

ARBEITSKREIS BAYERISCHER PHYSIKDIDAKTIKER

# BEITRAG AUS DER REIHE:

Werner B. Schneider (Hrsg.)

## Wege in der Physikdidaktik

Band 3

Rückblick und Perspektive

ISBN 3 - 7896 - 0513 - 1

Verlag Palm & Enke, Erlangen 1993

### Anmerkung:

Die Bände 1 bis 5 sind (Ausnahme Band 5) im Buchhandel vergriffen.  
Die einzelnen Beiträge stehen jedoch auf der Homepage

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.

Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.

Zum privaten Gebrauch dürfen die Beiträge unter Angabe der Quelle  
genutzt werden. Auf der Homepage

[www.solstice.de](http://www.solstice.de)

werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

Manfred Achilles

## Die Lochkamera hat ein vorzügliches Objektiv!

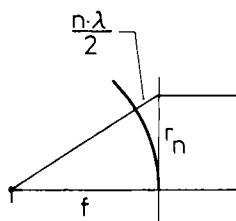
### Einführung

Sowohl in der Schule als auch in der Hochschule findet die Lochkamera Beachtung. In der Regel wird sie zur Einführung in die Physik der optischen Abbildung verwendet. Als Vorzug der Lochkamera gilt die scheinbare Einfachheit in der Beschreibung und ihre Billigkeit in der Herstellung, weil außer dem lichtempfindlichen Material und einer Dunkelkammereinrichtung nur wertlose Materialien benötigt werden. Die Erklärung ihrer Funktion erfolgt in der Regel in strahlenoptischer Weise: Das Licht fällt von jedem Objektpunkt wie bei einem Schattenwurf durch das Loch und erzeugt dadurch auf der Mattscheibe einen Lichtfleck. Das aus vielen Lichtflecken bestehende, umgekehrte Bild ist deshalb unscharf und hält dem eines Photoapparates nicht stand. Diese Deutung einer Lochkamera ist physikalisch untragbar, da ein Verstoß gegen die Anwendbarkeit der Strahlenoptik vorliegt. Diese gilt bekanntlich nur dann näherungsweise, wenn die Lichtbündelstärke *sehr* groß gegen die Wellenlänge des verwendeten Lichtes ist, was zwar im allgemeinen für den Linsenphotoapparat, aber nicht für die Lochkamera zutrifft. Um optimal mit einer Lochkamera photographieren zu können, müssen die Welleneigenschaften des Lichtes berücksichtigt werden.

### 1. Die Fresnelsche Zonenkonstruktion

Das Phänomen der optischen Abbildung ist ein Beugungseffekt. J.-A. Fresnel (1788-1827) erfaßte die geradlinige Ausbreitung des Lichtes durch seine Zonenkonstruktion als Phänomen der Beugung und Interferenz richtig. E. Abbé (1840-1905) brachte sie in die endgültige Form. Eine Rundblende vom Radius  $r$  blendet ein Lichtbündel mit der (mittleren) Wellenlänge  $0,55 \cdot 10^{-6} \text{m}$  aus. Der Unterschied der Lichtwege, einmal geradlinig durch das Zentrum und

einmal vom Rand der Blende gebeugt, darf nicht größer als  $\lambda/2$  sein, wenn alle Wege konstruktiv interferieren sollen und nur die 1. Ordnung berücksichtigt wird.



$$\left(f + \frac{n \cdot \lambda}{2}\right)^2 = f^2 + r_n^2$$

$$r_n^2 = f n \lambda + \left(\frac{n \cdot \lambda}{2}\right)^2$$

Abb.1 Herleitung der Fresnelschen Zonenkonstruktion

Auf Abb.1 ist schematisch der Fall gezeigt, der für die Lochkamera zutrifft: Licht aus dem Unendlichen trifft sich im Aufpunkt, der sich im Abstand der "Brennweite f" befindet. Der Zusammenhang ist einfach und ist für die 1. Ordnung  $r^2 = f \cdot \lambda$ , wenn man den quadratischen Term wegen Geringfügigkeit vernachlässigt.

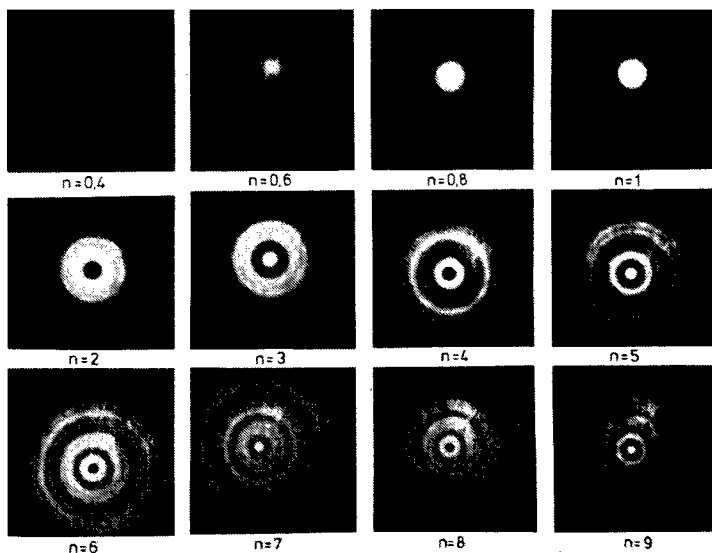


Abb.2 Photographien von Bildpunkten abhängig von Zonen 1 - 9  
Der Verfasser hat den "Lichtpunkt" eines He-Ne-Lasers mit Hilfe eines Loches photographiert, denn das Licht eines Lasers, einmögig arbeitend, kommt *immer* von *einem* optischen Punkt, sonst er-

zeugte er kein kohärentes Licht. Aus dem Beam wurde nach ca. 10m mittels einer Irisblende ein Lichtkegel ausgeblendet, der, an der Blende gebeugt, nach abermals 10m den Film belichtete. Die Irisblende wurde determiniert so geöffnet, daß nacheinander *ganzzahlige*, höhere Ordnungen passieren konnten. Das Ergebnis zeigt Abb.2. Man erkennt, daß die Zentren (der Aufpunkt) mit steigender Ordnung *n* kleiner werden, wobei ungerade Ordnungen helle Zentren (konstruktive Interferenz), gerade dagegen dunkle Zentren (destruktive Interferenz) bilden. Die zwar kleine erste Ordnung beim Passieren von mehreren Ordnungen nutzt aber nichts, da sie wegen der vorhandenen höheren Ordnungen anderer Lichtpunkte aufgehellt ist und so der Kontrast vermindert wird. Der kontrastreichste "optische Punkt" entsteht aber nicht beim Öffnungsradius für  $n=1$ , sondern nur bei ca.80% seines Radius. Das liegt daran, daß die verwandte Formel die Besselsche Zahl 1,22 nicht berücksichtigt, die für Rundblenden anzuwenden gewesen wäre ( $1/1,22 = 0,82$ ).

Tabelle für optimale Bemaßung einer Lochkamera

2r/mm	0,25	0,30	0,35	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5	2,0	3,0
1,22*2r	0,31	0,37	0,43	0,61	0,73	1,0	1,2	1,5	1,8	2,4	3,7
f/mm	42	60	83	170	240	430	680	970	1,5m	2,7m	6,1m
Blende	170	200	240	340	410	540	680	810	1000	1400	2000
Bel.-F.	240	330	460	940	1400	2400	3800	5500	8500	15T	34T

In der obigen Tabelle ist zu jedem Loch (erste Reihe, Durchm. 2r) in der zweiten Reihe mit dem Besselfaktor der Durchmesser der 1.Zone und daraus in der dritten Reihe die optimale Brennweite der Lochkamera ausgerechnet. Zur praktischen Benutzung ist in der vierten Reihe die bei Photoapparaten übliche Blendenzahl angegeben, um mit Hilfe eines Belichtungsmessers die Belichtungszeit ausrechnen zu können, wenn man nicht zur Bequemlichkeit den in der fünften Reihe angegebenen Belichtungsfaktor benutzen will, der ein Vielfaches der Belichtungszeit ist, die bei Benutzung von Blende 11 erforderlich wäre. Bemerkenswert ist, daß kleine Lochkameras eine relativ große, große dagegen eine sehr geringe Lichtstärke aufweisen.

## 2. Die optische Auflösung einer Kamera

Es ist physikalisch bemerkenswert, daß die bekannte Formel für die optische Auflösung (Helmholtz:  $x_{\min} = \lambda/2 \cdot \sin u$ , bei Verwendung der Besselzahl:  $x_{\min} = 1,22 \cdot \lambda/2 \cdot \sin u$ ) *keinerlei Linseneigenschaften* berücksichtigt. Die Formel ist sowohl objektseitig als auch bildseitig anwendbar. Demnach muß eine Lochkamera optisch so gut wie ein Linsenphotoapparat, beispielsweise eine hier verwandte Hasselblad CM 500, sein. In vergangenen Jahren haben einiger meiner Studenten versucht, die Zusammenhänge klarzulegen. Sie endeten stets mit dem im Bewußtsein fest verankerten Vorurteil, daß ein Linsenapparat doch schärfere Bilder liefere. Sie verglichen eine Aufnahme mit einer optimalen Lochkamera (Berücksichtigung der Zonenkonstruktion) mit der eines Photoapparates, benutzten aber unterschiedliche Blendendurchmesser  $2r$  und verstießen so gegen die Formel der optischen Auflösung. Dieses Vorurteil erhält durch einen immer wiederkehrenden, unfairen Vergleich beider Systeme neue Nahrung. *Die bestimmende Größe bezüglich der Auflösung der Photoapparate ist nämlich der Blendendurchmesser  $2r$ . Ist dieser groß, wird  $\sin u$  groß und dann verkleinert sich nach der Auflösungsformel der kleinstmögliche optische Punkt  $x_{\min}$ . Wenn man für einen vorgegebenen Blendendurchmesser die Lochkamerabrennweite ausrechnet und damit photographiert, ist das Bild schärfer, als wenn man der Hasselblad ( $f=80\text{mm}$ ) eine Blende mit gleichem Durchmesser vor das Objektiv setzt und das viel kleinere Bild der Hasselblad in der Dunkelkammer auf die Größe vergrößert, die das Lochkamerabild wegen der viel größeren Brennweite schon hat.* Die Linse des Photoapparates verwandelt nur die für der Lochkamera maßgebliche Fresnelsche Beobachtungsart der Beugung in eine Fraunhofersche, die das Beugungsbild in die Bildebene der Linse (praktisch die Brennebene) heranholt und dabei *beträchtlich verkleinert*, wodurch beugungsbedingte Unschärfen nicht mehr sichtbar sind. Die Auflösung wird durch die Blende bestimmt und durch ein Linsenobjektiv nicht verändert. Verbindet man beide Formeln (Fresnelsche Zonenkonstruktion und Auflösungsformel) miteinander, ist die kleinste auflösbare Länge  $r/2$ . Könnte man mit dem Blendendurchmesser von  $7,3\text{mm}$ , das entspricht der Blende 11 bei einer Brennweite von  $80\text{mm}$ , ein Lochkamerabild mit

der zugehörigen Brennweite von 143m anfertigen, das 1800 mal größer ist, und verkleinert es auf die Größe des Hasselbladbildes, ist kein Unterschied bemerkbar.

### 3. Diskussion beider Objektive

Auch ein Beugungsobjektiv weist Abbildungsfehler auf. Aus der Helmholtzschen Formel geht hervor, daß sie einen chromatischen Fehler zeigt. Weiterhin hat sie einen, allerdings vernachlässigbaren astigmatischen Fehler, weil für schräg einfallendes Licht das Loch nicht mehr eine kreisrunde, sondern eine ovale Öffnung hat. Dagegen entfällt der sphärische Fehler. Jede Linsenkamera dagegen hat mit zunehmenden Blendendurchmesser (abnehmender Blendenzahl) einen je nach Qualität des Objektivs unterschiedlichen, sphärischen Fehler, der das Bild verschlechtert. Der entscheidende Grund, weshalb bei praktischer Anwendung ein Linsenphotoapparat doch günstiger ist, ist nicht seine Schärfe, sondern seine viel größere Lichtstärke, weil er das Bild erheblich verkleinert und damit heller macht. Damit verbunden ist auch seine Handlichkeit, die erst Schnappschüsse möglich macht.

Zum Beweis meiner Behauptungen habe ich ein weit entferntes Objekt einmal mit einer Lochkamera ( $f=1,2m$ ) und dann bei Vorsetzen der gleichen Blende (Durchmesser 1,3mm) mit der Hasselblad ( $f=80mm$ ) photographiert. Abb.3a zeigt die Lochkameraaufnahme, Abb.3b die Hasselbladaufnahme. Wegen der unterschiedlichen Brennweiten ist das Hasselbladbild kleiner; wird aber der eingekastete Bereich auf die gleiche Größe vergrößert, ist es schlechter als das erstere. Konturen (z.B. links oben die Plattenfugen) werden von der Lochkamera besser aufgelöst, zudem stört bei der Hasselbladaufnahme die Körnigkeit des Filmmaterials.

#### Daten der drei Photographien:

Lochkamera:  $f=1,20m$   $2r=1,3mm$  Film: HP5 27/10DIN Blende 900  
Bei Lichtwert 16 ist die Belichtung 8s  
Hasselblad:  $f=80mm$   $2r=1,3mm$  Film: HP5 w.o. Blende 64  
Bei Lichtwert 16 ist die Belichtung 1/15 s

Ein feinkörniger Film wäre zwar für die Hasselbladaufnahme geeigneter gewesen, er hätte aber nichts an der Auflösung ändern können.

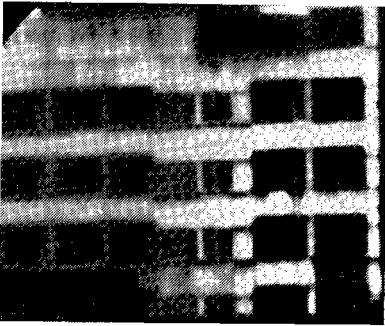


Abb.3a Lochkamerabild



Abb.3b Hasselbladbild

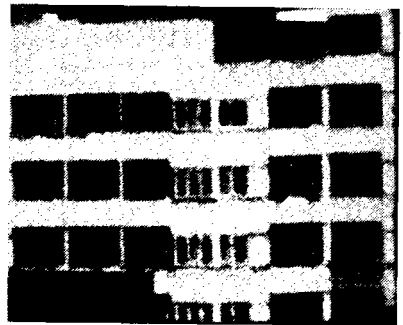


Abb.3c, 3b vergrößert zu 3a

#### Literatur

- M. ACHILLES, Das historische Experiment: Versuche zur Beugung von Mikrowellen an Rundblenden.  
In: Prax.d.Nat.-Wiss.(Phys.) 2/37 S.36-38 (1988)
- M. ACHILLES, Ist die Lochkamera trivial? Einführung zu einem Bildband, In: (Hrsg.) R. LANGEBARTELS, Edition Gianozzo Berlin Bd 26: 100 Lochkameras/100 Photographien. Berlin 1983 S. 2-6
- R.W.POHL, Einf.i.d.Mechanik, Akustik u. Wärmelehre. Berlin, Heidelberg, New York, 17.1969 S.210  
(Fresnelsche Zonenkonstruktion)