle des Raumfahrtsektors als wichtiger Motor für eine nachhaltige Entwicklung;
2. Nutzung des Potenzials der Raumfahrt zur Lösung alltäglicher Herausforderungen und Nutzung raumfahrtbezogener Innovationen zur Verbesserung der Lebensqualität;
3. Verbesserung des Zugangs zum Weltraum für alle und Sicherstellung, dass alle Länder sozioökonomisch von wissenschaftlichen und technologischen Weltraumanwendungen sowie weltraumgestützten

Daten, Informationen und Produkten profitieren können, um so die Erreichung der Ziele für nachhaltige Entwicklung zu unterstützen;

4. Aufbau von Partnerschaften und Stärkung der internationalen Zusammenarbeit bei der friedlichen Nutzung des Weltraums und bei der globalen Steuerung von Weltraumaktivitäten.

Diese Ziele sind stark auf eine Nutzung des Weltraums im Sinne der SDGs ausgerichtet. Relevante weitere Aspekte, wie die Einhaltung des Vorsorgeprinzips und ein nachhaltiger Umgang mit dem Weltraum an sich, sind nicht abgedeckt. Eine eventuelle Aktualisierung der Agenda 2030 sollte daher darüber hinaus gehen und den Weltraum in das bestehende Framework integrieren, um ihm die gleichen Schutzbestimmungen zuteilwerden zu lassen wie den terrestrischen Schutzgebieten. Dies würde auch eine integrierte Betrachtung und Berücksichtigung der Nutzung des Weltraums im Kontext der globalen Nachhaltigkeitsfragen ermöglichen – als Schutzgut aber auch, wo möglich, als Treiber für positive Entwicklungen hin zu mehr Nachhaltigkeit.

### 6.2.3 Nationales Weltraumrecht

Auf nationaler Ebene ist ein umweltpolitisches Agenda-Setting zum Weltraum dringend notwendig. In Deutschland dauert die Diskussion über ein nationales Weltraumgesetz weiter an: Im Jahr 2019 veröffentlichte der Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. (BDI) seine Berliner Weltraumerklärung mit acht Handlungsempfehlungen an die Politik, um Wettbewerbsfähigkeit im Zukunftsmarkt Weltraum zu garantieren. Ziel eines solchen Gesetzes sollte sein, „nationale kommerzielle Aktivitäten zu schützen, zu befördern und gleichzeitig justiziabel zu machen, auch mit Blick auf potenzielle Auswirkungen auf andere Staaten oder deren Raumfahrtinfrastruktur“ (Wachter et al. 2019; S. 13). Als Nachfolger der Raumfahrtstrategie von 2010 wurde 2023 eine neue Raumfahrtstrategie vorgelegt, in der auch das Thema Weltraumschrott und die satellitengestützte Erdbeobachtung eine Rolle spielen. Die Erdbeobachtung soll Veränderungen in den Umweltmedien sichtbar machen, um diese Erkenntnisse für den Klimaschutz zu nutzen. In der Frage, ob die deutsche Raumfahrt auf nationaler oder europäischer Ebene zu regulieren sei, herrscht allerdings Uneinigkeit (Sürig 2021a).

Die derzeit laufende Aktualisierung der deutschen Weltraumstrategie sowie der angedachte Entwurf eines Weltraumgesetzes (siehe Kapitel 3.2) bieten die Möglichkeit, die nachhaltige Nutzung des Weltraums zunächst auf nationaler Ebene zu verankern. Während dies für eine Transformation der Nutzung des Weltraums allein nicht ausreichen wird, wäre dieser Schritt trotzdem ein wichtiges politisches Signal und könnte anderen Nationen als Vorbild dienen. Ein internationaler Konsens wäre wiederum Voraussetzung für die Schaffung internationaler Regulierungen.

## 6.3 Nachhaltigkeit von Infrastruktur und technischen Systemen

Die meisten Umweltauswirkungen der heutigen Raumfahrt entstehen als direkte Folge der eingesetzten technischen Systeme. Deshalb hat eine Regulierung, die an der Gestaltung und Umsetzung der technischen Aspekte der Raumfahrt ansetzt, direkte Auswirkungen auf das Ausmaß, in dem eine Zunahme der Raumfahrtaktivitäten die Umwelt auf der Erde und im Weltraum schädigt. Neben der Regulierung umweltschädigender Technologien sollte der politische Fokus, angesichts des Bedarfs an neuen Systemen für eine nachhaltigere Nutzung des Weltraums, auch auf der Forschung und Förderung von nachhaltigen Innovationen liegen, die gesellschaftliche und ökologische Probleme adressieren und nicht nur dem technischen Fortschritt an sich dienen.

### 6.3.1 Verpflichtende Ökobilanzierung der Bodeninfrastruktur

Im Kontext der Bodeninfrastruktur kann eine verpflichtende umfassende Ökobilanzierung dazu beitragen, die Umweltwirkungen künftiger Neubauten besser mit dem zu erwartenden Nutzen abzugleichen und auf diesem Weg eine Weiternutzung bestehender Systeme zu begünstigen. Die Bilanzierung sollte dabei nicht nur den Bau, sondern auch den Betrieb und den Rückbau, also die gesamte Lebensdauer der Infrastruktur umfassen. Neben direkt mit der Raumfahrt verbundenen Gebäuden und Infrastrukturen wie Startplätzen, Forschungsanlagen etc. sollten hier auch Datenarchive und Cloud-Infrastrukturen berücksichtigt werden, die für die Auswertung der anfallenden Datenmengen benötigt werden und im Betrieb erhebliche Energiemengen verbrauchen. Auf dieser Grundlage sollten auch die resultierenden Produkte ökobilanziert werden, da mit ihrer Berechnung und Speicherung Energieverbrauch und Emissionen verbunden sind. Mögliche Fehlstarts und Komplikationen vor dem Start könnten ebenfalls in die Bilanzierung einbezogen werden, da diese zum Teil erhebliche Umweltschäden verursachen.

### 6.3.2 Entwicklung alternativer Treibstoffe

Ein erheblicher Teil der Umweltwirkungen eines Raketenstarts entsteht durch das Verbrennen des Treibstoffs in der Startphase (siehe Kapitel 4.2.3). Die beschriebenen, bereits in der Entwicklung befindlichen alternativen Treibstoffe, sind teilweise sowohl in ihrer Herstellung als auch bezüglich der Emissionen während der Verbrennung umweltfreundlicher als die bisher genutzten Varianten. Außerdem ist insbesondere die Auswirkung von Raumfahrtemissionen auf die obere Atmosphäre (inklusive Ozonschicht) von Relevanz.

In Hinblick auf die Wechselwirkungen zwischen der Hochatmosphäre und den beim Start sowie beim Wiedereintritt von Raumfahrzeugen in die Atmosphäre entstehenden Emissionen besteht derzeit eine Forschungslücke. Diese muss geschlossen werden, um die Folgen des zu erwartenden Anstiegs der Weltraumnutzung in diesem Bereich akkurat bemessen zu können. Schon die bekannten Effekte (z. B. CO<sub>2</sub>-Emissionen) bieten aber durch ihre steigende Relevanz und Menge Anlass zur Regu-

lierung. Diese kann analog zur internationalen zivilen Luftfahrt erfolgen, indem Emissionen der Raumfahrt etwa in das Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA) (Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) 2021) eingebunden werden, oder in das Europäische Emissionshandelssystem EU-EHS (European Commission o.J. d). Bei der Entwicklung von alternativen Treibstoffen sollte sichergestellt werden, dass die verwendeten Chemikalien den „Safe and Sustainable by Design“-Kriterien der EU entsprechen (s. European Commission, Joint Research Centre et al. 2022) und darüber hinaus zum EU-Aktionsplan zur „Zero Pollution Ambition“ (European Commission 2021b) beitragen.

Für eine umfassende Regelung unter Berücksichtigung aller potenziellen Risiken ist weitere Forschung zu den Umweltwirkungen in der Atmosphäre notwendig. Aus der Forschung an alternativen, umweltverträglicheren Treibstoffen können sich zudem auch relevante Innovationen für den Verkehrssektor auf der Erde ergeben.

### 6.3.3 Nachhaltige Produktionsanlagen

Im Rahmen der Verbringung in den Weltraum der für die Raumfahrt verwendeten Systeme (Trägerraketen, Raumfahrzeuge, Satelliten etc.) entstehen Emissionen. Doch bereits bei ihrer ressourcenaufwendigen Produktion erzeugen sie Umweltwirkungen (siehe Kapitel 4.2.2). Diesem Problem kann begegnet werden, indem die in Kapitel 6.3.1 geforderte Ökobilanzierung zur nachhaltigen Umgestaltung der bestehenden Systeme herangezogen wird. Denkbar sind etwa eine Energieversorgung aus erneuerbaren Quellen, Optimierungen bei Kühl- und Wärmemanagement oder auch die gemeinsame Nutzung von Produktionsanlagen durch verschiedene Akteure, um die Zahl von kosten- und ressourcenintensiven Neubauten zu reduzieren. Zudem sollte bei der Errichtung neuer Standorte auch der Einfluss auf die bestehende Umwelt stärker berücksichtigt werden, um Umweltwirkungen in besonders gefährdeten Ökosystemen zu vermeiden.

### 6.3.4 Chancen und Grenzen der Weltraumkreislaufwirtschaft

Bisherige Raumfahrtsysteme sind oft für die einmalige Verwendung konzipiert und werden nach ihrer Nutzung entweder kontrolliert zum Eintritt in die Atmosphäre gebracht, wo sie teilweise verglühen und durch die Freisetzung von Abbauprodukten die Zusammensetzung der Atmosphäre verändern; oder sie verbleiben im Weltraum, wo sich im niedrigen Erdorbit zunehmend mehr Weltraumschrott akkumuliert (siehe Kapitel 4.2.4). Vor diesem Hintergrund sollten Möglichkeiten in den Fokus genommen werden, die benötigten Systeme recycelbar oder mehrfach nutzbar zu machen. Neben den in Kapitel 4.2.4 aufgeführten Forschungsansätzen wäre eine grundlegende Umstrukturierung der Raumfahrt im Sinne der Kreislaufwirtschaft denkbar, sodass eingesetzte Systeme und Ressourcen wiederverwendet werden können.

Während es sich hierbei um eine sinnvolle theoretische Überlegung handelt, muss ihre Umsetzbarkeit insbesondere mit Hinblick auf den Stand irdischer kreislaufwirtschaftlicher Bestrebungen kritisch betrachtet werden. Diese sind erwiesenermaßen durch physikalisch-technische Fakto-

ren begrenzt, und das Konzept der Kreislaufwirtschaft hat schon auf der Erde bisher keine weitreichende Verbreitung gefunden. Eine Umsetzung einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft unter ungleich schwierigeren Bedingungen im Weltraum wäre demnach noch deutlich komplexer.

Dennoch bietet die Berücksichtigung kreislaufwirtschaftlicher Grundsätze bei der Entwicklung neuer Technologien die Chance, im Vergleich zum Status Quo Umwelt und Ressourcen zu schonen und zumindest Teilaspekte der Raumfahrt durch z. B. recycelbare technische Systeme umweltverträglicher zu gestalten. Im Vergleich zur Erde können hier insbesondere wirtschaftliche Aspekte eine Rolle spielen, da eine Wieder- oder Weiterverwendung der oft extrem kostspieligen Technologien, sofern technisch umsetzbar, auch im Sinne der Betreiber wäre.

### 6.3.5 Neue Nutzungskonzepte fördern

Auch die Nutzung des Weltraums bietet Potenziale für eine vermehrte Berücksichtigung nachhaltiger Aspekte. Durch so genanntes Ride Sharing lassen sich Umweltwirkungen reduzieren: Dabei transportiert man mehrere Nutzlasten mit einer gemeinsam genutzten Rakete in den Weltraum und spart so Ressourcen und Emissionen. Satellitenkonstellationen müssen im Sinne der Nachhaltigkeit gleichzeitig von verschiedenen Nutzern bzw. zu verschiedenen Zwecken genutzt werden, was die Menge notwendiger Satelliten reduziert. Ride Sharing ist bereits eine etablierte Praxis für die Verbringung von kommerziell genutzten Satelliten in den LEO, etwa durch das deutsche Unternehmen Exolaunch (Exolaunch 2022), sollte aus Umweltsicht aber zur primären oder einzigen Methode zur Verbringung von Nutzlasten ins All werden. Wirtschaftliche Anreize können hier zu noch mehr Kooperation bei der Nutzung der technischen Systeme führen. Auch eine Regulierung ist denkbar, aber unter marktwirtschaftlichen Bedingungen schwer umsetzbar.

Neben der geteilten Nutzung von Raumfahrzeugen bietet insbesondere auch die gemeinsame Nutzung von Herstellungs- und Betriebsinfrastruktur eine weitere Chance, Ressourcen und Emissionen einzusparen. Dieses Vorgehen wäre grundsätzlich bei sämtlichen in Kapitel 4.1.1 Anlagen denkbar und würde neben den positiven Umwelteffekten auch kleineren Akteuren Zugang zu Infrastruktur ermöglichen, die für einzelne Akteure nicht wirtschaftlich wäre. Auch hier könnten wirtschaftliche Anreize ein Mittel sein, um vermehrte Kooperation in der Raumfahrt zu etablieren (McKinsey & Company und World Economic Forum 2022).

Im Sinne von Suffizienz und Effizienz lässt sich der Fokus auf eine optimalere Nutzung der verwendeten Ressourcen legen und die Sinnhaftigkeit immer neuer Systeme und der damit verbundenen Umweltfolgen hinterfragen. Dies würde auch den zunehmend „vollen“ und dadurch schwieriger zu nutzenden Erdorbit entlasten, was wiederum sowohl die gegenwärtige, als auch die zukünftige Nutzung des Weltraums erleichtern bzw. überhaupt ermöglichen würde. Zudem könnte der durch die Haltung der riesigen, von einer stetig wachsenden Anzahl an Satelliten produzierten Datenmengen anfallende Ressourcenverbrauch reduziert werden. Zu den Umweltwirkungen, die ein solches Vorgehen nach sich

ziehen würde, zählt auch eine reduzierte Lichtverschmutzung durch Satelliten, die zum einen Lebewesen auf der Erde negativ beeinflusst, die sich z. B. am Sternenhimmel orientieren, und zum anderen die menschliche Fähigkeit zur Beobachtung des Weltraums einschränkt.

## 6.4 Umgang mit Weltraumschrott

Die steigende Nutzung der Erdumlaufbahn minimiert den zur Verfügung stehenden Platz im Erdorbit, der sich zunehmend als endliche Ressource herausstellt (siehe Kapitel 3.3.1). Neben intakten Satelliten machen defekte oder am Ende ihres Lebenszyklus abgeschaltete Satelliten einen großen Teil der künstlichen Objekte im Erdorbit aus. Die Gesamtmenge der Objekte erhöht die Kollisionsgefahr für im Betrieb befindliche Systeme stark. In den Steuerungszentralen auf der Erde sind so zunehmend mehr Eingriffe vonnöten, die wiederum Ressourcen verbrauchen.

Die Beseitigung von existierendem Weltraumschrott und die Regulierung neu in den Weltraum verbrachter Objekte ist nicht nur notwendig, um unabsehbare Folgen von Kollisionen zu vermeiden, sondern auch, weil Kommunikations- und Erdbeobachtungssatelliten mit ihren vielfältigen Anwendungen und Umweltpotenzialen auf die Nutzung der erdnahen Umlaufbahnen angewiesen sind. Zudem verkleinern sich die Fenster für zukünftige Raketenstarts durch die steigende Menge an Weltraumschrott, was den Handlungsspielraum kommender Generationen im Weltraum einschränkt.

Zwar existieren bereits politische Instrumente, die das Problem des Weltraumschrotts aufgreifen (Guidelines for the Long-Term Sustainability of Outer Space Activities – Kapitel 3.3.1, Space Debris Mitigation Guidelines – Kapitel 4.2.4), die Umsetzung der dort formulierten Ziele ist aber bisher nicht ausreichend. Angesichts zunehmender Raumfahrtaktivitäten wird dies zu einem immer größeren Problem, das politischer Nachbesserung bedarf – etwa indem die bisher freiwilligen Guidelines gesetzlich festgeschrieben werden. Die Regulierung muss dabei auf internationaler Ebene erfolgen – zum einen, um dem Erdorbit als Gebiet von globaler Bedeutung gerecht zu werden, zum anderen, da die Kooperation sämtlicher Raumfahrtakteure vonnöten ist, um die Problematik des Weltraumschrotts lösen zu können.

### 6.4.1 Verbot von neuem Weltraumschrott

Um die gegenwärtige Lage im Erdorbit unter Kontrolle bekommen zu können, ist es im ersten Schritt notwendig, den Zuwachs von neuem Weltraumschrott so vollständig wie möglich einzuschränken. Dies kann mit einer Reduzierung der Anzahl in den Weltraum verbrachter Systeme gelingen, entweder durch eine Einschränkung der zugelassenen Raketenstarts oder einen Fokus auf die Nutzung eines Satelliten für verschiedene Zwecke, sodass Nutzungen gebündelt werden, die bisher mehrere Starts und Satelliten erfordern würden.

Zusätzlich müssen aber auch Richtlinien dafür geschaffen werden, wie mit Satelliten am Ende ihres Lebenszyklus zu verfahren ist. Der bisherige Ansatz, sie an Ort und Stelle zu belassen, führte zum gegenwärtigen Problem des Weltraumschrotts auf relevanten Erdorbits. Sämtliche neu in den Weltraum verbrachten Satelliten müssen daher verbindlich mit End-of-Life-Technologien ausgestattet werden, die eine Entfernung des Objekts aus dem Erdorbit am Ende seiner Lebenszeit ermöglichen. Die Satelliten müssen durch kontrolliertes Absenken in die Erdatmosphäre zum Verglühen gebracht werden – auch wenn dieses Vorgehen mit eigenen negativen Umweltwirkungen behaftet ist (siehe Kapitel 4.2.4). Vor diesem Hintergrund muss neben einer Überarbeitung der eingesetzten Technologien hin zu mehr Nachhaltigkeit auch im Rahmen einer die Umweltfolgen im Weltraum einschließenden Kosten-Nutzen-Abwägung die Notwendigkeit neuer Systeme grundsätzlich hinterfragt bzw. durch den Einsatz modular ergänzbarer Technologien reduziert werden. Hier könnten „On-Orbit-Operations“ Abhilfe schaffen, bei denen Satelliten im Erdorbit repariert, recycelt oder neu zusammengebaut werden, was sowohl Weltraumschrott als auch Emissionen in der Erdatmosphäre reduzieren würde (Sturm 2020).

#### **6.4.2 Weltraumschrott überwachen**

Bereits vorhandener Weltraumschrott muss weiterhin überwacht werden, um Kollisionen zu vermeiden. In diesem Bereich ist internationale Zusammenarbeit zwingend notwendig, da ein vollständiger Überblick über alle in den Weltraum gebrachten Systeme und Objekte benötigt wird. Wie in Kapitel 3.2.3 ausgeführt, sind die gegenwärtig geltenden Regelwerke nicht strikt genug, um ein umfassendes Monitoring zu ermöglichen, denn die Meldung von Objekten im Weltraum geschieht oft erheblich zeitverzögert. In der Zwischenzeit befindet sich eine wachsende Anzahl von Objekten im Orbit, deren Anwesenheit anderen Akteuren unbekannt ist – ein Sicherheitsrisiko, zu dessen Bekämpfung der bestehende regulatorische Rahmen angepasst werden muss. Eine möglichst lückenlose Überwachung ermöglicht zudem eine bessere Attribution von Weltraumschrott, d. h. Rückstände lassen sich besser zum jeweiligen Verursacher zurückverfolgen.

#### **6.4.3 Weltraumschrott entsorgen**

Neben der Vermeidung von neuem Weltraumschrott stellt die Reduzierung des schon vorhandenen Weltraummülls die wichtigste Aufgabe dar, der die Menschheit bezüglich eines weiterhin nutzbaren Erdorbits gegenübersteht. In den Space Debris Mitigation Guidelines von COPUOS wird empfohlen, dass Satelliten in einer niedrigen Erdumlaufbahn nach spätestens 25 Jahren entfernt werden sollen, um Kollisionen zu vermeiden – eine Vorgabe, der wegen der nicht rechtlich bindenden Natur der Leitlinien viele Betreiber keine Folge leisten. Die starke Kommerzialisierung des geostationären Orbits sorgt hingegen dafür, dass die dort handelnden Akteure mehrheitlich Schritte zur Bereinigung der Umlaufbahn unternehmen (siehe Kapitel 4.2.4).

Politische Ansatzpunkte könnten verschiedene Strategien verfolgen. Über die Anpassung der existierenden Vorgaben ist eine Regulierung

dahingehend möglich, dass Satelliten am Ende ihres Lebenszyklus kategorisch aus der Umlaufbahn entfernt werden müssen. Dies kann mit verbesserten Methoden zur Nachverfolgung der Betreiber kombiniert werden, um Nichteinhaltungen effektiver sanktionieren zu können (siehe Kapitel 6.4.2). Zudem kann das Eigeninteresse der Akteure an einem weiterhin uneingeschränkt zugänglichen Weltraum genutzt werden, um, z. B. über die Schaffung von Anreizen, zu einem verantwortungsbewussteren Umgang mit dem von ihnen erzeugten Weltraumschrott anzuregen. Und nicht zuletzt kann eine Forcierung der Forschung zu Weltraumschrott-Entsorgungssystemen wie ClearSpace-1 dazu beitragen, den bereits in Umlauf befindlichen Weltraummüll zu reduzieren (siehe Kapitel 4.2.4). Sofern die Bereinigung des Erdbits durch ein gezieltes De-Orbiting und Verglühen des Weltraumschrotts in der Atmosphäre erfolgt, sind jedoch auch die negativen Folgen auf die obere Atmosphäre, insbesondere die Ozonschicht (siehe Kapitel 4.2.4), zu berücksichtigen. Zudem ist weitere Forschung notwendig, um auch die Entsorgung kleiner Trümmerteile zu ermöglichen, die ebenfalls eine Gefahr für aktive Raumfahrzeuge darstellen.

# 7

## Ausblick



Der vorliegende Trendbericht fasst aktuelle und erwartete Entwicklungen der Weltraumnutzung zusammen und zeigt einen klaren Anstieg in der Kommerzialisierung und Privatisierung des Bereichs. Sinkende Kosten für Raketenstarts ermöglichen es immer mehr privaten Akteuren, sich an Raumfahrtaktivitäten zu beteiligen. Auch große Privatakteure wie SpaceX oder Amazon weiten ihre Aktivitäten aus und verfolgen beispielsweise Anstrengungen in der Ausbringung kommerzieller Kleinsatelliten (SpaceX: Projekt Starlink, Amazon: Projekt Kuiper). Auch staatliche Aktivitäten nehmen deutlich zu: Rund 90 Staaten finanzieren derzeit ein eigenes Raumfahrtprogramm.

In Deutschland forderte der Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) einen Weltraumbahnhof in der Nordsee, und die German Offshore Spaceport Alliance (GOSA) kündigte ihn ursprünglich für 2020 an. Die Planungen schreiten nun weiter voran: Der Offshore-Weltraumbahnhof soll mehr als 400 km vor der Küste in Form eines Spezialschiffs mit Startrampe entstehen und in der Lage sein, Kleinsatelliten per Microlauncher ins All zu bringen. Von Bremerhaven aus sollen die Raketen mit Satelliten sowie die Startrampe von einem Frachtschiff zum Startpunkt transportiert werden (Ilina 2023). Der erste Start soll 2023 erfolgen, wurde bisher aber nicht angekündigt (Stand September 2023). Da Deutschland als Mitglied der ESA bereits über einen gesicherten europäischen Zugang zum Weltraum verfügt, ist die Notwendigkeit der Errichtung eines deutschen Weltraumbahnhofs in einem sensiblen Ökosystem (siehe Kapitel 5.1.1) kritisch zu betrachten.

Neue Entwicklungen in der Satellitennavigation und -kommunikation ermöglichen verbesserte Steuerung von Mobilitätssystemen. Dies, so zeigt die Trendanalyse, ist vor allem für Transport und Logistik relevant, beispielsweise für die Entwicklung autonomer Logistikkonzepte und Robotik-Navigation. Mithilfe von Megakonstellationen aus Kleinsatelliten und einer Fusion mit der terrestrischen 5G-Technologie kann die Internetversorgung global ausgeweitet werden. Andere Anwendungsbereiche sind die umwelt- und ressourcenschonende Präzisionslandwirtschaft und Smart Cities.

Chancen für Bekämpfung von und Anpassung an den Klimawandel auf der Erde ergeben sich auch aus Anwendungen im Bereich der Erdbeobachtung: Informa-

tionen von Erdbeobachtungssatelliten können durch detaillierte Daten Maßnahmen gegen den Verlust der Biodiversität unterstützen, beispielsweise durch die Dokumentation von Habitatsveränderungen, von Verschlechterung der Boden-, Luft- und Wasserqualität und klimatischen Veränderungen. Zudem könnte die Erstellung von digitalen Zwillingen der Erde behilflich sein, natürliche und menschliche Vorgänge zu überwachen und Szenarien für den Einsatz von Klimaschutzmaßnahmen zu modellieren und zu testen.

Grundlegender, wichtiger Leitgedanke in der Raumfahrt muss die Suffizienz sein. Suffizienz umfasst die sorgfältige Abwägung von Raumfahrtmissionen, die Begrenzung nicht notwendiger Aktivitäten im All und die Förderung nachhaltiger Alternativen, um einen ausgewogenen und verantwortungsbewussten Umgang mit den begrenzten Ressourcen unseres Planeten sicherzustellen und die Ozonschicht zu schützen. Noch vor Anwendung innovativer Technologien zur Reduzierung der Umweltwirkungen der Raumfahrt sollte grundsätzlich diskutiert und entschieden werden, in welchem Umfang eine Nutzung des Welttraums für Mensch und Umwelt notwendig und die damit verbundenen Risiken hinnehmbar sind.

Der Abbau von Rohstoffen im Weltraum wird kontrovers diskutiert, da dieser zwar potentiell Ressourcenknappheit auf der Erde und Ressourcenprobleme der Raumfahrt lösen könnte, aber auch erhebliche Risiken bergen kann. Mögliche, irreversible Schäden sind aus heutiger Sicht noch nicht absehbar, sodass ein möglicher Ressourcenabbau im Weltraum dringend dem Vorsorgeprinzip zu unterstellen ist. Der vorliegende Trendbericht zeigt, dass mit dem Wachstum des Raumfahrtsektors zahlreiche Umweltauswirkungen und -risiken einhergehen, darunter chemische (z. B. Treibhausgase und Luftschadstoffe) und physikalische Belastungen (z. B. Lärm, Ressourcenverbrauch durch Produktion, Betrieb und Entsorgung) sowie Auswirkungen der Weltraumnutzung auf Satellitenkommunikation und Erdbeobachtung (Lichtverschmutzung) und die Ansammlung von Weltraumschrott im Erdorbit.

Innovationen in der Raumfahrt und die zunehmende Nutzung des Weltraums haben das Potenzial, die Lebensgrundlagen zukünftiger Generationen zu verbessern, aber auch weiter zu degradieren. Um den möglichen Folgen begegnen zu können, ist ein ver-

bindliche regulativer Rahmen für die Nutzung des Weltraums notwendig. In diesem müssen die Umweltauswirkungen der Raumfahrtaktivitäten eine zentrale Rolle spielen. Derzeit sind viele Initiativen freiwillig und basieren auf dem Gedanken, dass durch eine verstärkte Kooperation zwischen den verschiedenen Akteuren aus Wirtschaft, Wissenschaft und Staat Potenziale für den Umweltschutz geschaffen werden. Neue Regularien der Weltraumnutzung müssen verbindlich, aber auch innovationsfreundlich sein und in Einklang mit Umwelt- und Klimazielen stehen.

Daher wird eine Aktualisierung des politischen Rahmens und die Ausarbeitung einer internationalen Nachhaltigkeitsstrategie zur Nutzung des Weltraums dringend empfohlen. Zu diesem Zweck muss die internationale Zusammenarbeit sowohl in der Forschung als auch bei der Regulierung der Weltraumnutzung, die sich an den Grundsätzen der Agenda 2030 orientieren kann, ausgeweitet und vertieft werden. Sollte auch unter Berücksichtigung des Suffizienzgedankens ein extraterrestrischer Abbau von Ressourcen umsetzbar werden, sollte das Ziel eine gleichberechtigte, nachhaltige extraterrestrische Ressourcennutzung sein. Weitere wichtige Maßnahmen sind die Förderung technologischer Innovationen und die stärkere Berücksichtigung von Kriterien der Nachhaltigkeit in der Raumfahrt, z. B. die Produktion umweltverträglicher Treibstoffe, Ressourceneinsparungen durch Wiederverwendbarkeit bzw. Sharing-Systeme und Umweltbewertungen baulicher Infrastruktur für die Nutzung des Weltraums.

Der vorliegende Trendbericht zeigt, dass die Raumfahrt in Deutschland und weltweit stärker in den umweltpolitischen Fokus rücken muss. Der Weltraum sollte im Umweltressort stärker berücksichtigt werden, um zukünftige Trends in der Raumfahrt mit nationalen und globalen Nachhaltigkeitsbestrebungen in Einklang zu bringen. Insbesondere weil viele Anwendungsfelder der Raumfahrt mit einem hohen Ressourcenverbrauch einhergehen, dürfen Umweltfragen nicht auf zukünftige Generationen abgewälzt, sondern müssen proaktiv schon heute angegangen werden. Grundlage hierfür muss ein informierter, gesamtgesellschaftlicher Diskurs zu den Zielen der Raumfahrt sein, der neben den Chancen auch die Risiken in den Blick nimmt und Nachhaltigkeitsaspekte berücksichtigt. Viele Entwicklungen, wie zum Beispiel der Weltraumtourismus, stehen noch am

Anfang und werden ohne Gegensteuerung in baldiger Zukunft stark in ihrer Nutzung und damit ihren Umwelteffekten zunehmen.

Es gilt, diese Entwicklungen zu antizipieren und einen Rahmen zu schaffen, in dem der Weltraum ebenso wie der Planet Erde und seine Umlaufbahnen geschützt werden können. Dafür soll dieser Bericht ein Ausgangspunkt sein. Der Dynamik und Vielfältigkeit des Themenkomplexes geschuldet, ergeben sich aus diesem Bericht mehrere weitere Forschungsansätze und -bedarfe. Der Bericht zeigt insbesondere auf, dass Nachhaltigkeitsaspekte einen zentralen Stellenwert in der Weltraumforschung einnehmen müssen, wenn der Weltraum und der Planet Erde in gleichwertiger Weise für kommende Generationen nutzbar sein sollen. Die Verankerung dieses Themas in Legislatur und Gesellschaft ist die große Aufgabe, die dem Umweltressort in Bezug auf den Weltraum bevorsteht.

## Quellenverzeichnis

- Above: Space Development Corporation (o.J.): A New Standard To Work, Play, And Thrive In Space. <https://abovespace.com/voyager-stand>, Stand: 20.02.2024.
- Airbus (2021): Airbus, in the 'new space' era: once a pioneer, always a pioneer. <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2021-05-airbus-in-the-new-space-era-once-a-pioneer-always-a-pioneer>, Stand: 16.02.2024.
- Albat, D. R. (2011): Startinfrastruktur. In: Handbuch der Raumfahrttechnik. S. 192–198. München.
- Albat, D. R.; Haidn, O. J.; Langel, G. (2011): Antriebssysteme. In: Handbuch der Raumfahrttechnik. S. 167–192. München.
- Amorim Cork Composites (2020): Reinventing Thermal Protection. Insulation and Ablative Materials. [https://amorimcorkcomposites.com/media/1095/brochura-aerospace\\_en\\_digital.pdf](https://amorimcorkcomposites.com/media/1095/brochura-aerospace_en_digital.pdf), Stand: 21.02.2024.
- Amos, J. (2010): Japan probe collected particles from Itokawa asteroid. BBC News. <https://www.bbc.com/news/science-environment-11763484>, Stand: 20.02.2024.
- Amos, J. (2020): European contract signed for Moon mission hardware. BBC News. <https://www.bbc.com/news/science-environment-52782479>, Stand: 20.02.2024.
- Anderssohn, J. (2021): Operationelle InSAR-Anwendung im Bergbau. Nationales Forum für Fernerkundung und Copernicus 2021. [https://www.d-copernicus.de/fileadmin/Content/pdf/Forum\\_2021/TREA\\_Anderssohn\\_CopernicusForum\\_2021\\_v1.pdf](https://www.d-copernicus.de/fileadmin/Content/pdf/Forum_2021/TREA_Anderssohn_CopernicusForum_2021_v1.pdf), Stand: 16.02.2024.
- Anton, A.; Schetsche, M. (2023): SETI—History, Methods and Presuppositions of the Scientific Search for Extraterrestrial Intelligences. In: Meeting the Alien. S. 65–83. doi:10.1007/978-3-658-41317-0\_4.
- Arctic Astronautics / Kitsat (2021): First look at the WISA Woodsat prototype. <https://arcticastronautics.fi/2021-05-first-look-wisa-woodsats-prototype>, Stand: 20.02.2024.
- Arianespace (o.J.): Missions Archive. <https://www.arianespace.com/missions/>, Stand: 16.02.2024.
- Arianespace (2015): Corporate Social Responsibility Report. 2014-2015. [https://www.arianespace.com/wp-content/uploads/2016/03/CSR\\_report\\_2014\\_2015\\_GB.pdf](https://www.arianespace.com/wp-content/uploads/2016/03/CSR_report_2014_2015_GB.pdf), Stand: 08.09.2023.
- Arianespace (2022): From Earth To Outer Space. Arianespace 2022 CSR. <https://www.arianespace.com/wp-content/uploads/2016/03/CSR-LEAFLET-2022-FN.pdf>, Stand: 16.02.2024.
- Auswärtiges Amt (2023): Weltraumrecht. <https://www.auswaertiges-amt.de/de/ausenpolitik/themen/internationales-recht/einzelfragen/weltraumrecht/weltraumrecht/217086>, Stand: 15.02.2024.
- Badalian, V. (2023): The Space Industry Has a Sustainability Problem. GreenBiz. <https://www.greenbiz.com/article/space-industry-has-sustainability-problem>, Stand: 10.11.2023.
- Ball, A. J.; Garry, J.; Lorenz, R.; Kerzhanovich, V. (2009): Planetary Landers and Entry Probes. Cambridge. doi:10.1017/CBO9780511536052.
- Banner, T. (2020): „Pale Blue Dot“: Nasa-Bild zeigt, wie klein und unbedeutend die Erde ist. Frankfurter Rundschau. <https://www.fr.de/wissen/pale-blue-dot-beruehmtes-nasa-bild-zeigt-unbedeutend-erde-zr-13529810.html>, Stand: 28.08.2023.
- Banner, T. (2021): Internationale Raumstation ISS. Mammutprojekt im Weltall - Forschung und Völkerverständigung. Frankfurter Rundschau. <https://www.fr.de/wissen/internationale-raumstation-iss-raumfahrt-groesste-menschengemachte-objekt-weltall-erde-astronaut-91040859.html>, Stand: 20.02.2024.
- Barazi, S. a.; Bastian, D.; Damm, S.; Fritz, A.; Kern, M.; Liedtke, M.; Schmidt, M. (2023): DERA-Rohstoffliste. Berlin. doi:10.25928/f94t-c116.
- Bärwald, W.; Brieß, K. (2011): Systemdesign am Beispiel Mikrosatellit. In: Handbuch der Raumfahrttechnik. S. 676–686. München.
- Bates, S. (2020): Arctic Animals' Movement Patterns are Shifting in Different Ways as the Climate Changes. National Aeronautics and Space Administration (NASA). <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2020/arctic-animals-movement-patterns-are-shifting-in-different-ways-as-the-climate-changes>, Stand: 15.02.2024.
- Bazilian, M. D.; Lange, I.; Aaen, P.; Gilbert, A. (2019): The Emerging Competition for Space Solar Power. Global Policy. <https://www.globalpolicyjournal.com/blog/21/10/2019/emerging-competition-space-solar-power>, Stand: 20.02.2024.
- Beck, U. (1986): Risikogesellschaft. Auf dem Weg in eine andere Moderne. Frankfurt am Main.
- Beißwenger, J. (2021): Lichtverschmutzung – Wie Tiere unter hellen Nächten leiden. <https://www.swr.de/swr2/wissen/lichtverschmutzung-wie-tiere-unter-hellen-naechten-leiden-sw2-wissen-2020-09-14-100.html>, Stand: 19.02.2024.
- Belabbas, B. (2020): Zuverlässige Satellitennavigation für Autonomes Fahren. Lektionen aus der Luftfahrt. Technik in Bayern. <https://www.technik-in-bayern.de/mobilitaet/autonomes-fahren/zuverlaessige-satellitennavigation-fuer-autonomes-fahren>, Stand: 17.06.2022.
- Berger, E. (2022): Jeff Bezos and Amazon just hired everybody but SpaceX for Project Kuiper. Ars Technica. <https://arstechnica.com/science/2022/04/amazon-signs-blockbuster-launch-deal-for-its-satellite-megaconstellation/>, Stand: 17.06.2022.
- Bilby, E. (2019): Greener fuels to propel rocket launches into space. Horizon - The EU Research & Innovation Magazine. <https://ec.europa.eu/research-and-innovation/en/horizon-magazine/greener-fuels-propel-rocket-launches-space>, Stand: 20.02.2024.
- Blair, B. R.; Sanders, G. B.; Nall, M. E.; Heiss, K. P.; Anderson, S. H.; Curreri, P. A.; Sacksteder, K. R.; Rice, E. E.; McCullough, E. D.; Duke, M. B.; Maglessen, T. C. (2005): The Enabling Role of ISRU for Space Commercialization. Space Resources Roundtable VII. Lunar and Planetary Institute. <https://www.lpi.usra.edu/meetings/leag2005/pdf/2054.pdf>, Stand: 19.02.2024.
- Blendis, S. (2022): 'If we can make a space station fly, we can save the planet': An astronaut's view on protecting the Earth. CNN. <https://edition.cnn.com/2022/01/24/europe/thomas-pesquet-iss-climate-change-c2e-scen-spc-intl/index.html>, Stand: 03.09.2023.

## Quellenverzeichnis

- Bocksch, R. (2021a): Immer mehr Kleinsatelliten im All. Statista GmbH. <https://de.statista.com/infografik/19756/anzahl-der-klein-satelliten-im-all/>, Stand: 15.02.2024.
- Bocksch, R. (2021b): Zwei Drittel aller Raumfahrer kommen aus den USA. Statista GmbH. <https://de.statista.com/infografik/24187/nationen-mit-den-meisten-astronaut-innen-seit-1961/>, Stand: 08.09.2023.
- Boeing (o.J.): Starliner Updates - Mission Updates. <https://starliner-updates.com/category/mission-updates/>, Stand: 20.02.2024.
- Boley, A. C.; Byers, M. (2021): Satellite mega-constellations create risks in Low Earth Orbit, the atmosphere and on Earth. Sci Rep 11 (1). doi:10.1038/s41598-021-89909-7.
- Borthomieu, Y. (2013): Satellite Lithium-Ion Batteries. In: Lithium-Ion Batteries. Advances and Applications. S. 311–344. Amsterdam. doi:10.1016/B978-0-444-59513-3.00014-5.
- BR (2023): Atmosphäre und Wetter: 5 Stockwerke in die Höhe | BR.de. <https://www.ardalpha.de/wissen/umwelt/klima/wetter-atmosphaere-troposphaere-meteorologie-100.html>, Stand: 29.03.2023.
- Brachet, G. (2016): Protecting our space interests. ROOM - Space Journal of Asgardia 10 (4). <https://room.eu.com/article/protecting-our-space-interests>, Stand: 15.02.2024.
- Brien, J. (2023): Autonom in die Klimakrise: Selbstfahrende Autos mit mieser Umweltbilanz. t3n. <https://t3n.de/news/autonomes-fahren-co2-umweltbilanz-mit-studie-forschung-1535536/>, Stand: 20.02.2024.
- Brieß, K. (2011): Missionskonzept und Missionsarchitektur. In: Handbuch der Raumfahrttechnik. S. 622–631. München.
- Brinkmann, P. (2022): Space balloon entrepreneurs. Aerospace America. <https://aerospaceamerica.aiaa.org/departments/space-balloon-entrepreneurs/>, Stand: 14.07.2023.
- Brodkin, J. (2017): SpaceX and OneWeb broadband satellites raise fears about space debris. Ars Technica. <https://arstechnica.com/information-technology/2017/10/spacex-and-oneweb-broadband-satellites-raise-fears-about-space-debris/>, Stand: 20.02.2024.
- BRYCE Space and Technology (2022): State of the Satellite Industry Report 2022. Summary. Satellite Industry Association (SIA). [https://brycetechnology.com/reports/report-documents/SIA\\_SSIR\\_2022.pdf](https://brycetechnology.com/reports/report-documents/SIA_SSIR_2022.pdf), Stand: 02.09.2023.
- BRYCE Tech (2022): Start Up Space 2022. [https://brycetechnology.com/reports/report-documents/Bryce\\_Start\\_Up\\_Space\\_2022.pdf](https://brycetechnology.com/reports/report-documents/Bryce_Start_Up_Space_2022.pdf), Stand: 09.09.2023.
- Bund für Naturschutz und Umwelt in Deutschland (BUND) (o.J.): Suffizienz – was ist das? Eine Definition. <https://www.bund.net/ressourcen-technik/suffizienz/suffizienz-was-ist-das/>, Stand: 20.02.2024.
- Bundesministerium der Finanzen (BMF) (2020): Bundeshaushalt 2020. Kapitel 1205 - Luft- und Raumfahrt. <https://www.bundeshaushalt.de/static/daten/2020/ist/epl12.pdf#page=61>, Stand: 16.02.2024.
- Bundesministerium der Finanzen (BMF) (2021a): Bundeshaushalt 2021. Haushaltsstelle 0901 685 31 - 164. <https://www.bundeshaushalt.de/static/daten/2021/ist/eplog.pdf#page=21>, Stand: 16.02.2024.
- Bundesministerium der Finanzen (BMF) (2021b): Bundeshaushalt 2021. Haushaltsstelle 0901 683 32 - 165. <https://www.bundeshaushalt.de/static/daten/2021/ist/eplog.pdf#page=20>, Stand: 16.02.2024.
- Bundesministerium der Justiz (BMJ) (1998): RAÜG - Gesetz zur Übertragung von Verwaltungsaufgaben auf dem Gebiet der Raumeinfahrt. [https://www.gesetze-im-internet.de/ra\\_g/BJNR010140990.html](https://www.gesetze-im-internet.de/ra_g/BJNR010140990.html), Stand: 08.09.2023.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (o.J.): Ausgaben des Bundes für Wissenschaft, Forschung und Entwicklung nach Förderbereichen und Förderschwerpunkten. Tabelle 1.1.5. <https://www.datenportal.bmbf.de/portal/de/Tabelle-1.1.5.html>, Stand: 20.02.2024.
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2019): Cross-Compliance. <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/eu-agrarpolitik-und-foerderung/direktzahlung/cross-compliance.html>, Stand: 20.02.2024.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (2018): Heute haben wir es in der Hand, wie unser Planet morgen aussehen wird! Eindrucksvoller Appell von @Astro\_Alex an Bord der @Space\_Station zum Beginn der UN-Weltklimakonferenz #COP24 – mit einer einzigartigen Perspektive aus dem Weltall. @DLR\_de @DLR\_next @ESA\_de @UNKlima <https://t.co/oGqh1HPAAz>. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV). <https://twitter.com/BMUV/status/106924922527131650>, Stand: 17.02.2024.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2022): Luft- und Raumfahrt. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/luft-und-raumfahrt.html>, Stand: 20.02.2024.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2023): Regierungsentwurf des Bundeshaushalts 2024. Einzelplan 09: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/P-R/regierungsentwurf-des-bundeshaushalts-2024.pdf>, Stand: 20.02.2024.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (2012): Für eine zukunftsfähige deutsche Raumfahrt. Die Raumfahrtstrategie der Bundesregierung. [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Technologie/zukunftsfaeheige-deutsche-raumfahrt.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=8](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Technologie/zukunftsfaeheige-deutsche-raumfahrt.pdf?__blob=publicationFile&v=8), Stand: 20.02.2024.
- Bundesregierung (2018): Völkerrechtliche Regelung des Weltraumbergbaus. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Roman Müller-Böhm ... und der Fraktion der FDP – Drucksache 19/5687 –. <https://dserver.bundestag.de/btd/19/063/1906326.pdf>, Stand: 15.02.2024.
- Bundesregierung (2019a): Ein neuer Aufbruch für Europa - Eine neue Dynamik für Deutschland - Ein neuer Zusammenhalt für unser Land. Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/974430/847984/5b8b-c23590d4cb2892b31c987ad672b7/2018-03-14-koalitionsvertrag-data.pdf>, Stand: 20.02.2024.
- Bundesregierung (2019b): Weltraumbergbau und Privatisierung der Rohstoffe im Weltall. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Fabio De Masi ... und der Fraktion DIE LINKE - Drucksache 19/12385 - . <https://dserver.bundestag.de/btd/19/123/1912385.pdf>, Stand: 15.02.2024.
- Bundesregierung (2023): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage - Nr. 20/6439. [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Parlamentarische-Anfragen/2023/04/20-6439.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Parlamentarische-Anfragen/2023/04/20-6439.pdf?__blob=publicationFile&v=4), Stand: 15.02.2024.
- Byrne, P. K. (2019): Mining the Moon. The Conversation. <https://theconversation.com/mining-the-moon-110744>, Stand: 14.12.2021.

- Calamur, K. (2015): ‚Definite Evidence‘ Of Alien Life Within 20-30 Years, NASA Chief Scientist Says. NPR. <https://www.npr.org/sections/thetwo-way/2015/04/08/398322381/definite-evidence-of-alien-life-within-20-30-years-nasa-chief-scientist-says>, Stand: 20.02.2024.
- Carbon Mapper Inc. (o.J.): Carbon Mapper: accelerating local climate action, globally. <https://carbonmapper.org>, Stand: 20.02.2024.
- Carroll, B. W.; Ostlie, D. A. (2017): An Introduction to Modern Astrophysics. Cambridge. doi:10.1017/9781108380980.
- Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) (2018): French Guiana - A launch base like no other. CNES Mag, Band 78. Centre National d'Etudes Spatiales (CNES). [https://cnes.fr/sites/default/files/drupal/201811/default/is\\_cnesmag\\_78\\_en\\_web.pdf](https://cnes.fr/sites/default/files/drupal/201811/default/is_cnesmag_78_en_web.pdf), Stand: 20.02.2024.
- Centre Spatial Guyanais (2023): Production plants. <https://centre-spatialguyanais.cnes.fr/en/les-usines-de-production-en>, Stand: 16.02.2024.
- Chanoine, A.; Duvernois, P.-A.; Le Guern, Y. (2017): Environmental impact assessment analysis. Technical Note D8: Executive summary. Deloitte Sustainability. [https://nebula.esa.int/sites/default/files/neb\\_study/1116/C4000104787ExS.pdf](https://nebula.esa.int/sites/default/files/neb_study/1116/C4000104787ExS.pdf), Stand: 16.02.2024.
- Chatre, E.; Benedicto, J. (2019): 2019 – Galileo Programme Update. In: Proceedings of the 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2019). S. 650–698. Miami, Florida. doi:10.33012/2019.16900.
- Chavy-Macdonald, M.-A.; Oizumi, K.; Kneib, J.-P.; Aoyama, K. (2021): The cis-lunar ecosystem — A systems model and scenarios of the resource industry and its impact. Acta Astronautica 188 (2), S. 545–558. doi:10.1016/j.actaastro.2021.06.017.
- China Radio International (CRI) (2021): Chinas bemannter Welt- raumflug: Von Shenzhou-1 bis Shenzhou-12. [http://german.cri.cn/china/china\\_heute/3255/20210617/677246.html](http://german.cri.cn/china/china_heute/3255/20210617/677246.html), Stand: 06.12.2021.
- Clark, S. (2022): China launches two more space missions. Spaceflight Now. <https://spaceflightnow.com/2022/05/03/china-launches-two-more-space-missions/>, Stand: 06.05.2022.
- ClearSpace (o.J.): Shaping Sustainability Beyond Earth. <https://clearspace.today>, Stand: 20.02.2024.
- Cockell, C. S.; Santomartino, R.; Finster, K.; Waajen, A. C.; Eades, L. J.; Moeller, R.; Rettberg, P.; Fuchs, F. M.; van Houdt, R.; Leys, N.; Coninx, I.; Hatton, J.; Parmitano, L.; Krause, J.; Koehler, A.; Caplin, N.; Zuijderduijn, L.; Mariani, A.; Pellari, S. S.; Carubia, F.; Luciani, G.; Balsamo, M.; Zolesi, V.; Nicholson, N.; Loudon, C.-M.; Dosswald-Winkler, J.; Herová, M.; Rattenbacher, B.; Wadsworth, J.; Craig Everroad, R.; Demets, R. (2020): Space station biomineral experiment demonstrates rare earth element extraction in microgravity and Mars gravity. Nat Commun 11 (1). doi:10.1038/s41467-020-19276-w.
- Cohen, A. F. (1984): Cosmos 954 and the International Law of Satellite Accidents. Yale Journal of International Law 10 (1), S. 78–91. <http://hdl.handle.net/20.500.13051/6129>, Stand: 15.02.2024.
- Committee on Space Research (COSPAR) (2021): COSPAR Policy on Planetary Protection. COSPAR Panel on Planetary Protection (PPP). [https://cosparhq.cnes.fr/assets/uploads/2021/07/PPP00licy\\_2021\\_3-lune.pdf](https://cosparhq.cnes.fr/assets/uploads/2021/07/PPP00licy_2021_3-lune.pdf), Stand: 20.02.2024.
- Committee on the Peaceful Uses of Outer Space (COPUOS) (2022): Report on the implementation of the Guidelines for the Long-term Sustainability of Outer Space Activities in the European Space Agency. [ments/2022/aac\\_105c\\_12022crp/aac\\_105c\\_12022crp\\_14rev\\_1\\_0.html/AC105\\_C1\\_2022\\_CRP14ERev01.pdf](https://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/docu-ments/2022/aac_105c_12022crp/aac_105c_12022crp_14rev_1_0.html/AC105_C1_2022_CRP14ERev01.pdf), Stand: 16.02.2024.
- Copernicus (2021a): Landwirtschaft: Copernicus in Deutschland. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR). <https://www.d-copernicus.de/daten/beispiele-und-anwendungen/landwirtschaft/>, Stand: 27.09.2021.
- Copernicus (2021b): EMSR379: Forest fire in Artenara, Spain / EMSR381: Forest fire in Cazadores, Spain / EMSR382: Forest fire in Valleseco, Gran Canaria, Spain - Information Bulletin 120. <https://www.copernicus.eu/en/news/news/emsr379-forest-fire-artenara-spain-emsr381-forest-fire-cazadores-spain-emsr382-forest>, Stand: 20.02.2024.
- Coustenis, A.; Hedman, N.; Doran, P. T.; Al Shehhi, O.; Ammannito, E.; Fujimoto, M.; Grasset, O.; Groen, F.; Hayes, A. G.; Ilyin, V.; Kumar, K. P.; Morisset, C.-E.; Mustin, C.; Olsson-Francis, K.; Peng, J.; Prieto-Ballesteros, O.; Raulin, F.; Rettberg, P.; Sinibaldi, S.; Suzuki, Y.; Xu, K.; Zaitsev, M. (2023): Planetary protection: an international concern and responsibility. Front. Astron. Space Sci. 10. doi:10.3389/fspas.2023.1172546.
- Crowley, M. A.; Stockdale, C. A.; Johnston, J. M.; Wulder, M. A.; Liu, T.; McCarty, J. L.; Rieb, J. T.; Cardille, J. A.; White, J. C. (2023): Towards a whole-system framework for wildfire monitoring using Earth observations. Global Change Biology 29 (6), S. 1423–1436. doi:10.1111/gcb.16567.
- D'Aversa, E.; Ruault, J.-M.; Hertzberg, A.; Manfretti, C.; Sippel, M.; Caruana, J.-N.; Perigo, D.; Asakawa, H.; Saitoh, Y.; Hiroshi Ueno; Hurlbert, E. A.; Klem, M. D.; Rogers, M. N.; Whitley, R.; Hanna, S.; Vangen, S.; Alexander, L.; Johnson, W. (2016): Lox/Methane Gap Assessment Report. International Space Exploration Coordination Group (ISECG). <https://www.globalspaceexploration.org/word-press/docs/Lox%20Methane%20Gap%20Assessment%20Report.pdf>, Stand: 07.09.2023.
- D'Agostino, S. (2021): Is using nuclear materials for space travel dangerous, genius, or a little of both? Bulletin of the Atomic Scientists. <https://thebulletin.org/2021/07/is-using-nuclear-materials-for-space-travel-dangerous-genius-or-a-little-of-both/>, Stand: 18.09.2023.
- Dallas, J. A.; Raval, S.; Alvarez Gaitan, J. P.; Saydam, S.; Dempster, A. G. (2020a): Mining beyond earth for sustainable development: Will humanity benefit from resource extraction in outer space? Acta Astronautica 167, S. 181–188. doi:10.1016/j.actaastro.2019.11.006.
- Dallas, J. A.; Raval, S.; Alvarez Gaitan, J. P.; Saydam, S.; Dempster, A. G. (2020b): The environmental impact of emissions from space launches: A comprehensive review. Journal of Cleaner Production 255, S. 120209. doi:10.1016/j.jclepro.2020.120209.
- Dallas, J. A.; Raval, S.; Saydam, S.; Dempster, A. G. (2021): Investigating extraterrestrial bodies as a source of critical minerals for renewable energy technology. Acta Astronautica 186, S. 74–86. doi:10.1016/j.actaastro.2021.05.021.
- Davenport, C. (2021): The Biden administration has set out to dismantle Trump's legacy, except in one area: Space. The Washington Post. <https://www.washingtonpost.com/technology/2021/03/02/biden-space-artemis-moon-trump/>, Stand: 06.12.2021.
- David, L. (2022): Studies flag environmental impact of reentry. SpaceNews. <https://spacenews.com/studies-flag-environmental-impact-of-reentry/>, Stand: 20.02.2024.
- Dech, S.; Reiniger, K.-D.; Schreier, G. (2011): Erdbeobachtung. In: Handbuch der Raumfahrttechnik. S. 505–520. München.

- Del Bianco, M.; Lanciano, O.; Bertacin, R. et al (2021): In-Situ Resource Utilization Gap Assessment Report. International Space Exploration Coordination Group (ISECG). <https://www.global-spaceexploration.org/wordpress/wp-content/uploads/2021/04/ISECG-ISRU-Technology-Gap-Assessment-Report-Apr-2021.pdf>, Stand: 21.02.2024.
- Del Peral-Rosado, J. A.; Saloranta, J.; Destino, G.; López-Salcedo, J. A.; Seco-Granados, G. (2018): Methodology for Simulating 5G and GNSS High-Accuracy Positioning. *Sensors* 18 (10). doi:10.3390/s18103220.
- Deller, C. (2021): Überwachung von EU-Badegewässern mithilfe satellitengestützter Fernerkundungsmethoden. Nationales Forum für Fernerkundung und Copernicus 2021. [https://www.d-copernicus.de/fileadmin/Content/pdf/Forum\\_2021/3\\_CD\\_Vortrag\\_Session\\_E.3\\_NatForCop\\_Deller.pdf](https://www.d-copernicus.de/fileadmin/Content/pdf/Forum_2021/3_CD_Vortrag_Session_E.3_NatForCop_Deller.pdf).
- DelPozzo, S.; Williams, C.; Doncaster, B. (2019): Nano/Microsatellite Market Forecast. 9th Edition. SpaceWorks Enterprises Inc. (SEI). <https://www.spaceworks.aero/wp-content/uploads/Nano-Microsatellite-Market-Forecast-9th-Edition-2019.pdf>, Stand: 20.02.2024.
- Denis, G.; Boissezon, H. de; Hosford, S.; Pasco, X.; Montfort, B.; Ranera, F. (2016): The evolution of Earth Observation satellites in Europe and its impact on the performance of emergency response services. *Acta Astronautica* 127, S. 619–633. doi:10.1016/j.actaastro.2016.06.012.
- Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) (2021): Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation - CORSIA. Umweltbundesamt (UBA). [https://www.dehst.de/DE/Europaeischer-Emissionshandel/Luftfahrzeugbetreiber/Corsia/corsia\\_node.html](https://www.dehst.de/DE/Europaeischer-Emissionshandel/Luftfahrzeugbetreiber/Corsia/corsia_node.html), Stand: 20.07.2023.
- Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (DLG e.V.) (2018): Digitale Landwirtschaft. Ein Positionspapier der DLG. [https://www.dlg.org/fileadmin/downloads/landwirtschaft/themen/ausschuesse\\_facharbeit/DLG\\_Position\\_Digitalisierung.pdf](https://www.dlg.org/fileadmin/downloads/landwirtschaft/themen/ausschuesse_facharbeit/DLG_Position_Digitalisierung.pdf), Stand: 17.02.2024.
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) (o.J.): DLR - Earth Observation Center – Für die Erde ins All. [https://www.dlr.de/eoc/de/desktopdefault.aspx/tabid-5277/8858\\_read-15912/](https://www.dlr.de/eoc/de/desktopdefault.aspx/tabid-5277/8858_read-15912/), Stand: 20.02.2024.
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) (2021): Das DLR im Überblick. <https://www.dlr.de/de/karriere-und-nachwuchs/angebote-fuer-studierende/das-dlr-im-ueberblick.pdf/>, Stand: 17.02.2024.
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) (2022): DLR beendet bilaterale Kooperationen mit Russland. [https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2022/01/20220303\\_dlr-beendet-bilaterale-kooperationen-mit-russland](https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2022/01/20220303_dlr-beendet-bilaterale-kooperationen-mit-russland), Stand: 20.02.2024.
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) (2023): Nachhaltige Treibstoffe für die Raumfahrt. DLR-Wissenschaftler gründen Start-up InSpacePropulsion Technologies. <https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2023/03/nachhaltige-treibstoffe-fuer-die-raumfahrt>, Stand: 20.02.2024.
- Deutschlandfunk Nova (2023): „Erdüberlastungstag“. Ressourcen des Jahres aufgebraucht. <https://www.deutschlandfunknova.de/nachrichten/erdueberlastungstag-ressourcen-des-jahres-aufgebraucht>, Stand: 20.02.2024.
- D'Hondt, S.; Spivack, A. J.; Pockalny, R.; Ferdelman, T. G.; Fischer, J. P.; Kallmeyer, J.; Abrams, L. J.; Smith, D. C.; Graham, D.; Hasiuk, F.; Schrum, H.; Stancin, A. M. (2009): Subseafloor sedimentary life in the South Pacific Gyre. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 106 (28), S. 11651–11656. doi:10.1073/pnas.0811793106.
- Die Luxemburger Regierung (2019): USA und Luxemburg unterzeichnen Absichtserklärung zur Zusammenarbeit im Weltraumsektor. [https://gouvernement.lu/de/actualites/toutes\\_actualites/communiqués/2019/05-mai/10-schneider-spatiale.html](https://gouvernement.lu/de/actualites/toutes_actualites/communiqués/2019/05-mai/10-schneider-spatiale.html), Stand: 20.02.2024.
- Dodel, H. (2011): Kommunikation. In: *Handbuch der Raumfahrttechnik*. S. 521–534. München.
- Dupree, S. (2015): Das Internet der Dinge. RESET. <https://reset.org/das-internet-der-dinge-11162015/>, Stand: 20.02.2024.
- Durrieu, S.; Nelson, R. F. (2013): Earth observation from space – The issue of environmental sustainability. *Space Policy* 29 (4), S. 238–250. doi:10.1016/j.spacepol.2013.07.003.
- Dutheil, J.-P.; Boué, Y. (2017): Highly reusable Lox/LCH<sub>4</sub> ACE rocket engine designed for SpacePlane: Technical Maturation progress via key system demonstrators results. 7th European Conference For Aeronautics And Space Science (EUCASS). doi:10.13009/EUCASS2017-552.
- Edwards, J. (2017): Goldman Sachs: space-mining for platinum is ‚more realistic than perceived‘. *Business Insider*. <https://www.businessinsider.com/goldman-sachs-space-mining-asteroid-platinum-2017-4>, Stand: 21.02.2024.
- Elvis, M.; Milligan, T. (2019): How much of the Solar System should we leave as wilderness? *Acta Astronautica* 162, S. 574–580. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576517318507>, Stand: 20.02.2024.
- Elvis, M.; Stark, A.; Stalder, B.; Desira, C. (2017): Astronomical Prospecting of Asteroid Resources. EPSC Abstracts 11. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2017/EPSC2017-94-1.pdf>, Stand: 20.02.2024.
- Emirates News Agency (WAM) (2020): Einzelheiten zum Weltraumgesetz der VAE wurden bekannt gegeben, um die Entwicklung des Weltraumsektors zu erleichtern. <https://wam.ae/de/details/1395302826592>, Stand: 20.02.2024.
- Enzweiler, K.; Kind, S.; Jetzke, T. (2018): Autonomer Güterverkehr auf Straßen, Schienen und Wasserwegen. Themenkurzprofil. Band 19. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB). doi:10.5445/IR/1000133903.
- Erwin, S. (2020): Blue Origin delivers the first BE-4 engine to United Launch Alliance. *SpaceNews*. <https://spacenews.com/blue-origin-delivers-the-first-be-4-engine-to-united-launch-alliance/>, Stand: 20.02.2024.
- ESA Space Debris Office (2021): Space Debris Environment Report 2021. Annual Space Environment Report. Band 5. ESA Space Debris Office. [https://www.sdo.esoc.esa.int/publications/Space\\_Environment\\_Report\\_I5Ro\\_20210527.pdf](https://www.sdo.esoc.esa.int/publications/Space_Environment_Report_I5Ro_20210527.pdf).
- Etherington, D. (2020): SpaceX to build floating spaceports for rockets bound for the moon and Mars, and for hypersonic Earth travel. *TechCrunch*. <https://techcrunch.com/2020/06/16/spacex-to-build-floating-spaceports-for-rockets-bound-for-the-moon-and-mars-and-for-hypersonic-earth-travel/>, Stand: 20.02.2024.
- Euroconsult (2022): Satellites to be Built and Launched. A complete analysis & 10-year forecast of the satellite manufacturing & launch service market. Free Extract. [https://digital-platform.euroconsult-ec.com/wp-content/uploads/2022/12/Sat\\_Built\\_2022\\_Extract.pdf?t=6398ea0f694fc](https://digital-platform.euroconsult-ec.com/wp-content/uploads/2022/12/Sat_Built_2022_Extract.pdf?t=6398ea0f694fc), Stand: 20.02.2024.
- Europäische Kommission (2022): EU-Raumfahrtprogrammübersicht. [https://defence-industry-space.ec.europa.eu/system/files/2022-03/EUSpace%20Factsheet%20DE\\_o.pdf](https://defence-industry-space.ec.europa.eu/system/files/2022-03/EUSpace%20Factsheet%20DE_o.pdf), Stand: 20.02.2024.

- European Commission (o.J. a): Destination Earth. Destination Earth (DestinE), a European Commission flagship initiative for a sustainable future. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/destination-earth>, Stand: 20.02.2024.
- European Commission (o.J. b): IRIS<sup>2</sup>: the new EU Secure Satellite Constellation. Infrastructure for Resilience, Interconnectivity and Security by Satellite. [https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-space-policy/iris2\\_en](https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-space-policy/iris2_en), Stand: 20.02.2024.
- European Commission (o.J. c): Ozone Layer. Overview. [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/ozone-layer/overview\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/ozone-layer/overview_en), Stand: 20.02.2024.
- European Commission (o.J. d): What is the EU ETS? [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/what-eu-ets\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/what-eu-ets_en), Stand: 20.02.2024.
- European Commission (2014): FAQ – GALILEO, the EU’s satellite navigation programme. [https://ec.europa.eu/commission/press-corner/detail/en/memo\\_14\\_509](https://ec.europa.eu/commission/press-corner/detail/en/memo_14_509), Stand: 20.02.2024.
- European Commission (2021a): Destination Earth. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/destination-earth>, Stand: 20.02.2024.
- European Commission (2021b): Pathway to a Healthy Planet for All. EU Action Plan: ‚Towards Zero Pollution for Air, Water and Soil‘. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021DC0400>, Stand: 20.02.2024.
- European Commission (2022): Destination Earth - new digital twin of the Earth will help tackle climate change and protect nature. Press release IP/22/1977. [https://ec.europa.eu/commission/press-corner/detail/en/IP\\_22\\_1977](https://ec.europa.eu/commission/press-corner/detail/en/IP_22_1977), Stand: 20.02.2024.
- European Commission, Joint Research Centre; Caldeira, C.; Farcal, L.; Garmendia Aguirre, I.; Mancini, L.; Tosches, D.; Amelio, A.; Rasmussen, K.; Rauscher, H.; Riego Sintes, J.; Sala, S. (2022): Safe and sustainable by design chemicals and materials – Framework for the definition of criteria and evaluation procedure for chemicals and materials. Publications Office of the European Union. doi:10.2760/487955.
- European Space Agency (ESA) (o.J. a): Alexander Gerst. [http://www.esa.int/Science\\_Exploration/Human\\_and\\_Robotic\\_Exploration/Astronauts/Alexander\\_Gerst](http://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Astronauts/Alexander_Gerst), Stand: 20.02.2024.
- European Space Agency (ESA) (o.J. b): Biografie von Sigmund Jähn. [https://www.esa.int/Space\\_in\\_Member\\_States/Germany/Biografie\\_von\\_Sigmund\\_Jaehn](https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Biografie_von_Sigmund_Jaehn), Stand: 21.02.2024.
- European Space Agency (ESA) (o.J. c): Biografie von Ulf Merbold. [https://www.esa.int/Space\\_in\\_Member\\_States/Germany/Biografie\\_von\\_Ulf\\_Merbold](https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Biografie_von_Ulf_Merbold), Stand: 21.02.2024.
- European Space Agency (ESA) (o.J. d): Die deutschen Astronauten. [https://www.esa.int/Space\\_in\\_Member\\_States/Germany/Die\\_deutschen\\_Astronauten](https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Die_deutschen_Astronauten), Stand: 21.02.2024.
- European Space Agency (ESA) (o.J. e): Die Rosetta-Kometenmission im Überblick. [http://www.esa.int/Space\\_in\\_Member\\_States/Germany/Die\\_Rosetta-Kometenmission\\_im\\_Ueberblick](http://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Die_Rosetta-Kometenmission_im_Ueberblick), Stand: 20.02.2024.
- European Space Agency (ESA) (o.J. f): European Data Relay Satellite System (EDRS) Overview. <https://connectivity.esa.int/europe-an-data-relay-satellite-system-edrs-overview>, Stand: 20.02.2024.
- European Space Agency (ESA) (o.J. g): Europe’s Spaceport. [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Transportation/Europe\\_s\\_Spaceport/Europe\\_s\\_Spaceport2](https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Europe_s_Spaceport/Europe_s_Spaceport2), Stand: 20.02.2024.
- European Space Agency (ESA) (o.J. h): Matthias Maurer. [https://www.esa.int/Space\\_in\\_Member\\_States/Germany/Deutschland/Weltraum/Matthias\\_Maurer](https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Deutschland/Weltraum/Matthias_Maurer), Stand: 20.02.2024.
- European Space Agency (ESA) (o.J. i): Medical research. [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Preparing\\_for\\_the\\_Future/Space\\_for\\_Earth/Space\\_for\\_health/Medical\\_research](https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Space_for_Earth/Space_for_health/Medical_research), Stand: 21.02.2024.
- European Space Agency (ESA) (o.J. j): Mitigating space debris generation. [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Safety/Space\\_Debris/Mitigating\\_space\\_debris\\_generation](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Safety/Space_Debris/Mitigating_space_debris_generation), Stand: 20.02.2024.
- European Space Agency (ESA) (o.J. m): Space debris by the numbers. [https://www.esa.int/Space\\_Safety/Space\\_Debris/Space\\_debris\\_by\\_the\\_numbers](https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/Space_debris_by_the_numbers), Stand: 20.02.2024.
- European Space Agency (ESA) (o.J. k): Über die ESA. [https://www.esa.int/Space\\_in\\_Member\\_States/Germany/Ueber\\_die\\_ESA](https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Ueber_die_ESA), Stand: 21.02.2024.
- European Space Agency (ESA) (o.J. l): Φ-sat. Artificial intelligence for Earth observation. [https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Ph-sat](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Ph-sat), Stand: 20.02.2024.
- European Space Agency (ESA) (2016): Jan Wörner: Moon Village - Menschen und Roboter gemeinsam auf dem Mond. Jan Wörner, Generaldirektor der ESA, über die weitere Erkundung des Weltraums, seine Vision eines Moon Village und 3D-Drucker in der Raumfahrt. [https://www.esa.int/Space\\_in\\_Member\\_States/Germany/Jan\\_Woerner\\_Moon\\_Village\\_-\\_Menschen\\_und\\_Roboter\\_gemeinsam\\_auf\\_dem\\_Mond](https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Jan_Woerner_Moon_Village_-_Menschen_und_Roboter_gemeinsam_auf_dem_Mond), Stand: 20.02.2024.
- European Space Agency (ESA) (2018): Microlauncher: Neue Wege in den Weltraum. [https://www.esa.int/Space\\_in\\_Member\\_States/Germany/Microlauncher\\_Neue\\_Wege\\_in\\_den\\_Weltraum](https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Microlauncher_Neue_Wege_in_den_Weltraum), Stand: 20.02.2024.
- European Space Agency (ESA) (2019a): ESA is looking into futuristic in-orbit services: recycling satellites. <https://blogs.esa.int/cleanspace/2019/09/09/esa-is-looking-into-futuristic-in-orbit-services-recycling-satellites/>, Stand: 20.02.2024.
- European Space Agency (ESA) (2019b): Distribution of space debris in orbit around Earth. [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Videos/2019/02/Distribution\\_of\\_space\\_debris\\_in\\_orbit\\_around\\_Earth](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2019/02/Distribution_of_space_debris_in_orbit_around_Earth), Stand: 21.02.2024.
- European Space Agency (ESA) (2020a): ESA and CNES choose renewable energy to power Europe’s Spaceport. [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Transportation/ESA\\_and\\_CNES\\_choose\\_renewable\\_energy\\_to\\_power\\_Europe\\_s\\_Spaceport](https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/ESA_and_CNES_choose_renewable_energy_to_power_Europe_s_Spaceport), Stand: 20.02.2024.
- European Space Agency (ESA) (2020b): ExoMars Trace Gas Orbiter and Schiaparelli Mission (2016). <http://exploration.esa.int/mars/46124-mission-overview/>, Stand: 20.02.2024.
- European Space Agency (ESA) (2021a): ESA budget 2021. [https://www.esa.int/Newsroom/ESA\\_budget\\_2021](https://www.esa.int/Newsroom/ESA_budget_2021), Stand: 20.02.2024.
- European Space Agency (ESA) (2021b): ESA und UNOOSA veranschaulichen Weltraummüll-Problem. [https://www.esa.int/Space\\_in\\_Member\\_States/Austria/ESA\\_und\\_UNOOSA\\_veranschaulichen\\_Weltraummuell-Problem](https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Austria/ESA_und_UNOOSA_veranschaulichen_Weltraummuell-Problem), Stand: 20.02.2024.
- European Space Agency (ESA) (2021c): ESA moves forward with your ideas for 11 pioneering missions. [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Preparing\\_for\\_the\\_Future/Discovery\\_and\\_Preparation/ESA\\_moves\\_forward\\_with\\_your\\_ideas\\_for\\_11\\_pioneering\\_missions](https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/ESA_moves_forward_with_your_ideas_for_11_pioneering_missions), Stand: 20.02.2024.

- European Space Agency (ESA) (2022a): ESA budget 2022. [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2022/01/ESA\\_budget\\_2022](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2022/01/ESA_budget_2022), Stand: 20.02.2024.
- European Space Agency (ESA) (2022b): Effective use of Germanium. Nebula Public Library. <https://nebula.esa.int/content/effective-use-germanium>, Stand: 20.02.2024.
- European Space Agency (ESA) (2022c): Minister unterstützen kühne Ambitionen der ESA für die Raumfahrt mit historischem Mittelanstieg um 17 %. Press Release No. 62-2022. [https://www.esa.int/Newsroom/Press\\_Releases/Minister\\_unterstuetzen\\_kuehne\\_Ambitionen\\_der\\_ESA\\_fuer\\_die\\_Raumfahrt\\_mit\\_historischem\\_Mittelanstieg\\_um\\_17](https://www.esa.int/Newsroom/Press_Releases/Minister_unterstuetzen_kuehne_Ambitionen_der_ESA_fuer_die_Raumfahrt_mit_historischem_Mittelanstieg_um_17), Stand: 20.02.2024.
- European Space Agency (ESA) (2023): ExoMars suspended. Press Release No. 9-2022. [https://www.esa.int/Newsroom/Press\\_Releases/ExoMars\\_suspended](https://www.esa.int/Newsroom/Press_Releases/ExoMars_suspended), Stand: 20.02.2024.
- European Union Agency for the Space Programme (EUSPA) (o.J.): GOVSATCOM. <https://www.euspa.europa.eu/european-space/gov-satcom>, Stand: 21.02.2024.
- Exolaunch (2022): Falcon 9. Transporter-5 Mission. [https://www.exolaunch.com/mission\\_16.html](https://www.exolaunch.com/mission_16.html), Stand: 21.02.2024.
- Feddeck, P.; Mittelbach, E.; Fleischmann, M.: Erdbeobachtung. Unseren Planeten erkunden, vermessen und verstehen. Deutsche Raumfahrtagentur im DLR. <https://www.dlr.de/rd/PortalData/28/Resources/dokumente/publikationen/EOBroschuere.pdf>, Stand: 20.02.2024.
- Federal Aviation Administration (FAA) (2022): Final Programmatic Environmental Assessment for SpaceX Starship/Super Heavy Launch Vehicle Program at the SpaceX Boca Chica Launch Site in Cameron County, Texas. [https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-06/PEA\\_for\\_SpaceX\\_Starship\\_Super\\_Heavy\\_at\\_Boca\\_Chica\\_FINAL.pdf](https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-06/PEA_for_SpaceX_Starship_Super_Heavy_at_Boca_Chica_FINAL.pdf), Stand: 21.02.2024.
- Federal Aviation Administration (FAA) (2023): Written Re-Evaluation of the 2022 Final Programmatic Environmental Assessment for the SpaceX Starship/Super Heavy Launch Vehicle Program at The Boca Chica Launch Site in Cameron County, Texas. <https://www.faa.gov/media/27271>, Stand: 21.02.2024.
- Fischer, H.; Reinke, N.; Wette, P. (2019): Geschichte und Zukunft der Raumfahrt aus deutscher Perspektive. Aus Politik und Zeitgeschichte (aPuZ) (29-30). <https://www.bpb.de/apuz/293680/geschichte-und-zukunft-der-raumfahrt-aus-deutscher-perspektive?p=all>, Stand: 21.02.2024.
- Forensic Architecture (2021): Environmental Racism in Death Alley, Louisiana. <https://forensic-architecture.org/investigation/environmental-racism-in-death-alley-louisiana>, Stand: 21.02.2024.
- Forensic Architecture (2020): Intentional Fires in Papua. <https://forensic-architecture.org/investigation/intentional-fires-in-papua>, Stand: 21.02.2024.
- Forgan, D. H.; Elvis, M. (2011): Extrasolar Asteroid Mining as Forensic Evidence for Extraterrestrial Intelligence. International Journal of Astrobiology 10 (4), S. 307–313. doi:10.1017/S1473550411000127.
- Foster, C.; Hallam, H.; Mason, J. (2015): Orbit Determination and Differential-drag Control of Planet Labs Cubesat Constellations. Presented at AIAA Astrodynamics Specialist Conference in Vale, CO, August 2015. AAS. Band 15-524. Planet Labs PBC. doi:10.48550/arXiv.1509.03270.
- Foust, J. (2020): From the moon to the Earth: How the Biden administration might reshape NASA. SpaceNews. <https://spacenews.com/from-the-moon-to-the-earth-how-the-biden-administration-might-reshape-nasa/>, Stand: 21.02.2024.
- Foust, J. (2021): NASA delays human lunar landing to at least 2025. SpaceNews. <https://spacenews.com/nasa-delays-human-lunar-landing-to-at-least-2025/>, Stand: 21.02.2024.
- Freistetter, F. (2015): Wo beginnt der Weltraum? ScienceBlogs. <https://scienceblogs.de/astrodicticum-simplex/2015/03/02/wo-beginnt-der-weltraum/>, Stand: 21.02.2024.
- Fridays for Future U.S. (2021): 1% - After more than 5 million years of human existence on Earth, it's time for a change... Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=cKha3N7K7Hw>, Stand: 21.02.2024.
- Fuest, B.; Hegmann, G. (2019): 3236 Satelliten sollen Amazons Macht im All sichern. Welt. <https://www.welt.de/wirtschaft/article191523565/Amazon-Google-und-Facebook-wetteifern-um-die-Herrschaft-im-All.html>, Stand: 21.02.2024.
- Funke, T.; Buscher, M.; Patzphal, A.; Brieß, K. (2016): Eigenschaften und Entwicklung von Kleinstsatelliten. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt (DGLR). <https://www.dglr.de/publikationen/2016/420269.pdf>, Stand: 21.02.2024.
- Furian, W.; Loibl, D.; Schneider, C. (2021): Future glacial lakes in High Mountain Asia: an inventory and assessment of hazard potential from surrounding slopes. J. Glaciol. 67 (264), S. 653–670. doi:10.1017/jog.2021.18.
- Galli, A.; Losch, A. (2019): Beyond planetary protection: What is planetary sustainability and what are its implications for space research? Life Sciences in Space Research 23, S. 3–9. doi:10.1016/j.lssr.2019.02.005.
- Garcia, M. (o.J.): Visitors to the Station by Country. National Aeronautics and Space Administration (NASA). <https://www.nasa.gov/feature/visitors-to-the-station-by-country/>, Stand: 21.02.2024.
- Gebhardt, C. (2021): SpaceX launches first Starlink mission of 2021. NASASpaceFlight (NSF). <https://www.nasaspaceflight.com/2021/01/spacex-launch-first-starlink-mission-2021/>, Stand: 21.02.2024.
- Geerken, T.; Vercalsteren, A.; Boonen, K. (2018): User experience of the ESA LCA Handbook and database. VITO Remote Sensing. [https://indico.esa.int/event/234/contributions/4023/attachments/3020/3643/CSID\\_2018\\_User\\_experience\\_of\\_the\\_ESA\\_LCA\\_Handbook\\_and\\_database\\_Theo\\_Geerken.pdf](https://indico.esa.int/event/234/contributions/4023/attachments/3020/3643/CSID_2018_User_experience_of_the_ESA_LCA_Handbook_and_database_Theo_Geerken.pdf), Stand: 21.02.2024.
- Geldmann, J.; Manica, A.; Burgess, N. D.; Coad, L.; Balmford, A. (2019): A global-level assessment of the effectiveness of protected areas at resisting anthropogenic pressures. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS) 116 (46), S. 23209–23215. doi:10.1073/pnas.1908221116.
- Gensch, C.-O.; Gailhofer, P.; Gsell, M. (2019): Digitalisierung und Nachhaltigkeit: Politische Gestaltung zwischen Möglichkeiten, falschen Versprechungen und Risiken. Zusammenfassendes Rahmenpapier. Öko-Institut e.V. [https://www.zukunftserbe.de/fileadmin/user\\_upload/PDF/Rahmenpapier\\_Digitalisierung\\_20190503\\_final.pdf](https://www.zukunftserbe.de/fileadmin/user_upload/PDF/Rahmenpapier_Digitalisierung_20190503_final.pdf), Stand: 21.02.2024.
- German Orbital Systems (o.J.): German Orbital Systems. <https://www.orbitalsystems.de>, Stand: 21.02.2024.
- Gilbert, A. (2021): Mining in Space Is Coming. Milken Institute Review. <https://www.milkenreview.org/articles/mining-in-space-is-coming>, Stand: 21.02.2024.

- Gilbert, A.; Bazilian, M. D. (2020): The Era of Commercial Space Mining Begins. Viewpoint. Payne Institute for Public Policy. <https://payneinstitute.mines.edu/wp-content/uploads/sites/149/2020/09/Payne-Institute-Commentary-The-Era-of-Commercial-Space-Mining-Begins.pdf>, Stand: 21.02.2024.
- Gillis, J. R. (2012): The Human Shore. Seacoasts in History. Chicago, London.
- GISGeography (2015): Passive vs Active Sensors in Remote Sensing. <https://gisgeography.com/passive-active-sensors-remote-sensing/>, Stand: 21.02.2024.
- Glaister, B. J.; Mudd, G. M. (2010): The environmental costs of platinum–PGM mining and sustainability: Is the glass half-full or half-empty? Minerals Engineering 23 (5), S. 438–450. doi:10.1016/j.mineng.2009.12.007.
- Global Footprint Network (2023): About - Earth Overshoot Day. <https://www.overshootday.org/about/>, Stand: 21.02.2024.
- Gohd, C. (2021): International Space Station could be followed by commercial space stations after 2030, NASA says. Space. <https://www.space.com/iss-commercial-space-stations-after-2030-space-symposium>, Stand: 14.12.2021.
- Goswami, N. (2021): Paradigmatic shifts in space? Space policies of China and India: priorities, long-term focuses, and differences. The Space Review. <https://www.thespacereview.com/article/4245/1>, Stand: 21.02.2024.
- Gradoni, L. (2018): Auf Fischzug im Weltraum. Zur Sache - Internationales Recht. Band 1. Max-Planck-Gesellschaft. [https://www.mpg.de/12008336/Wo01\\_Zur-Sache\\_010-015.pdf](https://www.mpg.de/12008336/Wo01_Zur-Sache_010-015.pdf), Stand: 21.02.2024.
- Gradwohl, U. (2020): Macht ein Weltraumbahnhof in Deutschland Sinn? SWR Wissen. <https://www.swr.de/wissen/weltraumbahnhof-fuer-deutschland-100.html>, Stand: 21.02.2024.
- Graedel, T. E.; Harper, E. M.; Nassar, N. T.; Nuss, P.; Reck, B. K. (2015): Criticality of metals and metalloids. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS) 112 (14), S. 4257–4262. doi:10.1073/pnas.1500415112.
- Hall, A. (o.J.): International Space Station Facts and Figures. National Aeronautics and Space Administration (NASA). <https://www.nasa.gov/feature/facts-and-figures>, Stand: 21.02.2024.
- Handke, K. (2020): Deutscher Weltraumbahnhof in der Nordsee: Unternehmen planen Starts von Trägerraketen vom Wasser aus. Business Insider. <https://www.businessinsider.de/wirtschaft/mobility/deutscher-weltraumbahnhof-in-der-nordsee-unternehmen-planen-starts-von-traegerraketen-vom-wasser-aus-a/>, Stand: 21.02.2024.
- Handler, S.; Pike, C.; St. Clair, B.; Abbotts, H.; Janowiak, M. (o.J.): Assisted Migration. USDA Forest Service Climate Change Resource Center. [https://www.climatehubs.usda.gov/sites/default/files/Assisted-Migration\\_Climate-Change-Resource-Center.pdf](https://www.climatehubs.usda.gov/sites/default/files/Assisted-Migration_Climate-Change-Resource-Center.pdf), Stand: 21.02.2024.
- Hannemann, K.; Longo, J. (2011): Aerothermodynamik und Wiedereintritt. In: Handbuch der Raumfahrttechnik. S. 102–117. München.
- Hanson, A. (2022): Final PEA Executive Summary. Federal Aviation Administration (FAA). [https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-06/Final\\_PEA\\_Executive\\_Summary.pdf](https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-06/Final_PEA_Executive_Summary.pdf), Stand: 21.02.2024.
- Harper, J. (2020): Japan developing wooden satellites to cut space junk. BBC News. <https://www.bbc.com/news/business-55463366>, Stand: 21.02.2024.
- Harris, M. (2021): The mystery of Elon Musk's missing gas. TechCrunch. <https://techcrunch.com/2021/10/08/the-mystery-of-elon-musks-missing-gas>, Stand: 21.02.2024.
- 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](http://esamultimedia.esa.int/docs/corporate/European_and_space_activities_Harris_results.pdf), Stand: 21.02.2024.
- Häusler, M.; Wiedemann, K. (2011): Bodenstationsnetzwerk. In: Handbuch der Raumfahrttechnik. S. 468–487. München.
- Hawking, S. (1988): A brief history of time. From the Big Bang to Black Holes. London.
- Hecht, M.; Hoffman, J.; Rapp, D.; McClean, J.; SooHoo, J.; Schaefer, R.; Aboobaker, A.; Mellstrom, J.; Hartvigsen, J.; Meyen, F.; Hinterman, E.; Voecks, G.; Liu, A.; Nasr, M.; Lewis, J.; Johnson, J.; Guernsey, C.; Swoboda, J.; Eckert, C.; Alcalde, C.; Poirier, M.; Khopkar, P.; Elangovan, S.; Madsen, M.; Smith, P.; Graves, C.; Sanders, G.; Araghi, K.; de la Torre Juarez, M.; Larsen, D.; Agui, J.; Burns, A.; Lackner, K.; Nielsen, R.; Pike, T.; Tata, B.; Wilson, K.; Brown, T.; Disarro, T.; Morris, R.; Steinkraus, R.; Surampudi, R.; Werne, T.; Ponce, A. (2021): Mars Oxygen ISRU Experiment (MOXIE). Space Sci Rev 217 (1). doi:10.1007/s11214-020-00782-8.
- Hegmann, G. (2020): Satelliten-Pionier Musk erobert das All – und Europas Antwort lässt tief blicken. Welt. <https://www.welt.de/wirtschaft/article223364370/EU-plant-eigenes-Weltraum-Internet-Doch-Musk-und-China-sind-weit-voraus.html>, Stand: 21.02.2024.
- Heller, P. (2021): Auf in die Tiefen des Universums! Weltraumbau. Deutschlandfunk Kultur. <https://www.deutschlandfunkkultur.de/weltraumbau-auf-in-die-tiefen-des-universums-100.html>, Stand: 21.02.2024.
- Herold, C. (2021): Wettersatelliten. Deutscher Wetterdienst (DWD). [https://www.dwd.de/DE/wetter/thema\\_des\\_tages/2021/11/14.html](https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2021/11/14.html), Stand: 21.02.2024.
- Herrmann, J. (2005): dtv-Atlas Astronomie. Mit Sternatlas. München.
- Heyn, T.; Hofmann, A. (o.J.): Direkte Satellitenkonnektivität für 5G und 6G. Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen (IIS). <https://www.iis.fraunhofer.de/de/ff/kom/satkom/sat-5g.html>, Stand: 21.02.2024.
- High Performance Space Structure Systems (HPS) (o.J.): ADEO – Entfaltbare Bremssegel Für Deorbit. <https://www.hps-gmbh.com/portfolio/adeo-on-angel-wings/>, Stand: 21.02.2024.
- Hiltl, F. (2021): LKW-Parken als europäischer Datendienst und Buchungsservice. Prisma Solutions. [https://www.d-copernicus.de/fileadmin/Content/pdf/Forum\\_2021/Copernicus\\_mFUND\\_I7P\\_20210324.pdf](https://www.d-copernicus.de/fileadmin/Content/pdf/Forum_2021/Copernicus_mFUND_I7P_20210324.pdf), Stand: 21.02.2024.
- Hindlmaier, G.; Kuch, T. (2011): Kontrollzentrum. In: Handbuch der Raumfahrttechnik. S. 458–467. München.
- Hirzinger, G.; Landzettel, K.; Kaiser, C. (2011): Neue Technologien und Robotik. In: Handbuch der Raumfahrttechnik. S. 597–619. München.
- Holland, M. (2021): Starlink & Co.: Lichtverschmutzung künftig auch in Mitteleuropa am schlimmsten. heise online. <https://www.heise.de/news/Starlink-Co-Lichtverschmutzung-wird-auch-in-Mitteleuropa-am-staerksten-6198316.html>, Stand: 21.02.2024.
- Holsten, H. (2011): Trägersysteme. In: Handbuch der Raumfahrttechnik. S. 131. München.

- Horneck, G.; Cockell, C. S. (2010): Planetary Parks - Suggestion for a Targeted Planetary Protection Approach. In: Protecting the Environment of Celestial Bodies. – IAA Cosmic Study. S. 45–49. <https://iaaspace.org/wp-content/uploads/iaa/Scientific%20Activity/Study%20Groups/SG%20Commission%205/sg56/sg56finaldraftreport.pdf>, Stand: 21.02.2024.
- Howell, E. (2017): This Ultrathin Craft Could Soon Envelop and Destroy Space Junk. Space.com. <https://www.space.com/38105-ultrathin-craft-could-destroy-space-junk.html>, Stand: 21.02.2024.
- Howell, E. (2022): What is Space? Space.com. <https://www.space.com/24870-what-is-space.html>, Stand: 21.02.2024.
- Howell, E. (2023): NASA's Artemis 2 mission: Everything you need to know. Space.com. <https://www.space.com/artemis-2-humans-moon-orbit>, Stand: 21.02.2024.
- Hühn, S. (2019): Mission fehlgeschlagen: Ist Mars One endgültig Geschichte? Ingenieur.de. <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/raumfahrt/mission-fehlgeschlagen-ist-mars-one-endgueltig-geschichte/>, Stand: 21.02.2024.
- Illina, A. (2023): Der deutsche Weltraumbahnhof: Von der Nordsee ins All? Ingenieur.de. <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/raumfahrt/der-deutsche-weltraumbahnhof-von-der-nordsee-ins-all/>, Stand: 21.02.2024.
- Indian Space Research Organisation (ISRO) (o.J.): Chandrayaan-3 Details. [https://www.isro.gov.in/Chandrayaan3\\_Details.html](https://www.isro.gov.in/Chandrayaan3_Details.html), Stand: 21.02.2024.
- Inspiration4 (2021): Inspiration4 Crew Makes Evening Splashdown, Completing World's First All-Civilian Orbital Mission to Space. <https://inspiration4.com/press/kennedy-space-center-fl-september-18-2021--after>, Stand: 21.02.2024.
- Institut für Technikfolgen-Abschätzung der Österreichischen Akademie (ITA); Austrian Institute of Technology (AIT) (2018): Bergbau im All. Foresight und Technikfolgenabschätzung: Monitoring von Zukunftsthemen für das Österreichische Parlament. Projektbericht. Band ITA-AIT-7. [https://www.parlament.gv.at/dokument/fachinfos/zukunftsthemen/032\\_bergbau\\_im\\_all.pdf](https://www.parlament.gv.at/dokument/fachinfos/zukunftsthemen/032_bergbau_im_all.pdf), Stand: 21.02.2024.
- International Energy Agency (IEA) (2019): The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities. [https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The\\_Future\\_of\\_Hydrogen.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf), Stand: 21.02.2024.
- International Space Exploration Coordination Group (ISECG) (2022): The Global Exploration Roadmap. Supplement October 2022. [https://www.globalspaceexploration.org/wp-content/isecg/GER\\_Supplement\\_Update\\_2022.pdf](https://www.globalspaceexploration.org/wp-content/isecg/GER_Supplement_Update_2022.pdf), Stand: 21.02.2024.
- Isar Aerospace (o.J.): Spectrum. 2 Stage Orbital Launch Vehicle. <https://www.isaraerospace.com/spectrum>, Stand: 21.02.2024.
- Jafarzadeh, H.; Mahdianpari, M.; Homayouni, S.; Mohammadi-manesh, F.; Dabboor, M. (2021): Oil spill detection from Synthetic Aperture Radar Earth observations: a meta-analysis and comprehensive review. *GIScience & Remote Sensing* 58 (7), S. 1022–1051. doi:10.1080/15481603.2021.1952542.
- Janich, P. (2000): Philosophische Ethik und Technik: die Diskussion um die bemannte Raumfahrt. In: Philosophie und Technik. S. 147–162. München.
- Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) (Hrsg.) (2017): Earth Observations in support of the 2030 Agenda for Sustainable Development.
- JapanWelt (2021): Weltraumressourcengesetz in Japan erlassen – Kritik aus Russland. <https://www.japanwelt.de/news/weltraumgesetz-japan>, Stand: 20.02.2024.
- Johnson, J. E.; Conley, C.; Siegel, B. (2017): A Path to Planetary Protection Requirements for Human Exploration: A Literature Review and Systems Engineering Approach. National Aeronautics and Space Administration (NASA). <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20170006174/downloads/20170006174.pdf>, Stand: 20.02.2024.
- Jones, A. (2021a): China outlines space plans to 2025. SpaceNews. <https://spacenews.com/china-outlines-space-plans-to-2025/>, Stand: 20.02.2024.
- Jones, A. (2021b): China wants to build a sustainable human presence on Mars. Here's how. Space. <https://www.space.com/china-plans-mars-base-with-astronauts>, Stand: 20.02.2024.
- Jones, A. (2023a): China wants to launch over 200 spacecraft in 2023. Space. <https://www.space.com/china-launch-200-spacecraft-2023>, Stand: 20.02.2024.
- Jones, A. (2023b): Russia's war on Ukraine has caused lasting damage to international spaceflight cooperation. Space. <https://www.space.com/russia-war-ukraine-damage-international-spaceflight-cooperation>, Stand: 20.02.2024.
- Jones, A. (2023c): China's space station, Tiangong: A complete guide. Space. <https://www.space.com/tiangong-space-station>, Stand: 20.02.2024.
- Jordan, N. (2021): Astronautenblick für alle: Wie offen sind die Erdbeobachtungsdaten der ESA? RESET. <https://reset.org/blog/astronautenblick-fuer-alle-wie-offen-sind-die-erdbeobachtungsdaten-der-esa-01192021>, Stand: 20.02.2024.
- Kaboth, A.; Werling, L. (2021): Von der chemischen Synthese bis zum Einsatz – beim DLR entsteht der Raketentreibstoff der Zukunft. Die Zukunft der Treibstoffe beginnt im DLR Lampoldshausen. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR). [https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2021/01/20210330\\_fortschrittliche-gruene-treibstoffe](https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2021/01/20210330_fortschrittliche-gruene-treibstoffe), Stand: 18.09.2023.
- Kaiser, A. (o.J.): Earth Observation Center - Team: Datenprozessierung und Entwicklung. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR). [https://www.dlr.de/eoc/desktopdefault.aspx/tabid-9262/15971\\_read-39280/](https://www.dlr.de/eoc/desktopdefault.aspx/tabid-9262/15971_read-39280/), Stand: 20.02.2024.
- Kanis, S. (2016): What is Astrobee? National Aeronautics and Space Administration (NASA). <https://www.nasa.gov/astrobee>, Stand: 20.02.2024.
- Keronite (2023): The Lightweight Future of Space Design and Material Selection. <https://blog.keronite.com/the-lightweight-future-of-space-design-and-material-selection>, Stand: 20.02.2024.
- Kilian, P. (2019): Rückkehr in die Zukunft. Weltraumkolonisierung revisited. Geschichte der Gegenwart. <https://geschichtedergegenwart.ch/rueckkehr-in-die-zukunft-weltraumkolonisierung-revisited/>, Stand: 20.02.2024.
- Kind, S.; Jetzke, T.; Nögel, L.; Bovenschulte, M.; Ferdinand, J.-P. (2020): New Space – neue Dynamik in der Raumfahrt. TAB-Kurzstudie. Band 1. <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000130986>, Stand: 20.02.2024.
- Klapetz, P. (2023): Wie der wachsende Weltraumschrott zur Herausforderung der Raumfahrt wird. MDR. <https://www.mdr.de/wissen/faszination-technik/weltraumschrott-neue-methode-zur-vorhersage-von-bevorstehenden-kollisionen-100.html>, Stand: 20.02.2024.

- Koch, F. (2018): RFC: Space Debris – Waste or Value? <https://indico.esa.int/event/234/contributions/4019/attachments/3018/3630/RFC-OrbitRecycling-Waste-or-Value.pdf>, Stand: 20.02.2024.
- Koch, F. (2021): A Business Case for Space Debris. Executive Summary. [https://nebula.esa.int/sites/default/files/neb\\_study/2523/C4000132842ExS.pdf](https://nebula.esa.int/sites/default/files/neb_study/2523/C4000132842ExS.pdf), Stand: 20.02.2024.
- Köllner, C. (2019): Begrenztes Klimaschutz-Potenzial durch automatisiertes Fahren. [springerprofessional.de. https://www.springerprofessional.de/automatisiertes-fahren/nachhaltigkeit/begrenztes-klimaschutz-potenzial-durch-automatisiertes-fahren/16578216](https://www.springerprofessional.de/automatisiertes-fahren/nachhaltigkeit/begrenztes-klimaschutz-potenzial-durch-automatisiertes-fahren/16578216), Stand: 20.02.2024.
- Kowalski, G. (2015): 40 Jahre Sojus-Apollo-Projekt: Handschlag in der Umlaufbahn. Der Spiegel. <https://www.spiegel.de/wissen/schafft/weltall/sojus-apollo-projekt-shakehands-im-all-vor-40-jahren-a-1043851.html>, Stand: 20.02.2024.
- Krail, M.; Hellekes, J.; Schneider, U.; Dütschke, E. (2019): Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr. [www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccn/2019/energie-treibhausgaswirkungen-ernetztes-fahren.pdf](https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccn/2019/energie-treibhausgaswirkungen-ernetztes-fahren.pdf), Stand: 20.02.2024.
- Kramer, H. J. (2016): Tandem-L. [eoPortal. https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/tandem-l](https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/tandem-l), Stand: 20.02.2024.
- Kramer, W. R. (2014): Extraterrestrial Environmental Impact Assessments – A Foreseeable Prerequisite for Wise Decisions Regarding Outer Space Exploration, Research and Development. *Space Policy* 30 (4), S. 215–222. doi:10.1016/j.spacepol.2014.07.001.
- Kramer, W. R. (2017): In Dreams Begin Responsibilities – Environmental Impact Assessment and Outer Space Development. *Environmental Practice* 19 (3), S. 128–138. doi:10.1080/14660466.2017.1338874.
- Kramer, W. R. (2020): A Framework for Extraterrestrial Environmental Assessment. *Space Policy* 53, S. 101385. doi:10.1016/j.spacepol.2020.101385.
- Kranz, T.; Regenbrecht, D. (2014): Trägerraketen. Europas Tor zum Weltraum. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR). [https://www.dlr.de/rd/PortalData/28/Resources/dokumente/publikationen/Broschuere\\_Launcher\\_hires.pdf](https://www.dlr.de/rd/PortalData/28/Resources/dokumente/publikationen/Broschuere_Launcher_hires.pdf), Stand: 17.02.2024.
- Kulu, E. (2021a): Small Launchers - 2021 Industry Survey and Market Analysis. In: 72nd International Astronautical Congress (IAC 2021). [https://www.newspace.im/assets/Small-Launchers-2021-Erik-Kulu\\_IAC2021.pdf](https://www.newspace.im/assets/Small-Launchers-2021-Erik-Kulu_IAC2021.pdf), Stand: 20.02.2024.
- Kulu, E. (2021b): Commercial Landscape of Space Resources in 2021 – Industry Survey. *Space Resources Week 2021*, April 19-23. Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST). [https://www.factoriesinspace.com/graphs/Commercial-Landscape-of-Space-Resources\\_Erik-Kulu.pdf](https://www.factoriesinspace.com/graphs/Commercial-Landscape-of-Space-Resources_Erik-Kulu.pdf), Stand: 20.02.2024.
- Kuo, L. (2018): Tiangong-1 Crash: Chinese Space Station Comes Down in Pacific Ocean. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/world/2018/apr/02/tiangong-1-crash-china-space-station>, Stand: 20.02.2024.
- Küpper, S. (2023): Weltraum: Raumfahrt-Koordinatorin Anna Christmann: „Europa braucht gute Startmöglichkeiten für Kleinraketen“. *Augsburger Allgemeine*. <https://www.augsburger-allgemeine.de/wirtschaft/weltraum-raumfahrt-koordinatorin-anna-christmann-europa-braucht-gute-startmoeglichkeiten-fuer-kleinraketen-id65473406.html>, Stand: 20.02.2024.
- Kurstjens, R.; Schurmans, M.; Dessen, K. (2018): Increasing Ge resource efficiency for future low-CO2 multijunction solar cells. In: *Clean Space Industry Days 2018*.
- Lamboray, B.; Mousel, J.; Fleischer, S.; Martin, G.; Matuleviciute, D.; Rouesnel, F. (2019): Major Takeaways of the Mining Space Summit 2019.
- Landwehr, A. (2021): Kommerzielle Raumfahrt – Erhöhtes Konfliktpotenzial im All. *ARD Washington*. <https://www.tagesschau.de/ausland/amerika/weltraumstreit-usa-china-101.html>, Stand: 20.02.2024.
- Langley, R. B. (2017): Innovation: GLONASS – past, present and future. An Alternative and Complement to GPS. *GPS World*. <https://www.gpsworld.com/innovation-glonass-past-present-and-future/>, Stand: 20.02.2024.
- Larson, E. J. L.; Portmann, R. W.; Rosenlof, K. H.; Fahey, D. W.; Daniel, J. S.; Ross, M. N. (2017): Global atmospheric response to emissions from a proposed reusable space launch system. *Earth's Future* 5 (1), S. 37–48. doi:10.1002/2016EF000399.
- Lassmann, J.; Obersteiner, M. H. (2011): Gesamtsysteme. In: *Handbuch der Raumfahrttechnik*. S. 132–149. München.
- Lauvaux, T.; Giron, C.; Mazzolini, M.; D'Aspremont, A.; Duren, R.; Cusworth, D.; Shindell, D.; Ciaia, P. (2022): Global assessment of oil and gas methane ultra-emitters. *Science* (Vol 375, Issue 6580), S. 557–561. doi:10.1126/science.abj4351.
- Le Traon, P.-Y.; Melet, A.; Schuckmann, K. von (2021): Copernicus Marine Service (CMEMS). Aktuelle Entwicklungen der Copernicusdienste zur Überwachung der Meeresumwelt und Einblicke in den Bereich Küstenmonitoring. [https://www.d-copernicus.de/fileadmin/Content/pdf/Forum\\_2021/210324\\_1015\\_vonSchuckmann.pdf](https://www.d-copernicus.de/fileadmin/Content/pdf/Forum_2021/210324_1015_vonSchuckmann.pdf), Stand: 20.02.2024.
- Leeuw, J. de; Georgiadou, Y.; Kerle, N.; Gier, A. de; Inoue, Y.; Ferwerda, J.; Smies, M.; Narantuya, D. (2010): The Function of Remote Sensing in Support of Environmental Policy. *Remote Sensing* 2 (7), S. 1731–1750. doi:10.3390/rs2071731.
- Leman, J. (2020): Is Anyone Out There?: The Fermi Paradox, Explained. *Popular Mechanis*. <https://www.popularmechanics.com/space/deep-space/a32749273/what-is-fermi-paradox/>, Stand: 20.02.2024.
- Ley, W.; Wittmann, K.; Hallmann, W. (Hrsg.) (2011): *Handbuch der Raumfahrttechnik*. München.
- Lim, P. (2021): Space scrap the next frontier of metals recycling. *Recycling International*. <https://recyclinginternational.com/research/space-scrap-the-next-frontier-of-metals-recycling/33423/>, Stand: 20.02.2024.
- Lin, D.; Wambersie, L.; Wackernagel, M. (2023): Estimating the Date of Earth Overshoot Day 2023. <https://www.overshootday.org/content/uploads/2023/06/Earth-Overshoot-Day-2023-Nowcast-Report.pdf>, Stand: 20.02.2024.
- Liverpool, L. (2023): What Russia's continued participation in the ISS means for science. *Nature*. doi:10.1038/d41586-023-01558-0.
- Löfken, J. O. (2021): Vielversprechende ISS-Versuche: Gecko-Haftschrift fängt Weltraumschrott ein. *Heise Medien*. <https://www.heise.de/hintergrund/Vielversprechende-ISS-Versuche-Gecko-Haftschrift-faengt-Weltraumschrott-ein-5071869.html>, Stand: 20.02.2024.
- Logar, K. (1976): Forscher zu Gast - Das Apollo-Sojus- und das Space-Shuttle-Projekt. Interview mit Dr. Friedrich Vonbun (NASA). <https://www.nasa.gov/pdf/197601main-apollo-sojus-und-das-space-shuttle-projekt-197601main>

- [ps://www.mediathek.at/katalogsuche/suche/detail/?uid=01782B-BA-189-00EF4-00000BEC-01772EE2](https://www.mediathek.at/katalogsuche/suche/detail/?uid=01782B-BA-189-00EF4-00000BEC-01772EE2), Stand: 20.02.2024.
- Lorenzen, D. (2009): Weltraumbahnhof im Dschungel. Deutschlandfunk.de. <https://www.deutschlandfunk.de/weltraumbahnhof-im-dschungel-100.html>, Stand: 20.02.2024.
- Lorenzen, D. (2020): Unglück bei Apollo 13 - Das erfolgreiche Scheitern eines Mondflugs. Deutschlandfunk.de. <https://www.deutschlandfunk.de/unglueck-bei-apollo-13-das-erfolgreiche-scheitern-eines-100.html>, Stand: 20.02.2024.
- Lorenzen, D. (2022): „Tiangong-1“ - China vergrößert seine Raumstation. Deutschlandfunk.de. <https://www.deutschlandfunk.de/chinas-raumstation-100.html>, Stand: 20.02.2024.
- Losch, A. (2020): Planetary sustainability collection. Glob. Sustain. 3. doi:10.1017/sus.2020.7.
- Löw, F. (2021): Copernicus für Krisen- und Risikomanagement im Kontext Hochwasser. [https://www.d-copernicus.de/fileadmin/Content/pdf/Forum\\_2021/210324\\_1120\\_loew.pdf](https://www.d-copernicus.de/fileadmin/Content/pdf/Forum_2021/210324_1120_loew.pdf), Stand: 20.02.2024.
- Lucas-Rhimbassen, M.; Santos, C.; Long, G. A.; Rapp, L. (2019): Conceptual Model For A Profitable Return On Investment From Space Debris As Abiotic Space Resource. 8th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS). <https://www.eucass.eu/doi/EUCASS2019-0602.pdf>, Stand: 21.02.2024.
- Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) (2021): Luxembourg Space Ressources Week. Book of Abstracts. Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST).
- Luxembourg Space Agency (LSA) (2021): International Space Law. Legal Framework. <https://space-agency.public.lu/en/agency/legal-framework.html>, Stand: 20.02.2024.
- Maini, A. K.; Agrawal, V. (2014): Satellite technology. Principles and applications. Chichester, West Sussex.
- Malusky, J. (2023): GBT Will Receive Simulated Message from Extraterrestrial Intelligence. Green Bank Observatory. <https://greenbankobservatory.org/gbt-will-receive-simulated-message-from-extraterrestrial-intelligence/>, Stand: 20.02.2024.
- Mars, K. (2020): Space Station 20th – Space Flight Participants. NASA. <https://www.nasa.gov/feature/space-station-20th-space-flight-participants>, Stand: 24.08.2023.
- Mars, K. (2023): Gateway. National Aeronautics and Space Administration (NASA). <https://www.nasa.gov/gateway/overview>, Stand: 20.02.2024.
- Marsiske, H.-A. (2005): Heimat Weltall. Wohin soll die Raumfahrt führen? Frankfurt am Main.
- Marsiske, H.-A. (2016): RISpace: Wie kommt der Satellit (möglichst günstig) in den Orbit? heise online. <https://www.heise.de/newsticker/meldung/RISpace-Wie-kommt-der-Satellit-moeglichst-guens-tig-in-den-Orbit-3369777.html>, Stand: 20.02.2024.
- Martin, P. K. (2018): Examining the future of the International Space Station. <https://oig.nasa.gov/docs/CT-18-001.pdf>, Stand: 20.02.2024.
- Mäurer, D. K. (2020): ESA-Auftrag an Schweizer Startup : Der Schrott im Orbit soll weg. tagesschau.de. <https://www.tagesschau.de/ausland/europa/esa-weltraum-schrott-auftrag-101.html>, Stand: 20.02.2024.
- Maury, T.; Loubet, P.; Serrano, S. M.; Gallice, A.; Sonnemann, G. (2020): Application of environmental life cycle assessment (LCA) within the space sector: A state of the art. Acta Astronautica 170, S. 122–135. doi:10.1016/j.actaastro.2020.01.035.
- McDowell, J. (2022): Starlink Statistics. Planet 4589. <https://planet4589.org/space/con/star/stats.html>, Stand: 20.02.2024.
- McDowell, J. (2023): Space Activities in 2022. Planet 4589. <https://planet4589.org/space/papers/space22.pdf>, Stand: 20.02.2024.
- McKinsey & Company; World Economic Forum (2022): The role of space in driving sustainability, security, and development on Earth. Five actions that leaders can take to maximize the potential of the sector and its benefits for humanity. <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/aerospace%20and%20defense/our%20insights/the%20role%20of%20space%20in%20driving%20sustainability%20security%20and%20development%20on%20earth/the-role-of-space-in-driving-sustainability-security-and-development-on-earth-vf.pdf>, Stand: 20.02.2024.
- Messe München GmbH (2022): Der Weg zur autonomen Produktion. <https://automatica-munich.com/de/newsroom/news/digital-transformation/automatisierung/>, Stand: 20.02.2024.
- Metz, M. (2021): Weltraummüll - eine potenzielle Gefahr für die Raumfahrt. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR). <https://www.dlr.de/rd/desktopdefault.aspx/tabid-2265/3376-read-5091/>, Stand: 20.02.2024.
- Meyer, C. (2003): Lunar Regolith. NASA Lunar Petrographic Educational Thin Section Set. <https://curator.jsc.nasa.gov/lunar/lets/regolith.pdf>, Stand: 20.02.2024.
- Milakis, D.; van Arem, B.; van Wee, B. (2017): Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research. Journal of Intelligent Transportation Systems 21 (4), S. 324–348. doi:10.1080/15472450.2017.1291351.
- Mitchell, A. L.; Rosenqvist, A.; Mora, B. (2017): Current remote sensing approaches to monitoring forest degradation in support of countries measurement, reporting and verification (MRV) systems for REDD. Carbon Balance Manage 12 (1), S. 9. doi:10.1186/s13021-017-0078-9.
- Mohamed, M. T. A.; Al-Naimi, L. S.; Mgebojedo, T. I.; Agoha, C. C. (2021): Geological mapping and mineral prospectivity using remote sensing and GIS in parts of Hamissana, Northeast Sudan. J Petrol Explor Prod Technol 11 (3), S. 1123–1138. doi:10.1007/s13202-021-01115-3.
- Montenbruck, O. (2011): Bahnmechanik. In: Handbuch der Raumfahrttechnik. S. 74–101. München.
- Moore, B. (2013): Elefanten im All. Unser Platz im Universum. Zürich.
- Morales Serrano, S.; Padilla Gutierrez, E.; Courson, S.-A. de; Tormenta, E. (2022): LCA & EcoDesign for space. UN/UNOOSA Training. ESA Clean Space Team. [https://www.unoosa.org/documents/pdf/psa/activities/2022/UN-Austria/UNOOSA\\_ESA\\_LCA\\_EcoDesign\\_Training.pdf](https://www.unoosa.org/documents/pdf/psa/activities/2022/UN-Austria/UNOOSA_ESA_LCA_EcoDesign_Training.pdf), Stand: 20.02.2024.
- Moranta, S.; Donati, A.; Hadley, S.; Bataille, M.; Varma, J.; La Rocca, G.; Alba, F. (2020): ESPI Yearbook 2019. Space policies, issues and trends. <https://www.espi.or.at/wp-content/uploads/2020/05/ESPI-Yearbook-2019.pdf>, Stand: 20.02.2024.
- Moranta, S.; Varma, J.; Hrozensky, T.; Dalledonne, S.; Poirier, C.; Bataille, M.; Zontini, R.; Wright, E.; Hermes, M. (2021): ESPI Yearbook 2020. Space policies, issues and trends. European Space Policy Institute (ESPI).
- Morgan Stanley (2020): Space: Investing in the Final Frontier. <https://www.morganstanley.com/ideas/investing-in-space>, Stand: 20.02.2024.

- Möthe, A. (2010): Schneller schlau: Warum liegen alle Welt- raumbahnhöfe nahe dem Äquator? Handelsblatt. <https://www.handelsblatt.com/technik/forschung-innovation/schneller-schlau/schneller-schlau-warum-liegen-alle-weltraumbahnhoeefe-na-he-dem-aequator/3750980.html>, Stand: 20.02.2024.
- Mustow, S. E. (2018): Environmental impact assessment (EIA) screening and scoping of extraterrestrial exploration and development projects. *Impact Assessment and Project Appraisal* 36 (6), S. 467–478. doi:10.1080/14615517.2018.1500092.
- NASA Jet Propulsion Laboratory (o.J.): Voyager Mission Overview. <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/>, Stand: 20.02.2024.
- NASA Jet Propulsion Laboratory (2023): Shuttle Radar Topography Mission. <https://www.earthdata.nasa.gov/sensors/srtm>, Stand: 20.02.2024.
- NASA Jet Propulsion Laboratory; NASA Mars Exploration Mission (2023): Future. Mars Exploration Section. <https://mars.nasa.gov/mars-exploration/overlay-humans/>, Stand: 20.02.2024.
- NASA Orbital Debris Program Office (2022): International Space Station Maneuvers to Avoid Another Russian ASAT Fragment. *Orbital Debris Quarterly News* 26 (4). <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv26i4.pdf>, Stand: 20.02.2024.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) (o.J. b): NASA Spinoff. <https://spinoff.nasa.gov/>, Stand: 20.02.2024.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) (o.J. a): NASA: 60 Years & Counting - Technology. <https://www.nasa.gov/specials/60counting/tech.html>, Stand: 20.02.2024.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) (o.J. c): Orion Spacecraft. <https://www.nasa.gov/humans-in-space/orion-spacecraft/orion-overview/>, Stand: 20.02.2024.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2008): In-Situ Resource Utilization. <https://www.nasa.gov/overview/in-situ-resource-utilization/>, Stand: 20.02.2024.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2011): Preliminary Report Regarding NASA's Space Launch System and Multi-Purpose Crew Vehicle. [https://www.nasa.gov/pdf/510449main/SLS\\_MPCV\\_90-day\\_Report.pdf](https://www.nasa.gov/pdf/510449main/SLS_MPCV_90-day_Report.pdf), Stand: 20.02.2024.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2015): Reference Guide to the International Space Station. National Aeronautics and Space Administration (NASA).
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2016): NASA's OSIRIS-REx Asteroid Sample Return Mission. [https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/osiris\\_rex\\_factsheets-25.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/osiris_rex_factsheets-25.pdf), Stand: 06.05.2022.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2017): Human-Rating Requirements for Space Systems. Band 85. National Aeronautics and Space Administration (NASA). <https://nodis3.gsfc.nasa.gov/displayDir.cfm?t=NPR&c=8705&s=2C>, Stand: 20.02.2024. doi:10.14714/CP85.1413.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2019a): Forward to the Moon. NASA's Strategic Plan for Human Exploration. [https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/america\\_to\\_the\\_moon\\_2024\\_artemis\\_20190523.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/america_to_the_moon_2024_artemis_20190523.pdf), Stand: 20.02.2024.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2019b): New Horizons. [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/newhorizons/main/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/newhorizons/main/index.html), Stand: 20.02.2024.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2019c): Orbital Debris Mitigation Standard Practices. November 2019 Update. [https://www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov/library/usg\\_orbital\\_debris\\_mitigation\\_standard\\_practices\\_november\\_2019.pdf](https://www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov/library/usg_orbital_debris_mitigation_standard_practices_november_2019.pdf), Stand: 20.02.2024.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2019d): Voyager 1's Pale Blue Dot. NASA Solar System Exploration. <https://solarsystem.nasa.gov/resources/536/voyager-1s-pale-blue-dot/>, Stand: 20.02.2024.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2020a): NASA's Lunar Exploration Program Overview. September 2020. [https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/artemis\\_plan\\_20200921.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/artemis_plan_20200921.pdf), Stand: 20.02.2024.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2020b): The Artemis Accords. Principles for Cooperation in the Civil Exploration and Use of the Moon, Mars, Comets, and Asteroids for Peaceful Purposes. <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2022/11/Artemis-Accords-signed-13Oct2020.pdf>, Stand: 20.02.2024.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2022): NASA Economic Impact Report. FY19. <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/06/nasa-fy21-economic-impact-report-brochure.pdf>, Stand: 20.02.2024.
- National Air and Space Museum (NASM) (o.J.): TIROS Meteorological Satellite. [https://airandspace.si.edu/collection-objects/meteorological-satellite-tiros/nasm\\_A19650289000](https://airandspace.si.edu/collection-objects/meteorological-satellite-tiros/nasm_A19650289000), Stand: 20.02.2024.
- National Research Council (NRC) (2007): The scientific context for exploration of the Moon. doi:10.17226/11954.
- Nativi, S.; Craglia, M. (2020): Destination Earth Use Cases Analysis. Band JRC122456. [https://www.researchgate.net/publication/346444912\\_Destination\\_Earth\\_Use\\_Cases\\_Analysis](https://www.researchgate.net/publication/346444912_Destination_Earth_Use_Cases_Analysis), Stand: 20.02.2024. doi:10.2760/17457.
- Nestler, R. (2011): Satellitennavigationssystem „Galileo“: Start der Sojus-Rakete auf Freitag verschoben. *Der Tagesspiegel*. <https://www.tagesspiegel.de/gesellschaft/panorama/start-der-sojus-rakete-auf-freitag-verschoben-6711832.html>, Stand: 20.02.2024.
- Newman, C. J.; Williamson, M. (2018): Space Sustainability: Reframing the Debate. *Space Policy* 46, S. 30–37. doi:10.1016/j.spacepol.2018.03.001.
- Nguyen, C. (2022): Raumfahrt: Russland stoppt Arbeit am Welt- raumbahnhof Französisch-Guayana. *Die Zeit*. <https://www.zeit.de/politik/ausland/2022-02/raumfahrt-russland-weltraumbahnhof-franzoesisch-guayana>, Stand: 20.02.2024.
- Niebergall, S.; Loew, A.; Mauser, W. (2008): Integrative Assessment of Informal Settlements Using VHR Remote Sensing Data—The Delhi Case Study. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 1 (3), S. 193–205. doi:10.1109/JSTARS.2008.2007513.
- NOIRlab (2021): Executive Summary of the SATCON2 Workshop. <https://noirlab.edu/public/media/archives/techdocs/pdf/tech-doco31.pdf>, Stand: 20.02.2024.
- Normile, D. (2016): World's largest radio telescope will search for dark matter, listen for aliens. *Science*. <https://www.science.org/content/article/world-s-largest-radio-telescope-will-search-dark-matter-listen-aliens>, Stand: 20.02.2024.
- O'Callaghan, J. (2021): Starlink Megakonstellation zwischen Start und Klage. *Spektrum.de*. <https://www.spektrum.de/news/spacex-starlink-satelliten-vor-neuer-rechtlicher-herausforderung/1885504>, Stand: 20.02.2024.
- OHB SE (2023): Satellitentechnologie. <https://www.ohb.de/spa-ce-systems/satelliten>, Stand: 20.02.2024.

- OneWeb (2022): Our Network. <https://oneweb.net/our-network>, Stand: 20.02.2024.
- Orbit Recycling (2023): Orbit Recycling. <https://orbitrecycling.space/>, Stand: 20.02.2024.
- Osterhage, W. W. (2021): Die Geschichte der Raumfahrt. Berlin, Germany.
- Papagiannis, M. D. (1985): A Historical Introduction to the Search for Extraterrestrial Life. In: The search for extraterrestrial life. Recent developments. – International Astronomical Union 112. S. 5–11. Dordrecht. doi:10.1007/978-94-009-5462-5\_2.
- Parks, L. (2009): When Satellites Fall: On the Trails of Cosmos 954 and USA 193. <https://www.flowjournal.org/2009/06/when-satellites-fall-on-the-trails-of-cosmos-954-and-usa-193>lisa-parks-uc-santa-barbara/, Stand: 20.02.2024.
- Paton, M. (2017): Protection of surface assets on Mars from wind blown jettisoned spacecraft components. Acta Astronautica 136, S. 395–406. doi:10.1016/j.actaastro.2017.03.029.
- Paul, S. S.; Coops, N. C.; Johnson, M. S.; Krzic, M.; Chandna, A.; Smukler, S. M. (2020): Mapping soil organic carbon and clay using remote sensing to predict soil workability for enhanced climate change adaptation. Geoderma 363, S. 114177. doi:10.1016/j.geoderma.2020.114177.
- Perkins, R. (2023): In a First, Caltech’s Space Solar Power Demonstrator Wirelessly Transmits Power in Space. California Institute of Technology (Caltech). <https://www.caltech.edu/about/news/in-a-first-caltechs-space-solar-power-demonstrator-wirelessly-transmits-power-in-space>, Stand: 07.09.2023.
- Pettersen, J. B.; Silva, E. J.; Bergsdal, H.; Solli, C. (2016): D7 LCA of Space Propellants. Final Report.
- Pettit, M. (2021): Interview: Die Clean Space Initiative der ESA will die Raumfahrt nachhaltiger gestalten. <https://reset.org/interview-die-clean-space-initiative-der-esa-will-die-raumfahrt-nachhaltiger-gestalten-03152021/>, Stand: 20.02.2024.
- Podbregar, N. (2021): Mega-Konstellationen – der neue Wettlauf ins All. Weltumspannende Satellitennetze für das Internet der Zukunft. scinexx. [https://www.scinexx.de/service/dossier\\_print\\_all.php?dossierID=247467](https://www.scinexx.de/service/dossier_print_all.php?dossierID=247467), Stand: 20.02.2024.
- Portree, D. S. F. (2001): Humans to Mars. Fifty Years of Mission Planning, 1950 - 2000. Monographs in Aerospace History. Band 21. <https://history.nasa.gov/monograph21.pdf>, Stand: 20.02.2024.
- Potter, N. (2021): Solar Power from Space? Caltech’s \$100 Million Gambit. Billionaire makes secret donation for electricity from orbit. IEEE Spectrum. <https://spectrum.ieee.org/solar-power-from-space-caltechs-100-million-gambit>, Stand: 20.02.2024.
- Preuß, M.; Keppner, B.; Kahlenborn, W. (2020): Direkte und indirekte Umwelteffekte von intelligenten, vernetzten urbanen Infrastrukturen.
- Raatschen, W.; Kern, P. (2011): Lebenserhaltungssysteme. In: Handbuch der Raumfahrttechnik. S. 408–430. München.
- Rabenstein, L. (2021): Automatisierte Eisinformationen für die Polare Schifffahrt.
- Ramsar Convention on Wetlands Secretariat (2023): Ramsar - The Convention on Wetlands and its mission. <https://www.ramsar.org/about/convention-wetlands-and-its-mission>, Stand: 22.08.2023.
- Ran, C. (2019): Development of the BeiDou Navigation Satellite System. Version 4.0. China Satellite Navigation Office (CSNO). <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201912/P020191227430565455478.pdf>, Stand: 16.02.2024.
- Rauenzahn, B.; Wang, J.; Chung, J.; Jacobs, P.; Kaufman, A.; Pugh, H. (2020): Regulating Commercial Space Activity. The Regulatory Review. <https://www.theregreview.org/2020/06/06/saturday-seminar-regulating-commercial-space-activity/>, Stand: 20.02.2024.
- Rausch, L.; Friesen, J.; Altherr, L.; Meck, M.; Pelz, P. (2018): A Holistic Concept to Design Optimal Water Supply Infrastructures for Informal Settlements Using Remote Sensing Data. Remote Sensing 10 (2), S. 216. doi:10.3390/rs10020216.
- Reimers, H.-C. (2021): Fernerkundung im Einsatz für die Bewertung der Küsten- und Meeresgewässer. [https://www.d-copernicus.de/fileadmin/Content/pdf/Forum\\_2021/210324\\_1100\\_reimers.pdf](https://www.d-copernicus.de/fileadmin/Content/pdf/Forum_2021/210324_1100_reimers.pdf), Stand: 20.02.2024.
- Reinke, N.; Müller, M. (2010): Geschichte der deutschen Raumfahrt. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR). [http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/documents/2011\\_1/GeschichteRF\\_hires.pdf](http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/documents/2011_1/GeschichteRF_hires.pdf), Stand: 20.02.2024.
- Rencelj, M.; Pohl, L.; Bataille, M.; Dalledonne, S.; Falcão Serra, J.; Hrozensky, T.; Poirier, C.; Redigonda, G.; Varma, J.; Walczak, M.; Beahan, C.; Discenza, G.; Leichte, D.; Margarini, Riccardo; Tomassetti, M.; Trunov, T. (2023): ESPI Yearbook 2022. Space policies, issues & trends. <https://www.espi.or.at/wp-content/uploads/2023/08/ESPI-Yearbook-2022.pdf>, Stand: 20.02.2024.
- Richers, J. (2019): Roter Kosmos. Kulturgeschichte des Raumfahrtfiebers in der Sowjetunion. Aus Politik und Zeitgeschichte (aPuZ) (29-30). <https://www.bpb.de/apuz/293684/roter-kosmos-kulturgeschichte-des-raumfahrtfiebers-in-der-sowjetunion?p=all>, Stand: 20.02.2024.
- Richter, M.; Schwenke, T. (2021): Das Weltraumrecht. Rechtsbeherrschung Folge #100. <https://rechtsbeherrschung.com/weltraumrecht-100/>, Stand: 20.02.2024.
- Rincon, P. (2006): Early humans followed the coast. BBC News. <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/5398850.stm>, Stand: 20.02.2024.
- Risk, E. (2021): Network Architecture: A Guide for Modern IT Professionals. Twingate. <https://www.twingate.com/blog/network-architecture>, Stand: 20.02.2024.
- Rixecker, K. (2020): Starlink-Konkurrent: Der chinesische Autobauer Geely plant eigenes Satellitennetzwerk. t3n.de. <https://t3n.de/news/starlink-konkurrent-chinesische-1258846/>, Stand: 20.02.2024.
- Roberts, T. G. (2021): International Astronaut Database. Center for Strategic and International Studies (CSIS). <https://aerospace.csis.org/data/international-astronaut-database/>, Stand: 20.02.2024.
- Roberts, T. G. (2022): Space Launch to Low Earth Orbit: How Much Does It Cost? Center for Strategic and International Studies (CSIS). <https://aerospace.csis.org/data/space-launch-to-low-earth-orbit-how-much-does-it-cost/>, Stand: 20.02.2024.
- Roberts, T. G. (2023): Spaceports of the World. Aerospace Center for Strategic and International Studies (CSIS). <https://aerospace.csis.org/data/spaceports-of-the-world/>, Stand: 20.02.2024.
- Robinson, J.; Costello, K. (2018): International Space Station. Benefits for Humanity. [https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/benefits-for-humanity\\_third.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/benefits-for-humanity_third.pdf), Stand: 20.02.2024.
- Rodriguez Lopez, J. M.; Heider, K.; Scheffran, J. (2016): Illegales Wachstum von Megacities jetzt zuverlässig kartieren – neue Methode mit Potenzial. Universität Hamburg. <https://www.cen>

- [uni-hamburg.de/press/documents/20161220-pm-illegales-wachstum-megacities.pdf](https://uni-hamburg.de/press/documents/20161220-pm-illegales-wachstum-megacities.pdf), Stand: 19.02.2024.
- Ross, M.; Toohey, D.; Peinemann, M.; Ross, P. (2009): Limits on the Space Launch Market Related to Stratospheric Ozone Depletion. *Astropolitics* 7 (1), S. 50–82. doi:10.1080/14777620902768867.
- Ross, M.; Vedda, J. (2018): The policy and science of rocket emissions. Aerospace Center for Space Policy and Strategy (CSPS). [https://csp.s.aerospace.org/sites/default/files/2021-08/RocketE-missions\\_o\\_o.pdf](https://csp.s.aerospace.org/sites/default/files/2021-08/RocketE-missions_o_o.pdf), Stand: 20.02.2024.
- Roulette, J. (2021): Trump's Moon program survived a transfer of power, so what's next? With Artemis, Biden's NASA is focusing on continuity. *The Verge*. <https://www.theverge.com/2021/3/12/22323621/trump-moon-program-artemis-biden-nasa-timeline>, Stand: 20.02.2024.
- Rüdiger, A.; Ostler, U. (2020): Was ist eine Rechnerarchitektur? *DataCenter-Insider*. <https://www.datacenter-insider.de/was-ist-eine-rechnerarchitektur-a-950093/>, Stand: 20.02.2024.
- Ruhnke, R.; Rechid, D.; Dransch, D.; Bouwer, L. M.; Brix, H.; Dietrich, P.; Frickenhaus, S.; Greinert, J.; Henkel, D.; Petzold, A.; Castell, W. zu (2022): The Digital Earth Project: Focus and Agenda. In: *Integrating Data Science and Earth Science*. S. 7–16. doi:10.1007/978-3-030-99546-1\_2.
- Sagan, C. (2011): *Pale Blue Dot. A Vision of the Human Future in Space*. Westminster.
- Sahba El-Shawa; Benedetta Margrethe Cattani; Luisa Innocenti; Jessica Delaval (2021): From Cradle to Grave: ESA Clean Space's Approach to Space Sustainability. In: *Technical Programme*. [https://www.researchgate.net/publication/355819937\\_From\\_Cradle\\_to\\_Grave\\_ESA\\_Clean\\_Space%27s\\_Approach\\_to\\_Space\\_Sustainability](https://www.researchgate.net/publication/355819937_From_Cradle_to_Grave_ESA_Clean_Space%27s_Approach_to_Space_Sustainability), Stand: 20.02.2024.
- Saidani, M. (2018): *Monitoring and advancing the circular economy transition : Circularity indicators and tools applied to the heavy vehicle industry*. Thèse de doctorat en Sciences et technologies industrielles. Paris.
- Sassen, S. (2011): *Navigation*. In: *Handbuch der Raumfahrttechnik*. S. 535–553. München.
- Sawall, A. (2021): Satellit kann 5G ermöglichen. *Golem.de*. <https://www.golem.de/news/backhaul-satellit-kann-5g-ermoeglichen-2101-153440.html>, Stand: 20.02.2024.
- Schladebach, M. (2019): *Wem gehört der Weltraum? Grundlagen des Weltraumrechts*. Aus Politik und Zeitgeschichte (aPuZ) (29–30). <https://www.bpb.de/apuz/293688/wem-gehoert-der-weltraum-grundlagen-des-weltraumrechts?p=all>, Stand: 20.02.2024.
- Schmutz, C. G. (2022): Die EU will 200 Satelliten ins All schiessen und damit SpaceX sowie Amazon und One-Web konkurrenzieren. <https://www.nzz.ch/wirtschaft/die-eu-will-fuer-eine-bessere-internetverbindung-eigene-satelliten-ins-all-schiessen-und-damit-space-x-sowie-amazon-und-one-web-konkurrenzieren-l-d.1669854>, Stand: 20.02.2024.
- Schrijver, R. (2016): *Präzisionslandwirtschaft und die Zukunft der Landwirtschaft in Europa*. Wissenschaftliche Vorausschau. Wissenschaftlicher Dienst des Europäischen Parlaments (EPRS).
- Schug, F.; Frantz, D.; Wiedenhofer, D.; Haberl, H.; Virág, D.; van der Linden, S.; Hostert, P. (2022): Highresolution mapping of 33 years of material stock and population growth in Germany using Earth Observation data. *J of Industrial Ecology* 27 (1), S. 110–124. doi:10.1111/jiec.13343.
- Schulte, S.; Sturm, A. (2020): *Strategische Chance Weltraumbahnhof*. griephan Edition. Band 01. Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI); DVV Media Group GmbH. <https://bdi.eu/publikation/news/strategische-chance-deutscher-weltraumbahnhof/>, Stand: 15.02.2024.
- Schulz, L.; Glassmeier, K.-H. (2021): On the anthropogenic and natural injection of matter into Earth's atmosphere. *Advances in Space Research* 67 (3), S. 1002–1025. doi:10.1016/j.asr.2020.10.036.
- Schwerin, U. von (2023): «India is on the moon»: Chandrayaan-3 setzt erfolgreich am Südpol auf. *Neue Zürcher Zeitung (NZZ)*. <https://www.nzz.ch/international/indien-gelingt-erstmal-eine-mondlandung-ld.1752854?reduced=true>, Stand: 20.02.2024.
- Sealy, C. (2008): The problem with platinum. *Materials Today* 11 (12), S. 65–68. doi:10.1016/S1369-7021(08)70254-2.
- Secretary-General of the United Nations (UNSG) (2021): *Our Common Agenda - Report of the Secretary-General*. New York.
- Seeburg, C. (2021): *Wilder Westen im Orbit*. *Süddeutsche Zeitung*. <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/weltraumschrott-gruender-start-up-weltraumindustrie-new-space-wirtschaft-gruenderin-1.5163800>, Stand: 20.02.2024.
- Seidemann, C. (2022): *Weltraumschrott – Gefahr aus dem All*. <https://www.zdf.de/dokumentation/planet-e/planet-e-weltraumschrott-gefahr-aus-dem-all-100.html>, Stand: 20.02.2024.
- Seidler, C. (2011): *Heikler Countdown im Dschungelcamp*. *Neue „Sojus“-Raketenrampe*. <https://www.spiegel.de/wissenschaft/weltall/neue-sojus-raketenrampe-heikler-countdown-im-dschungelcamp-a-747583.html>, Stand: 20.02.2024.
- Seidler, C. (2019): *Darf Elon Musk den Nachthimmel verschandeln?* 42.000 Satelliten geplant. *Spiegel Online (SpOn)*. <https://www.spiegel.de/wissenschaft/weltall/spacex-von-elon-musk-will-40-000-satelliten-starten-a-1291881.html>, Stand: 20.02.2024.
- Seitz, R. (2021): *Fernerkundungssichtbare Vitalitätsveränderungen an den Hauptbaumarten – Untersuchungen aus dem Bereich der AFFEL-Mitgliedsländer und Ergebnistransfer in die forstliche Praxis*. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF). [https://www.d-copernicus.de/fileadmin/Content/pdf/Forum\\_2021/Session\\_D2\\_Seitz\\_Copernicusforum\\_2021.pdf](https://www.d-copernicus.de/fileadmin/Content/pdf/Forum_2021/Session_D2_Seitz_Copernicusforum_2021.pdf), Stand: 20.02.2024.
- Sheetz, M. (2021): *SpaceX's private Inspiration4 mission splashes down safely in Atlantic Ocean*. *CNBC*. <https://www.cNBC.com/2021/09/18/watch-spacex-livestream-inspiration4-splash-down-crew-dragon-returns.html>, Stand: 20.02.2024.
- Shofiyati, R.; Pasaribu, S. M.; Ardha, M.; Irawan, Y. R. (2022): *Climate Change Adaptation: Remote Sensing-Based Flood Crop Loss Assessment to Support Crop Insurance*. In: *Agriculture, Livestock Production and Aquaculture*. S. 167–179. doi:10.1007/978-3-030-93258-9\_10.
- Shostak, S. (2021): *A Primer on SETI at the SETI Institute*. <https://www.seti.org/primer-seti-seti-institute>, Stand: 20.02.2024.
- Siegel, E. (2018): *NASA Doesn't Have Enough Nuclear Fuel For Its Deep Space Missions*. *Forbes*. <https://www.forbes.com/sites/startswithabang/2018/12/13/nasa-doesnt-have-enough-nuclear-fuel-for-its-deep-space-missions/>, Stand: 20.02.2024.
- Sokolov, D. A. J. (2022): *Geelys Geespace startet erste Satelliten für selbstfahrende Autos*. *heise online*. <https://www.heise.de/news/Geelys-Geespace-startet-erste-Satelliten-fuer-selbstfahrende-Autos-6175683.html>, Stand: 20.02.2024.

- Sowers, G. F.; Dreyer, C. B. (2019): Ice Mining in Lunar Permanently Shadowed Regions. *New Space* 7 (4), S. 235–244. doi:10.1089/space.2019.0002.
- Sozialdemokratische Partei Deutschlands (SPD); Bündnis 90/Die Grünen; Freie Demokratische Partei (FDP) (2021): Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. [https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag\\_2021-2025.pdf](https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf), Stand: 20.02.2024.
- Space Energy Initiative (2022): UK to launch first power station in SPACE – limitless green energy to slash foreign ties. <https://spaceenergyinitiative.org.uk/uk-to-launch-first-power-station-in-space-limitless-green-energy-to-slash-foreign-ties/>, Stand: 20.02.2024.
- Space Foundation (2022): The Space Report 2022. 4 Quarterly Reports. <https://www.thespacereport.org/>, Stand: 20.02.2024.
- Space Safety Coalition (SSC) (2019): Best Practices for the Sustainability of Space Operations. Space Safety Coalition (SSC). <https://spacesafety.org/>, Stand: 20.02.2024.
- Space Telescope Science Institute (STScI) (2023a): Hubble Space Telescope - Quick Facts. <https://hubblesite.org/quick-facts>, Stand: 20.02.2024.
- Space Telescope Science Institute (STScI) (2023b): Webb Space Telescope - Quick Facts. <https://webbtelescope.org/quick-facts>, Stand: 20.02.2024.
- Space.com (2021): Biden's 2022 NASA budget proposal gives science and commercial space a boost. <https://www.space.com/biden-nasa-2022-budget-request-science-artemis>, Stand: 20.02.2024.
- Spaceport Cornwall (o.J.): Countdown to Cornwall: Spaceport Cornwall Officially Open for Business — Spaceport Cornwall. <https://spaceportcornwall.com/press-releases/countdown-to-cornwall-spaceport-cornwall-officially-open-for-business/>, Stand: 20.02.2024.
- SpaceTec Partners; BHO Legal (2016): NewSpace. Geschäftsmodelle an der Schnittstelle von Raumfahrt und digitaler Wirtschaft. [http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/bmwi-new-space-geschaeftsmodelle-an-der-schnittstelle-von-raumfahrt-und-digitaler-wirtschaft.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=7](http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/bmwi-new-space-geschaeftsmodelle-an-der-schnittstelle-von-raumfahrt-und-digitaler-wirtschaft.pdf?__blob=publicationFile&v=7), Stand: 20.02.2024.
- SpaceX (2020a): Mars & Beyond. The Road to making Humanity multiplanetary. <https://www.spacex.com/humanspaceflight/mars/>, Stand: 20.02.2024.
- SpaceX (2020b): Starship Users Guide. [https://www.spacex.com/media/starship\\_users\\_guide\\_v1.pdf](https://www.spacex.com/media/starship_users_guide_v1.pdf), Stand: 20.02.2024.
- SpaceX (2021): Falcon User's Guide. <https://www.spacex.com/media/falcon-users-guide-2021-09.pdf>, Stand: 20.02.2024.
- SpaceX (2022): Starship. <https://www.spacex.com/vehicles/stars-hip/>, Stand: 20.02.2024.
- Speicher, C. (2014): Das Langzeitrisko von billigen Kleinsatelliten. *Neue Zürcher Zeitung (NZZ)*. <https://www.nzz.ch/wissenschaft/astronomie/das-langzeitrisko-von-billigen-kleinsatelliten-1.18427327>, Stand: 20.02.2024.
- Spektrum.de (2022): Erste komplett private Crew wieder auf der Erde. Weltraumtourismus mit Axiom. <https://www.spektrum.de/news/axiom-1-erste-komplett-private-crew-wieder-auf-der-erde/2013118>, Stand: 20.02.2024.
- Spillmann, K. R. (1988): Geschichte der Raumfahrt 2. Teil: Von Sputnik bis heute. In: *Der Weltraum seit 1945*. S. 23–34. Basel. doi:10.1007/978-3-0348-5170-1\_2.
- Statista GmbH (2022): Global digital population as of April 2022. <https://www.statista.com/statistics/617136/digital-population-worldwide/>, Stand: 20.02.2024.
- Statista GmbH (2023a): Number of active satellites by year 1957-2022. <https://www.statista.com/statistics/897719/number-of-active-satellites-by-year/>, Stand: 20.02.2024.
- Statista GmbH (2023b): Erfolgreiche Raketenstarts von SpaceX bis 2022. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1058116/umfrage/erfolgreiche-raketenstarts-des-raumfahrt-unternehmens-spacex/>, Stand: 20.02.2024.
- Statista GmbH (2023c): Population of Europe by country 2023. <https://www.statista.com/statistics/685846/population-of-selected-european-countries/#statisticContainer>, Stand: 20.02.2024.
- Statista GmbH (2023d): Deutsche Raumfahrtindustrie - Umsatz 2022. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1056230/umfrage/umsatz-der-deutschen-raumfahrtindustrie/>, Stand: 20.02.2024.
- Statista GmbH (2023e): Raumfahrtindustrie Deutschland - Beschäftigtenzahl bis 2022. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1056245/umfrage/anzahl-der-beschaeftigten-in-der-deutschen-raumfahrtindustrie/>, Stand: 20.02.2024.
- Stiftung erste deutsche Astronautin (2022): Die erste deutsche Astronautin. <https://dieastronautin.de/>, Stand: 20.02.2024.
- Stirn, A. (2019): Auf dem Weg zur interplanetaren Spezies. *Spektrum.de*. <https://www.spektrum.de/news/auf-dem-weg-zur-interplanetaren-spezies/1678660>, Stand: 20.02.2024.
- Stirn, A. (2020): Raumfahrt: Wie die USA das Völkerrecht aushebeln könnten. *Spektrum.de*. <https://www.spektrum.de/news/raumfahrt-wie-die-usa-das-voelkerrecht-aushebeln-koennten/1787216>, Stand: 20.02.2024.
- Stoll, E.; Dietz, A. (2020): Staubige Angelegenheit: Mondgestein als Quelle neuer Rohstoffe. *VDI Nachrichten*. <https://www.vdi.de/news/detail/staubige-angelegenheit-mondgestein-als-quelle-neuer-rohstoffe>, Stand: 20.02.2024.
- Stone, M.; Roulette, J. (2023): SpaceX's Starlink Wins Pentagon Contract For Satellite Services To Ukraine. *Reuters Media*. <https://www.reuters.com/business/aerospace-defense/pentagon-buys-starlink-ukraine-statement-2023-06-01/>, Stand: 20.02.2024.
- Stoner, D. C.; Sexton, J. O.; Nagol, J.; Bernles, H. H.; Edwards, T. C., Jr. (2016): Ungulate Reproductive Parameters Track Satellite Observations of Plant Phenology across Latitude and Climatological Regimes. *POLS ONE* 2016. doi:10.1371/journal.pone.0148780.
- Stoppel, K. (2023): „Cosmic Girl“ von Virgin Orbit: Briten schießen erste Rakete ins All - mit Boeing 747. *n-tv Nachrichten*. <https://www.n-tv.de/wissen/Briten-schiessen-erste-Rakete-ins-All-mit-Boeing-747-article23831087.html>, Stand: 20.02.2024.
- Sturm, P. (2020): On-Orbit Servicing. *Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen (INT)*. <https://www.int.fraunhofer.de/content/dam/int/de/documents/EST/EST-0120-On-Orbit-Servicing.pdf>, Stand: 20.02.2024.
- Suckau, T. (2021): Qubits starten durch. Eine neue Forschungsinitiative fördert Quantencomputing „Made in Germany“. *DLRmagazin* (168), S. 9–11. <https://www.dlr.de/content/de/downloads/publika>

- [tionen/magazin/2021\\_dlrmagazin-168-qubits-starten-durch.pdf](#), Stand: 20.02.2024.
- Sudhakar, S.; Sze, V.; Karaman, S. (2023): Data Centers on Wheels: Emissions From Computing Onboard Autonomous Vehicles. *IEEE Micro* 43 (1), S. 29–39. doi:10.1109/MM.2022.3219803.
- Sürig, D. (2019): Regelwerk fürs All. *Süddeutsche Zeitung* (SZ). <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/weltraumgesetz-regelwerk-fuers-all-1.4615641>, Stand: 20.02.2024.
- Sürig, D. (2021a): Ampel-Koalition: Raumfahrt soll nachhaltiger werden. *Süddeutsche Zeitung* (SZ). <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/raumfahrt-ampelkoalition-start-ups-1.5482252>, Stand: 20.02.2024.
- Sürig, D. (2021b): Space-Allianz gegen US-Konzerne. *Süddeutsche Zeitung* (SZ). <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/raumfahrt-new-space-bdi-sap-spacex-1.5477078>, Stand: 20.02.2024.
- Sürig, D. (2021c): Streit um das Weltraumgesetz. *Süddeutsche Zeitung* (SZ). <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/raumfahrt-weltraumgesetz-kosten-1.5247937>, Stand: 19.02.2024.
- tagesschau.de (2022): Roskosmos-Chef: Russland steigt aus Internationaler Raumstation aus. <https://www.tagesschau.de/ausland/europa/russland-iss-101.html>, Stand: 19.02.2024.
- tagesschau.de (2023): Nach gescheiterter Raumfahrtmission: Virgin Orbit ist insolvent. <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/us-raketenhersteller-insolvenz-101.html>, Stand: 19.02.2024.
- Tagesspiegel (2018): Spektakuläre Fotos und Videos: Die beliebtesten Tweets von Alexander Gerst. *Der Tagesspiegel*. <https://www.tagesspiegel.de/wissen/die-beliebtesten-tweets-von-alexander-gerst-5539060.html>, Stand: 19.02.2024.
- Tagesspiegel (2019): Ein Astronaut im Bundestag: Alexander Gerst warnt Politiker vor Folgen des Klimawandels. *Der Tagesspiegel*. <https://www.tagesspiegel.de/politik/alexander-gerst-warnt-politiker-vor-folgen-des-klimawandels-5327722.html>, Stand: 19.02.2024.
- Taiebat, M.; Brown, A. L.; Safford, H. R.; Qu, S.; Xu, M. (2018): A Review on Energy, Environmental, and Sustainability Implications of Connected and Automated Vehicles. *Environmental science & technology* 52 (20), S. 11449–11465. doi:10.1021/acs.est.8b00127.
- Tantardini, M.; Friedman, L.; Brophy, J. R.; Culick, F. (2012): Asteroid Retrieval Feasibility Study. California Institute of Technology (Caltech); Jet Propulsion Laboratory (JPL).
- TASS Russian News Agency (2020): Crewed flight to Mars may take place in late 2030s, says Roscosmos official. TASS - Russian News Agency. <https://tass.com/science/1177101>, Stand: 19.02.2024.
- Taubenböck, H.; Schmich, P.; Erbertseder, T.; Müller, I.; Tenikl, J.; Weigand, M.; Staab, J.; Wurm, M. (2020): Satellitendaten zur Erfassung gesundheitsrelevanter Umweltbedingungen: Beispiele und interdisziplinäre Potenziale. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz* (63), S. 936–944. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00103-020-03177-w#citeas>, Stand: 19.02.2024.
- Thalhofer, N. (2021): Raumfahrt „Made in Germany“. *Klimaschutz, Innovation, Sicherheit und Wachstum*. Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie e. V. (BDLI). [https://www.bdlid.de/sites/default/files/2021-03/Raumfahrt\\_Langfassung\\_1.pdf](https://www.bdlid.de/sites/default/files/2021-03/Raumfahrt_Langfassung_1.pdf), Stand: 19.02.2024.
- The World Bank; Institute for Health Metrics and Evaluation (2016): The Cost of Air Pollution. Strengthening the Economic Case for Action. University of Washington. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/781521473177013155/pdf/1081441-REVISSED-Cost-of-PollutionWebCORRECTEDfile.pdf>, Stand: 19.02.2024.
- Thiry, N.; Chanoine, A. (2017): Lessons learned from the Sentinel 3 LCA and applications to a GreenSat. In: *Clean Space Industry Days 2017*.
- Tian, W.; Huang, J.; Zhang, J.; Xie, F.; Wang, W.; Peng, Y. (2023): Role of Stratospheric Processes in Climate Change: Advances and Challenges. *Adv. Atmos. Sci.* 40 (8), S. 1379–1400. doi:10.1007/s00376-023-2341-1.
- Toth, J.; Concini, A. de (2019): The future of the European space sector. How to leverage Europe’s technological leadership and boost investments for space ventures. European Investment Bank (EIB). doi:10.2867/484965.
- Tritscher, I.; Pitts, M. C.; Poole, L. R.; Alexander, S. P.; Cairo, F.; Chipperfield, M. P.; Grooß, J.-U.; Höpfner, M.; Lambert, A.; Luo, B.; Molleker, S.; Orr, A.; Salawitch, R.; Snels, M.; Spang, R.; Woiwode, W.; Peter, T. (2021): Polar Stratospheric Clouds: Satellite Observations, Processes, and Role in Ozone Depletion. *Reviews of Geophysics* 59 (2), e2020RG000702. doi:10.1029/2020RG000702.
- Ulamec, S.; Hanowski, N. (2011): Weltraumastronomie und Planetenmissionen. In: *Handbuch der Raumfahrttechnik*. S. 553–570. München.
- Ulmer, S. (2021): Ein hochpräziser digitaler Zwilling der Erde. ETH Zürich. <https://ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2021/02/wissenschaftler-entwickeln-hochpraezisen-digitalen-zwilling-der-erde.html>, Stand: 19.02.2024.
- Umweltbundesamt (UBA) (2021a): Analyse des Nutzens und der Wirkung des PRTRs als Instrumentarium zur Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung. [https://thru.de/fileadmin/SITE\\_MASTER/content/Dokumente/Downloads/01\\_Topthemen/Endbericht\\_UBA\\_PRTR\\_20210226\\_fin\\_PAC\\_Report\\_final.pdf](https://thru.de/fileadmin/SITE_MASTER/content/Dokumente/Downloads/01_Topthemen/Endbericht_UBA_PRTR_20210226_fin_PAC_Report_final.pdf), Stand: 19.02.2024.
- Umweltbundesamt (UBA) (2021b): Vorsorgeprinzip. <https://www.umweltbundesamt.de/vorsorgeprinzip>, Stand: 19.02.2024.
- United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space Scientific and Technical Subcommittee (COPUOS); International Atomic Energy Agency (IAEA) (2009): Safety Framework for Nuclear Power Source Applications in Outer Space. <https://nuke.fas.org/space/iaea-space.pdf>, Stand: 19.02.2024.
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) (2014): Critical Thinking about Critical Resources. <https://www.unesco.org/en/articles/critical-thinking-about-critical-resources>, Stand: 19.02.2024.
- United Nations Office for Disarmament Affairs (UNODA) (2020): Agreement Governing the Activities of States on the Moon and Other Celestial Bodies. <http://disarmament.un.org/treaties/t/moon>, Stand: 19.02.2024.
- United Nations Office for Disarmament Affairs (UNODA) (o.J.): Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, including the Moon and Other Celestial Bodies. [https://treaties.unoda.org/t/outer\\_space](https://treaties.unoda.org/t/outer_space), Stand: 19.02.2024.
- United Nations Office For Outer Space Affairs (UNOOSA) (1972): Convention on International Liability for Damage Caused by Space Objects. <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/spacelaw/treaties/intoliability-convention.html>, Stand: 19.02.2024.
- United Nations Office For Outer Space Affairs (UNOOSA) (1974): Convention on Registration of Objects Launched into Outer Space.

<https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/spacelaw/treaties/registration-convention.html>, Stand: 19.02.2024.

United Nations Office For Outer Space Affairs (UNOOSA) (1992): Principles Relevant to the Use of Nuclear Power Sources In Outer Space. <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/spacelaw/principles/nps-principles.html>, Stand: 19.02.2024.

United Nations Office For Outer Space Affairs (UNOOSA) (2010a): Space Debris Mitigation Guidelines of the Committee on the Peaceful Uses of Outer Space. [https://www.unoosa.org/pdf/publications/st\\_space\\_49E.pdf](https://www.unoosa.org/pdf/publications/st_space_49E.pdf), Stand: 19.02.2024.

United Nations Office For Outer Space Affairs (UNOOSA) (2010b): Space Debris Mitigation Guidelines of the Committee on the Peaceful Uses of Outer Space. [https://www.unoosa.org/pdf/publications/st\\_space\\_49E.pdf](https://www.unoosa.org/pdf/publications/st_space_49E.pdf), Stand: 19.02.2024.

United Nations Office For Outer Space Affairs (UNOOSA) (2018a): European Global Navigation Satellite System and Copernicus: Supporting the Sustainable Development Goals. BUILDING BLOCKS TOWARDS THE 2030 AGENDA. [https://www.unoosa.org/res/oosa-doc/data/documents/2018/stspace/stspace71\\_o\\_html/st\\_space\\_71E.pdf](https://www.unoosa.org/res/oosa-doc/data/documents/2018/stspace/stspace71_o_html/st_space_71E.pdf), Stand: 19.02.2024.

United Nations Office For Outer Space Affairs (UNOOSA) (2018b): Guidelines for the Long-term Sustainability of Outer Space Activities. [https://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2018/aac\\_1052018crp/aac\\_1052018crp\\_20\\_o\\_html/AC105\\_2018\\_CRP20E.pdf](https://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2018/aac_1052018crp/aac_1052018crp_20_o_html/AC105_2018_CRP20E.pdf), Stand: 19.02.2024.

United Nations Office For Outer Space Affairs (UNOOSA) (2021): 2020 Annual Report.

United Nations Office For Outer Space Affairs (UNOOSA) (2023): Online Index of Objects Launched into Outer Space. [https://www.unoosa.org/oosa/osoindex/search-ng.jsp?lf\\_id](https://www.unoosa.org/oosa/osoindex/search-ng.jsp?lf_id), Stand: 19.02.2024.

United Nations (UN) (o.J.): Vertrag über die Grundsätze zur Regelung der Tätigkeiten von Staaten bei der Erforschung und Nutzung des Weltraums einschliesslich des Mondes und anderer Himmelskörper. United Nations (UN).

United Nations (UN) (1992): Rio-Erklärung über Umwelt und Entwicklung. <https://www.un.org/Depts/german/conf/agenda21/rio.pdf>, Stand: 19.02.2024.

United Nations (UN) (2021): The United Nations General Assembly adopts the “Space2030” Agenda. <https://www.un-spider.org/news-and-events/news/united-nations-general-assembly-adopts-%E2%80%9Cspace2030%E2%80%9D-agenda>, Stand: 19.02.2024.

United Nations (UN) (2023): Unsere gemeinsame Agenda - Kurzdossier 7: Für die gesamte Menschheit - Die Zukunft der Verwaltung von Weltraumaktivitäten. <https://www.un.org/Depts/german/gs/QCA-PB7.pdf>, Stand: 19.02.2024.

Uri, J. (2021): 35 Years Ago: Remembering Challenger and Her Crew. National Aeronautics and Space Administration (NASA). <https://www.nasa.gov/feature/35-years-ago-remembering-challenger-and-her-crew>, Stand: 19.02.2024.

Uri, J. (2023): 20 Years Ago: Remembering Columbia and Her Crew. National Aeronautics and Space Administration (NASA). <https://www.nasa.gov/feature/20-years-ago-remembering-columbia-and-her-crew>, Stand: 19.02.2024.

Velden, D. G. (2021): Satelliten als Helfer im Einsatz gegen den Klimawandel. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR). <https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2021/04/20211102>

[satelliten-als-helfer-im-einsatz-gegen-den-klimawandel.html](https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2021/04/20211102), Stand: 20.02.2024.

Vercalsteren, A.; Boonen, K.; Geerken, T. (2018): Greensat: ecodesign of the PROBA-V mission. In: Clean Space Industry Days 2018.

Vercalsteren, A.; Holsters, P. (2017): Ecodesign applied to ESA's Proba vegetation satellite. In: Clean Space Industry Days 2017.

Vielstädte, L.; Haeckel, M.; Karsten, J.; Linke, P.; Schmidt, M.; Steinle, L.; Wallmann, K. (2017): Shallow Gas Migration along Hydrocarbon Wells—An Unconsidered, Anthropogenic Source of Biogenic Methane in the North Sea. Environmental science & technology (51), S. 10262–10268. doi:10.1021/acs.est.7b02732.

Voelsen, D. (2021): Internet aus dem Weltraum. SWP-Studie. Band 2. [https://www.swp-berlin.org/publications/products/studien/2021So2\\_SatellitenInternet.pdf](https://www.swp-berlin.org/publications/products/studien/2021So2_SatellitenInternet.pdf), Stand: 19.02.2024. doi:10.18449/2021So2.

Voigt, C.; Schumann, U.; Graf, K.; Gottschaldt, K.-D. (2011): Impact Of Rocket Exhaust Plumes On Atmospheric Composition And Climate — An Overview. In: Progress in Propulsion Physics. S. 657–670. Les Ulis, France. doi:10.1051/eucass/201304657.

Voski, A. (2020): The Ecological Significance Of The Overview Effect: Environmental Attitudes And Behaviours In Astronauts. Journal of Environmental Psychology 70, S. 101454. doi:10.1016/j.jenvp.2020.101454.

Wachter, M. (2021): Mit New Space in ein neues Industriezeitalter. Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI). <https://bdi.eu/themenfelder/sicherheit/newspace-initiative/>, Stand: 15.02.2024.

Wachter, M.; Hillmann, S.; Petretto, K. (2021): #WirMachen NewSpace. Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI). <https://bdi.eu/spezial/wir-machen/new-space>, Stand: 15.02.2024.

Wachter, M.; Will, K.; Klencke, H. v. (2018): Weltraumbergbau. Potenziale und Handlungsempfehlungen. Publikationen. Band 79. Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI). <https://bdi.eu/publikation/news/weltraumbergbau>, Stand: 15.02.2024.

Wachter, M.; Will, K.; Kräußlich, T. (2019): Zukunftsmarkt Weltraum. Bedeutung für die deutsche Industrie. Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI). <https://bdi.eu/publikation/news/zukunftsmarkt-weltraum/>, Stand: 19.02.2024.

Wagener, M. (2022): Zukunftsmarkt Kleinsatelliten. Große Zukunft für kleine Orbiter. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR). <https://event.dlr.de/ilaz022/zukunftsmarkt-kleinsatelliten/>, Stand: 19.02.2024.

Wall, M. (2021): SpaceX's Inspiration4 mission just opened a new era of private spaceflight. Space.com. <https://www.space.com/spacex-inspiration4-new-era-private-spaceflight>, Stand: 19.02.2024.

Ward, P. D.; Brownlee, D. (2000): Rare Earth. Why Complex Life is Uncommon in the Universe. New York. doi:10.1007/b97646.

Warhaut, M. (2011): Satellitenbetrieb. In: Handbuch der Raumfahrt-technik. S. 445–457. München.

Way, T. (2018): The Space Gap, Access to Technology, and the Perpetuation of Poverty. IRJ 5 (1). doi:10.25035/irj.05.01.07.


Webb, S. (Hrsg.) (2010): If the Universe Is Teeming with Aliens ... WHERE IS EVERYBODY? Fifty Solutions to the Fermi Paradox and the Problem of Extraterrestrial Life. New York, NY.

Westram, H. (2021): Weltraumtourismus – Den höchsten Preis bezahlt die Umwelt. ARD Alpha. <https://www.ardalpha.de/wissen/>

- [weltraum-tourismus-raketen-umwelt-co2-bilanz-100.html](#), Stand: 19.02.2024.
- Weyer, J. (1993): Verstärkte Rivalitäten statt Rendezvous im All? Die wechselhafte Geschichte der deutsch-amerikanischen Zusammenarbeit in der Raumfahrt. In: Technische Visionen - politische Kompromisse. Geschichte und Perspektiven der deutschen Raumfahrt. Berlin. doi:10.17877/DE290R-16503.
- Whalen, D. J. (2010): Communications Satellites: Making the Global Village Possible. National Aeronautics and Space Administration (NASA). <https://history.nasa.gov/satcomhistory.html>, Stand: 19.02.2024.
- Wheeler, A. (2020): Relativity Space and 6K Set Up Recyclable 3D Printing System to Build New Rockets. Engineering.com. <https://www.engineering.com/story/relativity-space-and-6k-set-up-recyclable-3d-printing-system-to-build-new-rockets>, Stand: 19.02.2024.
- White, F. (1987): The Overview Effect: Space Exploration and Human Evolution. New York.
- Will, F. (2021): Evidenz für das Anthropozän. Wissensbildung und Aushandlungsprozesse an der Schnittstelle von Natur-, Geistes- und Sozialwissenschaften. Gottingen.
- Williams, M. (2015): Who Are The Most Famous Astronauts? Universe Today. <https://www.universetoday.com/45089/famous-astronauts/>, Stand: 19.02.2024.
- Williams, M. (2020): NASA Chooses 10 Projects that Will Help it Live Off the Land... on the Moon. Universe Today. <https://www.universetoday.com/146959/nasa-chooses-10-projects-that-will-help-it-live-off-the-land-on-the-moon/>, Stand: 20.02.2024.
- Williamson, M. (2006): Space. The fragile frontier. Reston, Va. doi:10.2514/4.477768.
- Willis, J. (2016): All These Worlds Are Yours. The Scientific Search for Alien Life. New Haven.
- Wiskow, J.-H. (2019): Raumfahrt für Gesellschaft und Industrie von zentraler Bedeutung. Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI). <https://bdi.eu/artikel/news/raumfahrt-ist-im-digitalen-zeit-alter-fuer-deutschland-und-industrie-von-zentraler-bedeutung/>, Stand: 19.02.2024.
- Wittmann, K.; Hanowski, N. (2011): Raumfahrtmissionen. In: Handbuch der Raumfahrttechnik. S. 42–55. München.
- Wood, D. (2014): Space-Based Solar Power. U.S. Department of Energy (DOE). <https://www.energy.gov/articles/space-based-solar-power>, Stand: 19.02.2024.
- World Economic Forum (o.J.): Space Sustainability Rating. <https://www.weforum.org/projects/space-sustainability-rating>, Stand: 19.02.2024.
- World Economic Forum (2023): The World's First Sustainability Rating System For Space Exploration. <https://www.weforum.org/our-impact/world-s-first-space-sustainability-rating-launched/>, Stand: 19.02.2024.
- World Nuclear Association (2021): Nuclear Reactors and Radioisotopes for Space. <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-reactors-for-space.aspx>, Stand: 19.02.2024.
- Wu, P. (2016): China Manned Space Programme. Its Achievements and Future Developments. <https://www.unoosa.org/documents/pdf/copuos/2016/copuos2016tech20E.pdf>, Stand: 19.02.2024.
- Yaden, D. B.; Iwry, J.; Slack, K. J.; Eichstaedt, J. C.; Zhao, Y.; Vaillant, G. E.; Newberg, A. B. (2016): The Overview Effect: Awe And Self-transcendent Experience In Space Flight. Psychology of Consciousness: Theory, Research, and Practice 3 (1), S. 1–11. doi:10.1037/cns0000086.
- Yang, J.; Gong, P.; Fu, R.; Zhang, M.; Chen, J.; Liang, S.; Xu, B.; Shi, J.; Dickinson, R. (2013): The Role Of Satellite Remote Sensing In Climate Change Studies. Nature Clim Change 3 (10), S. 875–883. doi:10.1038/nclimate1908.
- Záboji, N.; Plickert, P. (2023): Europas Raumfahrtpläne: Kampf um die Satellitenstarts. Frankfurter Allgemeine Zeitung. <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/weltraum-bahnhof-in-der-nordsee-start-von-der-schwimmenden-insel-18629453.html>, Stand: 19.02.2024.
- Zambrano, L.; Aronson, M. F. J.; Fernandez, T. (2019): The Consequences of Landscape Fragmentation on Socio-Ecological Patterns in a Rapidly Developing Urban Area: A Case Study of the National Autonomous University of Mexico. Frontiers in Environmental Science (7). doi:10.3389/fenvs.2019.00152.
- Zeit Online (2019): USA und Luxemburg wollen im All verdienen. <https://www.zeit.de/news/2019-05/10/usa-und-luxemburg-wollen-im-all-verdienen-190510-99-167485>, Stand: 17.02.2024.
- Zeitler, F.; Brockamp, M.; Hermanns, K.; Steidle, N. (2019): Deutsche Raumfahrtakteure. Bundesländer – Organisation – Raumfahrt – raumfahrtbasierte Anwendungen. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR); DLR Raumfahrtagentur. <https://www.dlr.de/rd/PortalData/28/Resources/dokumente/publikationen/KatalogDeutscheRaumfahrtakteure.pdf>, Stand: 19.02.2024.
- Zimmermann, M. (2013): Europas größter Naturpark. Deutschlandfunk.de. <https://www.deutschlandfunk.de/europas-groesster-naturpark-100.html>, Stand: 19.02.2024.



**Unsere Broschüren als  
Download**  
Kurzlink: [bit.ly/2dowYYI](https://bit.ly/2dowYYI)

 [www.facebook.com/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)  
 [www.twitter.com/umweltbundesamt](https://www.twitter.com/umweltbundesamt)  
 [www.youtube.com/user/umweltbundesamt](https://www.youtube.com/user/umweltbundesamt)  
 [www.instagram.com/umweltbundesamt](https://www.instagram.com/umweltbundesamt)