



Brücken für den Physikunterricht

Herausgegeben von Raimund Girwidz und Thomas Rubitzko

Zu den Artikeln der Reihe „Experiment des Monats“ von Jearl Walker, erschienen zwischen 1978 und 1990 in der Zeitschrift „Spektrum der Wissenschaft“, veröffentlichen wir Brückentexte, um die Inhalte der „Experimente“ für den Schulunterricht verfügbar zu machen.

Lochkamera

Zu „Photographieren mit der Lochkamera“, Spektrum der Wissenschaft 1/1982, S. 113

Von Thomas Rubitzko und Raimund Girwidz

7. September 2007

Jearl Walkers Artikel

Zum Fotografieren benötigt man im einfachsten Fall nicht mehr als eine Dose mit Loch. Doch die Physik hierzu ist interessant. Der Artikel erläutert, welche Lochgröße bei welcher Bildweite Bilder mit gewünschter Auflösung ergibt. Neben relativ einfachen Gesetzen der geometrischen Optik ist Wissen über die Beugung des Lichts an den Rändern eines Lochs bedeutsam, wenn man eine Kamera mit guter Auflösung bauen will. Er betrachtet ergänzend dazu auch Abbildungsfehler von Löchern wie die chromatische Aberration oder den Astigmatismus schiefer Bündel. Des Weiteren werden praktische Tipps gegeben, wie eine Lochkamera gefertigt werden kann oder wie sie dann für Weitwinkelaufnahmen umgebaut werden kann. Am Ende zeigt Walker, welche Eigenschaften Bilder eines hell leuchtenden Gegenstandes haben, die nicht mit einer Lochblende, sondern mit einem kleinen undurchsichtigen Fleck auf einer transparenten Folie erzeugt werden.

- Themengebiet:** Optik, Verknüpfung von geometrischer Optik und Wellenoptik
- Klassenstufe:** geometrische Optik ab Klasse 7, Wellenoptik Oberstufe
- Zentrale Inhalte:** Bildentstehung bei der Abbildung mit Löchern, Abbildungsgleichung einer Lochkamera, Optimierung der Lochgröße, Beugung, Blende, Belichtungszeit

Einige Grundlagen kurz zusammengestellt

Geometrische Optik (Abb. 1):

- Von jedem Punkt eines Gegenstandes gehen Lichtstrahlen in alle Richtungen aus.
- Sich kreuzende Strahlen durchdringen sich ungestört.
- Strahlen, die von einem Punkt ausgehen und durch ein Loch gehen, ergeben einen Bildfleck, der bei einem Lichtweg parallel zur Optischen Achse die Form des Loches hat.
- Ein Gegenstandspunkt, der unendlich weit entfernt ist, ergibt einen Bildfleck, der die gleiche Größe wie das Loch hat.
- Die Bildflecken zweier eng benachbarter Gegenstandspunkte überlappen sich abhängig vom Lochdurchmesser.
- Je größer die Überlappung der Bildflecken ist, desto unschärfer ist das Bild.
- Je kleiner das Loch, desto geringer ist die Überlappung.
- Bilder von Gegenständen setzen sich aus den Bildflecken aller Gegenstandspunkte zusammen.
- Die Bilder sind seitenverkehrt und stehen auf dem Kopf.
- Die Abbildungsgleichung der Lochkamera ergibt sich zu

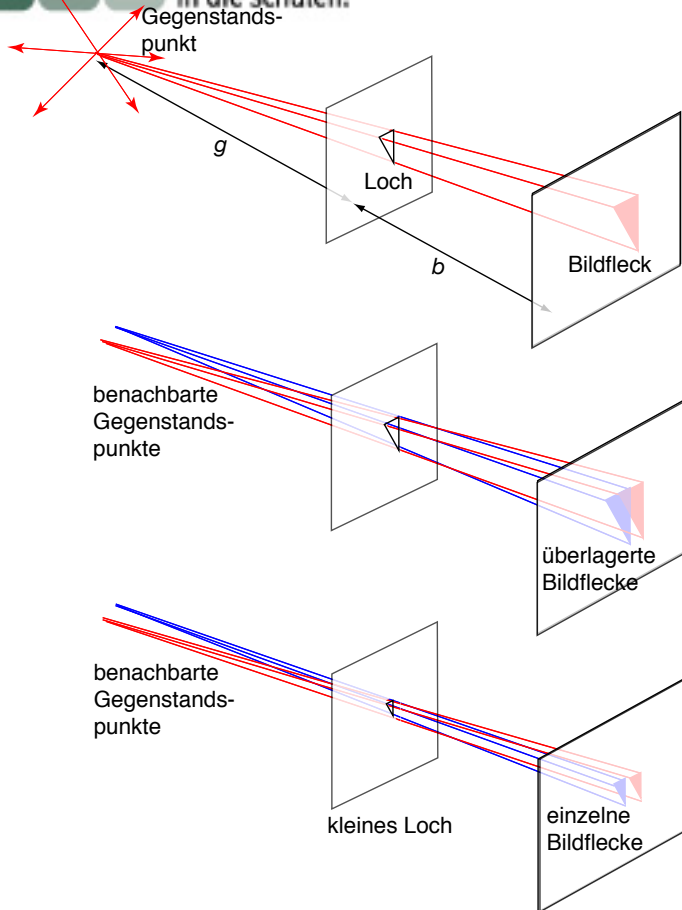


Abb. 1: Lichtweg einzelner Gegenstandspunkte

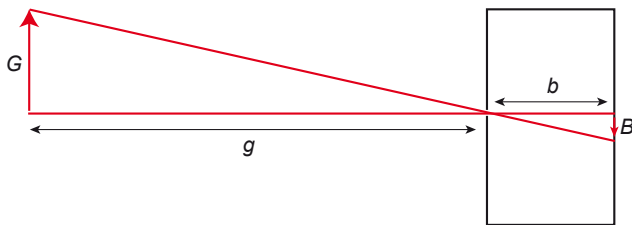


Abb. 2: Grundlage zur Abbildungsgleichung der Lochkamera

$$\tan \gamma = \frac{G}{g} = \frac{B}{b}$$

mit der Gegenstandsgröße G , Gegenstandsweite g , Bildgröße B und Bildweite b .

- Bei einer Verdoppelung der Bildweite oder einer Halbierung des Lochdurchmessers viertelt sich die Bestrahlungsstärke (d. h. die Strahlungsleistung pro Flächeneinheit) des Bildflecks.

Wellenoptik (Abb. 3):

- Licht wird aufgrund seiner Welleneigenschaften gebeugt, wenn es durch ein Loch fällt. (Dieser Effekt gewinnt mit abnehmendem Lochradius zunehmend an Bedeutung.)
- Der Abstand der Beugungsringe auf dem Schirm wird bei ab-

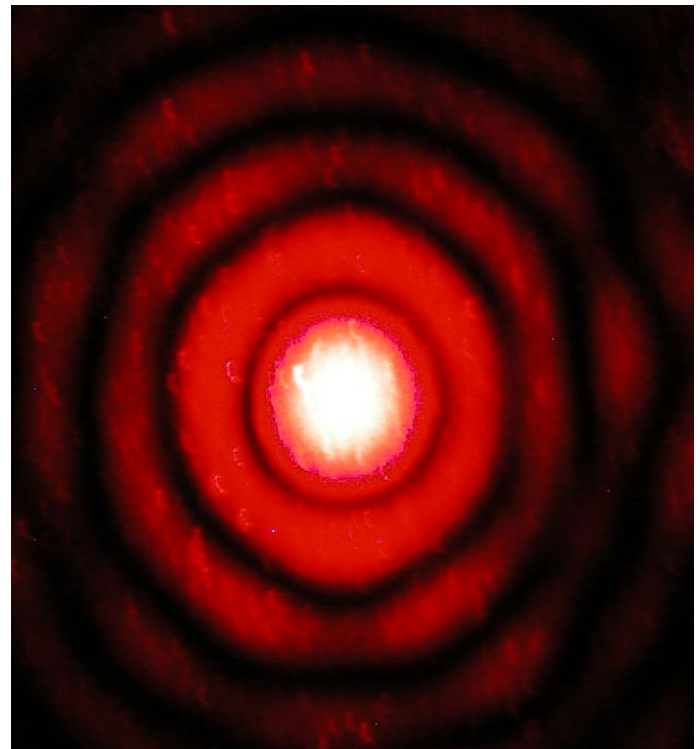


Abb. 3: Beugungsmuster eines aufgeweiteten Laserstrahls an einem Loch

nehmender Lochgröße größer. (Dadurch überlagern sich die Bildflecke immer mehr.)

- Je kleiner das Loch ist, desto größer ist die von der Beugung stammende Unschärfe, und je größer das Loch ist, desto größer ist der Bildfleck, entsprechend den Gesetzen der geometrischen Optik. Es gibt folglich einen optimalen Lochdurchmesser d in Abhängigkeit der Wellenlänge des Lichts λ und der Bildweite b . Er beträgt $d = 2 \sqrt{\lambda b}$.
- Die Beugung ist für unterschiedliche Farben unterschiedlich stark, deshalb ergeben sich Farbfehler.

Mögliche Intentionen im Unterricht

Alle oben genannten physikalischen Grundgedanken zur geometrischen Optik passen in einen Anfangsunterricht der Mittelstufe. Die Beugung sollte allerdings nur qualitativ untersucht werden, bis zu der Aussage, dass bei kleiner werdender Lochgröße ab einem bestimmten Wert die Schärfe wieder abnimmt.

In der Oberstufe lassen sich aber auch die Überlegungen in Walkers Artikel zu Fresnel'schen Zonen und zur Zonenplatte erarbeiten. Ebenso lassen sich hier Abbildungsfehler erläutern, und die Begründung für das Entstehen der Schattenbilder ist als Transfer möglich.

Anknüpfungsmöglichkeiten im Unterricht

Der Einstieg zum Thema Lochkamera kann über verschiedene einfache Experimente erfolgen. Bohren Sie ein Loch in die Verdunklung des Physikraums und beobachten Sie die Außenwelt mit einer Mattscheibe, oder besuchen Sie eine begehbbare Camera Obscura.

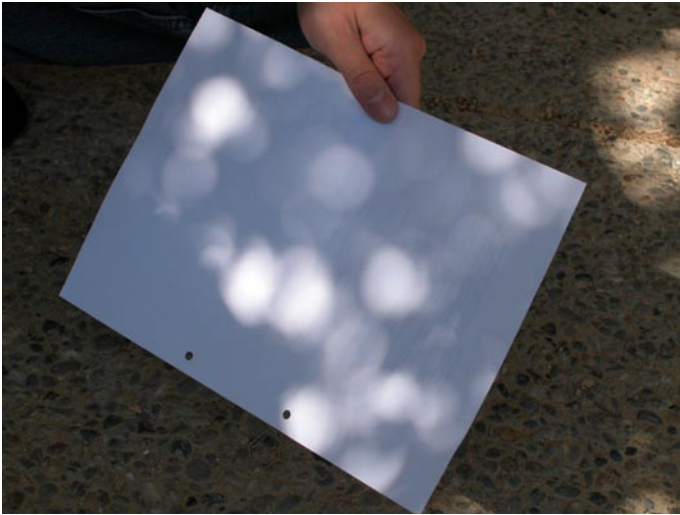


Abb. 4: Sonnentaler unter einem Baum. Die Taler sind kreisrund, weil das Blatt senkrecht zum Lichteinfall orientiert ist.

Wagenschein (1991, S. 34) schlägt dagegen sogar für die gesamte Optik einen Einstieg über das Naturphänomen der Sonnentaler vor. Diese Lichtflecken entstehen, wenn das Licht der Sonne durch die Lücken im Blätterdach eines dichten hohen Baumes fällt und am Boden die runden, bei schrägem Lichteinfall ovalen Sonnentaler zeichnet (Abb. 4).



Abb. 5: Schatten eines Farns, wie gewohnt bei runder Lichtquelle (oben) und überraschend bei dreieckiger Lichtquelle (unten)

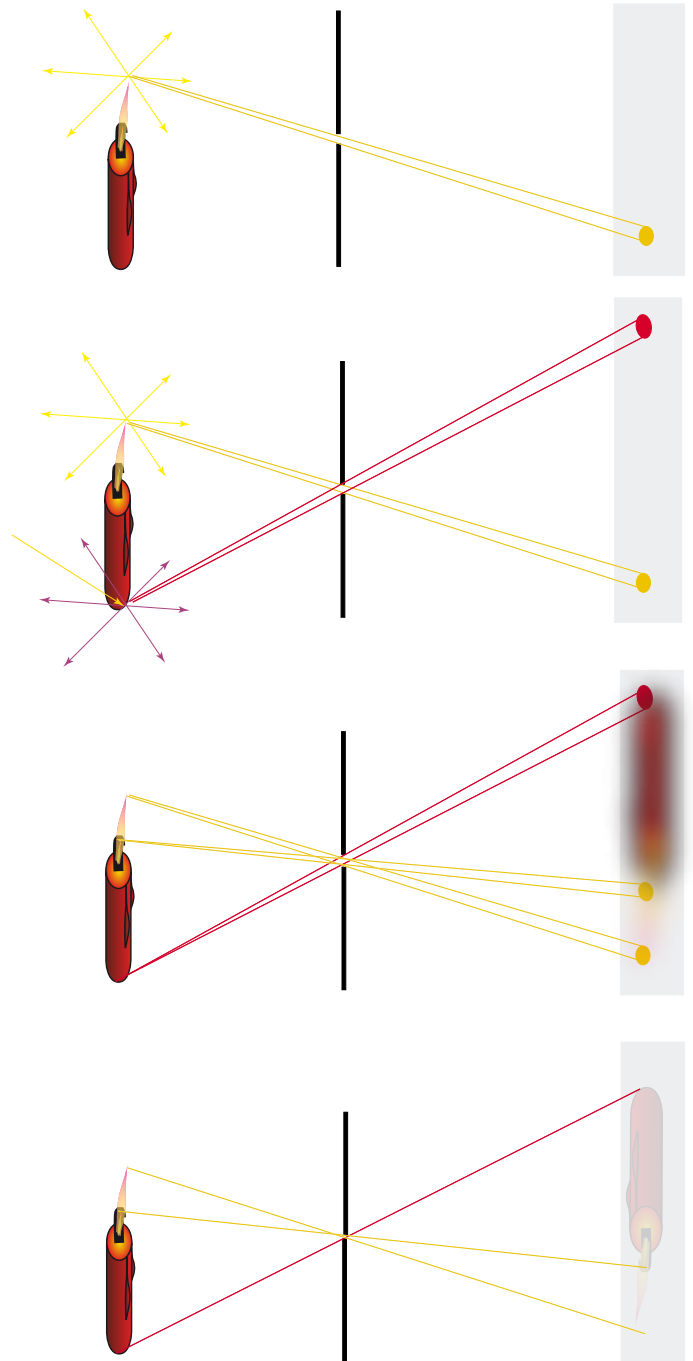


Abb. 6 (nach Berge, 2002a): Bilder setzen sich aus den einzelnen Bildflecken zusammen. Bei großem Loch ergibt sich ein helles, aber unscharfes Bild, bei kleinen Öffnungen ein scharfes, aber lichtschwaches Bild.

Englert (2002) empfiehlt, dieses Phänomen im verdunkelten Klassenzimmer nachzustellen. An die Stelle der Sonne tritt eine einzelne Neonröhre an der Klassenzimmerdecke und an die Stelle des Blätterdachs ein mehrfach durchlöcherter Blatt Papier. Am Boden oder den Schülertischen erscheinen dann anstelle von Sonnentälern „Neonstangen“.

Mit diesem Versuch lassen sich bereits eine große Anzahl der qualitativen Aussagen zur geometrischen Optik treffen, wenn man Bild- und Gegenstandsweite variiert und verschiedene Lochgrößen und -formen im Blatt verwendet.

Alternativ zum Blatt Papier bietet sich auch eine Pflanze mit kleinen Blattzwischenräumen an, z. B. ein Farn. Dreieckige

Lichtquellen ergeben dabei nicht nur dreieckige Lichtflecken, sondern bilden zudem auch häufig noch dreieckige Schatten, nämlich die Zwischenräume zwischen den dreieckigen Bildern der Lichtquelle. Ein solches Bild als Unterrichtseinstieg, kommentarlos an die Wand projiziert, gibt Anlass für ein Unterrichtsgespräch (Abb. 5).

Im Anschluss daran sollte mit einzelnen Löchern experimentiert werden. Anhand einer Zeichnung (Abb. 6) lässt sich nun der Bildaufbau und die Umkehrung des Bildes einer Lochkamera erläutern.

Im Folgenden soll ein Versuch zur Erarbeitung des Abbildungsgesetzes mit Beteiligung aller Schüler und Schülerinnen einer Klasse skizziert werden.

Schneiden Sie ein großes F in einen großen Schuhkarton und bekleben Sie das Loch mit Pergamentpapier. Ein Baustrahler (oder eine andere helle Lampe), der in den Schuhkarton gestellt wird, bringt das F zum Leuchten. Stellen Sie den Karton im verdunkelten Klassenzimmer etwas erhöht auf dem Lehrertisch.

Um die Abbildungsgleichung und die Abhängigkeit der Bildschärfe und Bildhelligkeit von der Lochgröße nach dem Vorbild von Berge (2002b) zu erarbeiten, erhält jede Arbeitsgruppe ein Blech mit einer Bohrung von 1 mm und eines mit einer 3 mm dicken Bohrung, dazu eine Mattscheibe und Meterstäbe. Blech und Mattscheibe, auf eine optische Bank aufgesetzt, ergeben eine Lochkamera.

Zuerst vergleichen die Schüler die Abbildungen, die durch die beiden Bleche erzeugt werden. Danach verwenden sie das Blech mit dem kleinen Loch und vermessen Gegenstandsgröße G , Gegenstandsweite g , Bildweite b und Bildgröße B . Bei fester Gegenstandsweite variiert jede Gruppe an ihrem Platz die Bildweite und erhält so unterschiedliche Bildgrößen. Die ganze Klasse trägt im Anschluss daran ihre Werte von G , g , B und b in einer Tabelle an der Tafel zusammen. Die Tabelle enthält nun auch unterschiedliche Gegenstandsweiten abhängig vom Sitzplatz der Arbeitsgruppen. Mit der Tabelle und aus den Werten gezeichneten Graphen lassen sich dann die Proportionalität zwischen B und b und die anderen Zusammenhänge belegen.

Zur Wellenoptik können in der Sekundarstufe II mit einem aufgeweiteten Laserstrahl die Beugungseffekte an Löchern untersucht werden. Dabei lassen sich die Zusammenhänge zwischen Lochgröße und Ausdehnung des Maximums und dessen Lichtstärke im Zentrum erarbeiten.

Erweiterungen und Ergänzungen

Kann man Filme selbst entwickeln, so bietet sich natürlich der Bau einer richtigen Lochkamera an. Dabei kann in der Oberstufe auf den Text Walkers im Internet unter <http://www.wissenschaftschulen.de/> verwiesen werden. Nach diesen Angaben sollen die Schülerinnen und Schüler ihre eigene Lochkamera bauen.

Ist das gute Stück fertig, stellt sich die Frage, welche Belichtungszeit bei welcher Beleuchtungssituation und welcher Filmempfindlichkeit zu verwenden ist. Hier hilft entweder Trial & Error oder die Berechnung, wozu man zuerst die Blende der Kamera kennen muss. Dies ist auch am Ende der Sekundarstufe I zu leisten:

Betrachtet man die Bildweite b als Brennweite der Lochs mit dem Durchmesser d , so ist die Blende k der Kamera $k = b/d$. Bei einer Kamera von 15 cm Brennweite und einem optimalen

Lochdurchmesser $d = 2\sqrt{\lambda b} = 0,5$ mm für eine mittlere Wellenlänge im sichtbaren Bereich kommt man zur Blende $k_{\text{Loch}} = 300$.

Nun kann man mit einer herkömmlichen manuell einstellbaren Kamera oder einem Belichtungsmesser für eine vorgeählte Blende, beispielsweise $k_{\text{Kamera}} = 16$, und entsprechender Filmempfindlichkeit die Belichtungszeit t_{Kamera} bestimmen. Die Belichtungszeit t_{Loch} für die Lochkamera ergibt sich dann zu

$$t_{\text{Loch}} = t_{\text{Kamera}} (k_{\text{Loch}} / k_{\text{Kamera}})^2$$

Dies ist allerdings noch nicht unbedingt die wirkliche Belichtungszeit. Ab einer Belichtungszeit von etwa einer Sekunde ist mit dem Schwarzschildeffekt zu rechnen. Bei langen Belichtungszeiten und damit kleinen Lichtmengen pro Zeiteinheit verhält sich die Belichtung des Films nämlich nicht mehr proportional zur auftreffenden Lichtmenge. Es muss deutlich länger belichtet werden. Die Korrekturwerte für lange Belichtungszeiten finden sich in den technischen Datenblättern zu den Filmen. Darin findet man beispielsweise für den Schwarzweißfilm 100 Delta von Ilford (gibt es im DIN A4-Format zum Zuschneiden), dass eine gemessene Belichtungszeit von 5 Sekunden auf etwa 10 Sekunden zu verdoppeln und eine Zeit von 30 Sekunden sogar auf 150 Sekunden zu verfünffachen ist (Ilford, 2002).

Weitere Quellen

Wer zuerst mal Bilder ansehen will, findet davon mehr als reichlich in der Galerie des „Weltweiten Tags der Lochkamera-Fotografie“. Dort dürfen sich Lochkamerafotografen aus aller Welt mit ihren Bildern verewigen, die an einem bestimmten Tag im Jahr fotografiert wurden. <http://www.pinholeday.org>

Dieter Bublitz' „Lochkamerasseite“ bietet einen umfassenden Einblick. Neben vielen brauchbaren Bauanleitungen und Tipps zur Verwendung der Lochkamera findet sich unter anderem auch ein praktischer Lochkamerarechner zur Bestimmung der geeigneten Belichtungszeit bei vorgegebenen Filmempfindlichkeiten, Lochgrößen und Brennweiten. <http://www.die-lochkamera.de>.

Das Themenheft „Lochkamera“ der Zeitschrift „Naturwissenschaften im Unterricht“ (Berge, 2002) bietet etliche interessante Artikel zu Einsatzmöglichkeiten der Lochkamera im Unterricht. Themen sind unter anderem Sonnentaler, begehbare Lochkameras und zu Lochkameras ausgebauten Spiegelreflexkameras. Die Artikel beziehen sich dabei vor allem auf ein Aufgreifen des Themas in der Mittelstufe.

Literatur

- Berge, O. E. (Hrsg.) (2002). Lochkamera. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 68 (13).
- Berge, O. E. (2002a). Die Erklärung des Lochkamerabildes. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 68 (13), S. 18–23
- Berge, O. E. (2002b). Lochkameraversuche und das Abbildungsgesetz. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 68 (13), S. 24 – 27
- Ilford (2002). Fact Sheet Delta 100 und Delta 400 Professional. <http://www.ilfordphoto.com>
- Englert, U. (2002). Sonnentaler – Abbilder der Sonne. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 68 (13), S. 10–12
- Wagenschein, M. (1991). *Verstehen lehren*. Weinheim: Beltz