

30 Lichtkonzentratoren

Thema

So wie man die geometrische Optik gewöhnlich lernt, scheint es ihr einziges Ziel zu sein, optische Abbildungen zu beschreiben. Dabei soll sich möglichst viel Licht, das von einem Gegenstandspunkt ausgeht, in einem Bildpunkt vereinigen. Unter den Vorgängen, bei denen es darum geht, Licht von einer Stelle zu einer anderen zu bringen, ist die optische Abbildung aber nur ein Spezialfall.

Wenn man sich auf die Forderung beschränkt, mit dem Licht Energie von einer Stelle zu einer anderen zu transportieren, ohne dass dabei eine optische Abbildung realisiert werden soll, sind die Bedingungen, die man an das optische System stellen muss, nicht einfach nur lockerer als bei der abbildenden Optik. Sie sind ganz anderer Art. Man hat es zu tun mit der "nichtabbildenden Optik", die zuständig ist, wenn es um Beleuchtung oder um die Konzentration oder das Sammeln von Licht geht [1].

Das wichtigste Bauelement der nichtabbildenden Optik ist der Lichtkonzentrator. Er dient dem Zweck, Licht, das auf eine Fläche des Inhalts A_1 trifft, so weiterzuleiten, dass es auf die kleinere Fläche A_2 gelangt. Man nennt den Quotienten

$$c = \frac{A_1}{A_2}$$

den Konzentrationsfaktor.

Wenn der Weg des Lichtbündels von A_1 nach A_2 umkehrbar ist, wenn also keine Entropie erzeugt wird, so gilt die Abbe'sche Bedingung:

$$A_1 \cdot \sin^2 \alpha_1 = A_2 \cdot \sin^2 \alpha_2$$

Hier ist α der halbe Öffnungswinkel der Lichtbündels an einer beliebigen Stelle der durchstrahlten Fläche. Die Gleichung sagt uns, dass man die Fläche, die das Licht durchströmt nur dadurch verkleinern kann, dass man den Öffnungswinkel vergrößert. Die Unordnung im Ort kann also nur auf Kosten der Unordnung der Richtungen verkleinert werden, oder in anderen Worten: die Entropie bleibt während das Licht von A_1 nach A_2 geht konstant.

Der Konzentrationsfaktor wird in diesem Fall:

$$c = \frac{A_1}{A_2} = \frac{\sin^2 \alpha_2}{\sin^2 \alpha_1}$$

Da α_2 maximal 90° werden kann, ergibt sich für die maximal erreichbare Konzentration

$$c_{\max} = \frac{1}{\sin^2 \alpha_1}$$

Fragen wir zum Beispiel danach, wie stark man das Sonnenlicht hier auf der Erde konzentrieren kann. Wir sehen die Sonne unter einem Winkel von etwa $0,5^\circ$; es ist also $\alpha = 0,25^\circ$. Daraus folgt

$$c_{\max} \approx 50\,000$$

Ein gutes Objektiv erreicht nur etwa 10% dieses Wertes.

Für diffuses Licht ist $\alpha_1 = 90^\circ$ und c_{\max} wird gleich eins; es lässt sich also nicht konzentrieren.

Das Gerät

Wir wollen hier nicht den theoretisch besten Konzentrator realisieren, denn mit einer ganz primitiven Version erreicht man bereits einen Konzentrationsfaktor von 90% des theoretischen Maximums, also viel mehr als mit einem teuren Objektiv. Es ist kein Gerät für ein Demonstrationsexperiment. Jeder Student oder Schüler soll es selbst bauen. Aus silbern reflektierendem Geschenkpapier macht man einen kegelförmigen Trichter. Auf der einen Seite hat er eine große Öffnung, auf der anderen eine kleine. Die kleine hat einen Durchmesser von etwa 0,5 cm, Abbildungen 1 und 2.

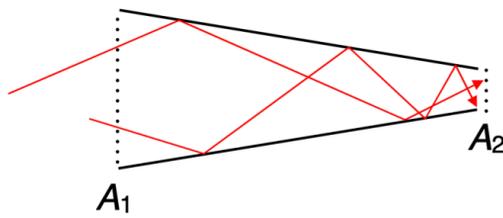


Abb. 1. Verlauf einiger Lichtstrahlen



Abb. 2. Einfacher Lichtkonzentrator aus Geschenkpapier

Abbildung 3 zeigt drei Versionen eines Konzentrators. Der linke ist der theoretische bestmögliche. Er wurde aus Plexiglas hergestellt. Der in der Mitte ist einfach kegelförmig und wurde auf der Drehbank aus Aluminium hergestellt. Man kann ihn verwenden etwa um Sonnenlicht, das mit einem großen Hohlspiegel vorkonzentriert wurde, noch stärker zu konzentrieren, sodass man sehr hohe Temperaturen erreicht. Der rechte ist noch einmal der oben beschriebene Konzentrator aus Geschenkpapier.



Abb. 3. Links: Bestmöglicher Konzentrator aus Plexiglas; Mitte: Kegelförmiger Konzentrator aus Aluminium; rechts: Primitive Version aus Geschenkpapier

Der Versuch

Man steht in einem Innenraum in einem gewissen Abstand vom Fenster, und zwar so, dass man ein Stück des Himmels sieht.

Man hält nun den Konzentrator direkt vor ein Auge und orientiert ihn so, dass er einen Raumwinkelbereich ausschneidet, der dem sichtbaren Teil des Himmels entspricht. Man nimmt nun wahr, dass der ganze Raumwinkel, den das Auge erfasst, genau so gleichmäßig hell aussieht, wie das Stück Himmel, das man direkt sieht. Das Licht des Himmels kommt jetzt aus dem ganzen vom Auge wahrgenommenen Raumwinkel von 2π , d.h. dem vorderen Halbraum.

Was man daraus lernen kann

Licht ist in mancher Hinsicht für thermodynamische Betrachtungen besser geeignet als das so beliebte ideale Gas.

Die Konstanz des Produktes $A \cdot \sin^2 \alpha$, die so genannte Étendue, ist Ausdruck der Erhaltung der Entropie. Wenn im Lichtbündel Absorption oder Streuung stattfindet, nimmt die Étendue zu, was ein Zeichen dafür ist, dass die Entropie erzeugt wird.

Es gibt für die Konzentration von Licht eine obere Grenze, die durch den zweiten Hauptsatz gegeben ist.

[1] T. Wütscher, H. Hauptmann und F. Herrmann, *Which way does the light go?*, Am. J. Phys. **70**, 599-606 (2002)
DOI: 10.1119/1.1450570