

Wellen begegnen uns in vielfältigen Formen. In elektromagnetischer Form sind sie für uns z.B. die Grundlage für drahtlose Kommunikation. Zur Einführung befassen wir uns mit mechanischen Wellen, da sie für uns leichter erfassbar sind. Wir arbeiten mit der html5-Simulation "Seilwelle" von der University of Colorado (phet.colorado.edu/de/simulations findest Du leicht mit den Suchbegriffen "phet simulation").

In der Simulation wird die erste Kugel der Kette durch einen rotierenden Exzenter periodisch auf- und abbewegt. Beschreibe die Welle, die sich ergibt.

Das Konstruktionsprinzip für dieses Modell ist einfach:

In jedem Zeitschritt wird jede Kugelposition an die nächstfolgende Kugel weitergegeben. (Die erste Kugel wird vom rotierenden Exzenter bewegt)

4. Wellen

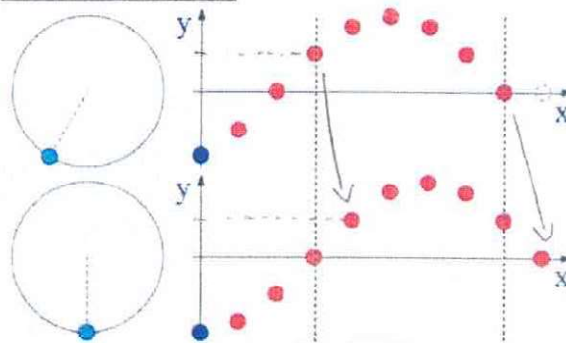
4.1 Entstehung und Ausbreitung

Modellexperiment

Die Kugelkette (oder Seil) nimmt eine sinusförmige Gestalt an. Diese Form bewegt sich nach rechts vom rotierenden Exzenter (Erzeugung einer lokalen Schwingung) weg.



Konstruktionsprinzip:

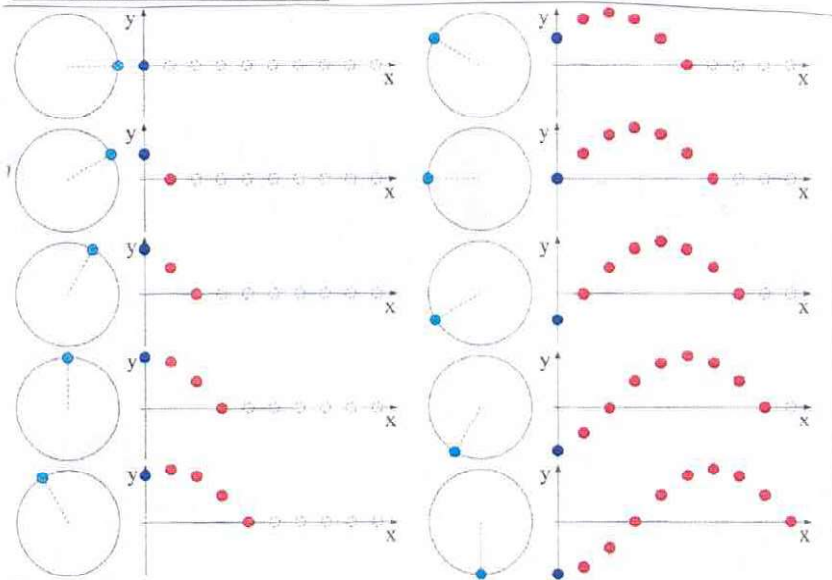


4.1 Entstehung und Ausbreitung

1

Führe diese Konstruktion in der Vorlage für alle Zeitschritte und alle Kugeln durch. Der Zeitschritt zwischen zwei Bildchen beträgt dabei jeweils 0,1 s. Dabei hat sich der Exzenter jeweils um 30° weiter bewegt. Beachte, dass sich die Bewegung erst nach und nach in die Kugelkette ausbreitet.

Konstruktion der Wellenform:



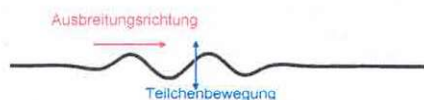
Beachte:

Jedes einzelne Teilchen schwingt dabei lediglich um seine Mittellage auf und ab. Es wird also kein Material in Richtung der Wellenausbreitung transportiert. Das ist typisch für die Ausbreitung von Wellen.

Arten:

Bisher haben wir Wellen betrachtet, bei denen die einzelnen Teilchen senkrecht zur Bewegungsrichtung schwingen. Die Teilchen können aber auch in Ausbreitungsrichtung schwingen. Daher unterscheiden wir zwischen zwei Arten von Wellen.

Transversalwelle (Querwelle):



Beispiel: Seilwellen

Longitudinalwelle (Längswelle)



Beispiel: Schallwellen

Hier siehst Du zwei Bilder aus der vorhergehenden Folie sowie ein weiteres. **Gib die Zeitpunkte an, die zu den Situationen gehören.**

Periodendauer und Frequenz einer Welle entsprechen den Werten der erzeugenden Schwingung. Gib diese für das Beispiel an.

Markiere die Wellenlänge (siehe Kasten) im 3. Bild und gib ihren Wert an.

Größen bei einer Welle:

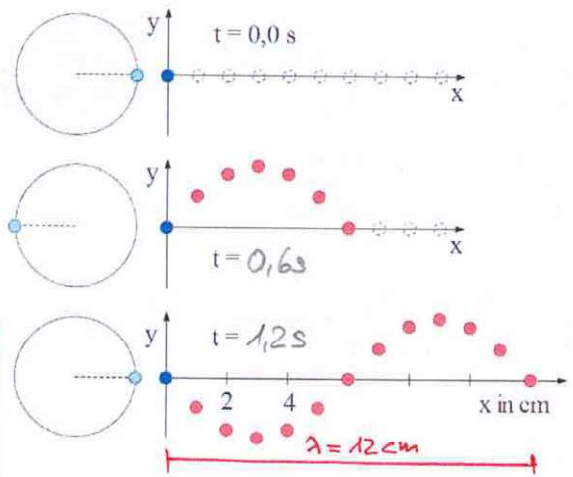
$$T = 1,2 \text{ s}$$

$$f = \frac{1}{T} \approx 0,83 \text{ Hz}$$

Begriff:

Der Abstand zwischen zwei Punkten mit gleichem Schwingungszustand heißt

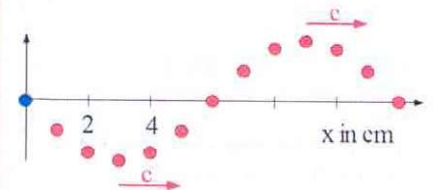
Wellenlänge λ



Die maximale Auslenkung der schwingenden Teilchen heißt Amplitude.

Ausbreitungsgeschwindigkeit:

Die Geschwindigkeit, mit der sich der Zustand der Schwingung ausbreitet, heißt Ausbreitungsgeschwindigkeit oder Phasengeschwindigkeit c . Sie lässt sich gut an der Bewegung der Wellenfront oder der Verlagerung eines Wellenberges oder Wellentales erkennen.



$$\text{Geschwindigkeit} = \frac{\text{Weg}}{\text{Zeit}} = \frac{12 \text{ cm}}{1,2 \text{ s}} = 10 \frac{\text{cm}}{\text{s}} = 0,10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Allgemein: } c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f = \lambda \cdot \frac{1}{T}$$

$$c = \lambda \cdot f$$

4.1 Entstehung und Ausbreitung

3

Beachte:

Während sich die Geschwindigkeit der einzelnen Teilchen ständig ändert, ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle konstant. Berühmte Beispiele:

Schall: $c = 330 \text{ m/s}$

Licht: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Bestimme die Ausbreitungsgeschwindigkeit für das betrachtete Beispiel.

Training: Schallwelle

Bestimme die Frequenz eines Senders, wenn eine Schallwelle mit der Wellenlänge $\lambda = 10 \text{ cm}$ entsteht.

$$c = \lambda \cdot f \rightarrow f = \frac{c}{\lambda} = \frac{340 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,10 \text{ m}} = 3,4 \text{ kHz}$$

Training: Wellenausbreitung an einem Federseil

Aufgabe und Abb. aus leifiphysik.de.

In der nebenstehenden Skizze führt die Hand am Ende einer langen leicht gespannten Feder (Slinky-Feder) in einer Sekunde zwei volle Schwingungen aus. Die Welle bewegt sich mit der Geschwindigkeit $0,50 \text{ m/s}$ entlang der Feder.

a) Berechne den Abstand zweier Berge bei dieser Welle.

b) Angenommen die Frequenz der Welle sei jetzt $5,0 \text{ Hz}$ und die Amplitude $1,3 \text{ cm}$. Berechne die Strecke, die der markierte Punkt (in vertikaler Richtung) in $3,0 \text{ s}$ zurücklegt.

$$a) f = \frac{n}{t} = \frac{2}{1 \text{ s}} = 2 \frac{1}{\text{s}}$$

$$c = 0,50 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$c = \lambda \cdot f$$

$$\rightarrow \lambda = \frac{c}{f} = \frac{0,50 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2 \frac{1}{\text{s}}} = 0,25 \text{ m}$$

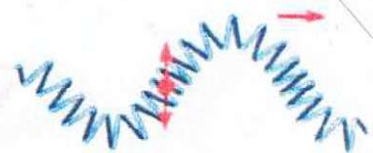


Abb. aus leifiphysik.de

$$b) \text{ Punkt führt mehrere volle Schwingungen an seiner Position durch}$$

$$f = \frac{n}{t} \rightarrow n = f \cdot t = 5,0 \frac{1}{\text{s}} \cdot 3,0 \text{ s} = 15$$

bei einer vollen Schwingung legt er $4 \cdot A = 4 \cdot 1,3 \text{ cm} = 5,2 \text{ cm}$ zurück

$$\text{Gesamtweg: } 15 \cdot 5,2 \text{ cm} = 78 \text{ cm}$$

Selbst-Check:

- Schwingung und Welle
- Konstruktion der Wellenform
- Transversal- und Longitudinalwellen
- Periodendauer, Frequenz und Wellenlänge
- Ausbreitungsgeschwindigkeit

Übungsmöglichkeiten:

Passende Aufgaben sowie zwei Tests zum Thema findest Du auf Leifiphysik unter Teilgebiet Mechanik - Mechanische Wellen - Größen zur Beschreibung einer Welle. Auch hier reichen die leichten Aufgaben (grün).

Wenn Autos auf gleicher Fahrbahn aufeinandertreffen, gibt's Blechschaden. Bei Wellen ist das ganz anders.
Schau Dir die obere Wellenbegegnung an und übertrage das Prinzip auf das 2. Beispiel.

Wenn sich Wellen begegnen, durchlaufen sie sich ohne Störung. Dabei addieren sich an jedem Ort zu jeder Zeit ihre Auslenkungen. Diese Überlagerung nennt man Interferenz.

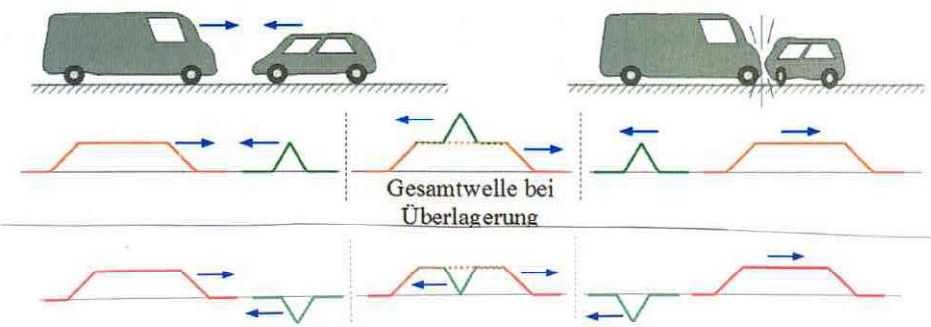
Links begegnen sich zwei Wellenberge, rechts ein Berg und ein Tal. Zeichne jeweils die Gesamtwelle während der Begegnung (Bild 2) sowie die Wellen nach ihrer Begegnung (Bild 3). Ergänze die Beobachtung darunter.

Richtig erfassen kann man das nur in Bewegung, deshalb solltest Du Dir die Animation auf Leifiphysik ansehen unter Teilgebiet Mechanik - Mechanische Wellen - Stehende Wellen Einführung.

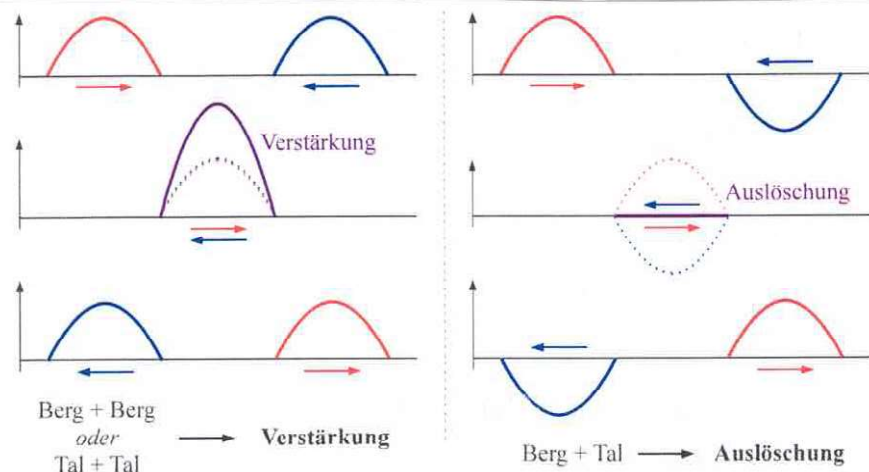
Diese Situation trifft häufiger auf als man denkt, da aus einer Welle durch Reflexion eine entgegenlaufende Welle entstehen kann. Die Bäuche der stehenden Welle, die sich dann ergibt, sind im Falle von Handystrahlung als Funklöcher wohl bekannt und gefürchtet.

4.2 Überlagerung von Wellen - Interferenz

Wellen begegnen sich:



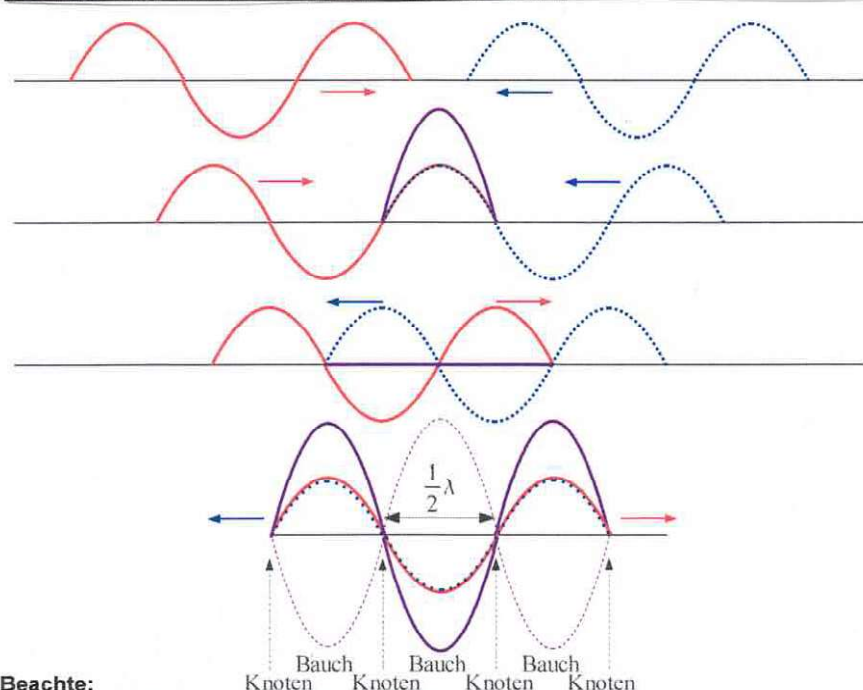
Auslöschung und Verstärkung:



4.2 Überlagerung von Wellen

1

Überlagerung fortlaufender Wellen - stehende Welle:



Beachte:

Begegnen sich zwei Wellen gleicher Wellenlänge, so entsteht eine stehende Welle, die an festen Stellen dauerhaft keine Schwingung (Knoten) zeigt, während dazwischen die Schwingung besonders stark ist (Bäuche). Der Abstand der Knoten entspricht der halben Wellenlänge.

4.2 Überlagerung von Wellen

2

Stehende Wellen treten auch auf, wenn ein Seil an beiden Enden eingespannt ist und zu Schwingungen angeregt wird.

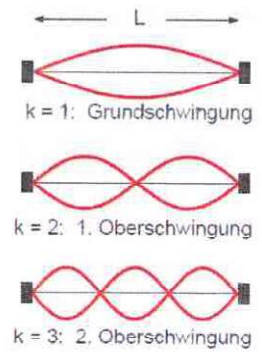
Anwendung:

Die Einspannung bewirkt, dass die durch die Anregung erzeugten Wellen an den Enden jeweils reflektiert werden und dass dort jeweils ein Knoten vorliegen muss. Damit diese Bedingung erfüllt ist, muss für die Wellenlänge λ und die Seillänge L gelten:

$$L = k \cdot \frac{\lambda}{2}$$

mit $k = 1; 2; 3; \dots$

Die Schwingungszustände werden als Grund - und Oberschwingung bezeichnet.



Stehende Wellen auf Saiten oder Luftsäulen sind die Grundlage für die Funktionsweise vieler Musikinstrumente.

Kürzt man bei gleichbleibender Spannung eine Saite der Länge L um $\Delta L = 10 \text{ cm}$, so erhöht sich die Grundfrequenz f auf das 1,5-fache.

Berechne die ursprüngliche Länge L .

Aufgabe (aus leifiphysik)

$$k=1: L = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \lambda = 2L$$

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2L}$$

$$f_{\text{kurz}} = 1,5 \cdot f = \frac{c}{2(L-10\text{cm})}$$

$$\frac{c}{2(L-10\text{cm})} = 1,5 \cdot \frac{c}{2L} \quad | :c \quad | \cdot L \quad | \cdot (L-10\text{cm}) \quad | \cdot 2$$

$$L = 1,5 \cdot (L-10\text{cm}) = 1,5L - 15\text{cm} \quad | +15\text{cm} - L$$

$$0,5L = 15\text{cm}$$

$$L = 30\text{cm}$$

4.2 Überlagerung von Wellen

3

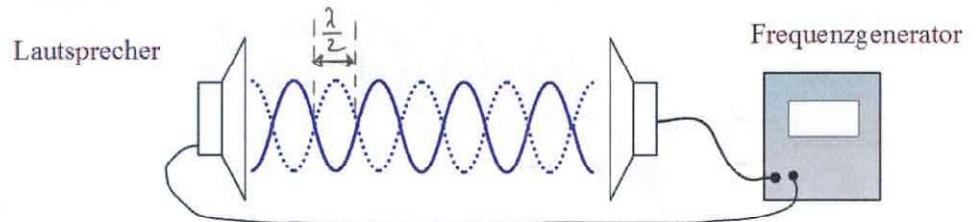
Das Bild zeigt ein einfaches Experiment mit akustischen Wellen, bei dem die Bäuche und Knoten der stehenden Welle hörbar sind.

a) Berechne den Abstand von zwei Knoten, wenn man die Lautsprecher mit einer Frequenz von 550 Hz betreibt.

b) Welche Abstände der beiden Lautsprecher sind besonders gut geeignet, wenn man davon ausgeht, dass unmittelbar an der Lautsprechermembran idealerweise ein Bauch liegt (siehe Zeichnung).

In der Oberstufe nutzen wir diesen Versuchsaufbau, um experimentell die Wellenlänge von Funkwellen zu messen.

Experiment: stehende Welle mit zwei Lautsprechern



$$a) c = \lambda \cdot f \rightarrow \lambda = \frac{c}{f} = \frac{330 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{550 \frac{1}{\text{s}}} = 0,6 \text{ m}$$

$$\text{Abstand von 2 Knoten: } \frac{\lambda}{2} = 0,30 \text{ m} = 30 \text{ cm}$$

b) Zwischen den Lautsprechern befindet sich eine ganze Zahl von Bäuchen (je 30cm Breite).

→ Abstand sollte ein ganzzahliges Vielfaches von 30 cm sein (60 cm, 90 cm, 120 cm, 150 cm, ...)

Selbst-Check:

- Überlagerung von Wellen
- Auslöschung und Verstärkung
- stehende Welle
- Knoten, Bäuche

Übungsmöglichkeiten:

In diesem Bereich gibt's leider nicht wirklich geeignetes Aufgabenmaterial, da man sehr schnell auf Abiturniveau ankommt, wie Du an der letzten Aufgabe bereits sehen konntest. Deshalb heute mal keine Aufgabe.

4.2 Überlagerung von Wellen

4

Wirft man einen Stein in einen Teich, breitet sich eine Welle aus. In einer Wellenwanne erzeugen wir dies kontinuierlich durch Ein- und Austauschen eines Tupfers.

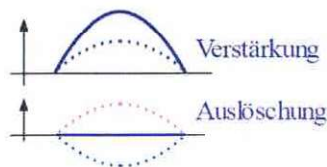
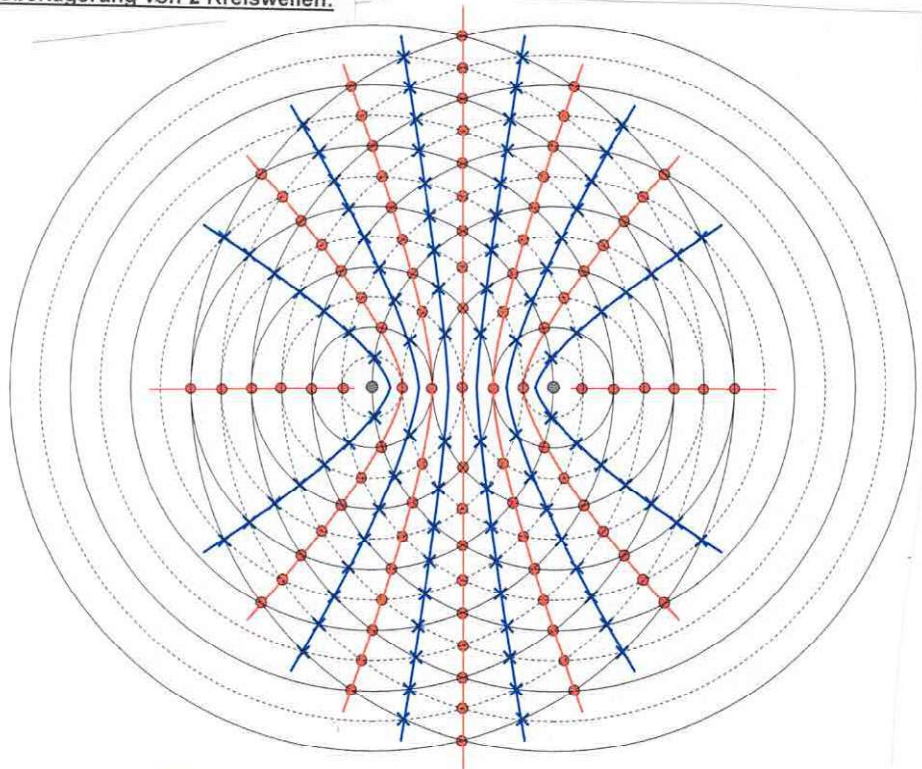
Abb. aus leifiphysik.de



Nun tauchen zwei Tupfer E_1 und E_2 synchron ins Wasser und erzeugen permanent Wellen. Durchgezogene Linien stehen für Wellenberge, gestrichelte für -täler.

Markiere Auslöschungen mit x und Verstärkungen (Berg/Berg bzw. Tal/Tal) mit einem Punkt. Verbinde zusammengehörige x bzw. Punkte.

4.3 Interferenzmuster Überlagerung von 2 Kreiswellen:



Im Foto sind die Auslöschungslinien dünne, durchgehende Linien, die hyperbelförmig auseinanderlaufen. Dazwischen finden sich die breiten Streifen mit hell-dunkel-Muster (Berg und Tal).

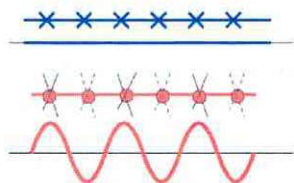
Interpretation des Interferenzmusters:

Auslöschungslinien (Kreuzchen) sind

Zonen vollkommener Ruhe

Verstärkungslinien (Punkte) sind

Zonen mit maximaler Schwingung



a) Miss den Abstand zweier durchgezogener Kreise. Welche Bedeutung hat dieses Maß für die Welle?

b) Bestimme die Abstände der bezeichneten Punkte zu den Tupfern E_1 bzw. E_2 und erfasse sie in der Tabelle.

c) Suche eine quantitative Bedingung für Verstärkung bzw. Auslöschung.

d) Warum stellt die Symmetrieachse eine Linie der Verstärkung dar?

Auswertung des Musters - Interferenzbedingungen:

Abstand von 2 Wellenbergen = $\lambda = 0,8 \text{ cm}$

Punkt	Auslö.	Verst.	Abstand zu E_1	Abstand zu E_2	Differenz der Abstände
P		X	2,8 cm	2,8 cm	0 cm = $0 \cdot \lambda$
Q		X	4,0 cm	4,8 cm	0,8 cm = $1 \cdot \lambda$
R		X	2,0 cm	3,6 cm	1,6 cm = $2 \cdot \lambda$
S	X		2,0 cm	3,2 cm	1,2 cm = $1,5 \cdot \lambda$
T	X		2,0 cm	1,6 cm	0,4 cm = $0,5 \cdot \lambda$
U	X		4,8 cm	2,8 cm	2,0 cm = $2,5 \cdot \lambda$

Interferenzbedingungen:

Verstärkung tritt an den Stellen auf, an denen die Differenz der Abstände

ein Vielfaches von λ ist

$$\Delta s = k \cdot \lambda$$

Auslöschung tritt an den Stellen auf, an denen die Differenz der Abstände

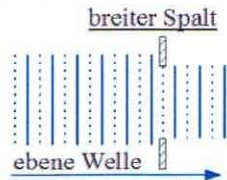
ein Vielfaches von λ plus $\frac{\lambda}{2}$ ist

$$\Delta s = k \cdot \lambda + \frac{\lambda}{2}$$

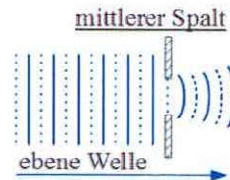
$k \in \mathbb{N}$

Mit einem schienenförmigen Tüpfel erzeugen wir eine ebene Welle (Zeichnung) und lassen diese durch ein Tor (Spalt) im Becken laufen. **Beschreibe das Ergebnis abhängig von der Spaltbreite.** Bilder hierzu findest Du auf Leifiphysik unter Teilgebiet Mechanik - Mechanische Wellen - Versuche - Wellenwanne.

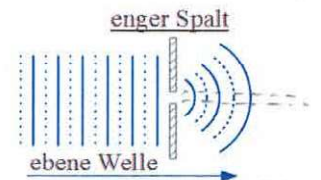
Beugung am Spalt:



breiter Spalt:
ebene Welle läuft
passend zum Spalt
weiter



Übergang

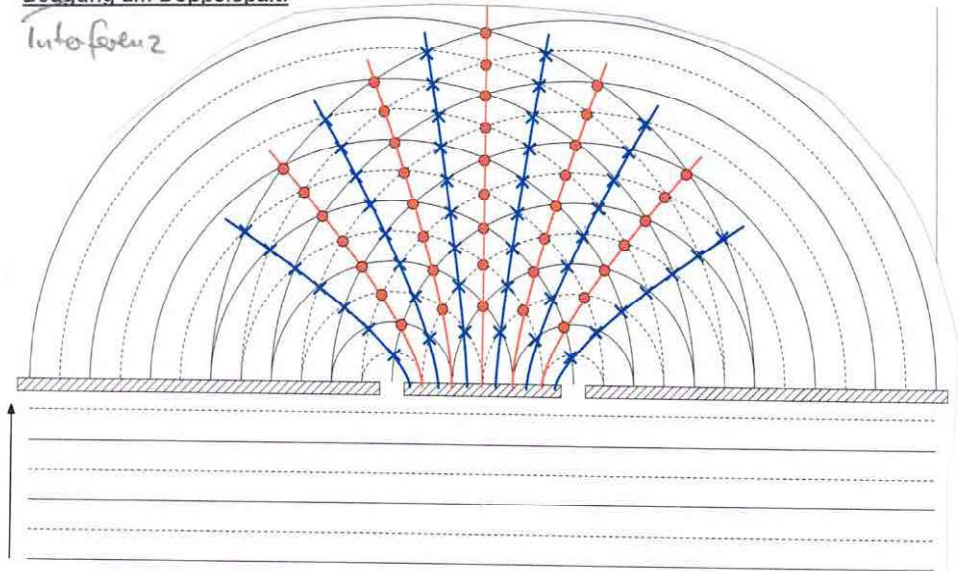


am engen Spalt entsteht
eine Kreiswelle, die
in den geometrischen
Schattenraum läuft

Beugung am Doppelspalt:

Interferenz

An einem Doppelspalt (mit engen Spalten) laufen die Wellen wie dargestellt nach oben weiter. In der Wellenwanne ist der Effekt relativ schlecht darstellbar, bei elektromagnetischen Wellen, z.B. Licht, ist dieses Prinzip aber von ganz entscheidender Bedeutung (siehe nächstes Kapitel). **Ermittle das Interferenzmuster oberhalb des Doppelspaltes.**



Folgende Aufgabe (verkürzt) stammt aus dem bayerischen Physikabitur 2019 (für diese beiden Teilaufgaben gab's 10 BE von 60 BE für den Q11-Teil):

Zwei Sendantennen D_1 und D_2 strahlen Wellen gleicher Wellenlänge 3,0 cm ab. Sie haben einen Abstand von zwei Wellenlängen. Ein Empfänger wird auf einem Kreis k um die Antennen bewegt.

- a) Geben Sie die Antennenlänge an (Hinweis: halbe Wellenlänge) sowie die Sendefrequenz.
b) Kennzeichnen Sie in der Zeichnung die Orte mit maximalem Empfang und geben Sie die Anzahl der Positionen an, an denen der Empfänger maximalen Empfang feststellt.

Training: Interferenz (aus Abitur 2019 Bayern)

a) Antennenlänge $\frac{\lambda}{2} = \frac{3,0 \text{ cm}}{2} = 1,5 \text{ cm}$

$c = \lambda \cdot f$

$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,03 \text{ m}}$

$= 10^{10} \frac{1}{\text{s}} = 10 \text{ GHz}$

b) abzählen

→ 8 Positionen
auf dem Kreis

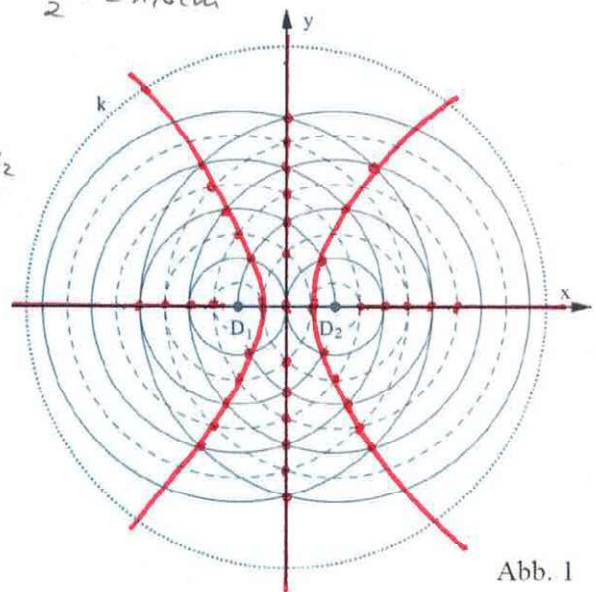


Abb. 1

Selbst-Check:

- Interferenz von 2 Kreiswellen – Interferenzmuster
- Interferenzbedingungen
- Beugung am Spalt
- Interferenz am Doppelspalt

Übungsmöglichkeiten:

Ein paar Aufgaben zu diesem Kapitel findest Du auf Leifiphysik unter Teilgebiet Mechanik - Mechanische Wellen - Interferenz.

Heinrich Hertz kam 1899 nach seinen Experimenten mit den ersten Sendeanlagen für elektromagnetischen Wellen zu der Erkenntnis: "Die Wellentheorie des Lichts ist, menschlich gesprochen, Gewissheit."

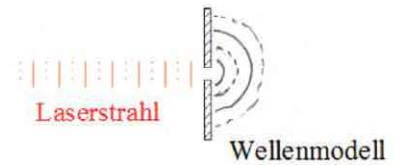
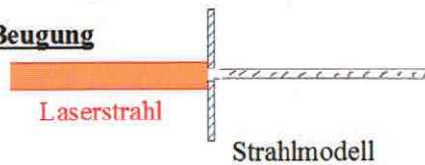
Zunächst vergleichen wir, welche Prognosen wir über den weiteren Verlauf des Laserstrahles treffen würden, wenn wir im Strahlmodell (7. Klasse) bzw. im Wellenmodell (10. Klasse) denken.

In den hier abgebildeten Experimenten entdecken wir das Phänomen "Beugung" wieder, das wir in der Wellenwanne bei Wasserwellen beobachten konnten.

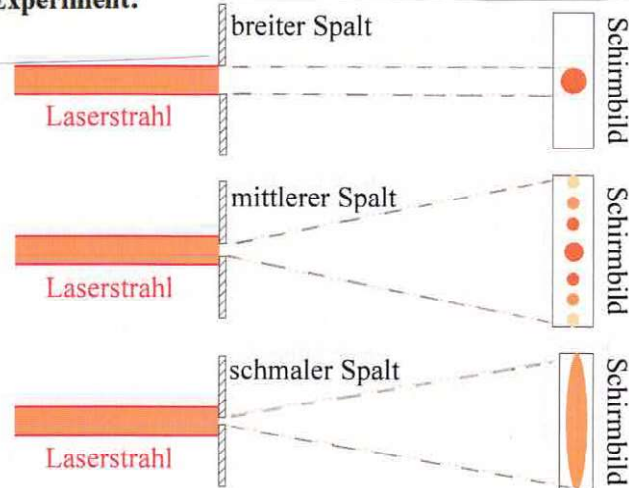
Zeichne in den Kasten "Schirmbild" das Bild, das sich jeweils auf dem Beobachtungsschirm zeigt. Beschreibe daneben jeweils den Effekt mit Fachbegriffen. Den Effekt beim mittleren Spalt können wir noch nicht erklären.

4.4 Interferenz bei Licht Beugung am Einzelspalt:

Beugung



Experiment:



durch den breiten Spalt geht das Licht unverändert durch

bei mittlerem Spalt entsteht ein Interferenzmuster (?)

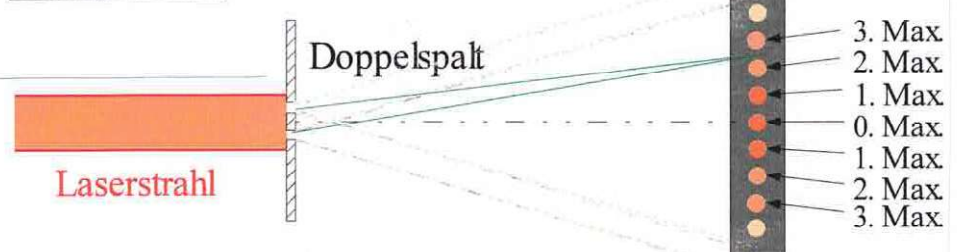
bei schmalem Spalt wird das Licht gebeugt, der Laserpunkt zerfließt

Auch bei Licht können wir an Spalten Beugung beobachten.
Die Entstehung dieses Phänomens erfordert aber kleine Spaltbreiten.

Auch dieses Experiment liefert ein Ergebnis, das wir von Wasserwellen bereits kennen.

- Zeichne das Schirmbild und erkläre seine Entstehung.
- Welche Forderung ist an die Spaltbreite zu stellen?
- Beschreibe die Änderung des Interferenzmusters, wenn man den Abstand der 2 Spalte verkleinert.

Doppelspaltversuch:



An beiden Spalten entstehen **Wellen**, die miteinander **interferieren** (abhängig vom Unterschied der **Weglängen**).

$$\Delta s = k \cdot \lambda \rightarrow \text{Verstärkung (hell)}$$

$$\Delta s = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \rightarrow \text{Auslöschung (dunkel)}$$

$$= k \cdot \lambda + \frac{\lambda}{2}$$

Die **Spaltbreite** sollte klein sein, damit Beugung auftritt.

Verkleinert man den **Spaltabstand**, so rücken Maxima und Minima weiter auseinander.

Die Simulationsapp "Wellen" von der University of Colorado passt hier perfekt und hilft, das Phänomen besser zu verstehen. Du findest sie unter phet.colorado.edu/de/simulations oder mit den Suchbegriffen "phet simulation". Arbeite im Modul "Spalte", wähle dort als Quelle den Laser und als Hindernis "zwei Spalte". Mit einem Häkchen bei "Bildschirm" wird klar, wie die Wellenüberlagerung zu unserer Beobachtung führt.

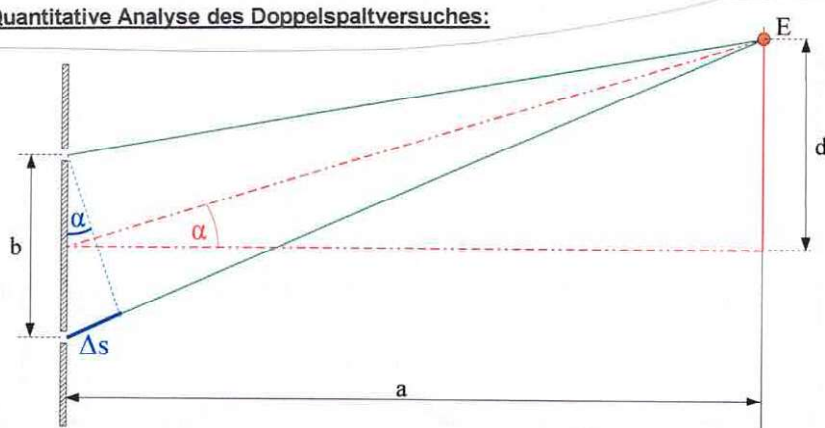
- Zeichne die Wegstrecken ein, die das Licht von den Spalten bis zur Position E auf dem Schirm zurücklegt.
- Ermittle graphisch den Unterschied Δs der beiden Wegstrecken durch Einzeichnen eines geeigneten Dreiecks.
- Stelle eine Formel zur Berechnung des Wegunterschiedes auf.
- Der Winkel taucht ein weiteres Mal innerhalb des Versuchsaufbaues auf. Ermittle auch dafür eine Formel.
- Wir führen die beiden Formeln gemeinsam zusammen.
- Berechne Δs für die vierte Verstärkung neben der Mitte.
- Mit Hilfe der Interferenzbedingung können wir nun die Wellenlänge ermitteln.

Messwerte:

$$d_4 = 20 \text{ mm}$$

$$a = 4,0 \text{ m} \quad b = 0,5 \text{ mm}$$

Quantitative Analyse des Doppelspaltversuches:



Blaues Dreieck: $\Delta s = b \cdot \sin \alpha \rightarrow \sin \alpha = \frac{\Delta s}{b}$

Rotes Dreieck: $\tan \alpha = \frac{d}{a}$

Die Winkel α in diesem Experiment sind ausgesprochen klein. Für kleine Winkel ($\alpha < 10^\circ$) gilt allgemein: $\sin \alpha \approx \tan \alpha$

$$\rightarrow \frac{\Delta s}{b} = \frac{d}{a} \rightarrow \Delta s = b \cdot \frac{d}{a} \quad (\text{mit Kleinwinkelnäherung})$$

Versuchsdaten: $a = 400 \text{ cm}$, $b = 0,5 \text{ mm}$

Abstand 4. Maxima = $40 \text{ mm} \rightarrow d = 20 \text{ mm}$

$$\Delta s = b \cdot \frac{d}{a} = 0,5 \text{ mm} \cdot \frac{20 \text{ mm}}{4,0 \text{ m}} = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ m} \quad \text{und} \quad \Delta s = k \cdot \lambda$$

$$\text{hier: } \Delta s = 4 \cdot \lambda \rightarrow \lambda = \Delta s : 4 = 625 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 625 \text{ nm}$$

Der Schulversuch wird nochmal durchgeführt (nun mit $a = 4,5 \text{ m}$ und $b = 0,5 \text{ mm}$), zunächst mit rotem Licht ($\lambda_r = 660 \text{ nm}$), dann mit grünem Licht ($\lambda_g = 440 \text{ nm}$). Berechne jeweils den Abstand d zwischen zwei aufeinanderfolgenden Maxima und zeichne die beiden Interferenzmuster (als Abfolge von kurzen farbigen Strichen) untereinander in den Karo-Bereich (die Mitten der Muster untereinander).

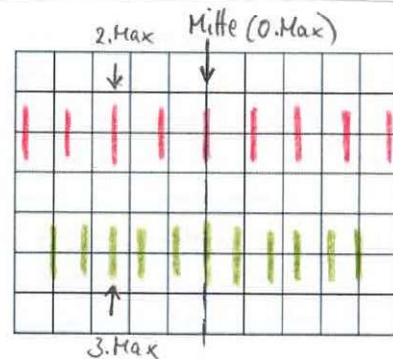
Training: Vergleichbarer Versuch

$$k \cdot \lambda = b \cdot \frac{d_k}{a} \rightarrow d_k = \frac{k \cdot \lambda \cdot a}{b} = k \cdot \frac{\lambda \cdot a}{b}$$

Abstand zweier Maxima jeweils: $d = \frac{\lambda \cdot a}{b}$

$$d_r = \frac{\lambda_r \cdot a}{b} = \frac{660 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot 4,5 \text{ m}}{0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 0,6 \text{ cm}$$

$$d_{gr} = \frac{\lambda_{gr} \cdot a}{b} = \frac{440 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot 4,5 \text{ m}}{0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 0,4 \text{ cm}$$



2. Maximum rot und 3. Maximum grün liegen an derselben Stelle

Selbst-Check:

- Beugung am Einzelspalt
- Interferenz am Doppelspalt
- Berechnungen im Doppelspaltexperiment
- Kleinwinkelnäherung

Übungsmöglichkeiten:

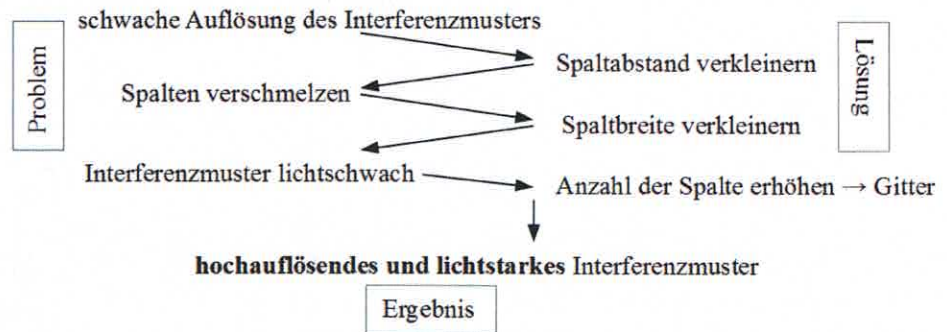
Passende Aufgaben gibt's auf Leifiphysik unter Teilgebiet Optik - Beugung und Interferenz - Doppelspalt, die leichten Übungsaufgaben (grün) reichen hier. Du siehst, dass sich in diesem Bereich auch schon Abituraufgaben (gelb) finden.

groß ausdrucken

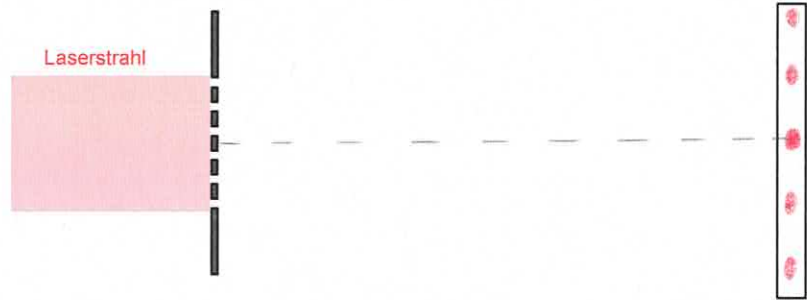
In unseren Experimenten mit Laserlicht lagen die einzelnen Maxima sehr nah beieinander, wir sprechen von einer schwachen Auflösung. Versucht man diese experimentell zu verbessern, so ist man mit weiteren Problemen konfrontiert, deren Lösung stringent zu einem neuen Bauteil führt. Die ersten Transmissions-Gitter wurden Anfang des 19. Jahrhunderts von Joseph Fraunhofer erfolgreich entwickelt und eingesetzt. **Beschreibe den Unterschied beim Interferenzmuster im Vergleich zu den Versuchen am Doppelspalt im vorigen Kapitel.**

4.5 Optische Gitter

Vom Doppelspalt zum Gitter:



Experiment:



Beobachtung:

Die Maxima auf dem Schirm liegen weit auseinander.
Die Auslöschungsbereiche dazwischen sind sehr breit.

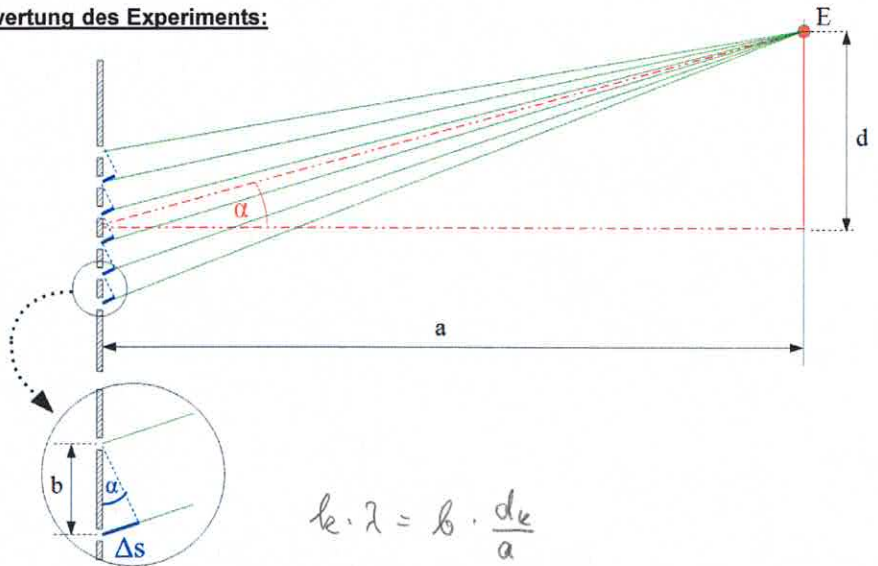
Auswertung des Experiments:

Rechentchnisch geht alles wie am Doppelspalt, da je zwei benachbarte Spalte einen Doppelspalt bilden. Es gilt also weiter die Formel:

$$k \cdot \lambda = b \cdot \frac{d_k}{a}$$

Beachte allerdings:

- in der Literatur findet man für den Spaltabstand oft die Bezeichnung Gitterkonstante g (b ist dann die Spaltbreite)
- bei Gittern erreicht man große Winkel, so dass man separat mit \sin und \tan rechnen muss (Kleinwinkelnäherung nicht gültig)



$$k \cdot \lambda = b \cdot \frac{d_k}{a}$$

$$d_k = k \cdot \frac{\lambda \cdot a}{b}$$

$$\text{z.B.: } d_2 = 2 \cdot \frac{\lambda a}{b} \quad d_3 = 3 \cdot \frac{\lambda a}{b}$$

$$\text{Abstand von 2 Maxima: } d = \frac{\lambda \cdot a}{b}$$

$$\text{Spaltabstand} = \text{Gitterkonstante } b = \frac{10 \text{ mm}}{80} = 0,125 \text{ mm}$$

$$d = \frac{625 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot 4,0 \text{ m}}{0,125 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 0,02 \text{ m} = 2,0 \text{ cm}$$

Die Wellenlänge des Lasers im Versuch beträgt 625 nm. Das Gitter hat 80 Linien pro cm. Wandabstand ist 4,0 m. **Berechne den Abstand der Interferenzmaxima.**

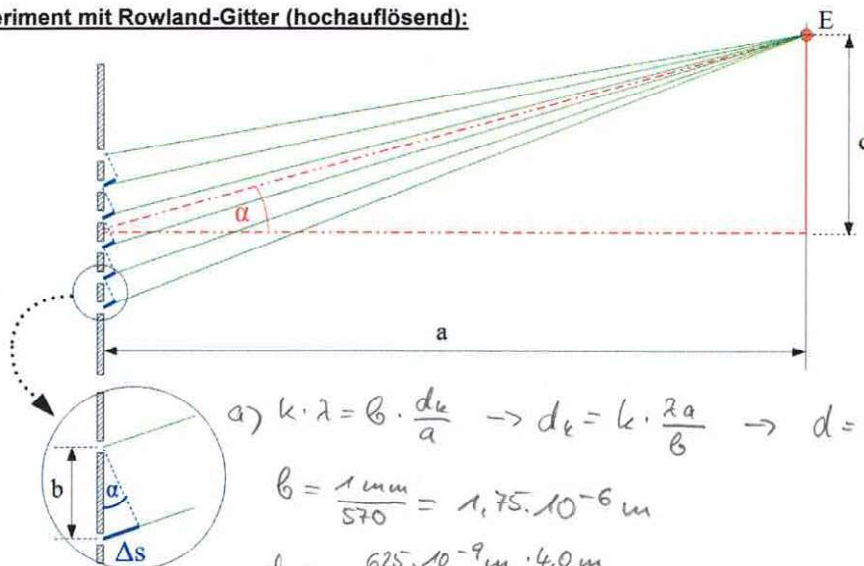
$$\text{Anmerkung: hier ist } \tan \alpha = \frac{d}{a} = \frac{0,02 \text{ m}}{4 \text{ m}} = 0,005$$

$$\rightarrow \alpha = 0,29^\circ \rightarrow \text{Kleinwinkelnäherung OK}$$

Ende des 19. Jahrhunderts entwickelte Henry Rowland Gitter mit sehr kleinem Linienabstand, die sehr hohe Auflösungen zulassen. In diesem Versuch arbeiten wir mit einem Gitter, das 570 Linien pro mm hat.

- Versuche zuerst, die Position des 1. Maximums mit der Formel auf der Vorderseite zu ermitteln.
- Berechne anschließend den Winkel für das erste Maximum aus dem kleinen Dreieck und der Interferenzbedingung.
- Berechne die Position d des 1. Maximums aus dem zuvor berechneten Winkel.
- Vergleiche mit dem Ergebnis im Experiment.
- Welchen Wert kann \sin maximal erreichen? Ermittle daraus die höchste Ordnung eines Maximums, die mit dieser Versuchsanordnung erreicht werden kann.

Experiment mit Rowland-Gitter (hochauflösend):



$$a) k \cdot \lambda = b \cdot \frac{d_k}{a} \rightarrow d_k = k \cdot \frac{\lambda a}{b} \rightarrow d = \frac{\lambda a}{b}$$

$$b = \frac{1 \text{ mm}}{570} = 1,75 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$$d = \frac{625 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot 4,0 \text{ m}}{1,75 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = 1,43 \text{ m}$$

hier ist $\tan \alpha = \frac{d}{a} = \frac{1,43 \text{ m}}{4,0 \text{ m}} = 0,36 \rightarrow \alpha = 20^\circ \rightarrow$
Kleiwinkelnäherung unzulässig!

$$b) \Delta s = b \cdot \sin \alpha = 1,2$$

$$\sin \alpha = \frac{\lambda}{b} = \frac{625 \cdot 10^{-9} \text{ m}}{1,75 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = 0,357 \rightarrow \alpha = 20,9^\circ$$

$$c) \tan \alpha = \frac{d}{a} \rightarrow d = a \cdot \tan \alpha = 4,0 \text{ m} \cdot \tan 20,9^\circ = 1,53 \text{ m}$$

d) Messung bestätigt c)

$$e) \sin \alpha \leq 1 \rightarrow b \cdot \sin \alpha = k \cdot \lambda$$

$$k = \frac{b \cdot \sin \alpha}{\lambda} \leq \frac{b}{\lambda} = \frac{1,75 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{625 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 2,8$$

Das Maximum 3. Ordnung kann nicht mehr erreicht werden.

Im folgenden ist eine Aufgabe aus dem Physikabitur 2010 verkürzt wiedergegeben (Quelle leifiphysik.de)

a) Beschreiben Sie einen Versuch zur Bestimmung der Wellenlänge von Laserlicht mit einem optischen Gitter. Zeigen Sie, wie man aus den Messdaten die Wellenlänge berechnet. (7 BE)

b) Welche Vorteile bietet das Gitter im Vergleich zum Doppelspalt? (4 BE)

c) Mit zwei optischen Gittern über Kreuz angeordnet erhält man dieses Interferenzbild. Bestimmen Sie das Verhältnis der Gitterkonstanten. Wie liegen die Linien beim Gitter mit dem größeren Strichabstand? (5 BE)

d) Bestimmen Sie die Gitterkonstante des Gitters, dessen Linien waagrecht liegen, wenn der Abstand zum Schirm 1,5 m beträgt und Licht mit der Wellenlänge 630 nm verwendet wird. (5 BE)

Training: aus dem Physik-Abitur

a) siehe Folie 1

$$\Delta s = b \cdot \sin \alpha = k \cdot \lambda \rightarrow \sin \alpha = \frac{k \cdot \lambda}{b}$$

$$\tan \alpha = \frac{d_k}{a}$$

Kleiwinkelnäherung:

$$\frac{k \cdot \lambda}{b} = \frac{d_k}{a} \rightarrow \lambda = \frac{b \cdot d_k}{k \cdot a}$$

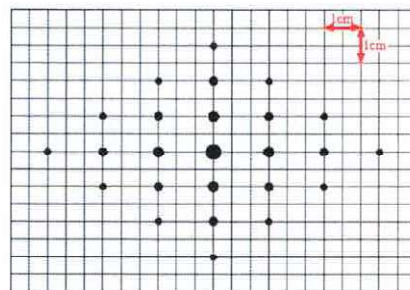
b) Gitter höher auflösend und höhere Lichtintensität

c) hier $\lambda = \text{const}$, $a = \text{const} \rightarrow b \cdot d_k = \text{const} \rightarrow b$ und d_k umgekehrt proportional

d_k verhalten sich 2:3 $\rightarrow b$ verhalten sich 3:2

b groß $\rightarrow d_k$ klein \rightarrow senkrechtes Muster \rightarrow Gitterlinien bei waagrecht

$$d) \frac{d}{a} = \frac{\lambda}{b} \rightarrow b = \frac{\lambda \cdot a}{d} = \frac{630 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot 1,5 \text{ m}}{0,01 \text{ m}} = 9,45 \cdot 10^{-5} \text{ m} = 0,09 \text{ mm}$$



Selbst-Check:

- vom Doppelspalt zum optischen Gitter
- Auflösung eines Gitters
- Rechenmethodik

Übungsmöglichkeiten:

Auf Leifiphysik gibt's unter Teilgebiet Optik - Beugung und Interferenz - Vielfachspalt und Gitter einige Abituraufgaben, die zumindest zum Teil mit den bisherigen Kenntnissen gelöst werden können. Das vermittelt Dir eine Vorstellung von den Anforderungen, die im Abitur gestellt werden.

Wir führen den Versuch der letzten Stunde nun mit dem weißen Licht einer Glühbirne durch. Da dieses im Gegensatz zu einem Laser in alle Richtungen ausgesendet wird, ist der experimentelle Aufbau etwas komplizierter. Entscheidend für uns ist aber die Geometrie hinter dem Gitter, die identisch zum Versuch mit dem Laser ist.

Wir verwenden das Gitter mit 570 Strichen pro mm bei einem Schirmabstand von 30 cm. Das erste Maximum erstreckt sich über einen Bereich von 7 cm bis 15 cm und zeigt alle Farben des Regenbogens.

- a) Bestimme damit den Wellenlängenbereich von sichtbarem Licht.
b) Kann man mit dieser Anordnung auch noch ein Maximum 3. Ordnung darstellen?

3. Ordnung:

$$\Delta s = b \cdot \sin \alpha = k \cdot \lambda$$

$$\sin \alpha = \frac{k \cdot \lambda}{b}$$

innen:

$$\sin \alpha = \frac{3 \cdot 398 \text{ nm}}{1754 \text{ nm}} = 0,68$$

$$\rightarrow \alpha = 43^\circ \text{ (vielleicht geht)}$$

außen:

$$\sin \alpha = \frac{3 \cdot 783 \text{ nm}}{1754 \text{ nm}} = 1,34 > 1$$

(tot geht nicht)

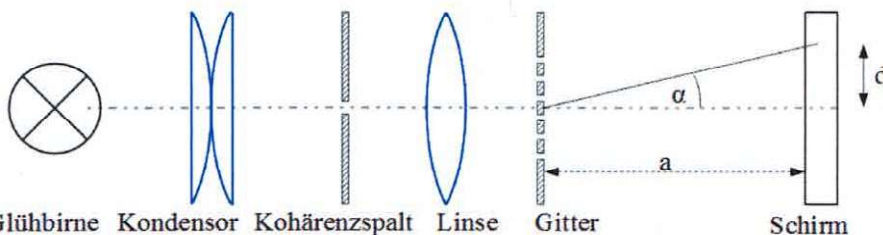
Diese Aufgabe dient als Vorbereitung einer entsprechenden Aufgabe im Praktikum.

Wir verwenden ein Gitter mit 500 Strichen pro mm, der Schirm steht 20 cm entfernt. Berechne die Positionen der 1. Maxima für die Wellenlängen von 400 nm (violett) bis 800 nm (rot) in 50 nm - Schritten (arbeite geschickt im Team).

Erstelle damit eine symmetrische Skala (mit dem 0. Maximum in der Mitte) am unteren Rand dieses Blattes.

4.6 Spektrum

Spektrale Zerlegung von weißem Licht am Gitter:



Glühbirne Kondensor Kohärenzspalt Linse Gitter Schirm

$$b = \frac{1 \text{ mm}}{570} = 1,754 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 1754 \text{ nm}$$

innere Grenze:

$$\tan \alpha = \frac{d}{a} = \frac{0,07 \text{ m}}{0,3 \text{ m}} = 0,23 \rightarrow \alpha = 13,1^\circ$$

$$\Delta s = 1 \cdot \lambda = b \cdot \sin \alpha \rightarrow \lambda = 1754 \text{ nm} \cdot \sin 13,1^\circ = 398 \text{ nm}$$

äußere Grenze:

$$\tan \alpha = \frac{d}{a} = \frac{0,15 \text{ m}}{0,3 \text{ m}} = 0,5 \rightarrow \alpha = 26,6^\circ$$

$$\lambda = 1754 \text{ nm} \cdot \tan 26,6^\circ = 783 \text{ nm}$$

Merke: sichtbares Licht von 400 nm bis 800 nm (ca.)

Beobachtung:

Bei weißem Licht ergibt jedes Maximum ein ganzes Spektrum, da sich für jede Farbe (Wellenlänge) eine andere Position d ergibt.

Praktikumsversuch:

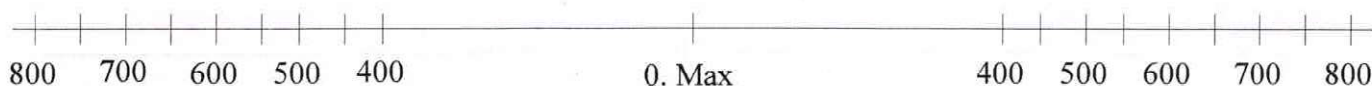
$$b = \frac{1 \text{ mm}}{500} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 2000 \text{ nm}$$

$$\Delta s = b \cdot \sin \alpha = 1 \cdot \lambda \rightarrow \sin \alpha = \frac{\lambda}{b} = \frac{400 \text{ nm}}{2000 \text{ nm}} = 0,2 \rightarrow \alpha = 11,5^\circ$$

$$\tan \alpha = \frac{d}{a} \rightarrow d = a \cdot \tan \alpha = 0,2 \text{ m} \cdot \tan 11,5^\circ = 41 \text{ mm}$$

entsprechend:

λ in nm	400	450	500	550	600	650	700	750	800
α	11,5°	13,0°	14,5°	16,0°	17,5°	19	20,5°	22,0°	23,6°
d in mm	41	46	52	57	63	69	75	81	87



Das Spektrum des sichtbaren Lichts ist nur eine kleiner Ausschnitt aus dem großen Bereich aller elektromagnetischen Wellen, der auch Funkwellen oder Röntgenstrahlung umfasst.

a) Die beiden Skalen sind logarithmisch (10er-Potenzen). Was bedeutet das konkret?

b) In welcher Weise hängen die beiden Skalen miteinander zusammen?

c) Analysiere das Diagramm im Q11-Buch auf S.177 oben und erkläre mit dessen Hilfe, warum unsere Augen nur den kleinen Bereich des sichtbaren Lichts erfassen können.

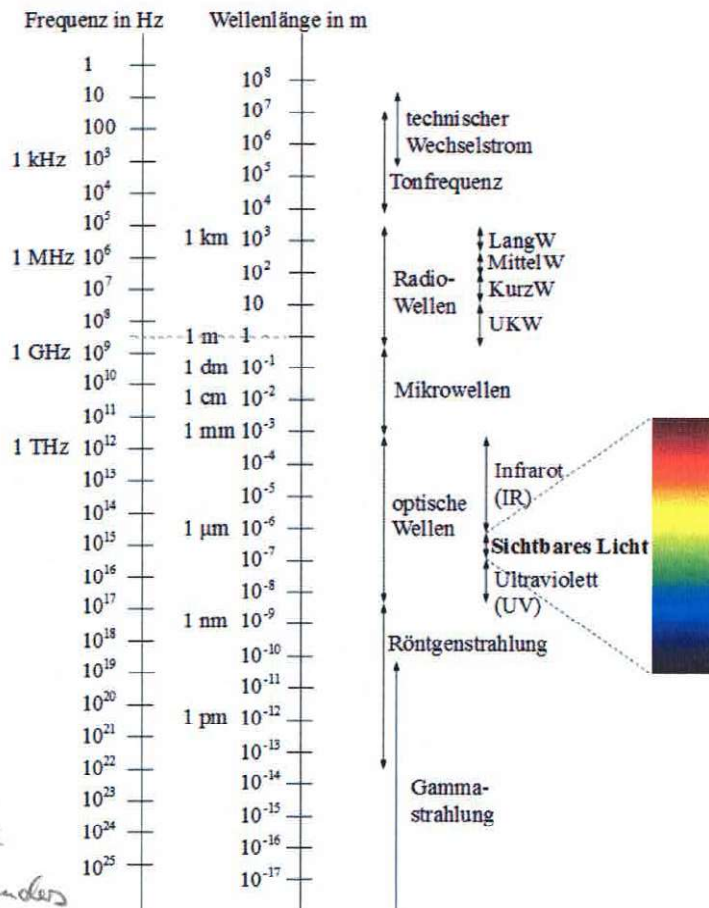
a) jeder Teilstrich vervielfacht den Wert, gleiche Abstände bedeuten Unterschiedliches

b) $c = \lambda \cdot f$

$$f = \frac{c}{\lambda}, \text{ z.B. } f = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1 \text{ nm}} = 3 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

c) Durch unsere Atmosphäre geht das sichtbare Spektrum besonders gut durch und steht deshalb für das Sehen zur Verfügung

Elektromagnetisches Spektrum:



Im folgenden ist eine Aufgabe aus dem Physikabitur 2015 verkürzt und verändert wiedergegeben (Quelle: isb.bayern.de)

Die Spektralanalyse eines farbigen Lichtstrahls ergibt das abgebildete Interferenzbild.

a) Interpretieren Sie das Interferenzmuster. (3 BE)

b) Der Schirm stand im Versuch 1,80 m hinter dem Gitter. Berechnen Sie die Wellenlänge des roten Lichts, wenn die Wellenlänge des grünen Lichts 532 nm beträgt. Begründen Sie, weshalb hier die Verwendung der Kleinwinkelnäherung nicht sinnvoll ist. (9 BE)

Training: aus dem Physik-Abitur

rot grün

gelb

grün rot

847 mm 249 mm

a) der Lichtstrahl ist gelb, dieses Licht setzt sich aus rotem und grünem Licht zusammen, durch das Gitter werden die Komponenten getrennt

b) λ unbekannt!

$$\tan \alpha_g = \frac{d_g}{a} = \frac{847 \text{ nm}}{1800 \text{ nm}} = 0,47 \rightarrow \alpha_g = 25,2^\circ$$

$$\Delta s = 1,2 = b \cdot \sin \alpha_g \rightarrow b = \frac{\lambda_g}{\sin \alpha_g} = \frac{532 \text{ nm}}{\sin 25,2^\circ} = 1249 \text{ nm}$$

$$\tan \alpha_r = \frac{d_r}{a} = \frac{847 \text{ nm} + 249 \text{ nm}}{1800 \text{ nm}} = 0,61 \rightarrow \alpha_r = 31,3^\circ$$

$$\Delta s = 1,2 = b \cdot \sin \alpha_r = 1249 \text{ nm} \cdot \sin 31,3^\circ = 650 \text{ nm}$$

Übungsmöglichkeiten:

Selbst-Check:

- Zerlegung von weißem Licht
- elektromagnetisches Spektrum
- Zerlegung von farbigem Licht

Von den Aufgabenempfehlungen des letzten Blattes auf Leifiphysik unter Teilgebiet Optik - Beugung und Interferenz - Vielfachspalt und Gitter passen in diese Stunde vor allem die Aufgaben "Spektralanalyse" und "Strahlung einer Fernbedienung". Aber wie gesagt, das sind Abituraufgaben!