

B5 Wir bauen ein thermisches Sonnenkraftwerk – Mit Brennglas und Spiegel

Die beiden Teilexperimente zur Bündelung der Sonnenstrahlung mit Linse und Spiegel eignen sich sehr gut, um im Physikunterricht im Bereich Strahlenoptik und Kalorik einige Gesetzmäßigkeiten anhand eines hochaktuellen Themas kennenzulernen oder das bereits Gelernte zu verifizieren. Aber auch bei einem Projekttag zum Thema regenerative Energien oder Energiewende sind die Experimente gut einsetzbar.

1 Zentrale Fragestellung

Wie können die ungeheuren Energiemengen der Sonne, die täglich mehr Energie auf die Erde einstrahlt als die ganze Welt jährlich verbraucht, genutzt werden? Welche Möglichkeiten gibt es, diese regenerative Energiequelle zu erschließen? In einfachen Freihandexperimenten sollen den Schülerinnen und Schülern Ansätze dafür gezeigt werden. „Vom Brennglas zum Solarkraftwerk“ ist es zwar ein weiter Weg, dennoch lernen die Schülerinnen und Schüler auf diese Weise ganz hauptsächlich in Gruppenexperimenten das Grundprinzip und die Schwierigkeiten bei der technischen Umsetzung regenerativer Energiegewinnung kennen. Gleichzeitig lassen sich damit wichtige Bezüge zur Wertebildung herstellen, zum Beispiel hinsichtlich des *Umweltbewusstseins* und der *Nachhaltigkeit*.

2 Einordnung des Experiments in den Unterrichtszusammenhang

2.1 Fachliche Grundlagen

Wünschenswerte, aber nicht zwingend notwendige Vorkenntnisse der Schülerinnen und Schüler:

- aus der Optik:
 - Licht als elektromagnetische Strahlung (→ Spektrum)
 - Optische Linsen und Spiegel als Instrumente zur Richtungsänderung von Strahlen
 - Konvergente Lichtbündel zur Bildung von Brennpunkten
- aus der Kalorik:
 - Temperaturstrahlung als Energietransport ohne Materie (Strahlungsenergie)
 - Temperaturmessung mit dem elektrischen Widerstandsthermometer

2.2 Lehrplanrelevanz

Im Physikunterricht der Altersstufe 12 bis 14 Jahre sind bei den Grundlagen der Optik folgende Themen angesprochen: Parallele, konvergente Lichtbündel; Lichtstrahl als idealisiertes enges, paralleles Lichtbündel; optische sphärische Linsen (Konvexlinse als Sammellinse → Brennpunkt); Strahlengänge beim Hohlspiegel. In der Kalorik gibt es Schnittmengen mit den Themen Temperaturmessung, Erwärmung eines Körpers durch Absorption von Strahlungsenergie; Spezifische Wärmekapazitäten; Energietransport ohne Vorhandensein von Materie (→ Temperaturstrahlung); Sonne als Temperaturstrahler und Solarkonstante.

Themen und Begriffe: Brennglas, Brennpunkt, elektromagnetische Strahlung, Energiedichte, Energiegewinnung, erneuerbare Energien, Hohlspiegel, Kalorik, konkav, konvex, Lichtbündel, Lichtstrahlen, Lupe, Optik, Parabolspiegel, Sammellinse, Solarkraftwerk, Sonnenlicht, sphärische Linse, Strahlengang, Temperaturstrahler, Thermometer

2.3 Kompetenzen

Die Schülerinnen und Schüler ...

- leiten das Bündeln von Lichtstrahlen in divergenter bis fast paralleler Form von der Taschenlampe ab.
- erfahren im praktischen Umgang mit Uhrglas oder Lupe, dass man Sonnenlicht einfangen, und in seiner Richtung verändern kann.
- ermitteln, dass die Fokussierung von Sonnenstrahlung durch optische Hilfsmittel zu einer wesentlich erhöhten Energiedichte führt, sodass in kürzester Zeit sogar Papier entzündet werden kann. Dieser Sachverhalt wird den Schülerinnen und Schülern in einfachen Experimenten und vor allem mit einfachen Mitteln überzeugend vor Augen geführt.
- entwickeln unmittelbar Überlegungen, diese Art der „Energiegewinnung“ nutzbar zu machen durch Besprechung und Auswertung der Versuchsergebnisse.
- erörtern die Bedeutung einer nachhaltigen Energieversorgung für die Zukunft (→ thermische Sonnenkraftwerke; z. B. Desertec-Projekt) und machen es zu ihrem eigenen Anliegen.
- entwickeln einen bewussten und verantwortlichen Umgang mit Natur und Ressourcen.

2.4 Das Experiment im Erklärungszusammenhang

2.4.1 Teilexperiment 1: Entzünden eines Papierstreifens mit der Lupe als Brennglas

Hier geht es um das Erzeugen hoher Temperaturen mithilfe einer Lupe als Brennglas. Das experimentelle Herausfinden, wie das Brennglas als doppelkonvexe Sammellinse in den Strahlengang der Sonne (Parallellicht) zu positionieren ist (Gegenstands-Seite) und wie groß der Abstand auf der Bild-Seite zu wählen ist, damit eine maximale Verstärkung der Energie im Brennpunkt gelingt, ist Aufgabe der Schülerinnen und Schüler. Die erzielbare Energiedichte selbst hängt im Wesentlichen von der bestrahlten Fläche der wirksamen Linsenoberfläche ab.

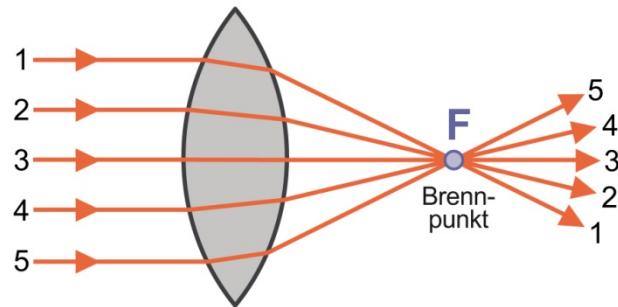


Abb. 1: Der Brennpunkt einer Sammellinse. Das aus großer Entfernung stammende und damit parallele Licht wird in einem Punkt vereint („gesammelt“).

Bei einer Linse mit 250 mm^2 Fläche wird so die eingestrahlte Energie im Brennpunkt auf ca. ein Hundertstel der Fläche (ca. $2,5 \text{ mm}^2$) fokussiert. Eine weitere mögliche Verkleinerung des Brennflecks wirkt sich enorm auf die Temperatur aus. Zu beachten ist, dass die Maximaltemperatur nur durch die Fixierung von Thermometer oder Papier in der Brennebene zu erreichen ist. Da die Sonne wandert, ist ein Nachführen des Brennglases notwendig; dies stellt aber in der Kürze der Versuchsdauer in Teilexperiment 1 kein größeres Problem dar. Die Schülerinnen und Schüler beobachten sehr schnell die Entwicklung einer Rauchfahne und das Aufflammen des Papierstreifens. Beim Entzünden fester Substanzen wie Papier ist Voraussetzung, dass sich durch Zersetzen der Cellulose brennbare Gase entwickeln. Die für trockenes Papier zureichende Temperatur von 233°C ($451^\circ\text{Fahrenheit}$) ist mit dem Brennglas zu erreichen, dunkles Papier erleichtert die Entzündung aber ungemein durch den erhöhten Absorptionseffekt.

2.4.2 Teilexperiment 2: Wir erwärmen Wasser mit der Sonne

Hier soll eine kleine Menge Wasser durch die fokussierte Strahlung der Sonne erwärmt werden – im Prinzip ist dies der Aufbau eines „Solarkochers“, wie er in südlichen, noch wenig industrialisierten Ländern praktische Verwendung findet. Hierbei wird ein Parabolspiegel angewendet. Der Brennpunkt bei dem verwendeten Brennspiegel liegt bei senkrechter Bestrahlung ca. 3,5 cm über dem Spiegelgrund. Ein optimaler Erwärmungseffekt ist aber auch hier nur gewährleistet, wenn das Sonnenlicht senkrecht einfällt, was je nach Breitengrad eine mehr oder weniger starke Neigung des Spiegels voraussetzt. Da zur experimentellen Bestimmung des Brennpunkts ständig in den Spiegel hineingeschaut werden muss, ist das Tragen einer starken Sonnenbrille obligatorisch.

Ansonsten ist die Strahlenoptik des Brennspiegels der einer Konvexlinse durchaus vergleichbar, nur dass der Brennpunkt auf der sonnenzugewandten Seite liegt.

Da bei diesem Versuch zunächst das Glas mit Wasser (mit hoher spezifischer Wärmekapazität) erwärmt wird, ist wegen der zeitlichen Streckung des Experiments das Nachführen des Spiegels und des Reagenzglases abhängig vom Sonnenstand erforderlich. Es erfordert einiges an Geschick, den „strahlenden Fokus“ immer auf den Erwärmungspunkt zu fixieren. (Eine elektronisch motorgesteuerte Nachführung der Spiegel bei Sonnenkraftwerken ist die technische Lösung dieses Problems.)

Die Vergrößerung des Parabolspiegels ergibt genau wie bei der Lupe als Brennglas eine um das Vielfache erhöhte Energiedichte. Es sind so Temperaturen bis zu 400 °C möglich, wodurch Strom mit einer Gesamtleistung von über 50 MW pro Kraftwerksblock erzeugt werden kann. Das zeigen moderne Solarthermiekraftwerke, z. B. in Südspanien (Andasol), Marokko oder Kalifornien.

2.5 Durchführungsvarianten

- Die Schülerinnen und Schüler können bei Teilexperiment 1 im Zweierteam arbeiten, das etwas aufwändiger Teilexperiment 2 kann dann zu viert durchgeführt werden, wobei jeweils zu zweit aufgebaut und experimentiert wird, die beiden anderen im Team messen und werten aus.
- Sollte Teilexperiment 2 im Freien durchgeführt werden, ist auf eine Abschirmung des Reagenzglases gegen Wind zu achten, da hierbei der Kühlungseffekt nicht zu unterschätzen ist. Der spätere Vormittag ist wegen des höheren Sonnenstands zu bevorzugen.
- Beide Versuche können jedoch auch parallel in zwei Gruppen durchgeführt werden, sodass die Einzelteams dann in der Folgestunde im Unterricht ihr Expertenwissen aus den Versuchen der jeweils anderen Gruppe mitteilen können.
- Alle Versuche können mit jeder der genannten Altersstufen durchgeführt werden, differenzieren kann die Lehrkraft dann hinsichtlich der Tiefe der Auswertung und der weiteren Fragestellung.

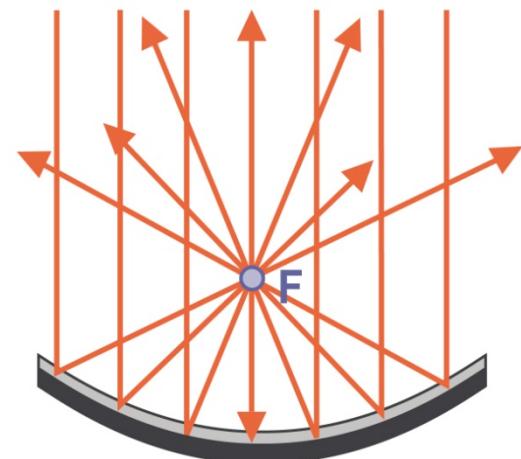


Abb. 2: Brennpunkt eines Hohlspiegels. Das aus großer Entfernung stammende und damit parallele Licht wird in einem Punkt vereint („gesammelt“).

3 Ergänzende Informationen zum Experiment

Zur Vorbereitung bzw. zur Vertiefung dieses Experiments finden Sie ergänzende Medien auf dem Medienportal der Siemens Stiftung: <https://medienportal.siemens-stiftung.org>.

Speziell zum Thema „Solarthermie und Photovoltaik – Energien mit Zukunft“ findet man ein weiteres Medienpaket auf dem Medienportal.

Optional: Weitere Experimentiermöglichkeiten

- Um die Wirkungsweise von Konvex- und Konkavlinsen zu erarbeiten, kann man in der Einführung mit einem Löffel arbeiten.
- Die Schülerinnen und Schüler können dabei jeweils ihr Spiegelbild in der Innenseite und der Außenseite des Löffels erkennen und beschreiben: (Konvex: verkleinert, aufrecht/ Konkav: verkleinert, umgedreht)

4 Hinweise zur Durchführung der Teilexperimente

4.1 Räumlichkeiten

Die Experimente können nur an sonnigen Tagen im direkten, intensiven Sonnenlicht durchgeführt werden, am besten am offenen Fenster oder im Freien. Es sollte windstill sein und die Lufttemperatur mindestens 20 °C betragen. Prinzipiell würde auch die Sonne im Winter reichen. Jedoch ist bei geschlossenem Fenster die Sonnenstrahlung stark abgeschwächt und im Freien wird zu viel Wärme durch die kalte Luft abgeführt. Genauso gut geeignet sind starke Foto-/Video-Lampen mit parallelem Lichtbündel und Leistungen ab ca. 500 Watt. Preisgünstige Leuchten mit Hochleistungslampen (z. B. aus dem Baumarkt) müssten ausgetestet werden, da das Licht eventuell zu wenig parallel ist.

4.2 Zeitbedarf

	Vorbereitung	Durchführung	Auswertung	Besprechung
Teilexperiment 1	5 min	10 min	10 min	10 min
Teilexperiment 2	10 min	30 min	10 min	5 min

4.3 Sicherheitsaspekte

Die Versuche dürfen nur bei Anwesenheit und unter Aufsicht der Lehrkraft durchgeführt werden. Die Schülerinnen und Schüler sind darauf hinzuweisen, dass die bereitgestellten Materialien nur entsprechend den jeweiligen Anweisungen eingesetzt werden dürfen.

Bei diesen Experimenten achten Sie bitte auf folgende mögliche Gefahren und machen Sie auch Ihre Schülerinnen und Schüler darauf aufmerksam:

- Brennpunkt der Lupe bei Bestrahlung durch die Sonne kontrolliert einsetzen, nicht auf das Auge lenken!
- Wegen der Blendgefahr für das Auge durch Lupe und Brennspiegel muss zumindest die Schülerin bzw. der Schüler, die/der den Spiegel fokussiert, unbedingt eine Sonnenbrille tragen und durch die Lehrkraft beaufsichtigt werden.
- Beim Erwärmen des Wassers nicht in den Brennspiegel schauen!
- Es besteht Verbrennungsgefahr und Brandgefahr beim Arbeiten mit Feuer. Vor der ersten Benutzung der Feuerzeuge sind diese von der Lehrkraft auf ordnungsgemäße Funktion zu überprüfen, insbesondere die Regulierung der Flammengröße.
- Stellen Sie sicher, dass keine Schäden an wasserempfindlichen Materialien und Geräten entstehen können.
- Wasserbehälter bereitstellen zum Löschen des Papierbrandes!

4.4 Benötigte Materialien

Sicherheitsrelevante Materialien und Geräte sind vor Aushändigung an die Schülerinnen und Schüler auf ihre ordnungsgemäße Funktion zu testen.

Für **eine** Schülergruppe werden folgende Materialien benötigt:

Die Schülerinnen und Schüler müssen Sonnenbrillen mitbringen.

Material	Anzahl
Digitalthermometer	1
Feuerzeug (wenn möglich ein Stabfeuerzeug) bzw. Streichhölzer	1
Kaffeelöffel	1
Klebeband	1 für die ganze Klasse
Lupe als Brennglas	1
Papier, schwarz, DIN A4	1
Reagenzglas aus Glas	1
Reagenzglasklammer aus Holz	1
Spiegel, konkav (als Brennspiegel)	1
Wünschenswert: Stativ mit Stativklammer. Alternativ können auch Bücher oder ein stabiles Trink- oder Konservenglas als Stativersatz dienen.	1
Teelicht	1
Wasser	nach Bedarf
Weißes Papier	1



Abb. 3: Geräte bzw. Materialien für eine Schülergruppe, beispielhafte Abbildung.

4.5 Aufräumen, Entsorgen, Recyceln

Fast alle verwendeten Geräte und Materialien sind wiederverwendbar. Daher sollten sie nach Beendigung des jeweiligen Experiments ordentlich aufgeräumt werden. So stellen Sie sicher, dass Sie bzw. Ihre Kolleginnen und Kollegen beim nächsten Einsatz alles schnell wiederfinden.

Geräte, die beim Experimentieren verschmutzt wurden, wie z. B. Becher, Schalen, Löffel, Reagenzgläser, sollten vor dem Zurücklegen erst gereinigt werden. Sinnvollerweise lässt man dies die Schülerinnen und Schüler gleich nach Beendigung des Experiments erledigen.

Stellen Sie zudem sicher, dass die Geräte wieder für den nächsten Einsatz betriebsbereit sind. Beispielsweise sind benutzte Akkus gleich aufzuladen (Auch bei längerer Nichtbenutzung ist das Aufladen der Akkus sinnvoll.).

Materialien, die nicht wiederverwendbar sind, wie z. B. gebrauchte pH-Messstäbchen oder Filterpapier, sollten fachgerecht entsorgt werden.

Die Entsorgung der in diesem Experiment anfallenden Abfälle kann über den normalen Hausmüll bzw. den Ausguss erfolgen.