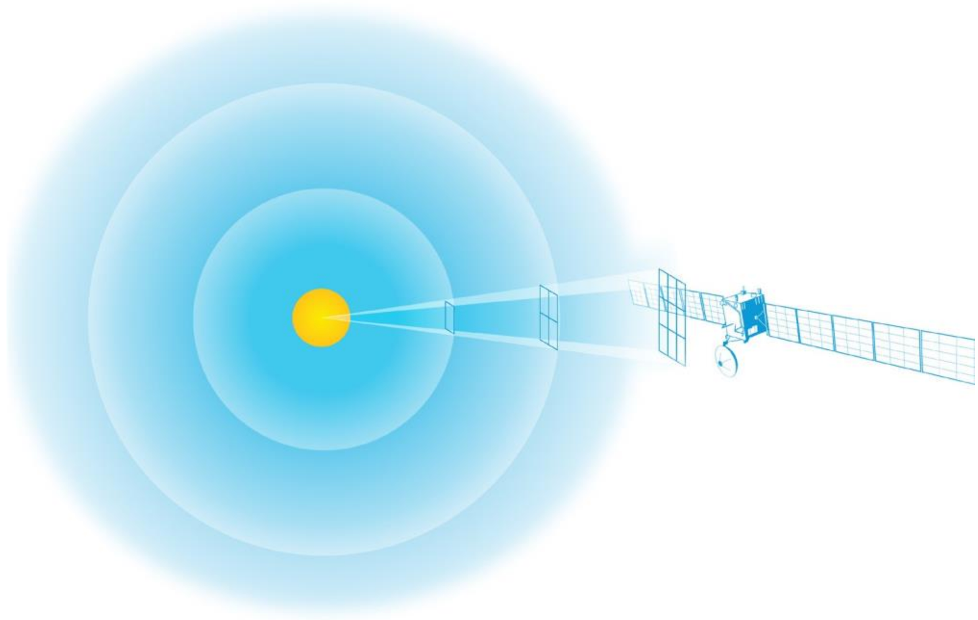
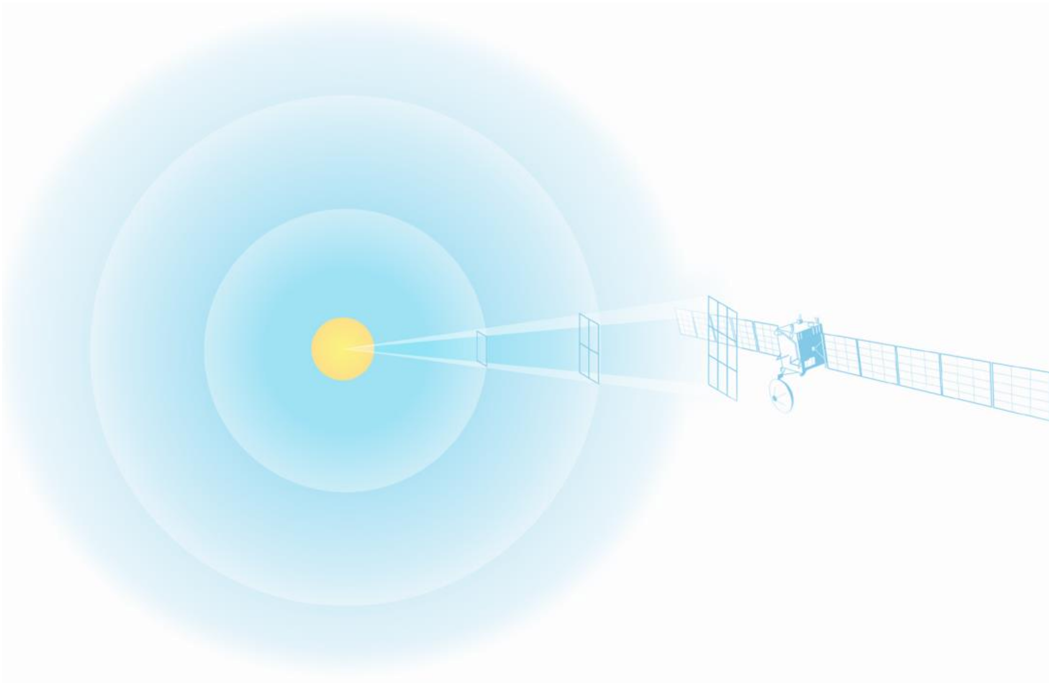
Lehren mit dem All

→ Strom aus Sonnenlicht

Mit Solarenergie das Weltall erkunden





Lehren mit dem All – Strom aus Sonnenlicht | P09
www.esa.int/education

Das ESA Education Office freut sich über Feedback und Kommentare
teachers@esa.int

Eine ESA Education Produktion

Copyright 2018 © European Space Agency

Eine Übersetzung von ESERO Germany

→ STROM AUS SONNENLICHT

Mit Solarenergie das Weltall erkunden

Kurzinformationen

Unterrichtsfach: Physik
Alter: 14-18 Jahre
Typ: Schüleraktivität
Schwierigkeit: Mittel
Kosten: gering
Vorbereitungszeit: 1 Stunde
Benötigte Zeit: 1,5 Stunden (plus 20 Min. für den Versuchsaufbau)
Ort: Klassenraum
Besonderes Equipment: Solarzellen
Stichworte: Physik, Solarenergie, Abstandsgesetz, Strahlungsintensität, Einfallswinkel, Solarsysteme

Überblick

In dieser Aufgabenreihe lernen die Schülerinnen und Schüler (SuS) zwei physikalisch Gesetze kennen, die das Design von Solarmodulen für Raumfahrtmissionen beeinflussen: das Abstandsgesetz (auch reziprokes Quadratgesetz oder quadratisches Entfernungsgesetz) und den Einfallswinkel. Die SuS führen zwei einfache Untersuchungen mit einer Photovoltaikzelle (Solarzelle) und einer Lichtquelle durch. Zuerst messen sie, wie sich die von den Solarzellen erzeugte Leistung mit der Entfernung von der Lichtquelle ändert und versuchen, das Abstandsgesetz für die Strahlungsintensität experimentell zu ermitteln. Die SuS führen dann ein zweites Experiment durch, um die Abhängigkeit der Leistung der Solarzelle vom Einfallswinkel zu untersuchen. Schließlich werden sie diese Konzepte auf echte ESA-Raumfahrtmissionen anwenden.

Lernziele

- Verstehen, was Strahlungsintensität ist und lernen sie zu berechnen.
- Die Bedeutung des Einfallswinkels verstehen.
- Die Funktionsweise von Solarzellen kennenlernen.
- Eigenen Experimente durchführen, um das Abstandsgesetz und die Bedeutung des Einfallswinkels zu untersuchen.
- Daten analysieren und grafisch darstellen.
- Einfache Stromkreisläufe mit Solarzellen gestalten und bauen.
- Sich mit der elektrischen Spannung, dem Strom, der Leistung und der Strahlungsintensität vertraut machen.
- Anforderungen an Solarenergie bei Weltallmissionen untersuchen.

→ Zusammenfassung der Aufgaben

Zusammenfassung der Aufgaben					
	Titel	**Beschreibung**	**Ergebnis**	**Voraussetzungen**	**Zeit**
1	Das Abstands-gesetz	Das Abstandsgesetz mit eigenen Experimenten untersuchen.	Verstehen, wie das Abstandsge-setz funktioniert und wie es die elektrische Leistung von Solarzellen beeinflusst.	Keine	20 Minuten für den Versuchs aufbau 30 Minuten für die Aktivität
2	Der Einfalls-winkel	Den Einfallswinkel mit eigenen Experimenten untersuchen.	Verstehen, was der Einfalls-winkel ist und wie er die elektrische Leistung einer Solarzelle beeinflusst.	Das erfolgreiche Beenden der Aufgabe 1 wird empfohlen.	30 Minuten
3	Mit Solar-energie das Weltall erkunden	Anwenden des Abstandsgesetzes bei echten ESA Weltraummissionen.	Vor- und Nachteile von Solarenergie bei der Erforschung des Weltalls verstehen.	Das erfolgreiche Beenden der Aufgabe 1 wird empfohlen.	30 Minuten

→ Einleitung

Solarenergie wird oft für Raumfahrtmissionen genutzt, da sie die einzige Energiequelle ist, die nicht mit dem Raumschiff gestartet werden muss und das Raumschiff mehrere Jahre lang mit Strom versorgen kann. Bei der Bearbeitung dieses Unterrichtsmaterials werden die SuS zwei wichtige Faktoren untersuchen, die bei der Entwicklung von Solarmodulen für Raumfahrtmissionen berücksichtigt werden müssen: das Abstandsgesetz und den Einfallswinkel.

Abstandsgesetz

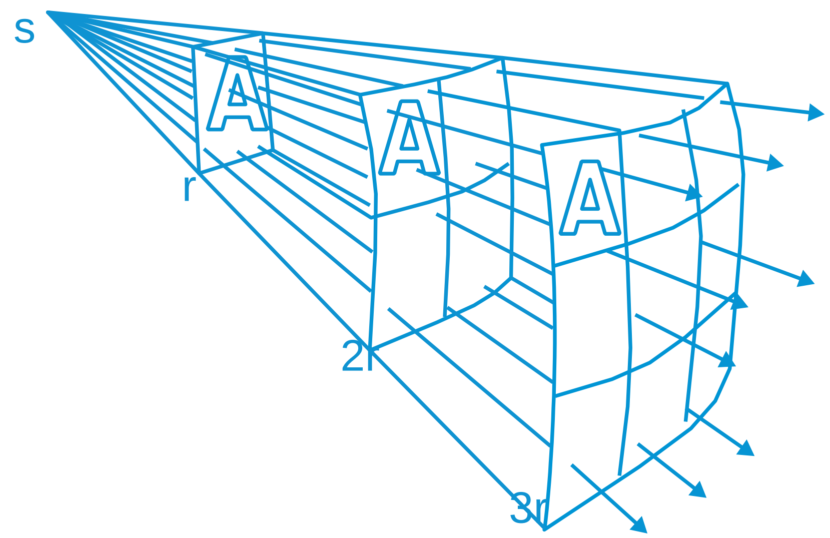
Das Abstandsgesetz besagt, dass der Wert einer physikalischen Größe umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung von der Quelle dieser physikalischen Größe ist. Eines der bekanntesten Beispiele dafür ist das Abstandsgesetz des Lichts; der von einer Lichtquelle empfangene Fluss ist umgekehrt proportional zum quadratischen Abstand von der Lichtquelle. Beim Licht ist der Fluss die Menge der Leistung, die durch eine bestimmte Fläche abgestrahlt wird. Bei einer kugelförmigen Lichtquelle wie der Sonne ist der Fluss gleich der **Strahlungsintensität (I)**. Die Sonne strahlt Licht gleichmäßig in alle Richtungen aus, so dass die Strahlungsintensität dem Abstandsgesetz mit Distanz zur Sonne folgt. Das Abstandsgesetz für diesen Fall ist in der folgenden Gleichung zusammengefasst:

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

I = Strahlungsintensität der Sonne
r = Abstand zur Sonne

Das bedeutet, dass, wenn ein Planet zweimal so weit von der Sonne entfernt ist wie die Erde, die dort gemessene Strahlungsintensität der Sonne nur ein Viertel von der auf der Erde gemessenen betragen wird (Abb. 1).

Abb. 1



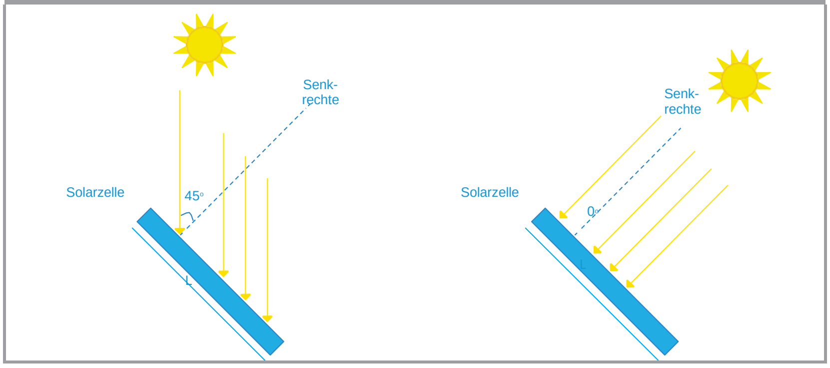
↑ Die Sonne (Punkt S) emittiert Licht gleichmäßig in alle Richtungen. Bei einem Abstand r passiert das Licht eine Fläche A, wenn sich der Abstand verdoppelt (2r) vervierfacht sich die Fläche (4A) und wenn sich der Abstand verdreifacht, ist die Fläche gleich 9A.

Das Abstandsgesetz zu verstehen ist wichtig, da es große Auswirkungen auf Raumfahrtmissionen hat, die durch Solarmodule angetrieben werden. Je weiter ein solarbetriebenes Raumfahrzeug von der Sonne entfernt ist, desto größer muss die Fläche seiner Solarmodule sein, um den Energiebedarf zu decken.

Einfallswinkel

Der Einfallswinkel (θ) des Sonnenlichts auf einem Solarmodul ist ebenfalls ein wichtiger Faktor für die Stromerzeugung. Ein Solarmodul sammelt Sonnenenergie am effizientesten, wenn die Sonnenstrahlen senkrecht, also mit einem Einfallswinkel von 0°, zur Oberfläche des Moduls stehen, weil das die effektive Sammelfläche maximiert (siehe Abbildung 2). Bei einem Solarmodul mit der Länge L ist die effektive Sammelfläche gleich L*cos(θ), so dass die auf die Solaranlage einfallende Intensität auch L*cos(θ) ist.

Abb. 2



↑ Ein Einfallswinkel von 45° (links) und 0° (rechts). Der Einfallswinkel ist der Winkel zwischen den einfallenden Sonnenstrahlen und der Senkrechten der Solarzelle (mit der Länge L). Wenn die Sonnenstrahlen parallel zur Senkrechten der Solarzelle sind, liegt ein Einfallswinkel von 0° vor.

Für Weltallmissionen ist der Einfallswinkel ein entscheidender Faktor. Viele Raumfahrzeuge sind mit verstellbaren Solarmodulen ausgestattet, um den Einfallswinkel zu verringern und somit die Stromproduktion zu maximieren.

Solarenergie bei Missionen im All

Nachfolgend sind einige Beispiele aufgeführt, wie das Abstandsgesetz und der Einfallswinkel die Technik von Weltraummissionen beeinflussen.

Rosetta

Die Rosetta-Mission der ESA war mehr als 10 Jahre lang unterwegs zum Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko. Am äußersten Punkt ihrer Reise befand sich Rosetta 800 Millionen Kilometer von der Sonne entfernt, wo das Sonnenlicht nur 4% des auf der Erde empfangenen Lichts ausmacht. Es ist die erste Mission, die außerhalb des Haupt-Asteroidengürtel reiste und sich dabei ausschließlich auf Solarzellen zur Stromerzeugung stützte. Die 32 Meter langen Solarmodule hatten eine Gesamtfläche von 64 m^2 (siehe Abbildung 3).

Abb. 3

↑ Die Raumfähre Rosetta mit einem ihrer Solarflügel.

BepiColombo

Abb. 4

↑ Raumsonde BepiColombo mit ihrem Solarmodul.

Ein großer Teil des einfallenden Lichts, das die Solarmodule erreicht, wird in Wärme umgewandelt. Die BepiColombo-Mission der ESA zum Merkur wird in der Nähe der Sonne fliegen, wo der Heizeffekt sehr groß ist. Wenn die Solarmodule von BepiColombo länger als ein paar Sekunden direkt auf die Sonne zeigen, würden die Materialien beschädigt werden und die Solarmodule nicht mehr funktionieren. Damit die Solarmodule kühl genug bleiben (ca. 200°C), werden sie von der Sonne weggedreht. Um die für BepiColombo benötigte elektrische Energie zu erzeugen, müssen die Solarmodule deshalb viel größer sein, als wenn wir die Fläche nur mit dem Abstandsgesetz berechnen würden. Für BepiColombo müssen die Solarmodule 42 m^2 groß sein (siehe Abb. 4).

→ Aufgabe 1 – Das Abstandsgesetz

In dieser Aufgabe werden die SuS die elektrische Leistung einer Solarzelle berechnen, indem sie zunächst eigene Messungen des elektrischen Stroms und der elektrischen Spannung durchführen und versuchen werden, das Abstandsgesetz aus ihren Messungen herzuleiten.

Materialien

- Ausgedruckte Arbeitsblätter und Anhang 1 für jede Gruppe
- Eine dunkle Kiste (an einer Seite geöffnet)
- Stromkabel
- Klebeband
- Lichtquelle (kleine Glühbirne, 4.5V, 0.3A)
- Lineal
- 30 cm Stab (z.B. ein dünner Holzstab)
- Material zum abdunkeln (z.B. Schaumstoff, Bauwollstoff)
- Amperemeter und Voltmeter (oder ein Multimeter)
- Krokodilklemmen

Übung

Teilen Sie die SuS in Gruppen mit jeweils drei bis vier SuS ein. Verteilen Sie das Arbeitsblatt zu Aufgabe 1 und pro Gruppe zusätzlich noch den Anhang 1. Bevor die SuS mit den Experimenten beginnen, sollten Sie das Konzept der Strahlungsintensität vorstellen.

Versuchsaufbau

Die SuS müssen das Experiment zunächst aufbauen. Bitten Sie sie Schritte 1 bis 9 von Anhang 1 durchzuführen. In Schritt 9 ist dringend darauf zu achten, dass die SuS die Distanz null markieren, wenn die Glühbirne die Solarzelle berührt. Nach dem Versuchsaufbau sollten die SuS noch einmal kontrollieren, ob alles richtig aufgebaut wurde und funktioniert.

Experiment

Die SuS sollten ihre Messungen der elektrischen Spannung (U) und des elektrischen Stroms (I) gemäß den Schritten 10 bis 12 in Anhang 1 durchführen und ihre Daten in Tabelle 1 auf ihren Arbeitsblättern eintragen.

Vor der ersten Messung sollten die SuS den Mindestabstand von 5 cm einhalten. Für jede nachfolgende Messung sollten die SuS die Lichtquelle jeweils 1 cm zurückziehen, bis sie ca. 30 cm erreicht haben. Im Idealfall sollten die SuS 20 bis 30 verschiedene Entfernungen messen. Es ist möglich, größere Intervallabstände zu verwenden, aber der Abfall der Leistungsabgabe kann dann zu schnell sein, um das Abstandsgesetz zu beobachten; dies variiert mit der Lichtquelle und den Solarzellen. Wir empfehlen, die optimalen Abstände zu testen, bevor Sie das Experiment mit Ihren SuS durchführen.

Die SuS sollten ihre Messungen noch zweimal wiederholen und dann den Durchschnitt berechnen. Besprechen Sie die Zuverlässigkeit der Ergebnisse und den wissenschaftlichen Prozess mit den SuS.

Bitten Sie die SuS, Tabelle 1 ihres Arbeitsblattes auszufüllen, indem Sie die Ausgangsleistung berechnen:

$$P(W) = I\,(A) * U\,(V)$$

Ergebnisse

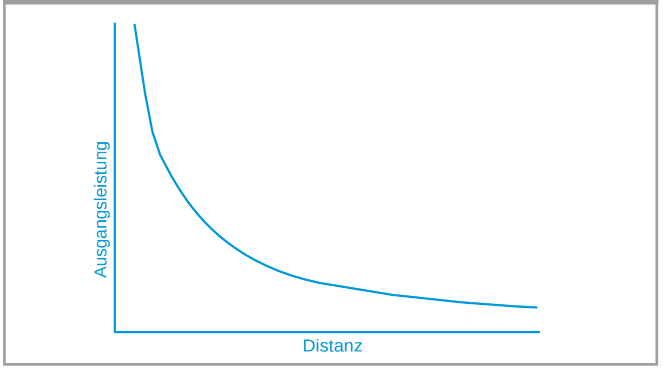
Bei der Analyse der Ergebnisse gehen wir davon aus, dass die von den Solarzellen produzierte Leistung direkt proportional zur Leistung ist, die von der Solarzelle empfangen wird (produzierte Leistung = empfangene Leistung x Wirkungsgrad der Zelle). Die empfangene Leistung ist proportional zur Strahlungsintensität 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.

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

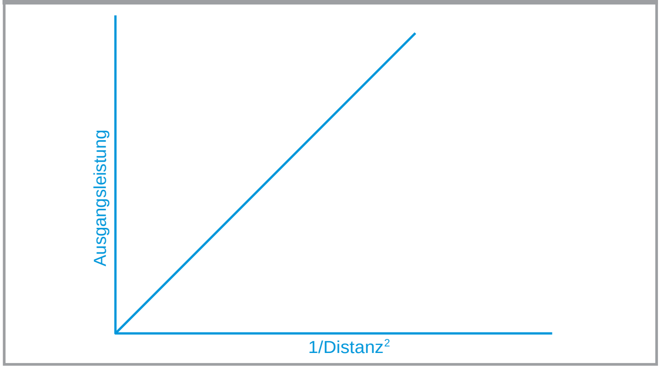
Um ihre Daten zu analysieren, sollten die SuS die Leistung als Funktion der Distanz (Abb. 5a) und die Leistung als Funktion des Kehrwerts des quadratischen Abstands (Abb. 5b) zeichnen.

Abb. 5a



↑ Erwarteter Graph für Ausgangsleistung gegen Distanz.

Abb. 5b



↑ Erwarteter Graph für Ausgangsleistung gegen 1/Distanz^2.

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[1] 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.

[1] 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

Bitten 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°). Obwohl der erwartete Messwert, wenn die Solarzelle parallel zur Lichtquelle steht (Einfallswinkel = 90°), 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°, -60° und -90° 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° 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 Abstandgesetzes 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 42m² 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 m² 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.

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

7. Die Solarzellen haben pro Quadratmeter eine Masse von:

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

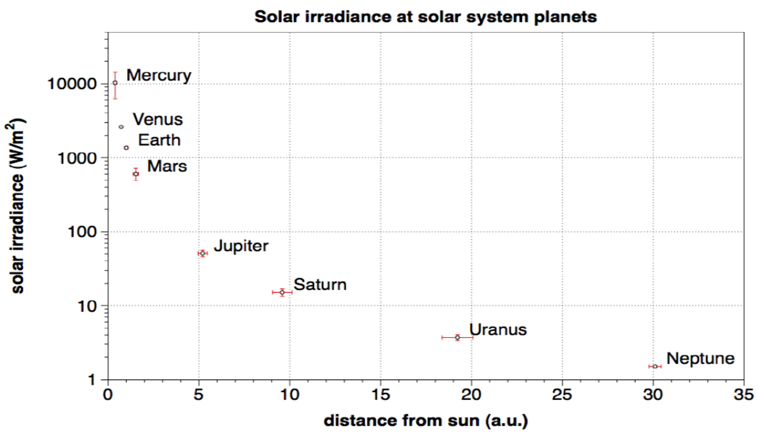
Die Gesamtmasse der Solarzellen, die für die Cassini-Mission benötigt worden wären, beträgt ungefähr:

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

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 Abstandgesetz 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.

Abb. 6



	Distance from Sun, AU	Solar radiation W/m^2	Approx array temp, degC
Mercury	0.4	9014	238
Venus	0.7	2645	101
Earth	1.0	1371	45
Mars	1.5	593	-15
Jupiter	5.2	51	-134
Saturn	9.5	15	-170
Uranus	19	4	-200
Neptune	30	2	-215
Pluto	39	0.9	-222

↑ 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
esa.int/Education/Moon_Camp

Mond-Animationen über die Monderforschung
esa.int/Education/Moon_Camp/Making_a_Home_on_the_Moon

ESA Unterrichtsmaterialien:
esa.int/Education/Classroom_resources

ESA Raumfahrtprojekte

ESA Rosetta Mission
esa.int/rosetta

ESA/JAXA BepiColombo Mission
esa.int/Our_Activities/Space_Science/BepiColombo_overview2

Cassini-Huygens Mission
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

Erzeugte Leistung (5.25 AU) bei Rosetta (395 W, 64 m^2)
esa.int/Our_Activities/Space_Science/Rosetta/The_Rosetta_orbiter

Technische Daten für das Raumfahrzeug Cassini
fas.org/nuke/space/bennett0706.pdf

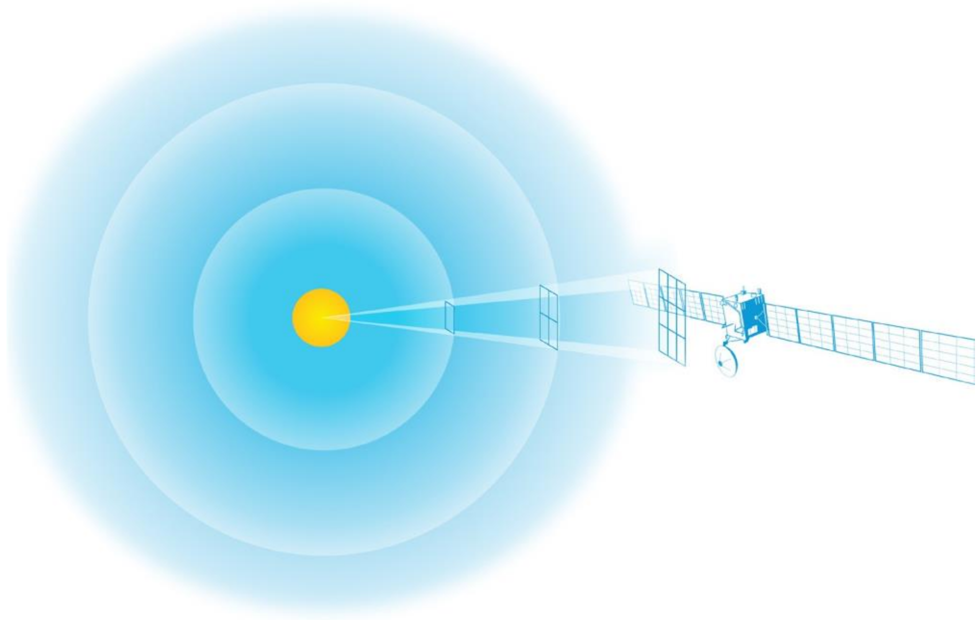
Informationen über die Masse von Solarzellen
lpi.usra.edu/opag/nov_2007_meeting/presentations/solar_power.pdf

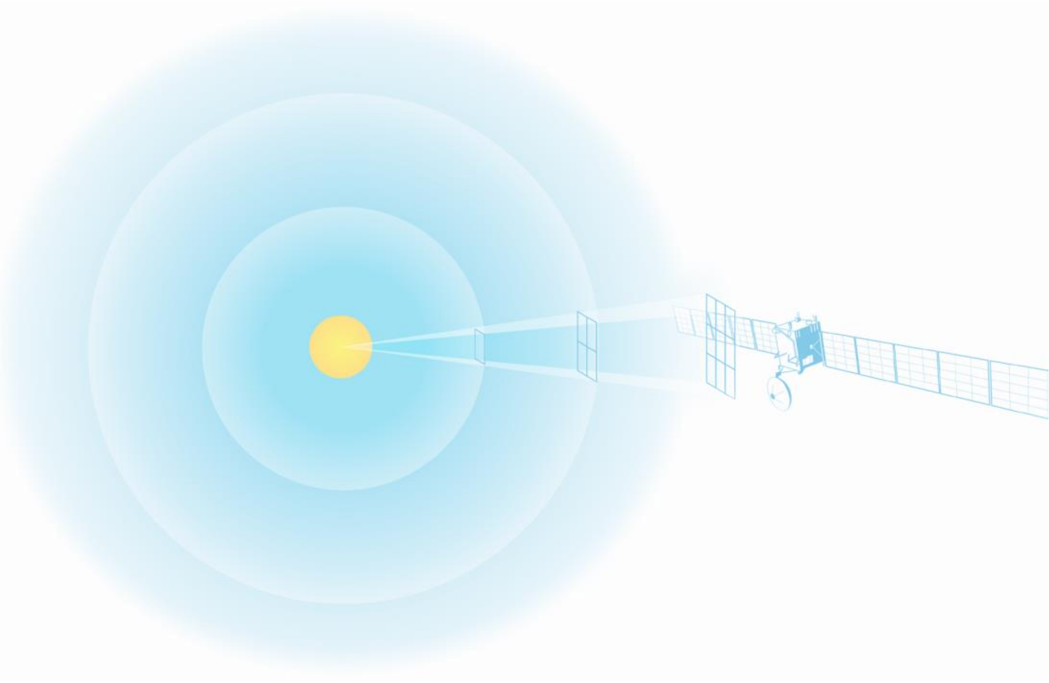
Einsatz von Solarflügeln bei BepiColombo
https://www.youtube.com/watch?v=Lhw4aojbkvs

Lehren mit dem All

→ Strom aus Sonnenlicht

Mit Solarenergie das Weltall erkunden





Lehren mit dem All – Strom aus Sonnenlicht | P09
www.esa.int/education

Das ESA Education Office freut sich über Feedback und Kommentare
teachers@esa.int

Eine ESA Education Produktion

Copyright 2018 © European Space Agency

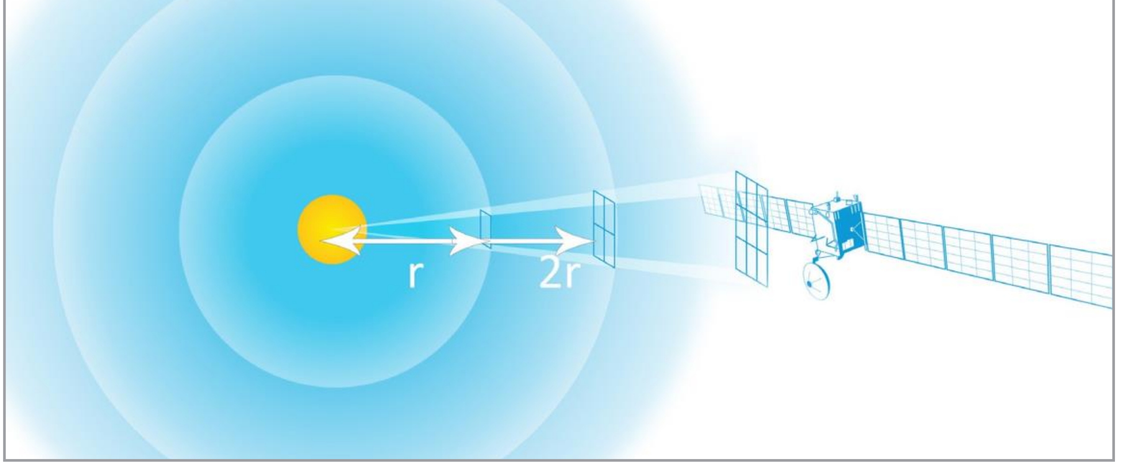
Eine Übersetzung von ESERO Germany

→ STROM AUS SONNENLICHT

Mit Solarenergie das Weltall erkunden

→ Übung 1: Das Abstandsgesetz

Abb. A1



↑ Die Sonne emittiert Licht gleichmäßig in alle Richtungen. Bei einer Distanz r dringt das Licht durch eine Fläche A, wenn sich die Distanz verdoppelt (2r), passiert die gleiche Lichtmenge durch eine Fläche, die vier Mal so groß ist (4A).

Die Sonne emittiert Licht gleichmäßig in alle Richtungen (siehe Abb. A1). Deshalb ist die Strahlungsintensität (I) bei einer gegebenen Distanz (r) gleich der gesamten von der Sonne abgestrahlten Energie, verteilt auf eine Kugel mit dem Radius r und einer Oberfläche von $4\pi r^2$.

$$\text{Strahlungsintensität der Sonne } (\mathrm{W/m^2}) = \frac{\text{Strahlungsleistung der Sone (W)}}{4\pi r^2\ (\mathrm{m^2})} \quad (1)$$

Abhängig von ihrer Entfernung zur Sonne, empfangen Raumfahrzeuge im Sonnensystem unterschiedliche Mengen an Sonnenlicht.

Wusstest du schon...?

SMART-1 startete im September 2003 und war die erste ESA-Mission zum Mond. Sie war die erste Mission, die die Erdumlaufbahn, wenn auch langsam, ausschließlich mit Sonnenenergie verließ. Mit 13 Monaten stellte sie einen Rekord für die längste Reise zum Mond auf. SMART-1 brach den Rekord für den niedrigsten Kraftstoffverbrauch pro Kilometer für eine Mondreise und bezog den größten Teil ihrer elektrischen Energie aus den Flügeln der Solarmodule, die jeweils etwa 7 Meter lang waren.

Experiment

In diesem Experiment werdet ihr versuchen, das Abstandsgesetz für die elektrische Leistung einer Solarzelle heranzuziehen.

- Baut den Versuchsaufbau nach der Anleitung in Anhang 1 von Schritt 1 bis 10 auf.
- Kontrolliert, ob das gesamte Equipment korrekt angeschlossen ist und funktioniert.
- Beginnt mit den Messungen und folgt dabei Schritt 11 und 12 der Anleitung.
- Notiert die gemessene Spannung (U) und den Strom (I) in Tabelle 1.
- Wiederholt die Messungen jeweils zwei weitere Male.
- Berechnet die elektrische Leistung (P) der Solarzelle und vervollständigt Tabelle 1.

$$P\,(W) = I\,(A) * U\,(V)$$

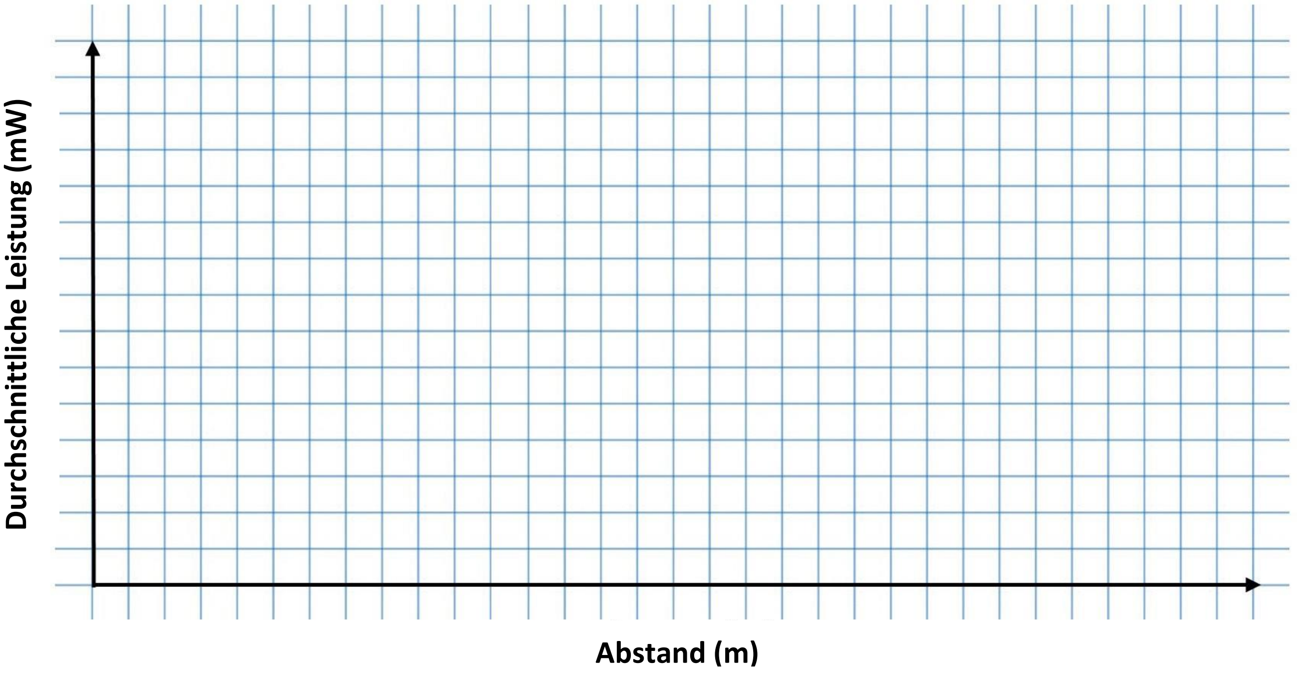
- Berechnet die durchschnittliche Leistung (P) für die verschiedenen Abstände.

Tabelle 1

Abstand	Experiment 1			Experiment 2			Experiment 3			Mittelwert P (mW)
	U (V)	I (mA)	P (mW)	U (V)	I (mA)	P (mW)	U (V)	I (mA)	P (mW)	

↑ Tabelle für die gemessene Spannung (U), den gemessenen Strom (I) und die jeweils berechnete elektrische Leistung (P)

1. Zeichne die durchschnittliche elektrische Leistung als Funktion des Abstands zur Lichtquelle:



2. Folgt die elektrische Leistung der Solarzelle dem Abstandsgesetz? Erkläre deine Antwort.

____

____

____

3. Welche Unsicherheiten gibt es in dem Experiment? Wie beeinflussen sie dieses?

____

____

____

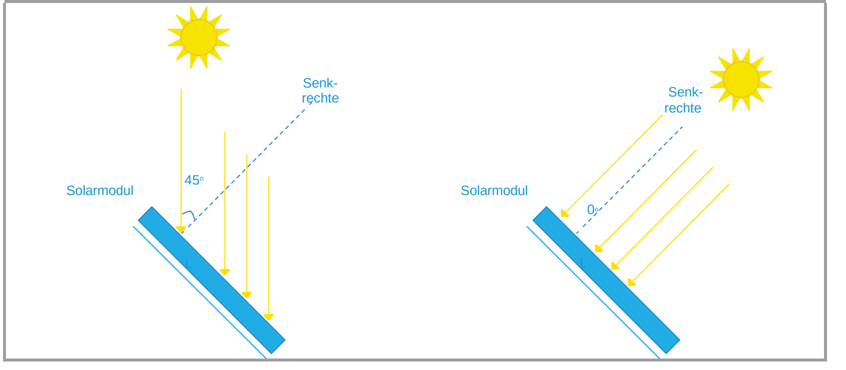
4. Wenn wir die Distanz zur Lichtquelle verdoppeln, wie groß muss dann die Solarzelle sein, um die gleiche elektrische Leistung zu erbringen?

   - ☐ Sie muss kleiner sein
   - ☐ Sie muss zweimal so groß sein
   - ☐ Sie muss viermal so groß sein
   - ☐ Sie muss neunmal so groß sein

→ Übung 2: Der Einfallswinkel

Der Einfallswinkel des Sonnenlichts auf die Solarzellen ist ein wichtiger Faktor. Der Einfallswinkel ist der Winkel zwischen den einfallenden Sonnenstrahlen und der Senkrechten der Solarmodule. Wenn die Sonnenstrahlen im rechten Winkel zum Solarmodul stehen, haben sie einen Einfallswinkel von 0°.

Abb. A2



↑ Darstellung eines Einfallwinkels von 45° (links) und 0° (rechts).

1. Bevor du mit den Messungen beginnst, mache eine Annahme, welcher Einfallswinkel die größte Leistung erzielen wird. Begründe deine Annahme.

Experiment

In diesem Experiment werdet ihr messen, wie der Einfallswinkel die erbrachte Leistung eurer Solarzelle beeinflusst.

- Adaptiert den Versuchsaufbau von Übung 1 indem ihr den Schritten 1 bis 7 aus der Anleitung aus Anhang 2 folgt.
- Führt das Experiment durch, indem ihr die Schritte 8 bis 10 aus Anhang 2 befolgt. Notiert eure gemessene Spannung (U) und den gemessenen Strom (I) bei den verschiedenen Einfallswinkeln in Tabelle 2.
- Wiederholt die Messungen jeweils zwei weitere Male.
- Berechnet die elektrische Leistung der Solarzelle und vervollständigt Tabelle 2.

$$P\ (W) = I\ (A) * U\ (V)$$

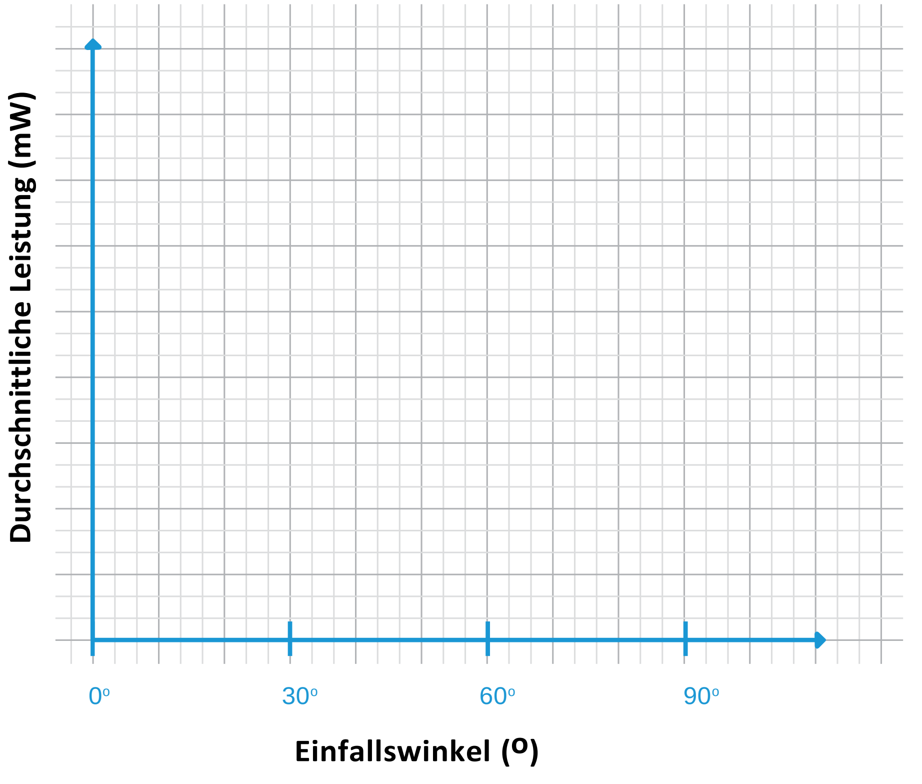
- Berechnet die durchschnittliche Leistung für die verschiedenen Einfallswinkel.

Tabelle 2

Winkel	Experiment 1			Experiment 2			Experiment 3			Mittel-wert P (mW)
	U (V)	I (mA)	P (mW)	U (V)	I (mA)	P (mW)	U (V)	I (mA)	P (mW)	
0°										
30°										
45°										
60°										
90°										

↑ Tabelle für die gemessene Spannung (U), den gemessenen Strom (I) und die jeweils berechnete elektrische Leistung (P) für verschiedene Einfallswinkel

2. Zeichne die durchschnittliche Leistung als Funktion des Einfallswinkels:



3. Welcher Einfallswinkel führt zur größten elektrischen Leistung?

___

4. War deine Annahme aus Frage 1 korrekt? Wenn nicht, kannst du erklären warum nicht?

___

___

___

5. Was denkst du, warum die Leistung nicht gleich Null ist, wenn die Solarzelle parallel zu der Lichtquelle ist? (Einfallswinkel = 90^0)

___

___

___

6. Erwartest du eine elektrische Leistung, wenn du das Experiment durchführst, während die Glühbirne ausgeschaltet ist? Teste es und erkläre deine Beobachtungen.

___

___

___

ARBEITSBLATT

7. Welche elektrische Leistung würdest du erwarten, wenn du das Experiment mit den Einfallswinkeln -30°, -45°, -60° und -90° durchführst? Begründe deine Antwort.

---

8. Welche Hauptunsicherheiten gibt es in dem Experiment? Gibt es Fehler bei euren Messungen?

---

9. Ihr habt gemessen, wie die elektrische Leistung von dem Einfallswinkel abhängt. Wie würdest du ein Solarmodul konstruieren, um die Leistung zu maximieren?

Wusstest du schon...?

Die Internationale Raumstation (ISS) wird mit Solarmodulen betrieben. Das rechte Bild zeigt einige der Solarmodule auf der ISS, auf der bis zu sechs Astronauten gleichzeitig leben. Während die ISS die Erde umkreist, können die Solarmodule gedreht werden, um direkter auf die Sonne zu zeigen. Die Solarzellen erstrecken sich über eine Fläche von 2500 m^2 - das entspricht der Größe eines halben Fußballfeldes!

→ Übung 3: Mit Solarenergie das Weltall erkunden

→ ARBEITSBLATT

Wann ist es eine gute Idee Solarenergie für die Raumfahrt zu nutzen und wie können wir unser Wissen über das Abstandsgesetz und den Einfallswinkel vorteilhaft dafür einsetzen?

ESAs Rosetta Mission reiste 800 Millionen km von der Sonne entfernt und benötigte enorm große Solarmodule, um genug Energie zu gewinnen, um die Systeme an Bord betreiben zu können. Im Gegensatz dazu ist **ESAs BepiColombo Mission** zum Merkur so nah an der Sonne, dass sie so großen Strahlungsmengen ausgesetzt ist, dass diese sehr schädlich für Solarzellen sein können.

Aufgabe

1. Die Erde befindet sich ungefähr 150 Millionen km von der Sonne entfernt. Die durchschnittliche emittierte Leistung der Sonne beträgt 3,828* 10^{26}W. Benutze Formel (1) aus Übung 1 um die Strahlungsintensität bei der Entfernung der Erde (I_{Erde}) zu berechnen.

2. Der kleinste Abstand von BepiColombo zur Sonne wird ungefähr 45 Millionen km betragen. Um Schäden der Solarzellen durch die große Hitze so gering wie möglich zu halten, müssen sie von der Sonne weggekippt werden. Berechne die Strahlungsintensität ($I_{BepiColombo}$) für diesen Abstand. Vergleiche sie mit I_{Erde}.

3. Rosettas größter Abstand zur Sonne betrug 800 Millionen km. Berechne die Strahlungsintensität ($I_{Rosetta}$) dieser Distanz. Vergleiche sie mit I_{Erde}.

4. Berücksichtigt man den benötigten Strom in Kombination mit der geringen Strahlungsintensität an dem am weitesten entfernten Punkt im Orbit, mussten Rosettas Solarzellen eine sehr große Oberfläche von $64m^2$ haben. Welche Größe hätten die Solarzellen haben müssen, wenn Rosetta stattdessen den gleichen Abstand zur Sonne wie die Erde gehabt hätte? Beziehe dabei nur den Unterschied der Strahlungsintensität in deine Berechnungen mit ein und gehe davon aus, dass alle anderen Variablen konstant bleiben.

5. Stelle dir jetzt vor, Rosetta würde die Sonne aus einer Distanz von 1,4 Milliarden km erforschen. Wie groß müssten die Solarzellen dann sein? Beziehe dabei nur den Unterschied der Strahlungsintensität in deine Berechnung mit ein und gehe davon aus, das alle anderen Variablen konstant bleiben.

6. Die letzte Mission zum Saturn, Cassini-Huygens, wurde mittels eines Radioisotopengenerators (RTG, engl. radioisotope thermoelectric generator) mit Energie versorgt. Cassini-Huygens benötigte eine Leistung von 885 W, wohingegen Rosetta nur 395 W benötigte. Berechne die Größe der Solarzellen die benötigt würden, um Cassini-Huygens (auf Höhe des Saturn) mit ausreichend Strom zu versorgen. Gehe davon aus, dass die Solarzellen vom Typ her ähnlich wie Rosettas sind.

7. Der Radioisotopengenerator, der für Cassini-Huygens verwendet wurde, hatte eine Masse von 56.4 kg. Rosettas Solarzellen hatten eine Masse von 51.2 kg. Wie viel größer wäre die Masse von Cassini-Huygens gewesen, wäre die Mission mit Solarzellen, wie in Frage 6 berechnet, durchgeführt worden?

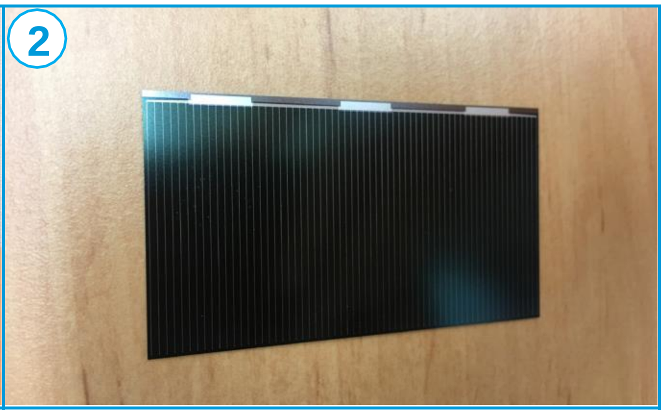
8. Was sind die Vor- und Nachteile der Solarenergie bei der Raumfahrt?

→ Anhang 1 - Abstandsgesetz

1

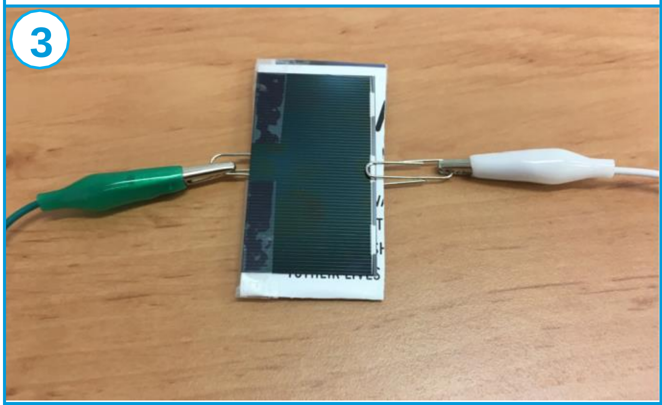
Ihr benötigt einen dunklen Kasten (20-30 cm Länge reichen für eine kleine Glühbirne aus).

2



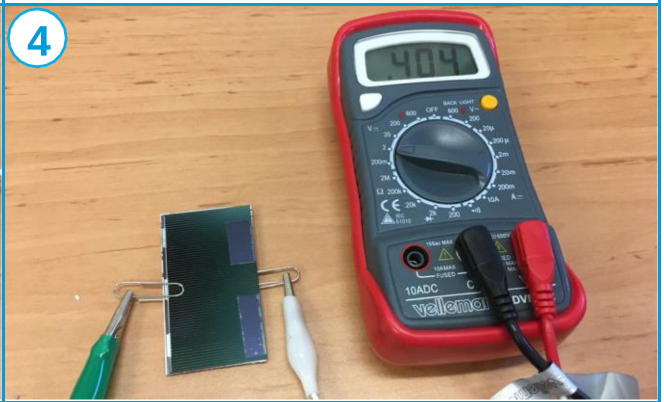
Außerdem benötigt ihr eine Solarzelle.

3



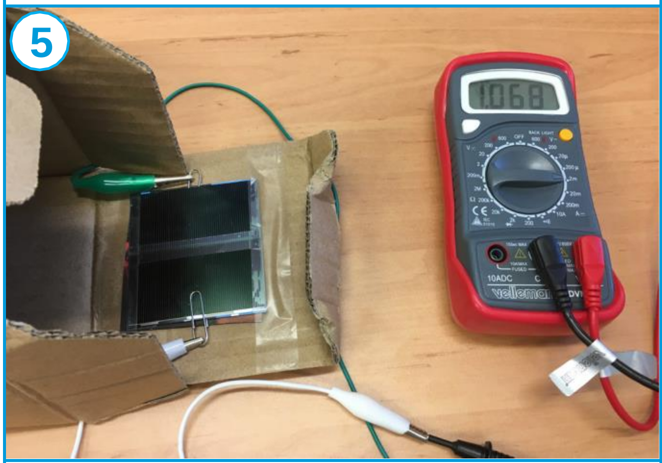
Verbindet die Krokodilklemmen mit der Solarzelle. Je nach Art der Solarzelle müsst ihr ggf. zunächst Verbindungspunkte für die Krokodilklemmen anbringen. Dafür könnt ihr z.B. Büroklammern benutzen.

4



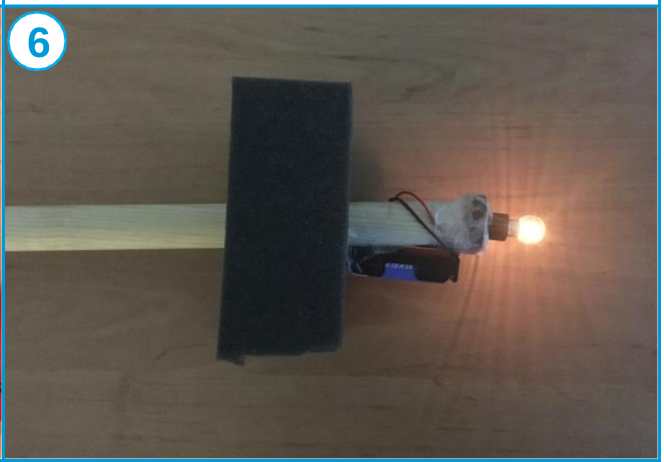
Testet, ob eure Solarzelle richtig funktioniert indem ihr ein Ampere- (Reihenschaltung) und Voltmeter (Parallelschaltung) oder ein Multimeter benutzt. Es sollten euch Spannung und Strom angezeigt werden.

5

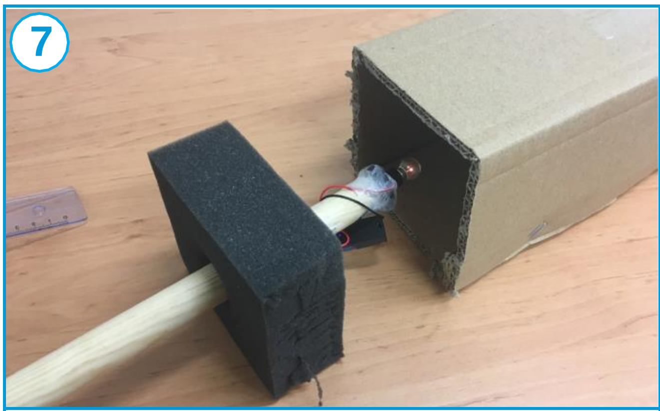


Bringt die Solarzelle wie im Bild dargestellt im Innern des Kastens an. Schließt den Kasten.

6

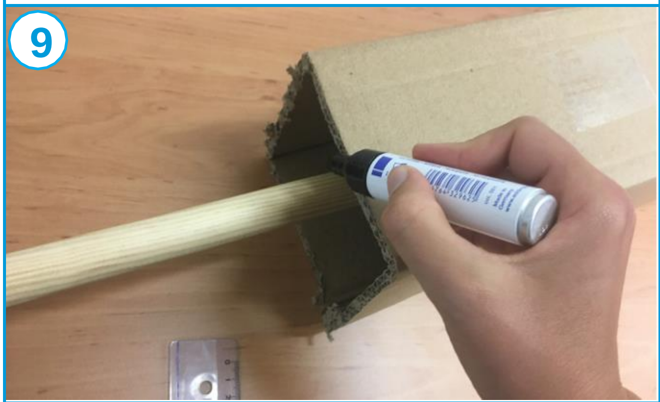


Bringt das kleine, batteriebetriebene Licht zusammen mit der Batterie am Ende des Stabs an. Schneidet, genau wie auf dem Foto, ein Stück Schaumstoff mit den Maßen der Schnittfläche des Kastens aus, um Lichteinfall von Quellen hinter der Glühbirne zu verhindern.



Schaltet die Glühbirne ein und führt den Stab in den Kasten ein. Achtet darauf, dass keine Lücken zwischen dem Schaumstoff und den Wänden des Kastens vorhanden sind. Eventuell müsst ihr den Kasten noch mit dunklem Klebeband abdichten oder den Versuch in einem dunklen Raum durchführen.

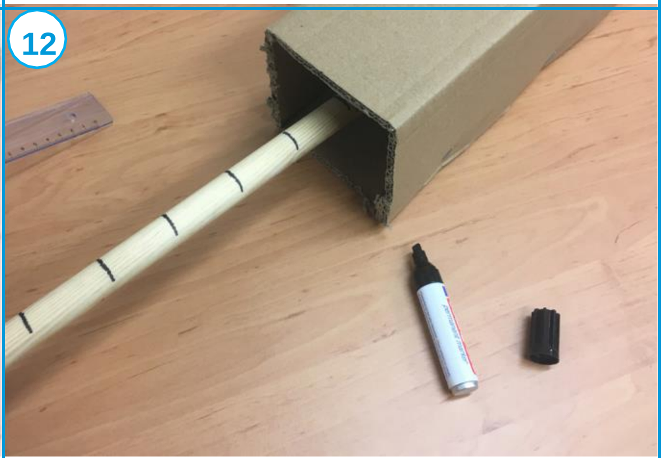
Führt den Stab vorsichtig soweit in den Kasten ein, bis die Glühbirne die Solarzelle berührt. Passt auf, dass ihr diese nicht beschädigt.



Markiert die Anfangsposition mit Klebeband oder einem Stift auf dem Stab und schreibt die Maßangabe (0 cm) dazu.

Ihr habt den Versuch nun fertig aufgebaut. Geht sicher, dass euer Equipment funktioniert und korrekt verbunden ist.

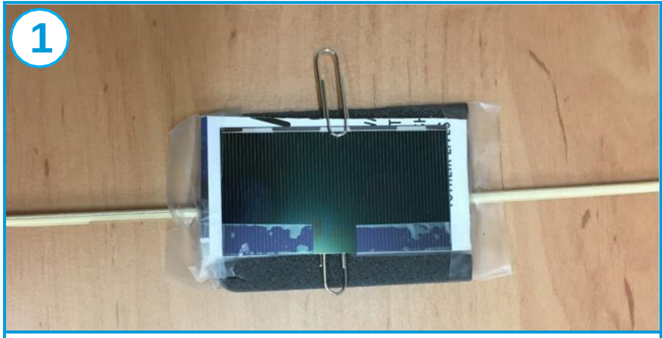
Bewegt die Glühbirne 5 cm von der Solarzelle weg und notiert den elektrischen Strom und die elektrische Spannung in Tabelle 1 auf euren Arbeitsblättern.



Bewegt die Lichtquelle schrittweise einen cm von der Solarzelle weg bis die Glühbirne am Ende des Kastens ist. Wiederholt die Messungen jeweils zweimal unter gleichen Bedingungen und für die verschiedenen Abstände.

→ Anhang 2 – Einfallswinkel

1



Benutzt die Materialien aus Übung 1. Verbindet die Solarzelle mittig mit einem kleinen Stab. Dies ermöglicht euch die Solarzelle innerhalb des Kastens zu rotieren. Die Rotationsaxe sollte in der Mitte der Solarzelle liegen.

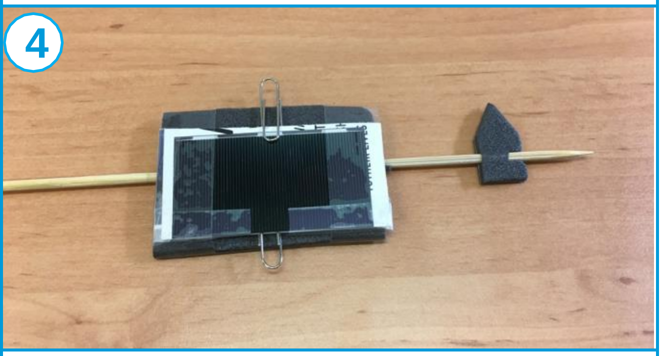
2

Benutzt den Kasten aus Übung 1. Markiert einen Punkt auf der Kastenseite, an dem der Stab durch den Kasten gehen soll. Vergewissert euch, dass er den gleichen Abstand zu der Ober- und Unterseite des Kastens hat und dass die Solarzelle genug Platz für die freie Rotation innerhalb des Kastens hat.

3

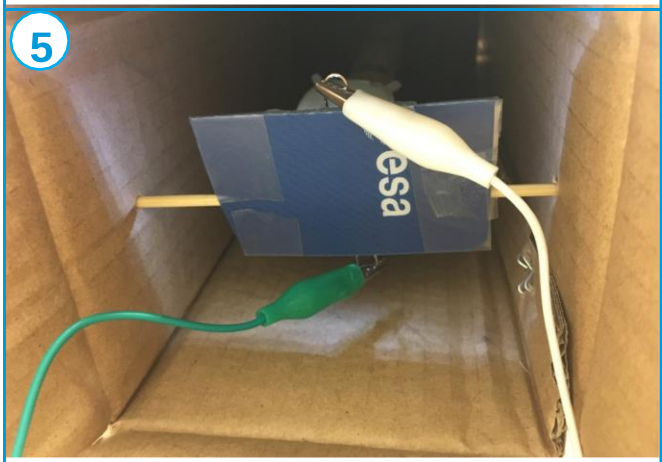
Markiert den 0°, 30°, 45°, 60° und 90° - Winkel mit der Senkrechten zu einer der Kastenseiten (ihr könnt auch ein Geodreieck anbringen).

4



Befestigt ein Stück Pappe so an dem Stab, dass es wie die Solarzelle orientiert ist. Es sollte sich außerhalb des Kastens befinden sodass ihr den Rotationsgrad der Solarzelle kontrollieren könnt.

5

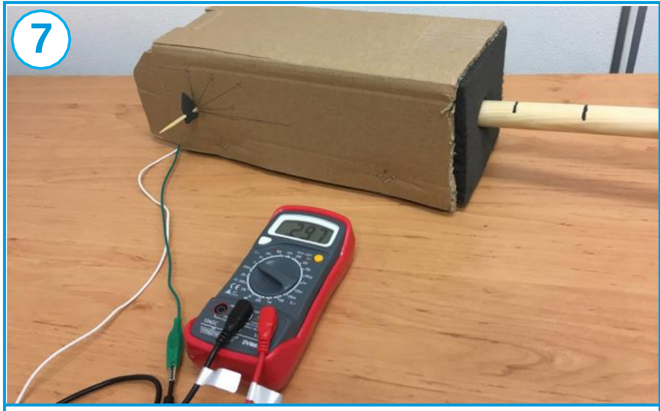


Befestigt die Solarzelle in dem Kasten und verbindet sie per Reihenschaltung mit einem Amperemeter und per Parallelschaltung mit einem Voltmeter (oder benutzt ein Multimeter). Schließt den Kasten.

6

Schaltet die Lichtquelle ein und schiebt sie in den Kasten. Der Abstand zwischen der Lichtquelle und der Solarzelle sollte ca. 10 cm betragen. Dieser Abstand darf während des Experiments nicht verändert werden. (Nicht den Stab bewegen!).

7

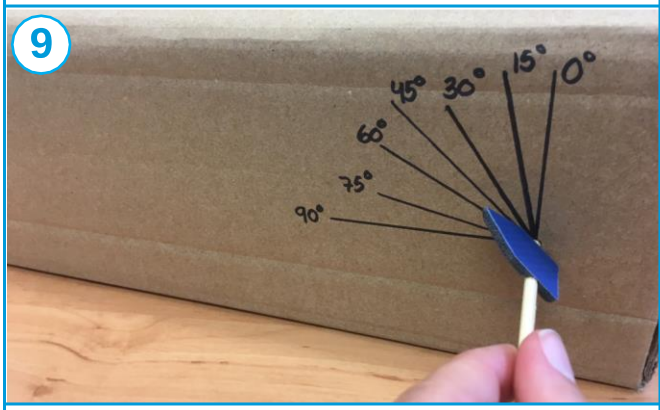


Testet ob der Versuchsaufbau funktioniert.

8

Messt den Strom und die Spannung, wenn die Solarzelle senkrecht zur Lichtquelle ist (Einfallswinkel von 0°). Notiert eure Messungen in Tabelle 2 eures Arbeitsblattes.

9



Kippt die Solarzelle schrittweise, indem ihr den kleinen Stab dreht und die auf dem Kasten markierten Winkel ablest. Messt den Strom und die Spannung bei jedem der markierten Winkel und notiert sie in Tabelle 2 auf eurem Arbeitsblatt.

10

Kippt die Solarzelle bis sie parallel zur Lichtquelle ist (Einfallswinkel von 90°). Messt auch bei dieser Position den Strom und die Spannung und notiert sie in Tabelle 2 auf euren Arbeitsblättern. Wiederholt die Messungen zwei weitere Male.