



Input Konzentration von Sonnenlicht

Warum Sonnenlicht konzentrieren?

In vielen Fällen möchten wir die Sonne als Wärmequelle verwenden (siehe 'Input Thermische Solarenergie'). Ein schwarzes Objekt in der Sonne wird warm, aber für gewisse Anwendungen nicht heiss genug. Um die erzeugte Hitze zu erhöhen, können wir das einfallende Sonnenlicht mit Linsen oder Spiegeln 'konzentrieren'.

Auch ohne Lichtkonzentration heizen z.B. Solarkollektoren Wasser auf 60°C auf. Das ist zwar das Maximum, was heisses Wasser aus dem Hahn haben sollte, doch zum Kochen reicht diese Temperatur kaum. Deshalb verfügen viele Solarkocher über konzentrierende Spiegelflächen.

Auch die grossen thermischen Solarkraftwerke für Strom funktionieren nur mit Temperaturen über 100°C, da sie zuerst Wasser in Dampf umwandeln (d.h. das Wasser 'kochen') um mit diesem Dampf eine Turbine anzutreiben. Aus physikalischen Gründen ist ein solches Kraftwerk umso effizienter, je heisser es betrieben wird.

In der Praxis finden wir also viele solare Lichtkonzentratoren in Solarkochern (siehe 'Input Kochen und Dörren mit der Sonne') und thermischen Solarkraftwerken.

Was ist der Konzentrationsfaktor?

Der Konzentrationsfaktor ist das Verhältnis der Fläche, welche die Sonnenstrahlen auffängt und umgelenkt weiterleitet zur Fläche, auf welcher das Licht konzentriert wird¹. Wenn z.B. der Spiegel eines Solarkochers eine Auffangfläche von 1m² hat und alles aufgefangene Licht auf einen Kochtopf mit 0.1m² schwarzer Oberfläche konzentriert, so erreicht dieser Kocher einen Konzentrationsfaktor von $1 / 0,1 = 10$.

Was ist der Brennpunkt?

Theoretisch gibt es Spiegelformen, die alles Licht auf einen einzelnen (unendlich kleinen) Punkt konzentrieren. Diesen Punkt nennen wir Brennpunkt oder 'Fokus'. Andere Geometrien bündeln das Licht auf eine Linie, in diesem Fall sprechen wir von einer Fokuslinie.

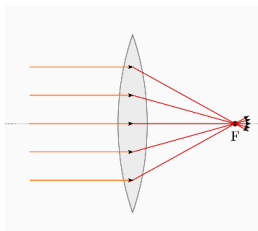
In Wirklichkeit werden wir eine perfekte Bündelung nie erreichen. Das Licht wird auf eine bestimmte Fläche konzentriert. Es ist also sinnvoller, von Fokusfläche zu sprechen. Gerade bei Solarkochern wäre es gar nicht sinnvoll, das Licht auf einen sehr kleinen Punkt zu bündeln. Wir würden nur ein Loch in den Kochtopf brennen! Um das Essen nicht anzubrennen, bevorzugen wir stattdessen, das Licht auf möglichst viel Oberfläche des ganzen Kochtopfs zu konzentrieren.

¹ Achtung: Alle Flächen werden rechtwinklig zu den Sonnenstrahlen gemessen, d.h. es gilt die Fläche, die die Sonne 'sieht'.

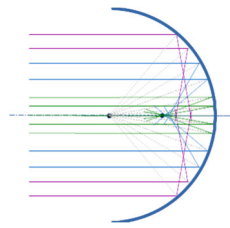
Linsen oder Spiegel?

Um das Licht zu konzentrieren, müssen wir einzelne Lichtstrahlen 'umlenken', damit möglichst viele davon auf die gleiche Fläche fallen. Sowohl Linsen wie auch Spiegel erfüllen diese Funktion, Lichtstrahlen umzuleiten. Bei einer Linse liegt der Punkt, an dem die Strahlen zusammenfallen, immer *hinter* der Linse (von der Lichtquelle aus gesehen) – Linsen arbeiten in 'Transmission'. Mit Spiegeln werden die Strahlen normalerweise vor dem Spiegel konzentriert – Spiegel arbeiten in 'Reflektion'.

Aus Gewichts- und Kostengründen werden in der Solartechnik fast nur (Metall-)Spiegel verwendet. Im weiteren Text schauen wir uns deshalb diese Möglichkeit genauer an.



Eine Linse: Das Licht kommt von links, der Brennpunkt liegt *hinter* der Linse.



Ein gekrümmter Spiegel: Das Licht kommt von links, der Brennpunkt liegt *vor* dem Spiegel.

Formen von Reflektoren

Vorbemerkung: In der Vorstellung der Reflektorformen betrachten wir zur Vereinfachung die Spiegelform jeweils als perfekt, obwohl wir wissen, dass dies nur theoretisch möglich ist. Wir sprechen deshalb von Brennpunkt und Fokuslinie.

2D oder 3D?

Wenn wir ein flaches Spiegelblech von Hand biegen, erreichen wir, dass das Licht in einer Richtung fokussiert wird, in der dazu rechtwinkligen Richtung hingegen nicht. Wir erreichen damit, das Licht von einer Fläche auf eine Linie zu konzentrieren, jedoch nicht auf einen Punkt. In diesem Fall sprechen wir von zweidimensionaler Fokussierung.

Wird das Blech so verformt, dass es in allen Richtungen fokussiert ('Suppenschüsselform'), dann können wir das Licht auf einem Punkt zusammenbringen. Das nennen wir dreidimensionale Fokussierung. Wir werden ein Blech nicht von Hand in eine solche Form bringen können; mit einer starken mechanischen Presse dürfte das jedoch möglich sein.

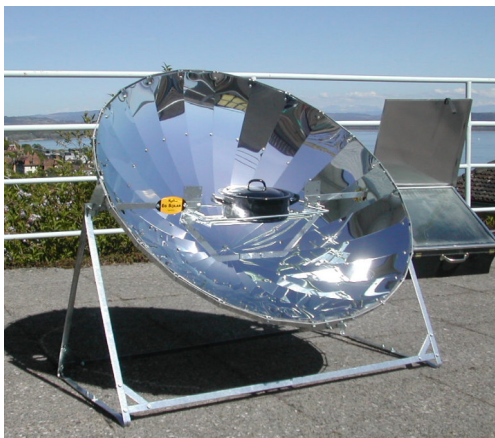
Mit 3D-Fokussierung können wir das Licht stärker konzentrieren als mit 2D. Handgefertigte Spiegel von Solarkochern erreichen meist Konzentrationsfaktoren bis 10, während mit 3D-Formen eine bis zu 40-fache Konzentration möglich ist².

² Dies sind keine Berechnungen, sondern praktische Werte, welche die unterschiedliche Effizienz der Bauformen belegen.

Flache oder gebogene Spiegel?

Möchten wir *Glasspiegel* verwenden, sind diese herstellungsbedingt fast immer flach und lassen sich nur minim verformen (bevor sie brechen). Deshalb werden wir versuchen, aus einzelnen flachen Spiegelementen eine Form zu erzeugen, die sich der gewünschten Reflektorform annähert. Ein Brennpunkt ist somit auch theoretisch nicht mehr möglich, die mögliche Fokusfläche ist mindestens so gross wie der Lichtfleck jedes einzelnen Spiegelements.

Viele Reflektoren verwenden zur Vereinfachung der Herstellung längliche Spiegelblechelemente, die in einer Richtung durchgebogen werden. Aus einer Vielzahl an solchen 2D-Spiegelementen wird eine grössere 3D-Form nachgeahmt. Die *Breite* jedes Spiegelblechs bestimmt in diesem Fall die minimale Grösse der Fokusfläche.



Dieser Solarkocher des Typs SK 10 besteht aus 24 einseitig geformten Spiegelblechen, die sich zusammen einer Parabolform annähern.

Vorstellung der wichtigsten Reflektorformen

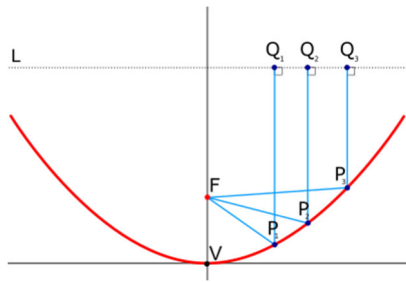
Im Folgenden stellen wir einige Reflektorformen vor. Im '[Experiment Konzentration von Licht mit Spiegeln](#)' können solche Formen ausprobiert werden, im '[Experiment Solar Darts](#)' wird gelernt, wie die Konzentration von Lichtflecken die Temperatur in der Fokusfläche stark erhöht.

Parabolspiegel

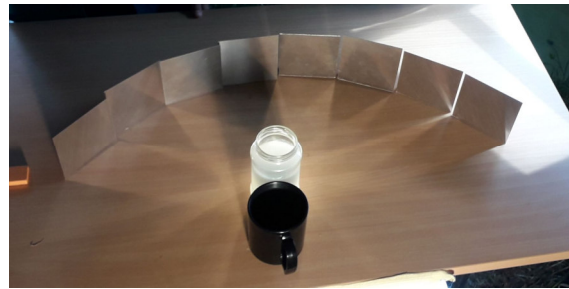
Die Parabel ist diejenige Form, welche parallele Lichtstrahlen auf einen einzelnen Punkt konzentrieren kann³.

Ein dreidimensionaler Spiegel dieser Form ('Suppenschüsselform') wird normalerweise 'Parabolspiegel' genannt. Bei Solarkochern können wir mit dieser Form hohe Temperaturen erreichen. Zudem ist die runde Form der Fokusfläche gut angepasst an die Form eines Kochtopfs.

³ Geometrisch wird sie durch die Formel $y = a \cdot x^2$ beschrieben. Die Fokallänge, d.h. die Länge zwischen dem Zentrum des Spiegels und dem Fokuspunkt, ist dabei $1/(4 \cdot a)$.



Ein Spiegel in Form einer Parabel reflektiert alle parallel einfallenden Lichtstrahlen (Q) auf einen Punkt (F).



Die Parabelform wird im 'Experiment Konzentration von Licht mit Spiegeln' aufgestellt.

Rinnenkollektor

Ein Rinnenkollektor verwendet eine zweidimensionale Parabelform, z.B. ein durchgebogenes Spiegelblech. Der Fokus liegt auf einer Linie. In der praktischen Anwendung wird das Licht meist auf ein schwarzes Rohr konzentriert. Rinne und Rohr können sehr lang sein, um so Verluste an den Enden der Rinne zu verringern.

Diese Form ist sehr gebräuchlich für Solarkraftwerke, da sie technisch einfacher zu realisieren ist als eine dreidimensionale Form, insbesondere in der Grösse, die für ein Kraftwerk benötigt wird.⁴ Zur Erhöhung des Wirkungsgrads wird das Fokusrohr in den Kraftwerken mit einer sogenannten selektiven Oberfläche versehen und mit einem Rohr aus Quarzglas isoliert.

Für Solarkocher war die Rinnenform lange Zeit eher unbeliebt, weil der Kochtopf eine längliche Form haben muss, was sehr ungewöhnlich (und zum Kochen etwas unpraktisch) ist. Seit auf dem Markt (sehr effiziente) vakuumisolierte Glasröhren speziell für Kocher aufgetaucht sind (sie sind dicker und viel kürzer als die Röhren für solare Warmwasserkollektoren), sind auch rinnenförmige Solarkocher im Handel ('Vakuumröhrenkocher'). Besonders geeignet für Würste und 'Baguettes' :-).



Ein Rinnenkollektor eines Solarkraftwerks.



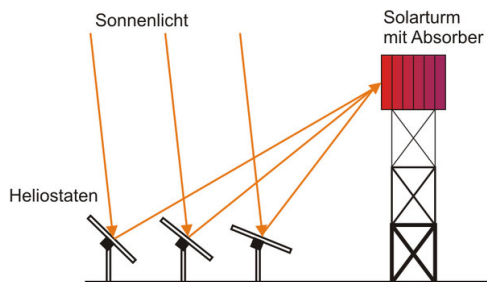
Ein Vakuumröhrenkocher.

⁴ Ein Beispiel: Jeder der 205'000 Reflektoren des Solarkraftwerks Andasol-3 in Spanien hat eine Fläche von 12m x 8m.

Heliostatenfelder

Heliostaten sind einzelne flache Reflektoren auf einem Ständer, die (laufend) so ausgerichtet werden, dass das gespiegelte Licht auf den gewünschten Fokus zielt. Im 'Experiment Solar Dart' entsprechen die Spiegel der Teilnehmenden einer Gruppe von Heliostaten.

Eine Gruppe von Heliostaten ahmt nicht eine grössere Geometrie (z.B. eine Parabel) nach, sondern kann fast beliebig aufgestellt werden. Das ist für sehr grosse Anlagen praktisch (Turmkraftwerke), bei denen die einzelnen Spiegel alle auf dem Boden aufgeständert sind, statt dass eine riesige Schüssel in die Höhe ragt. Der Brennpunkt liegt auf einem Turm und wird nicht verändert. Jedes einzelne Spiegelement wird so eingestellt und bewegt, dass sein Licht immer auf diesen Fokus fällt.



Skizze eines Heliostatenfelds.



'Solar Dart'-Spiel am Pfadi Folk Festival 2023: Die Spiegel wurden wie bei einem Kraftwerk auf den Boden gestellt und das Sonnenlicht in einem Brennpunkt (dem Temperaturfühler des Thermometers) konzentriert.

Spezialfall Sonnenlicht

In der Solartechnik verwenden wir Geometrien, die auch von Geräten wie z.B. Projektoren oder Beamern verwendet werden. Verglichen mit diesen Anwendungen (mit künstlicher Lichtquelle) hat die Sonne einige spezielle Eigenschaften (der 'Input Licht' liefert weitere Informationen zu diesem Thema).

Fast wie ein Laser

Die Sonne ist eine Lichtquelle, die extrem weit entfernt ist. Deshalb kommen ihre (direkten) Strahlen bei uns auf der Erde fast parallel an. In dieser Hinsicht sind Sonnenstrahlen fast wie Laserlicht!

Diese Eigenschaft des Sonnenlichts macht die Berechnung der Reflektorformen einfacher. Ein Leuchtmittel (Glühbirne oder LED) hingegen strahlt in verschiedene Richtungen; um sein Licht zu konzentrieren, braucht es andere Reflektorformen als bei Sonnenlicht.

Direktes und diffuses Licht

Das Sonnenlicht kommt auf der Erdoberfläche in zwei Formen an: als direkte und als diffuse Strahlung. Die diffuse Strahlung kommt aus der Richtung der Wolken, die über den ganzen Himmel verteilt sind, d.h. sie trifft in den verschiedensten Winkeln auf unsere Solarkocher und -reflektoren.

Alle oben beschriebenen Geometrien und Strahlenwege (Linien in unseren Grafiken) beziehen sich auf das direkte Sonnenlicht! Das diffuse Licht trifft aus einem anderen Winkel auf die Spiegel und es wird mit grosser Wahrscheinlichkeit am Kochtopf oder am Fokusrohr vorbeigelenkt. Mit anderen Worten: Nur das direkte Sonnenlicht kann konzentriert werden!

In der Schweiz kommt das Sonnenlicht über das Jahr gemittelt ca. zur Hälfte direkt an, zur anderen Hälfte indirekt. An einem sonnigen Sommertag können dies über 90% direktes Licht sein, an einem bewölkten Tag fast 100% diffuses Licht. (Auch) aus diesem Grund können wir nur an sonnigen Tagen mit unseren Parabolspiegeln kochen (diese können nur direktes Licht verwerten), während Solarpanels das ganze Jahr lang Strom produzieren – die Panels können auch das diffuse Licht verwerten.

Solarkraftwerke mit konzentrierenden Rinnenkollektoren werden aus den gleichen Gründen fast nur in Wüstengebieten gebaut. In der Schweiz sind photovoltaische Solarpanels sehr viel effizienter.

Der Sonne 'nachführen'

Ein eindeutiger Nachteil der Sonne besteht darin, dass sie sich 'über den Himmel bewegt'⁵. Deshalb müssen wir unsere (konzentrierenden) Solargeräte immer wieder neu ausrichten bzw. der Sonne 'nachführen'. Je stärker ein Solarreflektor konzentriert, desto öfter⁶ müssen wir diese Korrekturbewegung durchführen.

Die scheinbare Bahn der Sonne über den Himmel hat einen Anteil (der Azimut), der sich den ganzen Tag in die gleiche Richtung bewegt: Auf der Nordhalbkugel sehen wir dies als eine Bewegung 'von links nach rechts'. Ein anderer Anteil (die Höhe) bewegt sich am Vormittag nach oben, am Nachmittag nach unten.

Um diese zwei Bewegungen zu kompensieren, muss ein dreidimensionaler Solarreflektor in zwei Achsen nachgeführt werden. In der automatischen Variante braucht das zwei Motoren⁷. Zweidimensionale, lange Rinnenkollektoren kommen dagegen mit der Nachführung einer einzigen Achse aus.

⁵ Natürlich wissen wir, dass dies nur eine scheinbare Bewegung ist. In Wirklichkeit dreht sich die Erde.

⁶ Bei manuellen Parabolspiegelkochern wie z.B. dem Modell SK 14 genügt es, jede halbe Stunde nachzuführen. Die stärker konzentrierenden 'Schefflerkocher' verfügen über eine automatische Nachführung, weil diese sonst alle paar Minuten durchgeführt werden müsste.

⁷ Nur eine ganz spezifische Rotationsvorrichtung kann dies mit einem einzigen Motor erledigen. Dazu muss die Rotationsachse des ganzen Reflektors mit der Ausrichtung der Erdachse übereinstimmen. Ein 'Schefflerspiegel' benützt genau diese Vorrichtung.