

Experiment des Monats

Von der Beugung des Lichtes

an Kugeln und Spalten und den dabei entstehenden Poissonfiguren: Bemerkenswertes aus der Wellenoptik

Von Jearl Walker

Würde man Sie fragen, welche Verwendungsmöglichkeiten Sie sich für eine kleine glatte Kugel aus einem Kugellager vorstellen könnten, so würden Sie sicherlich nicht an ein Gerät zur Untersuchung des Lichtes oder an eine Art optische Linse denken. Aber beides kann sie sein, und das hängt mit einer Geschichte über die Natur des Lichtes zusammen.

Ist Licht eine Wellenerscheinung? Zu Beginn des 19. Jahrhunderts stieß diese Vorstellung auf viel Widerstand. Die Physiker hingen noch fest an der Vorstellung von Newton, der dem Licht Teilchennatur zuschrieb, als Augustin Fresnel im Jahre 1818 bei einem Wettbewerb der Académie Française ein Wellenmodell des Lichtes vorschlug. Die Jury bestand aus den Mathematikern Pierre Simon de Laplace und Siméon Denis Poisson und den Physikern Dominique François Arago, Jean Baptiste Biot und Joseph Louis Gay-Lussac.

Fresnels Arbeit stieß auf Widerstand – besonders bei Poisson, der ein Gedankenexperiment vortrug, um sie unglaublich zu machen. Wenn ein heller Lichtstrahl einen undurchsichtigen Gegenstand mit kreisförmigem Querschnitt beleuchtete, sagte er, so müsse nach Fresnels These ein heller Punkt mitten im Schatten des Gegenstandes zu sehen sein. Da so etwas offensichtlich absurd wäre, müsse das Modell falsch sein.

Arago führte das Experiment kurz darauf durch und fand den hellen Fleck, was Fresnel und das Wellenmodell des Lichtes bestätigte. Den Fleck hatten in der Tat schon 1773 andere Forscher beobachtet; das Phänomen war jedoch wieder in Vergessenheit geraten. Heute bezeichnet man diese Erscheinung häufig und nicht ohne Ironie als den Poisson'schen Fleck. Er ist von dunklen und hellen Ringen umgeben, die im Schatten der Kugel oder der kreisförmigen Scheibe liegen, die dieses Muster erzeugt.

Dale Blaszczak von der Cleveland State University hat einen Versuch ersonnen, der die Fresnelschen Prinzipien illustriert. Ich wiederholte diesen Versuch und photographierte das von einer Kugellagerkugel erzeugte Muster (Bild 1).

Wir konnten die Kugel auch als Linse verwenden, so daß sich in ihrem Schatten Bilder darstellen ließen (Bild 2). Das Poisson-Muster und die Abbildung, die von einer undurchsichtigen Kugel geformt werden, haben beide ihre Ursache in der Beugung – einer Erscheinung, die auf die Wellennatur des Lichtes zurückgeht.

Elementarwellen und Lichtausbreitung

Die Ausbreitung einer Lichtwellenfront beschreibt man manchmal mit Hilfe von sogenannten Elementarwellen, wie winzige Sender sie in jedem Augenblick im Gleichtakt an den einzelnen Punkten der Wellenfront ausstrahlen würden (Bild 6). Derartige Sender gibt es jedoch nicht in Wirklichkeit; sie sind rein mathematische Gebilde, die ihre kleinen Wellen hauptsächlich nach vorn (in der Ausbreitungsrichtung des Lichtes), ein wenig seitwärts und gar nicht nach hinten abstrahlen. Bei der Interferenz (Überlagerung) dieser Elementarwellen wird die Wellenfront ein Stück weiter in Ausbreitungsrichtung wieder aufgebaut. In dieser Weise deutet man die Bewegung der Wellenfront als die dauernde Erzeugung und Überlagerung der Elementarwellen.

Obwohl diese Elementarwellen und ihre kleinen Sender nicht wirklich existieren, sind sie doch für den Physiker eine Hilfe, wenn er sich ein Bild von vielen mit dem Licht zusammenhängenden Erscheinungen machen will. Ein wichtiges Beispiel ist die Lichtbeugung an einem schmalen Spalt in einem sonst undurchsichtigen Schirm.

Trifft die Wellenfront auf den Spalt, so blendet der Schirm ihren größten Teil aus – und damit auch die meisten der kleinen Sender. Die übriggebliebenen Strahlen zwar noch Wellen aus wie zuvor; die Überlagerung dieser Wellen reicht jedoch nicht mehr aus, um die ursprüngliche Wellenfront wiederaufzubauen: Anstatt geradlinig durch den Spalt zu laufen, weitet sich das Licht hinter ihm auf.

Läßt man das Licht auf eine Oberfläche – beispielsweise ein Blatt Papier –

fallen, so kann man diese Aufweitung sichtbar machen (Bild 7). Viele Stellen leuchten hell, weil die dort auftreffenden Lichtwellen in Phase sind und sich bei der Überlagerung verstärken (konstruktive Interferenz): Die Wellenberge kommen gleichzeitig an und bilden so eine große Lichtwelle. Andere Stellen sind dunkel, weil die ankommenden Wellen nicht in Phase sind und sich bei der Überlagerung gegenseitig auslöschen (destruktive Interferenz): Der Berg der einen Welle fällt mit dem Tal einer anderen zusammen, so daß sie sich gegenseitig aufheben.

Die Dimensionen des Musters aus hellen und dunklen Zonen hängen von der Größe des Spaltes ab. Angenommen, der wäre rechteckig und läge senkrecht. Dann ergäbe sich eine Figur, die in waagerechter Richtung gespreizt wäre, in der senkrechten hingegen nicht. Man nennt sie die Beugungsfigur des Spaltes.

Manchmal steht die Form einer solchen Lichtblende in einfachem Zusammenhang mit der zugehörigen Beugungsfigur. So besteht beispielsweise eine H-förmige Blende im Grunde aus drei Spalten. Der kurze waagerechte Spalt erzeugt eine senkrechte Beugungsfigur, die beiden senkrechten Spalten ergeben überlappende horizontale Muster.

Vielleicht möchten Sie versuchen, die Blendenformen zu erraten, die zu den Beugungsfiguren unten auf der gegenüberliegenden Seite gehören (Bild 5). Jede der Blenden besteht aus einem Großbuchstaben (in Fraktur), der auf glattes Papier getippt und auf Kodak-Umkehrfilm photographiert wurde. Nach der Entwicklung des Films erhielt ich Dias mit transparenten Buchstaben auf undurchsichtigem Untergrund.

Um die Beugungsfiguren photographieren zu können, stellte ich das Dia als Blende so in den Strahl eines Helium-Neon-Lasers, daß der Buchstabe voll ausgeleuchtet wurde. Etwa 20 Meter hinter dem Dia baute ich eine Kleinbildkamera direkt in der Beugungsfigur auf. Das Objektiv entfernte ich, so daß das Muster beim Öffnen des Verschlusses direkt auf den Film fiel.

Bei ausgeschalteter Raumbeleuchtung photographierte ich die Beugungsmuster mit verschiedenen Belichtungszeiten. Können Sie die Buchstaben anhand der Beugungsfiguren erraten? Die Buchstaben stehen in der richtigen Reihenfolge, um den Namen der Autoren von „ZEHN^{HOCH}“, dem ersten Band einer Buchreihe von Spektrum der Wissenschaft, zu ergeben. Allerdings habe ich mehrfach vorkommende Buchstaben weggelassen, und für die richtige Lage der Figuren kann ich auch nicht bürgen.

Ist die Blendenöffnung kreisförmig, so erklärt man die Lichtbeugung besser auf

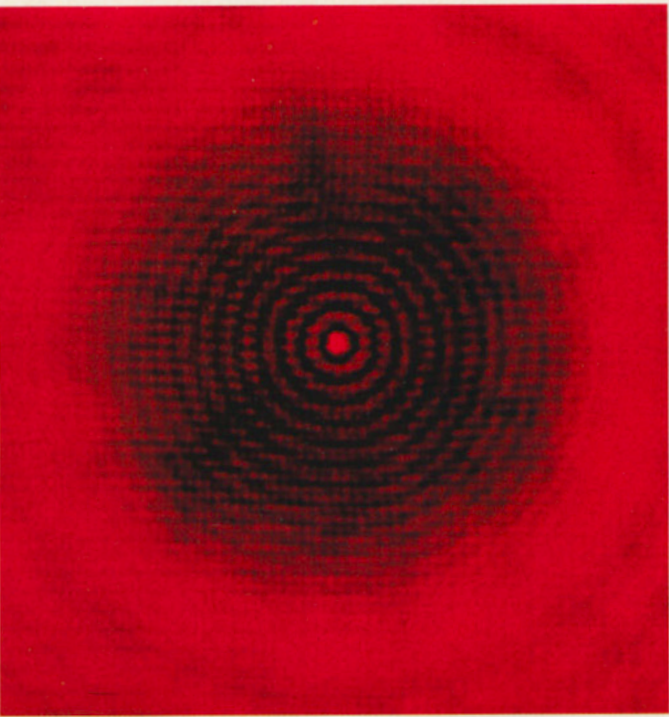


Bild 1: Eine Kugel und ihr Poissonmuster.

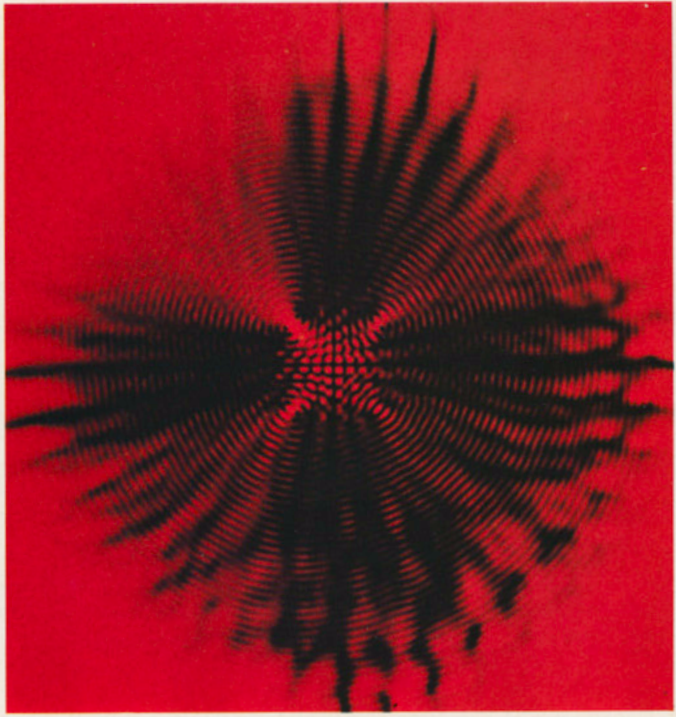


Bild 2: Gitter im Schatten einer Kugel.



Bild 3: Beugungsabbildung der Ziffer 2.



Bild 4: Beugungsabbildung des Buchstaben I.

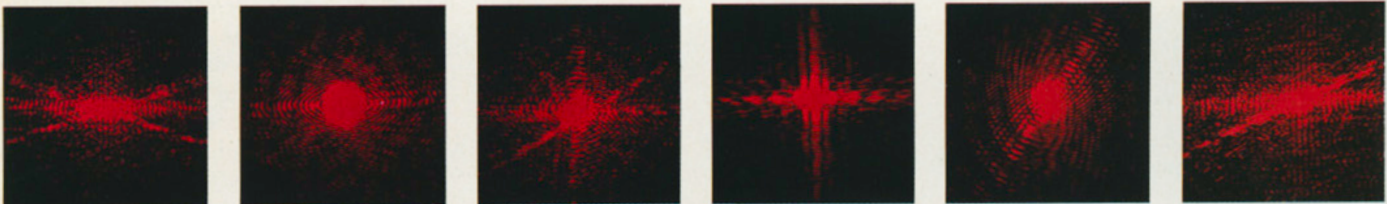


Bild 5: Beugungsabbildungen, die einen Namen verbergen.

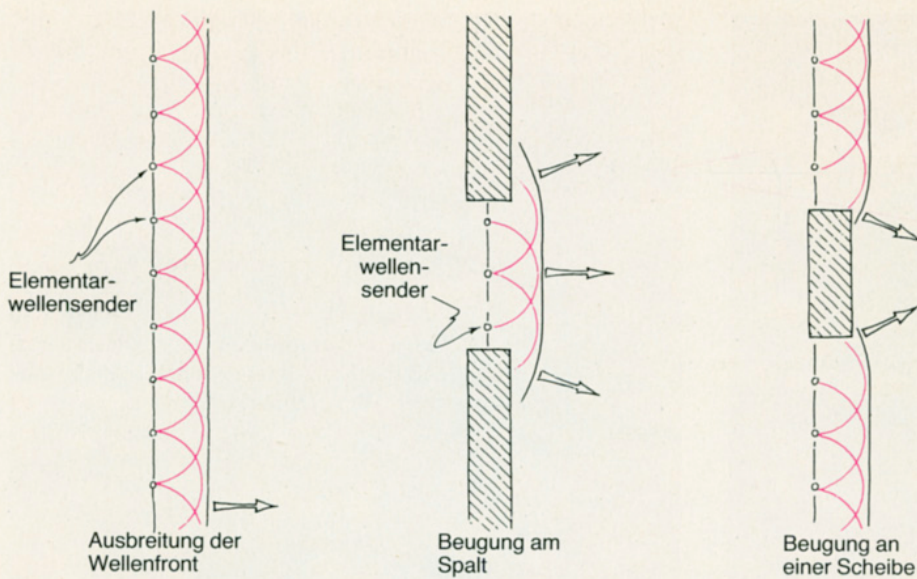


Bild 6: Elementarwellensender und Lichtausbreitung.

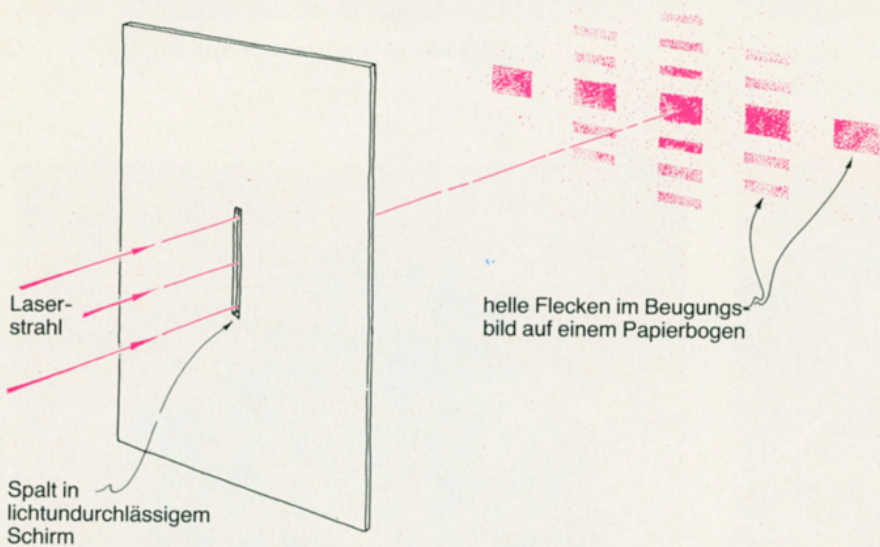


Bild 7: Lichtbeugung am Spalt.

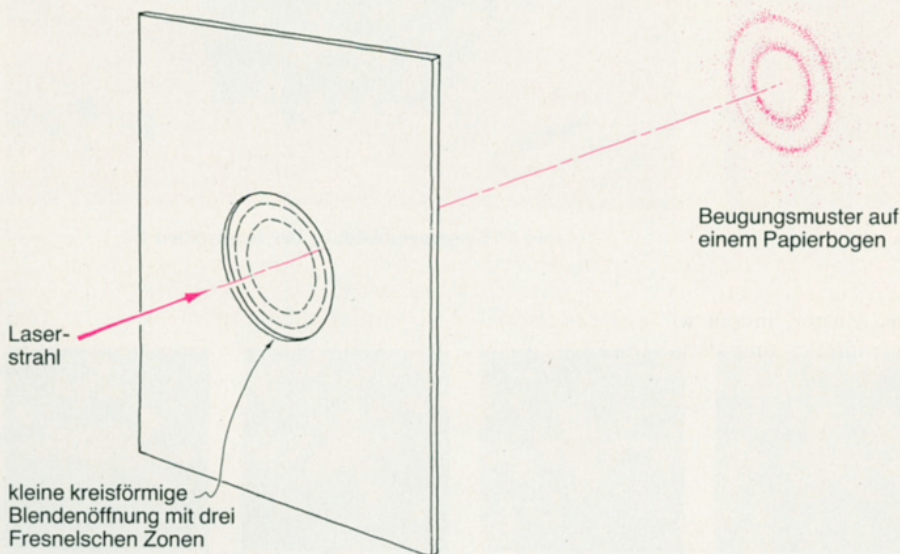


Bild 8: Fresnelzonen in einer kreisförmigen Blendenöffnung.

andere Art (Bild 8). Um die Mitte der Blende herum sind sogenannte Fresnelzonen angeordnet; sie lenken das Licht auf den Schirm, der das Beugungsmuster sichtbar macht.

Betrachten Sie nun die Mitte dieses Musters. Das Licht, das dort aus der zentralen Zone ankommt, ist aufgrund des Unterschiedes in der zurückgelegten Wegstrecke genau um eine Halbwelle phasenverschoben gegen das Licht aus der zweiten Zone. Das Licht aus der dritten Zone ist aus dem gleichen Grund gegen das aus der zweiten Zone um genau eine Halbwelle phasenverschoben. Die Zonen höherer Ordnung sind entsprechend definiert. Jede dieser Zonen sendet Licht ins Zentrum der Beugungsfigur, das gegen das Licht aus einer benachbarten Zone bei der Ankunft auf dem Schirm gerade um eine Halbwelle phasenverschoben ist.

Die Ausmaße der Zonen hängen von den Entfernungen zwischen Blende, Lichtquelle und Schirm ab; diese Abstände bestimmen, wieviele Zonen in der Blendenöffnung liegen. Angenommen, der Schirm ist so weit entfernt, daß die Zentralzone die gesamte Blendenöffnung ausfüllt. Dann ist die Mitte der Beugungsfigur hell. Bringt man den Schirm näher heran, so erscheint eine zweite Zone in der Blendenöffnung. Die Mitte der Figur ist jetzt dunkel, weil das aus der zentralen Zone ankommende Licht mit dem aus der zweiten Zone destruktiv interferiert.

Schiebt man den Schirm noch näher an die Blende heran, so taucht die dritte Zone in der Blendenöffnung auf. Obwohl die Lichtwellen aus der zentralen und der benachbarten Zone sich auch jetzt noch gegenseitig auslöschen, ist die Mitte des Beugungsmusters hell, da dort noch Licht aus der dritten Zone auftritt. Bewegt man den Schirm weiter auf die Blende zu, so beobachtet man, wie das Zentrum der Beugungsfigur abwechselnd hell und dunkel wird – je nachdem, ob die Anzahl der Zonen in der Blendenöffnung ungerade (hell) oder gerade (dunkel) ist.

In den dunklen Bereichen ist das Licht nicht vollständig ausgelöscht. Der Grund dafür ist ein sogenannter Neigungsfaktor: Das von einer Zone ausgehende Licht strahlt hauptsächlich nach vorne ab, während die Intensität nach den Seiten hin abnimmt. Deshalb ist die Lichtstrahlung aus einer Zone mit großem Radius in der Mitte der Beugungsfigur etwas schwächer als das Licht aus der benachbarten Zone mit kleinerem Radius. Die beiden Komponenten interferieren zwar destruktiv auf dem Schirm, löschen sich aber nicht vollständig aus.

Auch lichtundurchlässige Gegenstände können Beugungsfiguren erzeugen.

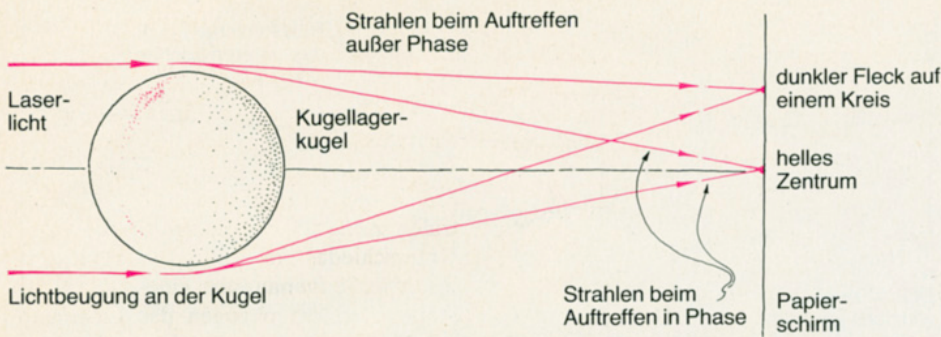


Bild 9: Wie eine polierte Kugel ein Poissonmuster erzeugt.

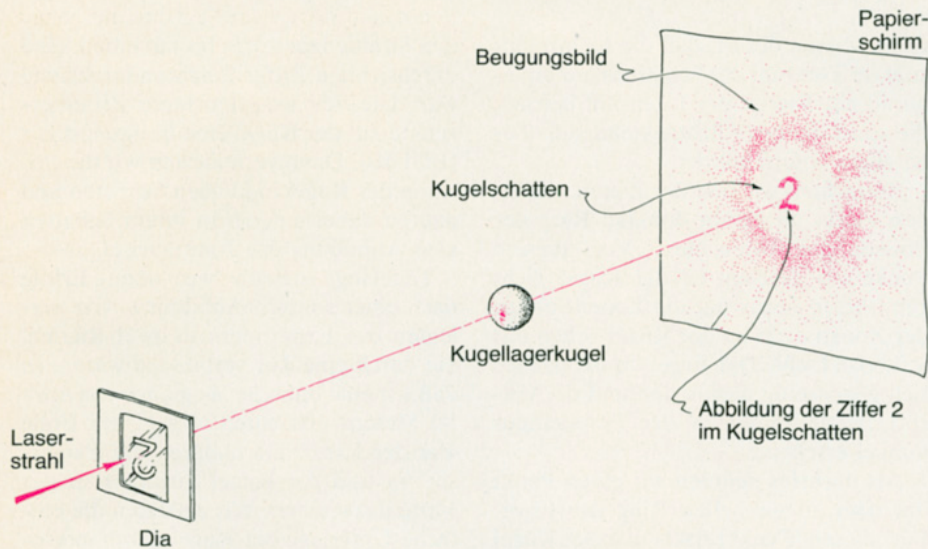


Bild 10: Bilderzeugung mit einer Kugellagerkugel: die 2.

Blaszcak untersuchte diese Erscheinung am Poissonmuster einer kreisförmigen Metallscheibe von etwa 10 Millimeter Durchmesser. Er klebte die Scheibe an einen dünnen Metalldraht (Durchmesser etwa ein zehntel Millimeter), den er zwischen Halteklammern in einer Ringfassung spannte. Die Scheibe war etwa 10 Meter von einem Laser entfernt, dessen Strahl eine Linse aufweitete. Der Schatten der Scheibe wurde auf einem 30 Meter entfernten Schirm aufgefangen. Blaszcak untersuchte dann den kleinen Schatten mit einer Lupe, nachdem er die Scheibe richtig justiert hatte. War sie senkrecht zum Strahl, so erschien der Poissonsche Fleck, weil dann die Scheibe dem Strahl einen kreisförmigen Querschnitt präsentierte.

Metallscheiben erzeugen Poissonmuster

Gelegentlich stellte Blaszcak eine Linse vor den Laser, um den Strahl aufzuweiten. Manchmal bündelte er diesen Strahl dann wieder mit einer zweiten Linse in einen breiteren, nicht divergenten Strahl. (Dazu fokussiere man das Licht zunächst mit der ersten Linse auf eine winzige Lochblende, die gleichzeitig im Brennpunkt einer dahinterstehenden

zweiten Linse liegt. Das durchtretende Laserlicht ist dann wieder parallel gebündelt; der Durchmesser des Lichtbündels ergibt sich aus dem Produkt von ursprünglichem Strahldurchmesser und dem Verhältnis von Ausgangsbrennweite zu Eingangsbrennweite.) Das Poissonmuster erschien in jedem Fall.

Wir versuchten, mit Hilfe der Scheibe ein Bild zu erzeugen, indem wir das Dia-positiv eines Gesichtes in das aufgeweitete, parallele Strahlenbündel etwa in der Mitte zwischen Laser und Scheibe aufstellten. Die Schattenzone zeigte daraufhin eine komplizierte Beugungsfigur, die aber keine Ähnlichkeit mit dem Gesicht aufwies.

Dann ersetzten wir die Scheibe durch eine 10 Millimeter große Kugel, die außerordentlich rund und glatt war. Jetzt zeigte sich eine brillante Poissonfigur auf dem Schirm (Bild 9). Wir vergrößerten das Muster, indem wir den Laserstrahl aufweiteten und dann die Kugel dicht vor den Laser brachten. Durch diese Anordnung erreichten wir einen größeren Abstand zwischen Kugel und Schirm.

Wir untersuchten dann die Beugungsfigur genau mit einer Lupe, anschließend mit einem Photoapparat. Nahmen wir das Objektiv der Spiegelreflexkamera heraus und ließen den Schatten der Ku-

gel genau auf den Spiegel fallen, so konnten wir uns im Sucher das vergrößerte Poissonmuster ansehen.

Ich muß Sie an dieser Stelle ausdrücklich warnen: *Eine derartige Versuchsanordnung ist gefährlich.* Wenn Sie durch den Sucher der Kamera blicken, die in dem Laserstrahl steht, dann fokussiert Ihr Auge das Licht auf die Netzhaut. Ein sehr helles Muster kann Ihre Retina zerstören und Sie blind machen. Alles, was Sie dabei empfinden, ist vielleicht nur, daß das Licht unangenehm hell ist, während Sie des Ausmaßes der Schädigung gar nicht gewahr werden – es wird deshalb vor der Durchführung dieses Versuches abgeraten.

Es ist wesentlich ungefährlicher, das Beugungsmuster auf dem Schirm mit Hilfe einer Lupe zu untersuchen, denn die Streuung am Schirm reduziert die Lichtintensität. (Wir benutzten den Kamerasucher, weil das Beugungsmuster auf dem Schirm so klein ist, daß es nur schwer zu erkennen ist.)

Auch die Anordnung mit dem Papier-schirm kann jedoch bei Verwendung eines Lasers hoher Leistung gefährlich werden. Unser Laser lieferte maximal 10 Milliwatt Ausgangsleistung; alle von uns untersuchten Muster könnte man jedoch ebenso gut mit einem Laser geringerer Ausgangsleistung erzeugen.

Sie könnten versuchen, das Poissonmuster auf dem Schirm zu photographieren. Stellen Sie dazu die Kamera seitlich so auf, daß sie den Lichtstrahl, der auf den Schirm fällt, nicht unterbricht. Da die Beugungsfigur unter einem solchen Winkel nicht mehr kreisförmig erscheint, drehen Sie den Schirm so, daß die Senkrechte auf seiner Oberfläche ungefähr in die Mitte zwischen der Laserstrahlachse und der Kamera-Blickrichtung zeigt.

Das Objektiv muß eingesetzt sein, damit das Muster auf dem Film scharf abgebildet wird. Meine Versuche dieser Art waren allerdings enttäuschend, da Streulicht vom Schirm oft die feinen Poissonfiguren verwischte.

Ich versuchte es auf andere Weise. Bei ausgeschalteter Raumbeleuchtung stellte ich die Kamera ohne Objektiv direkt in den Schatten der Kugel und belichtete den Film mit verschiedenen Verschlusszeiten. Mit einem Farbfilm von 27 DIN (400 ASA) Empfindlichkeit machte ich die besten Aufnahmen mit den kürzesten Belichtungszeiten, meistens mit 1/1000 oder 1/500 Sekunde. Falls Sie einen weniger hellen Laser haben, nehmen Sie 31 DIN (1000 ASA)-Film. Für Vorführzwecke nehme ich Farbumkehrfilm, damit ich die Ergebnisse einfach projizieren kann.

Die Poissonfigur entsteht aus der Lichtbeugung an der kreisförmigen Umrißlinie der Kugel senkrecht zur Strahl-

richtung. Nehmen wir an, sie werde von einem Lichtbündel mit gerader Wellenfront beleuchtet. Erreicht diese die Kugel, so werden einige der mathematischen Elementarwellensender ausgeblendet und sind damit nicht mehr an der Ausbreitung der Wellenfront beteiligt. Die restlichen erzeugen nach wie vor kleine Elementarwellen in Vorwärtsrichtung, aber deren Überlagerung kann die alte Wellenfront nicht mehr wiederherstellen. Statt dessen breitet sich ein Teil des Lichtes auch in die Schattenzone der Kugel hinein aus.

Entlang der Wellenfront, die die Kugel erreicht, sind alle Elementarwellensender in Phase. Beim Auftreffen auf dem Schirm hängen ihre Phasenbeziehungen untereinander und damit auch ihre Überlagerung von der zurückgelegten optischen Wegstrecke ab. Das Licht, das mitten im Kugelschatten auftrifft, hat von allen Seiten der Kugel einen gleich langen Weg hinter sich. Deshalb bleiben die Lichtwellen in Phase und verstärken sich bei der Überlagerung, so daß der Poissonsche Fleck entsteht.

Um diesen hellen Punkt liegt ein dunkler Ring, hervorgerufen durch destruktive Interferenz. Betrachten wir einen Punkt auf diesem Ring. Er ist dunkel, weil Licht von der einen Seite der Kugel einen weiteren Weg zurücklegen muß als von der gegenüberliegenden Seite. Der zusätzliche Wegunterschied läßt die beiden Lichtwellen gerade gegenphasig auf dem Schirm auftreffen.

Etwas weiter von der Mitte entfernt liegt ein durch konstruktive Interferenz erzeugter Ring. Wieder muß das Licht von der einen Seite der Kugel einen weiteren Weg zurücklegen als das Licht von der gerade gegenüberliegenden Seite; diesmal läßt jedoch der Wegunterschied beide Lichtwellen in Phase auf dem Schirm auftreffen. (Die eine Welle läuft gerade eine ganze Wellenlänge hinter der anderen her.) Gewöhnlich umgeben mehrere hellere und dunklere Ringe den Poissonschen Fleck.

Kugel und Fresnelzonen

Man kann das Muster auch mit Hilfe der Fresnelzonen erklären. Die Kugel blendet das Licht der mittleren Zonen aus. (In unserem Experiment werden die ersten Hunderte von Zonen ausgeblendet.) Gerade außerhalb des Kugelumfanges liegt dann die erste lichtaussendende Zone. Die Schattenmitte erhält sowohl Licht von dieser Zone, als auch von allen anderen weiter außen liegenden.

Da die Lichtwellen benachbarter Zonen gegenphasig sind, löschen sie sich gegenseitig aus. Der Neigungsfaktor verringert jedoch die Beiträge von den äü-

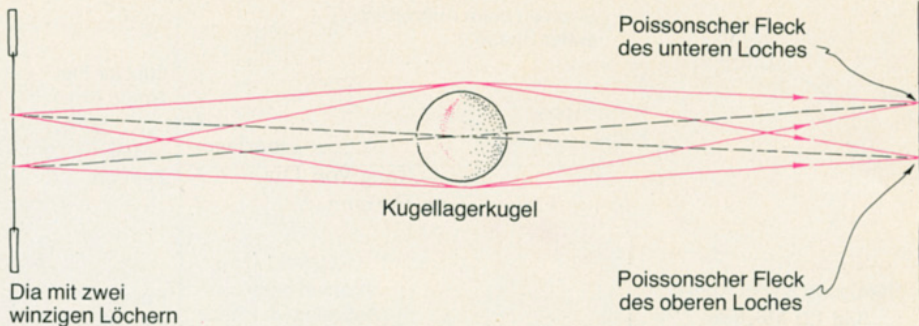


Bild 11: Abbildung einer Doppellochblende.

ßeren Zonen derart, daß die Lichtintensität im Zentrum des Schattens nur annähernd ein Viertel der Intensität beträgt, die sonst die erste lichtaussendende Zone allein liefern würde.

Betrachten wir nun die Zonen, die einen Punkt im ersten dunklen Ring der Poissonfigur beleuchten. Von diesem Punkt aus gesehen ist die Kugel nicht zentriert in bezug auf die Zonen; einige der Zonen dicht an der Kugel geben nur teilweise Licht. Das Ergebnis ist, daß sie sich gegenseitig auslöschen und der entsprechende Punkt in der Poissonfigur dunkel erscheint.

Als nächstes nehmen wir einen Punkt auf dem ersten hellen Ring der Figur. Für diesen Punkt erscheint die Kugel noch weniger zentriert, wieder sind einige Zonen nur teilweise sichtbar. Diesmal ist das Endergebnis jedoch Helligkeit.

Liegt die Kugelmitte nicht exakt auf der Strahlachse des Lasers, ist also der beleuchtete Querschnitt nicht kreisförmig, so ist das Beugungsmuster verzerrt oder nicht zu sehen. Daraus kann man schließen, daß die Elementarwellensender auf der einen Seite der Kugel keine symmetrischen Entsprechungen auf der gegenüberliegenden Seite haben.

Auch dies läßt sich mit Fresnelzonen erklären: Die innersten Zonen sind nicht ganz sichtbar, weil der beleuchtete Kugelquerschnitt nicht mehr kreissymmetrisch ist. Das resultierende Muster auf dem Schirm kann dann sehr kompliziert werden. Ist die Asymmetrie groß genug, so löschen die sichtbaren Zonenabschnitte das Licht an allen Punkten auf dem Schirm; der Schatten bleibt dann völlig dunkel.

Da die Kugel Licht in ihren Schatten hinein beugt, kann sie ähnlich wie eine Sammellinse ein Bild erzeugen; dieses Bild ist jedoch ein Ergebnis der Beugung anstatt der Brechung des Lichtes. Blaszcak und ich waren der Meinung, es sei leichter, mit der Kugel ein Bild herzustellen als mit der Scheibe, die wesentlich schwieriger so zu justieren ist, daß sie dem Lichtstrahl einen kreisförmigen Querschnitt bietet.

Zunächst erzeugten wir eine helle Poissonfigur. Dann brachten wir ein Dia in

den Strahlengang, das bis auf eine kleine durchsichtige Ziffer 2 lichtundurchlässig war. Die voll ausgeleuchtete Ziffer erzeugte auf der Kugel eine Beugungsfigur (Bild 10). Dann veränderten wir die Position der Kugel in kleinen Schritten und paßten dabei auf, ob in ihrem Schatten eine Abbildung der 2 auftauchte.

Tagelang suchten wir ohne Erfolg nach einer solchen Abbildung. Wir verlegten das Experiment in zwei Räume, die durch eine Tür verbunden waren, so daß wir eine optische Weglänge von etwa 80 Metern erreichten. An einem Ende war der Laser, am anderen der Papierschirm und die Kugel ungefähr in der Mitte dazwischen. Wir ersetzten die einfache Unterlage der Kugel durch mikrometergetriebene bewegliche Gestelle, die es uns erlaubten, ihre Position kontinuierlich zu verändern, und zwar sowohl waagrecht wie senkrecht.

Ein Problem bestand in der Beugungsfigur des Drahtes, an dem die Kugel angeklebt war: Manchmal erstreckte sie sich bis in den Bereich, in dem wir nach dem Bild der 2 suchten. Wir probierten auch Dias mit Buchstaben und anderen Zahlen aus.

Schließlich versuchten wir es mit einem Dia, auf dem ein regelmäßiges Gitter schwarzer Linien abgebildet war, die einen Abstand von zwei Millimetern hatten. Blaszcak vermutete, daß dieses gleichmäßige Muster nicht ganz so extreme Anforderungen an die richtige Justierung der Kugel stellen würde. Er hatte recht. Als wir den Schatten der Kugel untersuchten, entdeckten wir das Bild des Gitters in der Mitte. Außerhalb des Schattens war das ursprüngliche Beugungsmuster der Gitters zu erkennen, das nicht durch das Lager ausgeblendet wurde. Die Abbildung in der Mitte kam nur zustande, weil die Kugel etwas Licht in den Schattenbereich hineinbeugte.

Dann nahmen wir uns noch einmal mit mehr Geduld das Dia mit der Ziffer 2 vor. Wir justierten die Stellung der Kugel im Beugungsmuster der 2. Wir veränderten den Abstand zwischen Dia und Kugel und dem zwischen Kugel und Schirm (oder Kamera). Fast immer zeigte das Schattenzentrum eine komplizierte In-



Bild 12: Mögliche Abbildungen des Buchstabens I.

terferenzfigur, die nicht im entferntesten der 2 ähnelte. Schließlich schafften wir es, als die Kugel ungefähr in der Mitte des Beugungsmusters von der 2 war.

War das nun wirklich ein Bild des Dias oder nur eine glückliche zufällige Orientierung von hellen und dunklen Interferenzstreifen? Eine Möglichkeit, das zu überprüfen, gibt die Lage der Abbildung. Falls die Kugel wie eine Sammellinse wirkt, muß das Bild bezogen auf das Objekt kopfüber und seitenverkehrt sein. Das Bild der 2 war beides.

Vom Laser aus gesehen war auf dem Dia eine seitenverkehrte 2 auf dem Kopf. Und was wir auf dem Schirm sahen, war eine richtig orientierte 2. Mit einem I gelangen uns ebenfalls Abbildungen (Bild 12), aber mit komplizierteren Formen wie Gesichtern brachten wir es nie fertig. (Einige ältere Lehrbücher der Optik erwähnen Versuche, bei denen Gesichter mit Hilfe von Münzen oder Metallkugeln abgebildet wurden, verraten aber nur wenig Einzelheiten über die Abbildungstechnik.)

Seitenverkehrte Bilder im Schatten von Kugeln

Um verstehen zu können, wie im Schatten der Kugel ein seitenverkehrtes Bild entstehen kann, stelle man sich eine im Laserstrahl stehende Platte mit zwei feinen Bohrungen vor (Bild 11). Jedes der kleinen Löcher wirkt als Punktlichtquelle, die die Kugel beleuchtet und so eine Poissonfigur auf dem Schirm hervorruft. Die Mitte dieser Figur liegt jeweils auf der Linie, die von dem betreffenden Loch durch die Kugelmitte verläuft. Die hellen Flecken in den Zentren der Beugungsfiguren sind die Abbildungen der Bohrungen. Falls die Kugel mitten zwischen Platte und Papierschirm steht, wird der Abstand der beiden Löcher in der Abbildung reproduziert. Ist sie näher am Schirm, so ist der Abstand in der Abbildung kleiner als im Objekt; ist sie hingegen näher an der Platte, so ist der Abstand in der Abbildung größer.

Das mit der Kugel erzeugte Bild der Löcher ist wesentlich verschwommener

als die Objektabbildung durch eine Linse. Das liegt an den starken Verzerrungen im Überlappungsbereich der Poissonmuster, die beide Abbildungen umgeben. Diese Überlagerung kann je nach Stellung von Dia und Kugel verschiedene Formen ergeben; in einigen sind die Abbildungen nur schwer zu erkennen.

Daß wir beim Abbilden des Gitters auf so relativ einfache Weise erfolgreich waren, hängt wahrscheinlich mit dessen regelmäßiger Struktur zusammen. Normalerweise verwirren die hellen und dunklen Linien im Schattenzentrum beim Erkennen der Objektabbildung. Bei einem Gitter als Abbildungsobjekt werden die Linien jedoch auch in Gitterform gebracht und helfen so beim Auffinden des Bildes.

Ähnliche Verhältnisse von Abbildung und Verzerrungen sollte man auch mit anderen Dias im Strahlengang erhalten. So kann man beispielsweise eine I-förmige Blende als Lochreihe auffassen, bei der jedes einzelne Loch einen Poissonschen Fleck im Kugelschatten erzeugt. Hat man Erfolg mit der Abbildung, so setzen diese Flecken sich gerade zu einem I zusammen (Bild 12).

Als wir den Versuch mit dem I machten, beobachteten wir manchmal in der Reihe von Poissonschen Flecken, daß jeder einzelne von einem dunklen Ring umgeben war. Gelegentlich bildete sich durch Überlagerung dieser einzelnen Muster ein Paar fast paralleler dunkler Linien, die angenähert ein I beschrieben. Ähnliches fanden wir mit einem M im Strahlengang. Wenn wir die Kugel richtig einjustierten, glichen die senkrechten Striche des M dem Abbild des I, während die anderen Verbindungsstriche als kleine Punkte erschienen.

Häufig wurde das Zentrum des Schattens anscheinend durch das Beugungsmuster der Drahtaufhängung verzerrt. Um diese Fehlerquelle auszuschalten, klebten wir die Kugel auf einen Objektträger eines Mikroskops, den wir mit Klebestreifen an dem verschiebbaren Gestell befestigten. Obwohl kleine Kratzer auf dem Glas immer noch das Beugungsmuster im Schatten der Kugel störten, waren diese doch deutlicher als zuvor.

Wir waren neugierig, was passieren würde, wenn wir einen Teil des um die Kugel herumgebeugten Lichtes abschatten würden. Als wir eine Karte in die Nähe der Kugel hielten, erzeugte deren Kante ein eigenes starkes Beugungsmuster im Schattenbereich.

Daraufhin bauten wir eine andere Versuchsanordnung auf. Wir stellten ein Dia mit einem einzigen kleinen Loch in den Strahlengang und plazierten die Kugel dicht dahinter. Das Loch erzeugte eine Interferenzfigur aus hellen und dunk-

len Ringen mit einer hellen Mitte. Zuvor war der Abstand zur Kugel immer so groß gewesen, daß sie von dem zentralen hellen Fleck voll ausgeleuchtet worden war. Diesmal schoben wir die Kugel so dicht an das Loch heran, daß der erste dunkle Ring aus dessen Beugungsfigur gerade auf den äußeren Rand der Kugel fiel. Auf dem gesamten Umfang der Kugel interferierte also das Licht vom Loch destruktiv, es blieb dort dunkel. Das Beugungsmuster im Schatten der Kugel war jetzt verschwunden.

Danach rückten wir die Kugel so vor das Loch, daß der erste helle Interferenzring die Kugelkante gerade voll ausleuchtete. Wieder erschien das Poissonmuster. Daraufhin verschoben wir die Kugel leicht seitlich, so daß ihr Mittelpunkt nicht mehr auf der optischen Strahlachse lag. Auf einer Seite wurde der Umfang der Kugel hell von der Beugungsfigur des Lochs beleuchtet, auf der gegenüberliegenden streifte ein dunkler Ring ihre Oberfläche. Diesmal tauchte in der Schattenmitte ein greller Lichtfleck auf, der die Poissonfigur verwischte.

Offensichtlich hängt die Entstehung eines Poissonmusters von der Lichtbeugung an gegenüberliegenden Seiten der Kugel ab. Liegt eine Seite der Kugel in einem dunklen Interferenzring der Lochblende, so sind die dort vorbeilaufenden Lichtwellen gegenphasig. Obwohl sie in die Schattenregion gebeugt werden, ändert sich ihr Phasenunterschied nicht, und sie löschen sich weiterhin aus.

War der Kugelumfang ganz im Schatten des ersten dunklen Beugungsringes, so interferierte das gesamte die Schattenregion erreichende Licht destruktiv; der Bereich blieb dunkel. Wurde nur ein Teil des Umfangs vom dunklen Ring überstrichen, so konnte Licht von dieser Seite nicht konstruktiv mit Licht von der gegenüberliegenden interferieren. Der Schattenbereich bekam also von einer Seite der Kugel Licht, wies aber keine ringförmige Interferenzstruktur auf.

Obwohl optische Abbildungen mit einer Kugel oder einer Scheibe schon seit 1818 untersucht worden sind, konnte ich bisher keine detaillierten experimentellen Beschreibungen darüber finden. Es bleibt also noch vieles, was der Amateurforscher untersuchen könnte. Wie weit sollte eine Kugel vom Dia und von der Bildebene des Schirms entfernt stehen, um die Bildqualität zu verbessern? An welchem Punkt der vom Dia erzeugten Interferenzfigur sollte die Kugel stehen? Sollte sie groß oder klein sein? Kann eine Kugel, die viel größer als die hier verwendete Kugellagerkugel ist, in ihrem Schatten Bilder erzeugen? Gibt es eine Methode, die Bildverzerrungen durch sich überlagernde Poissonmuster zu vermindern?