

Gefährlicher Orbitalmüll?

von Burkard Steintrücken

Immer wieder macht der Orbitalmüll von sich reden. Ausgebrannte Raketstufen, aufgegebene Satelliten, Werkzeuge und Explosionstrümmer umkreisen unsere Erde und stellen mittlerweile eine Gefahr für die bemannte und unbemannte Raumfahrt dar. Die größten Trümmer sind erfasst, und die Raumfahrt nimmt heute bereits Rücksicht auf deren Bahnen. So musste z. B. das SPACE SHUTTLE bereits einmal ein Ausweichmanöver fliegen, um der drohenden Kollision mit einem Stück Orbitalmüll zu entgehen. Über die kleinen Stückchen liegt nur statistisches Material vor. Wie groß die Gefahr ist, die von Orbitalmüll ausgeht, soll die einfache Risikoabschätzung in diesem Artikel zeigen. Das Problem lässt sich in Anlehnung an die kinetische Gastheorie oder die *Fixed-Target-Experimente* der Kern- und Teilchenphysik als Streuproblem der Orbitalmüllstückchen am „SPACE SHUTTLE-“ oder „MIR-Target“ beschreiben.

Orbitalmüll im Spiegel der Presse

Ausgangspunkt der Beschäftigung mit dem Orbitalmüll in der Schule können Zeitungsartikel sein, die dieses Thema immer wieder aufgreifen. Die Berechnungen dieses Artikels gründen sich auf einen Beitrag im Spiegel, der in der Ausgabe 46/1995 erschienen ist. Der Spiegelbeitrag enthält auch eine Graphik, in der die Anzahl der Orbitalmüllstücke in Abhängigkeit der Höhe ihrer Umlaufbahn über dem Erdboden skizziert ist. Diese Graphik ist in Bild 1 wiedergegeben. Wir können ihr die etwaige Teilchendichte des Orbitalmülls entnehmen. Im Text werden die Gefahren des Orbitalmülls geschildert. Von besonderem Interesse ist für uns die folgende Passage:

„Zwei Drittel des Weltraummülls bewegen sich unterhalb von 2.000 Kilometern Höhe und gefährden dort besonders die Nachrichten übermittelnden Leos (Low Earth Orbit Satellites). Statistiker haben errechnet, dass für den einzelnen Leo-Satelliten in dem am stärksten müllbelasteten Bereich zwischen 800 und 1.000 Kilometer in zehn Betriebsjahren die Wahrscheinlichkeit einer Kollision bei einem Prozent liegt.“ Der Spiegel 46/1995 S. 215

Diese Angabe wollen wir durch eine vereinfachte Rechnung überprüfen. Die Geschwindigkeit der Trümmer lässt sich leicht mit Hilfe des Gravitationsgesetzes berechnen; sonstige geometrische Annahmen wie die Kollisionsfläche eines Satelliten werden abgeschätzt. Die Genauigkeit unserer Rechnung ist dadurch begrenzt. Die richtige Größenordnung sollte sich aber herausstellen.

Modellvorstellungen

Wir fassen einen Satelliten, das SPACE SHUTTLE oder die MIR als „Target“ auf, welches den rasenden Müllteilchen die etwaige Targetfläche $A = 10 \text{ m}^2$ bietet. Die Fläche A stellt den geometrischen Wirkungsquerschnitt für eine Reaktion zwischen Projektil und Target dar. Gesucht ist die mittlere freie Weglänge l des Satelliten durch das „Trümmergas“.

Wir benutzen die gängigen Begriffe der kinetischen Gastheorie, da es sich bei der nicht bekannten Bahn der Trümmer um ein statistisches Problem handelt und wir nur Wahrscheinlichkeitsaussagen erwarten können.

Außerdem lässt sich das ganze Problem als anschauliche Einführung in die Streureaktionen der Kern- und Elementarteilchenphysik auffassen, so daß sich die hier angewandten Begriffe auch auf den Kontext der Mikrophysik übertragen lassen.

Die Formeln zur Berechnung der mittleren freien Weglänge l entnehmen wir einem Lehrbuch:

$$\text{mittlere freie Weglänge } l = \frac{1}{n \cdot \sigma}$$

mit $n = \text{Teilchendichte}$ und $\sigma = \text{geom. Wirkungsquerschnitt}$

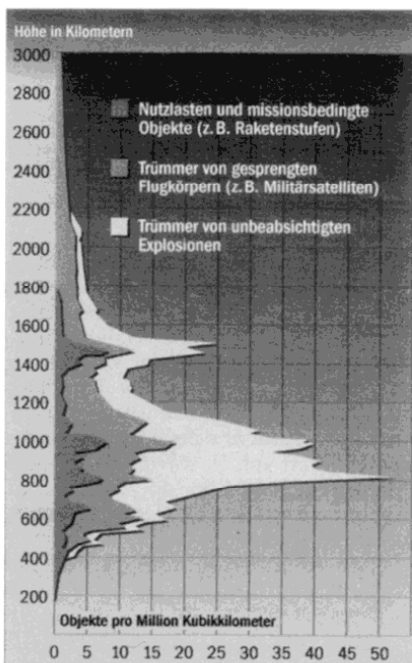
Anschaulich lässt sich dieser Zusammenhang folgendermaßen begründen. Je größer die Auftrefffläche A (bzw. der Wirkungsquerschnitt σ) ist, desto größer ist auch die Rate der auftreffenden Teilchen bzw. desto geringer ist im Mittel die zu erwartende Distanz zwischen zwei Stößen. Die mittlere freie Weglänge ist in unserem Beispiel so zu interpretieren, dass bei gegebenem Teilchendichte n nach Durchlaufen der Strecke l die Wahrscheinlichkeit für eine Kollision in der Größenordnung von 1 liegt. Um die Angabe im Spiegeltext (Kollisionswahrscheinlichkeit für Leos liegt bei 1% in 10 Jahren) auf ihre Plausibilität zu testen, müssen wir berechnen, welcher Bruchteil d der mittleren freien Weglänge l in 10 Jahren durchlaufen wird. Die tatsächlich durchlaufene Strecke d berechnet sich mit der Kollisionsgeschwindigkeit zu $d = v \cdot t$. Für die abgeschätzte Kollisionswahrscheinlichkeit ergibt sich somit folgender einfacher Ausdruck:

Kollisionswahrscheinlichkeit in 10 Betriebsjahren:

$$W = \frac{d}{l} = n \cdot \sigma \cdot v \cdot t \quad \text{mit } n = \text{Teilchendichte,}$$

$\sigma = \text{geom. Wirkungsquerschnitt, } v = \text{Kollisionsgeschwindigkeit, } t = 10 \text{ Jahre} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ s}$

Die Teilchendichte n ist – wie die Spiegel-Graphik zeigt – abhängig von der Höhe h der Müllstücke über dem Erdboden. Für unsere grobe Risikoabschätzung gehen wir (zunächst) vom ungünstigsten Fall der größten Teilchendichte bei einer Höhe von $h = 800 \text{ km}$ aus. Durch Summation der drei in der Graphik aufgeführten Orbitalmüllkomponenten erhalten wir einen etwaigen Wert von $n = 75$ Objekte pro Millionen Kubikkilometer:



DER SPIEGEL 46/1995, Seite 215

aus der Graphik: $n \approx 75/10^6 \text{ km}^3 = 7.5 \cdot 10^{-14} / \text{m}^3$
 Für die mittlere kollisionsfreie Weglänge unseres Satelliten ergibt sich damit:

$$\text{mittlere freie Wellenlänge } l = \frac{1}{n \cdot \sigma}$$

$$= \frac{1}{7.5 \cdot 10^{-14} \cdot 10} \text{ m} \approx 10^{12} \text{ Meter}$$

Die Anzahl der kollisionsfreien Erdumrundungen lässt sich ebenfalls leicht ermitteln, da wir den Orbitalradius ($R = \text{Erdradius} + 800 \text{ km}$) und damit den Orbitalumfang kennen:

Kollisionsfreie Erdumrundungen:

$$Z = \frac{l}{2\pi \cdot (R_{\text{Erde}} + h)} \approx \frac{10^{12} \text{ m}}{2\pi \cdot 7,17 \cdot 10^6 \text{ m}}$$

$$\approx 22.200$$

Die Geschwindigkeit u der Orbitalbewegung des Satelliten bzw. der Müllstücke errechnet sich mit Hilfe des Gravitationsgesetzes. Die Zentripetalkraft eines kreisenden Müllstückes oder Satelliten der Masse m in der Höhe $h = 800 \text{ km}$ über dem Erdboden ist die Gravitationskraft, welche die Erde und der Orbiter aufeinander ausüben:

$$\text{Zentripetalkraft } \frac{m \cdot v^2}{(R_{\text{Erde}} + h)} =$$

$$G \cdot \frac{m \cdot M_{\text{Erde}}}{(R_{\text{Erde}} + h)^2} \Leftrightarrow v = \sqrt{\frac{G \cdot M_{\text{Erde}}}{(R_{\text{Erde}} + h)}}$$

$$\text{mit } G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}, M_{\text{Erde}}$$

$$= 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg}, R_{\text{Erde}} = 6,37 \cdot 10^6 \text{ m} \text{ und } h = 880 \text{ km} \text{ ergibt sich:}$$

$$v \approx 7.500 \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ bzw. } v = 27.000 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Die Wahrscheinlichkeit für eine Kollision in 10 Jahren errechnet sich damit zu:

$$W = n \cdot \sigma \cdot v \cdot t \approx 7,5 \cdot 10^{-14} \text{ m}^{-3} \cdot 7,5 \cdot 10^3 \text{ m/s} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ s} \approx 1,7$$

Wir erhalten eine etwaige Kollisionswahrscheinlichkeit von 170 % in 10 Jahren. Gegenüber der Angabe im Spiegel-Artikel liegen wir um zwei Größenordnungen zu hoch.

Folgende kritische Bemerkungen müssen allerdings noch angebracht werden: Bei der Berechnung der Zeitdauer bis zur (wahrscheinlichen) Kollision wurde angenommen, dass sich der Orbiter mit der Geschwindigkeit v durch das Trümmergas bewegt. Richtig wäre die Relativgeschwindigkeit zwischen Projektil und Target. Diese kann zwischen den Extremwerten 0 und $2v$ liegen. Die Relativgeschwindigkeit ist Null, wenn Target und Projektil in die gleiche Richtung fliegen (es kommt dann niemals zu einer Kollision), sie ist maximal, wenn beide auf Kollisionskurs sind. In Ermangelung genauerer Informationen über die Bahnen der Müllstücke nehmen wir v als vernünftigen Mittelwert für die Relativgeschwindigkeit zwischen Target und Projektil. Die Trümmerstücke bewegen sich auf allen möglichen Bahnen um die Erde. Die Wahl von v als Relativgeschwindigkeit entspräche einem seitlichen Auftreffen des Trümmerstückes auf den Satelliten. Vermutlich ist der überhöhte Wert für die Kollisionswahrscheinlichkeit auf die nicht genau bekannte Dichte der wirklich gefährlichen Müllstücke, die auch in der Lage sind, einen Satelliten schrottreif zu schießen, zurückzuführen. Kleine Partikel – wie etwa Lackfetzen – können mit dem Satelliten kollidieren, ohne ihn in seiner Funktion zu beeinträchtigen. Der Mikrokrater, der auf der Frontscheibe eines Space Shuttle gefunden wurde und von einem winzigen Partikel herrührt, bezeugt dies. Außerdem haben wir mit 10 m^2 eine für einen Satelliten zu große Trefferfläche angenommen. Um der Diskrepanz weiter auf den Grund zu gehen, lesen wir nochmals im Zeitungsartikel nach. Wir finden im Text drei weitere Angaben, aus denen sich die mittleren Teilchendichten der verschiedenen Müllkomponenten berechnen lassen:

1. „Katalogisiert sind derzeit rund 7.500 Erdumkreisende Objekte, darunter etwa 2.000 Satelliten, von denen noch 350 in Betrieb sind. Sie werden von Bodenstationen fortlaufend erfasst.“
 2. „Viel gefährlicher ist der schwer oder gar nicht erfassbare Kleinmüll, zum Beispiel Teile auseinandergebrochener Satelliten, geborstene Raketentufen oder abgesprengte Sicherungsbolzen. Nach Schätzungen von US-Wissenschaftlern schwirren zwischen 40.000 und 150.000 Teile dieser Größenordnung (10 bis 100 Millimeter) um die Erde, die meisten davon sind nicht registriert.“
 3. „Schließlich schwirren in der Umgebung der Erde noch mehr als drei Millionen Kleinteile von weniger als 10 Millimeter Größe umher, darunter Partien sich auflösenden Isolationsmaterials oder Lackfetzen, die sich von einem Raumvehikel gelöst haben.“

Wir können unter der vereinfachenden Annahme, dass diese Müllkomponenten sich gleichverteilt zu zwei Dritteln zwischen Höhen von 200 km und 2.000 km über dem Erdboden aufhalten, deren mittlere Dichten berechnen und mit denen aus der Graphik vergleichen. Dazu berechnen wird zunächst das Volumen der Orbitalmüll-gefüllten Kugelschale:

$$\text{Müllvolumen } V = \frac{4}{3} \pi \left((R_E + 2.000 \text{ km})^3 - (R_E + 200 \text{ km})^3 \right) \approx 1,3 \cdot 10^{21} \text{ m}^3$$

Für die mittleren Dichten der im Text beschriebenen Orbitalmüllkomponenten erhalten wir damit:

Mittlere Dichten der drei beschriebenen Müllkomponenten:

$$n_1 \approx \frac{2/3 \cdot 7.500}{1,3 \cdot 10^{21} \text{ m}^3} \approx 4 \cdot 10^{-18} \text{ m}^{-3}$$

$$n_2 \approx \frac{2/3 \cdot 10^5}{1,3 \cdot 10^{21} \text{ m}^3} \approx 5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^{-3}$$

$$n_3 \approx \frac{2/3 \cdot 3 \cdot 10^6}{1,3 \cdot 10^{21} \text{ m}^3} \approx 2 \cdot 10^{-15} \text{ m}^{-3}$$

Alle Werte liegen unterhalb der aus der Graphik entnommenen maximalen Dichte von $7.5 \cdot 10^{-14} \text{ m}^{-3}$, was zunächst nicht überrascht, da wir ja eine gleichmäßige Verteilung über das ganze Müllvolumen angenommen haben und damit Spitzen in der Verteilung ignorieren. Ein erneuter Blick auf die Graphik zeigt uns, dass der Spitzenwert bei einer Höhe von 800 km etwa eine halbe Größenordnung über dem Durchschnittswert liegt. Bringen wir diese einfache Korrektur noch an, so erhöhen sich die berechneten Dichten ein wenig, erreichen aber trotzdem nicht den Spitzenwert aus der Graphik. Offensichtlich ist die im Text zitierte Wahrscheinlichkeitsangabe mit einer anderen Dichteangabe ermittelt worden. Wiederholen wir die Rechnung nochmals mit der um eine halbe Größenordnung nach oben korrigierten Dichte n_3 und einer verringerten Trefferfläche von ca. 2 m^2 , so erhalten wir für die Kollisionswahrscheinlichkeit in 10 Betriebsjahren:

$$\text{Kollisionswahrscheinlichkeit in 10 Betriebsjahren:}$$

$$W = n \cdot \sigma \cdot v \cdot t \approx 7 \cdot 10^{-15} \text{ m}^{-3} \cdot 2 \text{ m}^2 \cdot 7,5 \cdot 10^3 \text{ m/s} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ s} \approx 0,03$$

Die zweite Berechnung liefert ein Ergebnis von 3%, was im Rahmen der zu erwartenden Genauigkeit (eine Größenordnung) mit der Textangabe im Spiegel übereinstimmt. Die mittlere freie Weglänge erhöht sich entsprechend. Ebenso die Anzahl der kollisionsfreien Umläufe.

Als Fazit lässt sich sagen: Durch die tiefere Beschäftigung mit Presseartikeln und die Anwendung bekannter Formeln lässt sich schnell ein Gefühl für die Aussagekraft der in der Presse publizierten Daten und Schlussfolgerungen gewinnen. Naturgemäß können die vereinfachten Abschätzungen nur die richtige Größenordnung ergeben. Dafür erübrigt sich aber Detailwissen, über das nur Fachleute verfügen (hier z. B. die Bahnen der katalogisierten Müllstücke). Allgemein bekannte Lehrbuchformeln (hier die mittlere freie Weglänge aus der kinetischen Gastheorie oder das Gravitationsgesetz) lassen sich bei diesem aktuellen Thema anwenden und ermöglichen eine fundierte Behandlung des Orbitalmüllrisikos auf elementarem Niveau.

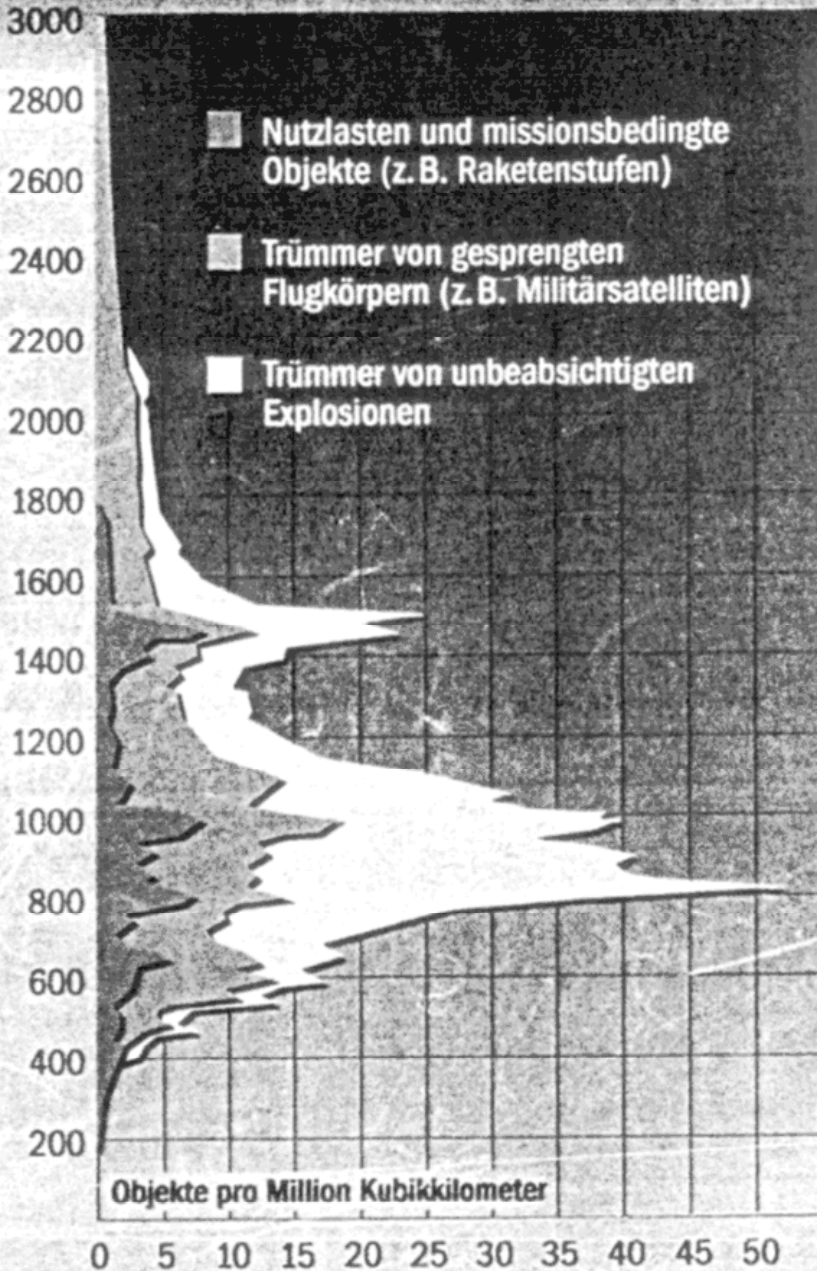
Anschrift des Autors:

Dr. Burkhard Steinrücken, Universität Dortmund, FB Physik, Lehrstuhl für Didaktik der Physik, 44421 Dortmund

Schrott im All

Verteilung von Raketen- und Satellitentrümmern im erdnahen Weltraum

Höhe in Kilometern



Streuung nach der Explosion

November 1986

Die dritte Stufe der „Ariane“-Rakete explodiert unerwartet und streut 465 Wrackteile in die Umlaufbahn.



April 1987

Der Kurs der Wrackteile variiert, die Trümmer kreisen auf verschiedenen Umlaufbahnen um die Erde.



April 1988

Ein dichtes Netz von Trümmerbahnen umschließt die Erde.

