

Kosmische Müllhalde

Neue laseroptische Ortungsverfahren erlauben es, die Bahnen von Schrottobjekten im Weltraum präzise zu vermessen.

Daniel Hampf, Leif Humbert, Thomas Dekorsy und Wolfgang Riede

Mehr als 20 000 Objekte im Weltall werden regelmäßig überwacht, da sie aktive Satelliten gefährden. Für die Katalogisierung dieses Weltraumschrotts gibt es neue laseroptische Methoden, mit denen sich diese Objekte entlang ihrer Bahnen genau verfolgen lassen. In einem weiteren Schritt gilt es, sie gezielt zu entfernen.

Am 4. Oktober 1957 wurde mit Sputnik 1 der erste Satellit in eine Erdumlaufbahn geschossen. Dieses Ereignis gilt als Beginn des Raumfahrtzeitalters. Sputnik 1 war nur drei Monate im Orbit, bevor er wieder in die Erdatmosphäre eintrat und verglühte. Aus diesen Anfangszeiten der Raumfahrt befinden sich nur noch wenige, inaktive Satelliten im Orbit.

Die meisten gehören zur Vanguard-Reihe der USA. Hiervon ist Vanguard 1 das älteste Objekt in der Erdumlaufbahn, dessen Wiedereintritt in die Atmosphäre Ende des 22. Jahrhunderts erwartet wird.

In den Anfangszeiten der Raumfahrt war es nicht nötig, sich Gedanken über mögliche Gefährdungen aktiver Satelliten und Astronauten durch Weltraumschrott zu machen. Erst bei der Planung von Langzeitmissionen mit großen Stationen wie Skylab, einer US-amerikanischen Raumstation aus den 1970er-Jahren, spielte das Thema eine Rolle.

Die steigende Zahl von Raketenstarts, aber auch Fragmentationen von Raketenoberstufen bzw. Satelliten nach Ende ihrer Betriebszeit, sorgten für immer mehr Trümmerteile. Verbliebene Mengen an Treibstoff können eine Explosion verursachen, bei der viele kleine, aber für die Raumfahrt sehr gefährliche Teilchen

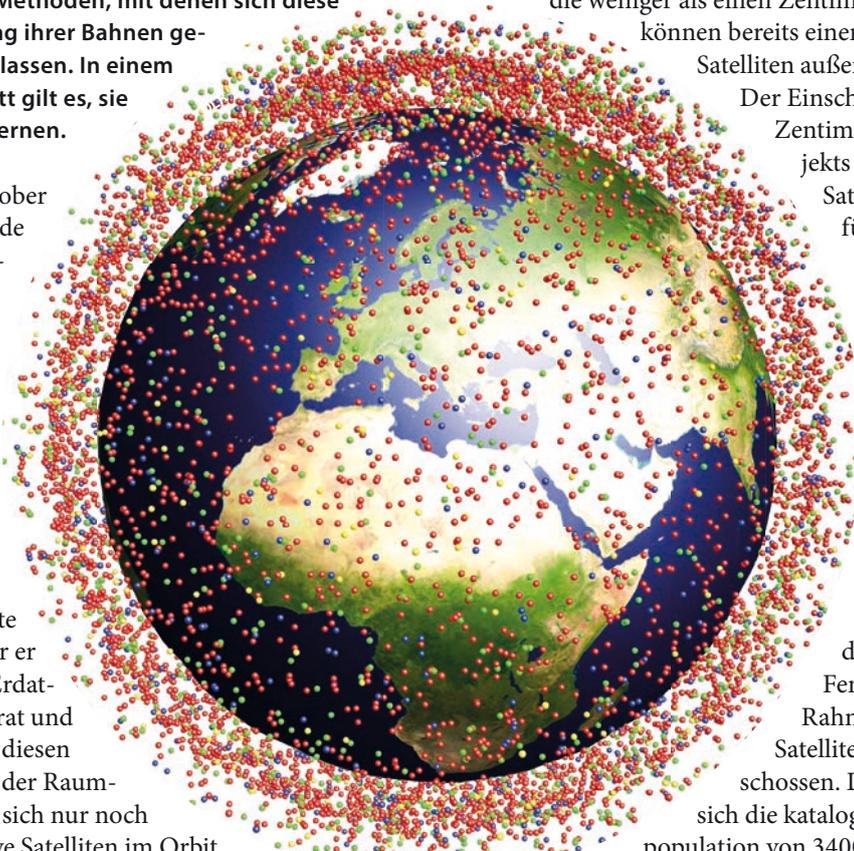
entstehen. Aufgrund der hohen Bahngeschwindigkeiten in niedrigen Erdborbits liegen die typischen Kollisionsgeschwindigkeiten bei 10 km/s. Objekte, die weniger als einen Zentimeter groß sind, können bereits einen operationellen Satelliten außer Funktion setzen.

Der Einschlag eines zehn Zentimeter großen Objekts in einen intakten Satelliten kann dazu führen, dass der Satellit sich in einer Trümmervolkle auflöst.

Die kontinuierliche Zunahme an Weltraumschrott wurde von zwei Kollisionsereignissen überlagert: 2007 hat China den Wettersatellit Fengyun-1C im Rahmen eines Anti-Satelliten-Tests abgeschossen. Dadurch erhöhte sich die katalogisierte Objektpopulation von 3400 auf knapp

12 000 Objekte. Die erste Kollision zwischen zwei strukturell intakten Satelliten (Iridium-33 und Kosmos-2251) im Jahr 2009 erhöhte diese Zahl nochmals um 17 Prozent (Abb. 1).

Seit Beginn des Raumfahrtzeitalters gelangten 7500 Satelliten bei 5250 Raketenstarts in den Orbit. Lediglich rund 1200 Satelliten sind derzeit operativ. Das Bodenstationsnetzwerk des US Space Surveillance Systems überwacht regelmäßig 23 000 Objekte. Aus statistischen Modellen lässt sich jedoch auf die Existenz von 29 000 Objekten größer als 10 Zentimeter schließen. Schätzungen gehen von rund 750 000 Objekten aus, die größer als ein Zentimeter sind.¹⁾



Auf Bahnen in bis zu 2000 Kilometer Höhe finden sich unzählige Schrottobjekte, die es zu katalogisieren gilt (Bild: DLR).

Dr. Daniel Hampf, Dr. Leif Humbert, Prof. Dr. Thomas Dekorsy und Dipl.-Phys. Wolfgang Riede, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Technische Physik, Aktive Optische Systeme, Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart

1) Alle Daten Stand Januar 2017, bit.ly/2zQijBT

Mit freundlicher Unterstützung von T. S. Kelso

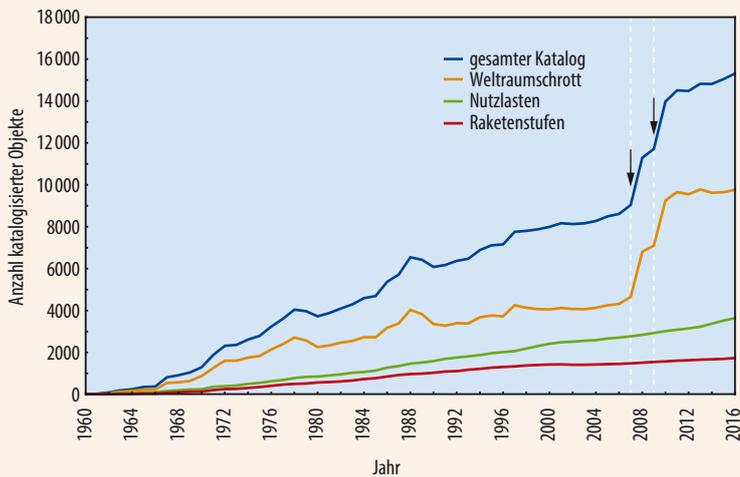


Abb. 1 Die Zahl der katalogisierten Objekte ab einer Größe von 10 cm im Erdorbit mit Bahnhöhen von 200 km bis 36 000 km nimmt stetig zu – überlagert von zwei Ereignissen in den Jahren 2007 und 2009.²⁾

Die aktuelle Situation

Die Gesamtmasse der aktiven Satelliten sowie der Schrottobjekte im Erdorbit liegt derzeit bei rund 7500 Tonnen – davon sind 6000 Tonnen Schrott. In einer Bahnhöhe von 800 bzw. 1500 Kilometer ist die Objektdichte besonders groß (Abb. 2). In diesen Höhen besteht die Gefahr einer Kaskade von Kollisionen. Diesem sog. Kessler-Syndrom zufolge kann eine kritische Dichte an Fragmenten dazu führen, dass Folgekollisionen immer kleinere Schrottobjekte erzeugen, die wiederum die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Folgekollisionen erhöhen [1].

Dann ließen sich diese Orbits auf absehbare Zeit nicht mehr nutzen. Die mittlere Verweildauer eines Objekts hängt von seiner Bahnhöhe ab, in 800 Kilometer Höhe beträgt sie etwa hundert Jahre. Da der Zugang zum All und die dort betriebene Infrastruktur für moderne Industriegesellschaften unverzichtbar geworden ist, hätte dies weitreichende Konsequenzen.

Ein weiteres Risiko besteht beim Wiedereintritt von Objekten in die Erdatmosphäre. Dabei wandelt sich in kurzer Zeit ein Großteil der kinetischen Energie des Körpers in Wärme um, sodass die Mehrzahl der Objekte vollständig verglüht. Größere bzw. kompakte Objekte können bis zum Erdboden gelangen. Das damit verbundene Risiko für die Bevölkerung ist jedoch extrem gering. Die ESA plant ihre Missionen so, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Personenschadens kleiner als 0,0001 ist. Bis dato sind keine Vorfälle bekannt, bei denen Personen zu Schaden gekommen sind.

Schätzungen der ESA zufolge treten jährlich rund 40 größere Objekte in die Atmosphäre ein.³⁾ Das europäische Raumfahrtkontrollzentrum der ESA in Darmstadt und das deutsche Weltraumlagezentrum in Uedem überwachen diese Ereignisse. Ein solches war der kontrollierte Wiedereintritt der Raumstation Skylab (Masse: 74 Tonnen) im Juli 1979. Durch aktive Kontrolle der Fluglage schlugen die nicht verglühten Trümmer in einem unbewohnten Korridor über unbewohntem Gebiet in Westaustralien auf. In Kürze wird der Wiedereintritt der chinesischen Raumstation Tiangong 1 (Masse: 8,5 Tonnen) erwartet.⁴⁾ Bis heute gelang es, etwa 70 größere Objekte nach ihrem Wiedereintritt an Land zu bergen.

Schon heute ist die Dichte an Objekten in einigen Bahnhöhen so hoch, dass Satellitenbetreiber immer wieder Ausweichmanöver einleiten müssen, um ihre Instrumente zu schützen. Allein die internationale Raumstation, die in einer Höhe von rund 400 Kilometer in einem eher wenig verschmutzten Orbit stationiert ist, musste bisher mehr als zwanzig Mal ausweichen [2]. Für diese Manöver sind genaue Bahnvorhersagen notwendig, die sich auf aktuelle und präzise Beobachtungsdaten stützen. Für die Bahnvorhersage von Weltraumschrott ist es erforderlich, die Bewegungsgleichungen unter Berücksichtigung des Schwerefelds der Erde inklusive höherer Momente, der Gravitation von Sonne und Mond, des variablen solaren Strahlungsdrucks der Sonne und atmosphärischer Reibung numerisch zu integrieren. Dies führt bei guten initialen Daten der Bahnkurve zu verlässlichen Vorhersagen, deren Genauigkeit mit der Bahnhöhe abnimmt, tiefe Bahnen sind alle paar Tage neu zu vermessen. Daher betreiben verschiedene Institutionen weltweit vollautomatische Sensorsysteme, die rund um die Uhr den erdnahen Weltraum beobachten, sowie Datenbanksysteme, die aktuelle Kollisionswarnungen liefern.

Die gängigen Methoden, um orbitale Objekte zu detektieren, basieren auf Radaranlagen für Objekte im niedrigen Erdorbit (Low Earth Orbit, LEO) bis zu

2) Die Darstellung entspricht dem Stand des öffentlich zugänglichen Katalogs im April 2016, <http://celestrak.com>

3) <http://ecss.nl>

4) www.aerospace.org/cords/reentry-predictions

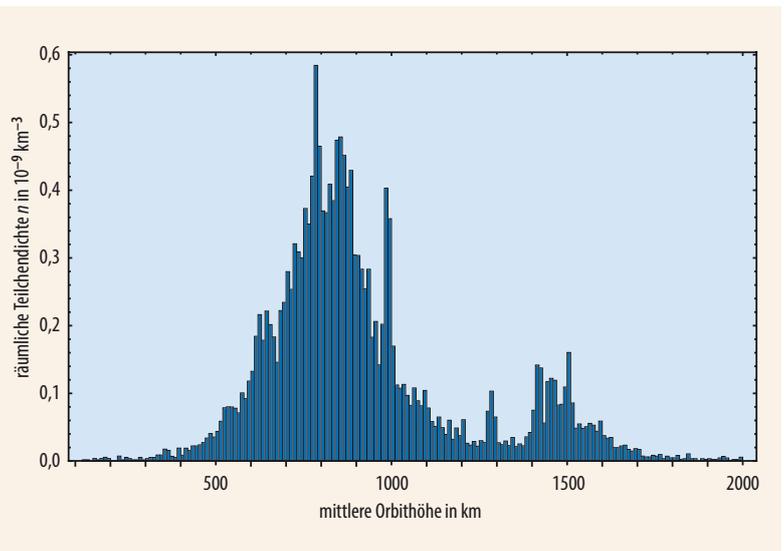


Abb. 2 Die Teilchendichte orbitaler Objekte ist in einer Höhe von 800 km bzw. 1500 km besonders hoch.²⁾

2000 Kilometer Bahnhöhe und auf optischen Teleskopen für Objekte in höheren Erdorbits wie dem geostationären Orbit (Geostationary Orbit, GEO) mit einer Bahnhöhe von 35786 Kilometer. Die mit vorhandenen Stationen erreichbare untere Detektionsgrenze beträgt bei Radar für den LEO – je nach Abstrahlleistung, Antennendurchmesser und Frequenz – im besten Fall bis zu einem Zentimeter. Eine vollständige Katalogisierung ist mit den derzeit verfügbaren Sensoren erst ab einer Größe von zehn Zentimeter möglich. Wünschenswert wäre es aber, die detektierbare Grenzgröße für die Ortung kleinerer Objekte bei gleichzeitiger exakter Vermessung ihrer Bahn zu reduzieren. Für Objekte im GEO liegt die Detektionsgrenze bei 0,3 bis 1 Meter und hängt von der solaren Beleuchtung, der Lichtverschmutzung in der Umgebung, der Brennweite und der Apertur des Teleskops ab [3].

Passiv beobachtet

Werden Objekte in einer niedrigen Erdumlaufbahn vom Sonnenlicht angestrahlt, sind sie von der Erde aus in der Dämmerung mit Teleskopen gut sichtbar (passiv-optische Beobachtung). Große Objekte wie der inzwischen defekte europäische Erdbeobachtungssatellit Envisat lassen sich sogar mit bloßem Auge erkennen.⁵⁾ Spiegelteleskope von etwa einem halben Meter Durchmesser erlauben es, zehn Zentimeter große Objekte im LEO zu beobachten.

Seit über 50 Jahren werden Satelliten auf diese Weise in der Dämmerung geortet.⁶⁾ Inzwischen ist die technische Entwicklung bei Kameras so weit fortgeschritten, dass passiv-optische Beobachtungen genaue und schnelle Positionsmessungen erlauben. Während dies für Objekte im GEO operationeller Standard ist, gelten optische Verfahren auch für den LEO zunehmend als Alternative zu Radarmessungen. Besondere Herausforderungen ergeben sich dabei aus der hohen Winkelgeschwindigkeit von bis zu einem Grad pro Sekunde.

Um die Position genau zu bestimmen, ist daher ein Kamerasystem notwendig, das den Zeitpunkt der Aufnahme auf weniger als eine Millisekunde genau festlegen kann. Dies ist mit modernen Digitalkameras (CCD oder sCMOS) problemlos möglich. Die Positionsbestimmung erfolgt durch einen Vergleich mit Sternen im Bildhintergrund. Dieses Verfahren ist nicht durch die Genauigkeit der Teleskopmontierung begrenzt. Bei der Auswertung der Daten gilt es, die Laufzeitkorrekturen durchzuführen, die aufgrund der endlichen Lichtgeschwindigkeit auftreten. Auf diese Weise sind Genauigkeiten von einigen wenigen Bogensekunden möglich. Das entspricht einigen hundert Metern im GEO und rund zehn Metern im LEO und reicht in der Regel aus, um die Objekte katalogisieren zu können. Sind genauere Messungen gefordert, können aktiv-optische Verfahren wie das Laser-Ranging helfen.

Neben den Bahninformationen liefern passiv-optische Beobachtungen weitere Informationen über die Objekte. So erlaubt beispielsweise das Spektrum des

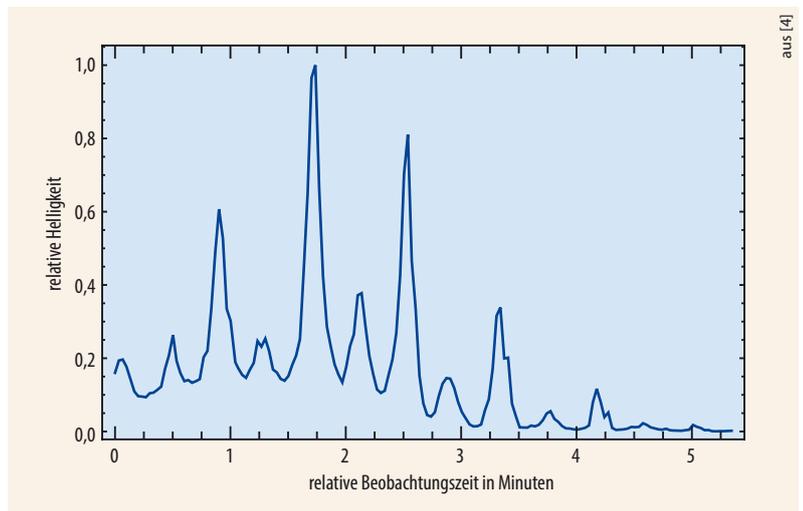


Abb. 3 Lichtkurve des Satelliten OICETS, gemessen am 13. August 2016 vom DLR Forschungsobservatorium in Stuttgart

reflektierten Lichts Rückschlüsse auf das Material der Reflexionsfläche. Über periodische Schwankungen der Helligkeit lassen sich Aussagen über die Rotation und ggf. über den Betriebszustand des Satelliten treffen. Während regelmäßig rotierende Objekte fast periodische Lichtkurven erzeugen und damit eine einfache Auswertung ermöglichen, sind Lichtkurven taumelnder Objekte oft nur mit komplexen Modellen und Parameteranpassungen zu interpretieren (Abb. 3). Für diese Messungen müssen bereits ungefähre Bahninformationen des Objekts bekannt sein.

Weitwinkelteleskope bieten dagegen die Möglichkeit, neuen Weltraumschrott zu entdecken und in eine Datenbank aufzunehmen. Im einfachsten Fall reicht eine gute Digitalkamera mit einem Teleobjektiv aus, um einen großen Bereich des Himmels abzudecken und Objekte ab einer Größe von einem halben Meter zu entdecken. Für kleinere Teile sind spezielle Teleskope nötig, die bei einer großen Apertur eine sehr kurze Brennweite und damit ein großes Blickfeld aufweisen. Eine solche Erstentdeckung ist

5) Aktuelle Überflüge von Envisat, der ISS und anderen Objekten sind öffentlich zugänglich: heavens-above.com.

6) Neben den professionellen Observatorien existiert eine aktive Szene aus Amateurastronomen, die Satelliten beobachtet und sich über Entdeckungen austauscht: www.satobs.org.



Abb. 4 Im Forschungsobservatorium Umlandshöhe werden Laserimpulse über den Refraktor (Sucherteleskop, oben) ausgesandt und vom Objekt zurückgestreute Photonen mit dem Spiegelteleskop (Mitte) detektiert.

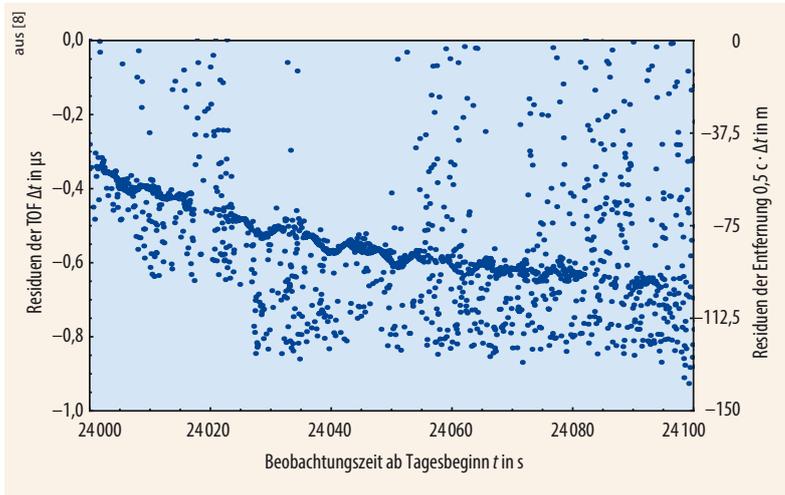


Abb. 5 Laser-Ranging-Diagramm für eine sieben Meter lange russische SL-4 Raketenoberstufe (NORAD ID 39679). Aus den Messdaten leiten sich die Rotationsperioden des Objekts ab. Aufgetragen sind die zeitlichen Abweichungen der Photonenlaufzeit zur erwarteten Bahn (TOF: Time-of-Flight).

7) <https://ilrs.cddis.eos-dis.nasa.gov>

notwendige Voraussetzung für genauere Messungen mit passiv-optischen oder Laser-Ranging-Methoden. Um die Entdeckung neuer Objekte zu bewerten, sind Populationsmodelle hilfreich [5].

Präzise Positionsmessungen dank Laser

Seit einigen Jahren gilt das Laser-Ranging als Alternative bzw. Ergänzung zu Radaranlagen für die Beobachtung von Weltraumschrott in niedrigen Erdumlaufbahnen. Dabei handelt es sich um eine Serie von Abstandsmessungen während des Überflugs eines Objekts über die Beobachtungsstation. Dazu werden mit einem Laser kurze Pulse in Richtung des Objekts ausgesendet und an dessen Oberfläche reflektiert bzw. gestreut. Aus der Lichtlaufzeit leitet sich der Abstand zum jeweiligen Zeitpunkt ab (Infokasten).

Beim Satellite-Laser-Ranging kommt dieses Messprinzip bereits seit den 60er-Jahren zum Einsatz. Dabei

wird per Laser der Abstand zu Satelliten gemessen, was geodätischen Untersuchungen zugute kommt oder zur Missionsunterstützung für Erdbeobachtungs- oder Navigationssatelliten dient. Ein weltweites Netzwerk aus über vierzig Stationen – der International Laser Ranging Service – beobachtet und vermisst die Bahnen von knapp hundert Satelliten rund um die Uhr.⁷⁾ Moderne Laser-Ranging-Systeme erlauben Abstandsmessungen mit einer Genauigkeit von unter einem Zentimeter. Das Laser-Ranging ist damit das genaueste bodengestützte Messverfahren, um einen Orbit zu bestimmen.

Voraussetzung ist jedoch ein Retroreflektor am Satelliten, der den ausgesendeten Laserstrahl in sich zurückspiegelt. In diesem Fall genügt eine Laserleistung von einigen hundert Milliwatt, damit eine ausreichende Anzahl an Photonen in die Empfangsapertur zurück kommt. Bei der Beobachtung von Weltraumschrott und anderen „unkooperativen Zielen“ sind dagegen Laserleistungen von 10 Watt bis deutlich über 100 Watt für kleinere Objekte notwendig. Denn während ein Retroreflektor den Großteil des Lichts auf einen Umkreis von wenigen hundert Metern um den Sender zurückwirft, streut ein unkooperatives Ziel das Licht mindestens in den halben Raumwinkel. Zusammen mit weiteren Streuverlusten, etwa in der Optik oder in der Atmosphäre, liegt der Abschwächungsfaktor bei rund neunzehn Größenordnungen. Anders gesagt: Von 10^{19} ausgesendeten Photonen eines Laserpulses von rund 2 Joule Energie erreicht nur ein einziges bei seiner Rückkehr den Detektor! Zudem sind bei Weltraumschrott die Bahnvorhersagen teils recht ungenau, und die Streuquerschnitte schwanken aufgrund der Rotation der Objekte stark.

Erste erfolgreiche Messungen zu unkooperativen Zielen gelangen der australischen Firma EOS im Jahre 2004 [6, 7]. Seitdem fanden an mehreren Observatorien weltweit ähnliche Experimente statt, in Europa unter anderem 2012 am Institut für Weltraumforschung der Universität Graz und 2016 am Geodätischen Observatorium in Wettzell, jeweils mit Lasern im grünen Spektralbereich [8]. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) betreibt selbst eine Satellite-Laser-Ranging Station (Abb. 4), hat die Laser-Technologie für diese beiden Experimente zur Verfügung gestellt und die Benutzung von Infrarot-Laserlicht entwickelt. Die Fundamentallängelänge eines Nd:YAG-Lasers von 1064 Nanometer erfordert es nämlich, viele Linsen und Filter im System sowie den Empfangsdetektor zu tauschen. Photodioden auf InGaAs-Basis bieten eine gute Alternative, sind jedoch in der Regel kleiner als 100 Mikrometer und müssen sehr genau justiert werden. Der Aufwand lohnt sich jedoch: Da Verluste bei der Frequenzkonversion und der atmosphärischen Propagation sich verringern oder nicht mehr vorhanden sind, verbessert sich die Photonenbilanz fast um einen Faktor zehn.



Abb. 6 Das transportable Laser-Ranging-System des DLR ist integriert in einen Standard ISO Container und wird derzeit auf den ersten Mess-Einsatz vorbereitet.

Systeme der nächsten Generation

Die bisherigen Experimente, die fast ausschließlich mit vorhandenen und entsprechend aufgerüsteten Satellite-Laser-Ranging-Stationen erfolgten, haben die hohe Erwartung an die Präzision der Messung bestätigt. In der Regel wird die Genauigkeit nur durch die Dauer der Laserimpulse und die Größe des Objekts limitiert, da die Photonen an unterschiedlichen Flächen am Objekt reflektiert werden können. Unter günstigen Bedingungen lässt sich sogar die Größe des Objekts aus der Zeitverteilung des reflektierten Signals extrahieren. Wenn die primäre Reflexionsfläche ihren Abstand zum Schwerpunkt des Objekts verändert, zeigt sich die Rotation des Objekts aus periodischen Schwankungen des Abstandes (Abb. 5).

Dank der bisherigen Experimente ist klar, welche technologischen Verbesserungen möglich sind, um die Kollisionsvermeidung zu unterstützen. Für einen flächendeckenden Einsatz sind kostengünstige, standardisierte und hochautomatisierte Laser-Ranging-Stationen nötig, die darauf optimiert sind, Weltraumschrott zu beobachten. Dazu entwickelt das DLR unter anderem ein transportables Container-System, mit dem 2018 die ersten Messungen erfolgen sollen (Abb. 6). Mittelfristig ist vorgesehen, dieses System an unterschiedlichen Standorten einzusetzen und einen vollautomatischen Betrieb unter unter-

schiedlichen klimatischen Bedingungen zu demonstrieren.

Für die Ortung sehr kleiner Schrottoobjekte, die auch für moderne Radaranlagen eine große Herausforderung darstellen, sind Laser-Ranging-Systeme mit deutlich besserer Sensitivität notwendig. In den oben erwähnten Experimenten lagen die kleinsten beobachteten Teile in einer Größenordnung von einem halben Meter. Da die zurückgestreute Leistung quadratisch mit der Objektgröße abnimmt, erfordern Objekte unterhalb von zehn Zentimetern stärkere Laser, größere Empfangsteleskope sowie eine bessere Zielgenauigkeit und Strahlqualität. Derzeit werden am DLR-Institut für Technische Physik Lasersysteme mit Pulslängen im Nanosekunden-Bereich mit mittleren Leistungen im kW-Bereich mit guter Strahlqualität entwickelt.

Gegen den Schrott

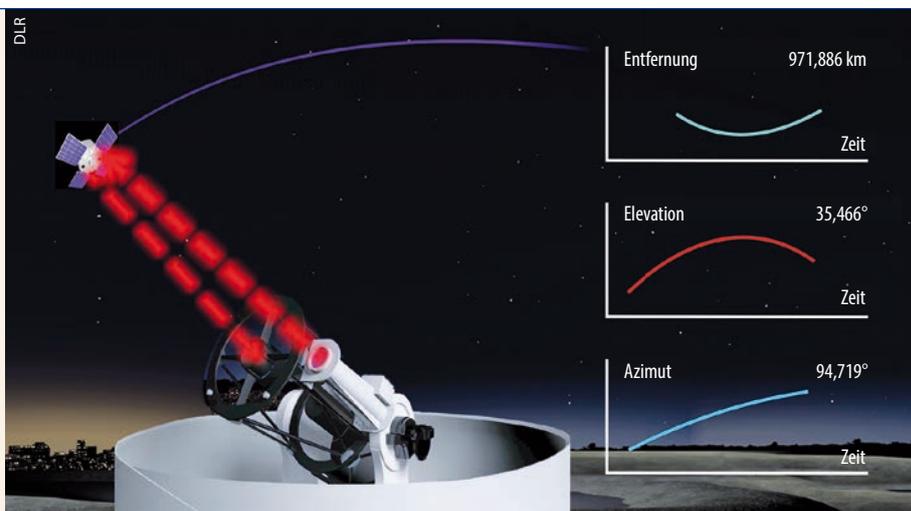
Das langfristige Ziel ist neben der verbesserten Kollisions- bzw. Wiedereintrittsvorhersage auch die Entfernung von Weltraumschrott. Dafür muss dessen genauer Orbit bekannt sein. In Forschung und Industrie werden zahlreiche Ansätze verfolgt, um Weltraumschrott zu entfernen, beispielsweise mittels eines Verfolgungssatelliten, der Weltraumschrott mit Harpunen oder Netzen einfängt (Abb. 7).

SATELLITE-LASER-RANGING

Eine Laser-Ranging-Station besteht im Wesentlichen aus einem Transmitter-System zur Aussendung der Laserpulse, einem Empfänger sowie der Mess- und Steuerelektronik. Während eines Überflugs finden damit kontinuierliche Abstandsmessungen statt (Abb.).

Transmitter: Ein Laser, der meist im Unterbau der Kuppel aufgebaut ist, erzeugt die Lichtpulse. Für Ziele mit Retroreflektor, die sehr genau vermessen werden sollen, haben die Pulse eine Dauer von zehn bis einigen hundert Pikosekunden, die Pulsenergie liegt unter einem Millijoule. Bei Weltraumschrott sind Pulsenergien von einigen hundert Millijoule nötig, für kleine Objekte noch mehr. Die Lichtpulse werden meist mit Wiederholraten von 100 Hertz bis einige Kilohertz ausgesendet. Vom Laser wird das Licht über ein System aus drehbaren Spiegeln in ein Refraktorteleskop eingekoppelt (Coudé-Pfad). Dieses Transmitterteleskop ist zusammen mit dem Empfangsteleskop auf einer schnellen, präzisen Montierung befestigt, um die Ziele verfolgen zu können. Da der Laserstrahl eine Divergenz von nur wenigen Bogensekunden hat, muss die Montierung hohe Anforderungen erfüllen.

Empfänger: Als Empfänger dient ein Spiegelteleskop, an das ein Einzelphotonendetektor angeschlossen ist. Um ein ausreichend großes Signal zu erhalten, wird meist eine Apertur von über einem halben Meter verwendet. Eine Avalanche Photodiode ermöglicht die Einzelphotonendetektion mit einer guten Zeit-



Beim Laser-Ranging erfolgen während eines Überflugs kontinuierlich Abstandsmessungen.

auflösung. Um auch bei starkem Hintergrundlicht messen zu können, wird der Detektor erst knapp vor jeder erwarteten Ankunft eines Photons aktiviert und ein schmaler Bandpassfilter bei der Laserwellenlänge eingesetzt.

Mess- und Steuerelektronik: Mit einem Event Timer werden die Zeitpunkte des ausgesendeten Lichtpulses und des reflektierten Signals auf Pikosekunden genau aufgezeichnet und korreliert. Die Genauigkeit der Einzelmessung wird bei Zielen mit Retroreflektor durch die Länge des Laserpulses definiert; so kann etwa ein System mit 100 Pikosekunden Pulslän-

ge eine Auflösung von $100 \text{ ps} \cdot c/2 = 1,5 \text{ cm}$ erreichen. Bei der Vermessung von Weltraumschrott ohne definierte Reflexionsebene und mit unbekanntem Massenschwerpunkt bestimmt die Ausdehnung des Objekts die Genauigkeit. Daher genügen für solche Systeme Nanosekunden-Laser. Für die Bahnvermessung werden Einzelmessungen von 30 bis 90 Sekunden gemittelt und so die Genauigkeit erhöht. Entscheidend ist eine zuverlässige Kalibration. Gute Systeme erreichen bei Objekten mit Retroreflektor eine Genauigkeit von wenigen Millimetern.

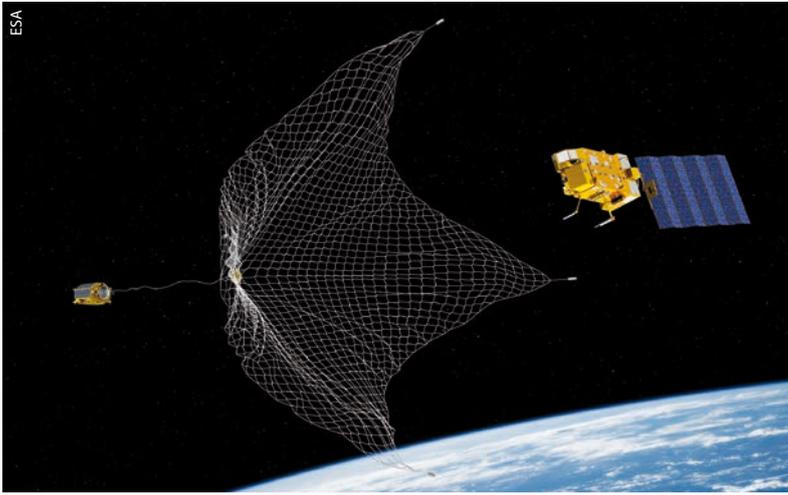


Abb. 7 Die ESA E-Deorbit-Mission soll dazu dienen, Objekte mit Netzen einzufangen.

Die Herausforderung besteht darin, ein Rendezvousmanöver zwischen dem Verfolger und dem Schrott erfolgreich zu kontrollieren und den richtigen Moment des Einfangens zu wählen. Solche Systeme laufen zumindest während der Annäherung weitestgehend robotisch. Gelingt das Einfangen, kann der Verfolgersatellit sich dank seines Antriebs mit dem Schrott in eine niedrigere Umlaufbahn manövrieren. Durch die Restatmosphäre kommen nach einiger Zeit beide zum Absturz und verglühen in der oberen Erdatmosphäre.

Fragmente, die nur wenige Dezimeter groß oder kleiner sind, lassen sich so nicht ökonomisch entfernen. Daher gilt es, Technologien zu erschließen, um mit Lasern von Bodenstationen aus die Orbits von Fragmenten gezielt zu manipulieren. Hierzu gibt es zwei Ansätze: Ähnlich wie die Strahlung der Sonne einen Impuls auf ein Sonnensegel eines Raumschiffs überträgt, kann ein kontinuierlicher Hochleistungslaser den Orbit eines Schrottteilchens mittels Impulsübertrag durch den Strahlungsdruck verändern [9]. Alternativ kann ein gepulster Hochenergielaser Material aus der Oberfläche herauslösen (laserinduzierte Ablation) und dabei einen Impuls auf das Fragment übertragen. Hierbei sind sehr hohe Energiedichten von rund 10 J/cm^2 nötig [10]. Erst dann entsteht ein Plasma in der Oberfläche, das zur Ablation führt. Zur Bündelung der Laserenergie auf diese weitentfernten, kleinen Objekte sind allerdings große Sendeaperturen von mehr als fünf Meter sowie adaptiv-optische Verfahren zur Turbulenzkompensation nötig.

Die großen Raumfahrtationen haben sich mittlerweile dazu verpflichtet, Weltraumschrott zu vermeiden. Dies spielt daher bei der Planung neuer Missionen eine große Rolle. Entsprechend den Richtlinien des Inter-Agency Space Debris Committee sollen Satelliten und Trägersysteme spätestens 25 Jahre nach ihrem Missionsende kontrolliert in niedrige Orbits abgesenkt werden und in der Atmosphäre verglühen. Angesichts der steigenden Anzahl von Satelliten ist es aber fraglich, ob diese Richtlinien genügen werden.

Zusammenfassung

Unsere Zivilisation ist in vielen Bereichen von satellitenbasierten Technologien abhängig. Damit auch zukünftige Generationen solche Technologien nutzen können, muss der erdnahe Weltraum als Infrastruktur verstanden werden, die es gilt, in internationaler Zusammenarbeit nutzbar zu erhalten. Das Institut für Technische Physik des DLR entwickelt für die nachhaltige Nutzung des Weltraums laserbasierte Methoden zur Neudetektion und genauen Bahnbestimmung von Weltraumschrott und beschäftigt sich mit Konzepten, um diesen Schrott zu reduzieren. Der Aufbau eines Netzwerkes von laserbasierten Bodenstationen in Ergänzung zur etablierten Radartechnologie wird in den nächsten Jahren im Zentrum der Forschung und Entwicklung stehen.

Literatur

- [1] D. J. Kessler und B. G. Cour-Palais, *J. Geophys. Res.* **83**, 2637 (1978)
- [2] *Orbital Debris Quarterly News*, Vol. 20, Issue 4, <https://go.nasa.gov/2zXP3qa>
- [3] H. Fielder et al., Proc. of the 7th European Conf. on Space Debris, Darmstadt, Germany (2017)
- [4] D. Burandt et al., Proc. of the 68th IAC, Adelaide (2017)
- [5] C. Wiedemann et al., XXI International Symposium on high power laser systems and applications 2016, SPIE, 10254, UNSP 102541I
- [6] C. Smith, The EOS Space Debris Tracking System, AMOS Conf. Techn. Papers (2006)
- [7] J. Bennett et al., *Adv. in Space Res.* **52**, 1876 (2013)
- [8] S. Riepl et al., Proc. ESA Space Debris Conf., Darmstadt, Germany (2017)
- [9] J. Mason et al., *Adv. in Space Res.* **48**, 1643 (2011)
- [10] S. Scharring et al., *Opt. Eng.* **56**, 011007 (2016)

DIE AUTOREN

Daniel Hampf (FV Teilchenphysik) studierte Physik an der Universität Münster und promovierte an der Universität Hamburg in der Astroteilchenphysik. Seit 2013 arbeitet er am DLR-Institut für Technische Physik.



Leif Humbert studierte Physik an der Universität Hamburg und promovierte an der University of Queensland. Als wissenschaftlicher Mitarbeiter ist er seit 2013 am Institut für Technische Physik des DLR tätig und entwickelt eine transportable Laser-Ranging-Station.

Thomas Dekorsy (FV Quantenoptik und Pho-

tonik, FV Kurzzeitphysik) hat in Aachen Physik studiert und promoviert. Er war Abteilungsleiter am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf und Professor an der Universität Konstanz. Seit 2016 ist er Direktor des Instituts für Technische Physik des DLR und Professor an der U Stuttgart.



Wolfgang Riede (FV Halbleiterphysik) hat an der Uni Stuttgart und der ETH Zürich Physik mit Schwerpunkt Optik und Lasertechnik studiert. Er leitet am Institut für Technische Physik des DLR die Abteilung Aktive Optische Systeme.