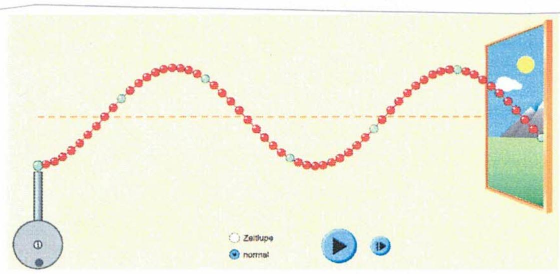
6. Wellen

6.1 Entstehung und Ausbreitung

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").

Modellexperiment



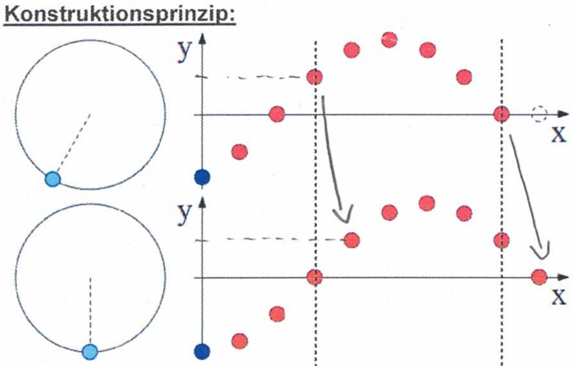
In der Simulation wird die erste Kugel der Kette durch einen rotierenden Exzenter periodisch auf- und abbewegt. Beschreibe die Welle, die sich ergibt.

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

Konstruktionsprinzip:

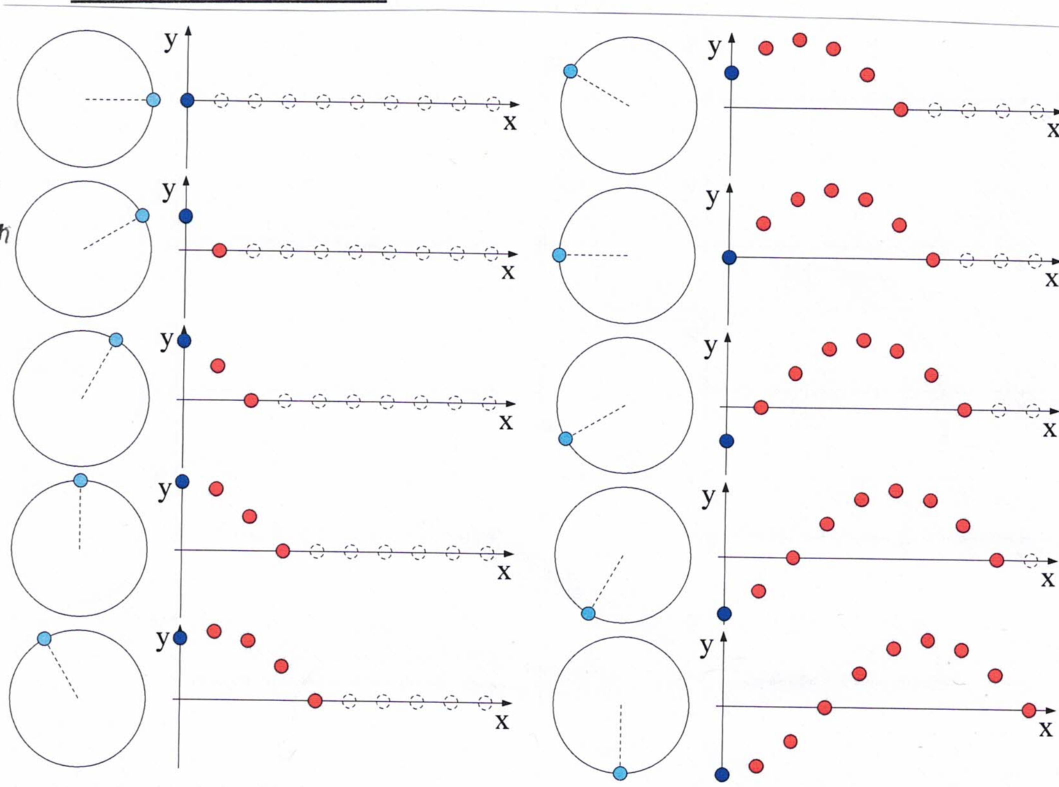
Das Konstruktionsprinzip für dieses Modell ist einfach:

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



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.

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

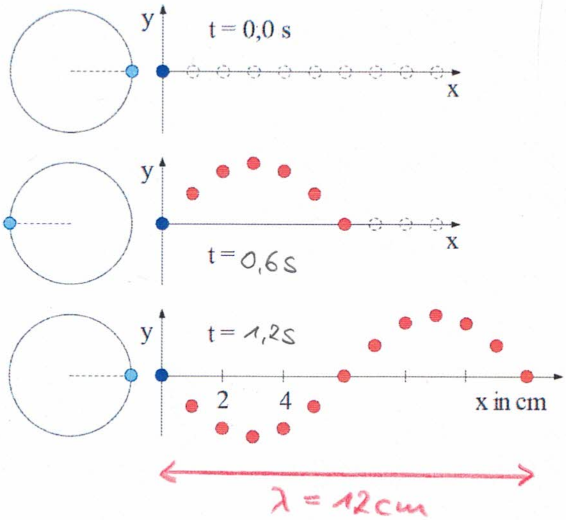
Periodendauer und Frequenz einer Welle entsprechen den Werten der erzeugenden Schwingung. Gib diese für das Beispiel an.

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

Größen bei einer Welle:

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

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



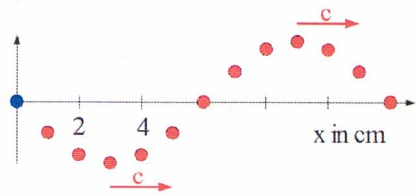
Begriff:

Der Abstand zwischen zwei Punkten mit gleichem Schwingungszustand heißt Wellenlänge λ.

Beachte:
Während sich die Geschwindigkeit der einzelnen Teilchen ständig ändert, ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle konstant. Berühmte Beispiele:
Schall: c = 330 m/s
Licht: c = 3 ·10⁸ m/s
Bestimme die Ausbreitungsgeschwindigkeit für das betrachtete Beispiel.

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.



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

Allgemein:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot \frac{1}{T} = \lambda \cdot f \qquad \boxed{c = \lambda \cdot f}$$

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 m/s entlang der Feder.
a)Berechne den Abstand zweier Berge bei dieser Welle.
b)Angenommen die Frequenz der Welle sei jetzt 5,0 Hz und die Amplitude 1,3 cm. Berechne die Strecke, die der markierte Punkt (in vertikaler Richtung) in 3,0 s zurücklegt.

Training: Wellenausbreitung an einem Federseil

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

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

$c = \lambda \cdot f$

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

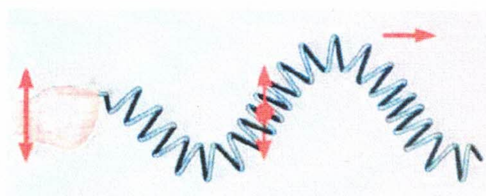


Abb. aus leiphyphysik.de

b) Punkt führt mehrere volle Schwingungen an seiner Position durch

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

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

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

Selbst-Check:
- **Schwingung und Welle**
- **Konstruktion der Wellenform**
- **Periodendauer, Frequenz und Wellenlänge**
- **Ausbreitungsgeschwindigkeit**

Übungsmöglichkeiten:

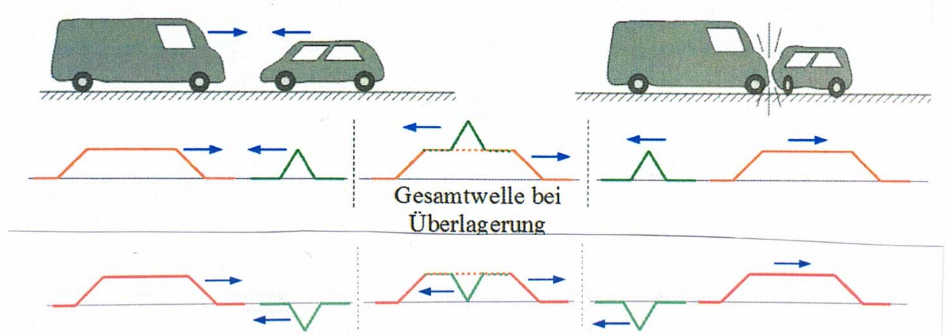
Passende Aufgaben sowie zwei Tests zum Thema findest Du auf Leifiphysik unter Teilgebiet Mechanik - Mechanische Wellen - Größen zur Beschreibung einer Welle. Auch hier reichen die leichten Aufgaben (grün).

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.

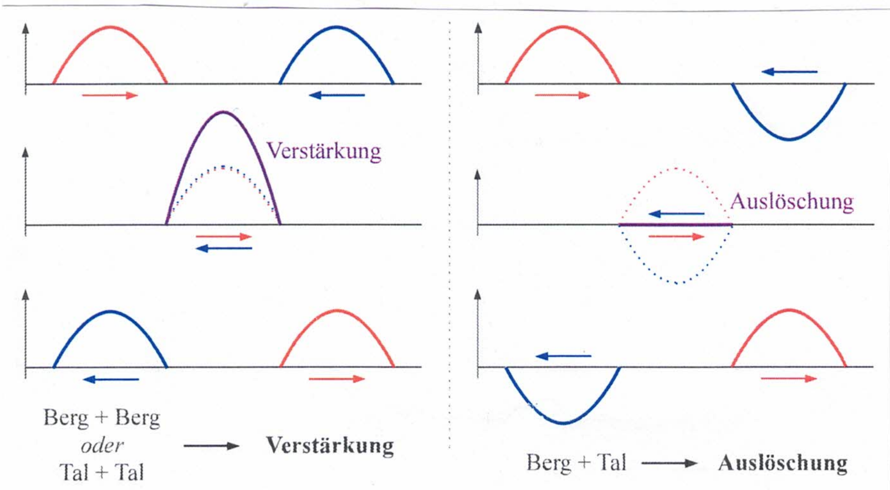
6.2 Überlagerung von Wellen - Interferenz

Wellen begegnen sich:



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.

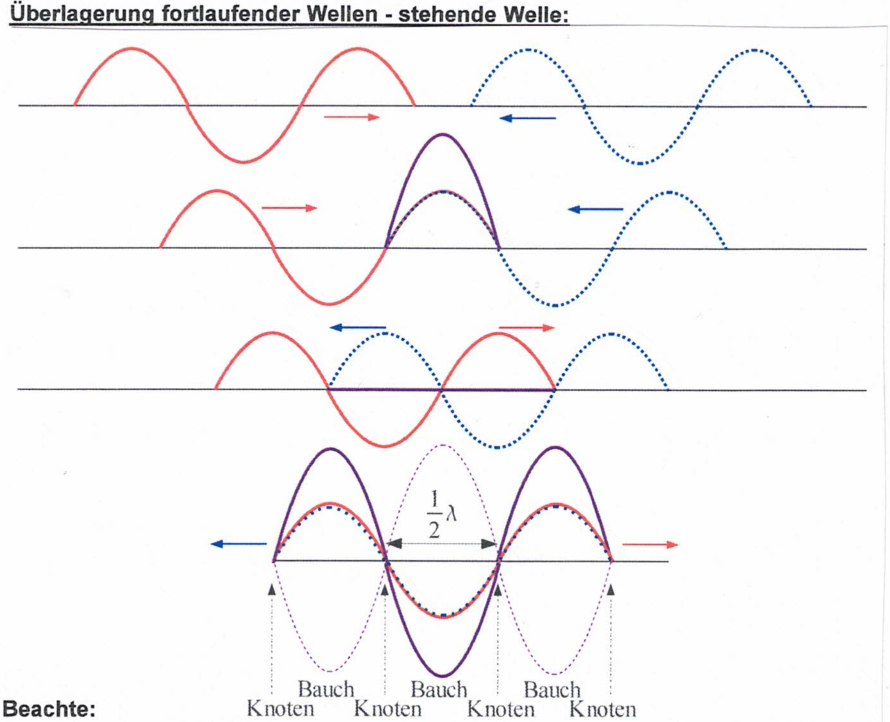
Auslöschung und Verstärkung:



In dieser Bildfolge treffen zwei längere Wellenzüge aufeinander. Zeichne für jeden Zeitpunkt die sich ergebende Gesamtwelle (in einer anderen Farbe). Finde die Gemeinsamkeit in allen Bildchen sowie den Unterschied (die Dynamik des Phänomens).

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.

Überlagerung fortlaufender Wellen - stehende Welle:



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 wohlbekannt und gefürchtet.

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.

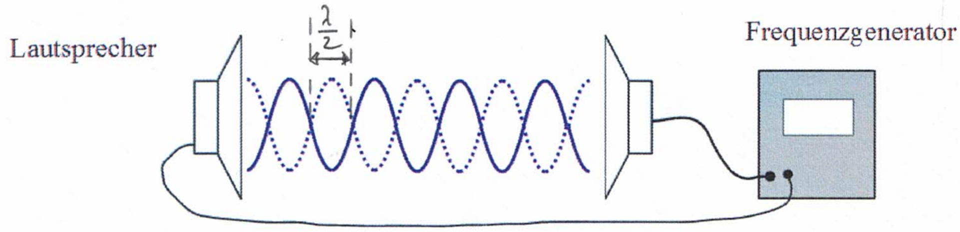
Experiment: stehende Welle mit zwei Lautsprechern

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 Q11 nutzen wir diesen Versuchsaufbau, um experimentell die Wellenlänge von Funkwellen zu messen.



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

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

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

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

Training: Sender vor Metallplatte (aus Abitur 2000 Bayern)

Folgende Aufgabe stammt aus dem bayerischen Physikabitur 2000 (etwas überarbeitet, zu holen gab's 10 BE von 60 BE für Q11):

Vor einer Metallwand M befindet sich ein Sender S, der elektromagnetische Strahlung mit 2,75 cm Wellenlänge aussendet.

a)Berechne die Sendefrequenz f.

b)Zeichne die sich ergebende Gesamtwelle vor der Metallwand (direkt an der Wand liegt ein Knoten vor). Achte auf eine passende Skalierung der x-Achse.

c) Zeichne darunter (mit gleicher Skalierung) ein Diagramm, das die Stärke des Signals darstellt, das man mit einem Empfänger E an verschiedenen Stellen auf der x-Achse vor der Wand messen kann.

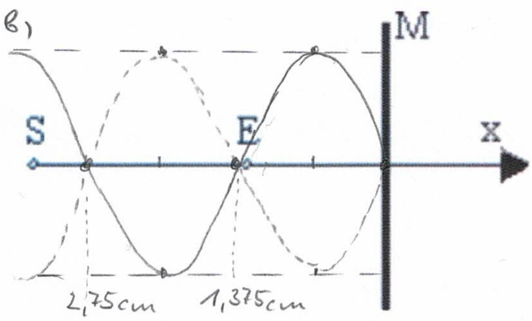
a) $c = \lambda \cdot f$

$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^{8}\,\frac{m}{s}}{0{,}0275\,m}$

$= 1{,}1 \cdot 10^{10}\,\frac{1}{s}$

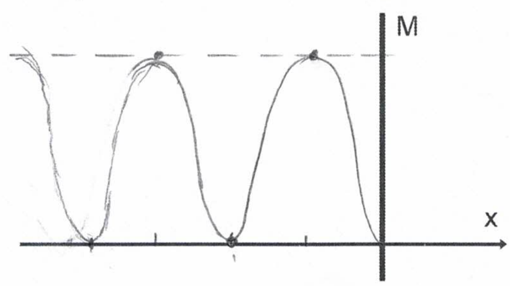
$= \underline{\underline{11\ GHz}}$

b)



c) Bauch → Empfang maximal

Knoten → Empfang null



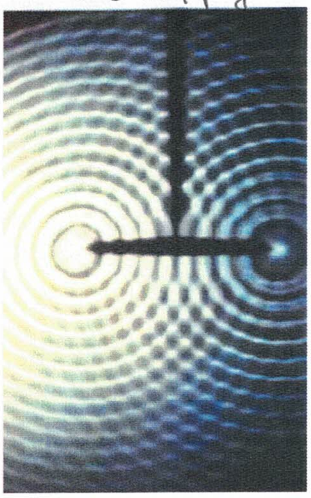
Selbst-Check:
- **Überlagerung von Wellen**
- **Auslöschung und Verstärkung**
- **stehende Welle**
- **Knoten, Bäuche**

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.

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

Abb. aus leifiphysik.de

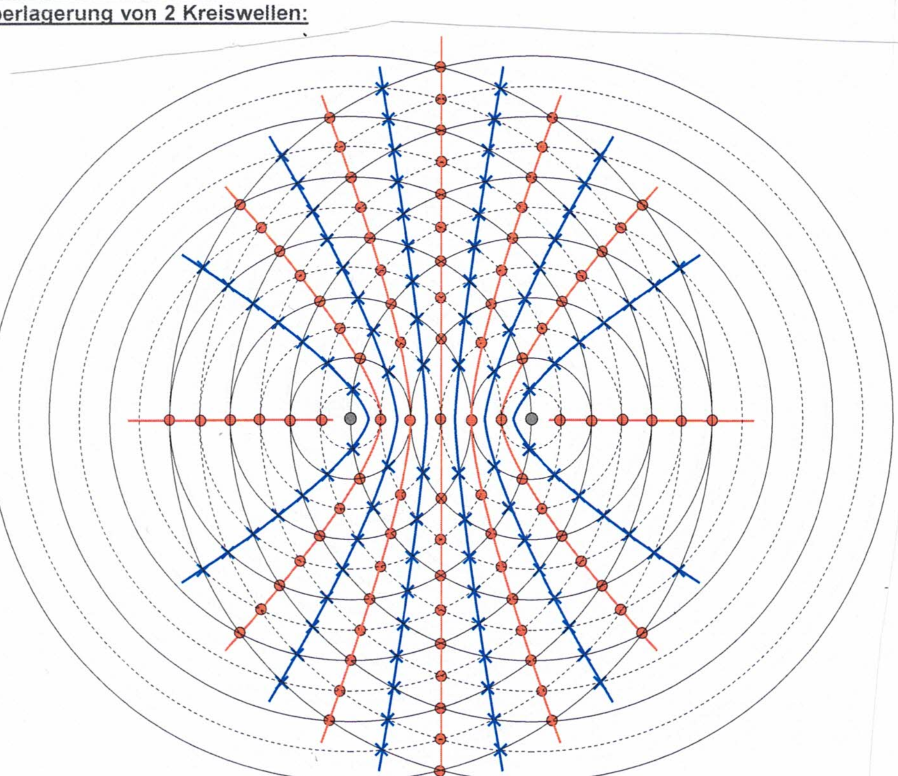


Nun tauchen zwei Tupfer E_1 und E_2 synchron ins Wasser und erzeugen permanent Wellen. Durchgezogene Linien stehen für Wellenberge, gestrichelte für -täler.

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

6.3 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).

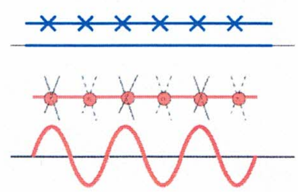
Interpretation des Interferenzmusters:

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 = λ = 0,8 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 $\Delta s = k \cdot \lambda$

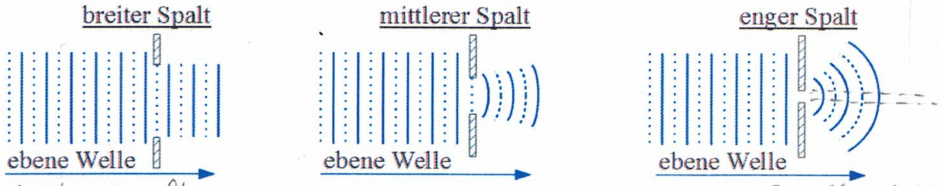
$k \in \mathbb{N}$

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

ein Vielfaches von λ plus $\frac{\lambda}{2}$ ist $\Delta s = k \cdot \lambda + \frac{\lambda}{2}$

Mit einem schienenförmigen Tupfer 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

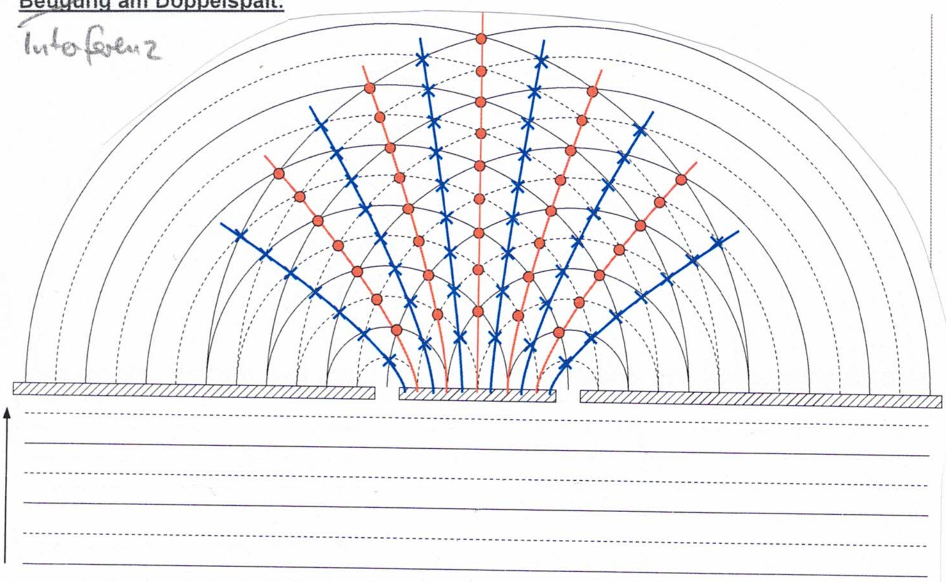
Übergang

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 Sendeantennen D_1 und D_2 strahlen Wellen gleicher Wellenlänge 3,0 cm ab. Sie haben eine 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 $\frac{\lambda}{2} = \frac{3{,}0\,cm}{2} = 1{,}5\,cm$

$c = \lambda \cdot f$

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

$= 10^{10}\,\frac{1}{s} = \underline{10\,GHz}$

b) abzählen

→ 8 Positionen auf dem Kreis

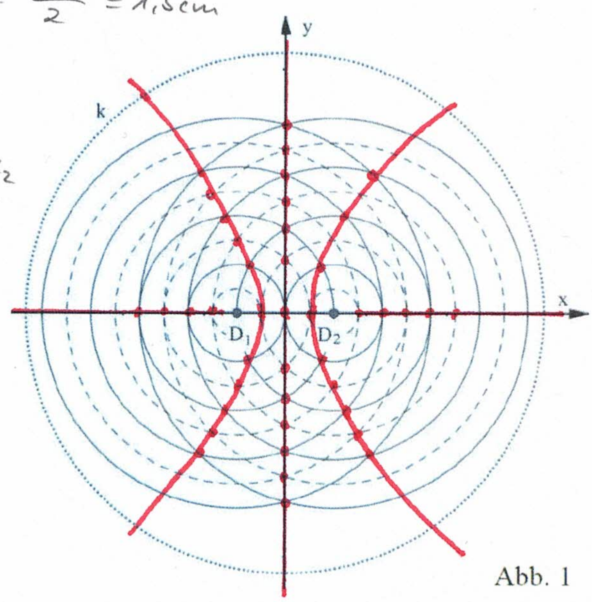


Abb. 1

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.

6.4 Interferenz bei Licht

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.

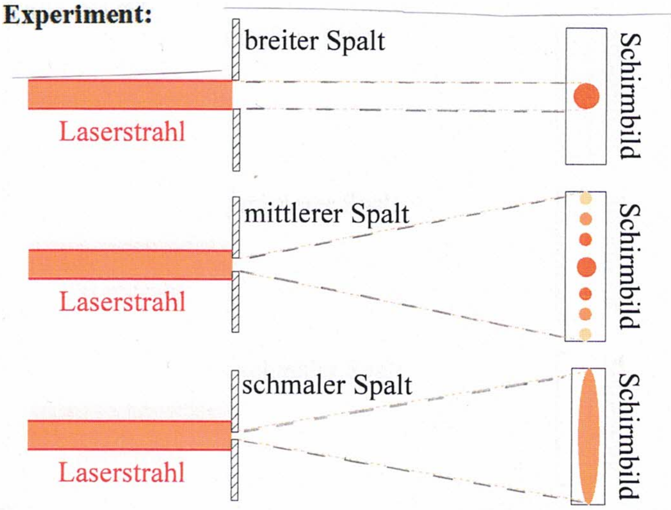
In den hier abgebildeten Experimenten entdecken wir das Phänomen "Beugung" wieder, das wir in der Wellenwanne bei Wasserwellen beobachten konnten.

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.*

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

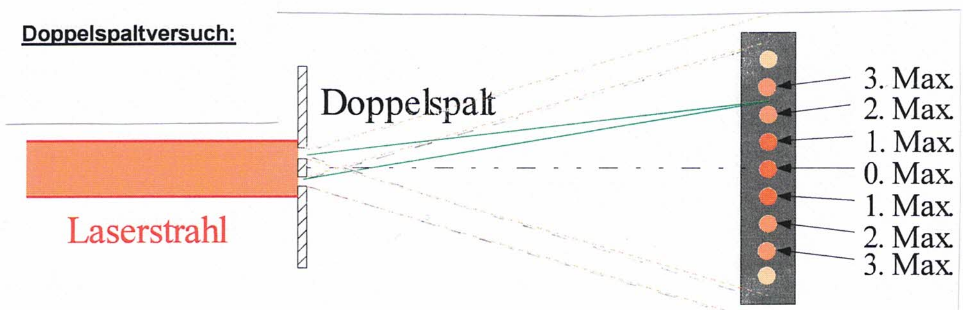
Auch bei Licht können wir an Spalten ....Beugung....... beobachten.

Die Entstehung dieses Phänomens erfordert aber ....kleine....... Spaltbreiten.

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

a) Zeichne das Schirmbild und erkläre seine Entstehung.
b) Welche Forderung ist an die Spaltbreite zu stellen?
c) 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).

$\Delta s = k \cdot \lambda \quad \rightarrow$ Verstärkung (hell)

$\Delta s = (2k+1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad \rightarrow$ 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.

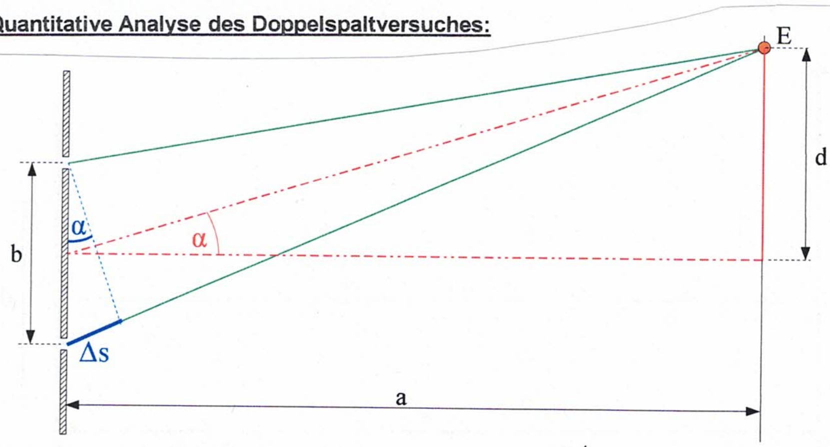
a) Zeichne die Wegstrecken ein, die das Licht von den Spalten bis zur Position E auf dem Schirm zurücklegt.
b) Ermittle graphisch den Unterschied Δs der beiden Wegstrecken durch Einzeichnen eines geeigneten Dreiecks.
c) Stelle eine Formel zur Berechnung des Wegunterschiedes auf.
d) Der Winkel taucht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

Messwerte:

d_4 = 20 mm

a = 4,0 m b = 0,5 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 ($\alpha < 10°$) gilt allgemein: $\sin\alpha \approx \tan\alpha$

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

Versuchsdaten: a = 400 cm, b = 0,5 mm
Abstand 4. Maxima = 40 mm → d = 20 mm

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

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

Der Schulversuch wird nochmal durchgeführt (nun mit a = 4,5 m und b = 0,5 mm), zunächst mit rotem Licht (λ_r = 660 nm), dann mit grünem Licht (λ_g = 440 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).

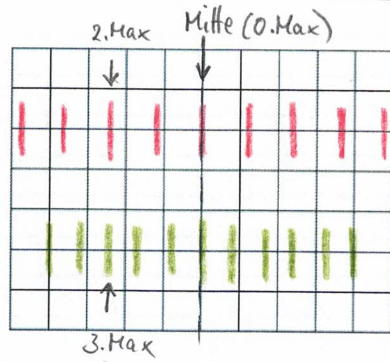
Training: Vergleichbarer Versuch

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

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

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

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



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

6.5 Optische Gitter

Vom Doppelspalt zum Gitter:

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.

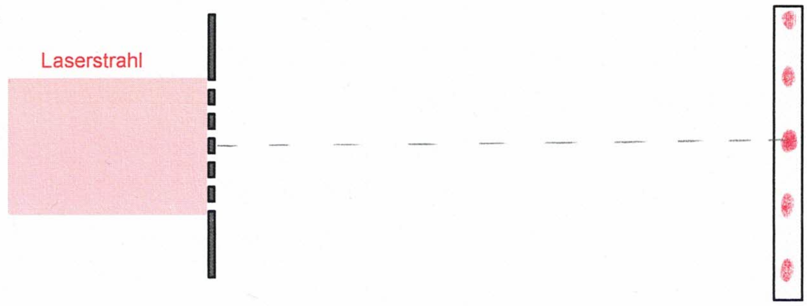
Problem		Lösung
schwache Auflösung des Interferenzmusters	→	Spaltabstand verkleinern
Spalten verschmelzen	← / →	Spaltbreite verkleinern
Interferenzmuster lichtschwach	→	Anzahl der Spalte erhöhen → Gitter

↓

hochauflösendes und lichtstarkes Interferenzmuster

Ergebnis

Experiment:

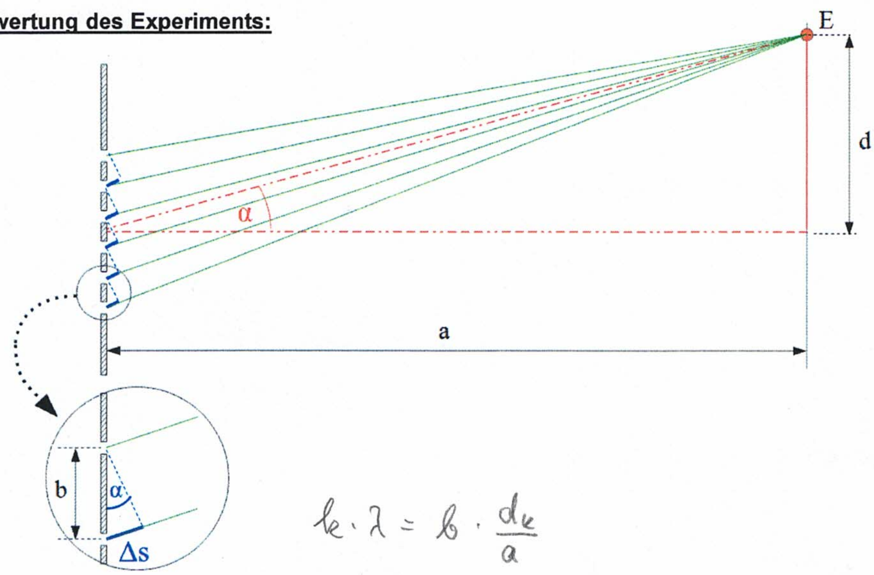


Beobachtung:

Die Maxima auf dem Schirm liegen weit auseinander .

Die Auslöschungsbereiche dazwischen sind sehr breit .

Auswertung des Experiments:



Rechentechnisch 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)**

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

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

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

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.

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

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

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

$\rightarrow \alpha = 0{,}29°$ $\rightarrow$ 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.

a) Versuche zuerst, die Position des 1. Maximums mit der Formel auf der Vorderseite zu ermitteln.

b) Berechne anschließend den Winkel für das erste Maximum aus dem kleinen Dreieck und der Interferenzbedingung.

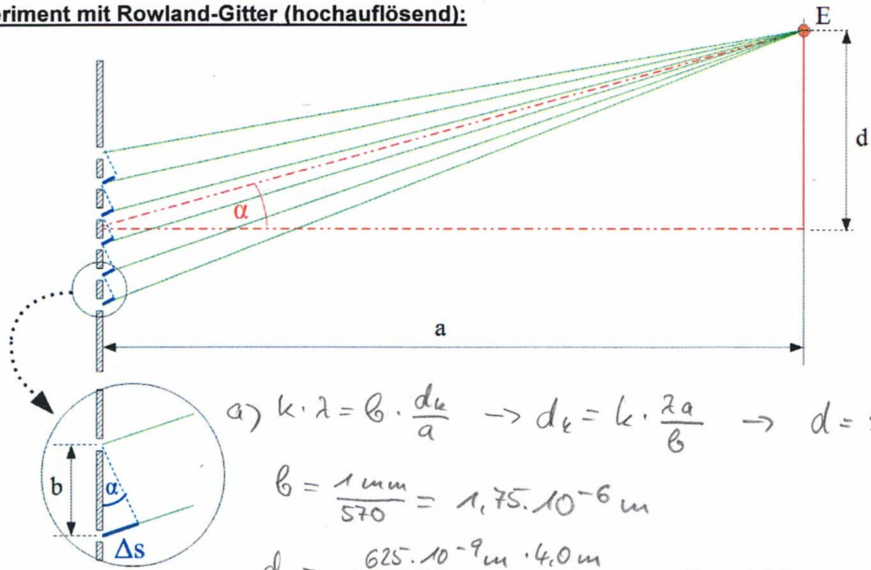
c) Berechne die Position d des 1. Maximums aus dem zuvor berechneten Winkel.

d) Vergleiche mit dem Ergebnis im Experiment.

e) Welchen Wert kann sin maximal erreichen? Ermittle daraus die höchste Ordnung eines Maximums, die mit dieser Versuchsanordnung erreicht werden kann.

Das Maximum 3. Ordnung kann nicht mehr erreicht werden.

Experiment mit Rowland-Gitter (hochauflösend):



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

$b = \frac{1\,mm}{570} = 1{,}75\cdot10^{-6}\,m$

$d = \frac{625\cdot10^{-9}\,m\cdot 4{,}0\,m}{1{,}75\cdot10^{-6}\,m} = \underline{1{,}43\,m}$

hier ist $\tan\alpha = \frac{d}{a} = \frac{1{,}43\,m}{4{,}0\,m} = 0{,}36 \rightarrow \alpha = 20° \rightarrow$ Kleinwinkelnäherung unzulässig!

b) $\Delta s = b\cdot\sin\alpha = 1\cdot\lambda$

$\sin\alpha = \frac{\lambda}{b} = \frac{625\cdot10^{-6}\,m}{1{,}75\cdot10^{-6}\,m} = 0{,}357 \rightarrow \underline{\alpha = 20{,}9°}$

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

d) Messung bestätigt c)

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

$k = \frac{b\cdot\sin\alpha}{\lambda} \leq \frac{b}{\lambda} = \frac{1{,}75\cdot10^{-6}\,m}{625\cdot10^{-6}\,m} = 2{,}8$

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

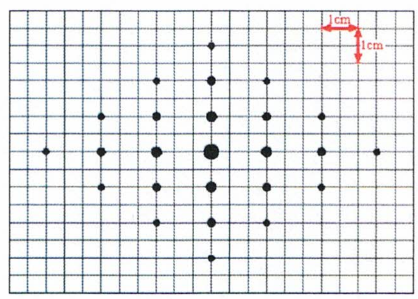
a) Beschreiben Sie einen Versuch zur Bestimmung der Wellenlänge von Laserlicht mit einem optischen Gitter. Zeigen Sie, wie man aus den Messdaten die Wellenlänge berechnet. (7 BE)

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 lagen 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

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

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

Kleinwinkelnäherung:

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

b) Gitter höher auflösend und höhere Lichtintensität

c) hier $\lambda = const$, $a = const \rightarrow b\cdot d_k = konst \rightarrow b$ und d_k indirekt proportional

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

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

d) $\frac{d}{a} = \frac{\lambda}{b} \rightarrow b = \frac{\lambda\cdot a}{d} = \frac{630\cdot10^{-9}\,m\cdot 1{,}5\,m}{0{,}01\,m} = 9{,}45\cdot10^{-5}\,m = \underline{0{,}09\,mm}$

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.

6.6 Spektrum

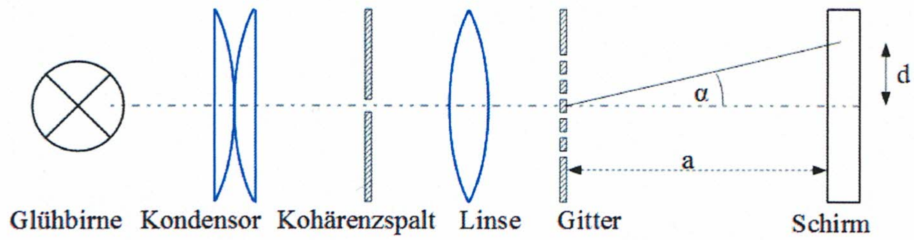
Spektrale Zerlegung von weißem Licht am Gitter:

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?



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

innere Grenze:

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

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

äußere Grenze:

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

$\lambda = 1754\,nm \cdot \tan 26{,}6° = 783\,nm$

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

3. Ordnung:

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

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

innen:

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

$\rightarrow \alpha = 43°$ (violett geht)

außen:

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

(rot geht nicht)

Beobachtung:

Bei weißem Licht ergibt jedes Maximum ein ganzes ....Spektrum.... ,

da sich für jede Farbe (Wellenlänge) eine ....andere Position d.... ergibt.

Praktikumsversuch:

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.

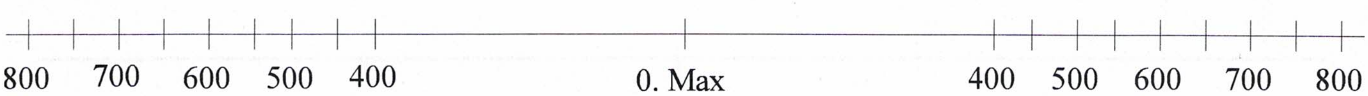
$b = \frac{1\,mm}{500} = 2 \cdot 10^{-6}\,m = 2000\,nm$

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

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

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.

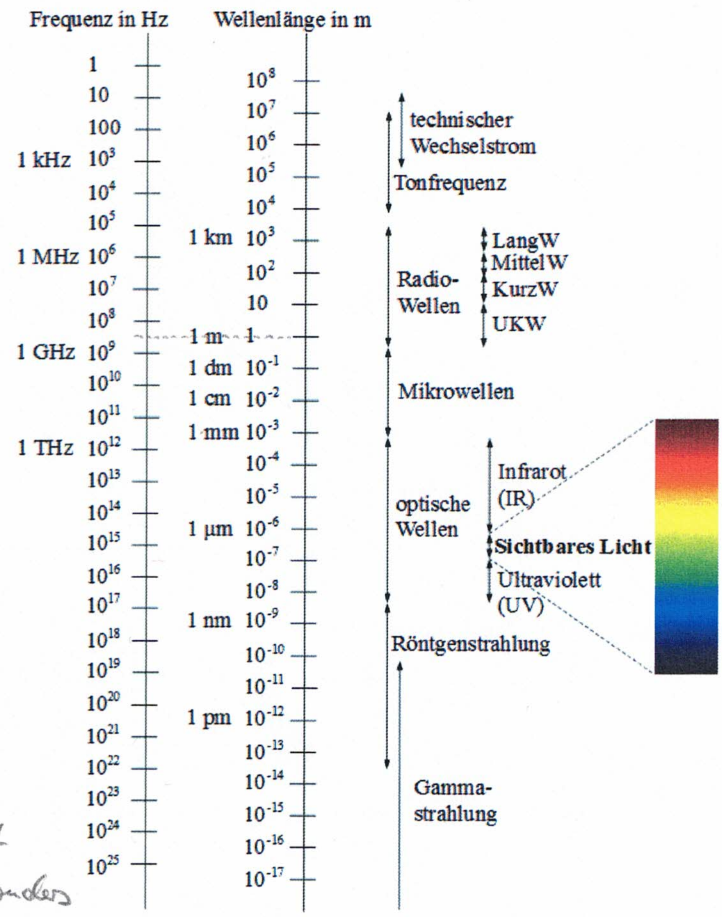
a) jeder Teilstrich verzehnfacht den Wert, gleiche Abstände bedeuten Unterschiedliches

b) $c = \lambda \cdot f$.

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

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

Elektromagnetisches Spektrum:



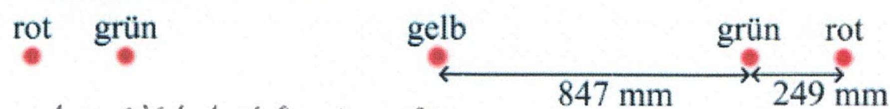
Im folgenden ist eine Aufgabe aus dem Physikabitur 2015 verkürzt und verändert wiedergegeben (Quelle isb.bayern.de)

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 mm beträgt. Begründen Sie, weshalb hier die Verwendung der Kleinwinkelnäherung nicht sinnvoll ist. (9 BE)

Training: aus dem Physik-Abitur



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

b) b unbekannt!

$\tan\alpha_g = \frac{d_g}{a} = \frac{847mm}{1800mm} = 0{,}47 \rightarrow \alpha_g = 25{,}2°$

$\Delta s = 1 \cdot \lambda = b \cdot \sin\alpha \rightarrow b = \frac{\lambda_g}{\sin\alpha_g} = \frac{532nm}{\sin 25{,}2°} = 1249\ nm$

$\tan\alpha_r = \frac{d_r}{a} = \frac{847mm + 249mm}{1800mm} = 0{,}61 \rightarrow \alpha_r = 31{,}3°$

$\Delta s = 1 \cdot \lambda_r = b \cdot \sin\alpha_r = 1249nm \cdot \sin 31{,}3° = 650\ nm$

Übungsmöglichkeiten:

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!

Selbst-Check:

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