















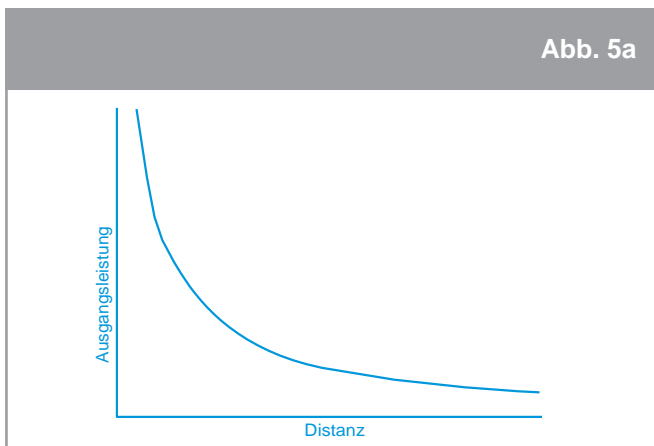
## Ergebnisse

Bei der Analyse der Ergebnisse gehen wir davon aus, dass die von den Solarzellen produzierte Leistung direkt proportional zur Leistung ist, die von der Solarzelle empfangen wird (produzierte Leistung = empfangene Leistung x Wirkungsgrad der Zelle). Die empfangene Leistung ist proportional zur Strahlungsintensität der Lichtquelle (denn Intensität = Leistung / Fläche, und die Fläche bleibt während des gesamten Experiments gleich). Daher können wir sagen, dass die von der Photovoltaikzelle erzeugte Leistung proportional zur Strahlungsintensität ist.

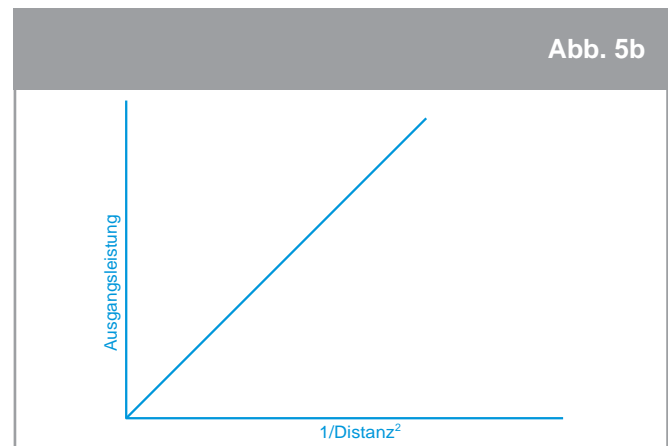
Da das Abstandsgesetz gilt, sollte die vom Solarmodul (P) erzeugte Leistung proportional zum Kehrwert des quadratischen Abstands (r) sein.

$$P \propto \frac{1}{r^2}$$

Um ihre Daten zu analysieren, sollten die SuS die Leistung als Funktion der Distanz (Abb. 5a) und die Leistung als Funktion des Kehrwerts des quadratischen Abstands (Abb. 5b) zeichnen.



↑ Erwarteter Graph für Ausgangsleistung gegen Distanz.



↑ Erwarteter Graph für Ausgangsleistung gegen 1/Distanz².

Die SuS werden das Abstandsgesetz mit dem Versuch wahrscheinlich nicht genau ermitteln können. Unter anderem können die folgende Faktoren die Ergebnisse beeinflussen:

- Die Kiste ist nicht komplett abgedunkelt und Variationen der Strahlungsintensität außerhalb der Kiste beeinflussen deshalb die Messungen.
- Bei der Versuchsdurchführung sind die Messungen des Abstands sehr fehleranfällig.
- Eventuell kommt es zu stärkerer Lichtstreuung innerhalb der Kiste.
- Der Innenwiderstand der Solarzelle kann während des Experiments variieren.
- Die Messungen in direkter Nähe zur Solarzelle folgen nicht dem Abstandsgesetz, da der Ursprung der Lichtquelle nicht genau ermittelt werden kann.

Als Resultat sollten die SuS festhalten, dass wir, wenn wir die Distanz zur Lichtquelle verdoppeln, viermal größere Solarzellen bräuchten um die gleiche Energiemenge zu generieren.



## → Aufgabe 2: Der Einfallswinkel

In dieser Aufgabe werden die SuS lernen, wie wichtig der Einfallswinkel ist und welche Vorteile deshalb die optimale Ausrichtung von Solarzellen hat. Während eines Experiments werden sie messen, wie der Einfallswinkel die Ausgangsleistung beeinflusst.

### Materialien

- Ausgedruckte Arbeitsblätter und Anhang 1 für jede Gruppe
- Versuchsaufbau von Aufgabe 1 (siehe Anhang 2)
- Stab um die Solarzelle rotieren zu können (z.B. ein Schaschlikspieß aus Holz)
- Winkelmesser (Geodreieck)

### Übung

Diese Übung sollten die SuS wieder in 3er- bis 4er-Gruppen bearbeiten. Verteilen Sie die Arbeitsblätter und den Anhang 2 an die Gruppen.

Bevor die SuS mit den Übungen beginnen, sollten Sie sie mit dem Thema des Einfallswinkels vertraut machen.

### Versuchsaufbau

Aufgabe 2 baut auf Aufgabe 1 auf. Die SuS müssen den Versuchsaufbau anpassen, sodass sie die Solarzelle kippen können und sie in einem bestimmten Winkel steht. Sie sollten den Versuchsaufbau aus Aufgabe 1 adaptieren, indem sie den Schritten 1 bis 7 in Anhang 2<sup>1</sup> folgen. Bevor die SuS mit den Messungen beginnen, sollten sie kontrollieren, ob der Aufbau korrekt ist und alles funktioniert.

### Experiment

Die SuS sollten die Messungen so durchführen, wie es in Schritt 8 bis 10 beschrieben ist und sie in Tabelle 2 auf ihren Arbeitsblättern festhalten. Die SuS sollten die Messungen zweimal wiederholen, wobei darauf zu achten ist, dass die Versuchsbedingungen gleichbleiben müssen und dann den Mittelwert der Ausgangsleistung für die einzelnen Einfallswinkel berechnen.

---

<sup>1</sup>Falls die SuS Aufgabe 1 nicht durchgeführt haben, sollten sie den Schritten 1 bis 7 aus Anhang 1 folgen, um den Versuch aufzubauen. Schritt 5 kann dabei übersprungen werden. Danach kann der Anleitung in Anhang 2 gefolgt werden.

## Ergebnisse

Bitte Sie die SuS, die mittlere Leistung in Abhängigkeit vom Einfallswinkel darzustellen.

Die SuS sollten aus ihren Daten entnehmen, dass die Leistung dann am größten ist, wenn das Solarmodul senkrecht zu den Lichtstrahlen steht (Einfallswinkel =  $0^\circ$ ). Obwohl der erwartete Messwert, wenn die Solarzelle parallel zur Lichtquelle steht (Einfallswinkel =  $90^\circ$ ), im Prinzip Null sein sollte, ist dies, hauptsächlich aufgrund der Lichtstreuung im Inneren der Box, wahrscheinlich nicht der Fall.

Auch bei ausgeschalteter Lichtlampe kann ein messbarer Fehlerstrom im Stromkreis (Dunkelstrom) vorhanden sein. Bei wissenschaftlichen Experimenten, die Präzisionsmessungen erfordern, sollten die Werte korrigiert werden, indem dieser Fehler von den Messwerten abgezogen wird.

Wenn die SuS ihre Solarzellen so neigen, dass sie einen Einfallswinkel von  $-30^\circ$ ,  $-60^\circ$  und  $-90^\circ$  haben, sollten sie ähnliche Werte erhalten, da das System symmetrisch ist. Experimentell hängt dies davon ab, wie gut das System ausgerichtet ist.

Einige der Fehlerquellen wurden bereits in Aufgabe 1 erwähnt. In dieser Aufgabe müssen wir auch Ungenauigkeiten bei der Messung des Winkels und bei der Ausrichtung des Solarmoduls im Kasten als mögliche Fehlerquellen berücksichtigen.

Abschließend sollten die SuS die Frage 9 des Arbeitsblattes beantworten und feststellen, dass der Einfallswinkel zur Maximierung der Leistung des Solarmoduls nahe  $0^\circ$  liegen sollte. Sie könnten einen Sonnenverfolgungsmechanismus mit Solarmodulen vorschlagen, sodass sich die Module entsprechend der scheinbaren Bewegung der Sonne drehen und neigen.

In diesen Experimenten ist die Erwärmung vernachlässigbar, da die Gesamtenergie der Glühbirne nur wenige Watt beträgt. Bei sonnennahen Raumfahrzeugen wie BepiColombo gibt es eine enorme Erwärmung, die einen großen Einfluss auf die Gestaltung der Mission hat. Ein weiterer zu berücksichtigender Aspekt ist, dass Solarmodule auf der Erde mit Luft gekühlt werden können, dies aber im Vakuum des Weltraums nicht möglich ist.

## → Aufgabe 3: Mit Solarenergie das Weltall erkunden

In dieser Aufgabe üben die SuS das Abstandsgesetz anhand von echten ESA Weltallmissionen zu nutzen. Die SuS werden erfahren, wie sich die Eigenschaften des Abstandsgesetzes darauf auswirken, wie groß die Solarmodule sein müssen und wie wichtig der Einfallswinkel für Missionen in der Nähe der Sonne ist.

### Ergebnisse

1. Die Strahlungsintensität, die bei der mittleren Entfernung der Erde zur Sonne empfangen wird ( $I_{Erde}$ ) kann mit dem Abstandsgesetz und den Werten auf dem Arbeitsblatt berechnet werden:

$$I_{Erde} = \frac{3,828 * 10^{26} W}{4\pi(1,5 * 10^{11} m)^2} = 1.354 \frac{W}{m^2}$$

2. Bei einer Distanz von 45 Millionen km zur Sonne wird die Strahlungsintensität wie folgt berechnet:

$$I_{BepiColombo} = \frac{3,828 * 10^{26} W}{4\pi(4,5 * 10^{10} m)^2} = 15.043 \frac{W}{m^2}$$

$$I_{BepiColombo} = 11 I_{Erde}$$

Bei diesem Abstand zur Sonne ist die Strahlungsintensität elfmal höher als auf der Erde. Die Hitzeschäden, die an den Solarzellen entstehen würden, wären extrem groß, weshalb diese permanent von der Sonne abgewandt sein müssen. Das bedeutet auch, dass die reale Oberfläche der Solarzellen mit 42m<sup>2</sup> viel größer ist als wenn diese direkt zur Sonne zeigen könnten.

3. Die ESA-Raumsonde Rosetta folgte einer Flugbahn, die sie 800 Millionen km von der Sonne entfernte. Bei diesem Abstand zu Sonne berechnet sich die Strahlungsintensität wie folgt:

$$I_{Rosetta} = \frac{3,828 * 10^{26} W}{4\pi(8 * 10^{11} m)^2} = 47,6 \frac{W}{m^2}$$

Im Vergleich zu  $I_{Erde}$ :

$$I_{Rosetta} = 0,035 I_{Erde}$$

Die Strahlungsintensität in einer Entfernung von 800 Millionen km zur Sonne beträgt ungefähr 3,5% der Strahlungsintensität wie beim Abstand der Erde zur Sonne.

4. Obwohl die Stromversorgung durch extrem leistungsstarke Solarzellen erfolgte, variierte die Effizienz von Rosettas Solarzellen zwischen 18% und 26%. In Kombination mit der geringen Strahlungsintensität an dem von der Sonne am weitesten entfernten Punkt in der Umlaufbahn, mussten Rosettas Solarzellen mit 64 m<sup>2</sup> eine sehr große Oberfläche aufweisen.

Nehmen wir an, die einzige Variable wäre die Strahlungsintensität. Wenn Rosetta eine Umlaufbahn in der gleichen Entfernung wie die Erde gehabt hätte, wäre die Fläche der Solarzellen nur:

$$A_{Erde} = 0,035 * 64 m^2 = 2,24 m^2$$

5. Unter Berücksichtigung des Abstandsgesetzes beträgt die Strahlungsintensität beim Saturn:

$$I_{Saturn} = \frac{3,828 * 10^{26} W}{4\pi(1,4 * 10^{12} m)^2} = 15,5 \frac{W}{m^2}$$

Ähnlich wie die Berechnung für den Abstand zur Erde:  $I_{Rosetta} = 3,1 I_{Saturn}$

Das bedeutet, die Solarzellen müssten bei einer Distanz von 1,4 Milliarden km zur Sonne 3,1-mal größer sein als bei einem Abstand von 800 Millionen km:

$$A_{Saturn} = 3,1 * 64 m^2 = 198,4 m^2$$

6. Cassini-Huygens' Energiebedarf war 2,2-mal so groß wie der von Rosetta (885 W /395 W = 2,2), deshalb wurde bei dieser Mission eine Atomenergiequelle, die man Radioisotopengenerator nennt, verwendet. Wenn stattdessen Solarmodule verwendet worden wären, hätte die Fläche der Solarzellen 2,2-mal so groß sein müssen wie die in Frage 4 errechnete Fläche.

$$A_{\text{Cassini-Huygens}} = 2,2 * 198,4 \text{ m}^2 = 436,5 \text{ m}^2$$

7. Die Solarzellen haben pro Quadratmeter eine Masse von:

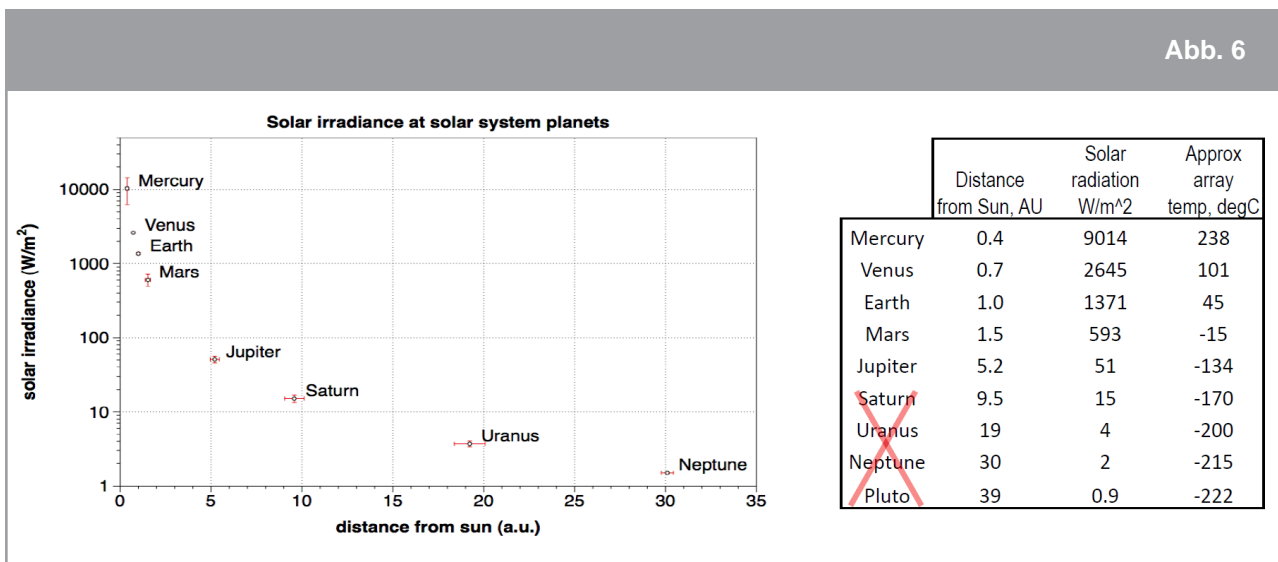
$$\frac{51,2 \text{ kg}}{64 \text{ m}^2} = 0,8 \text{ kg m}^{-2}$$

Die Gesamtmasse der Solarzellen, die für die Cassini-Mission benötigt worden wären, beträgt ungefähr:

$$0,8 \text{ kg m}^{-2} * 436,5 \text{ m}^2 = 349,2 \text{ kg}$$

Der Radioisotopengenerator wog 56,4 kg. Die Verwendung von Solarzellen würde also eine Gewichtszunahme von 292,8 kg bedeuten.

8. Sonnenenergie ist sehr wichtig, weil es sich bei ihr um eine erneuerbare Energiequelle handelt und weil sie nicht zeitgleich mit den Raumfahrzeugen gestartet werden muss. Aufgrund des Abstandsgesetz nimmt die Strahlungsintensität mit zunehmender Entfernung von der Sonne stark ab (siehe Abbildung 6). Das bedeutet, dass größere Solaranlagen benötigt werden, um den erforderlichen Energiebedarf an Bord bei weiten Entfernungen zur Sonne zu decken und dass es in Entfernungen über den Jupiter hinaus effektiv zu dunkel ist, um Sonnenenergie zu nutzen.



↑ Bestrahlungsstärke (Strahlungsintensität) bei verschiedenen Planeten unseres Sonnensystems.

Wie in Frage 6 berechnet, hätte Cassini-Huygens unter Verwendung von Solarzellen eine Gesamtmasse, die mehr als das Sechsfache der Masse des Radioisotopengenerators beträgt! Eine möglichst geringe Masse von Raumfähren ist für die Weltraumforschung extrem wichtig, denn für jedes weitere Kilogramm Gewicht wird mehr Kraftstoff benötigt, um der Erdanziehungskraft zu entkommen. Sicherheitseinschränkungen, die insbesondere mit der Kernenergie verbunden sind, müssen jedoch berücksichtigt werden.

## → Links

### ESA Ressourcen

Moon Camp Challenge

<https://ars.electronica.art/esero/de/projects/moon-camp-challenge/>

Mond-Animationen über die Monderforschung

[esa.int/Education/Moon\\_Camp/Making\\_a\\_Home\\_on\\_the\\_Moon](https://esa.int/Education/Moon_Camp/Making_a_Home_on_the_Moon)

ESA Unterrichtsmaterialien:

[esa.int/Education/Classroom\\_resources](https://esa.int/Education/Classroom_resources)

### ESA Raumfahrtprojekte

ESA Rosetta Mission

[esa.int/rosetta](https://esa.int/rosetta)

ESA/JAXA BepiColombo Mission

[esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/BepiColombo\\_overview2](https://esa.int/Our_Activities/Space_Science/BepiColombo_overview2)

Cassini-Huygens Mission

[esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/Cassini-Huygens](https://esa.int/Our_Activities/Space_Science/Cassini-Huygens)

### Technische Informationen zu den einzelnen Fragen und Übungen

Informationen bezüglich der Masse der Solarzellen bei Rosetta (Seite 10)

[lpi.usra.edu/opag/nov\\_2007\\_meeting/presentations/solar\\_power.pdf](https://lpi.usra.edu/opag/nov_2007_meeting/presentations/solar_power.pdf)

Erzeugte Leistung (5.25 AU) bei Rosetta (395 W, 64 m<sup>2</sup>)

[esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/Rosetta/The\\_Rosetta\\_orbiter](https://esa.int/Our_Activities/Space_Science/Rosetta/The_Rosetta_orbiter)

Technische Daten für das Raumfahrzeug Cassini

[fas.org/nuke/space/bennett0706.pdf](https://fas.org/nuke/space/bennett0706.pdf)

Informationen über die Masse von Solarzellen

[lpi.usra.edu/opag/nov\\_2007\\_meeting/presentations/solar\\_power.pdf](https://lpi.usra.edu/opag/nov_2007_meeting/presentations/solar_power.pdf)

Einsatz von Solarflügeln bei BepiColombo

<https://www.youtube.com/watch?v=Lhw4aojbkvs>