

Die Newtonschen und Fresnelschen Beugungsexperimente

Helmut Nieke

Zusammenfassung

Photographien der Beugungsfigur des Dreieckspaltes und Grimaldis leuchtender Kante bestätigen Newtons Beobachtungen. Newton beschrieb den Übergang innerer zu äußeren Beugungsstreifen am Dreieckspalt und zeigte, daß gebeugtes Licht nur aus der engen Umgebung jeder Kante (Grimaldis leuchtende Kante) kommt und nicht von der Fläche des Spaltes. Fresnel hingegen teilte nur leicht berechenbare Grenzfälle mit, keine Übergänge innerer zu äußeren Streifen und berücksichtigte nicht die Lokalisierung gebeugten Lichtes. Seit 1850 übernahmen die Lehrbuchautoren Fresnels Theorie und unterschlugen Newtons Beugungsexperimente.

Newton's and Fresnel's Diffraction Experiments

Abstract

Photos of diffraction figures of the triangular slit and Grimaldi's luminous edge confirm Newton's observations. Newton described the transition from inner to outer fringes at triangular-slit and showed that bent light comes only out of narrow surroundings of every edge (Grimaldi's luminous edge) and not out of the whole slit. On the contrary Fresnel communicated only easily calculable border-line cases, disregarded the transition of inner to outer fringes and localization of bent light. Since 1850 text-book authors took over Fresnel's theory and intercepted Newton's diffraction experiments.

1. Newtons und Fresnels Beugungsexperimente

Newton [1] berichtete vollständig über die Beugung, auch wo er die Meßergebnisse nicht erklären oder mathematisch darstellen konnte.

Wenn man die Beugungsexperimente von Fresnel [2] nachprüft, so stellt man fest, daß seine Angaben sehr genau stimmen. Aber genau dort, wo seine Theorie die Meßergebnisse nicht mehr hinreichend erfüllt, genau dort bricht er die Mitteilung seiner Meßergebnisse ab, ohne auf die Abweichungen hinzuweisen. Zur Entschuldigung Fresnels ist zu bemerken, daß er sonst seinen Gegnern in amtlichen Stellungen die Schwachstellen seiner Theorie aufgezeigt hätte, denn Fresnel war zu Lebzeiten nicht anerkannt.

Fresnel [2] bearbeitete vor allem die äußeren Beugungsstreifen des Hindernisses, die der Beugung an der Halbebene entsprechen. Dort lassen sich die Schattengrenzen leicht geometrisch bestimmen, denn von dort werden die Beugungsstreifen ausgemessen. In einem beschränkten Bereich konnte er die Beugungsfigur der Halbebene und der äußeren Beugungsstreifen des Spaltes in

sehr großen Entfernungen mit Hilfe des Fouriertheorems (Fresnel Integrale) mathematisch formulieren, was einen bleibenden Verdienst darstellt.

In Lehrbüchern werden seit 1850 nur Fresnels Grenzfälle berücksichtigt und Newtons Beugungsexperimente unterschlagen.

2. Innere und äußere Beugungsstreifen am Spalt

Newton [1] III beschrieb in der 10. Beobachtung die Beugungserscheinungen am Dreieckspalt. Als

Abb. 1 wurde seine Zeichnung

übernommen. Die äußeren Streifen

(nahe der Spitze C) laufen hier

hyperbelförmig mit gleichem

gegenseitigen

Abstand reziprok

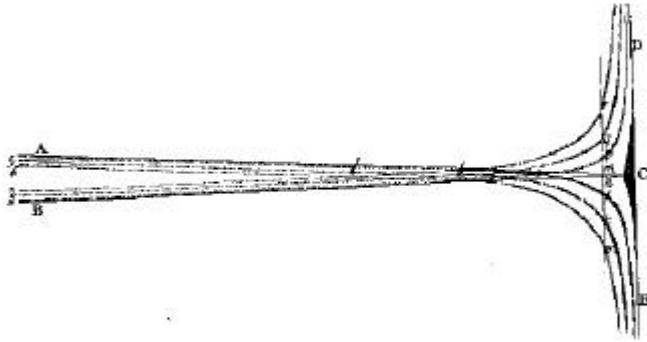


Abb. 1. Die Beugung am Dreieckspalt nach Newton [1] III, Beobachtung 10. Mit Sonnenlicht, einem kleinen Loch im Fensterladen, Entfernung zum Dreieckspalt 10 Fuß und zur Zeichenebene 9 Fuß. ABC Projektion (Schattengrenze) des Dreieckspaltes. Bei Sonnenlicht erhält man drei farbige Beugungsstreifen, mit monochromatischem Licht entsprechend mehr.

zur Spaltweite. Die inneren Streifen (nahe der Basis A-B) laufen parallel zur

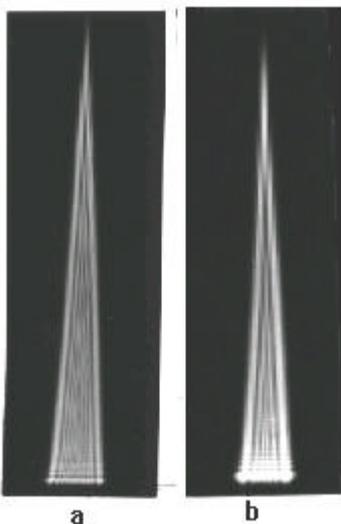


Abb. 2

Abb. 2. Die Beugungsfigur des Dreieckspaltes bei divergentem Licht. Eine Quecksilber-Höchstdrucklampe mit Grünfilter wurde mit einem Kondensator auf eine Blende vom Durchmesser 0,1 mm abgebildet. In 1 m Entfernung befand sich der Dreieckspalt 0...3 mm.

a: Eine Photoplatte fing die Beugungsfigur in 0,5 m von Spalt auf, zweifach nachvergrößert, Belichtungszeit war den inneren Streifen angepaßt.

b: Photoplatte in 2 m vom Spalt in Originalgröße.



Abb. 3

Abb. 3 Die Beugungsfigur eines Dreieckspaltes bei parallelem Licht. Anordnung wie Abb. 2, nur vor dem Dreieckspalt stand eine Linse $f' = 1$ m, a und b 2fach nachvergrößert.

a: Beugungsfigur in 0,5 m,

² b: Beugungsfigur in 2 m Entfernung vom Spalt.

Schattengrenze der Kanten (A-C und B-C), sie geben die gleiche Erscheinung wie die Streifen bei der Beugung an den Kanten als Halbebenen. Als innere Streifen am Spalt werden diese auch im Übergangsbereich bezeichnet, bis wirklich keine inneren Streifen mehr zustande kommen (Abb. 1 mit i, k, l bezeichnet).

Die Abb. 2 und 3 zeigen photographische Aufnahmen der Beugungsfigur von einem Dreieckspalt im divergenten und parallelen Licht in verschiedenen Entfernungen, die der Zeichnung Newtons entsprechen (und Fresnels Konzept widersprechen). Im Photo Abb. 2 b ist zu sehen, daß sich der erste innere Streifen der Beugungsfigur wirklich fast bis zu dieser Stelle des Überganges fortsetzt. In diesem Gebiet spalten auch äußere Streifen ab, das fällt nicht so auf, da die Belichtungszeit den inneren Streifen angepaßt war. Newton [1] (III Frage 3) : "Werden nicht die Lichtstrahlen beim Vorübergange an den Rändern und Kanten der Körper in aalartiger Bewegung mehrmals hin- und hergebeugt? Und entstehen nicht die drei Farbsäume aus drei solchen Beugungen?"

3. Grimaldis leuchtende Kante

Grimaldi [3] berichtete als erster 1665 über Beugungserscheinungen des Lichtes und dabei beschrieb er die Erscheinung der leuchtenden Kante, die man erhält, wenn etwa eine Halbebene eine Lichtquelle verdeckt.

Newton [1] untersuchte die Beugung genauer in III 5. Beobachtung: "Denn wenn ich das Auge jenseits des Endes eines solchen, hinter dem Messer entstehenden Streifens brachte und nach dem Messer blickte, so konnte ich an seiner Schneide eine Lichtlinie erkennen, und zwar nicht bloß, wenn mein Auge in der Linie der Streifen, sondern auch, wenn es sich außerhalb dieser Linie befand, entweder gegen die Spitze hin oder nach der Hefte hin. Diese Lichtlinie lag dicht an der Messerschneide und war schmaler als das Licht der inneren Franse, am schmalsten, wenn mein Auge am weitesten vom direkten Licht entfernt war; das Licht schien also zwischen dem Licht dieser Franse und der Messerschneide hindurchzugehen, und das Licht nächst der Schneide, wenn auch nicht alles von diesem Licht, schien die stärkste Beugung zu erfahren".

Newton [1] III Frage 1: „Wirken nicht die Körper schon aus einiger Entfernung auf das Licht und beugen dadurch seine Strahlen? Und ist nicht, unter sonst gleichen Umständen, diese Einwirkung bei der kleinsten Entfernung am stärksten?" Den Inhalt der Frage 1 bezeichnete man auch als Newtonsches Prinzip.

In jedem Fall ist festzustellen, daß gebeugtes Licht aus einem leuchtenden Gebiet nahe der Kante kommt und weder von der Kante noch vom gesamten Spalt.

Young [4] stellte fest, daß gebeugtes Licht nicht nur von der schattenseitigen Spaltkante kommt, sondern auch von der lichtseitigen Kante des Spaltes. Sicher hat das auch schon Newton gesehen, aber da er dies nicht als Reflexion ausschließen konnte, darüber nicht berichtet. Aber gegenüber Newton bietet Young einen Rückschritt, da er die leuchtende Kante fälschlich auf die Kante beschränkte und



Abb. 4. Die leuchtende Kante am Dreieckspalt. Eine Quecksilber-Höchstdrucklampe mit Grünfilter beleuchtete über einen Kondensator eine Durchmesser 0,1 mm Öffnung. In 1 m befand sich der Dreieckspalt, ein Rasierklingspalt mit 3 mm Basisbreite. Eine Kamera mit doppeltem Bodenauszug und Tessar 1 : 4,5, $f' = 13,5$ cm war auf den Dreieckspalt scharf eingestellt und so weit seitlich gestellt, daß das direkte Licht neben das Objektiv fiel..

nicht wie Newton auf deren enge Umgebung. Vermutlich dachte Young an eine Anregung der Kante, aber das ist mit sichtbarem Licht nicht möglich, wie wir heute wissen. Davon leitete Young aber sein Interferenzprinzip ab, womit die Beugung an Doppelspalt und Gitter in größeren Entfernungen erklärt werden konnte.

4. Photos von Grimaldis leuchtender Kante

Grimaldi, Newton, Young und Fresnel konnten ihre Beobachtungen nur beschreiben und noch nicht photographisch dokumentieren. Beobachtet man die leuchtenden Kanten eines Dreieckspaltes mit dem Auge, so vermittelt die Abb. 4 den Eindruck, der dabei entsteht. Im Photo wird gezeigt, daß die leuchtende Kante schatten- und lichtseitig auftritt und die Beschreibung als feine Lichtlinie gerechtfertigt ist.

Zur genaueren Beobachtung muß die Erscheinung im Makromaßstab aufgenommen werden, was mit der Anordnung Abb. 5 erfolgte, wo getrennte Lichtquellen den Spalt in Auf- und Durchlicht beleuchteten. Die Planseite eines Präzisionsspalt konnte nicht verwendet werden, weil bei den vorhandenen Spalten die Kanten angephast waren. Kupferfolien bildeten daher den benutzten Spalt. Dabei war der Winkel zwischen den optischen Achsen der

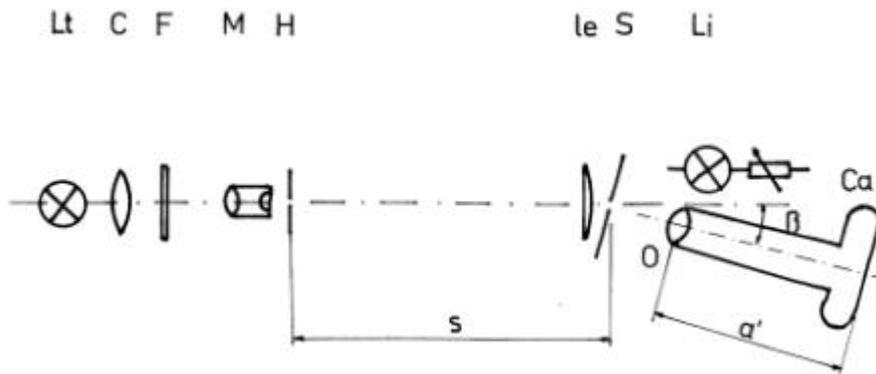


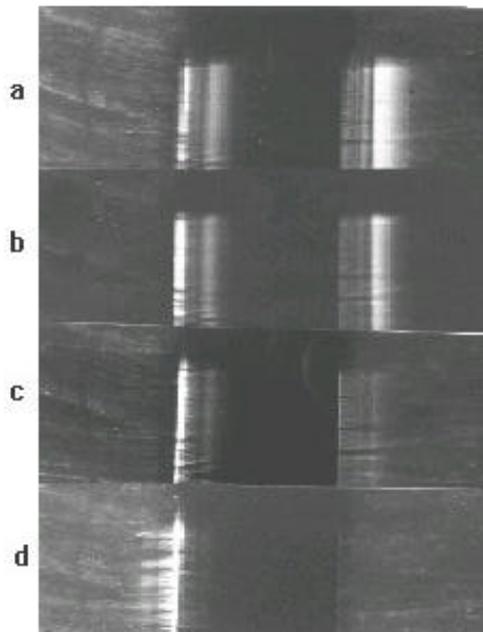
Abb. 5. Experimentelle Anordnung zur Photographie der leuchtenden Kante. Lt - Lichtquelle für Durchlicht, eine Quecksilber-Höchstdrucklampe HBO 100; C - Kondensator; F - Grünfilter; M - Mikroskopobjektiv; H - Kreisblende; Le - Linse für parallele Beleuchtung; S - Spalt 4 mm aus 0,03 mm; Kupferfolie; s - Entfernung von B zu S; Li - Lichtquelle für Auflicht, eine Glühlampe gespeist aus einem Stelltrafo; O - Kameraobjektiv Tessar 1 : 2,8, $f' = 50$ mm; Ca - einäugige Spiegelreflex-Kleinbildkamera mit Zwischenringen; a' - Bildweite = 380 mm. In dieser Abbildung wird die obere Kante als lichtseitige, die untere als schattenseitige bezeichnet.

Durchlichtbeleuchtung und der Aufnahmekamera mindestens so eingestellt, daß kein direktes Licht in das Photoobjektiv fiel. Es muß die volle Öffnung des Objektivs benutzt werden, oder die Aperturblende vor der Frontlinse stehen, damit direktes Licht keine Streuung oder Reflexion im Objektiv verursacht.

Die Abb. 6 und 7 zeigen Aufnahmen bei unterschiedlichen Beleuchtungsaperturen, Winkeln und Brennweiten der Aufnahmeoptik. Dabei ist zu beachten, daß bekanntlich bei der Abbildung das Licht geradlinig nach rückwärts verfolgt wird. Das Licht scheint also von den hellen Stellen der Positive zu kommen. Als erstes fällt auf, daß die leuchtende Kante sowohl Licht- als auch schattenseitig auftritt, wie das nach den Youngschen Beobachtungen zu erwarten war. Die Erscheinung der leuchtenden Kante ist nicht auf die Kante beschränkt, sondern es leuchtet ein endliches Gebiet in der Umgebung der Kante, wie das schattenseitig schon Newton richtig beobachtet hatte.

Als nächstes ist die Lage der leuchtenden Kante bemerkenswert. Lichtseitig scheint das Licht aus einem Gebiet lichtseitig der Kante zu kommen, während es schattenseitig vom schattenseitigen Gebiet jenseitig der Kante, also von der Spaltbacke, zu kommen scheint. Es ist zu bemerken, daß

die spezielle Lage der leuchtenden Gebiete sehr von der Lage der Einstellebene abhängt. Wenn, etwa in der Spaltebene, die Richtung des Lichtes verändert oder seitlich versetzt wird, so läßt sich durch Defokussierung die Lage dieses Lichtes in der Mattscheibenebene verändern, wie dies auch gemäß der geometrischen Optik zu erwarten ist. Die richtige Lage der Einstellebene sollte die Scharfeinstellung auf die Oberfläche des Spaltes sein, dann werden in der Bildebene die Durchstoßpunkte mit der Einstellebene ermittelt, bzw. bei seitlicher Versetzung die Schnitte mit der Verlängerung nach der seitlichen Versetzung. Aus diesem Grund erfolgte die Scharfeinstellung auf die Oberfläche des Spaltes mit großer Sorgfalt.

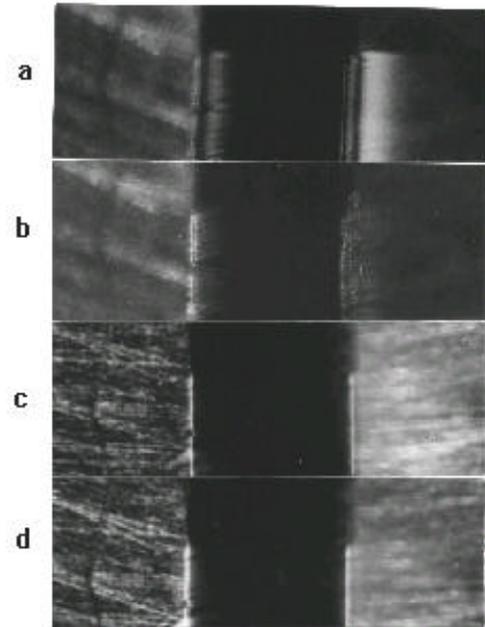


Lichtseite

Schattenseite

Abb. 6. Photographische Aufnahmen eines Spaltes 0,3 mm nach der Anordnung der Abb. 5. Der obere Teil zeigt den Spalt nur im Auflicht, der untere Teil zusätzlich im Durchlicht.

- a. $fH = 50 \text{ mm}$, $s = 1 \text{ m}$, $f' = 50 \text{ mm}$, $b = 7^\circ$,
 b. $fH = 50 \text{ mm}$, $s = 0,5 \text{ m}$, $f' = 50 \text{ mm}$, $b = 7^\circ$,
 c. $fH = 50 \text{ mm}$, $s = 1 \text{ m}$, $f' = 50 \text{ mm}$, $b = 15^\circ$,
 d. $fH = 50 \text{ mm}$, $s = 1 \text{ m}$, $f' = 50 \text{ mm}$, $b = 30^\circ$.



Lichtseite

Schattenseite

Abb. 7. Wie Abb. 6, aber:

- a. $fH = 50 \text{ mm}$, $s = 1 \text{ m}$, $f' = 135 \text{ mm}$, $b = 7^\circ$,
 b. $fH = 50 \text{ mm}$, $s = 1 \text{ m}$, $f' = 135 \text{ mm}$, $b = 14^\circ$,
 c. $fH = 50 \text{ mm}$, $s = 1 \text{ m}$, $f' = 10 \text{ mm}$, $b = 7^\circ$,
 d. $fH = 50 \text{ mm}$, $s = 1 \text{ m}$, $f' = 10 \text{ mm}$, $b = 14^\circ$.

Weiterhin fällt auf, daß die leuchtenden Gebiete nicht gleichmäßig ausgeleuchtet sind, sondern bei kleinen Beleuchtungsaperturen in Abb. 6 a und c in einzelne Streifen aufgelöst sind. Die Streifen haben ungleichmäßige Abstände wie bei der Beugungsfigur der Halbebene. Legt man die Einstellebene vom Objektiv aus hinter die Oberfläche, so wird die Zahl der sichtbaren Streifen vermehrt; liegt sie vor der Oberfläche, so wird die Zahl der Streifen vermindert, wobei eng liegende Streifen verschwinden. Bei Einstellung auf die Oberfläche erscheinen vier bis fünf helle Streifen. Bei großen Beleuchtungsaperturen wie in Abb. 6 d werden die Streifen unscharf. Die Breite der leuchtenden Gebiete beträgt bei kleinem Winkel maximal etwa 0,1 mm. Eine längere Brennweite als 50 mm in Abb. 7 a und b brachte keine anderen Verhältnisse. Anders die kürzere Brennweite von 10 mm Abb. 7 c und d. Hier zeigte sich nur ein schmaler Streifen, was am Aufbau der Beugungsfigur

Arbeit 1

liegen könnte, denn die bekannte Beugungsfigur der Halbebene erscheint erst in Entfernungen ab etwa 50 mm. In einer späteren Arbeit wird darüber genauer berichtet.

5. Ergänzende Experimente zur leuchtenden Kante

Zusätzlich zum gebeugten Licht ist noch gestreutes Licht auf den Bildern zu sehen. Da gestreutes Licht keine Streifenbildung zeigt, sind beide Anteile leicht zu unterscheiden. Bei größerem Winkel nimmt vor allem lichtseitig der Anteil des gestreuten Lichtes zu. Die

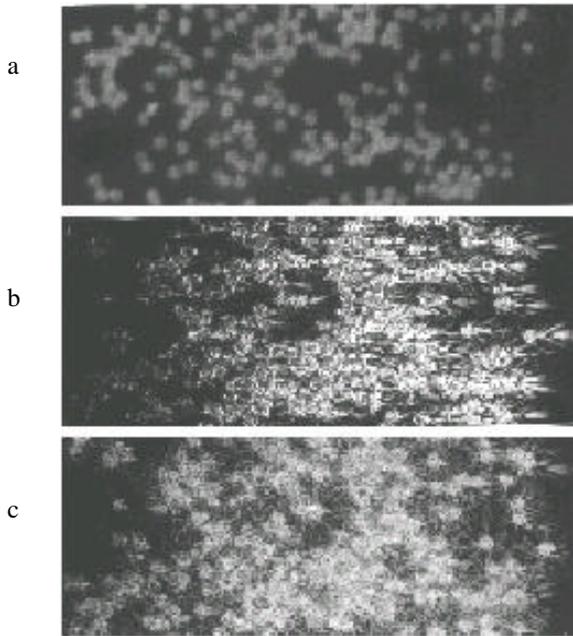


Abb. 8. Photographische Aufnahmen der Streufiguren von Bärklappsporen in der Apparatur der Abb. 5, aber statt Li 1 bis F ein He-Ne Laser 188 und statt S eine Glasplatte mit Bärklappsporen, Abbildungsmaßstab wie Abb. 6.

- a. Nur Auflicht,
 b. Nur Durchlicht, $\mathbf{b} = 7^\circ$,
 c. Nur Durchlicht, $\mathbf{b} = 15^\circ$

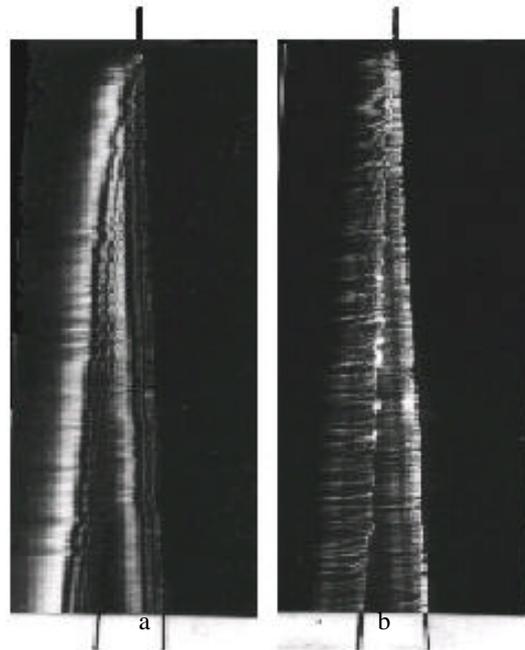


Abb. 9. Photographische Aufnahme der Spitze des Dreieckspaltes in der Apparatur der Abb. 5, im gleichen Abbildungsmaßstab wie Abb. 6., $fB = 0,5$ mm, $s = 1$ m, Die Striche deuten die Lage der Projektion des Spaltes an.

- a. $\mathbf{b} = 7^\circ$ b. $\mathbf{b} = 15^\circ$

Verwendung von Kupferfolie als Material für den Spalt bedingt eine relativ starke Streuung, denn diese läßt sich nicht wie ein Präzisionsspalt reinigen. Um die Streuung getrennt zu untersuchen, wurden auf einer Glasscheibe Bärklappsporen aufgestreut und diese Scheibe an Stelle des Spaltes in den Strahlengang nach Abb. 5 gestellt, wobei der

Bärklappsporen zur Kamera zeigte. Bärklappsporen werden als rund mit einem Durchmesser von etwa $30 \mu\text{m}$ beschrieben. Als Lichtquelle wurde hier ein He-Ne Laser HNA 188 verwendet, die Hg-Lampe gibt analoge Ergebnisse, allerdings bei unbequem langen Belichtungszeiten. Die Abb. 8 zeigt ähnliche Ergebnisse wie Abb. 6. Die sternförmigen Fransen sind bei kleinem Aufnahmewinkel einseitig ausgebildet und schattenseitig gerichtet, während sie bei größerem Winkel allseitig auftreten. Die sternförmige Streufigur ist vermutlich durch eine Struktur der Streuteilchen bedingt. Über radiale Fransen berichtete auch schon Laue [5].

Um die leuchtende Kante bei kleinen Spaltweiten zu untersuchen, wurde die Spitze eines Dreieckspaltes in der gleichen Anordnung untersucht. Die Abb. 9 zeigt keine Besonderheiten.

6. Diskussion der inneren und äußeren Beugungsstreifen des Spaltes

Mit den Kenntnissen der Newtonschen Beugungsexperimente sind die vorgelegten Experimente nicht verwunderlich, sondern zu erwarten. Dagegen nach den Fresnelschen Beugungsexperimenten und allgemein nach der Wellentheorie des Lichtes unerklärlich. Die Gründe müssen erläutert werden.

Fresnel [2] leitete seine Theorie mit der Anwendung des Huygensschen Prinzips für Beugungsstreifen am Hindernis ab. Er schrieb: "Die Schwingungen einer Lichtwelle können in jedem ihrer Punkte als Summe von Elementarbewegungen betrachtet werden, welche alle Teile dieser Welle im selben Augenblick, während jeder einzeln wirkt, aussenden, würde wenn man sie in

irgendeiner ihrer früheren Lagen betrachtet. „Als Anmerkung: "Ich betrachte stets die Aufeinanderfolge einer Unzahl von Wellen oder eine Hauptschwingung der Flüssigkeit. Nur in diesem Sinne kann man sagen, daß zwei Lichtwellen sich auslöschen, ..."

Dies soll an der Beugungsfigur des Spaltes diskutiert werden, da diese bekannter sind als die analogen des Hindernisses.

Die Maxima und Minima äußerer Beugungsstreifen am Spalt in großen Entfernungen gehorchen mit m als Maßzahl für die Ordnung n und d als Spaltweite der Formel:

$$\sin \alpha = m \lambda / d \quad (1)$$

(Min: $m = n$, Max: $m = 0$ und $m = (2n + 1)/2$ mit $n = 1, 2, \dots$)

Zur Begründung wird Formel (1) auf die Entfernung null, also in die Spaltebene extrapoliert. Das wird in jedem Lehrbuch der Optik geometrisch dargestellt. In heutiger Sprechweise nach der Wellentheorie: „Der Spalt begrenzt eine Wellenfront und jeder Punkt der Wellenfront wird Ausgangspunkt einer neuen Kugelwelle“. Wenn aber als Voraussetzung für Formel (1) in dem Buch die Entfernung $\gg \lambda$ steht, so ist diese Extrapolation bereits als unzulässig gekennzeichnet.

Dazu zeigte Newton [1] die Beugungsfigur des Dreieckspaltes in der 10. Beobachtung, die als Abb. 1 reproduziert ist. Nur in großen Entfernungen und bei kleinen Spaltweiten, also rechts am Dreieckspalt, treten die äußeren Beugungsstreifen auf, die der Formel (1) entsprechen. Bei großen Spaltweiten oder entsprechend kurzen Entfernungen, also im linken Teil der Abb. 1, treten die inneren Beugungsstreifen des Spaltes auf, sie entsprechen der Beugung an der Halbebene mit den Kanten als Halbebenen. Diese Streifen liegen parallel innerhalb der Schattengrenzen ACB, also lichtseitig der Schattengrenze. Die Abstände der Streifen sind ungleichmäßig, sie gehorchen also nicht der Formel (1) und sind unabhängig von der Spaltweite. Die Streifenabstände wachsen, wie Fresnel [2] experimentell (und nicht aus der Wellentheorie) nachwies, nicht linear mit der Entfernung wie die äußeren Streifen des Spaltes, sondern z.B. bei paralleler Einstrahlung nur mit der Wurzel aus der Entfernung. Daraus ist zu folgern: Die Extrapolation der Formel (1) war unzulässig, denn die Formel gilt bei inneren Streifen in kurzen Entfernungen gar nicht.

Arkadiew [6] wiederholte die Beugung am Dreieckspalt in Entfernungen von über 20 m und konnte damit erreichen, daß nur äußere Beugungsstreifen im Photo zu sehen waren, ähnlich wie in Abb. 3 b. Dieses Photo wurde überall verwendet, um nicht auf die Umwandlung innerer Streifen in äußere eingehen zu müssen. Das wäre notwendig gewesen, wenn die Newtonsche Zeichnung benutzt worden wäre, aber der Umwandlung stand man damals hilflos gegenüber.

Wenn jemand einwendet, daß weit auseinander gerückte Kanten die Beugungsfiguren der Halbebene liefern müssen, so ist das richtig, aber es ist hier zu erklären, warum bei gleicher Spaltweite in kurzen Entfernungen innere Streifen auftreten und in großen Entfernungen äußere Streifen.

Dann kann jemand einwenden, daß es noch andere Begründungen für Licht als Welle gäbe. Nein, die gibt es nicht. Mach [7] hat gezeigt, daß alle Beugungs- und Interferenzexperimente nur die Periodizität des Lichtes beweisen und nicht die Welle. Wenn man alle diese Experimente kritisch durchgeht, so kann man Mach nur bestätigen. Dabei ist Periodizität nicht auf Schwingung oder Welle begrenzt, sondern auch z.B. bei Rotation möglich. Man vergleiche Siemens [8]. Eine Darstellung mit Hilfe des Fouriertheorems ist für jedes beliebige stückweise monotone Ergebnis möglich. Pohl [9] schrieb: „Eine Übertragung der Wellenvorstellung auf das Vakuum ist schon eine weitgehende Abstraktion“.

Schwarzschild [10] suchte den Übergang innerer zu äußerer Beugungsstreifen durch Her- und Hinüberwerfen von Lösungen von einer Kante zur anderen mathematisch zu begründen, aber das wurde nie als Lösung des Problems anerkannt.

7. Diskussion von Grimaldis leuchtender Kante

Formel (1) und auch die Folgerungen für die äußeren Beugungsstreifen des Spaltes setzen voraus, daß das gebeugte Licht vom gesamten Spalt kommt. Auch das stimmt nicht, und das war schon lange vor Fresnel bekannt. Grimaldi [3] beobachtete bei verdeckter Lichtquelle an der Kante eine feine Lichtlinie, genannt Grimaldis leuchtende Kante. Newton [1] beobachtete dies genauer wie schon im Abschnitt 3 berichtet wurde. Young [4] reduzierte dies aber fälschlich auf die Kante. Fresnel [2] schrieb: „Nachdem ich mich so vergewissert hatte, daß die Fransen vom Körper selbst ausgingen in dem Maße, wie ich dies mit einer starken Lupe beurteilen konnte ...“. Mit diesen Fakten und dem Youngschen Interferenzprinzip gelang es aber Fresnel nicht, die Beugung am Spalt gemäß Formel (1) zu berechnen, wie man leicht nachprüft (für Doppelspalt und Gitter Max: $m = n$, Min: $m = (2n + 1)/2$, mit $n = 0, 1, 2, \dots$, $d =$ Spaltabstand), und er versuchte es daher mit der oben genannten Folgerung des Huygensschen Prinzips.

Folgerung: Die Extrapolation der Formel (1) ist nicht nur unzulässig, sondern auch falsch, denn gebeugtes Licht kommt nur aus der Umgebung der Kanten und nicht vom gesamten Spalt, wie vorausgesetzt.

Aber ist es nicht notwendig, daß jeder die Mitteilung der Ergebnisse von Fresnel [2] über seine Mitteilungen hinaus nachprüft, sondern es genügt die Extrapolation der Formel (1) mit Newtons Beugungsexperimenten zu vergleichen.

Hier versuchte Rubinowicz [11] diesen Widerspruch zu überbrücken. In der Funktionentheorie kann man für analytische Funktionen ein Linienintegral in ein Flächenintegral umrechnen. Mit Licht, dargestellt durch eine e -Funktion als analytische Funktion, glaubte er den Widerspruch beseitigt zu haben, es sei danach gleichgültig, ob gebeugtes Licht von der Kante oder von der gesamten Fläche kommt. Aber Licht kommt weder nur von der Kante, noch von der Fläche, sondern aus der Umgebung der Kante, die Lichtlinie Grimaldis kann also nicht als Linienintegral dargestellt werden. Daß gebeugtes Licht nur aus der Umgebung der Kanten kommt, ist also eine seit Jahrhunderten bekannte Tatsache, nie hat jemand gezeigt, daß gebeugtes Licht vom gesamten Spalt kommt, aber trotzdem setzte man allgemein Flächenintegrale zur Berechnung an.

Sommerfeld [12] folgerte aus seiner Beugungstheorie, die das Huygensschen Prinzip nutzt, daß von der Kante kein Licht ausgeht. Daher bezeichnete er Grimaldis leuchtende Kante als unerlaubte Extrapolation des Auges. Von der Kante geht in der Tat kein Licht aus, wohl aber kommt gebeugtes Licht nur aus der engen Umgebung der Kante und nicht vom gesamten Spalt. Aber das berücksichtigte Sommerfeld nicht, er integrierte über die Fläche. Sommerfeld ignorierte also Newtons Beugungsexperimente.

8. Allgemeine Bemerkungen zu Newtons Beugungsexperimenten

Jordan [13] kritisierte Newtons Deutung der Beugungsexperimente, ohne etwas Neues zu bieten. Richtig ist, daß das Loch im Fensterladen ein divergentes Licht liefert, aber schon, weil die flächenhaft leuchtende Sonne kein paralleles Licht liefert.

Rosenberger [14] meinte, daß Newtons Beugungsexperimente nicht viel über Grimaldi hinausgingen, ein 1895 zu vertretendes Urteil.

Burkhardt [15] erweiterte die Untersuchungen Fresnels auf den Spalt, aber auch nur in großen Entfernungen, wo die Ergebnisse hinreichend mit Fresnels Theorie übereinstimmten.

Hall [16] bestätigte in seiner Einführung zu Newtons Optik, daß Newton bei seinen Beugungsexperimenten sehr sorgfältig gearbeitet habe, stellte aber das dritte Buch nicht besonders heraus.

9. Folgerungen

Fresnel [2] bestätigte in seiner ersten Arbeit über die Beugung, daß gebeugtes Licht nur ‘von den Kanten’ kommt, konnte damit aber die inneren Beugungsstreifen des Hindernisses (und äußere des Spaltes) nicht berechnen. Auch hatte er festgestellt, daß am Spalt das Gebiet zwischen den gebeugten Bereichen nicht einfach abgedeckt werden darf. Tut man dies, so erhält man die Beugungsfigur des Doppelspaltes. Daher nahm er in der zweiten Arbeit das Huygensschen Prinzip als vorgegeben an. Den physikalischen Widerspruch der Herkunft des gebeugten Lichtes berücksichtigte er nicht mehr, ihn genügte die mathematische Darstellung in großen Entfernungen und er zeichnete seine Wellen als Kreise später nicht bis zum Hindernis. Fresnel war sich also der Schwächen seiner Theorie bewußt. Die Lehrbuchautoren ab 1850 ließen Newtons Beugungsexperimente weg und konnten so eine einfache aber irreführende Beschreibung der Beugung vortäuschen. Daß das Gebiet zwischen den Bereichen, aus denen gebeugtes Licht kommt, nicht abgedeckt werden darf, muß in späteren Arbeiten begründet werden, es rechtfertigt aber nicht die Extrapolation.

Man kann zusammenfassen, daß Fresnel [2] in späteren Arbeiten 1. Die Beugung an der Halbebene, mit ungleichmäßigen Abständen der Beugungsstreifen, mittels Fouriertheorem mit dem Fresnelintegral, Huygensschen Prinzip und Youngs Interferenzprinzip, berechnen konnte. 2. Die Beugung am Hindernis mit inneren und am Spalt mit äußeren Beugungsstreifen, mit konstanten Abständen der Beugungsstreifen, mit dem Fouriertheorem mit Winkelfunktionen der Formel (1) berechnen konnte. Insbesondere Punkt 2 ist aber nur in sehr großen Entfernungen gültig.

Die (unterschlagenen) Newtonschen Beugungsexperimente zeigen: 1. Gebeugtes Licht kommt nach Newton nur aus der engen Umgebung der Kante, nach Young und Fresnel fälschlich nur von der Kante. 2. Die Beugung am Dreieckspalt demonstriert, daß in kurzen Entfernungen und großen Spaltweiten die inneren Beugungsstreifen des Spaltes (bzw. die äußeren des Hindernisses) entstehen, die der Beugungsfigur der Halbebene mit den Kante als Halbebenen entsprechen. Erst in größeren Entfernungen entstehen die äußeren Beugungsstreifen des Spaltes (bzw. die inneren des Hindernisses), die in Lehrbüchern nach 1850 als einzige Beugungsfigur des Spaltes angegeben wurden. Hier kommt also erst die unzulässige und falsche Extrapolation zur Geltung.

Literaturverzeichnis

- [1] I. Newton, Opticks, or a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light. London 1704;
Opera quae exstant omnis, Tom IV, London 1782;
Reprint, Bruxelles 1966;
Optik II + III, Übers. W. Abendroth, Ostwald's Klassiker Nr. 97, Engelmann, Leipzig 1898;
Neuaufgabe: Bd 96/97, Vieweg, Braunschweig 1983;
Optique. Trac. J.P. Marat 1787; Bourgois, Paris 1989.
- [2] A. J. Fresnel, Oeuvre Complètes I Paris 1866;
Abhandlungen über die Beugung des Lichtes. Ostwalds Klassiker Nr. 215 Engelmann Leipzig 1926. Zitate S.3 und 47.
- [3] F. M. Grimaldi, Physico-mathesis de lumine, coloribus et iride. Bononiae 1665.
- [4] T. Young, A course of lectures on natural philosophy and mechanical arts. London 1807.
- [5] M.v.Laue, Sitzungsber. Akad. Wiss. Berlin 1914 XLVII S. 1144.
- [6] W. Arkadiew, Phys. Z. **14** (1913) 832.
- [7] E. Mach, Die Prinzipien der physikalischen Optik. Barth, Leipzig 1921, S. 185 - 226.
- [8] W. Siemens, Phys. Bl. **34** (1978) 128.
- [9] R. W. Pohl, Einführung in die Optik. Springer, Berlin> Heidelberg, Göttingen 7./8. Auflage, 1948, S. 317.
- [10] K. Schwarzschild, Math. Ann. **55** (1902) 177.
- [11] A. Rubinowicz Ann. Physik (4) **53** (1917) 258; **73** (1927) 339.
- [12] A. Sommerfeld, Vorlesungen über theoretische Physik, Bd. 4, Optik. Dietrich Wiesbaden 1950. S. 268-269.
- [13] G. W. Jordan, Nicholson's Journ. nat. philos. **4** (1800) 78, 140;
Bearb. Gilbert (Gilbert's) Ann Physik **18** (1804) 1.
- [14] F. Rosenberger, Isaac Newton und seine Prinzipien. Barth, Leipzig 1895. S. 300-1
- [15] H. Burkhardt, Abh. Bayr. Akad. Wiss. mat.-nat. Kl. N. F. Heft 64, München 1954.
- [16] A. R. Hall, All Was Light, an introduction to Newton's Opticks Clarendon Press, Oxford 1993.