

Überlagerung von Interferenz und Beugung

Helmut Nieke

Zusammenfassung

Es wird in einem Mach-Zehnder Interferometer gezeigt, daß sich die Beugungsfigur in einer Halbebene nicht ungestört mit der Interferenzfigur überlagert. Das wird darauf zurückgeführt, daß Photonen der Beugungsfigur der Halbebene nicht geradlinig laufen. Das Gleiche wird mit Newtonschen Ringen gezeigt, wo sich ebenfalls Beugung und Interferenz nicht ungestört überlagern. Bei der Streuung hingegen konnte die Überlagerung nicht geprüft werden, es wird diskutiert, warum in einer normalen Interferenzapparatur die gewohnte Streufigur nicht entstehen kann.

Superposition of Interference and Diffraction

Abstract

In a Mach-Zehnder interferometer is shown that the diffraction figure of a half-plane does not superpose with the interference figure of the half-plane undisturbly. This is reduced because photons of the diffraction figure of half-plane do not go rectilinearly. The same fact is shown with Newton's rings where likewise diffraction and interference do not superpose undisturbly. Whereas in scattering the superposition could not be examined, it was discussed why the common scattering figure can not originate in an usual interference apparatus

1. Einleitung

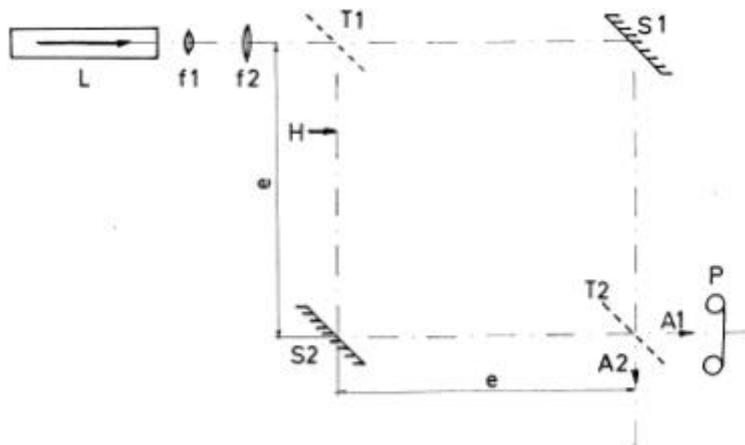


Abb. 1: Mach-Zehnder Interferometer (Leybold Didaktik). L - He-Ne-Laser; f_1 , f_2 - Linsen zur Strahlungsaufweitung, parallel eingestellt; T_1 , T_2 - Strahlungsteiler; H - bei einigen Aufnahmen Ort der Halbebene oder der Streuplatte; e - Entfernungen 16,5 cm; S_1 , S_2 - Spiegel; A_1 , A_2 - Ausgänge, wie Positiv und Negativ; P - Kamerakörper einer einäugigen Spiegelreflexkamera.

Nieke [1] zeigte bei hintereinander folgenden Beugungen mit der Beugungsfigur der Halbebene am folgenden Spalt, daß damit eine veränderte Beugungsfigur entsteht. Es lag daher nahe, auch die Überlagerung von Beugung und Interferenzfiguren zu prüfen.

Interferenzanordnungen erfordern stets eine Strahlungsteilung. Diese Teilung kann durch folgende Anordnungen erreicht werden:

- a. Reflexion - Brechung (Newtonsche Ringe, Lummer-Gehrcke Platte)
- b. Halbdurchlässige Verspiegelung (z. B. Michelson-Interferometer)

Newton's Beugungsexperimente und ihre Weiterführung Arbeit 8

- c. Doppelabbildung (verkippte Spiegel, geteilte Linsen)
- d. Teilabdeckung mit Beugung (Spalt, Doppelspalt, Gitter)
- e. Streuung (kleine Teilchen, eingestaubte Platte, Mattscheibe)
Ohne Strahlungsteilung ist Interferenz nur mit zwei moden- und phasenstabilisierten Lasern möglich, wobei an die Stabilisierung hohe Forderungen zu stellen sind.

2. Experimente mit Beugung in der Interferenzapparatur

Zu diesem Zweck wurde ein Mach-Zehnder Interferometer benutzt. Das Michelson

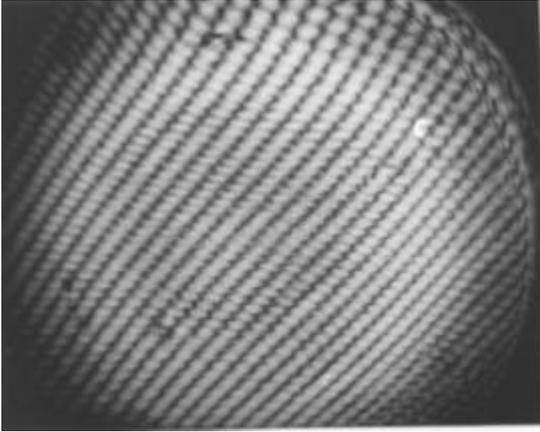


Abb. 2. Interferenzfigur des Interferometers nach Abb. 1.

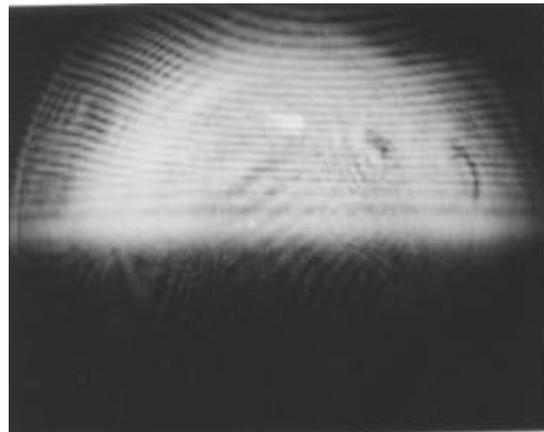


Abb. 3. Beugungsfigur einer Halbebene in H mit abgedecktem anderen Lichtweg.

Interferometer scheidet aus, denn dort wird der gleiche Arm vom Licht jeweils hin und zurück durchlaufen, so daß die Verhältnisse unübersichtlich werden. Im Mach-Zehnder Interferometer nach Abb. 1 erfolgt die Beugung in einem Arm nur einmal, sie ist also auch getrennt zu beobachten. An der Stelle H der Abb. 1 wurde in Abb. 3 und 4 die Halbebene eingebracht.

Die Abb. 2 zeigt die ungestörte Interferenzfigur des Interferometers nach Abb. 1. Die Abb. 3

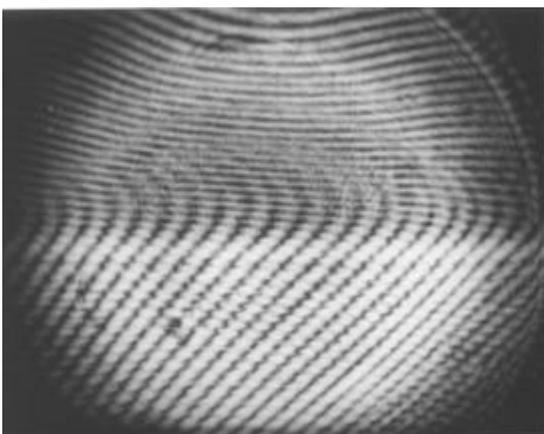


Abb. 4. Überlagerung der Beugungs- und Interferenzerscheinungen.



Abb. 5. Ungestörte Interferenzfigur mit einem klaren Objektglas in H der Abb. 1. Neu justiert für Abb. 6 bis 8.

demonstriert die Beugungsfigur der Halbebene in einem Arm des Interferometers, wobei der andere

Lichtweg abgedeckt war. Die Abb. 4 zeigt schließlich die Überlagerung der Beugungs- und Interferenzfigur. Wie bei Nöke [1] überlagern sich die Figuren nicht unbeeinflusst.

Es wurde mit Absicht eine Halbebene zur Beugung benutzt, denn dafür hat schon Fresnel [2] gefunden, daß z. B. bei paralleler Einstrahlung die Abstände der Beugungsstreifen nur proportional der Wurzel aus der Entfernung wachsen. Die gebeugten Photonen können also nicht geradlinig laufen und es ist bei der Überlagerung von Beugung und Interferenz eine gestörte Überlagerung zu erwarten.

3. Experimente mit Streuung in der Interferenzapparatur

Honig [3] referierte über einen Vortrag, den Martini auf einem Kongreß gehalten hatte. Er berichtete über die Einfügung einer durchscheinenden Plastscheibe in einen Arm eines Interferometers und dann von unterschiedlichen Verhalten bei kleinsten Intensitäten, wenn die Scheibe rotierte. Dies wurde nachgewiesen mit einem Photonen-zähler, wo sich ein nichtlineares Verhalten bei kleinsten Intensitäten ergab.

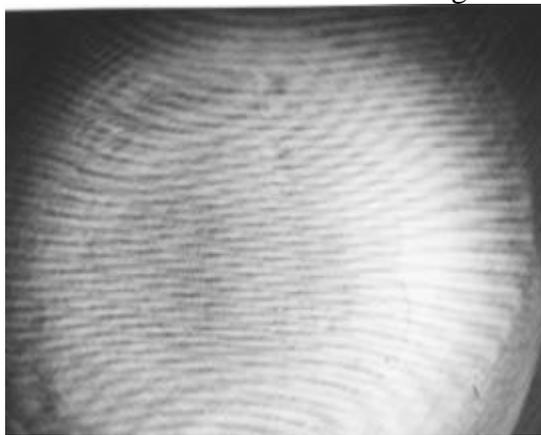


Abb. 6. Streufigur mit Bärlappsporen auf der Objektglas in H, der andere Lichtweg war abgedeckt.



Abb. 7. Gesamtergebnis mit Streufigur überlagert von der Interferenzfigur.

Nöke [4] hatte gezeigt, daß die Streifen an der Machschen rotierenden Scheibe ein physikalisches Phänomen sind. Er diskutierte dies als Beugung an bewegten Kanten.

Hier interessierte allerdings nur der Einfluß der Streuung auf die Interferenzfigur und nicht die Nichtlinearität der Photonen-zählung bei kleinsten Intensitäten, worauf bereits Nöke [5] einging.

Es wurde festgestellt, daß bei Einfügung einer Plastscheibe oder Mattscheibe in einen Arm der Interferenzapparatur keine Interferenzfiguren mehr entstehen (was eine Photonen-zählung nicht ausschließt). Zur Untersuchung wurde daher eine Anordnung gewählt, die eine geringere Streuung ergibt, wie üblich wurde ein mit Bärlappsporen (Lykopolidium) bestäubtes Objektglas benutzt und in einen Teilstrahlengang (an der Stelle H der Abb. 1) gebracht. Die Abb. 5 zeigt die ungestörte Interferenzfigur der Apparatur nach Abb. 1, wo



Abb. 8. Wie Abb. 7, aber das Objektglas mit dem Bärlappsporen zusätzlich bewegt

der klare Teil des Objektglases in den Strahlengang eingestellt war. In Abb. 6 war das ruhende Objektglas mit Bärlappsporen bestreut und der andere Lichtweg abgedeckt, es wird also nur die Streuung gezeigt. Die Abb. 7 zeigt dann das Gesamtergebnis, beide Lichtwege waren geöffnet, in einem der Lichtwege war der Bärlappsporen angeordnet. In Abb. 8 wurde die Platte mit dem Bärlappsporen zusätzlich bewegt.

4. Experimente mit Beugung und Newtonschen Ringen

In einer Schlierenapparatur nach Abbe, wie sie Nieke [6] benutzte, zeigt ein Plattenpaar mit Newtonschen Ringen sowohl in Durchlicht als auch in Reflexion hinter der Schlierenblende weder eine merkliche Aufhellung noch eine Interferenzfigur. Das gleiche Ergebnis ergab das Köstersche Doppelprisma. Aus diesen Experimenten ist zu folgern, daß bei Interferenzen gleicher Dicke keine nachweisbare Richtungsänderung der Photonen erfolgt.

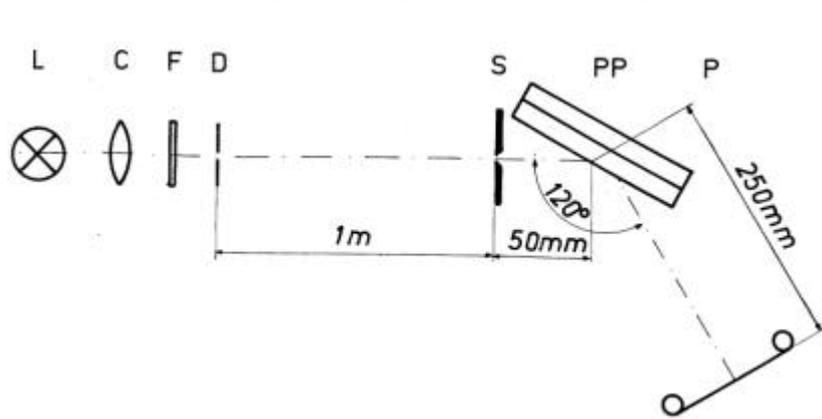


Abb. 9. Experimentelle Anordnung zur Untersuchung der Newtonschen Ringe bei Beleuchtung mit Beugungsstreifen in Reflexionsstellung. L - Lichtquelle, eine Quecksilber-Höchstdrucklampe HBO 100; C - Kondensator; F - Grünfilter; D - Kreisblende $\varnothing 0,1$ mm; S - veränderlicher Spalt; PP - Planplatten, die Newtonsche Ringe zeigen; P - Photofilm.

Newton'sche Ringe zeigen, mit der Beugungsfigur eines weiten Spaltes beleuchtet, der bei den hier angewandten Entfernungen innere Beugungsstreifen lieferte. Abb. 10 zeigt Ausschnitte der überlagerten Beugungs- und Interferenzfigur. Die Newtonschen Ringe laufen im Bild schräg von links

Bei fertig
zusammgebauten
Linsenpaaren zur
Demonstration der
Newtonschen Ringe ist zu
prüfen, ob die Innenflächen
mit einer
Immersionsflüssigkeit benetzt
sind. Damit kann auch mit
Linsen mäßiger Güte der
schwarze Fleck vorgeführt
werden, dies stört aber in der
Schlierenapparatur.

Die Abb. 9 zeigt die experimentelle Anordnung, es wurden zwei Platten, die

nach rechts oben, und weisen auf gestörte Überlagerungen an Stellen wo Minima der Beugung mit Minima der Newtonschen Ringe zusammentreffen. Diese Stellen sind in Abb. 10 durch Pfeile gekennzeichnet. Eine Beleuchtung mit äußeren Streifen (enger Spalt) bringt diese Erscheinung

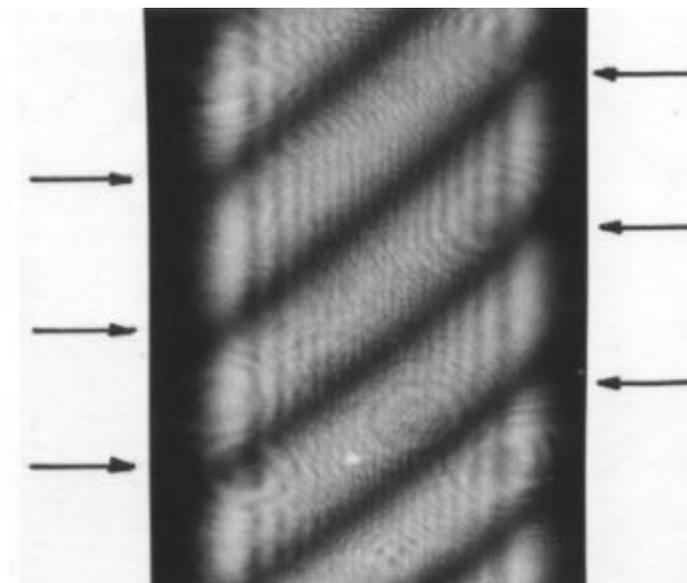


Abb. 10. Teile Newtonscher Ringe nach Abb. 9, beleuchtet bei einer Spaltweite von S mit 2 mm. Pfeile - vgl. Text.

nicht.

5. Diskussion der Interferenzexperimente

Wenn man die Frage stellt: „Wo bleibt das Licht, wenn ein Weg eines Interferenzgerätes dunkel erscheint?“ So ist zu bemerken: Bei Newtonschen Ringen oder beim Mach-Zehender Interferometer ist stets der eine Weg (Reflexion-Transmission) hell, wenn der andere dunkel ist, die Wege 1 und 2 der Abb. 1 verhalten sich wie Negativ und Positiv. Das Licht ist nicht verschwunden, es hat sich nicht ausgelöscht, sondern das Photon hat den anderen Weg eingeschlagen, das Feld aber beide. Am zweiten Strahlungsteiler erscheint dann ein Weg hell oder dunkel (2 Ausgänge!) je nach Phasendifferenz muß das Photon einen der Wege nehmen. Beim Michelson-Interferometer ist zu beachten, daß beim zweiten Weg das Licht zur Lichtquelle zurück reflektiert wird.

Newton [8] beantwortete diese Frage bei seinen Interferenzringen, daß die Lichtteilchen „fits“ (= Passungen und nicht Anwandlungen) lat. „vices“ als periodisch wechselnden Zwang (Disposition) zu Brechung oder Reflexion haben. Man prüft leicht nach, daß das Mach-Zehender Interferometer sich wie ein auseinandergezogenes Plattenpaar für Newtonsche Interferenzringe verhält. Nach Broglie - Welle durch Feld ersetzt - läßt sich das als Wechselwirkung des Photons mit seinem Feld entsprechend der Weglängendifferenz von Photon und Feld deuten. Dabei kann das Photon entsprechend Broglie [9] jeweils nur einen Weg benutzen, das Feld jedoch alle anderen möglichen Wege.

Außer einer Richtungsänderung der Photonen bei der Beugung muß es also unbedingt den schon von Newton geforderten Effekt der periodischen Beeinflussung von Reflexion und Brechung geben, gleichgültig ob man das augenblicklich erklären kann oder nicht.

Wenn Anordnungen mit Interferenzen gleicher Dicke Interferenzen zeigen und keine Ablenkung der Photonen nachweisbar sind, so bleibt als einzige Möglichkeit ihrer Entstehung die Änderung der Anteile von Brechung und Reflexion durch die periodischen Eigenschaften von Photonen und Feld. Die „fits“ waren also weder eine Hypothese noch ein Erklärungsversuch, sondern eine Beschreibung der Tatsache, daß Interferenzen gleicher Dicke ohne Ablenkung auftreten. Schon Mach [10] zeigte, daß Interferenzen die Periodizität des Lichtes und nicht die Welle beweisen.

Die Interferenzfigur der Newtonschen Ringe ist in jedem Fall auffangbar und verändert sich in konvergenten oder divergenten Lichtbündeln ähnlich. Bei Abbildung erhält man die schärfsten Bilder bei Einstellung auf den letzten Strahlungsteiler. Die Beugungsfigur des Spaltes ist zwar auch auffangbar, in der Schlierenapparatur zeigen sie eine definierte Aufhellung, also eine Richtungsänderung, die Beugungsfiguren in unterschiedlichen Entfernungen müssen jedoch nicht ähnlich sein, wie Nieke [7] bei inneren und äußeren Beugungsstreifen zeigte.

6. Diskussion der Streuexperimente

Für die Streuung an unregelmäßigen Teilchen wird üblicherweise Bärlappsporen benutzt, wie dies z.B. bei Pohl [11] mit eingestaubten Spiegeln und regellosen Kreisöffnungen beschrieben wurde. Die Sichtbarkeit der dort beschriebenen Streufigur setzt voraus, daß nur eine kleine Fläche beleuchtet und diese auf eine große Fläche projiziert wird. In einer üblichen Interferenzapparatur ist also diese Streufigur nicht zu erreichen, sondern wie in Abb. 6 sind nur die Streuteilchen als Punkte zu sehen. Nun kann man Interferenzen auch mit divergentem Licht zeigen, das erfordert aber eine spezielle größere Apparatur, wo das Licht bis H konvergent geführt wird und dann ab H mit Streuplatte divergent. Das könnte also versucht werden.

Dann ist noch Laue [12] zu zitieren, der bei unregelmäßig angeordneten Streuteilchen über ein Versagen der klassischen Wellentheorie berichtete. Er berichtete auch von radialen Fasern, die der Theorie nicht entsprachen, wie auch Nieke [6] über sternförmige Streufiguren. Laue [13] schrieb: „... denn Versuch und Theorie sind an dieser Stelle bisher aneinander vorübergegangen, ohne voneinander recht Kenntnis zu nehmen.“ Er stellt in dieser Arbeit die Differenzen gegeneinander ohne sie zu lösen.

Die sog. Wellenoptik versagt nach Laue bei Streufiguren, aber auch bei der Beugung bei Berücksichtigung der Newtonschen Beugungsexperimente (Nieke [6] und [14]), auch wenn für Spezialfälle Fresnel mit Hilfe des Fourier-Theorems Lösungen angeben konnte. Mit dem Fourier-Theorem kann man jede stückweise monotone Funktion näherungsweise darstellen, notfalls mit Hilfe eines nur wegen der Abweichung der Wellentheorie von experimentellen Ergebnissen eingeführten Phasensprunges. Laue [12] schrieb: „Wir sehen darin ein Versagen der klassischen Wellentheorie, die sich doch sonst bei allen Interferenz- und Beugungserscheinungen so vortrefflich bewährt hat.“ Hier berücksichtigte Laue nur die mathematisch formale Anwendung des Fourier-Theorems in Spezialfällen und nicht die Newtonschen Beugungsexperimente ([8] Buch III Beobachtung 5 und 10, und Nieke [14]). Hier wird Laue nirgends zitiert, genau wie Laue [15] in seinem Handbuchartikel über die Beugung Newtons Beugungsexperimente nicht zitierte.

Literatur

- [1] H. Nieke, Newtons Beugungsexperimente und ihre Weiterführung. Arbeit 5.
- [2] A. Fresnel, Oeuvre Complètes 1. Paris 1866;
Abhandlungen über die Beugung des Lichtes. Ostwalds Klassiker Nr. 215, Engelmann, Leipzig 1926.
- [3] W. M. Honig, In: Hrsg. W. M. Honig, D. W. Kraft, E. Panarella:
Quantum Uncertainties. Nato AST Series B Vol 162, Plenum Press NY, London 1987,
S. 97: Summary of de Martini's Paper.
- [4] H. Nieke, Exp. Techn. Phys. **31**. (1983) 53.
- [5] Wie [1], Arbeit 4.
- [6] Wie [1], Arbeit 2
- [7] Wie [1], Arbeit 3
- [8] I. Newton, Opticks, or a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light. 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.
- [9] L. de Broglie, La Physique quantique restera-t-elle indéterministe? Gauthier-Villars Paris 1953.
Phys. Bl. **19** (1953) 488, 541.
- [10] E. Mach, Die Prinzipien der physikalischen Optik. Barth, Leipzig 1921
- [11] R. W. Pohl, Optik. 8. Aufl. 1948 Springer, Berlin, Göttingen, Heidelberg S. 79 u. 107.

- [12] M. v. Laue, Ber. Dtsch. Phys. Ges. **19** (1917) 19.
- [13] M. v. Laue, Sitzungsber. Akad. Wiss. Berlin 1914 XLVII S. 1144.
- [14] Wie [1], Arbeit 1
- [15] M. v. Laue, In: Handbuch der Experimentalphysik Bd 18. Akad. Verlagsges. Leipzig 1928.