

Arbeitsblatt 1:

Segeln mithilfe von Licht

Einleitung:

Photonen besitzen einen Impuls, der von der Energie des Lichts abhängt. Wegen

$E_{\text{ph}} = m_{\text{ph}} \cdot c^2$ und $p = m \cdot c$ ergibt sich nämlich $p = \frac{E_{\text{ph}}}{c}$. Dieser Impuls kann auf Körper übertragen werden, sobald diese von Licht getroffen werden.

Die Idee, mithilfe des **Strahlungsdrucks des Sonnenlichts** oder mithilfe gigantischer **Laser-Anlagen** Raumsonden anzutreiben, existiert bereits seit geraumer Zeit. Hauchdünne, hochreflektierende Folien sollen dabei zu riesigen Segelflächen aufgespannt werden, an denen die Photonen abprallen und dabei ihren Impuls auf das Segel übertragen. Dieses Arbeitsblatt wird Sie mit einem konkreten Anwendungsbeispiel vertraut machen.

Aber auch im mikroskopisch Kleinen lässt sich der Impuls von Photonen effektiv nutzen, um kleine Objekte zu bewegen. Diese **optischen Pinzetten**, für deren Erfindung 2018 der Nobelpreis in Physik vergeben wurde, spielen in der medizinisch-biologischen Forschung inzwischen eine große Rolle. Im zweiten Arbeitsblatt geht es daher um die Funktionsweise dieser **Lichtgreifer**, während im dritten Arbeitsblatt typische Anwendungsgebiete dieser Instrumente thematisiert werden.

Mit einem Lichtsegler zu Proxima Centauri b

2016 wurde ein erdähnlicher Exoplanet entdeckt, der unseren Nachbarstern Proxima Centauri innerhalb einer habitablen Zone umkreist. Im Kontext dieser Entdeckung wurde eine äußerst kühne und visionäre Idee publiziert, wie man den 4,2 Lichtjahre entfernten Planeten mit einer Raumsonde innerhalb einer Reisezeit von 20 Jahren erreichen könnte. Zum Antrieb der Raumsonde wurde ein extrem leichtes, aber äußerst stabiles **Lichtsegel** vorgeschlagen. Auch wenn man das Ganze wohl eher als eine utopische Gedankenspielerei einordnen sollte, ist es durchaus interessant, sich die Physik hinter diesem Projekt etwas genauer anzuschauen.

Aufgaben:

1. Informieren Sie sich über das visionäre Projekt, das den Titel „Breakthrough Starshot“ trägt, zum Beispiel unter dem folgenden Link: www.heise.de/newsticker/meldung/Starshot-Interstellare-Mission-mit-vielen-Herausforderungen-4411269.html
2. Im Folgenden sollen Sie untersuchen, wie groß der **Impuls** ist, den die Photonen auf das Segel des Lichtseglers übertragen können.

Wir stellen uns vor, das Lichtsegel treibt mit konstanter Geschwindigkeit von uns weg und hat den Impuls p_s . Es treffen nun Photonen mit dem Gesamtimpuls p_{ph} auf das Segel.

Da dessen Masse extrem viel größer ist als die der Photonen, werden die Lichtteilchen wie an einer Wand reflektiert – behalten also ihren Impulsbetrag bei, ändern aber ihre Richtung. Bei diesem elastischen Stoß wird ein Impuls Δp auf das Segel übertragen.

Um diese Impulserhöhung zu berechnen, verwenden wir den folgenden Ansatz:

$$p_s + p_{ph} = (p_s + \Delta p) - p_{ph}$$

a) Erklären Sie diesen Ansatz. **Tipp:** Erinnern Sie sich an den Impulserhaltungssatz.

b) Leiten Sie her: Der Impulsübertrag der Photonen auf das Sonnensegel beträgt $\Delta p = 2 \cdot p_{ph}$.

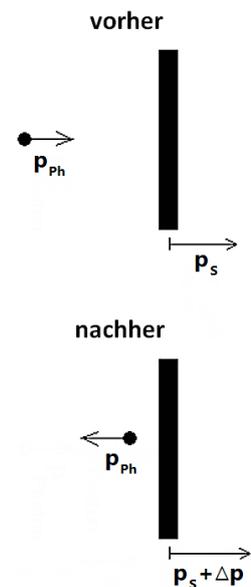
c) Licht der Energie E_{Licht} hat einen Impuls, den wir mit

$$p_{ph} = \frac{E_{\text{Licht}}}{c}$$

Leiten Sie her: Wegen $\Delta p = m \cdot \Delta v$ erhält das Sonnensegel der Masse m_s durch das Auftreffen des Lichts einen Geschwindigkeitszuwachs $\Delta v = \frac{2 \cdot E_{\text{Licht}}}{m_s \cdot c}$.

d) Ein Wald von Laserkanonen soll beim „Starshot-Projekt“ den gewaltigen Lichtdruck auf das Segel der Raumsonde erzeugen. Die vorgeschlagene Lichtleistung von 100 Gigawatt bedeutet, dass pro Sekunde eine Energie von $E = 100 \cdot 10^9 \text{ J}$ ausgestrahlt wird.¹ Berechnen Sie, welcher Geschwindigkeitszuwachs pro Sekunde (Beschleunigung) dadurch erreicht wird, wenn wir von der (ziemlich unrealistischen) Gesamtmasse des Lichtseglers von 1,33 Gramm ausgehen und annehmen, dass alle Photonen das Segel treffen und zu 100 % reflektiert werden.

e) Berechnen Sie den Geschwindigkeitszuwachs innerhalb von 120 Sekunden Bestrahlungszeit. Wie viel Prozent der Lichtgeschwindigkeit hat der Lichtsegler erreicht?



Anmerkung: Wenn Sie richtig gerechnet haben, sollten Sie auf eine Reisegeschwindigkeit von 20 % der Lichtgeschwindigkeit kommen. Dies entspricht dem Wert, der in den Veröffentlichungen zum Starshot-Projekt stets genannt wird. Allerdings wäre dies nur mit einer Gesamtmasse des Systems von 1,33 Gramm zu erreichen, was einigermaßen unrealistisch erscheint – abgesehen von der unglaublich hohen Laserleistung, die bereitgestellt werden müsste. Vom rein physikalischen Standpunkt aus gesehen ist die Idee, den Impuls der Photonen als interstellaren Antrieb zu nutzen, aber durchaus plausibel und entbehrt nicht einer gewissen Faszination.

¹ Dies entspricht in etwa der elektrischen Energie, die fünf Einfamilienhäuser pro Jahr verbrauchen.