

Solar Sail – Raumfahrt mit Sonnensegeln

In Bezug auf den Beitrag „Die erste Reise zu den Sternen“ von Gabriel Popkin in der Zeitschrift »Sterne und Weltraum« 4/2018, Rubrik „Welt der Wissenschaft: Interstellare Raumfahrt“, S. 26, Oberstufe, WIS-ID: 1377460

Dr. Axel Tiemann

(tiemann-axel@t-online.de)

Der Begriff „Sonnensegel“ im Sinne der Raumfahrt (engl.: SSP - solar sail propulsion) entstand Ende der 50er Jahre des letzten Jahrhunderts, obwohl die Idee dahinter schon älter ist. Die Photonen des Sonnenlichts sollen durch Reflexion an der Segelfläche den Vortrieb einer mitgeführten Sonde erzeugen. Ein großer Vorteil ist, dass man auf mitzuführende Treibstoffe verzichten kann. Praktische Versuche dazu sind bereits in Russland, Japan, den Vereinigten Staaten und von der ESA durchgeführt worden. Die letzten Missionen waren *Ikaros* (Japan 2010) und *NanoSail D2* (USA 2011). Das für Januar 2015 geplante Projekt *sunjammer* wurde allerdings von der NASA gestrichen, weil der Hersteller des Segels die Vertragsbedingungen nicht einhalten konnte. Eine technische Herausforderung liegt offenbar darin, geeignete Materialien für die Segelfläche zu finden. Auch ist es schwierig das Segel nach dem Transport durch die Erdatmosphäre im Weltraum zu entfalten. DLR und ESA versuchen mit dem Projekt *Gossamer*, diese Probleme zu lösen. In drei Stufen soll die Technologie für immer größere Segel erprobt werden.

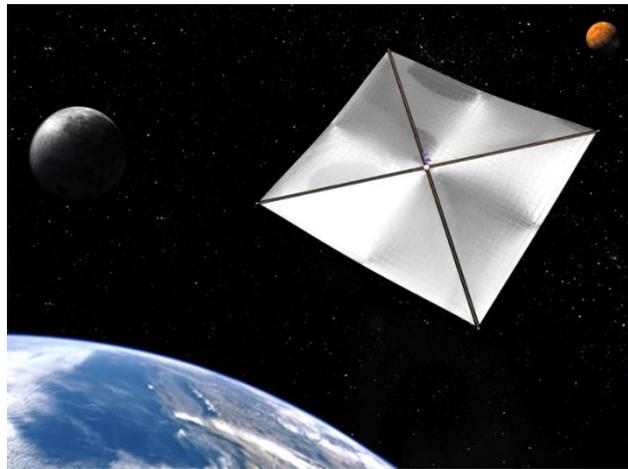


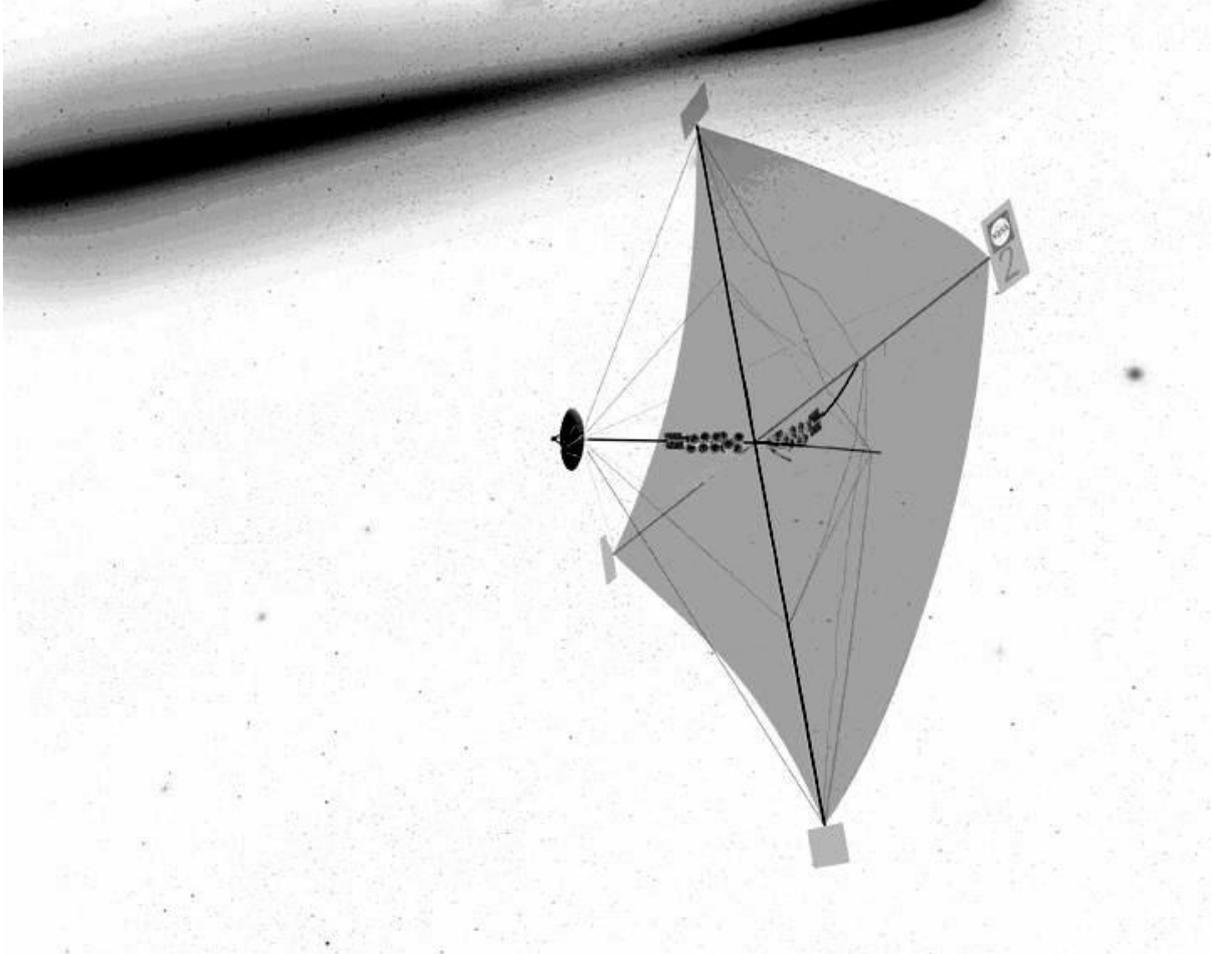
Abbildung 1: Computergrafik eines quadratischen Sonnensegels. © NASA

Mit Sonnenlicht lassen sich in Erdnähe nur geringe Beschleunigungen erreichen. Wissenschaftler und private Investoren gehen daher noch einen Schritt weiter. Die Initiative *Breakthrough Starshot* plant schon Missionen in andere Sonnensysteme. Eine Batterie kohärent strahlender Hochleistungslaser soll eine winzige Sonde mit Segelfläche mit $0,2c$ aus unserem Sonnensystem katapultieren. Ziel ist zunächst das Sternensystem Alpha Centauri (hierarchisches Dreifachsternsystem, bestehend aus den Sternen Alpha Centauri A, Alpha Centauri B und Proxima Centauri) mit seinem erdähnlichen Planeten Proxima Centauri b. Von dort soll die Sonde Informationen über die Bewohnbarkeit und eventuelles Leben zur Erde funken. Die technischen Herausforderungen sind enorm und noch klingt das Ganze eher, wie Science-Fiction. Doch die beteiligten Wissenschaftler sind optimistisch und können auf eine stattliche finanzielle Unterstützung zugreifen. Man darf also gespannt sein!

Der folgende WIS-Beitrag stellt eine Reihe von Aufgaben für die Schule zum Thema ‚Raumfahrt mit Sonnensegeln‘ vor.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Raumfahrt	Missionen ohne Treibstoff, Interstellare Raumflüge, Sonnensegel
Physik	Mechanik Quantenphysik	Geschwindigkeit, Beschleunigung, Newtons Grundgesetz $F = m \cdot a$, Strahlungsenergie, Leistung, Lichtquanten, Photonenimpuls
Fächer- verknüpfung	Astro-Ma, Astro-Ch, Astro-En	Berechnungen, Materialeigenschaften, englischsprachige Originalliteratur lesen
Lehre allgemein	Kompetenzen (Wissen und Erkenntnis), Unterrichtsmittel	Fachwissen Physik und Mathematik, Interpretation von Anwendungsbezügen, Entwickeln von Lösungsstrategien, Übersetzung von Originalartikeln in englischer Sprache, Arbeitsblatt

Arbeitsblatt “Solar Sail”



Explanation:

Nearly 400 years ago astronomer Johannes Kepler observed comet tails blown by a solar breeze and suggested that vessels might likewise navigate through space using appropriately fashioned sails. It is now widely recognized that sunlight does indeed produce a force which moves comet tails and a large, reflective sail could be a practical means of propelling a spacecraft. In fact, the illustration above represents one concept explored by NASA centers to develop an interstellar probe pushed along by sunlight reflected from an ultrathin sail. Nearly half a kilometer wide, the delicate solar sail would be unfurled in space. Continuous pressure from sunlight would ultimately accelerate the craft to speeds about five times higher than possible with conventional rockets -- without requiring any fuel! If launched in 2010 such a probe could overtake Voyager 1, the most distant spacecraft bound for interstellar space, in 2018 going as far in eight years as the Voyager will have journeyed in 41 years.

Aufgaben

- 1) Fassen Sie den Artikel „Solar Sail“ in deutscher Sprache kurz zusammen!
- 2) Die Strahlungsleistung der Sonne beträgt in Erdnähe 1367 W/m^2 (Solarkonstante). Geben Sie die Strahlungsenergie an, die pro Sekunde auf ein m^2 Segel trifft!
- 3) Die mittlere Wellenlänge eines Photons dieser Strahlung beträgt 600 nm . Wie viele Photonen treffen pro Sekunde auf ein mm^2 Segel?

Aluminium beschichtetes Mylar ist ein bei höchster Festigkeit ultraleichtes Sonnensegelmateriale, das aktuell hergestellt werden kann. Mit den Nutzlasten kommt man damit auf eine Flächenbelegung von ca. 30 g/m^2 . Für Gossamer-3 ist ein quadratisches Segel mit 50 Metern Seitenlänge geplant. Bei 100% Reflexion von 1367 W/m^2 würde der Strahlungsdruck $9,12 \cdot 10^{-6} \text{ N/m}^2$ betragen.

- 4) Bestimmen Sie die Masse der kompletten Gossamer-3 Sonde, wenn nachträglich noch $8,4 \text{ kg}$ Nutzlast dazukommen sollen!
- 5) Wie groß ist die Beschleunigung der Sonde?
- 6) Welche Strecke hat sie nach 1 Tag (1 Monat = 30 Tage) zurückgelegt? Geben Sie auch die jeweils erreichten Geschwindigkeiten an! Nehmen Sie dabei an, dass der Strahlungsdruck konstant bleibt; machen Sie sich aber klar, dass diese Annahme unrealistisch ist!
- 7) Erst im Jahre 2287 wird der Mars der Erde wieder sehr nahe kommen, der Abstand beträgt dann 55,69 Millionen Kilometer. Wie lange würde die Sonde für diese Entfernung benötigen? Machen Sie sich hier klar, dass die Annahme einer statischen Entfernung unrealistisch ist!
- 8) Bestätigen Sie die Angabe des Strahlungsdruckes mit Hilfe des Photonenimpulses! Beachten Sie dabei, dass der Impulsübertrag doppelt gerechnet werden muss (Warum?)!
- 9) Das System Alpha Centauri ist ca. 4,22 Lichtjahre von der Erde entfernt. Bestimmen Sie, nach welcher Zeit man die ersten Funksignale auf der Erde erwarten kann, wenn eine Sonde mit $0,2c$ dorthin gestartet wird!

Hinweise zum Einsatz im Unterricht:

Der Artikel und das Arbeitsblatt sollen an die Schüler ausgegeben werden.

Weiterführende Links mit Animationen und Hintergrundinformation:

<http://www.faz.net/aktuell/wissen/sonnenstuerme-nasa-setzt-die-sonnensegel-12632182.html>

http://www.nasa.gov/mission_pages/tdm/solarsail/solarsail_overview.html

<https://www.youtube.com/watch?v=BVgeTGm2YqM>

<https://www.youtube.com/watch?v=hACvoOdjNoY>

https://www.youtube.com/watch?v=bI_FH_2Cqr8

<http://futuristicnews.com/will-starshots-insterstellar-journey-succeed/>

<https://www.youtube.com/watch?v=xRFXV4Z6x8s>

Weitere WIS-Materialien zur Astronomie und allen ihren Bezügen finden Sie unter der Adresse www.wissenschaft-schulen.de (Fachgebiet Astronomie).

Wir würden uns freuen, wenn Sie zum vorliegenden Beitrag Hinweise, Kritiken und Bewertungen an die Kontaktadresse des Autors senden könnten.

Lösungen der Berechnungsaufgaben:

2) pro Sekunde: $W = \frac{P}{A} \cdot A \cdot t = 1367 \text{ W/m}^2 \cdot 1 \text{ m}^2 \cdot 1 \text{ s} = 1367 \text{ Ws} = 1367 \text{ J}$

3) Energie eines Photons: $E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \approx \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{6 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 3,31 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Strahlungsenergie auf 1 mm²: $1,367 \cdot 10^{-3} \text{ J}$, Anzahl $n = \frac{1,367 \cdot 10^{-3} \text{ J}}{3,31 \cdot 10^{-19} \text{ J}} \approx 4,13 \cdot 10^{15}$ Photonen pro s

4) $m = 2500 \text{ m}^2 \cdot 0,03 \text{ kg/m}^2 + 8,4 \text{ kg} = 83,4 \text{ kg}$

5) $F = 9,12 \cdot 10^{-6} \text{ N/m}^2 \cdot 2500 \text{ m}^2 = 22,8 \text{ mN}$ $a = \frac{F}{m} = \frac{22,8 \cdot 10^{-3} \text{ N}}{83,4 \text{ kg}} = 2,734 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}^2$

6) $s_d = \frac{a}{2} \cdot t^2 = \frac{2,734 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}^2}{2} \cdot (86400 \text{ s})^2 \approx 1020,46 \text{ km}$ $s_m = 900 \cdot s_d \approx 918414 \text{ km}$

$v_d = a \cdot t = 2,734 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}^2 \cdot 86400 \text{ s} \approx 23,62 \text{ m/s} \approx 85,03 \text{ km/h}$ $v_m = 30 \cdot v_d \approx 2551 \text{ km/h}$

Der Strahlungsdruck ist abhängig von der Entfernung zur Sonne. Zusätzlich gibt es Schwankungen durch die Eruptionen auf der Sonnenoberfläche.

7) $t = \sqrt{\frac{2s}{a}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 5,569 \cdot 10^{10} \text{ m}}{2,734 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}^2}} \approx 2,02 \cdot 10^7 \text{ s} \approx 234 \text{ d}$

Nach 234 Tagen hat sich die Konstellation der Planeten völlig verändert.

8) pro m²: $F = n \cdot \frac{\Delta p}{\Delta t} = 4,13 \cdot 10^{21} \cdot 2 \cdot \frac{h}{\lambda \cdot \Delta t} = 4,13 \cdot 10^{21} \cdot 2 \cdot \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{6 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot 1 \text{ s}} = 9,11 \cdot 10^{-6} \text{ N}$

Wegen der Reflexion muss der Übertrag doppelt gerechnet werden.

9) $5 \cdot 4,22$ (Flugdauer) + $4,22$ (Übertragung) = $25,32$

Also ca. 25 Jahre und 4 Monate – das liegt durchaus innerhalb der aktiven Phase eines Wissenschaftlers.