

Frequenzminderung des Lichtes nach der Beugung

Helmut Nieke

Zusammenfassung

Laserlicht fiel auf einen engen Spalt und trat dann in eine Lummer-Gehrcke Platte ein. Deren Interferenzstreifen zeigten eine Verbreiterung zum Ort des Lichtes niedriger Frequenzen, es trat also keine gesamte Linienverschiebung zum niederfrequenten Licht ein. Dies war nachweisbar bei Spaltweiten unter 0,01 mm, bei höheren Ordnungen auch bei einigen 0,001 mm. Je kleiner die Spaltweite, je höher die Ordnung und je höher die Frequenz des Lichtes, je stärker wurde die Verbreiterung zu niedrigeren Frequenzen. Smekal sagte die Frequenzminderung bei der Beugung voraus.

Diminishing of Frequency of Light after Diffraction

Abstract

Laser light fell through a narrow slit into a Lummer-Gehrcke plate. Their interference fringes show a spread of one flank to place of light of lower frequencies, but there are no displacement of the whole lines to lower frequencies. This is proved with slit-widths below 0.01 mm, in higher orders till some 0.001 mm. So narrower the slit, so higher orders of diffraction, and so higher the frequency of light, so stronger was the spread of the flank to lower frequencies. Already Smekal predicted diminishing of frequency of light after diffraction.

1. Experimentelle Anordnung

Die Abb. 1 zeigt die experimentelle Anordnung. Ein Laser beleuchtete, meist mit Strahlungsaufweitung, einen engen Präzisionsspalt. Im Abstand e folgte eine Lummer-Gehrcke Platte. Es wurden mit gleichem Erfolg die Platten 5 mm . 22 mm . 200 mm und 3 mm . 15 mm . 100 mm verwendet. Die Interferenzfiguren der Lummer-Gehrcke Platte registrierte unmittelbar dahinter angeordnet eine einäugige Kleinbild-Spiegelreflexkamera mit einem Tessar 1 : 4,5, $f' = 13,5$ cm Abstand der Brennweite auf feinkörnigem Film.

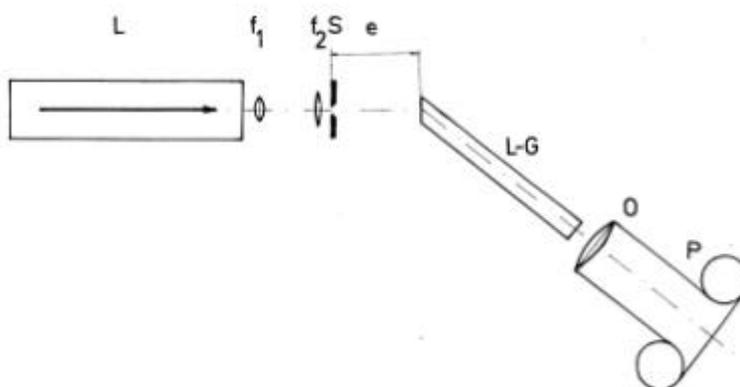


Abb. 1. Experimentelle Anordnung.
 L - He-Ne oder Argon- Laser; f_1, f_2 - Linsen zur Strahlungsaufweitung, S Präzisionsspalt mit maximaler Weite 0,3 mm.; e - Entfernung; L-G - Lummer-Gehrcke Platte, O - Objektiv Tessar 1 : 4,5, $f' = 13,5$ cm; P - einäugige Spiegelreflexkamera.

Wer die Interferenzfigur der Lummer-Gehrcke Platte hinter dem Spalt eines Spektrographen kennt, muß sich erst umstellen, wenn er mit einem Laser einstrahlt. Man erhält statt der gewohnten

vertikalen Linien nur Punkte, denn das Laserlicht ist parallel gebündelt. Da die Beugung vorwiegend senkrecht zu den Spaltkanten stattfindet, ist das Laserlicht in Richtung des Spaltes noch gebündelt und durch die Linse der Kamera wird das Licht in einem Punkt der Brennebene abgebildet. theoretisch sollte da eine Strahlungsaufweitung des Bündels nichts ändern, aber so streng ist die Bündelung nach der Beugung offenbar nicht, bei Strahlungsaufweitung findet man kurze schmale Streifen. Dies ist bei einer Photometrierung vorteilhaft, denn bei der Punktform tritt leicht eine Überstrahlung auf. Auch wenn die Figur der Lummer-Gehrcke Platte mit einem Strahlungsempfänger abgefahren wird, ist eine Aufweitung der Laserstrahlung zweckmäßig. Aber es tritt auch mit oder ohne Aufweitung so viel Streustrahlung auf, daß man zusätzlich noch die gewohnten Linien sieht, aber natürlich entsprechend lichtschwach.

Man könnte versuchen mit einer Zylinderlinse die Strahlung auf den Spalt zu konzentrieren, um die Intensität zu erhöhen. Bei größeren Spaltweiten, z. B. 0,2 mm erhält man dann aber keine scharfen Interferenzen mehr, denn nach Nieke [1] ist dann die geometrische Interferenz-Winkelbedingung nicht mehr erfüllt, wonach die Divergenz auf der Seite der Lichtquelle voll auf die Seite der Beugung übertragen wird. Bei den kleinsten hier angewandten Spaltweiten wäre der Einsatz einer Zylinderlinse möglich, aber die Intensität der Laserstrahlung ist ausreichend hoch, außerdem möchte man hier die Ergebnisse unter gleichen Bedingungen erhalten, deshalb wurde in keinem Fall eine Zylinderlinse eingesetzt.

2. Experimentelle Ergebnisse mit dem He-Ne Laser

Als erstes wurde nur die Spaltweite variiert und die Mitte der nullten Ordnungen untersucht, die Entfernung e nach Abb. 1 wurde in der Abb. 2 zu 0,2 m gewählt. Es sind die beiden innersten Streifen der Lummer-Gehrcke Platte der einen Seite gezeigt. Von 0,2 zu 0,02 mm Spaltweite sieht man nur eine geringfügig verbreiterte äußere, hier linke, Seite jeder Linie, bei Spaltweiten von 0,01 zu 0,005 mm links daneben sind die Abweichungen der hier linken Flanken deutlicher. Dabei ist zu beachten, daß diese inneren Linien beim Photometrieren und dann beim Zeichnen auf die gleiche Höhe normiert sind, denn bei Aufnahmen mit unterschiedlichen Spaltweiten ist keine völlig übereinstimmende Belichtung möglich. Die Belichtungszeiten wurden variiert und die Aufnahme ausgewählt, die im linearen Schwärzungsbereich lag. Es ist zu sehen, daß sich die Intensität nach außen verschiebt, also zum Ort mit niedrigeren Frequenzen, wo bei sehr kleinen Spaltweiten die Flanken in diesem Sinn verbreitert sind. Bei niedrigeren Frequenzen des Lichtes wird nämlich bei normaler Dispersion die Brechzahl kleiner und dieser Teil somit außen liegend.

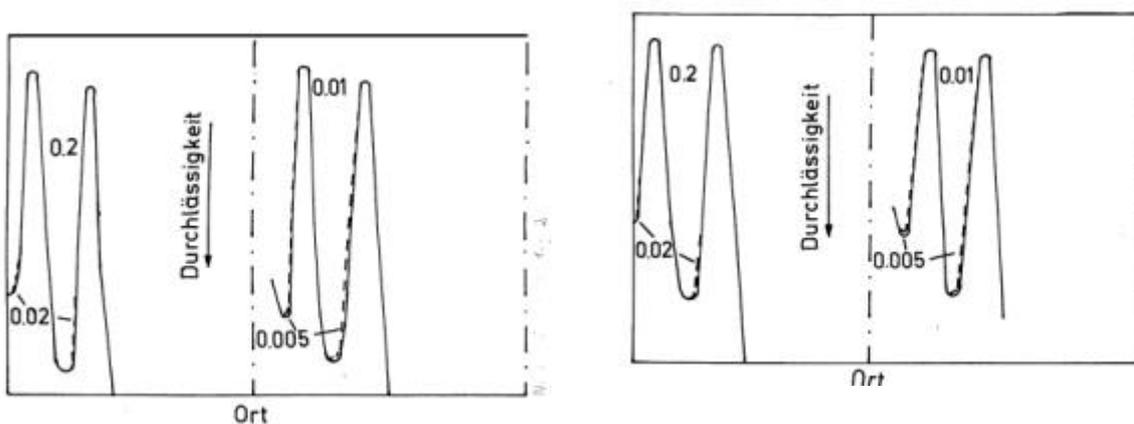


Abb. 2. Photometerkurven der ersten beiden linken Linien der Lummer-Gehrcke Platte, beleuchtet mit dem He-Ne Laser 188 mit den Spaltweiten 0,2, 0,02, 0,01 und 0,005 mm bei $e = 0,2$ m. Es sind die Mitten der nullten Ordnungen bei variiertem Spaltweite untersucht, die optischen Durchlässigkeiten der Negative in Abhängigkeit vom Bildort sind in willkürlichen Einheiten aufgetragen. Die gestrichelten Linien der Spaltweiten 0,02 und 0,005 mm sind nur dort gezeichnet, wo sie von den durchgezogenen Kurven bei 0,2 oder 0,01 mm abweichen. Die innere Linie ist in der Höhe normiert gezeichnet. Strichpunktiert ist die Symmetrielinie der Aufnahme der Lummer-Gehrcke Platte dargestellt. Abb. 3. Wie Abb. 2, nur $e = 1,2$ m.

Diese Ergebnisse wurden noch aus größeren Entfernungen mit $e = 1,2 \text{ m}$ geprüft. Bei kürzeren Entfernungen treten erst die inneren Streifen des Spaltes auf, wie dies schon Newton [2] III in seiner 10. Beobachtung am Dreieckspalt zeigte, die der Beugung an der Halbebene entsprechen. Schon Fresnel [3] stellte fest, daß die inneren Beugungsstreifen oder die Beugungsstreifen der Halbebene nicht linear mit der Entfernung wachsen, sondern bei parallelem Lichteinfall nur mit der Wurzel aus der Entfernung. Es ist also keineswegs selbstverständlich, daß nach der Beugung das Licht geradlinig läuft, und nicht geradlinig laufendes Licht würde veränderte Interferenzen liefern. Nieke [4] stellte fest, daß sich hintereinanderfolgende Beugungen nicht ungestört überlagern, also die Überlagerung der Beugungsfigur des Spaltes und der Interferenzfigur der Lummer-Gehrcke Platte muß nicht ungestört verlaufen. Außer der Versuche in Abb. 3 wurde zusätzlich dies für die hier angewandten Spaltweiten im Entfernungsbereich von $0,2 \text{ m}$ bis $1,2 \text{ m}$ durch Ausmessen der Interferenzfiguren überprüft, die Abstände der Beugungsstreifen wuchsen hier linear mit der Entfernung. Es ist damit

gesichert, daß hier das gebeugte Licht keine andere Interferenzfigur bei der Lummer-Gehrcke Platte liefert als dies bei ungestörtem Licht der Fall gewesen wäre.

Die Abb. 4 zeigt für eine feste Spaltweite die Verhältnisse bei unterschiedlichen Ordnungen. Die Spaltweite von $0,025 \text{ mm}$ wurde gewählt, weil dafür eine Ordnung gerade die Lummer-Gehrcke Platte ausleuchtete. Höhere Ordnungen zeigen also eine Verbreiterung nach der niederfrequenten Seite, je höher die Ordnung, je stärker die niederfrequente Verbreiterung.

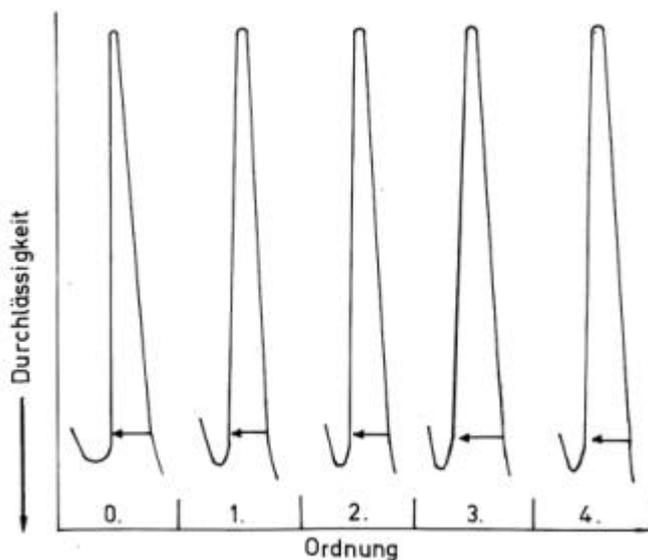


Abb. 4. Die Ordnungen 0 bis 4 der Beugungsfiguren. Gezeichnet ist die linke innerste Linie der Photometerkurven der Lummer-Gehrcke Platte bei der Spaltweite $0,25 \text{ mm}$ der Ordnungen 0 bis 4. Der Pfeil am Fuß der Kurven soll auf die Verbreiterungen bei höheren Ordnungen hinweisen. Die Höhe der Linien ist normiert gezeichnet.

3. Experimentelle Ergebnisse mit dem Argon-Laser

Abb. 5 zeigt die Ergebnisse mit der blau-grünen Linie eines Argon-Lasers ohne Strahlungsaufweitung. Schon bei der größten Spaltweite zeigte sich eine Feinstruktur dieser Linie. Es ist bekannt, daß bei der starken Anregung mit diesem Laser eine Doppellinie auftritt, das ist also kein Ergebnis der Beugung. Die Doppellinie zeigt die Verbreiterung durch die Intensitätsverlagerung auf die äußere, hier linke Linie besonders augenfällig. Dann ist zu bemerken, daß der Argonlaser mit Blau-Grün ein höherfrequentes Licht erzeugt als das Rot des Ne-Ne Lasers, und nach der Erfahrung beim Compton Effekt war dann eine stärkere Verbreiterung zu erwarten. Die Resultate bei $0,2 \text{ mm}$ Spaltweite sind mit denen von $0,02 \text{ mm}$ wieder nur wenig verschieden, bei $0,01$ zu $0,005 \text{ mm}$ Spaltweite tritt hingegen ein deutlicher Unterschied auf. Bei kleineren Spaltweiten steigt die Intensität der äußeren Maxima und das Verhältnis der Intensität des inneren zum äußeren Maximum verschiebt sich bei allen Streifen zugunsten der äußeren, also niederfrequenten Maxima.

Die Abb. 6 zeigt wie die Abb 4 die einzelnen Ordnungen, wie dort tritt bei höheren Ordnungen eine höhere Verbreiterung auf. Hier ist der Effekt offensichtlicher wegen der Doppellinie und größer wegen des höherfrequenten Laserlichtes.

Abb. 5. Photometerkurven der beiden ersten Streifen der Lummer-Gehrcke Platte. Es wurde wie in Abb. 2 die nullte Ordnung bei variiertem Spaltweite untersucht, Ein Argon-Laser ILA 120 beleuchtete mit der blaugrünen Einstellung den Spalt, im Unterschied zum He-Ne Laser liefert der Argonlaser Doppellinien. Es ist die optische Durchlässigkeit der Negative in willkürlichen Einheiten in Abhängigkeit vom Bildort aufgetragen. Sonst wie Abb. 2.

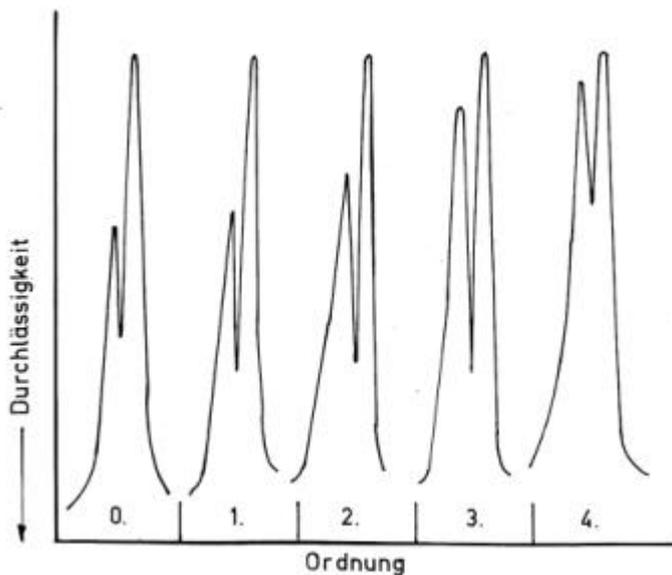
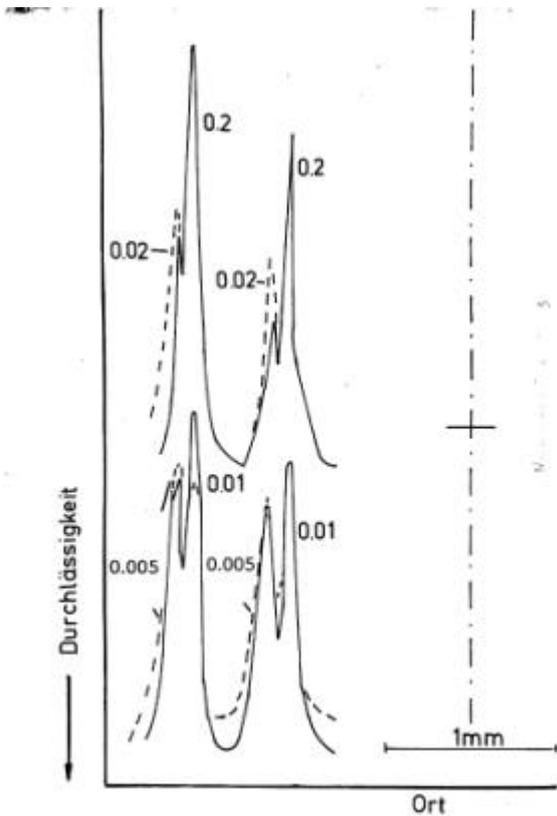


Abb. 6. Photometerkurven der Negative, die mit Beugungsstreifen von verschiedenen Ordnungen bei konstanter Spaltweite mit dem Argonlaser aufgenommen wurden. Es sind jeweils nur die linken ersten Doppelstreifen dargestellt, die bei einer Spaltweite von 0,025 mm gewonnen wurden. Es sind die 0. bis 4. Ordnung analysiert, wobei die inneren Maxima auf die gleiche Höhe normiert gezeichnet sind.

4. Diskussion

Bei Kenntnis des Compton Effektes ist die Rotverschiebung des Lichtes bei der Beugung nicht verwunderlich. Wer allerdings eine Rotverschiebung der gesamten Linie erwartet hatte, wie Hubble [5] im Licht außergalaktischer Nebel beobachtete, der wird enttäuscht sein. Man könnte dies vergleichen beim Compton-Effekt, wenn man über den gesamten Winkelbereich summiert, dann erhält man auch nur eine Verbreiterung nach der niederfrequenten Seite. Dies wäre hier zu vergleichen mit der Summierung über die Spaltweite.

Dazu ist zu beachten, was schon Newton [2] III Beobachtung 5 festgestellt hatte und Nieke [6] und [7] bestätigte, daß gebeugtes Licht nicht vom gesamten Spalt kommt, sondern nur aus der näheren Umgebung jeder Kante ($<0,1$ mm). Bei Spaltweiten kleiner als $0,1$ mm überlappen sich die beiden Gebiete aus denen gebeugtes Licht kommt.

Die Ermittlung der Spaltweite Null ist nicht eindeutig. Stellt man die Spaltweite Null ein, wenn im Auflicht eine Bewegung der Spaltbacken bei Spalterweiterung wahrzunehmen ist, so stellt man bei Beobachtung im Durchlicht die erste Lichtwahrnehmung bei Werten zwischen $0,001$ bis $0,002$ mm fest. Also die Angabe jeder Spaltweite ist mit dieser Ungenauigkeit verknüpft.

Smekal [7] schrieb in der Arbeit, in der er auch den Raman-Effekt voraussagte: „Es hat den Anschein, als ob mit jeder beliebigen Richtungsänderung eines Lichtstrahles Vorgänge von ganz ähnlicher Beschaffenheit verknüpft sein würden, wie die oben beschriebenen ‚Translationsquantenübergänge‘. Die formale Anwendung der Einsteinschen Impulsfolgerung ergäbe dann grundsätzlich eine Frequenzänderung bzw. -erniedrigung des Lichtes bei jedem Reflexions-, Brechungs- und Beugungsvorganges, eine Konsequenz, aus welche in etwas spezieller Weise bereits W. Duane [8] unabhängig von den oben behandelten Fragen aufmerksam gemacht hat. Eine genauere Prüfung zeigt, daß die dadurch bedingte Abweichungen von der klassischen Wellentheorie unter den günstigsten experimentellen Umständen interferometrisch sogar bequem meßbar gemacht werden können müßten. Bis zur Verwirklichung derartiger Zukunftshoffnungen, welche in mancherlei Hinsicht geeignet wären, das Dogma von der Unentbehrlichkeit wellentheoretischer Überlegungen in der Optik der Reflexion und Interferenz zu zerstören, ist aber vielleicht ein noch sehr weiter Weg.“

Raman mußte Stunden oder Tage lang seine Aufnahmen belichten. Mit Laserlicht sind heute Sekunden oder Minuten ausreichend. So ist es auch keine Schwierigkeit mit Laserlicht die Frequenzminderung des Lichtes bei der Beugung nachzuweisen.

Die notwendige Frequenzänderung Δf vom ersten zum zweiten Streifen der verwendeten Lummer-Gehrcke Platten, also das Dispersionsgebiet, ergibt sich etwa zu

$$\Delta f / f \sim 4 \cdot 10^{-5}$$

die maximale Verschiebung beträgt aber nur einen Bruchteil davon.

Literaturverzeichnis

- [1] H. Nieke, Newton's Beugungsexperimente und ihre Weiterführung. Arbeit 4.
- [2] I. Newton, Opticks or a Treatises of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light. London 1704;
Opera que 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, Trad. J. P. Marat 1787; Bourgois, Paris 1966.
- [3] A. Fresnel, Oeuvre Complètes I. Paris 1866.
Abhandlungen über die Beugung des Lichtes. Ostwalds Klassiker Nr. 215, Engelmann Leipzig 1926.
- [4] Wie [1], Arbeit 5.
- [5] E. Hubbel, The realm of nebula. Yale Univ. London 1936;
Das Reich der Nebel. Vieweg, Braunschweig 1938.
- [6] Wie [1], Arbeit 2
- [7] Wie [1], Arbeit 3.
- [8] A. Smekal, Naturwiss. **11** (1923) 973.
- [9] W. Duane, Proc. Acad. Amer. **9** (1923) 158.