



Ozonzerstörung durch Raketen und Satelliten

Ein Raketenstart hinterlässt viele Tonnen Material in der Atmosphäre. Ein Ariane-V Start beispielsweise setzt rund 500 Tonnen frei, darunter je 100 Tonnen Wasserdampf (H_2O), Kohlenmonoxid (CO) und Aluminiumoxid (Al_2O_3) sowie 60 Tonnen Salzsäuregas (HCl). Erste Untersuchungen zu möglichen Auswirkungen auf die Ozonschicht gab es bereits in den 1970er Jahren. In der Abgasfahne wurde starke bis völlige Ozonzerstörung (durch Chlor) berechnet und später auch beobachtet. Allerdings vermischt sich die Luft schnell wieder und der Ozonverlust gleicht sich aus. In den 1990er Jahren wurde für die damaligen Raketenstarts (u.a. viele Space-Shuttles) eine globale Ozonabnahme von 0.015 % berechnet (Abb. 1, [Jackman et al., 1998](#)). Das ist wenig im Vergleich zur Ozonabnahme durch FCKW (rund 3% im weltweiten Mittel, 6% am Hohenpeißenberg). Besonders ozonschädlich sind dabei Feststoffraketen, da sie sowohl ozonzerstörendes Chlor (HCl) als auch Aluminiumoxid-Partikel hinterlassen. Die Partikel wirken als Keime für stratosphärisches Aerosol und damit ozonzerstörend, ähnlich wie polare Stratosphärenwolken im antarktischen Ozonloch oder stratosphärisches Aerosol nach großen Vulkanausbrüchen. Ozonzerstörend wirkt auch Stickoxid, das in erheblichen Mengen in den heißen Abgasen beim Flug der Rakete durch die Stratosphäre entsteht. Später, beim Wiedereintritt und Verglühen von Raketenteilen und Satelliten in der oberen Atmosphäre wird ebenfalls Stickoxid gebildet, sowie Aluminiumoxid-Partikel. Beides kann in die Stratosphäre absinken und dort Ozon zerstören.

Abschätzungen wie in Abb. 1 zeigen für das Jahr 2030 eine globale Ozonabnahme von rund 0.035% durch Raketenstarts und Weltraumschrott. In der oberen Stratosphäre wird sogar eine Abnahme von bis zu 0.15 % geschätzt. Der Unsicherheitsbereich solcher Abschätzungen ist jedoch erheblich.

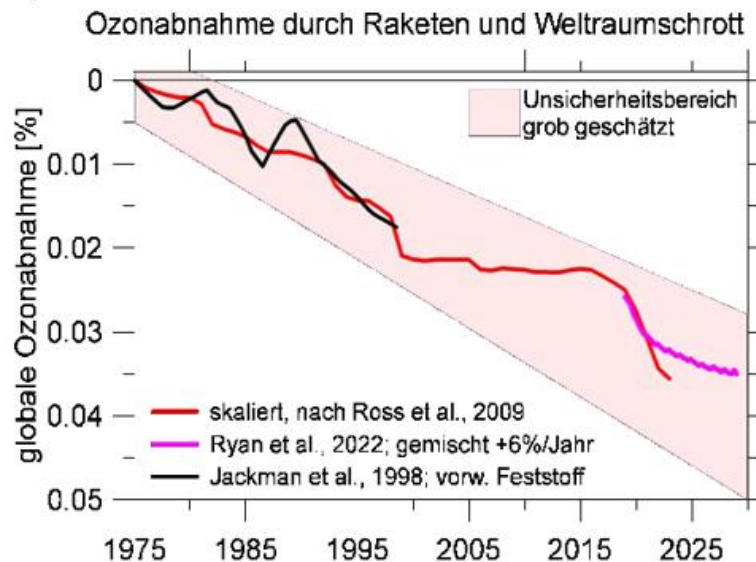


Abbildung 1: Zeitliche Entwicklung der global gemittelten Ozonabnahme durch Raketenstarts und verglühenden Weltraumschrott. Die rote Kurve ist geschätzt, anhand der Zahl von Objekten im Erdumlauf und des Ozonzerstörungsfaktors von [Ross et al. \(2009\)](#). Die Daten von [Jackman et al. \(1998\)](#) und [Ryan et al. \(2022\)](#) basieren auf typischen Emissionen und Modellrechnungen. Ryan et al. nehmen rund 60% Zunahme von 2021 bis 2030 an. Der Rückgang ozonschädlicher Feststoffraketen in den letzten Jahren spielt eine Rolle.

[Ferreira et al. \(2024\)](#) thematisieren als „neues“ Problem das Verglühen ausgedienter Satelliten. Der Absturz eines typischen Satelliten mit 250 kg Masse hinterlässt 30 kg Nanopartikel aus Aluminiumoxid. Bei 1000 abstürzenden Satelliten pro Jahr wären das 30 Tonnen Aluminiumoxid. Das ist deutlich weniger als die 1100 Tonnen Aluminiumoxid pro Jahr aus Feststoffraketen, die schon [Jackman et al. \(1998\)](#) und [Ryan et al. \(2022\)](#) angenommen haben. Allerdings fällt das Aluminiumoxid bei Ferreira et al. oberhalb von 60 km an (nur 1‰ der Atmosphäre liegt oberhalb von 50 km). Es kann dort und in der oberen Stratosphäre wegen der geringen Luftdichte aber stärker wirken. Ferreira et al. spekulieren, dass Aluminiumoxid Partikel in Zukunft zu erheblicher Ozonzerstörung führen könnten, wenn die Anzahl abstürzender Satelliten weiter stark zunimmt, z.B. auf 12000 Abstürze pro Jahr bzw. 360 Tonnen Aluminiumoxid. Auch das ist noch sehr viel weniger Aluminiumoxid als bei [Ryan et al. \(2022\)](#), wo 1100 Tonnen Aluminiumoxid pro Jahr praktisch nicht zur Ozonabnahme beitragen (nur 0.0001% Ozonabnahme, etwas mehr bei [Jackman et al., 1998](#): 0.008% Ozonabnahme).

Viel kritischer sind Stickoxide und Chlor (aus Feststoffraketen), die nach Ryan et al. jeweils etwa die Hälfte zur Ozonabnahme in Abb. 1 beitragen. Wasserdampf und Ruß spielen eine geringere Rolle, aber auch das kann sich in Zukunft deutlich ändern: Zu erwarten sind andere Treibstoffe, noch mehr Raketenstarts und viel mehr Satelliten. Abbildung 2 zeigt eindrucksvoll, dass sich die Zahl neuer Satelliten pro Jahr seit [Ross et al. \(2009\)](#) mehr als verzehnfacht hat. Im „low-earth“ Orbit, in 400 bis 2000 km Höhe, hat sich die Zahl der Satelliten (vor allem Telekommunikation und Erdbeobachtung) mehr als verdoppelt.

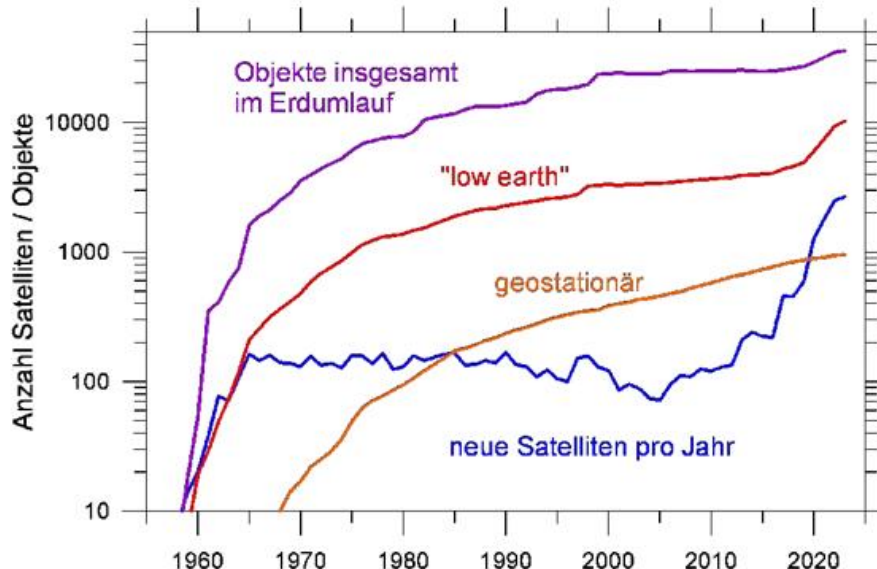


Abbildung 2: Zeitliche Entwicklung der Zahl von Objekten in Erdumlaufbahnen (violett, alle Objekte, inklusive Weltraumschrott), sowie von Satelliten in typischen Erdumlaufbahnen (rot: „low-earth“, orange: geostationär). Außerdem ist noch die Anzahl neuer Satelliten pro Jahr dargestellt (blau). Datenquelle: <https://ourworldindata.org/space-exploration-satellites> auf der Basis von Daten des United Nations Office for Outer Space Affairs.

Trotz erheblicher Unsicherheiten ist die globale Ozonabnahme durch Raketenstarts (mit einem kleinen Anteil durch verglühenden Weltraumschrott) mit bisher ca. 0.03% klein im Vergleich zu rund 3% Ozonabnahme durch FCKWs. Mit dem Verschwinden der FCKWs zum Ende des Jahrhunderts und der zu erwartenden erheblichen Zunahme von Raketenstarts und abstürzenden Satelliten (eine Größenordnung im nächsten Jahrzehnt?) verschieben sich jedoch die Gewichte. Zukünftige Raumfahrtaktivitäten könnten zu Ozonabnahmen im Prozentbereich führen. Die Unsicherheiten sind groß. Wir müssen das im Auge behalten!

Literatur:

- Ferreira et al., 2024, <https://doi.org/10.1029/2024GL109280>
 Jackman et al., 1998, <https://doi.org/10.1029/98GL00403>
 Ross et al., 2009, <https://doi.org/10.1080/14777620902768867>
 Ryan et al., 2022, <https://doi.org/10.1029/2021EF002612>