

# Experiment des Monats

## Photographieren mit der Lochkamera

Von Jearl Walker

Die verwirrende Vielfalt unter den hochentwickelten Kameras unserer Tage mag manchen Photographen vergessen lassen, daß man auch ohne ein kostspieliges Objektiv passable Aufnahmen machen kann: Ein Loch in der Kamera – dessen Durchmesser freilich auf die Größe des aufgenommenen Objekts abgestimmt sein muß – tut's auch, wie die Photographie in Bild 1 zeigt. Warum

kann man mit einem schlichten schwarzen Kasten, der vorn ein Loch hat und auf der hinteren Innenseite mit einem Film versehen ist, gute Photos machen?

Bereits Aristoteles erwähnt, daß man Gegenstände mit einer Lochblende auf einem ebenen Schirm scharf abbilden kann. Das Licht, das von einem bestimmten Punkt des Gegenstandes ausgeht, kann nämlich nur zu einem kleinen

Teil durch die winzige Kameraöffnung auf den Schirm – oder Film – gelangen. Nur das schmale Lichtbündel, welches durch das Loch hindurchgeht, erzeugt in der Filmebene einen Fleck. Aus vielen solcher Flecke, deren Helligkeit davon abhängt, wie hell der Gegenstand am zugehörigen Punkt ist, setzt sich das Bild hinter der Lochblende zusammen (Bild 2). Schon Leonardo da Vinci kannte dieses Prinzip – damit erklärte er die zu seiner Zeit bereits bekannte „Camera Obscura“, eine Art Lochkamera, bei der eine Mattscheibe die Rolle des Films ersetzt. Eine moderne Beschreibung muß natürlich der Wellennatur des Lichts Rechnung tragen – die erste Erklärung dieser Art stammt von Lord Rayleigh.

Natürlich besteht an der Lochkamera vor allem der einfache Aufbau. Allerdings müssen die Größe des Lochs und die Länge der Kamera genau aufeinander abgestimmt sein, damit man schließlich scharfe Bilder bekommt.



Bild 1: Photographie, die Kenneth A. Conners mit einer Lochkamera aufnahm.

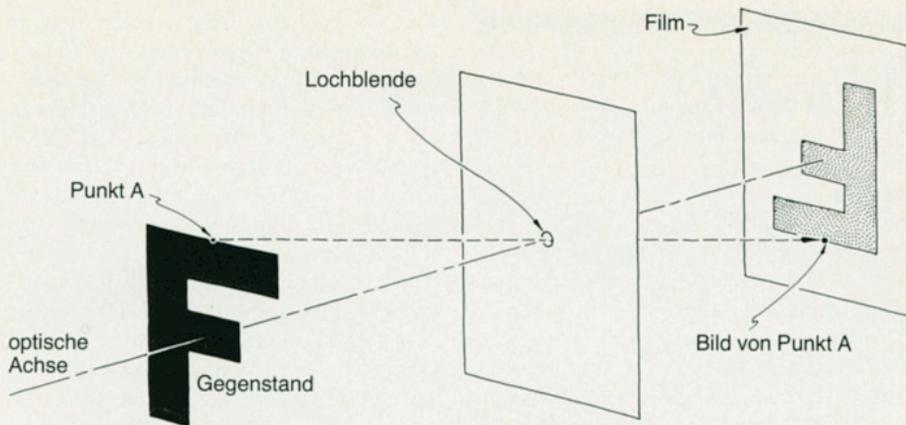


Bild 2: Strahlengang bei einer Lochkamera.

### Das Loch

Im Prinzip kann das Loch beliebig groß gewählt werden, sofern der Film genügend weit entfernt ist und ein ausreichendes Format hat. Wenn die Kamera nicht ins Uferlose wachsen soll, sind der Größe des Lochs allerdings enge Grenzen gesetzt. Ich möchte im folgenden eine handliche Kamera betrachten, deren Öffnung etwa zehn Zentimeter vom Film entfernt ist.

Angenommen, man nimmt einen weit entfernten Lichtpunkt auf. Lichtstrahlen, die von der Lichtquelle ausgehen, fallen dann annähernd parallel auf die Kamera. In der Filmebene entsteht also ein Lichtfleck, der genau den gleichen Durchmesser hat, wie das Loch. Je größer das Loch, um so größer also auch der Fleck. Wenn man nun mehrere Lichtpunkte aufnimmt, die dicht beieinander liegen, und die Kameraöffnung zu groß wählt, entsteht für jeden Lichtpunkt ein relativ großer Fleck in der Filmebene. Die Folge ist, daß sich die einzelnen Flecke überlappen – das Bild wird unscharf und gibt die Lichtpunkte nicht getrennt wie-

der. Man muß in einem solchen Fall den Lochdurchmesser verringern, um die Lichtfleckchen zu verkleinern.

Allerdings geht das nur bis zu einem gewissen Grad, denn irgendwann kommt unweigerlich die Beugung ins Spiel. Der Lichtfleck wird dann zu einem Beugungsbild aufgefächert: In der Bildmitte entsteht ein verhältnismäßig heller Punkt, der von lichtschwächeren Ringen umgeben ist. Wenn man das Loch jetzt noch weiter verkleinert, wächst das Beugungsmuster und wird deutlicher ausgeprägt – es verwischt die Konturen der einzelnen Lichtfleckchen, und das Bild wird unscharf.

Wo aber liegt zwischen den beiden extremen Lochgrößen der goldene Mittelweg? Der ideale Radius hängt vom Abstand zwischen Kameraöffnung und Film ab. Betrachten wir dazu den in Bild 3 gezeigten Strahlengang: Das Licht einer weit entfernten Punktquelle fällt auf eine kreisförmige Öffnung, die durch konzentrische Kreise in sogenannte Fresnelsche Zonen aufgeteilt ist. Der Abstand der Kreise entspricht dabei jeweils der halben Wellenlänge des einfallenden Lichts.

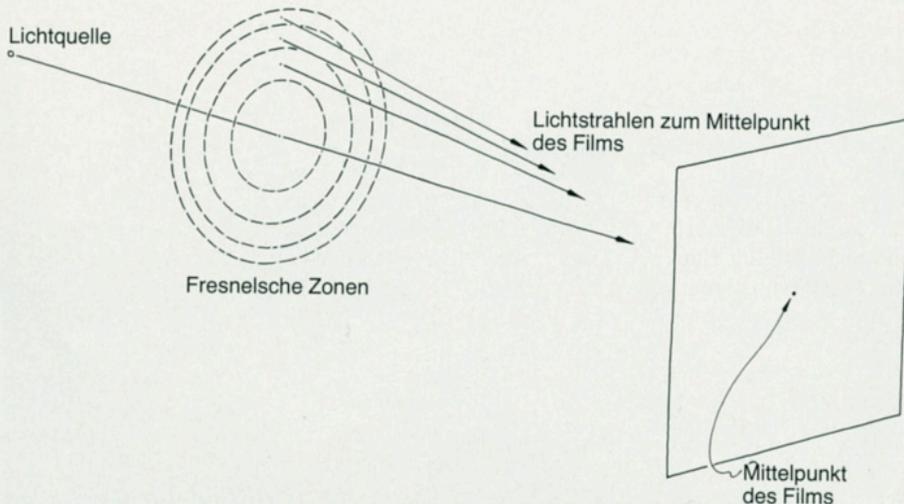


Bild 3: Abbildungseigenschaften eines Lochs.

Man kann nun die Lichtwellen betrachten, die von Punkten innerhalb der verschiedenen Zonen ausgehen. Nach dem Huygensschen Prinzip überlagern sich diese Lichtwellen – sie interferieren. Und zwar gerade so, daß sie sich in nur einem Punkt verstärken – nämlich dem Mittelpunkt des Beobachtungsschirms. An allen anderen Punkten löschen sich die Wellen aus. Beispielsweise legen zwei Wellen, die von der ersten und zweiten Zone ausgehen und sich im Mittelpunkt des Schirms treffen, unterschiedliche Wege zurück – die Differenz entspricht einer halben Wellenlänge. Wenn sie die gleichen Amplituden hätten, würden sie sich völlig auslöschen, und entsprechendes gilt für alle „Wellenpaare“ aus benachbarten Zonen. Allerdings sind die Amplituden nicht exakt gleich, und das ist der Grund, warum bei der Überlagerung aller Wellenanteile in der Mitte des Beobachtungsschirms ein heller Fleck – ein Interferenzmaximum – entsteht. Die Wellenamplitude ist dort allerdings nur halb so groß, wie die gesamte Amplitude der ersten Zone. Bei der Helligkeit wirkt sich dieser Unterschied besonders kraß aus, denn sie ist dem Amplitudenquadrat proportional. Wenn nur Licht aus der innersten Fresnelschen Zone auf den Schirm fiel, hätte der Lichtfleck also die vierfache Helligkeit.

Das Loch einer Lochkamera sollte also gerade die Größe haben, bei der die Lichtwellen der ersten Fresnelschen Zone durchgelassen werden, die Wellen der weiter außen liegenden Zonen dagegen nicht auf den Film gelangen. Dann entsteht nämlich in der Filmebene ein heller, aber noch nicht zu großer Lichtfleck. Bei einem zu kleinen Loch trägt nur ein Teil der ersten Zone zum Bild bei, und der Lichtfleck wird dunkler; obendrein fächert die stärkere Beugung den Fleck auf – das Bild wird unscharf. Ist das Loch zu groß, erhält man ebenfalls einen vergleichsweise dunklen Lichtfleck, denn die Wellen der zweiten Zone löschen die der ersten teilweise aus. Mit zunehmender Lochgröße wird natürlich auch der Lichtfleck größer.

Jetzt müssen wir nur noch wissen, wie der Radius  $R$  der ersten Fresnelschen Zone – die ideale Lochgröße – vom Abstand  $A$  zwischen Loch und Film abhängt. Solange das Loch vom Gegenstand viel weiter entfernt ist als vom Film, ergibt sich der Radius  $R$  näherungsweise aus der Quadratwurzel des Produktes von Lichtwellenlänge und Abstand. Diese Formel spiegelt die Tatsache wider, daß man bei einer handlichen Kameragröße nur mit winzigen Löchern arbeiten kann. Vor allem macht sie eine Analogie zwischen dem Loch und einer Linse deutlich.

Wenn auf dem Film ein scharfes Bild entsteht, dann kann man das Loch als Linse betrachten, die ein Bild in der Brennebene – oder Filmebene – fokussiert. In diesem Fall entspricht der Abstand zwischen Film und Loch also der Brennweite. Nach unserer Formel ist die Brennweite gleich dem Quadrat des Lochradius dividiert durch die Lichtwellenlänge.

Die Linsenanalgie hilft auch dann weiter, wenn man mit einer Lochkamera nicht nur weit entfernte, sondern auch nahe Objekte aufnehmen will (die aber immer noch durch viele Kameralängen vom Loch getrennt sind). Bei einer dünnen Linse kann man die Brennweite aus den Abständen zwischen Linse und Bild beziehungsweise Linse und Gegenstand berechnen: Der Kehrwert der Brennweite ist gleich der Summe der Kehrwerte von Gegenstandsweite und Bildweite. Wenn der Gegenstand sehr weit von der Kamera entfernt ist, beträgt der Kehrwert der Gegenstandsweite näherungsweise Null, und die Brennweite entspricht dem Abstand Loch-Film. Will man jedoch einen nahen Gegenstand aufnehmen, so muß man dem Beitrag der Gegenstandsweite Rechnung tragen und die Bildweite – und das heißt die Kamera – vergrößern, denn an der Brennweite ist bei vorgegebener Lochgröße nicht zu rütteln. Wenn die Kamera zu stark „wächst“, bietet sich als Ausweg an, das Loch zu verkleinern. Dann wird nämlich die Brennweite kleiner, und man kommt auch mit einer kleineren Bildweite aus. Allerdings kann man nicht beides haben – die ideale Lochgröße und eine handliche Kamera, sofern nahe Objekte fotografiert werden sollen. Zum Glück entstehen trotzdem im allgemeinen erstaunlich gute Bilder, denn eine Lochkamera besitzt eine außerordentlich große Tiefenschärfe.

Wenn man selbst eine Lochkamera bauen möchte, reicht es natürlich nicht aus, die Beziehungen zwischen Lochradius und Kameralänge zu kennen – für eine der beiden Größen braucht man einen genauen Zahlenwert. Da die Kamera handlich sein soll, gibt man in der Regel die Abmessungen des Gehäuses vor und paßt die Lochgröße dann so an, daß ein möglichst scharfes Bild entsteht oder, wie der Fachmann sagt, eine möglichst hohe Auflösung erreicht wird.

### Auflösung der Lochkamera

Alle optischen Instrumente und insbesondere auch das menschliche Auge haben ein begrenztes Auflösungsvermögen. Angegeben wird es meist durch den Winkel, unter dem die Kamera – oder das Auge – zwei eng benachbarte Punkte gerade noch trennen kann. Liegt die-

ser Winkel in Größenordnungen von weniger als drei Winkelminuten (ein Milliradian), erkennen wir anstelle zweier einzelner Punkte nur einen verschmierten Fleck. Dazu ein Beispiel: Wenn Sie zwei Punkte, die einen Abstand von einem Millimeter haben, aus einer Entfernung von einem Meter betrachten, entspricht der Sehwinkel einem Milliradian. Wenn Ihre Augen „gut“ sind, sollten Sie beide Punkte deutlich getrennt sehen.

Es reicht völlig aus, wenn eine Lochkamera das Auflösungsvermögen des Auges erreicht, denn bei einer nicht nachvergrößerten Fotografie würden wir von der höheren Auflösung ohnehin nichts wahrnehmen. Bei der folgenden Abschätzung gehe ich deshalb davon aus, daß mit der Lochkamera zwei Gegenstandspunkte fotografiert werden, die die Kamera unter einem Winkel von drei Minuten „sieht“. Wenn man einen Kontaktabzug von dem Filmnegativ macht und ihn aus einer Entfernung betrachtet, die der Bildweite der Kamera entspricht, sollte man beide Lichtflecke noch getrennt erkennen. Wenn man den Sehwinkel kennt, kann man daraus den idealen Lochdurchmesser bestimmen, denn dieser Winkel ist näherungsweise gleich dem Quotienten aus Lichtwellenlänge und Lochdurchmesser. Mit einer mittleren Wellenlänge von einem halben Mikrometer und dem oben zugrunde gelegten Winkel von drei Winkelminuten erhält man einen optimalen Lochdurchmesser von 0,5 Millimetern.

Jetzt müssen wir noch die Brennweite des Lochs und damit die optimale Bildweite abschätzen. Die oben abgeleitete Wurzelbeziehung zwischen Lochradius, Brennweite und Wellenlänge ergibt ohne große Rechnungen eine Bildweite von 12,5 Zentimetern. Diese Abschätzung liefert nur einen relativ groben Anhaltspunkt, denn die einfachen Formeln, die wir zugrundegelegt haben, gelten nur näherungsweise. Trotzdem zeigen sie, warum es wenig sinnvoll ist, das Auflösungsvermögen einer Lochkamera über ein gewisses Maß hinaus zu steigern: Wenn man den Lochdurchmesser beispielsweise verdoppelt, bekommt man zwar das doppelte Auflösungsvermögen, aber die Bildweite vervierfacht sich! An dem nicht vergrößerten Photoabzug merken Sie keine Verbesserung – solange Sie ihn nicht mit der Lupe betrachten. Aber dafür ist die Kameralänge auf fünfzig Zentimeter gewachsen – und einen größeren Film brauchen Sie auch. Ein hoher Aufwand also, den der geringe Effekt nicht lohnt.

### Abbildungsfehler

Ähnlich wie Linsen führt auch ein Loch zu gewissen Abbildungsfehlern,

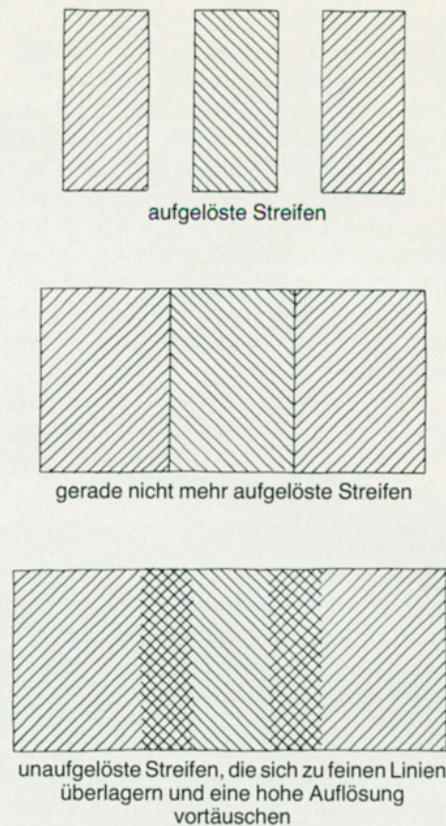


Bild 4: Tatsächliche und scheinbare Auflösung.

auch wenn das Loch in einem Punkt besser abschneidet als einfache Objektive. Während alle Linsen und die aus ihnen zusammengesetzten Kameraobjektive das Bild mehr oder weniger verzerren und beispielsweise aus einem Quadrat ein „Kissen“ oder eine „Tonne“ mit gekrümmten Seiten machen, ist das „Objektiv“ der Lochkamera schon von Haus aus völlig verzerrungsfrei. (Moderne Kameraobjektive müssen so korrigiert werden, daß das Auge die noch vorhandene Verzeichnung nicht mehr wahrnimmt.)

Daneben gibt es jedoch noch Abbildungsfehler, von denen auch eine Lochkamera nicht frei ist. Wenn das Loch für eine bestimmte Bildweite zu groß ist, weist das Bild manchmal feine Strukturen auf, die ein höheres Auflösungsvermögen vortäuschen, als die Kamera wirklich besitzt. Diese Strukturen haben auch nichts mit tatsächlichen Feinheiten des abgebildeten Gegenstands zu tun, sondern sie entstehen erst bei der Überlagerung sich überlappender Lichtflecke in der Filmebene (Bild 4).

Zu den „Linsenfehlern“ einer Lochkamera gehört auch die sogenannte chromatische Aberration. Für verschiedene Lichtwellenlängen erhält man bei ein und demselben Lochdurchmesser unterschiedliche Bildweiten. Wir haben den Lochdurchmesser bei unseren bisherigen Überlegungen immer nur für eine bestimmte Wellenlänge, nämlich 0,5 Mikrometer, betrachtet. Der sichtbare

Spektralbereich umfaßt jedoch Wellenlängen zwischen etwa 0,4 bis 0,8 Mikrometern, und vor allem wird das Licht bei jeder Wellenlänge etwas anders abgelenkt. Dadurch entstehen in Schwarzweißbildern oft unscharfe Kanten – bei Farbaufnahmen gelegentlich Farbsäume. Derartige Farbfehler lassen sich durch ein Filter ausschalten, das Licht nur in einen schmalen Wellenlängenbereich passieren läßt. Man kann die Kamera dann für diesen Wellenlängenbereich „maßschneidern“.

Ein Abbildungsfehler, der Linsen- und Lochkameras gleichermaßen anhaftet,

ist der Astigmatismus. Er tritt immer dann auf, wenn ein Gegenstand abgebildet wird, der nicht auf der optischen Achse liegt. Ein Lichtstrahl, der von einem solchen Objekt ausgeht, „sieht“ kein rundes Loch, sondern eine Ellipsenform. Selbst wenn nur Licht einer bestimmten Wellenlänge auf die Kamera fällt, gibt es unter diesen Umständen keine optimale Bildweite, denn für die große und kleine Halbachse der Ellipse ergibt die Rechnung verschiedene Ergebnisse. Hinzu kommt, daß schräg einfallende Lichtstrahlen zwischen dem Loch und der Filmebene längere Wege zu-

rücklegen, wenn sie mit der optischen Achse einen größeren Winkel einschließen. Für diese Strahlen ist die Bildweite also zu groß. (An der Form des Bildes ändert sich allerdings durch den Einfallswinkel nichts – das Bild des Lochs bleibt immer kreisförmig.)

Was das Photographieren mit einer Lochkamera so schwierig macht, sind aber nicht diese vergleichsweise harmlosen Abbildungsfehler, sondern die äußerst geringe Lichtstärke. Durch das kleine Loch gelangt so wenig Licht auf den Film, daß man eine sehr lange Belichtungszeit braucht. Sie läßt sich mit einem



Bild 5: Weitwinkelaufnahme von John M. Franke.

gewöhnlichen Belichtungsmesser ermitteln. Bei unserer Kamera mit einem Lochdurchmesser von 0,5 Millimetern und 12,5 Zentimeter Brennweite (das heißt bei Blende 250), muß der Film tausendmal länger belichtet werden, als der Belichtungsmesser für Blende 8 anzeigt! Die hohe Belichtungszeit ist der Preis, den man für die gewaltige Tiefenschärfe der Lochkamera zahlen muß. Denn die Tiefenschärfe ist eine Folge der hohen Blendenzahl.

### Weitwinkelaufnahmen

Mit einer Lochkamera kann man es durchaus zu Weitwinkelaufnahmen bringen; allerdings muß man dann dafür sorgen, daß der Film gleichmäßig belichtet wird. Bei einer Lochkamera ist das nämlich keineswegs von vornherein der Fall, selbst dann nicht, wenn der aufgenommene Gegenstand überall die gleiche Helligkeit hat. Dafür gibt es mehrere Gründe. Angenommen, man fotografiert zwei gleich helle und gleich weit entfernte Lichtpunkte, von denen einer auf der optischen Achse liegt und der andere ziemlich weit davon entfernt ist, dann bildet das Loch den ersten Punkt heller ab als den zweiten. Die Strahlen, die vom Lichtpunkt auf der optischen Achse ausgehen, können durch die volle Lochöffnung treten; für die vom zweiten Punkt ausgehenden Strahlen erscheint das Loch dagegen als zusammengedrückte Ellipse, die nur einen Teil der Strahlung durchläßt. Außerdem müssen die schräg zur Achse einfallenden Strahlen eine längere Wegstrecke vom Loch zum Film überwinden und werden daher durch die Beugung zu einem größeren (und entsprechend dunkleren) Lichtfleck aufgefächert. Auf diese Weise wird das Bild der Lochkamera in verhältnismäßig kleinen Abständen vom Mittelpunkt leicht zu dunkel – und das schränkt den Bildwinkel stark ein.

Da Lochkameras mit verhältnismäßig großen Brennweiten arbeiten, kann man große Bildwinkel nur mit großen Filmformaten erreichen. Weitwinkelaufnahmen mit Lochkameras sind bei den gängigen Filmformaten nur möglich, wenn man sich auf kleine Bildweiten beschränkt und entsprechend schlechte Auflösungen in Kauf nimmt. Theoretisch könnte man Abhilfe schaffen, indem man die Filmemulsion auf eine Halbkugel aufbringt, deren Mittelpunkt auf der optischen Achse liegt. Dann würden selbst Strahlen, die fast senkrecht zur optischen Achse einfallen, mit einer vernünftigen Bildweite senkrecht auf die lichtempfindliche Fläche treffen. Praktisch ist dieses Verfahren jedoch nicht, weil es enorme technische Schwierigkeiten bereitet, halbkugelförmige Filme

herzustellen. Bei flachen Landschaften und anderen Motiven mit geringer vertikaler Ausdehnung bietet sich aber ein Kompromiß an: Man biegt einen normalen Filmstreifen zu einem Halbkreis.

Weitwinkelaufnahmen mit einem Bildwinkel von fast 180 Grad lassen sich aber auch mit einem ebenen Film realisieren – das Photo in Bild 5 nahm John M. Franke mit einer gewöhnlichen Lochkamera auf, hinter deren Öffnung er eine Halbkugel aus Glas gesetzt hatte (Bild 6). Bei dieser Anordnung werden die einfallenden Lichtstrahlen an der ebenen Glasfläche direkt hinter dem Loch zur optischen Achse hin gebrochen und fallen dann im rechten Winkel auf die Kugelfläche, so daß sie dort nicht gebrochen werden. Das bedeutet, die Strahlen verlaufen vom Eintritt in den Glaskörper bis zum Auftreffen auf dem Film geradlinig. Dadurch werden Strahlen, die unter einem Winkel von 180 Grad auf das Loch treffen, in Frankes Kamera auf einen Kegel mit einem Öffnungswinkel von 84 Grad zusammengedrängt. Wenn der Film genügend weit vom Loch entfernt ist, kann man auf diese Weise einen Winkel von 180 Grad ins Bild bekommen.

Frankes Halbkugel besitzt einen Durchmesser von 25 Millimetern und besteht aus Borkron-Glas BK 7, dessen Brechzahl bei 1,5 liegt. Die Größe der Halbkugel spielt dabei nur eine untergeordnete Rolle – das Entscheidende ist die Brechzahl. Deshalb lohnt es sich, auch andere Glassorten oder vielleicht auch Kunststoffe auszuprobieren. Allerdings werden Sie bei Ihren Versuchen

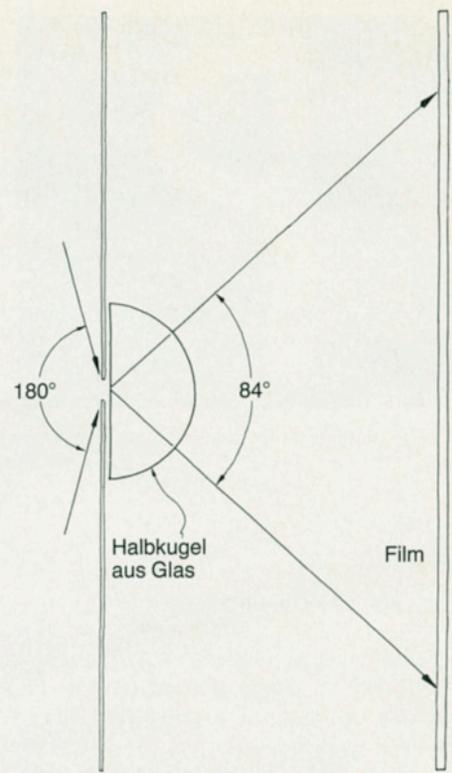


Bild 6: Anordnung für Weitwinkelaufnahmen.

auch den Haken an der Sache bemerken. Beim vollen Bildwinkel von 180 Grad entstehen Bilder, die am Rand etwas verzerrt sind. Außerdem hat die ebene Glasfläche den Nachteil, schräg einfallendes Licht zu reflektieren; beispielsweise werden Strahlen, die mit der optischen Achse einen Winkel von 80 Grad einschließen, zu 90 Prozent reflektiert.

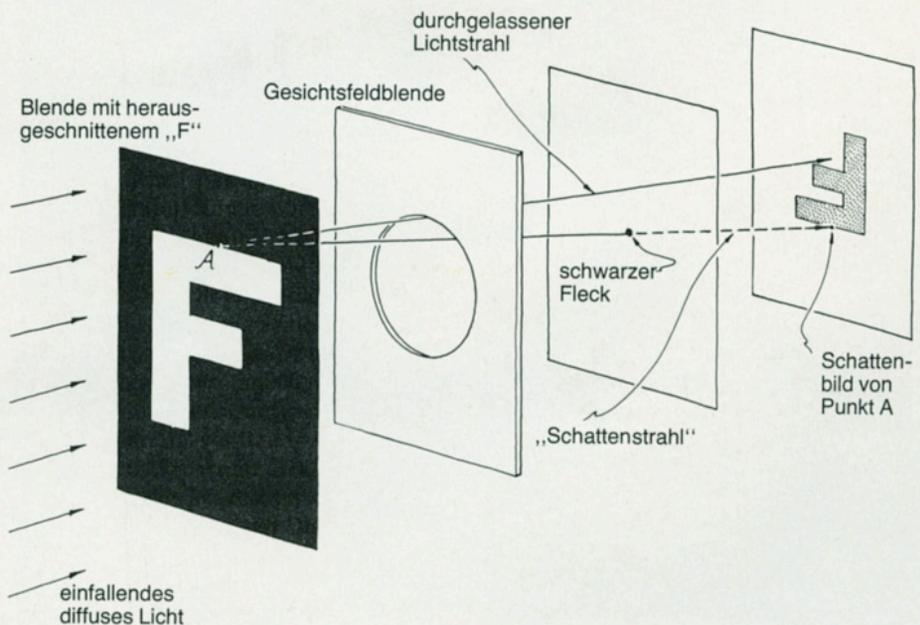
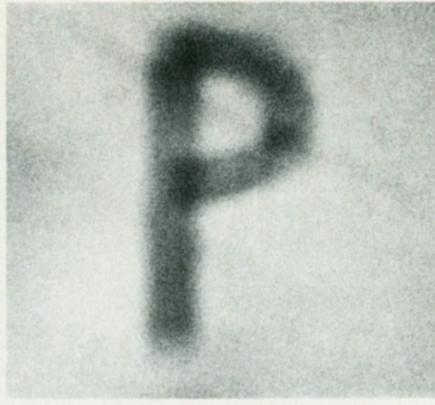
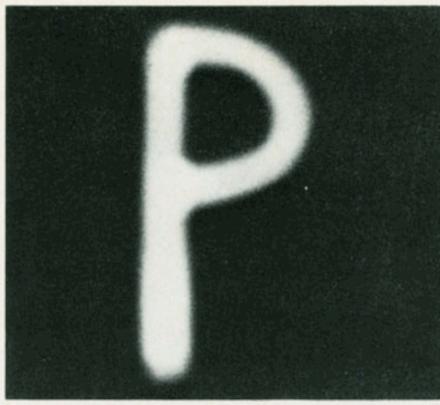


Bild 7: Strahlengang bei einem Schattenbild.



**Bild 8: Aufnahme mit einer Lochkamera (links) und das zugehörige Negativbild von einer Hinderniskamera.**

### Bau einer Lochkamera

Das Wichtigste ist, ein exakt kreisrundes Loch mit einem glatten Rand in die Blende zu bohren. Das läßt sich auf verschiedene Weise erreichen. So hat Matt Young seine Lochblenden aus 50 Mikrometer dicken Messingfolien gefertigt, die im Maschinenbau vielfach zur Herstellung von Toleranzplättchen verwendet werden. Er benutzte dazu eine Fräsmaschine. In den Fräskopf spannte er eine Nähnadel ein und legte die Folie mit einer frisch polierten Bleiplatte als Unterlage auf den Frästisch. Dann schaltete er

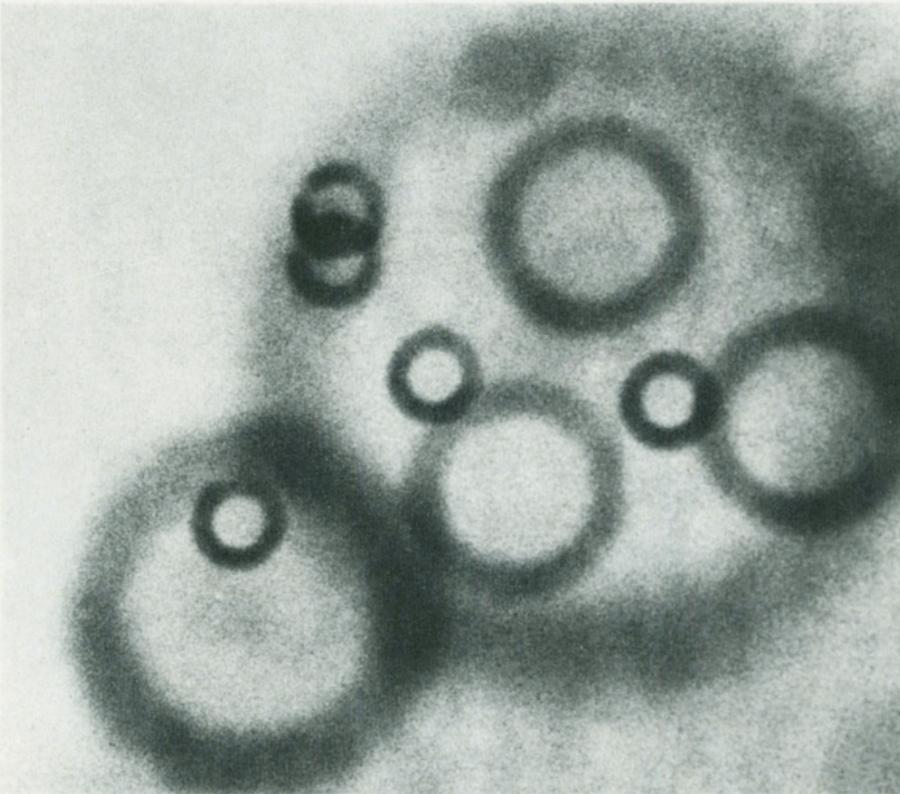
den Vertikalvorschub ein und trieb so die Nadel durch die Folie. Die Bleiunterlage sorgte dafür, daß sich die Folie nicht verziehen konnte. Nun wurde der Lochrand entgratet und das Loch vorsichtig mit der Nadelspitze erweitert.

Wie man dasselbe ohne Fräsmaschine erreichen kann, zeigt die Methode von Kenneth A. Conners, der ebenfalls mit 50 Mikrometer dicker Messingfolie arbeitet. (Bei einfachen Bastelmaterialien wie etwa Pappe entartet das Loch leicht zu einem Hohlzylinder, dessen Innenwand störende Reflexe erzeugt.) Als Arbeitsunterlage verwendet Conners einen

dicken Karton oder weiches Holz; mit einer Nadelspitze treibt er zunächst eine kleine Einsenkung in die Folie, achtet aber sorgfältig darauf, sie nicht zu durchstechen. Anschließend wird die Folie umgedreht und der durchgedrückte Höcker mit feinem Schmirgelpapier abgeschliffen. Die ganze Prozedur muß manchmal bis zu fünfzehnmal wiederholt werden, bis schließlich das Loch groß genug ist, um die Nadel durchzulassen. Den Nadeldurchmesser kann man mit einem Mikroskop, das ein Okularmikrometer besitzt, genau vermessen. Auf diese Weise läßt sich der Lochdurchmesser genau angeben. Allerdings braucht man hier die Exaktheit nicht zu übertreiben – probieren geht über studieren.

Die fertige Lochblende klebt Conners auf ein Blech, das seinerseits ein Loch mit sechs Millimeter Durchmesser hat. Die der Kamera zugewandte Seite seines „Objektivs“ schwärzt er mit Mattlack, um Reflektionen durch Streulicht zu vermeiden. Allerdings bleibt um die Blendenöffnung eine „Sicherheitszone“ von ein bis zwei Millimetern frei, damit sich keine Farbpartikel am Lochrand absetzen, die die kreisrunde Form verändern könnten. Natürlich muß die Blendenöffnung aus dem gleichen Grund staubfrei bleiben. Conners bewahrt seine Objektive in Plastikbeuteln auf und überprüft sie in regelmäßigen Abständen unter dem Mikroskop.

Als Kameragehäuse kann im Grunde genommen eine beliebige Schachtel dienen, sofern sie absolut lichtdicht ist. Ich habe schon funktionstüchtige Lochkameran aus Schuhkartons gesehen. Es genügt, den Film oder das Photopapier in der Dunkelkammer an der Innenseite der Rückwand festzukleben und anschließend den Deckel mit Klebestreifen abzudichten. Als Kameraverschluß kann man ebenfalls ein Stück Klebestreifen verwenden, das auf der Metallplatte des Objektivs über dem Loch befestigt und nur während der Aufnahme abgezogen wird. So einfach diese Kamera ist, so schwierig ist es, damit umzugehen: Der Fotograf muß nach jeder Aufnahme in die Dunkelkammer, und oft stellt er dann nach all der Mühe fest, daß das Bild verwackelt ist. Beim „Betätigen des Verschlusses“ läßt sich die Kamera kaum ruhig halten, und Erschütterungen führen unvermeidlich zu Bildverzerrungen. Wer eine perfekte Lochkamera haben möchte, kann eine Anregung von Young aufgreifen und eine handelsübliche Kamera entsprechend umbauen. Besonders gut eignet sich dafür eine Spiegelreflexkamera mit Wechseloptik. Wenn man einen Satz Zwischenringe oder gar ein Balgen-Naheinstellgerät zur Verfügung hat, braucht man nur noch die Lochblende anzubringen und dieses neue Objektiv –



**Bild 9: Aufnahme eines Rings, die Adam Lloyd Cohen mit elf Hindernisfolien machte.**

anstelle des alten – in die Kamera einzuschrauben. Notfalls tut es aber auch eine einfache Pappröhre – sie läßt sich mit Klebeband am Kameragehäuse befestigen. Natürlich bietet eine solche Lochkamera alle Bequemlichkeiten gewöhnlicher Photoapparate: Man kann einen ganzen Film mit vielen Aufnahmen belichten, und vor der Aufnahme ist im Sucher sogar deutlich (wenn auch etwas lichtschwach) das vom Loch auf den Film geworfene Bild zu erkennen.

### Punkte und Kügelchen als Objektiv

Wenn man die Anordnung der Lochkamera gleichsam auf den Kopf stellt und die Lochblende durch eine Klarsichtfolie mit einem kleinen kreisförmigen Fleck ersetzt, kann man Schattenbilder aufnehmen (Bild 7). Angenommen, man beleuchtet ein Stück Pappe, aus dem der Buchstabe F herausgeschnitten wurde, so daß das Licht durch die Folie mit dem Fleck auf einen Beobachtungsschirm oder einen Film fällt. Der Fleck erzeugt dann auf dem Schirm ein Schattenbild – genauso wie ein gleich großes Loch ein helles Bild fokussieren würde. Der Fleck hält gerade diejenigen Strahlen auf, die ein Loch durchlassen würde, und umgekehrt läßt die Klarsichtfolie Strahlen passieren, die eine Lochblende abschirmen würde. Auf diese Weise erzeugt der Fleck ein Negativbild von dem, was eine Lochkamera abbildet (Bild 8). Ansonsten unterscheiden sich die Bilder im Prinzip aber nicht – sie haben dieselbe Schärfe und Auflösung, wenn das Hindernis die Größe der Lochblende hat und genauso weit vom Film entfernt ist.

Bei den Schattenbildern beobachtet man allerdings wesentlich geringere Kontraste als bei Aufnahmen einer Lochkamera. Der Grund ist, daß sehr viel Licht am Hindernis vorbeigeht und den Film gleichmäßig ausleuchtet. Nur das wenige (im fertigen Bild fehlende) Licht, das auf das Hindernis trifft, zeichnet den Gegenstand – das heißt dessen Schatten – auf den Film. Der Bildkontrast läßt sich jedoch leicht steigern, indem man den Gegenstand mit weniger intensivem Licht beleuchtet oder einen größeren Teil der ausgehenden Strahlen mit dem Hindernis ausblendet. Dazu kann man das Hindernis vergrößern oder näher an den Film heranrücken. Allerdings geht das – wie bei der Lochkamera – in beiden Fällen auf Kosten der Auflösung.

Adam Lloyd Cohen hat viele Aufnahmen solcher Schattenbilder gemacht und dabei festgestellt, daß die schlechtere Auflösung oft unvermeidlich ist, weil manche Bilder erst sichtbar werden, wenn man die Kontraste steigert. In vielen Fällen verdirbt Fremdlicht, das nicht

vom Gegenstand stammt, die Aufnahme. Um es abzusichern, stellt Cohen eine Gesichtsfeldblende und einen Tubus hinter den Gegenstand, und zwar so, daß der Tubus die Blende teilweise abdeckt. Die Blendenöffnung ist zwar viel größer als das Hindernis, aber doch so klein, daß sie nur die Strahlen durchläßt, die vom Gegenstand ausgehen.

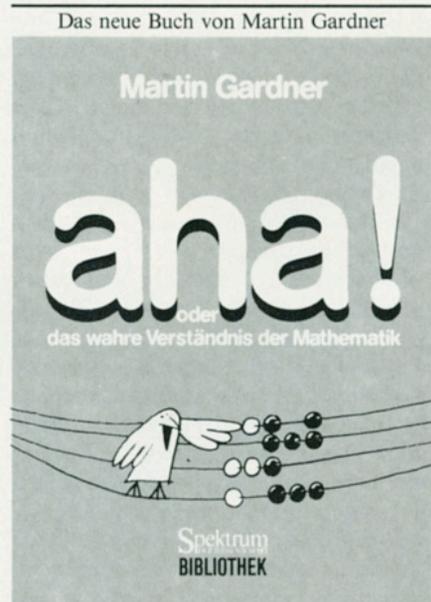
Wenn man die Schattenbilder mit einem Farbfilm aufnimmt, kann man Überraschungen erleben: Einzelne Gegenstände haben auf dem Farbpositiv ihre Farben gewechselt. Das hängt damit zusammen, daß die Farben, die wir sehen, meist keine reinen Spektralfarben sind, sondern durch Farbmischung zustandekommen. Das ist ähnlich wie bei dem altbekannten Farbkreis, dessen Farben sich bei der Rotation zu einem einheitlichen Farbton überlagern. Ein blau, grün und rot angemalter Kreislauf kann durchaus weiß aussehen, wenn er sich sehr schnell dreht. Auch die Farben der photographierten Gegenstände addieren sich auf diese Weise. Und das heißt, der Film wird mit einem einheitlichen Farbuntergrund belichtet. Allerdings fehlt dort, wo ein Schatten entsteht, diejenige Farbe, die der zugehörige Gegenstand hat. Das Schattenbild bekommt daher eine Farbe, die gleichsam durch Subtraktion der Farben des Gegenstands und des Untergrunds entsteht. Ist der Lichtuntergrund weiß, so sieht man im Schattenbild gerade die Komplementärfarbe, die zur Farbe des Gegenstands gehört. Beispielsweise erscheinen rote Gegenstände in der Komplementärfarbe Cyan und grüne in Purpur, sofern sich die Farben aller Gegenstände insgesamt zu Weiß mischen.

Kameras, bei denen ein Loch oder ein Hindernis als Objektiv fungieren, haben vieles gemeinsam: Das Abbildungsprinzip ist das gleiche, und das bedeutet, in beiden Fällen hängt der Abbildungsmaßstab von der Bildweite ab. Man erhält beide Male unverzerrte Bilder. Und schließlich kann man mit beiden Objektiven Weitwinkelaufnahmen machen. Dennoch gibt es wichtige Unterschiede: Wenn man als Hindernis Kügelchen verwendet, läßt sich ein Linsenfehler vermeiden, der bei jeder Lochkamera auftritt: der Astigmatismus. Im Falle des Kügelchens treffen nämlich auch die schräg einfallenden Strahlen immer auf ein Hindernis mit einem Kreisquerschnitt. Außerdem kann man mit mehreren Hindernispunkten reizvolle Effekte erzielen, die mit einer Lochkamera unmöglich wären. Wenn man eine Lochkamera mit mehreren Löchern ausstattet, erzeugt nur dann jedes davon ein Bild, wenn alle Löcher in denselben Schirm gestanzt sind. Stellt man mehrere Lochblenden hintereinander auf, dann kön-

nen keine Lichtstrahlen auf den Film gelangen, weil sich die Blenden gegenseitig im (Licht)Weg stehen. Dagegen stören sich kleine Hindernisse praktisch nicht, wie Cohens Aufnahme eines hellen Rings zeigt (Bild 9). Dabei erzeugte jedes Hindernis, das zwischen dem Gegenstand und der Filmebene stand, seinen eigenen Schattenring, dessen Größe von dem jeweiligen Abstand zum Film abhängt.

Wer mit Loch- und Hinderniskameras experimentiert, wird noch einen praktisch bedeutsamen Unterschied zwischen ihnen feststellen: Während man bei dem Loch auf eine exakte Kreisform achten muß – schon ein Staubkörnchen kann das Bild verderben – spielen kleinere Formabweichungen bei einem Hindernis praktisch keine Rolle. Eine Hindernisblende ist also leicht hergestellt: Auf eine Klarsichtfolie braucht man nur ein kreisförmiges Scheibchen zu kleben – und mit einem solchen Objektiv versehen ist Ihre Kamera fertig für den ersten Schnappschuß.

Aus: *Scientific American*, November 1981



Eine Fundgrube der schönsten Geschichten aus allen mathematischen Gebieten. Voller Humor, manchmal auch voller abgründiger Ironie. Vom Frauenmörder Landru bis zu Nessie, dem Monster von Loch Ness, muß jeder herhalten, um als Handelnder oder Opfer in Martin Gardners Beispielen aufzutreten.

192 Seiten, Format 19,5 x 25 cm  
Preis DM 23,80

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

Mönchhofstr. 15 · D-6900 Heidelberg  
Telefon 06221 - 49086