

UMWELTWIRKUNGEN DER RAUMFAHRT



© unsplash.com/Bill Jelen

ZUSAMMENFASSUNG

Schon jetzt gibt es über 5.500 aktive Satelliten im Orbit, bis 2030 sollen es 58.000 sein – eine Entwicklung, die vor allem auch durch die kommerzielle Raumfahrt angetrieben wird. Dazu kommen in absehbarer Zukunft die Raketenstarts zu geplanten Raumstationen und für Erkundungsmissionen zum Mond und Mars, Weltraumtourismus, Bergbau im All, Antisatellitenwaffen oder Solarkraftwerke. Auswirkungen dieser Aktivitäten sind vielfältig. Satelliten bieten essentielle Dienste, haben aber problematische Umweltwirkungen, die bisher aufgrund der relativ geringen Startdichte wenig beachtet wurden: Dazu gehören ozonschädigende Emissionen (Aluminium, Chlor) in der oberen Atmosphäre; enorme Treibstoffmengen mit Treibhausgasemissionen (CO₂, Wasserdampf, Rußpartikel), auch bodennah beim Start; Weltraumschrott, mit Kollisionsgefahr und Emissionen beim Wiedereintritt; Gefährdung durch wiedereintretende Raketenteile/kaputte Satelliten; Beeinträchtigung der Astronomie. Es gibt für den Weltraum zwar völkerrechtliche Übereinkommen, die aber diese Emissionen ebenso wenig abdecken wie Umweltabkommen (z. B. Montreal-Protokoll).

*Vermehrte Nutzung
des Weltraums hat
zunehmende
Umweltfolgen auf
der Erde*

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Derzeit befinden sich mehr als 5.500 aktive Satelliten in der Umlaufbahn der Erde, Schätzungen zufolge werden bis 2030 weitere 58.000 Satelliten gestartet. Durch gesunkene Kosten von Satelliten und Raketenstarts bringen vor allem private Unternehmen große Konstellationen von Satelliten in den Orbit, was momentan die Hauptursache für diesen Anstieg der Starts ist (GAO 2022). Während in den letzten Jahrzehnten die Zahl der gestarteten Objekte stetig bei wenigen Hundert pro Jahr lagen, waren es 2023 schon mehr als 2.600 Objekte.¹ In Zukunft sind aber auch vermehrte Raketenstarts durch den Bau und die Versorgung von Raumstationen (ISS, China etc.), Mond- und Marserkundungsmissionen, durch Weltraumtourismus, *Bergbau im All*, den Bau von Solarkraftwerken, aber auch durch die Beseitigung von *Weltraummüll*² zu erwarten. Durch die verstärkte Nutzung des Alls steigt auch das Konfliktrisiko, wobei der Einsatz von Antisatellitenwaffen (ASAT) und militarisierter Raumfahrt ein weiterer Grund für vermehrte Raketenstarts werden können.³ Bisher haben vier Länder bei Tests mit Antisatellitenwaffen eigene Satelliten zerstört (USA, China, Russland und Indien⁴). Österreich und zahlreiche andere Staaten haben sich klar gegen das Testen von ASAT-Raketen ausgesprochen, die Entwicklung von ASAT-Fähigkeiten wird aber stetig vorangetrieben.⁵

*Raketenstarts
nehmen stark zu ...*

Satelliten bieten wichtige, teils essentielle Dienste (GPS, Internet, zivile und militärische *Fernerkundung*, Steuerung von Windkraftanlagen etc.), allerdings ist Weltraumschrott nicht das einzige Umweltproblem der Raumfahrt. Nachdem Treibhausgasemissionen und vor allem ozonschädigende Abgase bisher durch die überschaubare Zahl von Raketenstarts als vernachlässigbar galten und wenig beforscht wurden, könnte sich das bei dem anhaltenden Trend in Zukunft ändern. Eine Studie zeigt z. B., dass bereits eine Dekade eines Weltraumtourismusbooms ausreicht, um die Ozonschicht in einem Maß zu schädigen, dass die gesamte Erholung der Schicht seit dem Montreal-Protokoll zunichte gemacht würde (Ryan, Marais, Balhatchet, & Eastham, 2022). Auch wenn heutige Emissionen im Vergleich zu anderen Industriesektoren klein erscheinen, der zukünftige CO₂-Fußabdruck ist schwer abschätzbar, wird sich aber in einer nicht-vernachlässigbaren Größe bewegen (Dallas, Raval, Gaitan, Saydam, & Dempster, 2020; Ross & Jones, 2022).

*... mit bisher
wenig beachteten
Umweltfolgen*

Insgesamt entstehen Umweltauswirkungen nicht nur beim Raketenstart, sondern an vielen Stellen im gesamten Lebenszyklus: (a) Abbau von Rohstoffen; (b) Verwendung von Seltenen Erden; (c) Herstellung von Satelliten; (d) Kalibrierungseinrichtungen für Satelliten; (e) horizontaler Start von Satelliten; (f) vertikaler Start von Satelliten; (g) Verschmutzung der Atmosphäre durch den Start; (h) Aktivitäten im Bodensegment; (i) Validierungskampagnen für Satelliten; (j) Auswirkun-

¹ ourworldindata.org/grapher/yearly-number-of-objects-launched-into-outer-space.

² esa.int/Space_Safety/ClearSpace-1.

³ tagesschau.de/ausland/amerika/krieg-satelliten-101.html.

⁴ space.com/anti-satellite-weapons-asats.

⁵ verteidigungspolitik.at/documents/475963/0/%C3%96sterreichische+Milit%C3%A4rische+Weltraumstrategie+2035%2B.pdf/2681f00c-2458-64b4-958a-0b93b3ebc806?version=1.0&t=1708438144625.

gen der Helligkeit des Nachthimmels auf die Astronomie; (k) Auswirkungen der Helligkeit des Nachthimmels auf die Ökologie; (l) Zunahme des Weltraummülls; und (m) zunehmende Kollisionen von Weltraumobjekten (Gaston et al., 2023).

Schon in den 1990er-Jahren zeigte eine Studie, dass die Zusatztriebwerke (Booster) der US-amerikanischen Space-Shuttles kleine Ozonlöcher erzeugen (Ko et al. 1994). Diese sogenannten Feststofftriebwerke verteilen bei der Verbrennung von Aluminiumperchlorid feine Partikel, die beim Kreuzen der Stratosphäre als Katalysator für die Zersetzung von Ozon fungieren. Die Veränderung der Atmosphärenchemie wurde dann vor allem wegen der vergleichsweise wenigen Starts als vernachlässigbar eingestuft, auch weil vermutet wurde, dass sich die kleinen Löcher schnell wieder schlossen.

*Ozonschädigende
Wirkung bei Start und
Wiedereintritt in die
Atmosphäre*

Der Schutz der Ozonschicht wurde mit dem Verbot von Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW) im Montreal-Protokoll völkerrechtlich geregelt, nachdem in den 1980er-Jahren die Forschung zeigen konnte, dass das antarktische Ozonloch saisonal auftrat. Eine ausgedünnte Ozonschicht lässt mehr ultraviolette Strahlung des Sonnenlichts durch die Atmosphäre, was auf Lebewesen krebserregend wirkt. Ohne Ozonschicht wäre das Leben auf der Erde, wie wir es heute kennen, nicht möglich. Auch wenn sich die Ozonschicht langsam erholt, treten heute Ozonlöcher saisonal an beiden Polen auf: Zwar wurden FCKWs verboten, aber eine Vielzahl anderer ozonschädigender Substanzen (z. B. Lachgas) werden weiter emittiert bzw. befinden sich als *langlebige Schadstoffe* auch nach dem Verbot noch lange in der Umwelt. Neben den Feststofftriebwerken verwenden heutige Raketen öfter Kerosin, Wasserstoff oder Methan. Feststofftriebwerke sind in ihrer Umweltwirkung besser untersucht und tragen stärker als andere Triebwerke zum Ozonverlust bei (Dallas et al., 2020). Aber alle Triebwerke, auch Flüssigtreibstoffe, emittieren eine Vielzahl von Partikeln und Gasen (wie Stickoxide) direkt in die mittlere und obere Atmosphäre und schädigen dort nachweislich die Ozonschicht (Brown, Bannister, & Revell, 2023).

Außerdem gibt es bei modernen Raketen einen Trend zu wiederverwendbaren Komponenten, die aber, genau wie wiedereintretende Trümmer, Stickstoffoxide beim Erhitzen durch den Wiedereintritt in die Atmosphäre erzeugen. Diese Emissionen tragen dann im gleichen Maß zum gesamten Ozon-Abbau in der Stratosphäre bei wie Chlor aus Feststofftriebwerken (Ryan et al., 2022). Die verglühenden Trümmer erzeugen nicht nur Stickoxide, sondern, da Aluminium ein Hauptbestandteil vieler Bauteile ist, auch Aluminiumoxid. Dies steht im Verdacht wiederum chemische Prozesse in der Atmosphäre anzustoßen. Eine internationale Industrienorm regelt, dass Satelliten spätestens 25 Jahre nach Missionsende verglühen müssen, was bei dem starken Anstieg der Satellitenstarts eine nicht zu vernachlässigende Menge an Material darstellt.

Die Treibhausgasemissionen der Raumfahrt galten bisher immer als vernachlässigbar. Allerdings sind die gesamten Auswirkungen von Partikel- und Gasemissionen auf die Ozonschicht und Treibhauseffekt unbekannt. Hierbei werden aber Chlor- und Partikelemissionen, wie z. B. Ruß, als besorgniserregender eingeschätzt als Gasemissionen, wie Wasserdampf und Kohlendioxid. Allerdings gilt dies auch nur für das jetzige Startaufkommen. Insgesamt ist das Ausmaß der

*Raketenstarts und
Klimaerhitzung*

potenziellen Klimaauswirkungen der Partikelemissionen unbekannt, da es nur wenige Beobachtungsdaten gibt, die für die Validierung von Modellierungsstudien für Raketenemissionen herangezogen werden können; und diese Daten wurden oft nur in der unteren Stratosphäre gesammelt (GAO, 2022). Rußpartikel aus Raketenemissionen haben eine besondere Wirkung, da sie in Höhen ausgestoßen werden, wo sie die Atmosphäre pro Maßeinheit fast fünfhundertmal stärker erwärmen als alle anderen Rußquellen am Boden und in der Luftfahrt zusammen (Ryan et al., 2022).

Angesichts des prognostizierten Wachstums der Raumfahrtindustrie sind die atmosphärischen Auswirkungen nicht ausreichend untersucht, und internationale Umweltabkommen, wie das Montreal-Protokoll, befassen sich derzeit nicht mit Raketenemissionen; auf nationaler Ebene gibt es nur vereinzelte Maßnahmen, wie Steuern auf Weltraumtourismus in den USA (Sirieys, Gentgen, Jain, Milton, & de Weck, 2022). Das unterstreicht die Notwendigkeit eines angemessenen Umweltmanagements für die obere Atmosphäre (Brown et al., 2023). Die Entwicklung eines Nachhaltigkeitsindex für Trägerraketen könnte als Grundlage für künftige Vorschriften dienen oder Anreize für den Sektor zu nachhaltigeren Designs schaffen, indem Emissionsreduzierung zu einem Wettbewerbsvorteil wird (Sirieys et al., 2022).

*Völkerrecht deckt
Raketenemissionen
nicht ab*

Mit dem Trend zu immer größeren Raketen steigt zudem das Risiko, dass die Haupttraketenstufe nach Ausbrennen beim unkontrollierten Wiedereintritt nicht vollständig verglüht. Bei der größten chinesischen Rakete „Langer Marsch“ stürzten ca. 20 Tonnen Metallschrott bei den Malediven ins Meer und überquerten vorher zahlreiche Ballungszentren von Europa bis Indien. Die weltweit bisher größte Rakete (Space-X-Starship) explodierte bei mehreren Starts in den letzten Jahren.

*Risiko durch
herabfallende Teile*

Sie ist allerdings grundsätzlich so konstruiert, dass die Hauptstufe zur Startrampe zurückkehrt und damit wiederverwendbar ist. Eine erfolgreiche Rückkehr gelang im Oktober 2024 zum ersten Mal.⁶ Insgesamt ist ein Trend zu wiederverwertbaren Raketensystemen zu verzeichnen, z. B. kehrte auch Blue origin bereits 2015 erfolgreich zurück zur Erde und auch die nationalen Weltraumprogramme in den USA und China arbeiten an RLV (reusable launch vehicles).⁷

*Trend zu
wiederverwertbaren
Raketensystemen*

Satelliten reflektieren auch nach Sonnenuntergang das Sonnenlicht und können daher als helle Streifen in Bildern des Nachthimmels erscheinen. Satelliten können auch die Fernerkundungsdaten von anderen Satelliten in höheren Umlaufbahnen stören, wenn sie unter ihnen vorbeifliegen. Die Kommunikation mit Satelliten erfolgt mit Funksignalen, die viel stärker sind als die Signale von astronomischen Phänomenen. Deshalb können Satelliten die schwachen, für die Radioastronomie wichtigen Signale verdecken und so Beobachtungen von weit entfernten Objekten, wie Schwarzen Löchern oder entfernten Galaxien, behindern. Auch wenn diese Auswirkungen bei einzelnen Satelliten gering sind, sind die Auswirkungen von vielen Satelliten, die in großen Konstellationen betrieben werden, größer oder in einigen Fällen sogar unbekannt (GAO, 2022).

*Störung der Erd- und
Allbeobachtung durch
Sonnenlichtreflexionen
und Funkübertragung*

⁶ orf.at/stories/3372657/.

⁷ researchgate.net/publication/383181934_Overview_on_Reusable_Space_Launch_System.

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Österreichs Weltraumstrategie 2030+⁸ hat sechs übergeordnete Ziele, von denen das erste die „Nachhaltige Entwicklung auf der Erde und im Weltall“ ist und sich klar den UN-Nachhaltigkeitszielen verpflichtet. Soll die Nutzung des Weltraums, auch durch die österreichische Weltraumforschung und -wirtschaft, nachhaltig erfolgen, müssen die offenen Fragen, etwa zur Schädigung der Ozonschicht durch Aluminium und andere Partikel und Gase, wissenschaftlich geklärt werden, ebenso wie die Frage, wie viele Starts für die Atmosphäre verkraftbar sind. Neben Agendasetting für diese Themen in der Forschungsförderung kann auch die Anpassung der in der Strategie genannten Nachhaltigkeitsindikatoren für Österreichs nationales Weltraumengagement Handlungsraum schaffen. Darüber hinaus könnte sich Österreich über die ESA sowie auf UN-Ebene beim „Greening“ des europäischen und internationalen Weltraumrechts einbringen.

*Weltraumstrategie:
Umweltwirkung
vermehrter
Raketenstarts
erforschen*

VORSCHLAG FÜR DAS WEITERE VORGEHEN

Neben dem dringend notwendigen Zusammenführen und Erweitern des Wissensstandes zu Emissionen und anderen Umweltwirkungen der Raumfahrt und politischen Handlungsoptionen in einer ausführlichen TA-Studie, könnte eine Agendasetting-Initiative mit Stakeholderbeteiligung die Grundlagen für eine diesbezügliche Forschungsagenda schaffen, die die zu klärenden Fragen dann in der Forschungsförderung verankern könnte. Beispielsweise muss rechtlich geklärt werden, inwiefern das Vorsorgeprinzip bei unsicherem Wissensstand zum Tragen kommen muss und inwieweit (private) Verursacher entstandene Schäden am Allgemeingut Atmosphäre kompensieren müssten. Außerdem werden weitreichende ethische Fragen aufgeworfen, z. B. nach der ungerechten Verteilung von Nutzen und Lasten (privater) Raumfahrt, wenn ein nur wenigen Reichen zugänglicher Weltraumtourismus Weltklima und Ozonschicht beachtlich schädigt.

*Neben natur-
wissenschaftlichen
auch ethische und
rechtliche Fragen
zu klären*

ZITIERTE LITERATUR

- Brown, T. F., Bannister, M. T., & Revell, L. E. (2023). Envisioning a sustainable future for space launches: a review of current research and policy. *Journal of the Royal Society of New Zealand*, 1-17.
- Dallas, J., Raval, S., Gaitan, J., Saydam, S., & Dempster, A. (2020). The environmental impact of emissions from space launches: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 255, 120209.
- GAO (2022). *Technology Assessment – Large Constellations of Satellites. Mitigating Environmental and Other Effects*. gao.gov/products/gao-22-105166.
- Gaston, K. J., et al. (2023). Environmental impacts of increasing numbers of artificial space objects. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 21(6), 289-296, esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/fee.2624.

⁸ austria-in-space.at/resources/pdf/V4_DE_Accessibility_Austrian-Space_Strategy_2030_v6_23_PAC2021_Approved.pdf.

- Ross, M. N., & Jones, K. L. (2022). Implications of a growing spaceflight industry: Climate change. *Journal of Space Safety Engineering*, 9(3), 469-477.
doi.org/10.1016/j.jsse.2022.04.004.
- Ryan, R. G., Marais, E. A., Balhatchet, C. J., & Eastham, S. D. (2022). Impact of rocket launch and space debris air pollutant emissions on stratospheric ozone and global climate. *Earth's Future*, 10(6), e2021EF002612.
- Sirieys, E., Gentgen, C., Jain, A., Milton, J., & de Weck, O. (2022). Space sustainability isn't just about space debris: On the atmospheric impact of space launches: MIT Science Policy Review.