

# Versuche zur geometrischen Optik

## Teilversuch Camera Obscura

Heino Hildebrand, Lars Hoegen, Arne Winterboer

29. Oktober 2004

### 1 Einleitung

Die Camera Obscura ist historisch gesehen eines der ersten optischen Instrumente zur Abbildung von Bildern zunächst auf Mattscheiben, mit Entdeckung der Lichtempfindlichkeit von Silber dann auch auf photographische Platten. In diesem Versuch soll es darum gehen, die zum Verstehen der Wirkungsweise einer Camera Obscura notwendigen Grundlagen geometrischer Optik darzulegen.

### 2 Theoretische Betrachtungen

Eine einfache Form der Camera Obscura bzw. einer Lochkamera besteht aus einem lichtdichten Behälter, einem Karton o.ä., in dessen eine Seitenwand ein kleines Loch gebohrt ist, durch das das Licht in die Kamera fällt. An der gegenüberliegenden Wand kann eine Milchglasscheibe zur Darstellung des Bildes dienen, Abbildung 1 zeigt einen Querschnitt.

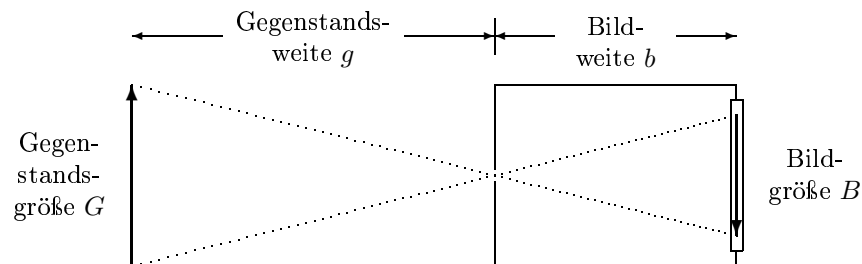


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Lochkamera

Denkt man sich den betrachteten Gegenstand als aus vielen kleinen leuchtenden Punkten zusammengesetzt, so erzeugt jeder kleine Leuchtpunkt einen kleinen Lichtfleck auf der Mattscheibe. Aus allen diesen Lichtflecken mit verschiedenen Farben und verschiedenen Helligkeiten setzt sich das Bild auf der Mattscheibe zusammen.

Diese gedachte Zerlegung des vom Gegenstand ausgehenden Lichtes in einzelne Lichtstrahlen, auch *Strahlenmodell* genannt, erklärt auch die Umkehrung der Orientierungen des Bildes im Vergleich zum Gegenstand. Wenn man die gedachte Linie zwischen Gegenstandsmitte und Bildmitte, die dann natürlich durch die Lochmitte geht, als *optische Achse* betrachtet, so müssen alle Lichtstrahlen, die von oberhalb dieser Achse durch das Loch fallen, im Loch diese Achse überqueren, denn Licht breitet sich gradlinig aus. Gleiches gilt für Lichtstrahlen unterhalb dieser Achse, die beim Durchqueren des Loches nach oberhalb der Achse wechseln.

Analoge Überlegungen führen zu der Erkenntnis, daß die Orientierung des abgebildeten Gegenstandes nicht nur oben und unten wechselt, sondern auch links und rechts. Das auf der Mattscheibe dargestellte Bild ist also doppelt seitenverkehrt.

Welchen Einfluß hat nun der Lochdurchmesser auf das dargestellte Bild? Wählt man einen großen Lochdurchmesser, so können zwei verschiedene Lichtstrahlen, die von einem Punkt des Gegenstandes ausgehen, auf verschiedenen Wegen durch das Loch auf die Milchglasscheibe fallen, siehe Abbildung 2. Der Bildpunkt, der so vom Gegenstandspunkt erzeugt wird, wird demnach größer und die verschiedenen Bildpunkte überlagern sich gegenseitig: das Bild wird unscharf. Da aber insgesamt mehr Lichtstrahlen durch das Loch gelangen, wird das Bild auch heller.

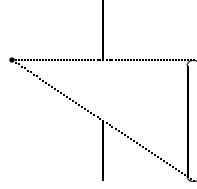


Abbildung 2: Ein großes Loch erzeugt einen unscharfen Bildpunkt

Ein kleineres Loch hat den Vorteil, daß das Bild schärfer wird. Dafür muß man in Kauf nehmen, daß das Bild dunkler ist, denn weniger Lichtstrahlen gelangen in die Kamera.

## 2.1 Das Abbildungsgesetz

Baut man die Lochkamera derart um, daß der Abstand zwischen Loch und Milchglasscheibe – auch als Bildweite  $b$  bezeichnet – variabel ist, so kann man mit der Kamera das Abbildungsgesetz herleiten, wenn man Gegenstands- und Bildgröße mit Gegenstands- und Bildweite vergleicht.

Zunächst läßt sich in einfachen Experimenten folgendes feststellen:

- Bei fester Bildweite  $b$  erscheint ein Gegenstand um so kleiner, je weiter er vom Loch der Kamera entfernt ist. Mit anderen Worten: Je größer die Gegenstandsweite  $g$ , desto kleiner die Bildgröße  $B$ .
- Bei fester Gegenstandsweite  $g$  wird sein Bild größer, wenn der Abstand zwischen Loch und Milchglasscheibe vergrößert wird. Mit anderen Worten: Je größer die Bildweite  $b$ , desto größer die Bildgröße  $B$ .

Man kann diesen Sachverhalt genauer quantifizieren. Durch systematische Variation der Bild- und Gegenstandsweite bei fester Gegenstandsgröße erkennt man einen Zusammenhang zwischen dem Quotienten von Bild- und Gegenstandsweite mit dem zwischen Bild- und Gegenstandsgröße, der sich im *Abbildungsgesetz* formulieren läßt:

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

Bild- und Gegenstandsgröße verhalten sich zueinander wie Bild- und Gegenstandsweite.

## 2.2 Der ideale Lochdurchmesser

Wie im Artikel [1] dargestellt, spielt bei der Bestimmung der idealen Lochgröße die Berücksichtigung der Fresnelschen Zonen eine Rolle. Idealerweise sollte mit dem Loch nur der Bereich der ersten Fresnelschen Zone auf die Mattscheibe abgebildet werden. Dieser Radius  $R$  ergibt sich näherungsweise nach der Beziehung

$$R = \sqrt{b\lambda}$$

wobei  $\lambda$  die Lichtwellenlänge und  $b$  die Bildweite bezeichnet.

Die etwas längere Herleitung der Beziehung zwischen Lochgröße und Bildweite unter dem Aspekt des Auflösungsvermögens der Kamera sei hier nicht wiedergegeben, dazu verweisen wir auf [1]. Der Autor bestimmt bei einem Lochdurchmesser von 0,5 mm die ideale Bildweite auf 12,5 cm.

Hecht kommt in seinem Buch [2] bei vergleichbaren theoretischen Betrachtungen zu einer anderen idealen Bildweite von etwa 25 cm bei einem Lochdurchmesser von 0,5 mm.

### 3 Versuchsdurchführung

Ziel unseres Versuches war es, eine einfache Camera Obscura zu bauen und mit ihr ein paar fotografische Aufnahmen zu machen. Wir hatten insgesamt drei verschiedene Modelle gebaut:

1. Ein einfacher Faltkarton, innen unbehandelt. Die Öffnungen schwarzem Fotopapier und Klebenand überklebt. In eine Seitenwand wurde ein Loch von etwa 1 cm Kantenlänge geschnitten, vor das ein Stück Haushaltsaluminiumfolie geklebt wurde. In diese Folie wurde mit Hilfe einer Stecknadel von etwa 0,5 mm Durchmesser ein Loch gebohrt. Auf der dem Loch gegenüberliegenden Seite wurde das Fotopapier befestigt. Der Abstand Loch–Film betrug etwa 8 cm.
2. Ein von innen geschwärzter Schuhkarton, an dessen kurzer Seite ein Loch von etwa 2 cm Kantenlänge geschnitten war. Vor dieses Loch wurde ein schwarzer Fotokarton geklebt, in den mit einer Nadel ein Loch von etwa 0,65 mm Durchmesser gestochen wurde. Der Film wurde an der anderen kurzen Seite des Kartons befestigt. Der Abstand Loch–Film betrug etwa 30 cm.
3. Eine von innen mit schwarzem Fotokarton ausgekleidete Teedose, in dessen Boden ein Loch von etwa 5 mm Durchmesser gebohrt wurde, vor das wiederum ein Fotokarton geklebt wurde, der mit einer Nadel von etwa 0,65 mm Durchmesser durchbohrt wurde. Der Film wurde im Deckel der Teedose befestigt. Der Abstand Loch–Film betrug etwa 15 cm.

Diese Lochkameras wurden im Fotolabor unter speziellem Grünlicht, das den Film nicht belichtet, mit Fotopapier für Schwarzweißaufnahmen bestückt; die Nadel-Löcher waren mit einem Stück Fotokarton verklebt, das als Verschluss diente.

Anschließend wurden mit allen drei Kameras verschiedene Motive vom Campus Wechloy der Universität Oldenburg belichtet. Dabei wurde die Belichtungszeit zwischen 5 und 14 Minuten variiert. Die Fotos wurden danach im Fotolabor regulär entwickelt.

#### 3.1 Auswertung

Es zeigte sich, daß die erste Kamera zwar detailreiche Bilder machte, auf denen aber etwa  $1/5$  der Bildgröße von einem schwarzen Fleck überlagert wurden. Wir führen dies auf das Eindringen von Restlicht zurück, ohne die genaue Ursache ermitteln zu können, denn auch bei besserem Abkleben der Faltschachtelöffnungen trat dieser Fleck auf.

Mit der zweiten Kamera machten wir bei Belichtungszeiten zwischen 8 und 10 Minuten Bilder, auf denen das gewählte Motiv erkennbar war. Leider waren alle Bilder relativ dunkel. Wir führen dies auf die Motivwahl – vergleichsweise schattige Blickwinkel im Innenhof des Campus Wechloy – zurück, die in Kombination mit der großen Bildweite eine etwas längere Belichtungszeit erfordert hätten. Beim Versuch, einen Baum mit gleicher Belichtungszeit zu fotografieren, kam es zu einer Überbelichtung, ähnlich dem dritten Foto in Abbildung 5.

Die zweite Kamera entsprach in ihren Dimensionen etwa den Vorgaben von Hecht [2]. Prinzipiell lassen sich damit gute Bilder machen, wenn man ein Gefühl für die notwendigen Belichtungszeiten bekommt.

Mit der dritten Kamera haben wir drei befriedigende Aufnahmen gemacht. Die Fotos sind im Anhang beigefügt: Darunter jeweils eine Digitalfotografie des Bildausschnitts, den die Lochkamera im Visier hatte. Auf diesen Vergleichsfotos bekommt man einen Eindruck von den Lichtverhältnissen während der Aufnahme. Aufgrund einer geschlossenen, relativ homogenen Wolkendecke war das Tageslicht relativ diffus und eher lichtschwach.

Das Foto in Abbildung 3 wurde etwa 10 Minuten lang belichtet, das Foto in Abbildung 4 etwa 12 Minuten lang und das Foto in Abbildung 5 etwa 14 Minuten. Bei den letzten beiden Fotos markiert eine kleine Einkerbung die Position des Fotopapiers in der Kamera, die Kerbe wies bei der Aufnahme nach oben.

Im Vergleich zu den Digitalfotos sieht man die Umkehrung der Bildorientierung. Bei den ersten beiden Bildern ist erkennbar, daß der relativ helle Himmel zu starken Schwärzungen des Fotopapiers führt. Die scheinbar mißlungene dritte Aufnahme bestätigt dies, denn hier ist ein Baum abgebildet, durch den vergleichsweise viel Himmelslicht auf das Fotopapier fällt; in Verbindung mit der langen Belichtungszeit führte dies zu einer Überbelichtung.

Man sieht, daß die von Walker in seinem Artikel [1] vorgeschlagenen Werte für Bildweite und Lochdurchmesser, die wir bei unserem Versuch mit der dritten Kamera näherungsweise nachgebildet haben, ebenfalls zu brauchbaren Ergebnissen führen.

## 4 Didaktische Kritik des Versuches

Die Camera Obscura ist nicht nur historisch gesehen ein Einstieg in die Untersuchung von geometrischer Optik. Auch in der Schule kann er die Behandlung von Strahlenoptik und Linsen motivieren. In den Rahmenrichtlinien des Landes Niedersachsen wird die Behandlung der geometrischen Optik für alle Schulstufen in Klasse 8 vorgeschlagen.

### 4.1 Notwendige Vorkenntnisse

Zum Verstehen der Strahlenoptik einer Lochkamera sind eigentlich nur wenige mathematische und physikalische Vorkenntnisse notwendig.

Aus physikalischer Sicht reicht hier die Erkenntnis, daß Licht sich gradlinig ausbreitet. Im Unterricht könnte dazu ein Vorversuch gemacht werden, in dem das sich radial ausbreitende Licht durch eine Anordnung von enger werdenden Spalte geschickt wird. Man erkennt, daß die Spalte den Lichtstrahl entlang von Begrenzungslinien einengen, die sich im Mittelpunkt der Lichtquelle treffen.

Nimmt man nun an, daß das Licht der Lampe aus vielen kleinen Lichtstrahlen besteht, die sich gradlinig ausbreiten und radial von der Mitte der Lichtquelle ausgehen, so begrenzen die Spalte jeweils ein kleineres Bündel solcher Lichtstrahlen. Diese Erkenntnis sollte als *Strahlenmodell* theoretisiert werden. Ein erster praktischer Tauglichkeitstest für diese Theorie ist dann die Lochkamera.

Die mathematische Herleitung der sich im Abbildungsgesetz niederschlagenden linearen Algebra, die Strahlensätze, werden, wie der Name schon andeutet, im Mathematikunterricht erst später behandelt als die geometrische Optik im Physikunterricht. Daher beschränkt sich die Mathematik hinter dem betrachteten Phänomen auf einfache zeichnerische Konstruktionen. Die Herleitung einer Formel für das Abbildungsgesetz kann dann – wie oben dargestellt – anhand weiterführender Messungen mit der Lochkamera erfolgen.

### 4.2 Kritik an den organisatorischen Rahmenbedingungen

Den Versuch in der von uns dargestellten Weise durchzuführen erfordert einen hohen organisatorischen Vorlauf. Die SchülerInnen müssen sich selbst eine Lochkamera bauen, was ggf. auch in Kleingruppen erledigt werden kann. Die dafür erforderlichen Materialien sind aber einfach zu beschaffen und die notwendigen händischen Fähigkeiten sollten bei allen SchülerInnen vorhanden sein.

Darüber hinaus muß an der Schule die Möglichkeit vorhanden sein, mit einer ganzen Klasse in einem Dunkelraum (z.B. einem Fotolabor) Fotopapier in die Kameras zu legen und dieses dann anschließend noch zu entwickeln. Der Umgang mit den Fotochemikalien birgt gewisse Risiken und erfordert ein hohes Maß an Konzentration, auf SchülerInnen- wie auf LehrerInnenseite.

Nach unserer Einschätzung ist für die Durchführung des Versuches eine Doppelstunde anzusetzen, da die Belichtungszeit im Schnitt einige Minuten beträgt und da die Arbeit im Fotolabor auch zeitintensiv ist.

### 4.3 Motivationale Aspekte

Die Lochkamera als Einstieg für die geometrische Optik zu wählen hat mehrere Vorteile:

- Der Versuchsaufbau ist relativ simpel und liefert doch sehr anschauliche und brauchbare Ergebnisse.
- Die Versuchsdurchführung ist nicht sehr anspruchsvoll, dafür aber vergleichsweise fehlertolerant (z.B. bezüglich der Belichtungszeit).
- Die Theorie hinter dem Versuch ist knapp und leicht verständlich.
- Das starre Konzept von reinem Frontalunterricht, wie in der Physik leider noch sehr häufig üblich, wird aufgebrochen.
- Der Versuch hat einen guten Alltagsbezug. Unter Umständen können die SchülerInnen den Versuch in ihrer Freizeit wiederholen.
- Der Versuch stellt ein Bindeglied dar zwischen der rein qualitativ deskriptiven Physik hin zur quantitativen analytischen Physik.

Der hohe Anteil an Eigenleistung steht bei diesem Versuch im Vordergrund und kann als Triebfeder für weitere Untersuchungen dienen. Der explorative Charakter des Versuches steht dabei exemplarisch für die historische Entwicklung der Physik, in der einfache Phänomene häufig Grundlagen tiefergehender Analysen waren.

### Literatur

- [1] Jearl Walker. *Photographieren mit der Lochkamera*. In: Reader zum Demonstrationspraktikum für alle Lehrämter. Carl von Ossietzky-Universität Oldenburg (Eigenverlag), 2004. Seite 65ff.
- [2] Hecht, Eugene *Optik*. Oldenbourg. München u.a., 2001. Seite 211

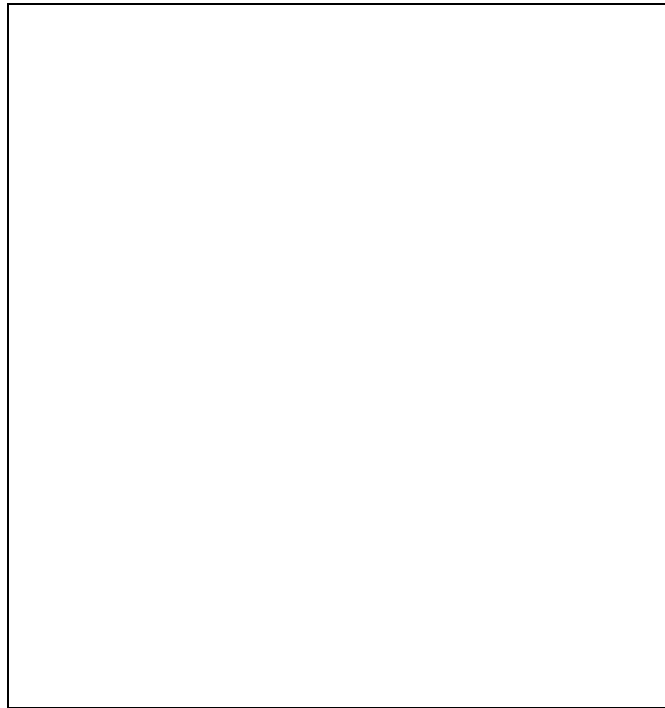


Abbildung 3: Erstes Foto der dritten Lochkamera mit einer Belichtungszeit von 10 Minuten, darunter zum Vergleich ein Digitalfoto vom gleichen Ausschnitt

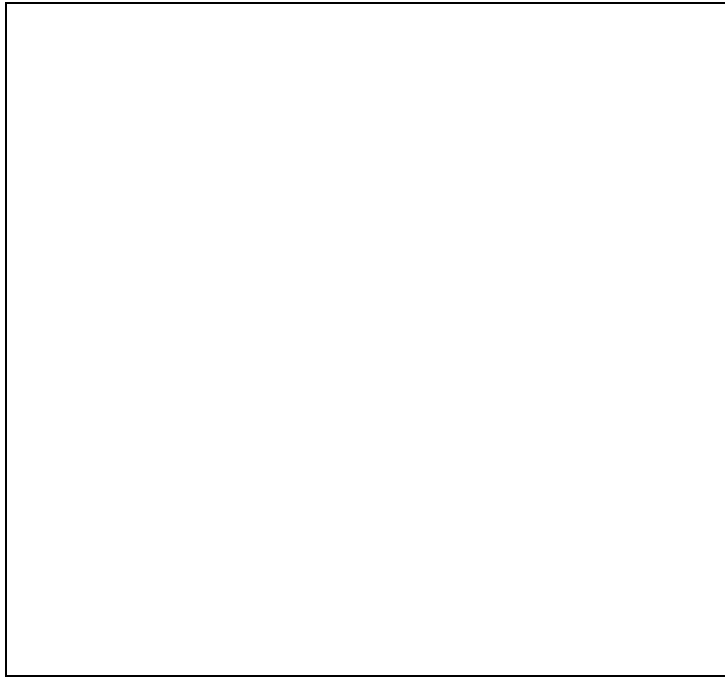


Abbildung 4: Zweites Foto der dritten Lochkamera mit einer Belichtungszeit von 12 Minuten, darunter zum Vergleich ein Digitalfoto vom gleichen Ausschnitt

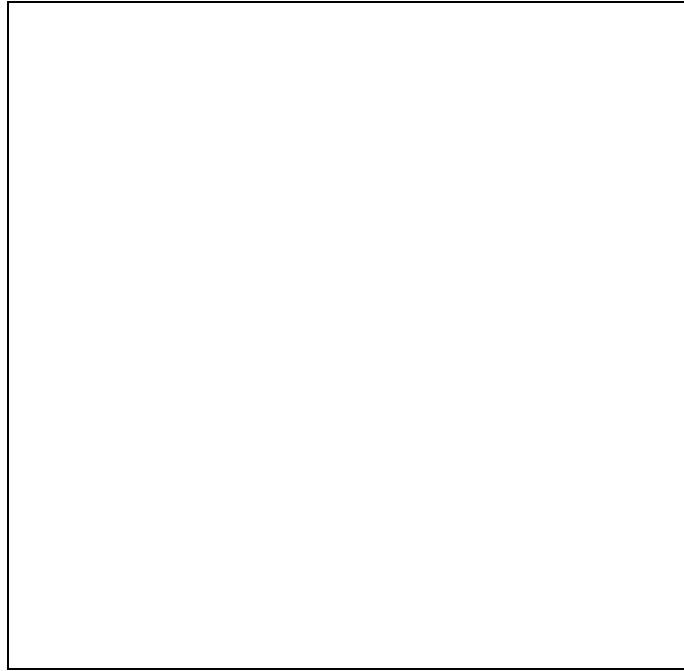


Abbildung 5: Drittes Foto der dritten Lochkamera mit einer Belichtungszeit von 14 Minuten, darunter zum Vergleich ein Digitalfoto vom gleichen Ausschnitt