Active Debris Removal

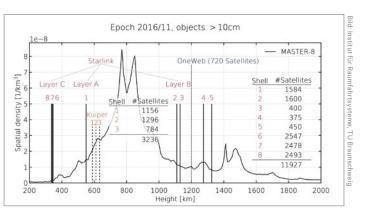
Methoden zur Bewältigung von Weltraumschrott

In den nächsten Jahren wird ein massiver Anstieg der Zahl an kommerziellen Satelliten im All erwartet. Dadurch wird auch Space Debris zu einem wachsenden Problem.

twa 90 Prozent aller vom Menschen geschaffenen Objekte in der Erdumlaufbahn sind derzeit ohne funktionalen Nutzen. Dieser sogenannte Weltraumschrott, englisch: Space Debris, stellt eine zunehmende Gefahr für operationelle Satelliten und die Internationale Raumstation ISS dar. Expertinnen und Experten sehen daher einen dringenden Handlungsbedarf bei der Vermeidung und Beseitigung von Weltraummüll. Die Forschung macht sich dabei auch Phänomene aus der Natur zunutze.

Laut der Europäischen Weltraumorganisation ESA ist die Anzahl der nachverfolgbaren Objekte im Erdorbit in den letzten zehn Jahren von etwa 15.000 auf 30.000 gestiegen. Diese stark zunehmende Objektdichte ist vor allem auf das Wachstum der Weltraummüllpopulation zurückzuführen. Noch dramatischer ist die Lage bei den nicht nachverfolgbaren Objekten, die kleiner als zehn Zentimeter sind: Statistische Analysen empirischer Daten zeigen, dass etwa 900.000 künstliche Objekte größer als ein Zentimeter sowie Millionen kleinerer Objekte die Erde umkreisen.

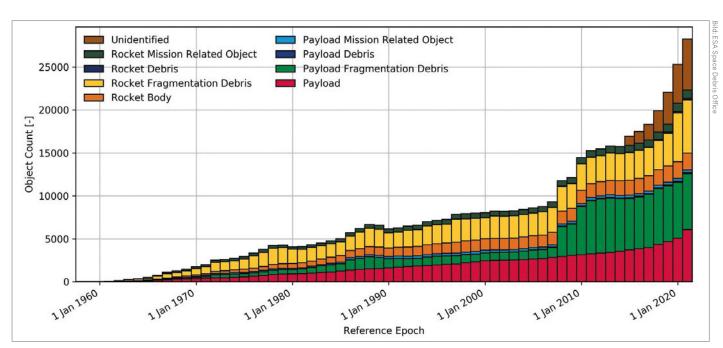
Der steigende Weltraumverkehr hat seinen Ursprung im sogenannten New Space, also bei kommerziellen Raumfahrtunternehmen wie SpaceX, OneWeb oder Amazon. Aus diesem Bereich wurde eine Vielzahl von Satellitenkonstellationen angekündigt, die Hunderte bis Tausende von Kleinsatelliten enthalten. Bei den Konstellationen werden Orbithöhen priorisiert, in denen die räumliche Dichte und damit ein potenzielles Kollisionsrisiko mit anderen Objekten eher gering sind. Diese neuen Satellitenkonstellationen sind ein Technologiesprung in der Raumfahrt und ermöglichen viele neue terrestrische Anwendungen. Sie führen aber auch dazu, dass aufgrund der großen Anzahl an neuen Satelliten auch ein erhöhtes Risikopotenzial in bisher vermeintlich sicheren Höhen besteht.



Räumliche Dichte-Verteilung in Abhängigkeit der Höhe von Objekten größer als ein Zentimeter, basierend auf dem MASTER-8.0-Modell. Zusätzlich sind die operationellen Höhen dreier prominenter Konstellationen aufgetragen. Ihre räumliche Dichte korreliert aber nicht mit der Länge der entsprechenden Balken im Bild.

Gefahrenquelle Antisatellitentests

Mehrere Ereignisse zeigten in der Vergangenheit deutlich die Risiken durch Space Debris auf. Beispiele sind die Kollision der Satelliten Kosmos 2251 und Iridium 33 im Jahr 2009 oder der Einschlag eines Weltraumschrott-Fragments auf den europäischen Sentinel-1A-Satelliten 2016. Umso kritischer sind daher die zunehmenden Antisatellitentests (ASAT) zu sehen, die 2007 mit der Zerstörung des chinesischen Wettersatelliten FengYun 1C begannen und darauf abzielen, Satelliten im Orbit unbrauchbar zu machen. Zuletzt generierte ein russischer ASAT bei der Zerstörung eines inaktiven russischen Satelliten im November 2021 ungefähr 1.500 neue nachverfolgbare Weltraumschrott-Teilchen, die nun ihrerseits eine ernst zu nehmende Gefahr auf verschiedenen Orbithöhen darstellen.

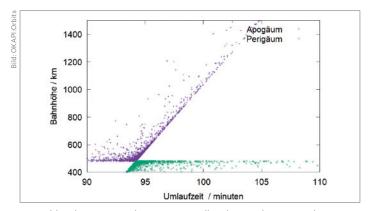


Anzahl der nachverfolgbaren Objekte (unter zehn Zentimetern) in Abhängigkeit des Typs

Active Debris Removal

Internationale Expertinnen und Experten sind sich einig, dass Maßnahmen notwendig sind, um die Erzeugung von Space Debris zukünftig zu vermeiden. Geeignet wären dafür Aktionen wie die Passivierung (zum Beispiel durch Ablassen des Treibstoffs, um Explosionen zu vermeiden) und das Absenken der Orbithöhe eines sich am operationellen Lebensende befindenden Satelliten. Langzeitsimulationen der Weltraummüllumgebung zeigen allerdings, dass diese Maßnahmen allein nicht ausreichen, um die Population konstant zu halten. Man geht daher davon aus, dass circa fünf bis sieben Hochrisikoobjekte pro Jahr mit Massen im Tonnenbereich aus dem Orbit entfernt werden müssten, um eine langfristige und nachhaltige Nutzung des erdnahen Orbits zu gewährleisten.

Lösungen für diese Herausforderungen werden als aktive Weltraummüll-Beseitigung (Active Debris Removal, ADR) bezeichnet. Allen ADR-Konzeptvorschlägen liegt als Ziel ein kontrolliertes De-Orbiting der Trümmerstücke zugrunde, damit diese durch den Wiedereintritt in die Erdatmosphäre schließlich verglühen oder auf sogenannten Friedhofsorbits verbleiben, auf denen sie keinen Schaden anrichten können. Doch ADR-Konzepte stellen eine enorme technische Herausforderung dar. Grund hierfür ist die nicht-kooperative Natur des Zielobjekts beim Einfangen (Docking) des Satelliten. Obwohl Docking bereits seit den 1960er-Jahren wiederholt erfolgreich im Orbit betrieben wird, besaßen alle Docking-Partner bisher die Fähigkeit, die eigene Lage zum jeweils anderen Objekt auszurichten. Im Gegensatz dazu wird man beim ADR ein Objekt vorfinden, das aufgrund von Störmomenten im All taumelt und weder optische Reflektoren noch einen dedizierten Docking-Adapter aufweist. Natürlich gibt es auch kontaktlose Möglichkeiten des ADR mittels bodengestützter Laser oder Satelliten mit einer Ionenstrahlen-Nutzlast im Orbit. Bei ihrer Nutzung wäre es jedoch eine große Herausforderung, die Eintrittstrajektorie, zum Beispiel über einem Ozean, genau zu regeln.



Ein Gabbard-Diagramm der Trümmerwolke, die aus dem russischen ASAT von 2021 resultiert, zeigt, wie sich Perigäum (erdnächster Punkt) und Apogäum (erdfernster Punkt) von Fragmenten in Bezug auf die Umlaufzeit vor den Auswirkungen von Bahnstörungen verhalten. Der Schnittpunkt beider Linien ist die ursprüngliche, quasi-kreisförmige Bahn des 1982 gestarteten Cosmos-1408-Satelliten. Punkte rechts von dieser Position stellen Fragmente dar, die in Bewegungsrichtung gestreut wurden, während Punkte links von dieser Position Fragmente darstellen, die entgegen der Bewegungsrichtung gestreut wurden. Der Cosmos-1408-Satellit bewegte sich in einer Höhe von 485 Kilometern, die Fragmente jedoch durchlaufen auch noch viel höhere Orbits.

Kontaktbasiertes Einfangen von alten Satelliten

Derzeit existiert ein breites Spektrum kontaktbasierter ADR-Missionsarchitekturen mit einem sogenannten *Chaser* zur Entfernung einzelner oder mehrerer Weltraummüll-Objekte. Prominente Konzepte zum Einfangen eines Objekts sind dabei Methoden mit Netz, Harpune oder robotischen Manipulatoren, da diese bereits über eine fortgeschrittene Technologiereife der entsprechenden terrestrischen Anwendungen verfügen.

In-Orbit-Demonstrationen beschränkten sich bisher auf Subsystemvalidierung wie optische Navigation oder das Einfangen (Capture). Zum Beispiel diente das AVANTI-Experiment (Autonomous Vision Approach Navigation and Target Identification) zwischen dem BIROS-Satelliten (Bispectral InfraRed Optical System) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und dem Picosatellitenprojekt BEESAT-4 (Berlin Experimental and Educational Satellite) der Technischen Universität Berlin der Erforschung von Formationsflug-Manövern. Darüber hinaus wurden in der RemoveDEBRIS-Mission unter Leitung der University of Surrey auch Fangversuche mit einem Netz und einer Harpune durchgeführt. Während des Netzexperiments wurde zunächst ein CubeSat mit geringer Geschwindigkeit ausgestoßen und dann in circa 11,5 Meter Entfernung mit einem Netz beschossen, das den Satelliten einfing - ohne jedoch noch eine Verbindung zum Chaser-Satelliten zu besitzen. Innerhalb der zweiten Demonstration wurde ein Harpunensystem auf ein ausfahrbares Ziel mit circa 1,5 Meter Abstand abgefeuert, das aber noch eine starre Verbindung zum Chaser hatte. Beide Demonstrationen waren offiziell erfolgreich, ließen aber die komplexen Seildynamiken zwischen Chaser und Target gänzlich außer Acht und sind daher wissenschaftlich nur von bedingter Aussagekraft.

Inzwischen gibt es auch **Start-ups**, die sich dem Problem der Space-Debris-Beseitigung widmen wollen. Die singapurische Firma *Astroscale* möchte zum Beispiel kommerzielle Dienstleistungen rund um das Entfernen von Objekten aus dem Orbit anbieten. Mit der Mission *ELSA-d* (*End-of-Life Service by Astroscale demonstration*) schickte sie einen sogenannten *Servicer* zusammen mit einem Zielobjekt (*Target*) in den Orbit. Letzteres dockte ein paar Zentimeter ab und wurde dann mittels eines magnetischen Docking-Interfaces wieder eingefangen. Während das Docken mit einem taumelnden Ziel für Folge-Experimente vorgesehen ist, ist die Nutzung eines magnetischen Interfaces aber nicht repräsentativ für das Einfangen von echtem Debris, da dieser im Normalfall keinen entsprechenden Adapter aufweist.

Zusammengefasst besitzen also die kontaktbasierten Einfangmethoden prinzipiell zwei Herausforderungen: Seile und Harpunen sind nicht mehrfach verwendbar, es wird also kein wiederholtes Ab- und Andocken zur Korrektur möglich sein. Des Weiteren ist die Dynamik der Seilverbindung zwischen Chaser und Target noch nicht abschließend geklärt. Robotische Manipulatoren (Greifarme) und mechanische Docking-Interfaces benötigen ein Gegenstück am Target zum Docken, das in der Regel nicht vorgesehen war, als das Objekt in den Weltraum gebracht wurde. Oft wird daher der Separationsring, der den Satelliten mit einer Rakete verbindet, als Greifziel anvisiert. In jedem Fall muss aber bei einer entsprechenden Mission die relative Winkelgeschwindigkeit zum taumelnden Ziel kompensiert werden – eine große Herausforderung.





Automatisierte Andocktests an Bord der ISS, durchgeführt im Dezember 2020 und Januar 2021 von NASA-Astronaut Victor Glover und NASA-Astronautin Shannon Walker. Flugroboter (Astrobees) wurden mit pilzförmigen, isotropen MDA am Chaser und verschiedenen Materialien am Target ausgestattet (im linken Bild zu sehen). Das Projekt wurde von der Raumfahrtagentur des DLR und vom damaligen Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert.

Weltraumschrott mit Mitteln der Natur bekämpfen

Aufgrund der Nachteile und Komplexität der bestehenden kontaktbasierten Docking-Ansätze hat in den letzten Jahren die Verwendung von synthetischen mikrostrukturierten Trocken-Adhäsiven (Micropatterned Dry Adhesives, MDA) größere Beachtung gefunden. Diese auch "Gecko-Materialien" genannte Technologie hat ihren Ursprung in der Natur und dient als Grundlage für die Entwicklung von biologisch-inspirierten Docking-Mechanismen.

Adhäsion ist ein universelles Phänomen, das zu einem Kraftschluss zwischen zwei sich berührenden Festkörpern führt. Im Laufe der Evolution haben sich bei Organismen adhäsive Extremitäten entwickelt, die es ihnen ermöglichen, sich an Festkörpern in verschiedenen Umgebungen anzuheften. Dies kann zur dauerhaften Haftung von Pflanzen bis hin zur reversiblen Adhäsion bei der Fortbewegung von Tieren dienen. Das Konzept eines Kontakts mit zahlreichen feinen Härchen ist von vielen Tierarten wie Geckos, Spinnen oder Insekten bekannt und zeigt die bemerkenswerte Fähigkeit, reversibel an fast jeder Oberfläche zu haften und mehrere Millionen von "Docking-Zyklen" zu überdauern.

Aus diesem Grund waren die Gecko-Materialien in den letzten zwei Jahrzehnten auch Thema einer Vielzahl von Studien zur Untersuchung der zugrunde liegenden Mechanismen mit dem Ziel, das Konzept zur Herstellung von MDA nachzuahmen. Die Studien resultierten in ersten Experimenten des Jet Propulsion Laboratory (JPL) der amerikanischen Raumfahrtbehörde NASA zur Funktionalität eines entsprechenden Mechanismus unter Mikrogravitation in einem Parabelflug 2014 und zur Überprüfung der Dauerhaftung innerhalb der ISS 2017. Ende 2020 und Anfang 2021 wurde das automatische Andocken mithilfe eines Astrobee genannten kleinen Flugroboters der NASA auf der ISS demonstriert. Das Experiment verantwortete ein deutsches Team (damals vom Institut für Raumfahrtsysteme der Technischen Universität Braunschweig; heute vom Fachgebiet Raumfahrttechnik der TU Berlin), das im Rahmen des REGGAE-Projekts (REduced Gravity Gecko Adhesion Docking Experiment) Docking-Experimente in sechs Freiheitsgraden durchführte.

Dabei wurde die Leistungsfähigkeit von zwei verschiedenen MDA-Typen, entwickelt am Leibniz-Institut für Neue Materialien in Saarbrücken (INM), für drei verschiedene Materialien (Acrylglas, Aluminium und Mehrschichtisolation) nachgewiesen, die auf den Astrobees montiert waren. Es ist also möglich, mithilfe dieser Technologie in Zukunft an die Solarzellen von taumelnden Satelliten oder an Oberstufen anzudocken.

So konnten zwar beim ADR schon erste Teil-Erfolge erzielt werden, die Forschung dazu hat jedoch bislang nur einen niedrigen Technologiereifegrad. Dem entgegen steht in den nächsten Jahren ein massiver Anstieg kommerzieller Satelliten im All. Es ist also zu erwarten, dass zukünftig gehäuft Fragmentationen - und damit Space Debris erzeugende Ereignisse – auftreten werden. Umso wichtiger ist es daher, bei zukünftigen Starts alle gängigen Maßnahmen zur Vermeidung von Weltraummüll umzusetzen. Nur so kann die Nachhaltigkeit in der Raumfahrt konsequent vorangebracht werden – für eine störungsfreie Raumfahrt.

DIF AUTOREN

Mohamed Khalil Ben-Larbi studierte Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität Stuttgart. Er leitete die Satellitentechnik-Gruppe an der TU Braunschweig. Seine Hauptarbeitsgebiete an der TU Berlin umfassen das Modellieren und die Simulation von Luft- und Raumfahrtsystemen sowie die Steuerung, Navigation und Regelung von Raumfahrzeugformationsflügen.

Dr. Carsten Wiedemann promovierte an der TU Braunschweig und ist dort kommissarischer Leiter des Instituts für Raumfahrtsysteme (IRAS). Seine Forschung konzentriert sich auf die Modellierung der Weltraummüllumgebung.

Prof. Dr. Enrico Stoll ist Professor für Raumfahrttechnik und leitet das gleichnamige Fachgebiet an der TU Berlin. Im Fokus der Forschung stehen dabei neben Sensornetzwerken im All die Entwicklung von robotischen Fähigkeiten für CubeSats zum ADR und zur additiven Fertigung im Orbit.