

Wellenoptik

Ein Phänomen, für das sich die Physik besonders interessiert, sind Interferenzen von Wellen. Sie zu erklären und für die Messtechnik zu nutzen, nimmt eine herausragende Rolle in der Physikgeschichte der letzten zwei Jahrhunderte ein.

Insbesondere als Instrument für den Nachweis von Welleneigenschaften wurde mit Hilfe der Interferenz Historisches erkannt. Gleich zweimal lieferten entsprechende Versuchsergebnisse Hinweise zur Entwicklung neuer Theorien des Lichts.

7

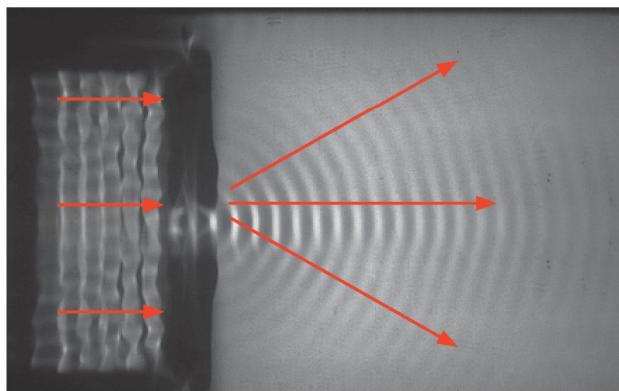
Das können Sie in diesem Kapitel erreichen:

- Sie lernen die Interferenz als Werkzeug zur Wellenlängenbestimmung kennen.
- Sie untersuchen das sichtbare Licht hinsichtlich seiner physikalischen Struktur als Welle.
- Sie setzen das optische Gitter als Hilfsmittel zur Untersuchung von Spektren ein.
- Sie erklären optische und akustische Interferenzphänomene z.B. an einer CD.
- Sie lernen technische Anwendungen wie das Michelson-Interferometer kennen.
- Sie untersuchen Strukturen, die erst mit Hilfe von Wellen erfassbar sind.
- Sie betrachten alle bekannten Modelle des Lichts hinsichtlich ihrer Gültigkeit.

7.2 Interferenz am Doppelspalt



B1 Ausbreitung einer Wellenfront hinter einer Öffnung



B2 Elementarwellen hinter einer schmalen Öffnung

Beugung bei Wasserwellen – Stellt man einer geraden Wellenfront ein Hindernis mit einer schmalen Lücke in den Weg, so erwartet man, dass die Wellen nur durch diese Lücke weiter fortschreiten können und ansonsten aufgehalten werden. Die Meereswellen in Bild **B1** laufen jedoch hinter der Öffnung in der Steinaufschüttung radial auseinander. Vor der Öffnung hatten sie noch eine einheitliche Richtung. In der Wellenwanne kann man diese Situation mit Hilfe eines geraden Blechstreifens als Erreger, der gerade Wellenfronten erzeugt, und einer schmalen Blende nachbilden (Bild **B2**). Hinter der Blende breitete sich eine Kreiswelle aus, deren Zentrum in der Spaltöffnung liegt.

Weil in der Öffnung eine Richtungsänderung stattfindet, spricht man von **Beugung**: Die Wellen werden an der Blendenöffnung gebogen. Wie die Kreiswelle entsteht, kann man sich so vorstellen: In der Blendenöffnung schwingt das von der ankommenden Welle erfasste Wasser genau so auf und ab wie ein dort periodisch eintauchender Stift. Die Öffnung wird dadurch zum Zentrum einer Kreiswelle. Die von der schmalen Öffnung ausgehende Kreiswelle wird in der Physik als **Elementarwelle** bezeichnet.

Beugung bei Mikrowellen – Die Beugung elektromagnetischer Wellen lässt sich gut bei Wellenlängen von einigen Zentimetern (z. B. Mikrowellen) untersuchen. Obwohl der Empfänger in Versuch **V1** von den Mikrowellen nicht erreicht wird (Versuch **V1a**) und durch die Metallplatte dann erst recht „im Schatten“ steht, registriert der Empfangsdipol weit in den Schattenraum hinein ein Signal (Versuch **V1b**). Die kleine Blendenöffnung wirkt wie ein dort aufgestellter allseitig strahlender Sender; sie wird zum Zentrum einer Elementarwelle, die sich rechts von der Blende rundherum ausbreitet.

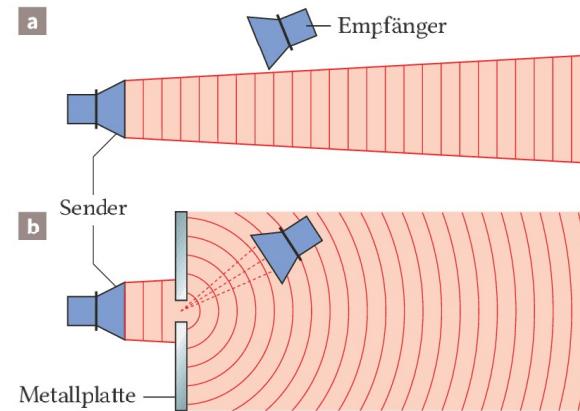
Das Huygens-Prinzip – Die Beugung, also die Bildung von Elementarwellen an schmalen Öffnungen, lässt sich bei allen Wellenarten beobachten. Der niederländische Physiker Christian HUYGENS (1629–1695) hat diese im Experiment beobachtete Eigenschaft von Wellen gedanklich noch weiterentwickelt: Man löst sich von der Blendenöffnung und denkt sich alle Punkte einer Wellenfront als mögliche Ausgangspunkte von Elementarwellen.

! Merksatz

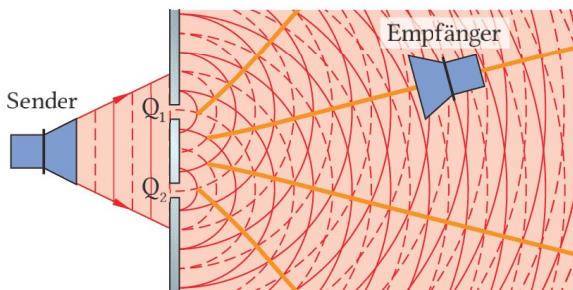
Für alle Wellenarten gilt das **Huygens-Prinzip**: Jede Stelle einer Wellenfront kann als Ausgangspunkt einer Elementarwelle aufgefasst werden.

V1 Beugung bei Mikrowellen

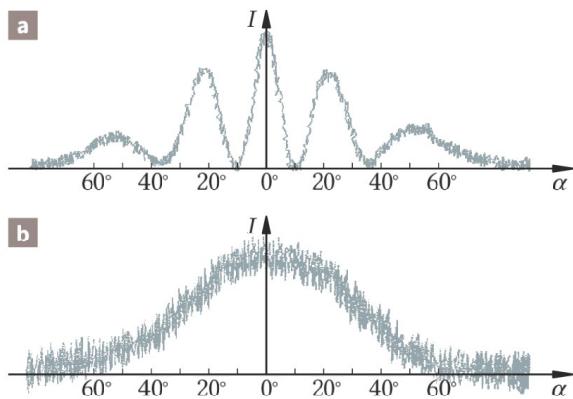
- Der Empfänger wird so aufgestellt, dass der Empfangsdipol vom Mikrowellenbündel des Senders nicht getroffen wird.
- Bringt man eine Blende mit einer Öffnung von etwa 2 cm Breite in den Weg des Bündels, kann der Empfänger ein Signal aufzeichnen.



V2 Doppelspalt mit Mikrowellen



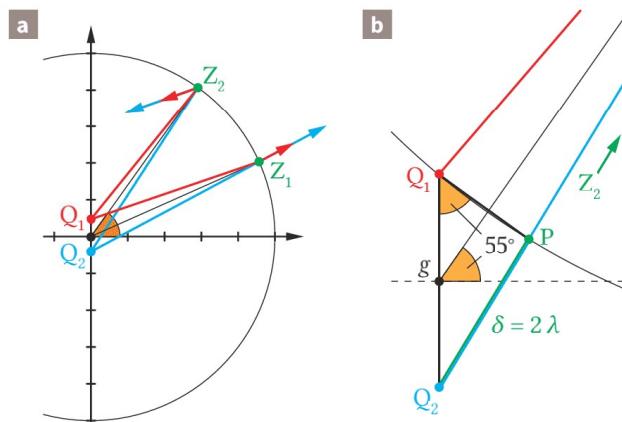
Mikrowellen treffen auf einen Doppelspalt, der aus zwei Metallplatten und einem mittleren Metallstreifen besteht (Breite des Streifens 6 cm, Spaltbreite 2,5 cm, Spaltmittendenabstand 8,5 cm).



B3 Signalstärke des Empfängers a) beim Doppelspalt; b) wenn einer der Spalte zugehalten wird.

Doppelspalt mit Wasserwellen – Bei genauerer Betrachtung sieht man in Bild **B1** zwei weitere Kreiswellsysteme, deren Zentren nicht mehr im Bild sind. In der Wellenwanne kann man in gleicher Weise aus der Welle eines realen Senders zwei kohärente, also interferenzfähige Quellen erzeugen, indem man in Bild **B2** die einzelne Öffnung in der Barriere durch zwei schmale ersetzt. Diese gleichphasig schwingenden Huygens-Zentren wirken dann wie zwei Stifte in der Wellenwanne. Im Doppelspaltversuch mit Wasserwellen beobachtet man das bekannte **Interferenzfeld** mit den auffälligen **Knotenlinien**.

Doppelspalt mit Mikrowellen – Auch bei Mikrowellen gilt nach Versuch **V1** das Huygens-Prinzip. In Versuch **V2** wird nun ein Doppelspalt verwendet. Jetzt breiten sich dahinter zwei Wellensysteme mit kohärenten Quellen aus. Die Öffnungen Q_1 und Q_2 sind schmal (in der Größenordnung einer Wellenlänge), aber einige



B4 a) Maßstäbliche Zeichnung zu Versuch V2. b) Die gelben Winkel sind gleich groß, also ist das Dreieck $Q_1 Q_2 P$ rechtwinklig.

Wellenlängen voneinander entfernt. Von ihnen gehen Elementarwellen aus. Bewegt man den Empfänger auf einem Kreisbogen um die Mitte des Doppelspalts, beobachtet man einen stetigen Wechsel von Minima und Maxima des Empfangs (Bild **B3a**). Daran bestätigt sich die Ausprägung eines Zwei-Sender-Interferenzfeldes mit den typischen Knotenlinien. Diese Interferenz verschwindet, wenn man einen der Spalte zuhält (Bild **B3b**). Zu beobachten ist nun ein **Ein-Zentren-Wellenfeld** ohne Interferenz.

! Merksatz

Bei Doppelspaltversuchen erzeugt man aus der Welle eines Senders zwei gleichphasige Elementarwellen, die genauso miteinander interferieren wie die Wellen von zwei realen kohärenten Sendern.

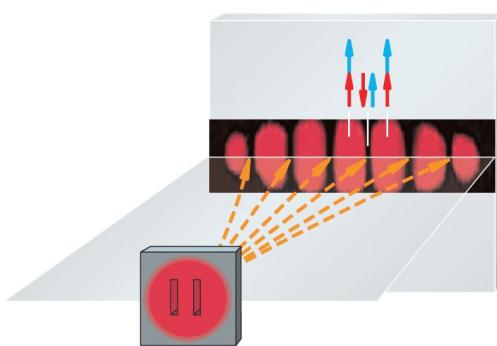
Wellenlänge der Mikrowellenstrahlung – Bild **B4a** ist ein maßstäbliches Bild zum Versuch **V2**. Der Zielpunkt Z kann auf dem Kreisbogen mit Radius $r = 0,5$ m um die Mitte des Doppelspalts herum bewegen werden. Bei den in Versuch **V2** gemessenen Winkeln für die Intensitätsmaxima (Bild **B3a**) sind die zu den Spalten Q_1 und Q_2 gehörigen Zeiger in Phase.

Bild **B4b** zeigt vergrößert die Situation für das zweite Maximum Z_2 . Bei großem Radius r des Kreisbogens um Z_2 entsteht durch den nun fast geraden Abschnitt PQ_1 des Kreisbogens ein rechtwinkliges Dreieck. Es enthält den Wegunterschied δ , den Spaltabstand g und näherungsweise den Richtungswinkel zu Z_2 . Mit den gemessenen Größen und $\sin 55^\circ = \frac{\delta}{g}$ lassen sich nun δ und damit auch λ berechnen: Die Mikrowellenstrahlung hat die Wellenlänge $\lambda = 3,5$ cm.

Doppelspaltexperiment mit Licht – Nicht nur bei Wasser-, auch bei Mikrowellen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, zeigt sich Beugung und Interferenz am Doppelspalt. Die Vermutung liegt nahe, dass auch Licht sich wie eine elektromagnetische Welle verhält.

Kohärente Sender – Zwei voneinander unabhängig betriebene Lampen sind nicht kohärent. Sie senden ihre Wellen nicht mit gleicher Frequenz und fester Phasenbeziehung aus. Die für Interferenzerscheinungen notwendigen kohärenten Lichtquellen werden daher wie bei den Mikrowellen mit Hilfe des Huygens-Prinzips erzeugt: In Versuch **V1** fällt Laserlicht auf einen Doppelspalt, dessen Spaltöffnungen und Spaltabstand sehr klein sind. So entstehen – ausgehend von den Spalten – zwei Elementarwellen, die sich im Zielgebiet hinter dem Doppelspalt überlagern.

Statt mit einem Empfänger das Zielgebiet abzutasten, wird in einiger Entfernung parallel zum Doppelspalt ein Schirm aufgestellt. Auf ihm sieht man „auf einen Blick“ die Spur des Interferenzfeldes, die Minima und Maxima der Intensität, die bei Mikrowellen beim Durchfahren des Interferenzfeldes nacheinander registriert wurden. In Bild **B1** durchstoßen die Knotenlinien des Interferenzfeldes den Schirm und markieren die Orte der Minima. Hier sind die Einzelzeiger entgegengerichtet ($\uparrow\downarrow$). Ansonsten sieht man – abhängig vom Ort – Hell und Dunkel in allen Zwischenwerten. Hier kommen alle Phasendifferenzen zwischen 0 und 2π vor; die Verkettung der beiden Zeiger liefert jeweils die resultierende Amplitude. Es scheint also, dass es auch bei Licht Bereiche gibt, in denen die Überlagerung zweier Wellen zur Auslöschung führt. An diesen Stellen gilt dann „Licht + Licht“ ergibt Dunkelheit. Alles spricht dafür, dass Licht sich wie eine Welle verhält.

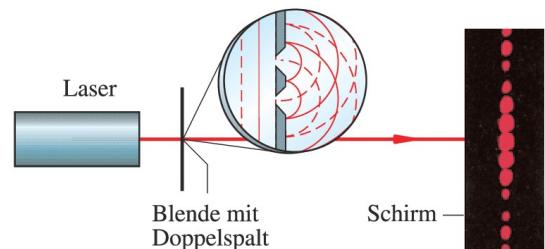


B1 Knotenlinien und Zeiger beim Doppelspalt

V1 Licht am Doppelspalt

Ein Laser wird als Lichtquelle benutzt. Aufgrund seiner Bauart erzeugt er kohärentes Licht, das für Interferenzphänomene geeignet ist.

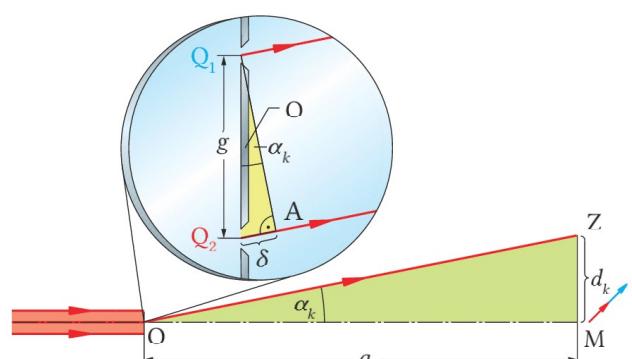
Wird mit Hilfe des Lasers ein Doppelspalt beleuchtet, so lassen sich auf einem Schirm besonders helle und besonders dunkle Bereiche erkennen.



! Merksatz

Interferenzerscheinungen beim Doppelspaltexperiment können auch bei der Durchführung mit Licht beobachtet werden, vorausgesetzt Spaltbreite und -abstand sind klein genug.

Geometrische Überlegungen – Bei Lichtwellen lässt sich Interferenz hinter einem Doppelspalt nur dann beobachten, wenn man wie in Versuch **V1** mit sehr kleinen Spaltabständen $g \ll 1 \text{ mm}$ experimentiert. Im Gegensatz zum Mikrowellenversuch ist hingegen der Abstand a zum Schirm (mehrere Meter) sehr viel größer als der Spaltabstand g . Nur einer stark vergrößerten Zeichnung könnte man (wie bei den Mikrowellen) Weglängen und Wegdifferenzen direkt entnehmen.



B2 Mit Hilfe ähnlicher Dreiecke wird δ berechnet.

Vereinfachend kann man deshalb hier annehmen, dass die Lichtwege von beiden Sendern zum Schirm annähernd parallel verlaufen. Dann kann man in Bild B2 den Wegunterschied mit Hilfe einer Senkrechten einzeichnen. Es entsteht ein rechtwinkliges Dreieck $Q_1 Q_2 A$. Hier gilt $\sin \alpha = \frac{\delta}{g}$ (Bild B2).

Die **Maxima** werden nun mit der **Ordnungszahl** k auf dem Schirm abgezählt – beginnend mit $k = 0$ beim Maximum in M – und die Winkel zum k -ten Maximum mit α_k bezeichnet. Die Wegunterschiede δ zu den Maxima sind null oder ganzzahlige Vielfache der Wellenlänge. Für das k -te Maximum (oder Maximum k -ter Ordnung) gilt mit $\delta_k = k \cdot \lambda$:

$$\sin \alpha_k = \frac{\delta_k}{g} = k \cdot \frac{\lambda}{g} \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots).$$

Minima treten auf, wenn der Wegunterschied $\frac{1}{2}\lambda, \frac{3}{2}\lambda, \frac{5}{2}\lambda, \dots$ beträgt. Für den Richtungswinkel zum k -ten Minimum folgt also

$$\sin \alpha_k = (2k - 1) \cdot \frac{\lambda/2}{g} \quad (k = 1, 2, 3, \dots).$$

! Merksatz

Beim Doppelspalt gilt für die Richtungswinkel α_k zum

k -ten Maximum: $g \cdot \sin \alpha_k = k \cdot \lambda \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$

k -ten Minimum: $g \cdot \sin \alpha_k = \frac{2k - 1}{2} \lambda \quad (k = 1, 2, \dots)$

Beim Doppelspalt mit Mikrowellen konnte man die Richtungswinkel α_k noch unmittelbar messen. In Versuch V1 beim Doppelspalt mit Licht werden diese Winkel α_k mit Hilfe des rechtwinkligen Dreiecks OMZ berechnet (Bild B2). Dort gilt

$$\tan \alpha_k = \frac{d_k}{a}.$$

Mit den Messwerten $a = 4,1$ m und dem Abstand $d_5 = 20$ mm zum 5. Maximum liefert der Taschenrechner (im Bogenmaß!)

$$\alpha_5 = \tan^{-1} \left(\frac{0,020 \text{ m}}{4,1 \text{ mm}} \right) = 0,0049.$$

Mit $k = 5$ und $g = 0,65 \cdot 10^{-3}$ m liefert die Gleichung für Maxima

$$5\lambda = g \cdot \sin \alpha_5 = 3,17 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$$\lambda = 6,34 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 634 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 634 \text{ nm}.$$

Dies ist die Wellenlänge des verwendeten Laserlichts.

Handliche Näherung – In Doppelspaltversuchen mit Licht erhält man meist sehr kleine Winkel α , für α_5 aus Versuch V1 beispielsweise im Bogenmaß etwa 0,005, also weniger als $0,3^\circ$! Für Winkel mit $\alpha < 5^\circ$ zeigt der Taschenrechner, dass $\sin \alpha$ und $\tan \alpha$ sich nur um wenige Prozente unterscheiden. Somit dürfen die Terme $\tan \alpha = \frac{d_k}{a}$ und $\sin \alpha = \frac{\delta}{g}$ bei Doppelspaltversuchen in guter Näherung gleichgesetzt werden:

$$\frac{d_k}{a} = \frac{\delta}{g} = \frac{k \cdot \lambda}{g}.$$

! Merksatz

Bei großem Abstand a eines Schirms von einem Doppelspalt (mit Mittenabstand g) gelten in guter Näherung für die Entfernung d_k :

$$d_k = \frac{\delta \cdot a}{g} = k \cdot \lambda \cdot \frac{a}{g} \quad \text{zum } k\text{-ten Maximum,}$$

$$d_k = \frac{\delta \cdot a}{g} = \frac{2k - 1}{2} \lambda \cdot \frac{a}{g} \quad \text{zum } k\text{-ten Minimum.}$$

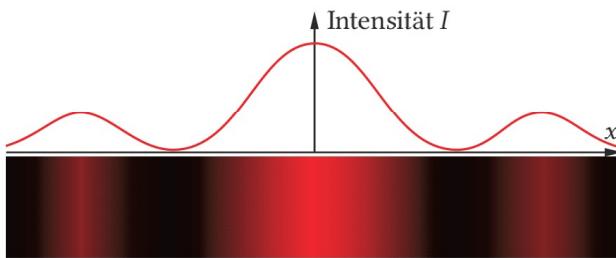
Endlich viele Maxima – Die Anzahl der sichtbaren Maxima in Versuch V1 ändert sich mit dem Spaltabstand. Vergrößert man den Spaltabstand, treten Maxima bis zu einer höheren Ordnung auf. Die Ordnungszahl k eines Maximums hängt davon ab, wie groß der an dieser Stelle auftretende Gangunterschied δ zwischen den beiden Wellenwegen ist. Die größte auftretende Ordnungszahl k findet man immer auf der erweiterten Verbindungsgeraden der Spalte, denn dort liegt mit dem Spaltabstand g der größtmögliche Gangunterschied vor.

Im Mikrowellenversuch V2 auf Seite 193 betrug die verwendete Wellenlänge $\lambda = 3,5$ cm und der Spaltabstand $g = 8,5$ cm. Das entspricht mit $\frac{g}{\lambda} = \frac{8,5 \text{ cm}}{3,5 \text{ cm}}$ etwa der 2,4-fachen Wellenlänge. Dementsprechend können Maxima ab der dritten Ordnung nicht mehr auftreten (Bild B3a auf Seite 193), weil ein Gangunterschied von $\delta = 3\lambda$ mit diesem Spaltabstand nicht möglich ist. Auch allgemein ergibt sich aus $\sin \alpha_k \leq 1$ direkt, dass $\sin \alpha_k = k \frac{\lambda}{g} \leq 1$ und damit $k \leq \frac{g}{\lambda}$ gilt.

! Merksatz

Die maximal mögliche Ordnungszahl k der auftretenden Maxima wird beim Doppelspaltversuch durch das Verhältnis von Spaltabstand g und Wellenlänge λ beschränkt:

$$k \leq \frac{g}{\lambda}.$$

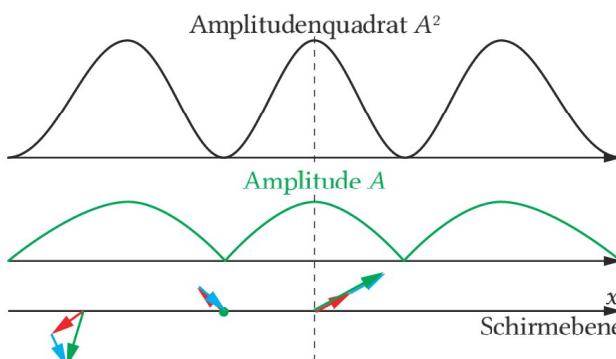


B1 Helligkeitsverteilung auf dem Schirm hinter einem Doppelspalt, darüber das I - x -Diagramm für die Intensität I

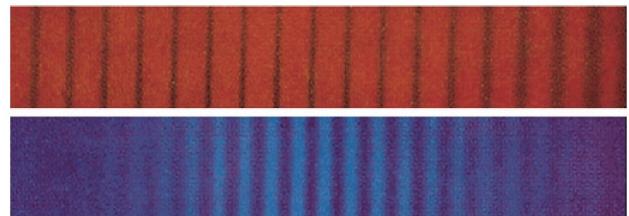
Amplituden und Intensität. Die Helligkeit (Intensität) des Interferenzmusters hinter einem Doppelspalt wird mit einem Lichtsensor gemessen und ergibt den dafür typischen Verlauf (Bild **B1**). Trägt man allerdings die Länge des resultierenden Zeigers als Amplitude A über der Ortsachse auf, erhält man etwas anderes Bild (Bild **B2**): Die Minima von A stehen „spitz“ auf der x -Achse, während die von I einen „runden“ Verlauf haben. Diese Betrachtung macht deutlich: Die Amplitude A entspricht nicht der Intensität I . Bei Licht registriert man als Intensität die Bestrahlungsstärke, also die pro Zeit und Flächeneinheit übertragene Energie. Ihr Wert folgt aus der Energiedichte $\rho_{\text{el}} \sim E_{\text{max}}^2$ des elektrischen Feldes und ist dem Quadrat der Feldstärke proportional. Quadriert man also die Amplitude, dann bekommt man eine Übereinstimmung mit der Messung (**B2**).

! Merksatz

Mit der Zeigermethode ermittelt man für jede Wellenart Amplituden und Phasen. Bei Licht beobachtet man die Intensität I , sie ist dem Quadrat der Amplitude A proportional: $I \sim A^2$.

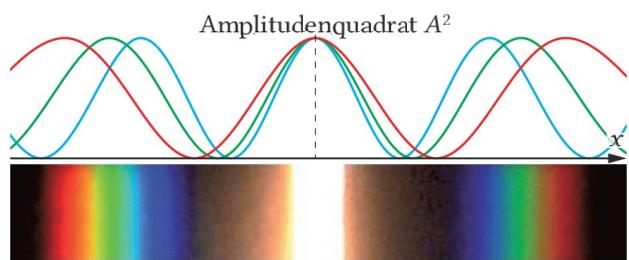


B2 Für drei Zielpunkte sind Zeigermuster gezeichnet (unten). Für alle Zielpunkte wurde die Länge des resultierenden Zeigers als Amplitude A und Amplitudenquadrat A^2 über der Ortsachse aufgetragen.



B3 Interferenzbilder mit Doppelspalt und verschiedenenfarbigen Lichtquellen. Bei blauem Licht liegen Maxima und Minima enger zusammen als bei rotem Licht.

Farben des Lichts. Wenn man Doppelspaltversuche mit verschiedenfarbigen Lichtquellen durchführt, stellt man fest: Der Abstand d der Interferenzstreifen hinter dem Doppelspalt ändert sich mit der Farbe des Lichts. In Bild **B3** ist zu erkennen: Bei gleichen Bedingungen liegen die Maxima des blauen Lichts enger zusammen als die des roten Lichts. Mit Hilfe der geometrischen Überlegungen wird klar, dass bis auf die Wellenlänge alle Voraussetzungen identisch sind. Die Wellenlänge des Lichts bestimmt also die Farbe, in der wir es wahrnehmen. Nach $\lambda = \frac{d g}{a}$ wächst λ proportional mit d . Also ist die Wellenlänge bei Rot größer als bei Blau. Rechnerisch ergibt sich für blaues Licht $\lambda = 474$ nm. Das für uns sichtbare Licht – etwa das „weiße“ Licht der Sonne oder einer Glühlampe – enthält in seinem kontinuierlichen Spektrum alle Farben von violett (Wellenlänge gleich 400 nm) bis tiefrot (800 nm). Wird das Doppelspaltexperiment mit weißem Licht durchgeführt, so wird jeder dieser farbigen Bestandteile am Spalt gebrochen. Jede Farbe zeigt hinter einem Doppelspalt ein Streifensystem mit dem zur jeweiligen Wellenlänge gehörigen Streifenabstand. Bild **B4** zeigt das Interferenzbild weißen Lichts einer Glühlampe bis zu den Maxima erster Ordnung.



B4 Interferenzbild mit Doppelspalt und weißer Lichtquelle. Man erkennt das Maximum nullter Ordnung (weiß) und die Aufspaltung der Farben in der ersten Ordnung. Darüber sind A^2 - x -Diagramme gezeichnet für 450 nm, 550 nm, 650 nm.

Das zentrale nullte Maximum in Bild **B4** liefern *alle* Wellenlängen am *gleichen* Ort. Dort addieren sich alle Farben zum Sinneseindruck „weiß“. Im ersten Maximum sieht man die spektrale Verteilung der Farben – mit wachsendem Abstand d für größere Wellenlängen.

Die Amplituden der Wellenlängen 450 nm (blau), 550 nm (grün) und 650 nm (rot) werden nun im passenden Maßstab in ein A^2 -x-Diagramm eingetragen. Bild **B4** zeigt, dass die zu diesen drei Farben gehörenden Maxima räumlich getrennt sind. An der äußeren Flanke des roten Maximums sind die Intensitäten von Grün und Blau so klein, dass für den vermittelten Farbeindruck Rot dominiert. Ähnlich ist es an den inneren Flanken der blauen Intensitätskurve: Dort verschwinden in der Farbensumme Grün und Rot.

Lösen Sie selbst

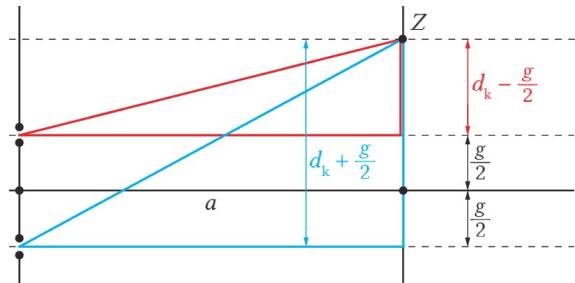
- 1** Der Punkt Z in Bild **B2**, Seite 194, soll 6 mm von M entfernt sein. Außerdem gelte $a = 4,1$ m und $g = 0,65$ mm.
 a) Zeichnen Sie bei der Wellenlänge des in Versuch **V1** (S. Seite 194) verwendeten Lasers Zeigerbilder für den Punkt Z und den auf der Mitte zwischen M und Z liegenden Punkt.
 b) Zeichnen Sie Zeigerbilder für den gleichen Punkt Z bei den Wellenlängen $\lambda_1 = 400$ nm, $\lambda_2 = 500$ nm, $\lambda_3 = 600$ nm. (Hinweis: Nehmen Sie für alle Einzelzeiger eine einheitliche Länge an, es kommt auf die Phasen an!)
- 2** Das Licht eines Lasers mit der Wellenlänge $\lambda = 500$ nm fällt senkrecht auf einen Doppelspalt mit dem Spaltmittenabstand $g = 0,5$ mm. Auf einem 1 m entfernten Schirm kann ein Interferenzmuster beobachtet werden. Berechnen Sie jeweils den Abstand und den zugehörigen Beugungswinkel des 3. Maximums und des 8. Minimums zum Hauptmaximum.
- 3** Ein Doppelspalt mit 0,8 mm Mittenabstand wird mit einfarbigem Licht einer weit entfernten Punktquelle beleuchtet. Auf einem vom Doppelspalt 50 cm entfernten Schirm entsteht ein Interferenzmuster.
 a) Der Abstand zwischen zwei benachbarten dunklen Interferenzstreifen beträgt 0,304 mm. Berechnen Sie die Wellenlänge des Lichts.
 b) Schätzen Sie den Spaltabstand ab, bei dem das 1. Maximum vom zentralen Maximum 2 mm entfernt wäre. Begründen Sie Ihr Ergebnis.

- 4** Ein Doppelspalt wird mit rotem Laserlicht der Wellenlänge 720 nm beleuchtet. Auf einem 3 m entfernten Schirm ist das originalgetreu abgebildete Interferenzmuster zu erkennen.



- a) Berechnen Sie den Spaltmittenabstand des Doppelspalts.
 b) Der Spaltabstand des Doppelspalts kann variiert werden und wird nun langsam immer weiter verkleinert. Wie verändert sich dadurch das Interferenzmuster auf dem Schirm? Begründen Sie!
 c) Ab einem gewissen Zeitpunkt in b) liegen die Maxima höherer Ordnung nicht mehr dort, wo sie nach $d_k = k \cdot \lambda \cdot \frac{a}{g}$ erwartet werden. Erklären Sie!

- 5** Wem die in diesem Kapitel vorgenommenen Näherungen („praktisch parallel“, „praktisch gleich“) nicht „ganz geheuer“ sind, kann auch mit dem Satz des Pythagoras die Wellenwege berechnen. Das geht mit dem Taschenrechner oder Computer – aber nur, wenn das Rechenwerk genügend Stellen berücksichtigt. Benutzen Sie nachfolgende Planskizze, um λ mit dem Satz des Pythagoras zu berechnen, und vergleichen Sie ihn mit dem entsprechenden Wert aus der Näherung.



- 6** Begründen Sie ohne vollständige Rechnung: Bei einem Doppelspaltversuch befindet sich das Maximum erster Ordnung der Wellenlänge 400 nm ungefähr an der gleichen Stelle wie das Maximum zweiter Ordnung der Wellenlänge 800 nm, wenn beide Experimente am selben Spalt durchgeführt werden.

- 7** Für den Abstand d zweier beliebiger benachbarter Maxima gilt folgende Beziehung: $d = \lambda \cdot \frac{a}{g}$.
 a) Leiten Sie den Zusammenhang aus den Gleichungen für die Kleinwinkelnäherung her.
 b) Ermitteln Sie den entsprechenden Abstand d zweier beliebiger benachbarter Minima.