

Interferenzen am Doppelspalt

theoretisch nachvollzogen

R. Sydow, Niederfinow (Deutschland)
(2024)

abstrakt: Die Nutzung von Interferenzen zur Auswertung von Versuchen ist ein probates Mittel in der Experimentalphysik. Der angepriesene Vorteil ist die deutliche Veränderung der Interferenzstreifen bei schon kleinen Veränderungen der Eingangsgrößen.

Doch wie funktioniert das? Was sind die Interferenzstreifen? Was kann man aus der Änderung der Interferenzstreifen ablesen?

Ist es möglich, von einer beobachteten Änderung der Interferenzstreifen auf die für diese Interferenzen verantwortlichen Ursachen zu schließen.

Als Lösungsansatz für diese Fragen sei im Folgenden ein Modell entwickelt, welches von veränderbaren Ursachen für Interferenzen auf die sich ergebenden Spektren schließt. Aus der Visualisierung dieser Interferenzerscheinungen wird versucht, Rückschlüsse auf deren Ursachen zu finden.



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Einleitung	3
ein bisschen Historie	4
die Parameter	5
Interferenzmuster	7
Programmbeschreibung	8
Einfluss unterschiedlicher Parameter	13
Amplitude	14
Frequenz	14
Phase	15
Schlussfolgerungen	16
Literatur	17

Einleitung

Eigentlich sollte jedem Abiturienten klar sein, dass das Thema der Interferenzen erschöpfend in der Physik behandelt wurde. Er weiß, dass die Interferenzen die Überlagerung von Wellen sind und dass sie sehr schöne Bilder erzeugen.

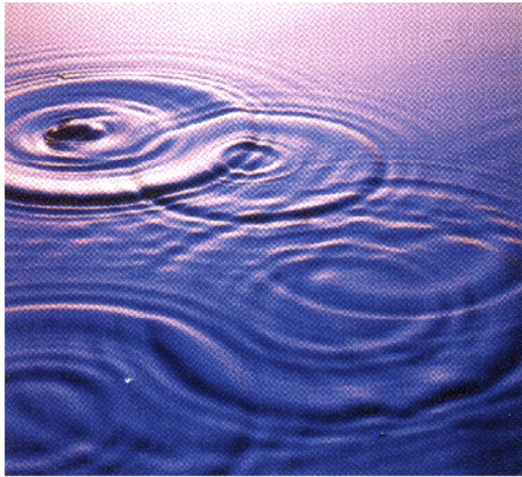


Bild 1: Wasserwellen überlagern sich als Interferenzerscheinung ([Sut] S. 337)

Dieses in jeder Pfütze zu beobachtende Wellenspiel ist aber zu ungeordnet, um daraus wissenschaftliche Schlüsse zu ziehen.

Um hier zu einer wissenschaftlichen Ordnung zu kommen, bedient man sich der Versuchseinrichtung „Doppelspalt“ (siehe Bild 2).

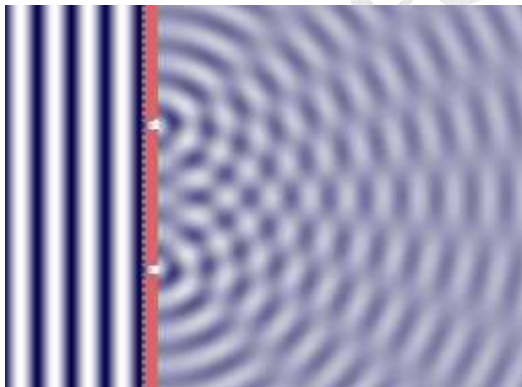


Bild 2: Interferenzen von Wasserwellen am Doppelspalt ([Zaw])

In der einschlägigen Literatur ([Dem], [Hoc], [Huy]¹, [Sut], usw.) sind die physikalischen Hintergründe dieses Experiments zu erfahren. Vom Ausbau des Experiments über die Berechnung des Überlagerungsmusters bis hin zur physikalischen Auswertung und Nutzung ist in der Literatur alles zu finden.

¹ im Original schreibt sich ‚Huyhgens‘ noch mit ‚h‘. In der modernen Literatur wird das ‚h‘ oft weggelassen

Quellenangabe: Sydow, R. Interferenzen am Doppelspalt, theoretisch nachvollzogen, Niederfinow 27.03.2024
<http://rolfswelt.de/Physik/#optik-interferenz>

Revision: 1.0.0.1 vom 27.03.2024

copyright ©: alle Rechte vorbehalten, 2024, Rolf Sydow



Wozu ist es erforderlich, sich des Themas erneut anzunehmen? Welche Fragen sind noch offen und in der Literatur nicht ausreichend behandelt? Ist es nur die schlichte Neugierde oder hat das Thema ‚Doppelspalt‘ noch Überraschungen übrig?

Schaut man sich beispielsweise das Bild 2 an, in welchem die Interferenzen von Wasserwellen am Doppelspalt dargestellt sind, fragt man sich, ob dieses Bild auf die Interferenzen von Licht in gleicher Weise anwendbar ist.

Abgesehen davon, dass das sichtbare Licht mit seiner Wellenlänge bei etwa 400 bis 900 nm liegt und somit einzelne Wellenzüge mit bloßem Auge nicht auszumachen sein können, würde man das an einem vorbeileuchtende Licht gar nicht wahrnehmen können.

Während die Wasserwelle an das Medium ‚Wasser‘ gebunden ist und mittels Lichtreflexionen von der Oberfläche erfasst werden kann, ist das Licht als den Raum ausfüllendes Gebilde nicht zu detektieren, wenn es nicht direkt zum Auge des Experimentators gelangt.

Insofern kann der Versuch am Doppelspalt sinnvoll nur mittels Modellierung nachempfunden werden.

ein bisschen Historie

Wenn Huyghens aus seinen Überlegungen ableitete, dass „[...] man sich die allmähliche Ausbreitung des Lichts durch kugelförmige Wellen vorstellen kann [...]“ ([Huy] S. 21), dann haftet dieser Gedanke auch der heutigen Wissenschaft teilweise noch an. Zwar wird dem Licht heutzutage ein Welle-Teilchen-Dualismus zugestanden, doch dieser Dualismus wird separiert, wenn es um die Beschreibung von den jeweiligen Eigenschaften des Lichts geht. So deuten die Interferenzerscheinungen des Lichts unzweifelhaft auf den Wellencharakter des Lichts hin (vgl. [Hoc] S. 369).

Mit diesem Wellencharakter des Lichts verbindet sich von Anfang an die Vorstellung, dass sich das Licht nur in einem Medium ausbreiten kann. Dieses Medium sollte ein den Raum erfüllender Äther sein. Dem Licht käme somit die Rolle der Schwingung einzelner Ätherteilchen zu. Über eine zu definierende Wechselwirkung dieser Ätherteilchen würde die Ausbreitung des Lichts ermöglicht. Die Parallele zur Ausbreitung des Schalls in der Luft wird von Huyghens angesprochen (siehe [Huy] S. 11) und doch arbeitet er dann heraus, dass das Medium der Lichtausbreitung von dem, in welchem sich das Licht ausbreitet, verschieden sein muss.

Mit seinem Werk ([Max]) schuf Maxwell die Theorie von der elektromagnetischen Welle des Lichts. Es handelt sich damit auch bei Maxwell um eine Welle des Lichts. Diese ist aber nicht mehr auf die Ausbreitung mittel Trägermedium angewiesen. Doch die Eigenschaften einer Welle bleiben dem Licht erhalten.

Eine dieser Eigenschaften ist die Überlagerung und die Ausbildung von Interferenzerscheinungen.

die Parameter

In diesem rechenstechnisch vollzogenen Versuch wird die Überlagerung von Lichtwellen im Doppelspaltexperiment simuliert. Dabei wird mit dem Doppelspalt erreicht, dass sich durch diese Spalten fallendes Licht in kreisförmigen Wellen vom jeweiligen Spalt ausbreitet (vgl. Bild 2). Damit findet dann eine bestimmte Überlagerung dieser beiden Wellen statt. Diese Überlagerung von Wellen entspricht der einfachen Addition der Elongationen dieser Wellen an einem Ort zu einem Zeitpunkt.

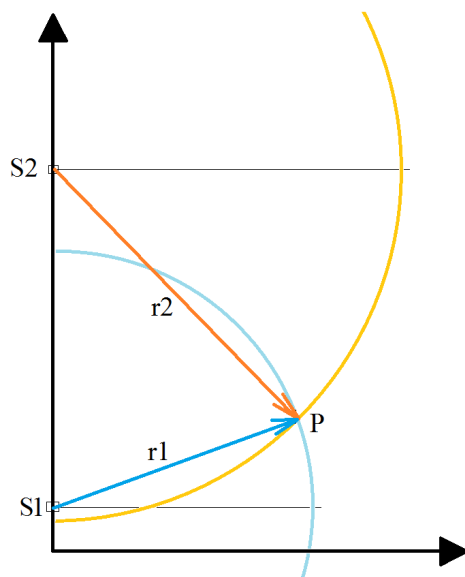


Bild 3: die vektorielle Überlagerung der Wellen am Doppelspalt

Breiten sich zwei Wellen von den Orten S1 und S2 kreisförmig aus und überlagern sie sich im Punkt P, dann ist die summierte Elongation der Überlagerung beider Wellen der Summe der jeweiligen Elongation der einzelnen Wellen im Abstand r1 und r2.

Der Vorteil des Doppelspaltexperiments besteht darin, dass man die Effekte der sich räumlich ausbreitenden Wellen als Kugeln durch die lineare Form der Spalten in flächenhafte Effekte überführen kann.

Somit ergibt sich die Elongation der überlagerten Wellen zu:

$$y = A_1 \cdot \sin(\omega_1 t_1 - \varphi_1) + A_2 \cdot \sin(\omega_2 t_2 - \varphi_2) \quad \text{Gl. 1}$$

In dieser Gleichung Gl. 1 sind zur Beschreibung jeder aus dem jeweiligen Spalt kommenden Welle 4 Parameter erforderlich:

- A ... Amplitude
- ω ... Kreisfrequenz ($\omega = 2\pi f$)
- t ... Laufzeit der Welle zum Radius r mit $r = ct$ (c = Lichtgeschwindigkeit)

- φ ... Phase der Welle beim Verlassen des Spalts

Über diese hohe Anzahl von Parametern scheint es schlecht möglich, ein Interferenzmuster aus der Gleichung abzuleiten.

Die Anzahl der Einflüsse auf die Interferenzen des Lichts ist mit diesen Parametern noch immer nicht beschreibbar. Während sich die Wasserwellen scheinbar unverändert ausbreiten (vgl. Bild 2), können sich bei der Lichtausbreitung noch solche Einflüsse einer Gerichtetheit und eines entfernungsabhängigen Intensitätsabfalls bemerkbar machen.



Bild 4: Einfluss von Parametern auf die Ausbildung einer sich ausbreitenden Lichtwelle

Diese im Bild 4 dargestellten Lichtwellen sind als Oberflächenwellen gezeichnet. Dabei bedeutet der intensivste Farbton die Amplitude, während schwarz gerade den Nulldurchgang der Schwingung bedeutet. Die Bilder sind somit als Absolut-Bilder aufzufassen.

Wollte man positive und negative Werte im Bild darstellen, ist es erforderlich mit einer weiteren Farbe zu operieren.

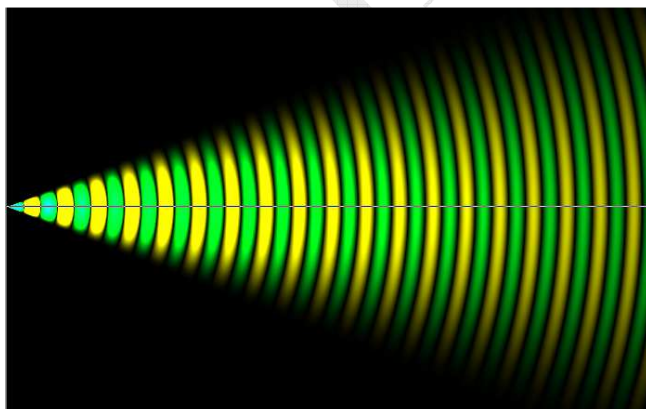


Bild 5: Darstellung eines gerichteten Lichtstrahls mit abfallender Intensität als HF-Bild dargestellt. Eine Mittellinie als Symmetrieachse ist eingezeichnet.

Solche Lichterscheinungen werden im Folgenden angewendet, um Interferenzen zu erzeugen. Wesentlich für die Ausbildung von solchen Interferenzen am Doppelspalt ist der Abstand der Spalten zueinander.

Interferenzmuster

Die Überlagerung von den im Bild 5 gezeigten Lichtbündeln führt zu Bereichen der Verstärkung und der Auslöschung der Lichtintensität.

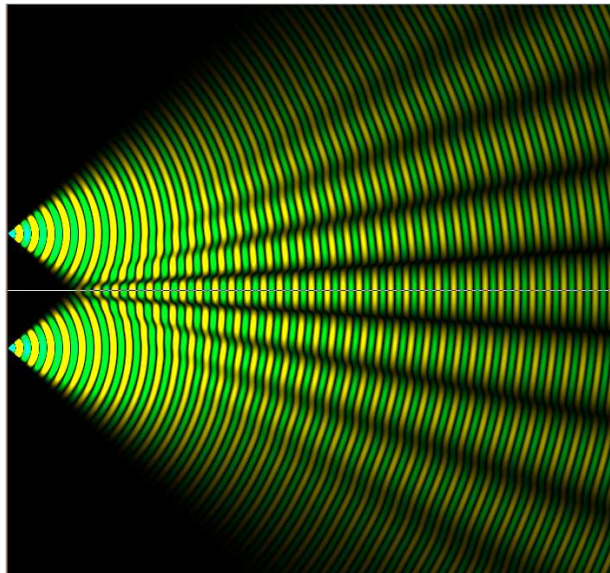


Bild 6: Interferenzerscheinung mit vergrößertem Ausschnitt

Das Bild 6 zeigt eine Überlagerung zweier Lichtbündel gleicher Intensität, Frequenz und Phase. Die Zweifarbigkeit verdeutlicht die Schwingung des Lichts mit positiven (grün) und negativen (gelb) Werten. Schwarze Bereiche resultieren aus dem Nulldurchgang der Schwingung.

Solche Darstellungen von Interferenzen (siehe Bild 6) sind in der Praxis leider nicht zu visualisieren. Selbst wenn es durch trickreiche Anordnungen (beispielsweise mittels Nebel) gelingen sollte, dunkle von hellen Stellen zu differenzieren, wäre diese Anordnung nicht praktikabel für die Vermessung von Interferenzmustern in Experimenten.

Für diesen Fall, dass man Interferenzmuster nutzen möchte, um die Eigenschaften des Lichts zu ergründen, wird ein Schnitt durch dieses Interferenzmuster erzeugt. Dieser Schnitt sollte senkrecht zur Mittellinie stehen und durch eine Platte realisiert werden.

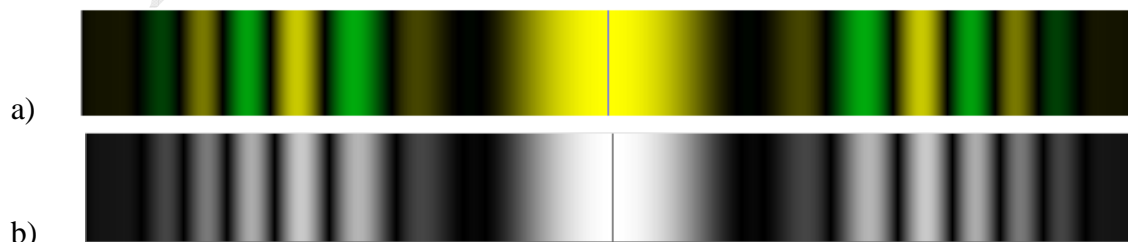


Bild 7: Interferenzen vom rechten Rand des Bildes 6

Im Bild 7 ist im oberen Teil a das Interferenzmuster farbig dargestellt. Dabei bedeutet grün wiederum die positiven und gelb die negativen Ausschläge der Schwingungen des Lichts. Da aber das Auge lediglich die Intensität des Lichts wahrnimmt und nicht zwischen positiver und negativer Intensität unterscheiden kann, ist es weniger irritierend, solche Interferenzmuster in schwarz/weiß-Darstellung auszuführen (siehe Bild 7 Teil b).

Wenn das Interferenzmuster (Bild 7) noch die Frage offen lässt, wie sich bei ständig wechselnder Phase an der Platte ein stehendes Muster von Interferenzstreifen ausbilden kann, erklärt sich das aus dem Bild 6. Egal wie sich die Schwingungen des Lichts durch Phasenbewegung fortbewegen, so werden dessen Nulldurchgänge (schwarz) immer an derselben Stelle der Platte erscheinen. Die Struktur an der Platte ist konstant. Somit ist erkennbar, dass das Interferenzmuster (Bild 7) gut auszuwerten ist, es aber nicht alle möglichen Informationen preisgibt.

Programmbeschreibung

Zur Darstellung der Interferenzen und der Interferenzmuster dient das Programm „Doppelspalt“.

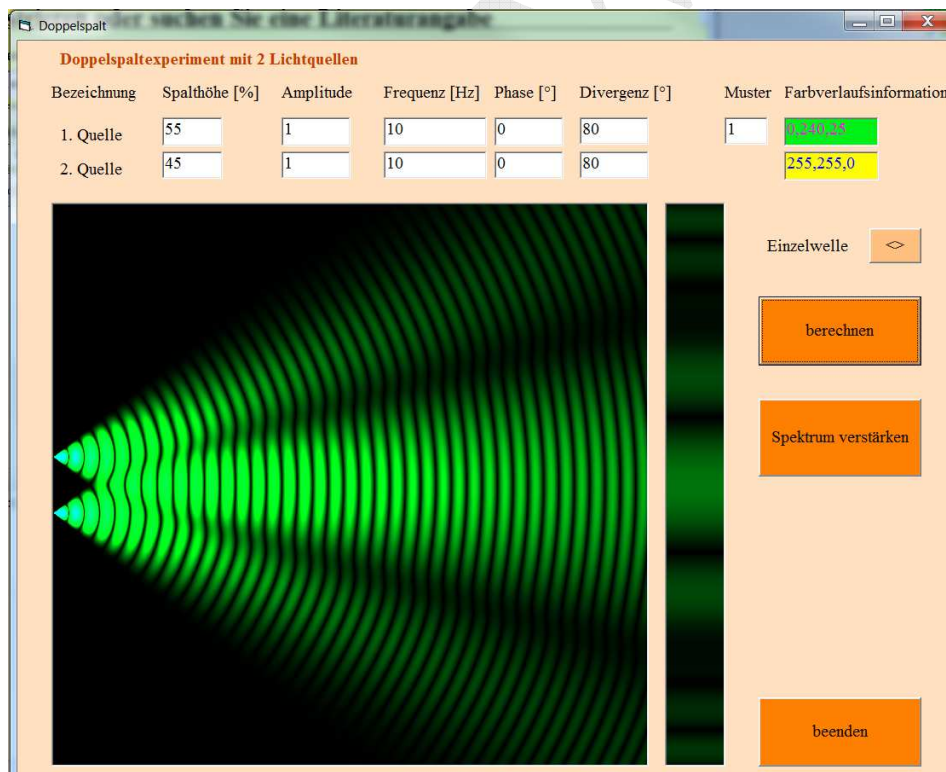


Bild 8: Programmoberfläche „Doppelspalt“

Im oberen Teil der Programmoberfläche werden die zur Darstellung erforderlichen Parameter eingegeben. Da es sich beim Doppelspaltexperiment um zwei lichtdurchlässige Spalten handelt, können Parameter für die Quellen zweier Lichtbündel eingegeben werden.

Es werden die Stellen der Spalten am linken Bildrand in Prozent der Bildhöhe angegeben. Voreingestellt sind hier die Werte 55% für den unteren Spalt und 45% für den oberen. Der Koordinatenursprung liegt somit in der oberen, linken Ecke des Bildes.

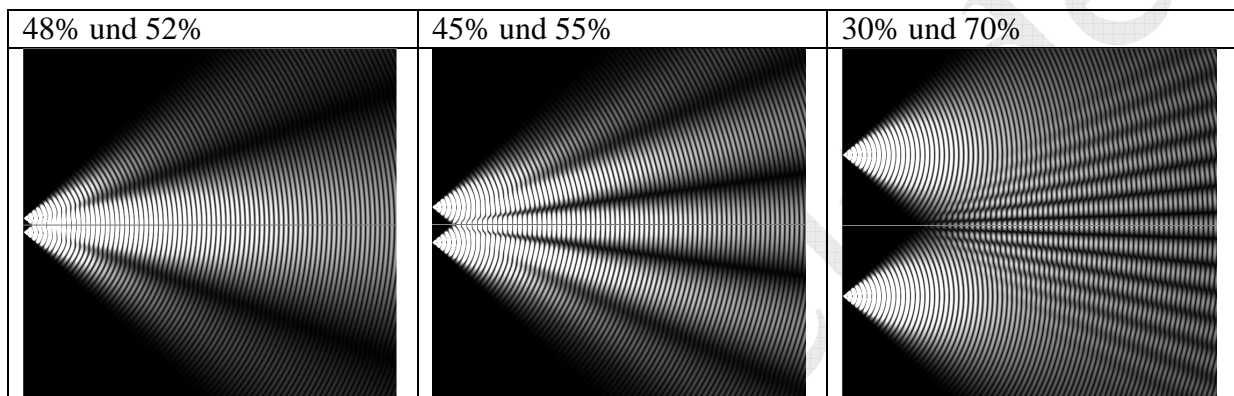


Bild 9: Interferenzen bei unterschiedlichen Spaltabständen

Jedem Lichtbündel kann eine Amplitude zugeordnet werden. Die Amplitude 0 bedeutet das Ausblenden des Lichts. Aber üblicherweise sollte die Amplitude für beide Quellen identisch sein. Es ist kaum zu erwarten, dass im Experiment auf die Spalten Licht unterschiedlicher Intensität gesendet wird.

Die Frequenz des simulierten Lichts ist lediglich eine fiktive Größe. Da sich die Frequenz des sichtbaren Lichts um die $5 \cdot 10^{14}$ Hz bewegt, ist damit rechentechnisch nichts anzufangen.

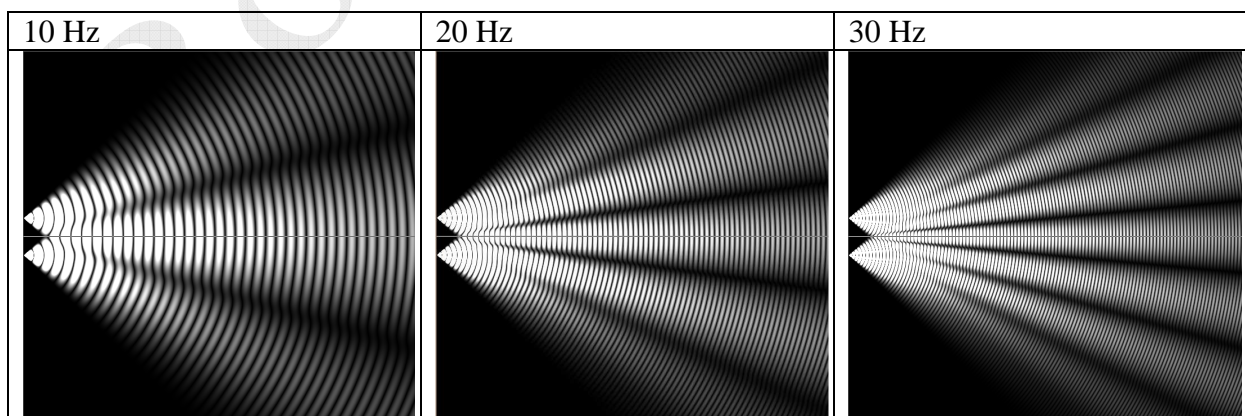


Bild 10: Beispiele für Interferenzen unterschiedlicher Frequenzen der Lichtbündel

Insofern sind Frequenzen bis 100 Hz sinnvoll anwendbar. Negative Frequenzen bewirken einen Phasensprung. Zur eindeutigen Identifizierung der Interferenzmuster sollten solche Phasensprünge aber durch die Eingabe einer um 180° versetzten Phase erzeugt werden.

Die Phase ist eine Verschiebung der Schwingung. Werden die Phasen beider Lichtbündel in gleicher Weise verändert, wird sich am Interferenzbild nichts verändern.

Will man das Lichtbündel etwas mehr oder weniger fokussieren, lässt sich das durch Änderung der Divergenz erreichen.

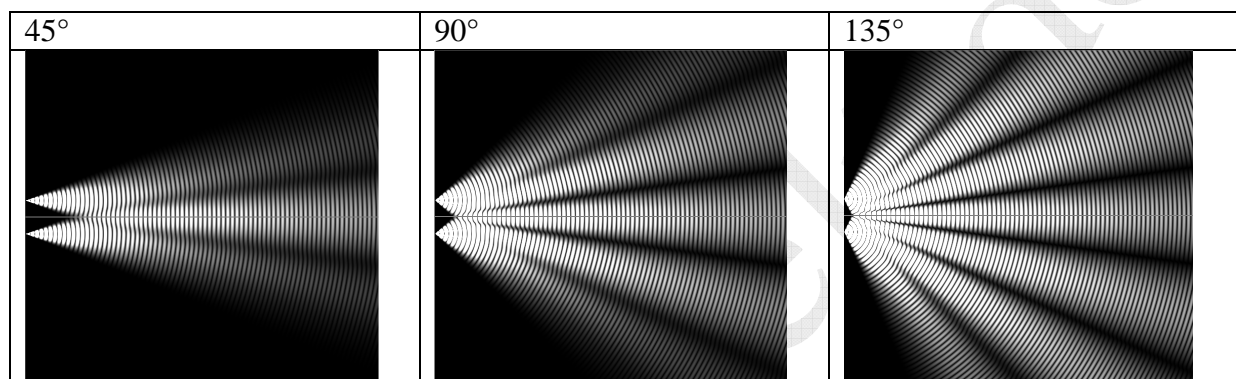


Bild 11: Beispiele für Interferenzen von Lichtbündeln unterschiedlicher Divergenz

Bei der Benutzung von Laserstrahlen ergeben sich derartige Divergenzen nach einer Gaußverteilung (vgl. [Sci] S. 22). Aus Gründen der Vereinfachung ist hier im Programm ein seitlicher Abfall der Intensität des Lichtbündels nach der Kosinus-Funktion angewendet worden. Dieser Vereinfachung der Divergenz sollte sich aber nicht auf die Interferenzmuster in ihrer Form auswirken. Wie in Bild 11 zu erkennen ist, bewirkt die Divergenz lediglich die seitliche Ausbreitung der interferierenden Lichtbündel.

Die Eingabe des Divergenzwinkels erfolgt für die Divergenz des kompletten Bündels. Das bedeutet, dass der halbe Winkel nach oben und die andere Hälfte nach unten zur Stahlachse angetragen wird.

Es ist möglich, die Interferenzen in unterschiedlichen Darstellungsformen ausführen zu lassen. Zur Auswahl der gewünschten Musters steht die Eingabe „Muster“ zur Verfügung. Es sind drei Muster im Programm integriert:

Muster = 1: es wird mittels der ersten Farbverlaufsinformationen eine Farbachse zwischen dem Nullpunkt (schwarz) und der oberen Farbverlaufsinformation definiert. Die an einem Punkt des Bildes verwendete Farbe ergibt sich dann aus einer proportionalen Zuordnung der Lichtintensität der Interferenz zu dieser Farbachse.

Muster 2: es werden wie beim Muster 1 zwei Farbachsen definiert. Die proportionale Zuordnung der Lichtintensitäten an einem Punkt erfolgt für positive Werte der Intensität zur oberen und für negative Werte der Intensität zur unteren Farbachse.

Muster 3: die Farbachse entspricht der Verbindung zwischen schwarz und weiß. Damit ergibt sich für die Zuordnung der Lichtintensitäten eine Grauskala.

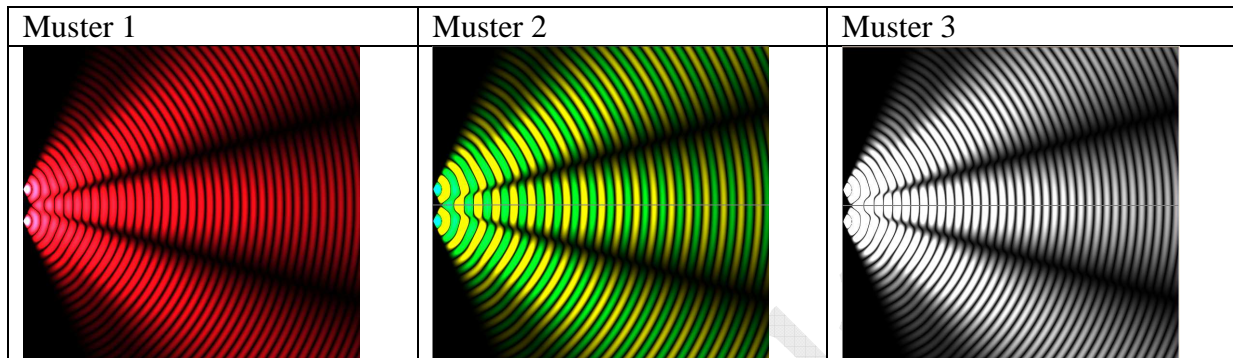


Bild 12: verschieden Farbdarstellungen eines Interferenzmusters

Die Angabe der Farben in der Farbverlaufsinformation hat nach dem Prinzip (rot, grün, blau) zu erfolgen. Die Werte der Farben dürfen zwischen 0 und 255 liegen. Sie sind natürliche Zahlen.

Es ist zu beachten, dass bei den Farbangaben ein Komma als Trennzeichen zu verwenden ist, während in allen anderen Eingaben nur ein Dezimalpunkt erlaubt ist.

Die oberen Bilder zeigen durchgängig die Interferenzen von Lichtbündeln ein und derselben Phase. Das Programm rechnet lediglich die Überlagerung von zwei Sinuskurven. Es muss aber unterstellt werden, dass einerseits die Sinuskurven mit so hoher Frequenz schwingen, dass es weder der Rechentechnik noch dem menschlichen Auge möglich ist, solche in den Bildern dargestellten Streifenmuster zu realisieren. Andererseits ist zu unterstellen, dass die durch den Spalt geschickten Lichtwellen mit sehr unterschiedlichen Phasen am Ort des Spalts behaftet sind.

Deshalb ist es mit dem Button „<“ möglich, entweder eine Einzelwelle durch den Spalt zu schicken oder eine Vermittlung von Welle verschiedener Phase interferieren zu lassen (siehe Bild 13).

Im Bild 13 sind die beiden Möglichkeiten, ein Lichtbündel darzustellen, gegenübergestellt. Es fällt auf, dass sich an der Aussage des Bildes durch die unterschiedliche Einstellung nichts geändert hat. Lediglich die Glättung des Musters ist bei der Nutzung der Hüllkurve ausgeprägter. Dass dort aber auch noch geringe Streifen erkennbar sind, liegt an der Verwendung von nur 10 unterschiedlichen Phasen, die übereinander gelegt wurden. Wollte

man hier das Bild noch verbessern, wäre diese Anzahl verwendeter Schwingungen unterschiedlicher Phase noch zu erhöhen. Das führt dann zu längeren Rechenzeiten.

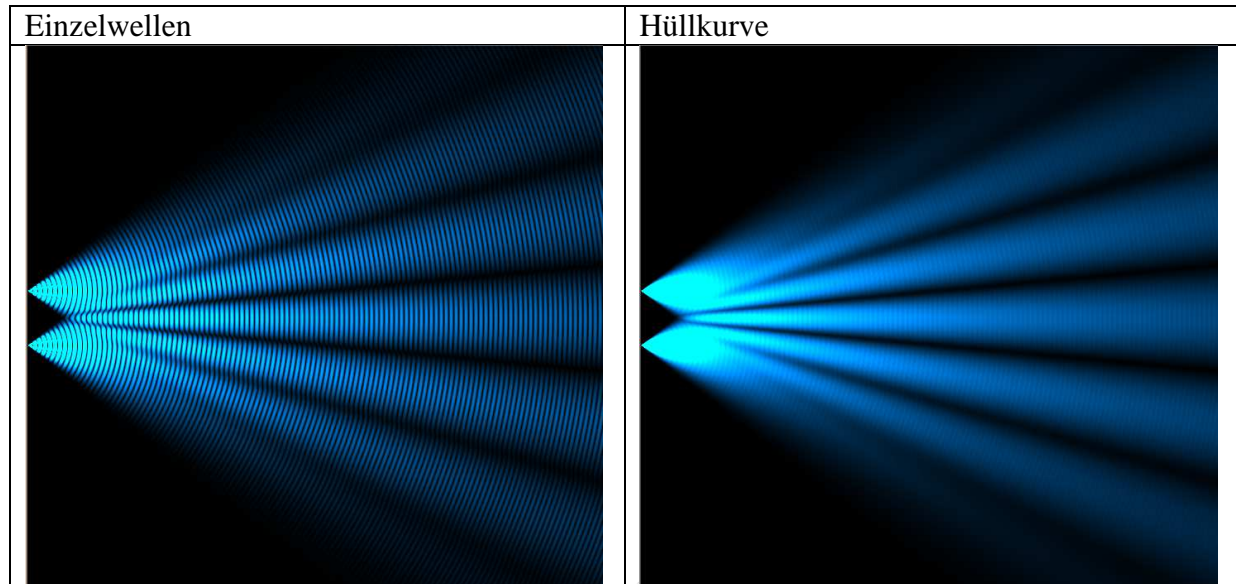


Bild 13: Darstellung des Unterschieds zwischen der Darstellung „Einzelwelle“ und „Hüllkurve“

Die Verwendung der Hüllkurve führt bei der Auswertung von Interferenzmustern zu übersichtlicheren Darstellungen.

Durch keinen Parameter beeinflussbar ist der Abfall der Intensität der Lichtbündel mit zunehmender Entfernung von der Lichtquelle (dem Spalt). Dieser Abfall wurde im Programm fest hinterlegt.

Wenn nach praktischen Überlegungen hier von dem Abstandsquadratgesetz auszugehen sein muss, wurde im Programm lediglich der Abstand in linearer Größe zur Minderung der Intensität herangezogen. So konnte erreicht werden, dass die zur Auswertung erforderlichen Interferenzmuster nicht so schwach ausfallen.

Durch einen Klick auf den Button „berechnen“ wird die Erzeugung zweier Bilder ausgeführt. Das linke (größere) Bild zeigt die Interferenzen zwei Lichtbündeln mit den vorher eingegeben Parametern.

Zusätzlich wird noch ein Interferenzmuster generiert, das sich am rechten Rand des Bildes einstellen würde, wenn dort eine Platte installiert wäre. Dieses Interferenzmuster ist in einem schmalen Bild rechts zu sehen.

Wenn eine Berechnung durchgeführt wurde und das Interferenzmuster erzeugt wurde, wird die Option „Spektrum verstärken“ freigegeben. Mittels dieser Option kann das

Interferenzmuster kontrastiert werden. Sind also die Interferenzstreifen nicht gut zu erkennen, werden sie nach dem Drücken dieses Buttons besser sichtbar.

Der Button „beenden“ beendet das Programm.

Es ist zu beachten, dass das Programm in VB6 geschrieben wurde. Damit ist es nicht kompiliert und kann nur mittels eines Interpreters genutzt werden. Wenn der Interpreter nicht vorhanden ist, muss er aus dem Internet gezogen werden. Dazu ist der VB Runtime 6.0 Modul downzuladen.

Einfluss unterschiedlicher Parameter

In Folgenden wird untersucht, welchen Einfluss die unterschiedlichen Parameter auf die Ausbildung des Interferenzmusters haben. Wenn in den vorangegangenen Erläuterungen Die Parameter der Lichtbündelquellen für beide Lichtbündel identisch waren, so wird nun untersucht, wie sich Unterschiede der Lichtbündel auf das gemeinsame Interferenzmuster auswirken.

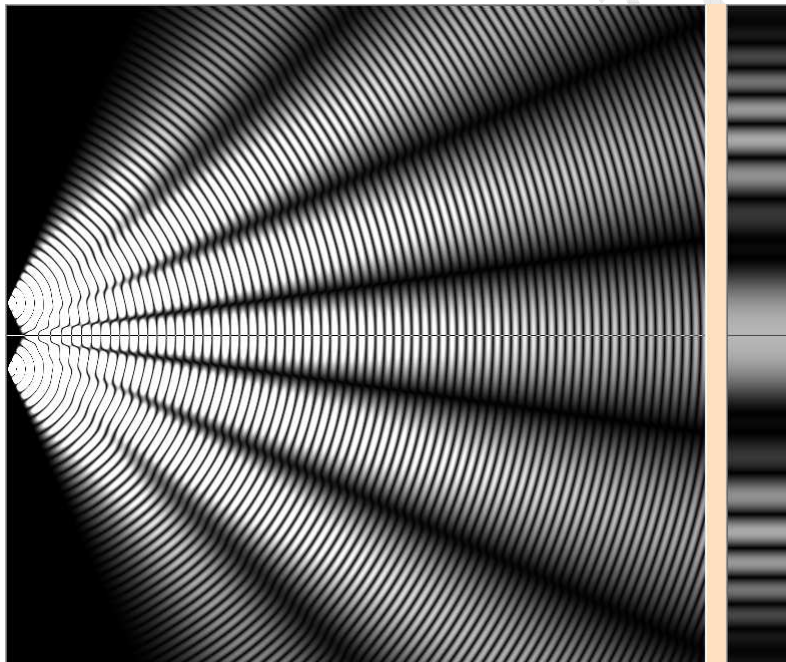


Bild 14: Darstellung von Interferenzen zweier Lichtbündel mit zugehörigem Interferenzmuster

Vorab ist aber noch zu den Bildern zu bemerken, dass das Interferenzmuster (rechte Seite im Bild 14) die einzelnen Keulen der Interferenzen in Interferenzstreifen auflöst. Das ist der Streifenstruktur dieser Keulen geschuldet. Günstiger ist es, im Folgenden nur noch Bilder mit der Hüllkurven-Einstellung zu generieren.

Amplitude

Es wird nun gezeigt, welche Auswirkungen die Interferenz von Licht gleicher Frequenz und Phase aber unterschiedlicher Amplitude hat.

Die im Programm verwendeten Parameter sind:

Spalthöhe: 55% und 45%

Frequenz: 30 Hz

Phase: 0°

Divergenz: 80°







1:1		
1:5		
1:10		

Bild 15: Interferenzen bei unterschiedlicher Amplitude der durch die Spalten kommenden Lichtbündel.

Es ist festzustellen, dass mit unterschiedlich werdender Amplitude die Interferenzstreifen mehr und mehr verwischen. Die Intensität wandert in die Richtung des Lichtbündels höherer Amplitude ab.

Von einer Verschiebung der Interferenzstreifen kann nicht die Rede sein.

Frequenz





Nun wird der Versuch mit unterschiedlichen Frequenzen durchgeführt.

Spalthöhe: 55% und 45%

Amplitude: 1 : 1

Phase: 0°

Divergenz: 80°

30 : 30 Hz		
30:30,1 Hz		

30:30,2 Hz		
---------------	---	--

Bild 16: Interferenzen bei unterschiedlicher Frequenzen der durch die Spalten kommenden Lichtbündel.

Es ist ein deutliches Abdriften der Interferenzstreifen nach links zu erkennen. Würden die Frequenzen getauscht, sodass das Licht höherer Frequenz durch den anderen Spalt fiel, würde die Drift der Interferenzstreifen in die andere Richtung gehen.

Interessant ist schon, dass eine relativ kleine Veränderung der Frequenz eine merkliche Verschiebung des Interferenzmusters erzeugt.

Phase

Letztlich ist noch der Einfluss einer Phasenverschiebung eines Lichtbündels zu untersuchen.

Spalthöhe: 55% und 45%
Amplitude: 1 : 1
Frequenz: 30 Hz
Divergenz: 80°

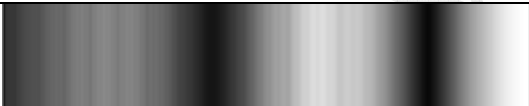





0 : 0		
60 : 0		
120 : 0		

Bild 17: Interferenzen bei unterschiedlichen Phasen der durch die Spalten kommenden Lichtbündel.

Auch hier ist eine deutliche Drift des Interferenzmusters zu verzeichnen. Bemerkenswert ist, dass es hier das Lichtbündel aus dem anderen Spalt ist (gegenüber der Frequenz), das erhöht werden muss, um eine Drift nach links zu erreichen.

Eine kombinierte Wirkung aus Frequenzverschiebung und Phasenverschiebung, die sich gegenseitig kompensieren, ist denkbar.

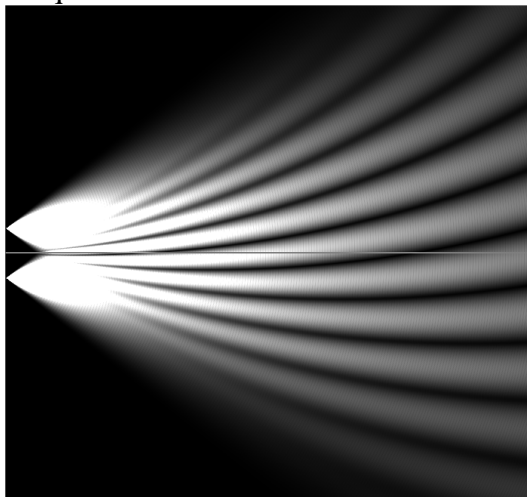
Schlussfolgerungen

Es wurden in dieser Arbeit auf rein theoretischem Wege die Ursachen für die Interferenzerscheinungen am Doppelspalt untersucht. Dabei kristallisierten sich Frequenz- und Phasendifferenzen als mögliche Ursachen für Verschiebungen des Interferenzmusters heraus.

Ergebnis der Untersuchung ist, dass es nur mit der Kenntnis eines Interferenzmusters nicht möglich ist, eindeutig auf die zutreffende Ursache für eine Verschiebung des Musters zu schließen.

Eine Möglichkeit der Unterscheidung der beiden Ursachen wäre die Analyse der Interferenzmuster als Funktion des Abstands der Fotoplatte, auf welcher das Interferenzmuster zu sehen ist.

Frequenzdifferenz



Phasendifferenz

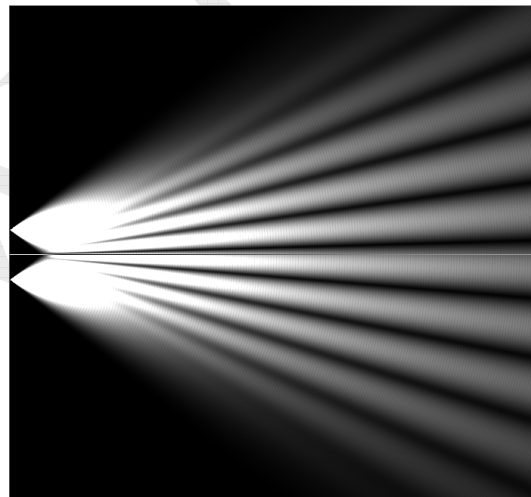


Bild 18: Interferenzen der unterschiedlichen Ursachen

Ergibt sich eine Abhängigkeit der Verschiebung des Interferenzmusters die nicht linear ist, dann kann das Muster nur von einem Frequenzunterschied kommen (siehe Bild 18 links). Ist diese Abhängigkeit linear, deutet das auf eine durch eine Phasenverschiebung verursachte Drift des Interferenzmusters hin.

In übrigen kann eine Phasenverschiebung eine Verschiebung der Interferenzstreifen nur vom Maximum bis zum nächsten Minimum erreichen. Eine frequenzinduzierte Verschiebung der Interferenzstreifen kann auch darüber hinausgehen.



Literatur

- [Dem] Demtröder, W.: Experimentalphysik 2, Elektrizität und Optik
Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH Berlin 2. Aufl. (2002) cited 08.12.2022
<https://vdoc.pub/documents/experimentalphysik2-elektrizitt-und-optik-300fcfcc56e0>
- [Hoc] Hoche, D. et al.: Physik Abitur, Duden - Basiswissen Schule
PAETEC Verlag für Bildungsmedien Berlin 2003
www.schuelerlexikon.de
- [Huy] Huyghens, C.; Lommel, E. (Hsgb.): Abhandlung über das Licht
Verlag von Wilhelm Engelmann Leipzig (1678;1890) load 28.04.2016
<https://archive.org/details/abhandlungberda00mewegoog>
- [Max] Maxwell, J. C.: a Treatise on Electricity and Magnetism
MacMillan and Co London (England) (1873) load 09.02.2022
<https://www.aproged.pt/biblioteca/MaxwellII.pdf>
- [Sci] Schied, A.: Helium-Neon-Ringlaser-Gyroskop
Universität Ulm Abteilung QuantenInformationsVerarbeitung Ulm (28.09.2006) load 08.12.2008
<http://www.uni-ulm.de/qiv/pub/LehramtAnnemarieSchied2006.pdf>
- [Sut] Suter, D.: Schwingungen
Universität Dortmund Dortmund (SS 03) load 04.01.2013
http://e3.physik.uni-dortmund.de/~suter/Vorlesung/Physik_B3_SS03/Physik_B3.html
- [Zaw] Zawischa, D.: Beugung und Interferenz
Institut für Theoretische Physik, Uni Hannover Hannover (10/2011) load 17.01.2016
<https://www.itp.uni-hannover.de/~zawischa/ITP/beugg.htmlgoogle>