

# Messungen zur Wärmewirkung der Sonnenstrahlung



# Messungen zur Wärmewirkung der Sonnenstrahlung

<b>1.</b>	<b>Notwendigkeit intelligenter Nutzung der Sonne .....</b>	<b>3</b>
<b>2.</b>	<b>Bestimmung der Solarkonstante.....</b>	<b>4</b>
2.1	Erläuterungen zur Solarkonstante .....	4
2.2	Experimentelle Bestimmung.....	5
2.2.1	Vorbereitungen.....	5
2.2.2	Durchführung.....	5
2.2.3	Messergebnisse und Berechnung der Bestrahlungsstärke.....	6
2.2.3.1	Messung am Vormittag.....	7
2.2.3.2	Messung am Mittag.....	7
2.2.4	Berechnung der Solarkonstante.....	8
<b>3.</b>	<b>Bau eines Sonnenkollektors .....</b>	<b>11</b>
3.1	Funktionsweise eines Sonnenkollektors .....	11
3.2	Vorbereitungen.....	11
3.2.1	Materialien .....	11
3.2.2	Versuchsaufbau .....	12
3.3	Durchführung .....	13
3.4	Auswertung .....	13
3.5	Verbesserungsvorschläge.....	14
3.5.1	Verschiedene Flüssigkeiten im Vergleich.....	14
3.5.2	Isolierung .....	15
3.5.3	Material des Wasserröhrchens .....	16
3.5.4	Veränderung der Geometrie.....	16
<b>4.</b>	<b>Solarkraftwerke .....</b>	<b>18</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>20</b>
	Quellenverzeichnis.....	20
	Abbildungsverzeichnis.....	21
	Tabellenverzeichnis.....	22

## 1. Notwendigkeit intelligenter Nutzung der Sonne

Schon im Jahr 2020 wird das Öl knapp, prognostiziert die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe<sup>1</sup>. Andere Studien sagen voraus, dass erst 2050 die Ölvorräte zur Neige gehen werden. Es gibt viele Diskussionen und Studien über dieses Thema und nur Wenige sind sich einig. Sicher ist nur eines und zwar, dass die Ölvorräte begrenzt sind und wir eines Tages ohne diesen fossilen Rohstoff auskommen müssen. Aber nicht nur das Öl wird knapp, auch andere Energieträger wie Kohle oder Erdgas wird es in der Zukunft nicht mehr ausreichend geben. So ist es nur sinnvoll, dass sich sowohl Wissenschaftler, als auch Politiker der ganzen Welt Gedanken machen, wie Energie eingespart werden kann, beziehungsweise welche anderen Energiequellen erschlossen werden können.

Einer dieser Energielieferanten ist so allgegenwärtig, dass wir ihn oft gar nicht als solchen erkennen: die Sonne. Sie liefert mit ihrer Strahlung fast ununterbrochen Energie, ohne dass wir es bemerken. Doch diese lässt sich noch sehr viel sinnvoller einsetzen. So gibt es heutzutage eine Vielzahl an Möglichkeiten, die Sonnenenergie zu nutzen, um Strom zu erzeugen oder einzusparen.

Am bekanntesten ist hier wahrscheinlich die Solarzelle. Sie erzeugt auf Grund physikalischer Effekte einen Elektronenfluss, der als Strom genutzt werden kann. Diese Photovoltaikzellen können mit relativ geringem Aufwand auf jedes Hausdach montiert werden und liefern an sonnigen Tagen Strom, der entweder vom eigenen Haushalt verbraucht wird oder in das öffentliche Stromnetz eingespeist werden kann. Auf diese Weise schützt man das Klima und spart zusätzlich noch Stromkosten. Im Jahr 2009 wurden auf deutschen Dächern knapp über 6000 GWh Strom<sup>2</sup> produziert und damit ist Deutschland der größte Nutzer von Photovoltaik Anlagen auf der Welt. Zum Vergleich: der Atomreaktor Isar 1 speiste 2007 knapp mehr als 7000 GWh ins deutsche Netz<sup>3</sup>. Somit wird jetzt bereits durch Solarzellen fast so viel Strom gewonnen wie durch einen Atomreaktor, allerdings völlig sauber, ohne Schadstoffe auszustoßen oder radioaktiven Müll zu produzieren. Bisher wird nur 1% des Jahresbedarfs durch Solarenergie gedeckt, doch wächst der Anteil jedes Jahr deutlich an. So waren es noch vor zwei Jahren nur 0,5% des Jahresstromverbrauchs.

---

<sup>1</sup> <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/0,1518,654001,00.html>

<sup>2</sup> <http://de.wikipedia.org/wiki/Solarstrom>

<sup>3</sup> [http://de.wikipedia.org/wiki/Kernkraftwerk\\_Isar](http://de.wikipedia.org/wiki/Kernkraftwerk_Isar)

Doch Photovoltaik-Zellen sind nicht die einzige Möglichkeit um mit Hilfe der Sonne die Umwelt zu schonen. Es gibt bereits jetzt dutzende verschiedene Möglichkeiten, die Sonnenenergie sinnvoll zu nutzen und so hoffe ich, dass in Zukunft auf umweltschädliche Energielieferanten wie Kohlekraftwerke völlig verzichtet werden kann, noch bevor uns die Begrenztheit der Rohstoffe dazu zwingt. Eine dieser Möglichkeiten sind Sonnenkollektoren die auf Hausdächer installiert werden, um für warmes Wasser im Haushalt zu sorgen. Auf diese Art gehe ich später noch genauer ein und erkläre auch, wie man einen solchen Kollektor selbst bauen kann. Zuvor jedoch beschäftige ich mich noch mit der Sonnenstrahlung im Allgemeinen und bestimme durch eigene Messungen den Wert der Solarkonstante.

## **2. Bestimmung der Solarkonstante**

### **2.1 Erläuterungen zur Solarkonstante**

Die Solarkonstante  $S_0$  beträgt  $1367^4$  W/m<sup>2</sup>. Dieser Wert wurde von der Weltorganisation für Meteorologie im Jahr 1982 so festgelegt. Sie sagt aus, welche mittlere Sonnenleistung auf einen extraterrestrischen Quadratmeter Fläche trifft. Die Atmosphäre schwächt die Bestrahlungsstärke nämlich deutlich, je nachdem wie lange der Weg durch die Atmosphäre ist, den das Licht zurücklegen muss.

So kann man in unseren Breiten im Sommer bei perfekten Bedingungen kaum mehr als 1000 W/m<sup>2</sup> erwarten. Der Wert  $S_0$  für die Solarkonstante gilt außerdem nur für den mittleren Abstand zwischen Erde und Sonne. Im Perihel, also dem Punkt, wenn die Erde der Sonne am nächsten ist, beträgt die Bestrahlungsstärke  $1420^5$  W/m<sup>2</sup> während sie im Aphel, dem sonnenfernsten Punkt, nur 1325 W/m<sup>2</sup> beträgt. Die Leistung der Sonne selbst schwankt so gut wie gar nicht. In der Gesamtstrahlung weicht sie um weniger als 0.1% vom eigentlichen Wert ab. Im Wellenlängenbereich von UV- und besonders bei Röntgenstrahlung kann sich der Wert jedoch um bis zu zwei<sup>6</sup> Größenordnungen ändern.

---

<sup>4</sup> <http://www.solarkonstante.de/sonne/sonnendaten.htm>

<sup>5</sup> <http://www.cad-hausplanung.de/solarkonstante-strahlungsleistung-encyclopedia-65.html>

<sup>6</sup> <http://de.wikipedia.org/wiki/Solarkonstante>

## 2.2 Experimentelle Bestimmung

### 2.2.1 Vorbereitungen<sup>7</sup>

Es gibt mehrere Möglichkeiten die Solarkonstante experimentell zu bestimmen: eine der einfachsten ist, die Erwärmung einer Metallplatte durch die Sonnestrahlung genauer zu betrachten. Man benötigt dazu lediglich ein kleines, nicht zu dünnes, quaderförmiges Metallstück, Styroporplatten, welche man in jedem Baumarkt kaufen kann und ein digitales Thermometer. Am besten färbt man die Oberseite des Metallblocks schwarz um die Reflexion des Lichts möglichst gering zu halten. Aus den Styroporplatten wird eine kleine Kiste gebaut, die das Metallstück, bis auf die Oberseite, komplett umschließt. So verhindert man, dass der Metallblock viel von seiner Energie an die umliegende Luft abgeben kann. Die Kiste dient hier also als Isolator, wofür sich Styropor sehr gut eignet, da es ein schlechter Wärmeleiter ist. Nun muss man noch in den Metallblock seitlich ein kleines Loch bis in die Mitte des Blocks bohren, denn dort im Inneren des Metalls wird die Temperatur gemessen. So geht man sicher, dass man die mittlere Temperatur des Metalls misst, da an der Oberfläche eine deutlich höhere Temperatur herrschen wird als am Boden. Es wird davon ausgegangen, dass der Metallblock zum Boden hin linear kühler wird. Somit misst man in der Mitte des Blocks die Durchschnittstemperatur, die für die Rechnung benötigt wird.

### 2.2.2 Durchführung

Um möglichst gute Ergebnisse zu erhalten, sollte man den Versuch an einem sehr sonnigen, wolkenfreien Tag durchführen. Für die Berechnung der Solarkonstante werden zwei Messwerte benötigt, somit muss man den Versuch zweimal bei möglichst identischen Wetterbedingungen durchführen, also am besten am Morgen und am Mittag desselben Tages. Man stellt den Versuchsaufbau so in die Sonne, dass die Sonne senkrecht auf die Metalloberfläche trifft.

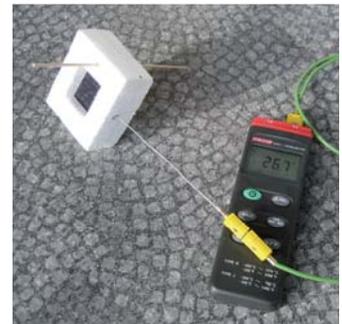


Abb. 1

---

<sup>7</sup> Fokus Physik 8, Seite 171

Dabei hilft es, einen Stab senkrecht durch das Styropor zu bohren und den Aufbau so auszurichten, dass der Stab keinen Schatten wirft. Nun misst man den Temperaturanstieg des Metallblocks innerhalb einer bestimmten Zeit. Ideal ist es, 2-3 Minuten zu messen, da so Messungenauigkeiten verringert werden. Jeglicher Schatten, verursacht durch Wolken oder anderes, verfälscht die Messergebnisse gewaltig.

Darüber hinaus muss man wissen, in welchem Winkel die Sonne zur Erdoberfläche steht. Dies kann man mit Hilfe der Schattenlänge ermitteln, die durch die Sonne entsteht. Am einfachsten ist es, ein Geodreieck mit einer der kurzen Seiten auf eine waagrechte Fläche zu stellen, sodass die andere kurze Seite in den Himmel ragt. Wenn man das Geodreieck so ausrichtet, dass es in dieselbe Richtung zeigt wie der Schatten, ist gewährleistet, dass der Schattenspende genau senkrecht zur Tischoberfläche steht. Nun misst man die Schattenlänge und die Länge der in die Höhe ragenden Kante um dann über den Tangens den Sonneneinfallswinkel zu berechnen.

### **2.2.3 Messergebnisse und Berechnung der Bestrahlungsstärke**

Man kann deutlich beobachten, dass sich der Metallblock relativ gleichmäßig erwärmt. Mit Hilfe der gesammelten Daten kann man nun die Bestrahlungsstärke berechnen. Bei diesem Versuch wird die Strahlungsenergie  $E_s$  in innere Energie umgewandelt, somit kann man die Formel für die Erwärmung eines Körpers,  $E_e = cm\Delta T$ , in die Formel für die Bestrahlungsstärke,  $B = \frac{E_s}{\Delta t A}$ , einsetzen. Somit ergibt sich:

$$B = \frac{cm\Delta T}{\Delta t A}$$

Die Masse und die Oberfläche des Metallblocks lassen sich einfach mit einer Waage und einem Maßband bestimmen. Die spezifische Wärmekapazität  $c$  findet sich für fast jedes Material in Formelsammlungen oder entsprechender Fachlektüre.

Bei dem durchgeführten Versuch sind folgende Werte bereits gegeben:

Masse des verwendeten Aluminiumblocks	$m = 0,03\text{kg}$
Bestrahlte Oberfläche des Aluminiumblocks	$A = 1,32 \cdot 10^{-3}\text{m}^2$
Spezifische Wärmekapazität von Aluminium	$c_{\text{Alu}} = 0,896 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

### 2.2.3.1 Messung am Vormittag

Bei einer exemplarischen Messung am Vormittag erwärmte sich der Aluminiumblock in 3 Minuten um 5,4 Kelvin.

$$\Delta T = 5,4K \quad \Delta t = 180s$$
$$B = \frac{cm\Delta T}{\Delta t A} = \frac{0,896 \frac{kJ}{kg} \cdot 0,03kg \cdot 5,4K}{180s \cdot 1,32 \cdot 10^{-3} m^2} = 0,61 \frac{kW}{m^2}$$

Die Sonne leistete also 610 Watt pro Quadratmeter.

Der Schatten des 14,9 cm hohen Geodreiecks war 21 cm lang.

$$\tan \alpha = \frac{h_{\text{Geodreieck}}}{l_{\text{Schatten}}} \quad \alpha = \tan^{-1} \frac{14,9cm}{21cm} = 35,36^\circ$$

Somit ergibt sich ein Einstrahlungswinkel von 35,36°.

Die folgende Tabelle 1 fasst die Messergebnisse vom Vormittag und die daraus berechneten Werte zusammen.

$\Delta t$ [s]	$\Delta T$ [K]	$l_{\text{Schatten}}$ [cm]	$h_{\text{Geodreieck}}$ [cm]	$B$ [ $\frac{kW}{m^2}$ ]	$\alpha$ [°]
180	5,4	21,0	14,9	0,61	35,36
180	5,2	22,0	14,9	0,59	34,11
180	4,5	19,3	14,9	0,51	37,67
180	4,8	23,4	14,9	0,54	32,49
180	5,1	17,5	14,9	0,58	40,41

Tabelle 1 Messergebnisse der Vormittagsmessungen

### 2.2.3.2 Messung am Mittag

Am Mittag desselben Tages erwärmte sich der Aluminiumblock um 7 Kelvin innerhalb von 3 Minuten.

$$\Delta T = 7,0K \quad \Delta t = 180s$$
$$B = \frac{cm\Delta T}{\Delta t A} = \frac{0,896 \frac{kJ}{kg} \cdot 0,03kg \cdot 7,0K}{180s \cdot 1,32 \cdot 10^{-3} m^2} = 0,79 \frac{kW}{m^2}$$

Die Sonne leistete also mit 790 Watt pro Quadratmeter deutlich mehr als noch zuvor.

Der Schatten des 14,9 cm hohen Geodreiecks war diesmal nur 7,8 cm lang.

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{14,9\text{cm}}{7,8\text{cm}} = 62,37$$

Der Bestrahlungswinkel beträgt nun 62,37°.

Man kann also deutlich erkennen, dass bei steilerem Einstrahlungswinkel auch die Bestrahlungsstärke deutlich zunimmt, wie man in Tabelle 2 erkennt.

$\Delta t$ [s]	$\Delta T$ [K]	$l_{\text{Schatten}}$ [cm]	$h_{\text{Geodreieck}}$ [cm]	$B$ [ $\frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$ ]	$\alpha$ [°]
180	7,0	7,8	14,9	0,79	62,37
180	6,7	9,3	14,9	0,76	58,03
180	5,9	9,9	14,9	0,67	56,40
180	6,4	8,9	14,9	0,72	59,15
180	6,5	8,1	14,9	0,74	61,47

Tabelle 2 Messergebnisse der Mittagsmessungen

#### 2.2.4 Berechnung der Solarkonstante<sup>8</sup>

Da die Solarkonstante  $S_0$  aussagt, welche Sonnenleistung pro Quadratmeter auf die Atmosphäre trifft, die gemessenen Bestrahlungsstärken aber nur in Bodennähe gelten, muss berücksichtigt werden, dass die Atmosphäre die Leistung der Sonne erheblich vermindert. Diese Schwächung entlang der Strecke  $d$ , die das Licht innerhalb der Luftschichten zurücklegt, wird durch das exponentielle Absorptionsgesetz beschrieben.

$$B = S_0 \cdot e^{-\mu \cdot d}$$

$\mu$  ist hierbei der Schwächungsindex. Weil die Strahlung sowohl die sehr dichten, als auch die weniger dichten Luftschichten durchdringt, kann man vereinfachend annehmen, dass die Atmosphäre gleichmäßig aufgebaut ist, sodass man mit einem konstanten, mittleren Koeffizienten  $\mu$  rechnen kann.

---

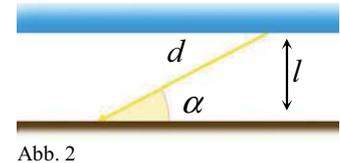
<sup>8</sup> Berechnung gemäß:

[http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web\\_ph12/versuche/12solarkonstante/solarkonstante.htm](http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph12/versuche/12solarkonstante/solarkonstante.htm)

Die Dicke der zu durchdringenden Schicht hängt stark vom Einfallswinkel ab, denn je flacher der Sonnenstrahl einfällt, desto länger wird die Strecke  $d$ , die er innerhalb der Atmosphäre zurücklegen muss.

Mit Hilfe des Sinus kann man die zu durchdringende Schicht in Abhängigkeit des Winkels  $\alpha$  und der Atmosphärendicke  $l$  ausdrücken.

$$d = \frac{l}{\sin \alpha}$$



Um mit dem Absorptionsgesetz rechnen zu können, werden beide Seiten logarithmiert und das eben berechnete  $d$  eingesetzt:

$$\ln B = \ln S_0 - \mu \cdot d = \ln S_0 - \frac{\mu \cdot l}{\sin \alpha}$$

Nach der Umformung, dass keine Brüche mehr enthalten sind, erhält man diese vorläufig endgültige Gleichung:

$$\ln B \cdot \sin \alpha = \ln S_0 \cdot \sin \alpha - \mu \cdot l$$

Nun bleibt aber immer noch ein Problem, denn in der Gleichung sind mit der Solarkonstante  $S_0$  und dem Schwächungsindex  $\mu$  immer noch zwei Unbekannte enthalten.

Um die Solarkonstante  $S_0$  berechnen zu können, muss man das  $\mu$  aus der Gleichung entfernen. Aus diesem Grund haben wir vorhin mehrere Versuche gemacht, um Bestrahlungsstärke und Einfallswinkel zu messen. Denn bei allen Versuchsreihen hat sich weder die Dicke der Atmosphäre, welche ja konstant ist, noch der Schwächungsindex verändert.

$$\ln B_1 \cdot \sin \alpha_1 = \ln S_0 \cdot \sin \alpha_1 - \mu \cdot l$$

$$\ln B_2 \cdot \sin \alpha_2 = \ln S_0 \cdot \sin \alpha_2 - \mu \cdot l$$

Deshalb ist es wichtig, dass sich während den zwei, zu unterschiedlichen Zeiten, durchgeführten Messungen die äußeren Bedingungen möglichst wenig verändern, weswegen diese auch an ein und demselben Tag durchgeführt werden sollten. Denn zum Beispiel eine Dunstschicht würde den Schwächungsindex stark beeinflussen. Da man bei den besprochenen Experimenten den Schwächungsindex als konstant annimmt, kann man diesen gleichsetzen.

Dadurch kann eine Gleichung von der anderen subtrahiert werden und man erhält:

$$\ln B_1 \cdot \sin \alpha_1 - \ln B_2 \cdot \sin \alpha_2 = \ln S_0 \cdot \sin \alpha_1 - \ln S_0 \cdot \sin \alpha_2$$

Nun muss man diese Gleichung lediglich nach  $S_0$  auflösen:

$$\ln B_1 \cdot \sin \alpha_1 - \ln B_2 \cdot \sin \alpha_2 = \ln S_0 (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2)$$

$$\ln S_0 = \frac{\ln B_1 \cdot \sin \alpha_1 - \ln B_2 \cdot \sin \alpha_2}{\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2}$$

$$S_0 = e^{\frac{\ln B_1 \cdot \sin \alpha_1 - \ln B_2 \cdot \sin \alpha_2}{\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2}}$$

Nach dieser Umformung sind nun nur noch gegebene Variablen enthalten und man kann die Solarkonstante berechnen. Mit den Werten einer exemplarischen Messung ergibt sich folgende Rechnung:

$$S_0 = e^{\frac{\ln 0,61 \frac{kW}{m^2} \cdot \sin 35,36^\circ - \ln 0,79 \frac{kW}{m^2} \cdot \sin 62,37^\circ}{\sin 35,36^\circ - \sin 62,37^\circ}} = 1,286 \frac{kW}{m^2}$$

Der gemessene Wert von 1,286 kW/m<sup>2</sup> weicht also nur geringfügig von dem festgelegten Wert von 1,367 kW/m<sup>2</sup> ab. Die Abweichung beträgt nicht einmal 6%. Diese Ungenauigkeit hat vor allem mit der nicht exakten Messung und dem Wärmeverlust an die Umwelt zu tun. Hier kommt auch der Effekt zu tragen, dass bei der Messung am Vormittag die Außentemperatur geringer ist als am Mittag, wodurch bei der ersten Messung mehr Energie an die Umgebung abgesondert wird. Zwar wird der Metallblock durch das Styropor relativ gut isoliert doch gibt er trotzdem noch Energie an die Umwelt ab. Auch muss man davon ausgehen dass nicht 100% der Sonnenstrahlung von dem Metallblock absorbiert, sondern ein Teil reflektiert wird.

Bei anderen Messungen ergaben sich folgende Solarkonstanten:

$B_1 \left[ \frac{kW}{m^2} \right]$	$\alpha_1 [^\circ]$	$B_2 \left[ \frac{kW}{m^2} \right]$	$\alpha_2 [^\circ]$	$S_0 \left[ \frac{kW}{m^2} \right]$
0,61	35,36	0,79	62,37	1,286
0,59	34,11	0,76	58,03	1,245
0,51	37,67	0,67	56,4	1,421
0,54	32,49	0,72	59,15	1,165
0,58	40,41	0,74	61,47	1,469

Tabelle 3 Messergebnisse und daraus berechnete Solarkonstanten

### **3. Bau eines Sonnenkollektors**

#### **3.1 Funktionsweise eines Sonnenkollektors**

Ein Sonnenkollektor benutzt Sonnenenergie um eine Flüssigkeit, zum Beispiel Wasser, zu erwärmen. Bei folgendem Versuchsaufbau trifft die Sonnenstrahlung auf eine große Spiegelfläche, die das Licht auf eine kleine Röhre konzentriert. Durch die stärkere Strahlungsleistung erwärmt sich das Wasser im Röhrchen. Mit dieser Technik könnte man den eigenen Haushalt mit warmem Wasser versorgen, ohne auf herkömmliche Energien zurückgreifen zu müssen. Auf diese Weise kann viel Energie gespart werden, wodurch die Umwelt erheblich entlastet würde.

#### **3.2 Vorbereitungen**

##### **3.2.1 Materialien<sup>9</sup>**

Um einen Sonnenkollektor zu bauen, benötigt man mehrere Materialien. Als Grundfläche benutzt man zwei quadratische Styroporplatten mit einer Seitenlänge von 50 cm. Die eine Styroporplatte sollte ca. 1,5 cm dick sein, die andere darf auch dicker sein, um für etwas Stabilität zu sorgen. Weiter sind sechs 30 cm lange Plexiglasrohre mit einem Innendurchmesser von 3,6 cm und dazu passende Gummistopfen mit einem Loch in der Mitte erforderlich. Zusätzlich dazu braucht man 6 dünne Glasröhrchen und 3-4 m PVC- oder Silikonschlauch. Da die Stopfen auf beiden Seiten des Plexiglasrohres überstehen und die Röhrchen noch soweit aus den Stopfen herausragen müssen, sodass man den Schlauch darauf befestigen kann, müssen die Glasröhrchen mindestens 6 cm länger sein als die Plexiglasrohre. Hier sind sie 37,5 cm lang und haben einen Innendurchmesser von 5 mm. Dabei ist darauf zu achten, dass der Schlauch auf den Glasröhrchen gut hält, und diese durch das Loch der Gummistopfen passen. Jetzt fehlt noch eine selbstklebende Spiegelfolie die man in vielen Bastelwarengeschäften findet und eine Miniaturpumpe, wie sie zum Beispiel im Modellbau verwendet wird. Zum Schluss benötigt man noch ein digitales Thermometer und ein Gefäß, um das Wasser aufzusammeln, also zum Beispiel ein Becherglas oder eine kleine Wasserflasche.

---

<sup>9</sup> Fokus Physik 8, Seite 172

### 3.2.2 Versuchsaufbau

Aus der 1,5 cm dicken Styroporplatte werden, wie in Abbildung 3 zu sehen, sechs gleichgroße Streifen mit einem Teppichmesser herausgeschnitten und zwar so groß, dass die Plexiglasrohre samt Stopfen gerade hineinpassen, also 4 cm breit und 32 cm lang. Die fertig ausgeschnittene Platte wird nun auf die andere Styroporplatte geklebt und bildet damit die Bodenplatte für das Experiment. Wichtig ist es, einen

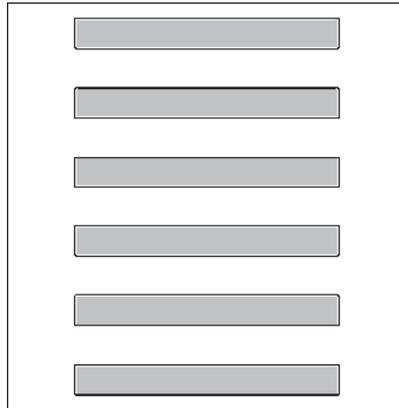


Abb. 3

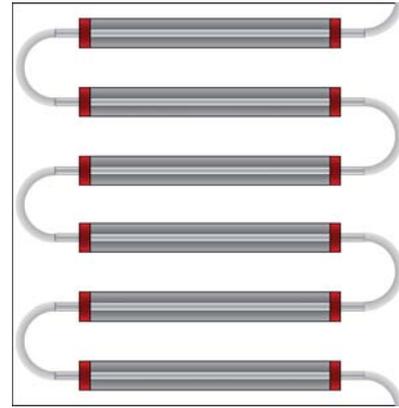


Abb. 4

Styroporkleber zu verwenden, andere Kleber fressen sich teilweise in das Styropor und zerstören es. Während der Kleber trocknet, kann man bereits die Spiegelröhren bauen. Dazu schneidet man Folienstücke aus, die so breit sind, dass die Hälfte der Röhre innen bedeckt wäre, also 5,6 cm. Diese Streifen werden nun mit der Klebeseite nach außen um eine weiche Stange gewickelt und fixiert. Diese Stange wird anschließend in die Plexiglasröhre eingeführt, um die Folie von innen fest an die Röhre zu pressen. So entstehen die Spiegelröhren, die das Licht später reflektieren sollen.

Wenn alle Plexiglasrohre mit Folie beklebt sind, kann man die Stopfen mit den Glasröhrchen befestigen. Dazu steckt man ein Glasröhrchen mit einem Gummistopfen auf der einen Seite in die Spiegelröhre und verschließt diese dann mit einem zweiten Stopfen. Damit der Gummi leichter auf das Glas rutscht, feuchtet man beides zuvor an. Wenn der Styroporkleber getrocknet ist, werden die Plexiglasrohre mit der beklebten Seite zum Boden hin in den ausgeschnittenen Öffnungen mit doppelseitigem Klebeband befestigt. Dann werden jeweils zwei nebeneinander liegende Röhren, wie in der Abbildung 4 gezeigt, mit einem kurzen Stück PVC-Schlauch verbunden. Die Schläuche dürfen beim Verbinden auf keinen Fall knicken, da sonst keine Flüssigkeit mehr fließen kann. Das eine Ende wird mit der Pumpe verbunden, während das andere Schlauchende zum Wassergefäß geht. Von dort führt dann noch ein Schlauch zur Pumpe, um den Kreislauf zu schließen.

### 3.3 Durchführung

Um den Versuch möglichst gut durchführen zu können, eignet sich am besten ein wolkenfreier Sommertag. Der Versuchsaufbau wird schräg gestellt, sodass das Sonnenlicht senkrecht darauf strahlt. Um leicht zu erkennen, wann die Sonnenstrahlen senkrecht darauf fallen, empfiehlt es sich einen Holzstab, z.B. einen Schaschlikspieß, senkrecht in das Styropor zu stecken. Wenn dieser Stab direkt auf die Sonne zeigt, wirft er keinen Schatten und somit ist der Versuchsaufbau perfekt zur Sonne hin ausgerichtet.



Abb. 5 Senkrecht zur Sonne ausgerichteter Sonnenkollektor

Nach diesen Vorarbeiten füllt man das Gefäß mit Wasser und aktiviert die Pumpe. Die Glasröhrchen füllen sich nun mit Wasser und man überprüft, dass sich genügend Flüssigkeit im Kreislauf befindet. Während das Wasser die ersten Male durch den Kreislauf fließt, muss darauf geachtet werden, dass der Versuchsaufbau vollkommen dicht ist und kein Wasser aus kleinen Lecks austritt.

Wenn alles passt, kann man nun den Versuch mehrere Stunden durchführen. Wichtig ist dabei nur, dass der Versuchsaufbau möglichst immer perfekt zur Sonne ausgerichtet ist, man muss also regelmäßig in möglichst kleinen Zeitabständen den Aufbau nachjustieren. Zwar bewirken kleinere Abweichungen keinen allzu großen Fehler, jedoch nimmt dadurch die Leistung des Versuchs stetig ab.

### 3.4 Auswertung

Der Versuch funktioniert leider nicht so gut wie erwartet. Bei mehrfachen Messungen erreichte das Wasser im Sonnenkollektor auch nach mehreren Stunden in der prallen Sonne kaum mehr als 38° C. Wegen diesem minimalen Wirkungsgrad wäre dieser Sonnenkollektor also keinesfalls verwendbar, um für warmes Wasser im Haushalt zu sorgen. Das Wasser braucht viel zu lange, um sich zu erwärmen und selbst dann erreicht es keine nutzbaren Temperaturen.

### **3.5 Verbesserungsvorschläge**

#### **3.5.1 Verschiedene Flüssigkeiten im Vergleich**

Wasser ist zwar die naheliegendste Flüssigkeit für einen Schulversuch, aber bei weitem nicht die bestmögliche. Wasser hat eine spezifische Wärmekapazität von  $4181 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$ <sup>10</sup>.

Das bedeutet, es wird eine Energie von 4181 J benötigt, um ein Kilogramm Wasser um ein Kelvin zu erwärmen. Andere Flüssigkeiten benötigen dazu teilweise deutlich weniger. Manche dieser Flüssigkeiten sind nur schwierig zu beschaffen und deswegen für den Schulversuch sinnlos. Jedoch gibt es auch im Haushalt Flüssigkeiten mit niedrigeren Wärmekapazitäten. Eine davon ist zum Beispiel Olivenöl. Dieses hat nur eine knapp halb so große Wärmekapazität wie Wasser, nämlich  $1970 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$ <sup>11</sup>, wodurch man deutlich weniger Energie benötigt um es zu erwärmen, sodass man in dem Versuch eine stärkere Erwärmung registrieren kann. So erwärmte sich die gleiche Menge Olivenöl in 20 min von  $23^\circ\text{C}$  auf  $42,7^\circ\text{C}$ <sup>12</sup>, während Wasser bei gleichen Bedingungen nur  $32,1^\circ\text{C}$  erreichte. Diese deutlich stärkere Erwärmung hängt jedoch auch mit der Färbung des Öls zusammen. Während Wasser durchsichtig ist und die Sonnenstrahlung größtenteils durch das Wasser einfach hindurchgeht, absorbiert die dunklere Farbe des Öls mehr Strahlung, wodurch auch eine stärkere Erwärmung resultiert. Dunkel gefärbtes Wasser erreichte bei selbigem Versuch eine Temperatur von  $35,3^\circ\text{C}$ . Während die Färbung der Flüssigkeit direkten Einfluss hat muss die spezifische Wärmekapazität mit Vorsicht bewertet werden. Zwar erwärmt sich die Flüssigkeit schneller, da weniger Energie benötigt wird, jedoch wird beim Abkühlen auch weniger Energie abgegeben. Somit ändert die spezifische Wärmekapazität nichts an der transportierten Energie, was es sinnlos macht, zu versuchen, mit dem „heißen“ Öl Wasser zu erwärmen, da dieses auch nur maximal die Temperatur erreichen würde, die es auch direkt durch die Sonne erreicht. Somit ist das Olivenöl gut geeignet, um den Wärmeeffekt deutlicher zu zeigen, aber nicht um die Sonne effektiver zu nutzen.

---

<sup>10</sup> [http://www.schweizer-fn.de/stoff/wkapazitaet/v2\\_wkapazitaet\\_fluessigkeit.htm](http://www.schweizer-fn.de/stoff/wkapazitaet/v2_wkapazitaet_fluessigkeit.htm)

<sup>11</sup> [http://www.schweizer-fn.de/stoff/wkapazitaet/v2\\_wkapazitaet\\_fluessigkeit.htm](http://www.schweizer-fn.de/stoff/wkapazitaet/v2_wkapazitaet_fluessigkeit.htm)

<sup>12</sup> Eigene Messung

### 3.5.2 Isolierung

Ein Hauptproblem des Versuchsaufbaus ist die fast komplett fehlende Isolierung. Zwar werden die Plexiglasrohre von unten durch das Styropor isoliert doch geht dort sowieso kaum Energie verloren, da die Sonnenstrahlung von den Spiegeln reflektiert wird und somit nicht durch die Rohre hindurch kommt. Viel problematischer ist die Isolierung an vielen anderen Stellen. Eine davon ist das Wassergefäß. Dort wird das Wasser gesammelt, während es nicht durch den Kreislauf fließt. Während das Wasser sich dort befindet, wird es nicht mehr durch Sonnenstrahlung erwärmt, sondern kühlt sich ständig ab. Da das Gefäß nur aus einer dünnen Glas- bzw. Kunststoffschicht besteht, wird die Wärme an die umliegende Luft abgegeben. Ein weiteres Problem des Wassergefäßes ist, dass dadurch, dass es nach oben hin geöffnet ist, das Wasser ohne Probleme verdunstet und so das Wasser weiterhin abkühlt. Da auch die Schläuche nicht isoliert sind, sinkt auch dort die Temperatur des Wassers. Folglich gibt es nur einen sehr kurzen Bereich, in dem das Wasser wirklich erwärmt wird. Das Wasser legt sogar einen längeren Weg in den Schläuchen zurück als in den Heizrohren. Somit hat das Wasser genug Zeit sich zwischen den Heizrohren wieder abzukühlen.

Bei einem Parallelversuch wurde getestet wie stark sich das Wasser in einem einzelnen Rohr erhitzt, ohne dass das Wasser durch den Kreislauf fließt, in dem es sich abkühlen würde. Hierzu wurde ein Heizrohr senkrecht gestellt und das untere Ende des Glasröhrchens mit Knetmasse verschlossen. Anschließend wurde es mit Wasser gefüllt und zur Sonne ausgerichtet. Nach derselben Zeit, in dem der Sonnenkollektor das Wasser auf 38° erwärmte, war das Wasser in der einzelnen Röhre, ohne große Verlustquellen, bereits 50,4° C<sup>13</sup> warm. Dies war dann auch hier das Maximum.

Durch eine verbesserte Isolierung ließe sich also auch die Effizienz des Sonnenkollektors deutlich anheben. Es wäre deshalb besonders wichtig wärmeisolierte Schläuche zu verwenden, oder zumindest diese mit in das Styropor einzubetten.

---

<sup>13</sup> Eigene Messung

### 3.5.3 Material des Wasserröhrchens

Das Glasröhrchen in dem das Wasser fließt ist in mehreren Hinsichten ungeeignet. Das meiste Licht, das auf das Glasröhrchen trifft, geht einfach durch das Wasser hindurch ohne es effektiv zu erwärmen. Somit geht viel Energie verloren, die auch genutzt werden könnte, um das Wasser zu erhitzen. Ein großes Problem des Glases ist es ebenso, dass auch das Glas zu einem gewissen Grad das Licht reflektiert. Ein Teil der Sonnenstrahlung, besonders der, der seitlich und somit sehr flach auf das Röhrchen trifft, wird abgelenkt und gelangt nicht zum Wasser, um es zu erwärmen. Es geht also auch hier nochmals ein nicht zu vernachlässigender Teil der Sonnenenergie verloren.

Um dieses Problem zu lösen, wäre es geschickter, ein mattschwarzes Metallrohr zu verwenden. Die Sonnenstrahlung würde von der rauhen Oberfläche fast nicht mehr reflektiert werden, sodass die Röhre die Energie des Lichts fast vollständig absorbieren könnte. Dadurch würde sich das Metallrohr stärker erwärmen und könnte mehr Energie an das Wasser abgeben. Außerdem wird verhindert, dass die Strahlung einfach durch das Wasser hindurchgeht.

### 3.5.4 Veränderung der Geometrie

Die konzentrische Ausrichtung des Glasröhrchens im Spiegelrohr ist zwar durch die Gummistopfen leicht umzusetzen und diese Anordnung klingt eigentlich sehr logisch, ist jedoch für den Versuch völlig ungeeignet! Während man erwartet, dass durch den großen Spiegel viel Sonnenstrahlung auf das Glasröhrchen reflektiert wird, werden die Sonnenstrahlen durch den Spiegel regelrecht um das Glasröhrchen herumgeleitet. Nur die Strahlung die direkt auf das Röhrchen in der Mitte trifft, würde von dem Spiegel auf das

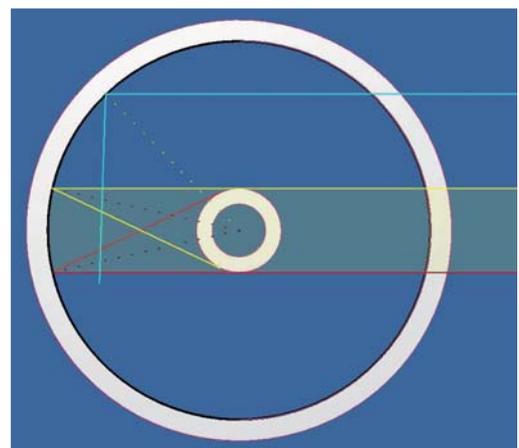


Abb. 6 Schlechte Platzierung des Glasröhrchens.

Wasser reflektiert werden. Die gesamte Sonnenstrahlung die darüber und darunter auf den Spiegel trifft wird mehrmals reflektiert und geht dann wieder aus dem Plexiglasrohr hinaus, ohne Energie an das Wasser abgeben zu haben. Somit treffen nur die

mittleren 8 mm des Lichts das Röhrchen. Der Sonnenkollektor kann das Wasser auf diese Weise also eigentlich fast nicht erwärmen. Ein Großteil der beobachteten Erwärmung resultiert daraus, dass sich die Luft im Inneren des Rohrs durch die reflektierten Sonnenstrahlen erwärmt. Diese Art der Erwärmung entspricht dem Treibhauseffekt, wie man ihn gezielt in Gewächshäusern einsetzt um ein gutes Wachstum der Pflanzen zu sichern.

Um ideale Reflexion zu erhalten müsste man die Form des Spiegelrohrs ändern. Solche Spiegel, wie sie auch in großen Solarkraftwerksanlagen verwendet werden, nennt man aufgrund ihrer Querschnittsform Parabolspiegel. Sie haben die Eigenschaft, dass sie alle Sonnenstrahlen auf eine Linie konzentrieren. Positioniert man dort das Glasröhrchen, würde man eine ideale Erwärmung erhalten. Parabolrinnenspiegel haben aber noch einen weiteren Vorteil. Dadurch, dass alle Strahlen in der Mitte des Glasröhrchens zusammenkommen, treffen sie gleichzeitig auch senkrecht auf die Außenseite des Röhrchens. Somit verringert man die Reflexion der Strahlen am Glasröhrchen fast vollständig. Leider sind solche Parabolspiegel sehr aufwändig herzustellen und deswegen auch sehr teuer.

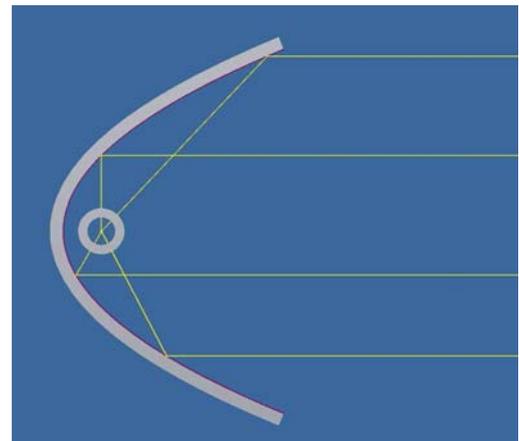


Abb. 7 ideale Parabelform

Um in unserem Versuchsaufbau zu verhindern, dass die meiste Sonnenstrahlung ungenutzt aus dem Rohr hinausgeht reicht es, wenn man das Glasröhrchen nicht zentral, sondern direkt an dem Spiegel befestigt. Zwar ist diese Lösung nicht ideal aber zumindest treffen dann alle Sonnenstrahlen auf das Röhrchen, die vorher vorbeigegangen sind. In Abbildung 8 wird deutlich sichtbar, dass sowohl die Strahlen, die knapp neben dem Glasröhrchen auftreffen, als auch die Strahlen weit außen so reflektiert werden, dass sie das Wasser erwärmen. Selbst die Sonnenstrahlen die ganz außen im Rohr auf den Spiegel treffen werden mehrmals durch den Spiegel so reflektiert, dass sie zum

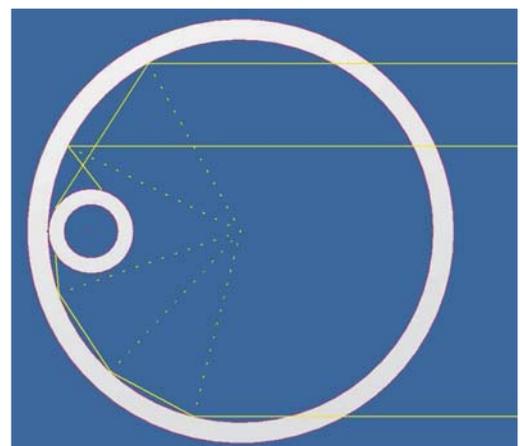


Abb. 8 Effektive Ausnutzung der Sonnenstrahlung durch spiegelnahe Glasröhrchen Platzierung.

Schluss auf das Röhrchen treffen. Die Spiegelfläche wird also zu 100% ausgenutzt und das Wasser wird von fast fünfmal so vielen Strahlen getroffen wie bei konzentrischer Orientierung. Der einzige Nachteil dieser Anordnung gegenüber Parabolspiegeln ist der, dass Sonnenstrahlen, die flach auf das Glasröhrchen treffen, von diesem reflektiert werden und so das Wasser nicht erwärmen können.

Bei dem bereits in 3.5.2 erwähnten Versuch, in dem sich das Wasser in einer einzelnen Spiegelröhre auf 50,4° C erwärmt hatte, erreichte die Spiegelröhre mit nicht konzentrischer Orientierung sogar 55,5° C.

#### 4. Solarkraftwerke

Auch wenn der Sonnenkollektor im Versuchsaufbau nicht effizient funktioniert hat, kann man trotzdem deutlich erkennen, was für ein Potenzial in dieser Form der Energie und Wärmegewinnung liegt. Mit den genannten Verbesserungen könnte ein ernstzunehmendes Miniatur-solarkraftwerk entstehen.



Abb. 9 Parabolrinnenkraftwerk in Andalusien

Es existieren bereits mehrere Solarkraftwerke weltweit, die auf ähnliche Weise, nur im großen Stil, Strom erzeugen und so völlig abgasfrei eine Energiequelle nutzen, die unerschöpflich ist. „Andasol“ ein Solarrinnenkraftwerk in der Provinz Granada, in Spanien, wurde erst 2009 fertig gestellt und versorgt jetzt jährlich 200000 Menschen mit sauberem, umweltschonendem Strom<sup>14</sup>. Zwar werden weltweit immer noch hunderte Atom- und Kohlekraftwerke gebaut, doch gibt es bereits eine Vielzahl an Firmen, darunter die Münchner Rück, Siemens, E.ON<sup>15</sup>, und zehn weitere Firmen, die versuchen das Projekt „Desertec“<sup>16</sup> zu verwirklichen. Es ist geplant in der Sahara ein

---

<sup>14</sup> [http://www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-1/86\\_read-17179](http://www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-1/86_read-17179)

<sup>15</sup> [http://de.wikipedia.org/wiki/Trans-Mediterranean\\_Renewable\\_Energy\\_Cooperation](http://de.wikipedia.org/wiki/Trans-Mediterranean_Renewable_Energy_Cooperation)

<sup>16</sup> <http://www.desertec.org/de/konzept/technologien>

riesiges Parabolrinnenkraftwerk zu bauen, welches Energie für fast die ganze Welt liefern soll. Spiegel in Parabelform sollen die extreme Sonnenstrahlung in der Wüste auf Röhren konzentrieren, in denen sich flüssige Salze auf mehrere hundert Grad erhitzen. Damit soll Wasser verdampft werden, welches Generatoren antreibt und somit Strom erzeugt. Wenn dieses Projekt verwirklicht werden sollte, würde sich die CO<sub>2</sub> Problematik drastisch reduzieren, da die alten Kohlekraftwerke abgeschaltet werden könnten, was einen enormen Schritt im Kampf gegen den Klimawandel bedeuten würde. Die Kraftwerksanlagen könnten in Zukunft auch weiter vergrößert werden, da bisher nur ein kleiner Teil der Sahara genutzt werden soll. Ich hoffe deshalb, dass genügend Geldmittel für diese einmalige Investition aufgebracht werden können, um dieses fantastische Projekt zu verwirklichen.

## Anhang

### Quellenverzeichnis

**Fokus Physik** - Gymnasium Bayern 8. Jahrgangsstufe,  
1. Auflage, 1. Druck, Cornelsen Verlag, Berlin (2006)

<http://www.spiegel.de> (24. Jan. 2010)

Prognose über Rückgang der fossilen Brennstoffe

<http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/0,1518,654001,00.html>

<http://de.wikipedia.org> (24. Jan. 2010)

Solarstrom – Kernkraftwerk Isar – Solarkonstante – Desertec

<http://www.solarkonstante.de> (24. Jan. 2010)

Werte und Definition der Solarkonstante

<http://www.solarkonstante.de/sonne/sonnendaten.htm>

<http://www.cad-hausplanung.de> (25. Jan. 2010)

Werte der Solarkonstante im Abhel und Perihel

[www.cad-hausplanung.de/solarkonstante-strahlungsleistung-encyclopedia-65.html](http://www.cad-hausplanung.de/solarkonstante-strahlungsleistung-encyclopedia-65.html)

<http://leifi.physik.uni-muenchen.de> (25. Jan. 2010)

Berechnung der Solarkonstante

[leifi.physik.uni-muenchen.de/web\\_ph12/versuche/12solarkonstante/solarkonstante.htm](http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph12/versuche/12solarkonstante/solarkonstante.htm)

<http://www.schweizer-fn.de> (25. Jan. 2010)

Wärmekapazitäten von Flüssigkeiten

[http://www.schweizer-fn.de/stoff/wkapazitaet/v2\\_wkapazitaet\\_fluessigkeit.htm](http://www.schweizer-fn.de/stoff/wkapazitaet/v2_wkapazitaet_fluessigkeit.htm)

<http://www.dlr.de> (25. Jan. 2010)

Solarrinnenkraftwerk Andasol in Spanien

[http://www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-1/86\\_read-17179](http://www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-1/86_read-17179)

<http://www.desertec.org> (25. Jan. 2010)

Bauvorhaben und Funktion von Desertec

<http://www.desertec.org/de/konzept/technologien>

## Abbildungsverzeichnis

Deckblatt: [http://www.tuebingen-macht-blau.de/bilddatenbank/sonne\\_600.jpg](http://www.tuebingen-macht-blau.de/bilddatenbank/sonne_600.jpg)  
(25. Jan. 2010)

Abb.1: eigenes Foto

Versuchaufbau zur Messung der Bestrahlungsstärke

Abb.2: eigene Grafik

Veranschaulichung des Einfallwinkels

Abb.3: eigene Grafik

Veranschaulichung der auszuschneidenden Fläche

Abb.4: eigene Grafik

Veranschaulichung des Kollektoraufbaus

Abb.5: eigenes Foto

Senkrecht zur Sonne ausgerichteter Sonnenkollektor

Abb.6: eigene Grafik

Strahlengang im Spiegelrohr, schlechte Platzierung des Röhrchens

Abb.7: eigene Grafik

Strahlengang in einem Parabolspiegel

Abb.8: eigene Grafik

Strahlengang im Spiegelrohr, gute Platzierung des Röhrchens

Abb.9: <http://www.wissenschaft.de/wissenschaft/hintergrund/300602.html>

Kollektoren im Parabolrinnenkraftwerk in Andalusien, Spanien (25. Jan. 2010)

### **Tabellenverzeichnis**

Tabellen enthalten eigene Messwerte:

Tabelle 1: Messergebnisse der Vormittagsmessungen

Tabelle 2: Messergebnisse der Mittagsmessungen

Tabelle 3: Messergebnisse und daraus berechnete Solarkonstanten