

Fachdidaktik Physik: 2.2.2. Wellenlehre

Hans-Otto Carmesin

Gymnasium Athenaeum Stade, Studienseminar Stade

Hans-Otto.Carmesin@t-online.de

16. März 2021

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	2
2 Gliederung der UE	2
3 Unterrichtssequenz Schwingungen	8
4 Seilwellen	15
5 Wasserwellen	31
6 Interferenz bei Lichtwellen	34
7 Schallwellen	37
8 Elektromagnetische Wellen	40
9 Material	47
10 Zusammenfassung	47



Abbildung 1: Am Strand verlaufen die Wellenfronten immer parallel zur Küste. Ist das Zufall? Liegt das an der Küste, am Wind, am Wasser, am Sand oder an den Wellen? Anscheinend kann man hier viel entdecken.

1 Einleitung

Die Unterrichtseinheit Schwingungen und wellen stellt eine zentrale Grundlage für die folgenden UEs zu Quantenobjekten, Atomphysik und Kernphysik dar (s. [Gehmann \(2015\)](#); [Frenzel \(2017\)](#); [Beime u. a. \(2012\)](#); [Brüning u. a. \(2010\)](#)).

Schon Schwingungen kommen häufig in der Lebenswelt vor, etwa bei der Schaukel, der Federung des Autos, der Uhr, dem Taktgenerator des Computers, dem Schwingkreis des Handys, bei Schwingungen des Trommelfells sowie der Stimmbänder oder bei schwingenden Armbewegungen beim Laufen. Auch Wellen treten häufig in der Natur und Technik auf, etwa bei Wasserwellen, Erdbeben, Musikinstrumenten, Radiowellen, Mikrowellen, Schallwellen, Lichtwellen oder Röntgenstrahlen.

Schwingungen und Wellen werden elementar durch sinusförmige Funktionen beschrieben, die von Raum und Zeit abhängen können. Aus derartigen sogenannten harmonischen Schwingungen und Wellen können im Sinne der Fourieranalyse beliebige periodische Schwingungen und Wellen durch Superposition mit Oberschwingungen gebildet werden. Daher kommen Schwingungen und Wellen einerseits in allen physikalischen Phänomenbereichen vor und sind zugleich mathematisch völlig einheitlich strukturiert. Dennoch können relativ komplizierte Strukturen auftreten, da beliebige Superpositionen in drei Dimensionen auch zeitabhängig und mit variablen Schwingungsebenen möglich sind. Daher sind gerade in dieser UE viele Techniken der aktivierenden Veranschaulichung wichtig.

2 Gliederung der UE

Schwingungen sind zeitlich periodische Bewegungen an einem Ort. Dagegen variieren Wellen auch räumlich periodisch. Daher sind Schwingungen grundlegend für Wellen und werden als eine Unterrichtssequenz vorab behandelt.

Inhaltsbezogene Kompetenzen: SuS ...	Prozessbezogene Kompetenzen: SuS ...
<p>... stellen harmonische Schwingungen grafisch dar.</p> <p>... beschreiben harmonische Schwingungen mithilfe von Amplitude, Periodendauer und Frequenz.</p>	<p>... verwenden die Zeigerdarstellung oder Sinuskurven zur grafischen Beschreibung.</p> <p>... haben Erfahrungen im selbstständigen Umgang mit einem registrierenden Messinstrument (z.B. Oszilloskop / Interface).</p>
<p>... geben die Gleichung für die Periodendauer eines Feder-Masse-Pendels an.</p>	<p>... bestätigen (eA: und untersuchen) die zugehörigen Abhängigkeiten experimentell.</p> <p>... eA: ermitteln geeignete Ausgleichskurven.</p> <p>... wenden diese Verfahren auf andere harmonische Oszillatoren an.</p>
<p>... eA: beschreiben die Schwingung eines Feder-Masse-Pendels mithilfe von Energieumwandlungen.</p> <p>... eA: beschreiben die Bedingung, unter der bei einer erzwungenen Schwingung Resonanz auftritt.</p>	<p>... eA deuten in diesem Zusammenhang die zugehörigen t-s- und t-v-Diagramme.</p> <p>... eA: erläutern den Begriff Resonanz anhand eines Experiments.</p>
<p>... eA: beschreiben den Aufbau eines elektromagnetischen Schwingkreises.</p>	<p>... eA: beschreiben in Analogie zum Feder-Masse-Pendel die Energieumwandlungen in einem Schwingkreis qualitativ.</p> <p>... eA: beschreiben ein Experiment zur Erzeugung einer Resonanzkurve.</p> <p>... eA: ermitteln die Abhängigkeit der Frequenz der Eigenschwingung von der Kapazität experimentell anhand eines Resonanzversuchs.</p> <p>...eA: beschreiben die Funktion eines RFID-Chips als technische Anwendung von Schwingkreisen.</p>

Tabelle 1: KC zur Unterrichtssequenz Schwingungen (s. [Gehmann \(2015\)](#); [Frenzel \(2017\)](#); [Beime u. a. \(2012\)](#); [Brüning u. a. \(2010\)](#)).

Das Grundphänomen der harmonischen Welle können die SuS in einer Raumdimension kennen lernen. So können sie die mit der Wellengleichung beschriebenen Erscheinungen mit minimalem kognitiven Aufwand begreifen. Hierzu schlage ich einen ersten Schwerpunkt der Wellenlehre vor, siehe Tab. 2.

Inhaltsbezogene Kompetenzen: SuS ...	Prozessbezogene Kompetenzen: SuS ...
... beschreiben die Ausbreitung harmonischer Wellen. ... beschreiben harmonische Wellen mithilfe von T , c , λ , f , \hat{y} und ϕ geben den Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Frequenz an.	... verwenden Zeigerketten oder Sinusfunktionen zur grafischen Darstellung. ... wenden die zugehörige Gleichung an. ... begründen den Zusammenhang zwischen λ und f mithilfe der Zeigerdarstellung oder der Sinusfunktion.

Tabelle 2: KC zum Schwerpunkt Wellengleichung (s. [Gehmann \(2015\)](#); [Frenzel \(2017\)](#); [Beime u. a. \(2012\)](#); [Brüning u. a. \(2010\)](#)).

Die weiteren Abschnitte der Wellenlehre haben vielfältige gegenseitige Bedingungen in der Lernstruktur, siehe Abb. 3. Daher schlage ich einen zweiten Schwerpunkt *Strukturen bei Wellen* vor, siehe Tab. 3.

Wegen der Vielfältigen Vernetzung von Gebieten der Wellenlehre gliedere ich die Unterrichtseinheiten nach den Phänomenbereichen. Zunächst behandle ich eindimensionale Strukturen einschließlich laufender sowie stehender Wellen, Superposition und Reflexion mit völlig anschaulichen und sogar haptisch wahrnehmbaren **Seilwellen** (s. [Carmesin \(2003\)](#), [Carmesin u. a. \(2020\)](#)). Die zweidimensionalen Strukturen bieten das zusätzliche Phänomen Beugung. Ich entwickle dies einschließlich der Beugungsformel aus den **Wasserwellen**. Denn diese entstammen der Erfahrungswelt der SuS und deren wesentliche Eigenschaften sind visuell völlig erfassbar. Mit Hilfe der Beugung können die SuS die Wellennatur des Lichts entdecken. So können sie die Ergebnisse der UE Wasserwellen auf die folgende UE **Lichtwellen** übertragen.

Es folgt die UE **Schallwellen**. Denn analog zu den Lichtwellen sind auch diese wahrnehmbar und ihre Wellennatur kann aus der Beugung und Interferenz erschlossen werden. Vor allem aber können die SuS die Erzeugung von Schallwellen an Musikinstrumenten haptisch, visuell, auditiv, begrifflich als stehende Wellen und durch feindiagnostische Messverfahren nachvollziehen.

So bereitet die UE Schallwellen die nächste UE **elektromagnetischen Wellen** (EM-Wellen) vor. Denn im Unterricht werden Radiowellen ebenfalls mit Hilfe stehender Wellen erzeugt, siehe Abb. 2. Radiowellen sind für die SuS das erste begrifflich nachvollziehbare Beispiel für EM-Wellen. Denn die Lichtwelle können die SuS mit Hilfe der Beugung allenfalls ansatzweise als EM-Welle erkennen. In dieser UE werden die Phänomene Polarisation und Glanzwinkel ausführlich und mit relevanten Anwendungen bearbeitet. EM-Wellen sind besonders abstrakt, denn ihre Wellennatur ist nicht wahrnehmbar und die meisten Vertreter stellen nicht einmal einen adäquaten Reiz für einen menschlichen Sinn dar. Dennoch können die SuS EM-Wellen aufgrund der vorher behandelten Wellen experimentell und begrifflich problemlos erfassen.

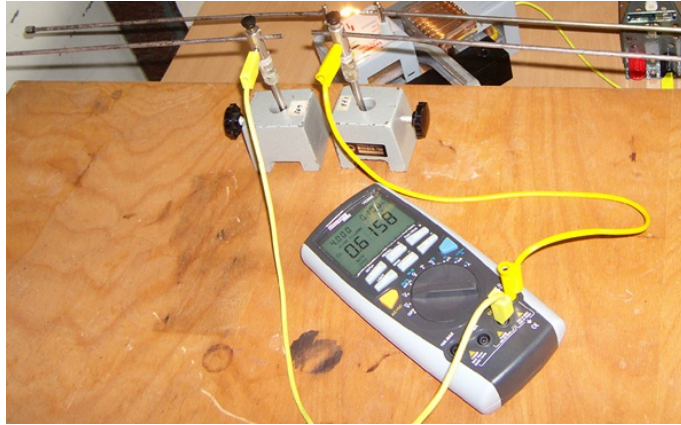


Abbildung 2: Durch überspringende Funken werden in zwei Stäben stehende elektrische Wellen erzeugt. Diese strahlen Radiowellen ab, die mit einem Radio oder einer primitiven Empfangsantenne und einem Voltmeter leicht nachweisbar sind. So können die SuS mit Hilfe der stehenden Wellen in Musikinstrumenten die Erzeugung von EM-Wellen durch grobe Analogie erfassen.

Inhaltsbezogene Kompetenzen: SuS ...	Prozessbezogene Kompetenzen: SuS ...
<p>Schwingungsebene: ... vergleichen longitudinale und transversale Wellen. ... eA: beschreiben Polarisierbarkeit als Eigenschaft transversaler Wellen.</p>	<p>... eA: untersuchen experimentell die Winkelabhängigkeit der Intensität des durchgehenden Lichts bei einem Paar von Polarisationsfiltern. ... eA: interpretieren in diesem Zusammenhang das Quadrat der Zeigerlänge bzw. das Quadrat der Amplitude der zugehörigen Sinuskurve als Intensität. ... eA: stellen Bezüge zwischen dieser Kenntnis und Beobachtungen an einem LC-Display dar.</p>
<p>... beschreiben und deuten Interferenzphänomene für folgende Zwei-Wege-Situationen: - eA: stehende Welle, - Doppelspalt und Gitter, - Michelson-Interferometer, ... eA: deuten die Schwebung als Überlagerung zweier Wellen unterschiedlicher Frequenz an einem Detektor. ... eA: beschreiben und deuten Interferenz bei der Bragg-Reflexion.</p>	<p>... verwenden die Zeigerdarstellung oder eine andere geeignete Darstellung zur Beschreibung und Deutung (gA: der aus dem Unterricht bekannten Situationen). ... erläutern die Veränderung des Interferenzmusters beim Übergang vom Doppelspalt zum Gitter.</p>
<p>... eA: erläutern ein Experiment zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in Luft.</p>	<p>... wenden ihre Kenntnisse über Interferenz auf die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in einem Medium an.</p>
<p>... beschreiben je ein Experiment zur Bestimmung der Wellenlänge von - eA: Ultraschall bei stehenden Wellen - Schall mit zwei Sendern, - Mikrowellen mit dem Michelson-Interferometer, - weißem und monochromatischem Licht mit einem Gitter (objektiv / eA: subjektiv), - eA: Röntgenstrahlung mit Bragg-Reflexion.</p>	<p>... werten entsprechende Experimente angeleitet aus. ... leiten die Gleichung für die Interferenz am Doppelspalt (gA: vorstrukturiert/ eA: selbständig) und begründet her. ... eA: wenden das Vorgehen auf Experimente mit anderen Wellenarten an. ... beschreiben die Funktion der zugehörigen optischen Bauteile (gA: auf der Grundlage einer vorgegebenen Skizze). ... eA: wenden ihre Kenntnisse zur Bestimmung des Spurabstandes bei einer CD/DVD an. ... eA: erläutern ein Verfahren zur Strukturuntersuchung als technische Anwendung der Bragg-Reflexion.</p>

Tabelle 3: KC zum Schwerpunkt Strukturen bei Wellen (s. [Gehmann \(2015\)](#); [Frenzel \(2017\)](#); [Beime u. a. \(2012\)](#); [Brüning u. a. \(2010\)](#)).

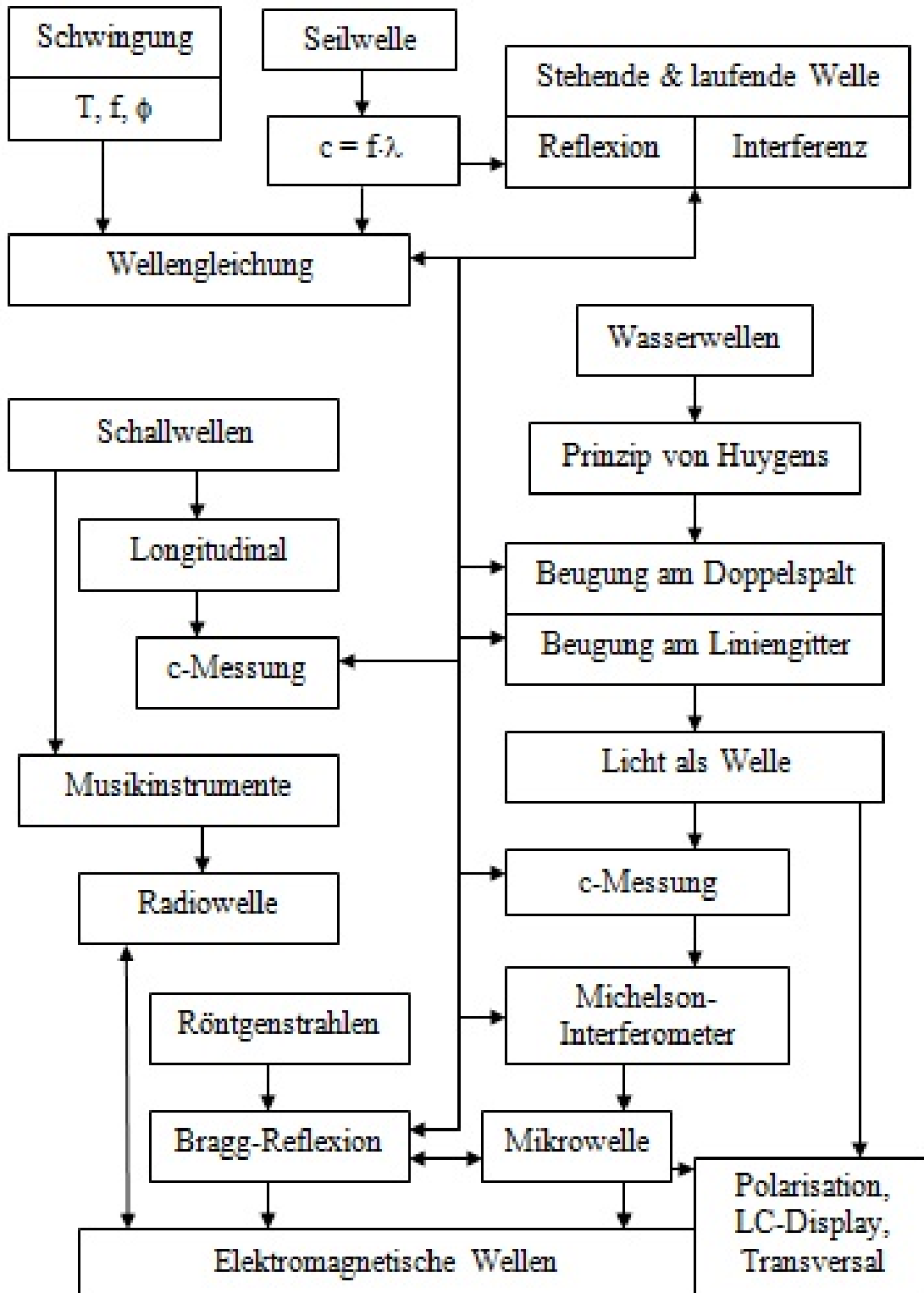


Abbildung 3: Lernstruktur: Zeilen 1-3: Grundlegende Welleneigenschaften entwickelt am Beispiel der Seilwelle. Zeilen 4 bis 11: Verallgemeinerung der grundlegenden Eigenschaften auf drei Dimensionen, Behandlung verschiedener Wellentypen, Experimentierverfahren und Anwendungen. Unterste Zeile: Viele der behandelten Wellen sind elektromagnetischen Wellen.

3 Unterrichtssequenz Schwingungen

In dieser Unterrichtssequenz schlage ich den Einstieg über den für SuS interessanten Bungeesprung vor. Wegen der großen technischen Bedeutung und zur Vorbereitung der folgenden Radiowellen schlage ich als weiteres Beispiel den Schwingkreis vor. Die SuS können die Strukturgleichheit gut erkennen, wenn sie zunächst die Rückstellkraft und weiterhin eine Energieanalyse behandeln.

Nr.	Stundenthema	Stundenlernziel
1	Untersuchung einer Schwingung beim Bungeesprung	Die SuS sollen eine Schwingung beim Bungeesprung experimentell, zeichnerisch und rechnerisch untersuchen können.
2	Anwendungen von Federpendeln	Die SuS sollen ihre Kenntnisse vom Bungeesprung auf andere Federpendel übertragen können.
3	Einführung des Schwingkreises	Die SuS sollen die Funktionsweise des Schwingkreises erläutern sowie die Schwingungsgleichung herleiten und anwenden können.
4	Entdeckung des Energieverlaufs bei Oszillatoren	Die SuS sollen die Verläufe der Energieformen beim Schwingkreis und beim Federpendel herleiten können.

Tabelle 4: Stundenabfolge zur Unterrichtssequenz Schwingungen

Hier präsentiere ich die grundlegende und methodisch sehr reichhaltige Einstiegsstunde zum Bungeesprung.

Kurzentwurf für eine Physikstunde

Athenaeum

PH EN 12

Thema der Unterrichtseinheit: Schwingungen**Untersuchung einer Schwingung beim Bungeesprung**

Didaktik: SLZ: Die SuS sollen eine Schwingung beim Bungeesprung experimentell, zeichnerisch und rechnerisch untersuchen können.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
LV: $F = m \cdot a = m \cdot h''$	Erläutern, Anwenden
LV: $F = m \cdot g$	Erläutern, Anwenden
LV: $F = D \cdot s$	Erläutern, Anwenden
TLZ: Schwingung, Kosinusform, Periodendauer T	Beschreiben, Experimentelles Begründen
TLZ: Simulation mit Excel	Durchführen, Auswerten
TLZ: $T \sim (M/D)^{0,5}$	Herleiten

Methodik: Dominantes Lehrverfahren: Problemlösend

Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
7	<u>Hinführung:</u> Bungeesprung	Beschreiben, Folie	LSG
10	<u>Problemstellung:</u>	Leitfrage entwickeln	LSG
20	<u>Analyse:</u> Ideen, s.u.	Vermuten, Entwickeln, Planen	MuG, LSG
60	<u>Lösung:</u> SE, Simulation, Herleitung,	LH, binnendifferenziert, AB	GA, TD
80	<u>Sicherung:</u> s.u., Rückkopplung, Reflexion	OHP, SE, GTR	SV
90	<u>Festigung:</u> AB2	Evtl. HA	EA

Geplanter TA

Trifft Mickey am Boden auf? Wie verläuft die Höhe $h(t)$ bei Mickey's Bungeesprung?

Lösungsideen: Versuch: Ultraschallsensor, GTR

Rechnen: $F = M \cdot a$; $F = M \cdot g$; $F = D \cdot s$; $s = 2m - h$; $F = M \cdot h'' = -M \cdot g + D \cdot (2m - h)$

Ergebnisse:

Langfristig stellt sich die sogenannte Ruhelage bei $h = 1,07m$ ein.

Anfangs verläuft $h(t)$ periodisch und Kosinus-förmig.

Der höchste Punkt ist bei $2m$. Der tiefste Punkt ist bei $0,12m$.

Bezeichnungen: Der Abstand von der Ruhelage zum höchsten Punkt heißt Auslenkung.

Ist die Auslenkung eine Kosinus-förmige Funktion der Zeit, so liegt eine harmonische Schwingung vor. Die größte Auslenkung heißt Amplitude.

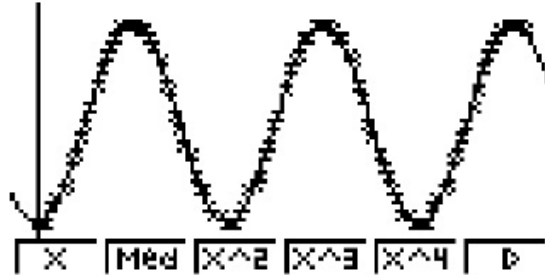
Schülerfolien:

Experimentalgruppen:

Beobachtung: $h(t)$ verläuft anfangs Kosinus-förmig.

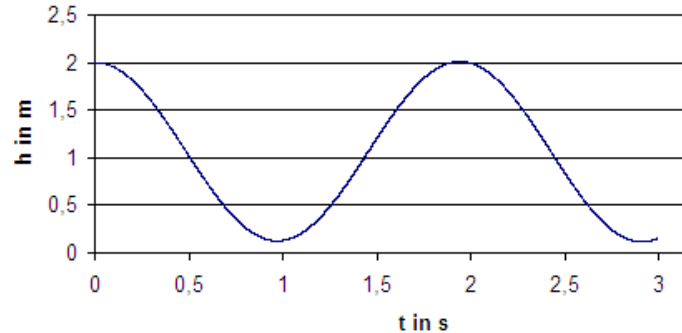
Langfristig kommt $h(t)$ zur Ruhe bei $h = 1,05\text{m}$.

Die Periodendauer beträgt $T = 1,95\text{ s}$



Simulationsgruppen:

Bungeesprung mit $dt = 0,001\text{ s}$



Herleitungsgruppen:

Berechnung der Ruhelage: $F_G = F_{\text{Spann}}$

$$M \cdot g = D \cdot (2\text{m} - h)$$

$$\text{Ruhelage: } h_0 = - M \cdot g / D + 2\text{m} = 1,07\text{m}$$

$$\text{Auslenkung: } y = h - h_0$$

$$M \cdot h'' = M \cdot y'' = - M \cdot g + D \cdot (2\text{m} - y - 2\text{m} + Mg/D) = - D \cdot y$$

$$y'' = - D/M \cdot y$$

$$\text{Ansatz: } y = \hat{y} \cdot \cos(\omega t)$$

$$\rightarrow y'' = -\hat{y} \omega^2 \cdot \cos(\omega t)$$

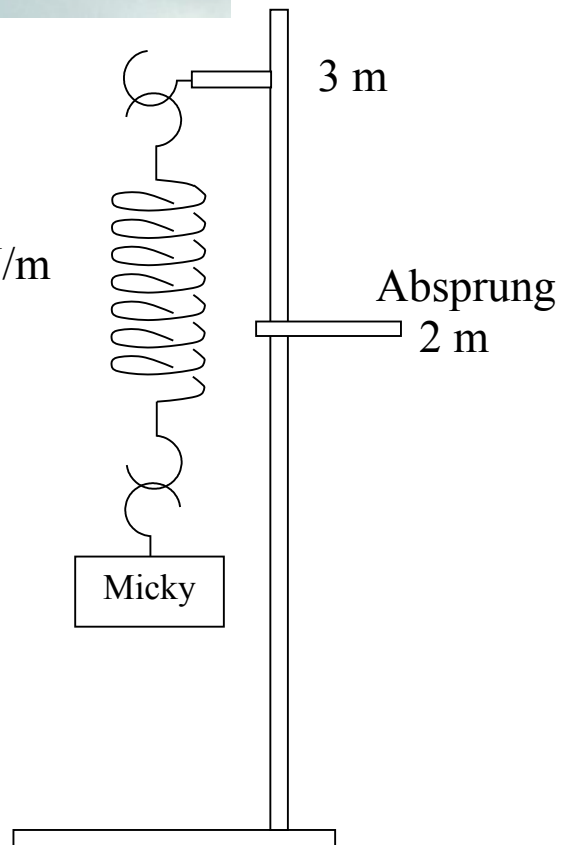
$$\rightarrow -\hat{y} \omega^2 \cdot \cos(\omega t) = -D/M \hat{y} \cdot \cos(\omega t) \quad | : [-\hat{y} \cdot \cos(\omega t)]$$

$$\rightarrow \omega^2 = D/M \rightarrow \omega = \sqrt{\frac{D}{M}} \rightarrow T = 2\pi / \sqrt{\frac{D}{M}} = 1,94\text{ s}$$

Einstiegsfolie



$D = 10,5 \text{ N/m}$
 $M = 1 \text{ kg}$



Simulation zum Bungeesprung

Herleitung von Differenzgleichungen

$$M \cdot h'' = -M \cdot g + D \cdot (2m - h) \quad | : M$$

$$h'' = -g + D/M \cdot (2m - h) = v' = \Delta v / \Delta t \quad | \cdot \Delta t$$

$$\Delta v = -g \cdot \Delta t + D/M \cdot (2m - h) \cdot \Delta t$$

analog: $\Delta h = v \cdot \Delta t$

Umsetzung in EXCEL

Wir geben die nötigen Konstanten ein und definieren deren Namen.

The screenshot shows the Excel interface with the 'Name' menu option selected. The spreadsheet contains the following data:

	A	B	C
1	D	10,5	
2	g	9,81	
3	dt	0,1	
4			
5			
6			
7			

The 'Namen definieren' dialog box is open, showing the 'Namen in der Arbeitsmappe:' field with 'D' entered.

Bestätige mit OK

Wir geben die Anfangswerte für $t = 0$ ein und berechnen die nächste Zeile mit Formeln

MITTELWERT	X	✓	=	=A6+dt	MITTELWERT	X	✓	=	=B6-g*dt+D*(2-C6)*dt		
	A	B	C	D		A	B	C	D	E	F
1	D	10,5			1	D	10,5				
2	g	9,81			2	g	9,81				
3	dt	0,1			3	dt	0,1				
4					4						
5	t	v	h		5	t	v	h			
6	0	0	2		6	0	0	2			
7	=A6+dt				7	0,1	=C6*dt				

MITTELWERT	X	✓	=	=C6+B6*dt	
	A	B	C	D	E
1	D	10,5			
2	g	9,81			
3	dt	0,1			
4					
5	t	v	h		
6	0	0	2		
7	0,1		=C6+B6*dt		

Wir berechnen die weiteren Zeilen wie folgt:

- Wir stellen den Zeiger über A7 und drücken die linke Maustaste.
- Wir ziehen den Zeiger bis C7 und lassen erst dann die linke Maustaste los.
- Jetzt ist die Zeile 7 wie folgt markiert.

6	0	0	2
7	0,1	-0,981	2

- Wir bewegen den Zeiger über die rechte untere Ecke des markierten Rechtecks, bis ein Kreuz erscheint.
- Dann drücken wir die linke Maustaste und ziehen die Ecke eine Zeile nach unten, erst jetzt lassen wir die Maustaste los. So erscheint die Zeile 8 wie folgt.

6	0	0	2
7	0,1	-0,981	2
8	0,2	-1,962	1,9019

- Wir wiederholen das herunterziehen, bis die Zeilen 9 und 11 erscheinen:

5	t	v	h
6	0	0	2
7	0,1	-0,981	2
8	0,2	-1,962	1,9019
9	0,3	-2,84	1,7057
10	0,4	-3,512	1,4217
11	0,5	-3,886	1,0705

Wir zeichnen den Graphen für h(t)

- Wir markieren wie oben die Zeiten in den Zellen a6 bis a11.
- Wir drücken die Ctrl-Taste und gleichzeitig die c-Taste.
- Wir halten die Ctrl-Taste gedrückt.
- Wir markieren wie oben die Orte in den Zellen c6 bis c11.
- Wir drücken die c-Taste. Dann sieht unsere Tabelle so aus:

5	t	v	h
6	0	0	2
7	0,1	-0,981	2
8	0,2	-1,962	1,9019
9	0,3	-1,913	1,7057
10	0,4	0,1962	1,5144
11	0,5	4,3139	1,534

- Wir drücken den Button mit den bunten Säulen.
- Im Menu drücken wir „Punkt(XY)“.

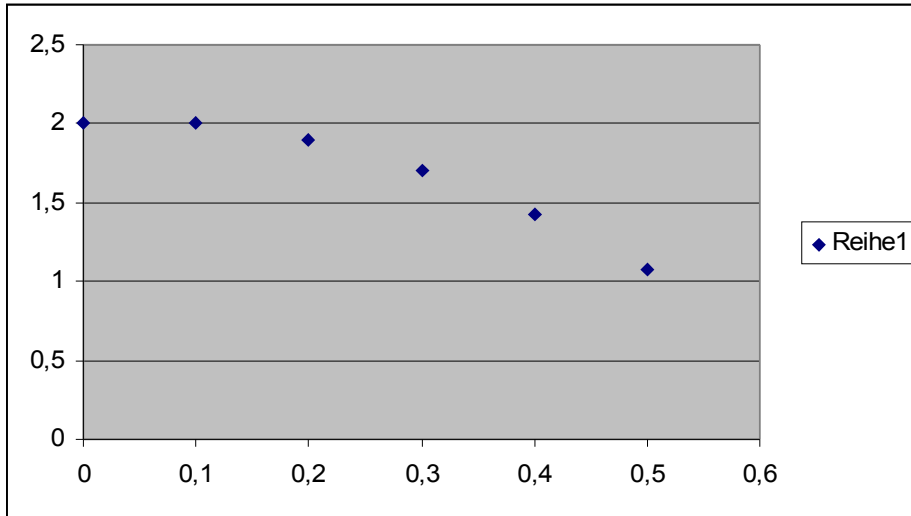
The screenshot shows a spreadsheet with the following data:

2	g	9,81	
3	dt	0,1	
4			
5	t	v	h
6	0	0	2
7	0,1	-0,981	2
8	0,2	-1,962	1,9019
9	0,3	-2,84	1,7057
10	0,4	-3,512	1,4217
11	0,5	-3,886	1,0705
12			
13			

The 'Diagramm-Assistent' dialog box is open, showing 'Standardtypen' and 'Benutzerdefinierte Typen' tabs. Under 'Standardtypen', 'Punkt (XY)' is selected. Under 'Diagrammuntertyp', a scatter plot icon is selected.

- Wir wählen die Linie mit Punkten sowie „Fertig stellen“:

Wir zeichnen den Graphen für $h(t)$



Untersuchen Sie längere Zeitintervalle und verbessern Sie die Genauigkeit durch Verkleinern von dt .

Herleitung zum Bungeesprung

- 1) Berechnen Sie die Höhe h_0 , bei der Mickey in Ruhe hängt. Das heißt $h'' = 0$.
Ersatzlösung: $h_0 = -M \cdot g/D + 2m = 1,07\text{m}$. Diese Höhe nennt man Ruhelage.
- 2) Ersetzen Sie die Variable Höhe $h(t)$ durch die Abweichung von der Ruhelage:
Auslenkung: $y = h - h_0$. Diese Abweichung heißt Auslenkung. Zeigen Sie, dass für die Auslenkung gilt: $y'' = -D/M \cdot y$
- 3) Machen Sie den Ansatz: $y = \hat{y} \cdot \cos(\omega t)$. Setzen Sie diesen Ansatz in die Differentialgleichung ein und bestimmen Sie die Kreisfrequenz ω . Hinweis: Das Verfahren ähnelt der Herleitung zum Entladen des Kondensators.

4 Seilwellen

Zur Einführung von Seilwellen schlage ich das ästhetische Beispiel des Kontrabasses vor. Denn hier kann man die Bewegung der Saite wegen der niedrigen Frequenzen noch visuell erkennen und zugleich haptisch und auditiv erfassen. Die SuS können mit 5 m langen strukturgleichen Schraubenfedern in Ruhe mit der Stoppuhr experimentieren und die Ausbreitungsgeschwindigkeit über einen motivierenden kognitiven Konflikt entdecken.

Zur Entwicklung der zentralen Wellengleichung schlage ich die Wellenfeldsynthese vor. Diese toppt die Stereophonie sowie die Quadrophonie und ist daher für Jugendliche attraktiv. Die additive Überlagerung von Wellen können die SuS am Beispiel der Analyse einer Monsterwelle experimentell am Modell überprüfen. Mit diesen Kenntnissen können die SuS stehende Wellen als überlagerte laufende Wellen deuten.

Nr.	Stundenthema	Stundenlernziel
1	Einführung von Seilwellen beim Kontrabass	Die SuS sollen die Seilwelle beim Kontrabass beschreiben sowie deren Wellenlänge und Frequenz erläutern und bestimmen können.
2	Entdeckung der Proportionalität von Wellenlänge und Periodendauer	Die SuS sollen die Proportionalität erläutern und experimentell begründen können.
3	Entdeckung der Ausbreitungsgeschwindigkeit	Die SuS können ihre Entdeckung der Ausbreitungsgeschwindigkeit bei einer Seilwelle erläutern und experimentell begründen.
4	Entwicklung der Wellengleichung an der Wellenfeldsynthese (WFS)	Die SuS sollen Wellengleichung begründen und anwenden können.
5	Entdeckung der Überlagerung von Wellen	Die SuS sollen die additive Überlagerung von Wellen begründen können.
6	Deutung der stehenden Welle als Überlagerung	Die SuS sollen Entstehung der stehenden Welle durch Überlagerung experimentell und rechnerisch begründen können.

Tabelle 5: Unterrichtssequenz Seilwellen

Da diese Unterrichtssequenz sehr grundlegend für die Wellenlehre ist, präsentiere ich Kurzentwürfe für die ersten fünf Stunden.

Kurzentwurf für eine Physikstunde

Athenaeum

PH EN 11

Thema der Unterrichtseinheit: Wellen**Einführung von Seilwellen beim Kontrabass**

Didaktik: SLZ: Die SuS sollen die Seilwelle beim Kontrabass beschreiben sowie deren Wellenlänge und Frequenz erläutern und bestimmen können.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
LV: Periodendauer, Frequenz	Erläutern, Messen
LV: Kontrabass, Funktionsweise	Beschreiben, Erläutern mit Alltagswissen
TLZ: Seilwelle, Schraubenfeder	Beschreiben, Darstellen, Anregen
TLZ: Periodendauer beim Kontrabass	Erläutern, Messen
TLZ: Wellenlänge beim Kontrabass	Erläutern, Messen

Methodik: Dominantes Lehrverfahren: Interaktiv erarbeitend

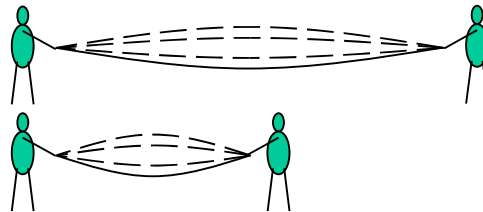
Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
5	<u>Hinführung:</u> Kontrabass	Beschreiben	LSG
7	<u>Aufgabenstellung:</u> Seilwelle	Skizzieren, Leitfrage entwickeln	LSG
20	<u>Erarbeitung:</u> Bewegung, Kontrabass und Modellversuch mit Seil	SE, Messung von λ , T	GA
30	<u>Sicherung:</u> s.u.	SV, Reflexion, Rückkopplung	SV
45	<u>Festigung:</u> AB		EA

Geplanter TA

Wie können wir beim Kontrabass einen um eine Oktave höheren Ton spielen?

Lösungsideen: Frequenz verdoppeln, Länge halbieren, Oszilloskop, Lineal

Versuchsskizze:

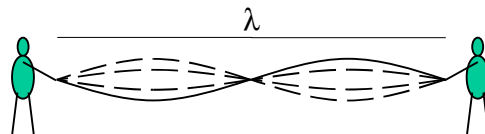


Versuchsdurchführung: Beim Kontrabass messen wir die Wiederholdauer T, indem wir den Ton mit einem Mikrofon aufnehmen und im Oszilloskop T bestimmen. Die Frequenz ist $f=1/T$. Beim Seil messen wir T mit der Stoppuhr.

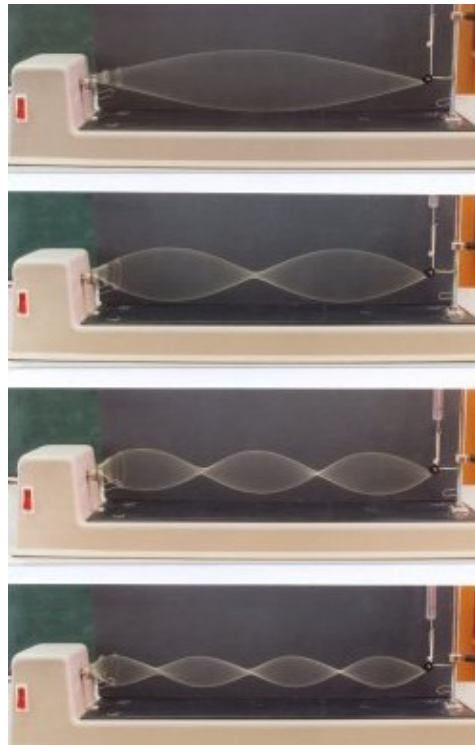
Ergebnis: Halbieren wir die Seillänge, so verdoppelt sich die Frequenz.

Bezeichnungen: Die Wiederholstrecke heißt Wellenlänge λ .

Diese räumliche und zeitliche Bewegung bei der Saite und beim Seil heißt Seilwelle.



Ein Seil der Länge 0,5 m wird zu vier Seilschwingungen angeregt. Bestimmen Sie die Wellenlängen!



Bestimmen Sie die Anzahl der Wellenbäuche bei den beiden Seilwellen am Kontrabass!





Kurzentwurf für eine Physikstunde

Athenaeum

PH EN 11

Thema der Unterrichtseinheit: Wellen

Einführung von Seilwellen beim Kontrabass

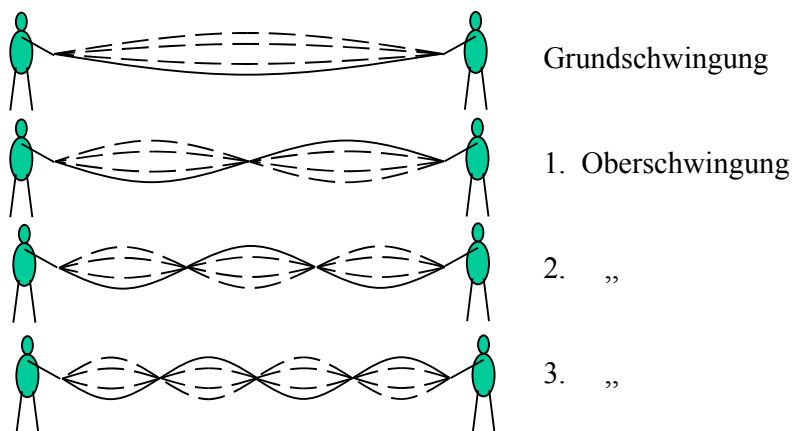
Entdeckung der Proportionalität von Wellenlänge und Periodendauer**Didaktik:** SLZ: Die SuS sollen die Proportionalität erläutern und experimentell begründen können.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
LV: Periodendauer beim Kontrabass und Seil	Erläutern, Messen
LV: Wellenlänge beim Kontrabass und Seil	Erläutern, Messen
TLZ: Versuchsplanung	Erläutern, Begründen
TLZ: λ proportional T	Erläutern, experimentelles Begründen

Methodik: Dominantes Lehrverfahren: Aufgebend erarbeitend

Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
4	<u>Hinführung:</u> λ , T beim Kontrabass	Beschreiben, messen	LSG
8	<u>Aufgabenstellung:</u> Zusammenhang	Leitfrage entwickeln, vermuten	LSG
20	<u>Erarbeitung:</u> Proportionalität	SE zur Seilwelle, Messung von λ , T	GA
30	<u>Sicherung:</u> s.u.	SV, Reflexion	SV
45	<u>Festigung:</u> AB		EA

Geplanter TA

Wie hängt die Wellenlänge von der Periodendauer ab?Vermutungen: $\lambda \sim T$ Versuchsidesen: Oszilloskop, Tongenerator, Lineal, Seil, StoppuhrErgebnisse: Bei der Seilwelle ist die Periodendauer proportional zur Wellenlänge. Kurz: $\lambda \sim T$ Beim Kontrabass ist $\lambda/T = 306$ m/s.Bei der Schraubenfeder ist $\lambda/T = 10$ m/s.

Kurzentwurf für eine Physikstunde

Athenaeum

PH EN 11

Thema der Unterrichtseinheit: Wellen

Einführung von Seilwellen beim Kontrabass

Entdeckung der Proportionalität von Wellenlänge und Periodendauer

Entdeckung der Ausbreitungsgeschwindigkeit

Didaktik: SLZ: Die SuS können ihre Entdeckung der Ausbreitungsgeschwindigkeit bei einer Seilwelle erläutern und experimentell begründen.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
LV: λ proportional T	Erläutern, experimentelles Begründen
LV: stehende Welle beim Seil	Erläutern, Anregen
TLZ: λ/T ist Geschwindigkeit	Erläutern, Begründen durch Einheit
TLZ: fortlaufender Einzelbauch	Erläutern, Anregen, Messen der Ausbreitungsgeschwindigkeit c
TLZ: $\lambda/T = c$	Erläutern, experimentelles Begründen

Methodik: Dominantes Lehrverfahren: Problemlösend

Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
	<u>Hinführung:</u> Konstante λ/T beim Kontrabass	Erläutern, deuten als Geschwindigkeit, deuten als Geschwindigkeit der Saite	LSG
	<u>Problemstellung:</u> kognitiver Konflikt, Geschwindigkeit der Saite nimmt mit der Amplitude zu, λ/T ist konstant	Leitfrage entwickeln, Vermuten	LSG
	<u>Erarbeitung:</u> Proportionalität	SE zur Seilwelle, Messung von λ , T	GA
	<u>Sicherung:</u> s.u.	OHP, Reflexion	SV
	<u>Festigung:</u> Anwenden	AB	EA

Geplanter TA

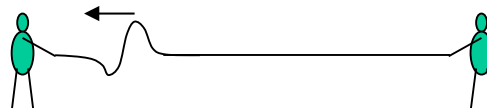
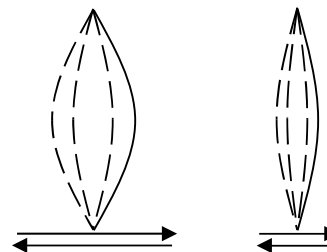
Was bedeutet die Konstante λ/T ?

Vermutungen: λ/T hat die Einheit m/s und ist daher eine Geschwindigkeit. Bewegung senkrecht zur Saite

Geschwindigkeit der Saite nimmt mit der Amplitude zu. ABER λ/T ist konstant.

Ergebnis: λ/T ist nicht die Geschwindigkeit Senkrecht zur Saite.

Versuchsidesen: Ausprobieren, Seil, Stoppuhr



Ergebnis: Bei der Seilwelle bewegt sich ein Wellenbauch mit der Geschwindigkeit 10 m/s.

Bezeichnung: Die Geschwindigkeit, mit der sich ein Wellenbauch voran bewegt heißt

Ausbreitungsgeschwindigkeit c.

Ergebnis: Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c ist gleich λ/T . Kurz: $c = \lambda/T$

1. Die Saiten einer Violine sind 33 cm lang.
 - a. Berechnen Sie die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle in der a – Saite, die mit der Frequenz 440 Hz schwingt.
 - b. Der Geiger greift die Saite 11 cm vom oberen Ende entfernt mit festem Griff. Wie viele Perioden führt die Saite dann pro s aus?
 - c. Er greift die Saite 11 cm vom oberen Ende entfernt mit leichter Berührung. Mit welcher Frequenz schwingt die Saite?

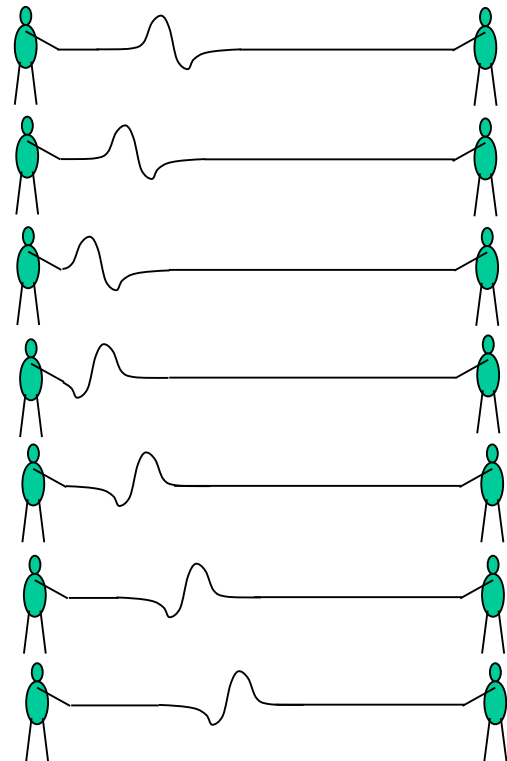


2. Eine Fledermaus erzeugt ein Ultraschallsignal der Frequenz 100 kHz bei einer Schallgeschwindigkeit von $331 \frac{m}{s}$.
 - a. Bestimmen Sie die Wellenlänge!
 - b. Bestimmen Sie die Wellenlänge für einen gut hörbaren Laut mit 5000 Hz.
 - c. Welchen Vorteil bietet Ultraschall für die Fledermaus?



3. Ein Handy sendet auf der Frequenz 1900 MHz. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht beträgt $300\,000 \frac{km}{s}$. Bestimmen Sie die Wellenlänge!

- 1) Beschreiben Sie die oben rechts dargestellte Bewegung der Seilwelle!
- 2) Die Saite eines Flügels hat die schwingende Länge 3 m und die Frequenz 30 Hz. Bestimmen Sie die Ausbreitungsgeschwindigkeit für die Saite!



Kurzentwurf für eine Physikstunde

Athenaeum

PH EN 11

Thema der Unterrichtseinheit: Wellen

Einführung von Seilwellen beim Kontrabass

Entdeckung der Proportionalität von Wellenlänge und Periodendauer

Entdeckung der Ausbreitungsgeschwindigkeit

Entwicklung der Wellengleichung an der Wellenfeldsynthese (WFS)**Didaktik:** SLZ: Die SuS sollen Wellengleichung begründen und anwenden können.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
LV: laufende Welle beim Seil	Erläutern, Anregen
TLZ: WFS	Beschreiben
TLZ: Auslenkung an einem Ort	Berechnen
TLZ: Wellengleichung	Begründen, Anwenden

Methodik: Dominantes Lehrverfahren: Entdeckenlassend

Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
5	<u>Einstieg:</u> WFS	Einstiegsfolie, Beschreiben	LSG
11	<u>Problemstellung:</u> $p(x,t)$	Leitfrage entwickeln	LSG
20	<u>Analyse:</u> Ideen	TA	MuG
40	<u>Lösung:</u> $p(x,t)$, Wellengleichung	Berechnen, Entwickeln, binnendifferenziert	GA
50	<u>Sicherung:</u> s.u.	Reflexion, Rückkopplung, OHP	SV
90	<u>Festigung:</u> Veranschaulichung, Zeiger	Auch HA	EA/PA

Geplanter TA

Wie bestimmen wir den Schalldruck beim Zuhörer?Ideen: Der Wellenberg wandert mit c nach rechts.Der Wellenberg kommt verspätet beim Zuhörer an. \rightarrow Verspätung t_v berechnen \rightarrow Phase φ berechnen, einsetzenErgebnisse:Ein Zuhörer bei $x = 0,84$ m erfährt den Schalldruck $p(t, x=0,84\text{m}) = \hat{p} \cdot \sin(\omega[t-0,0025\text{s}])$.Der Schalldruck an einer Stelle x ist $p(t, x) = \hat{p} \cdot \sin(2\pi \cdot [t/T - x/c])$.Bezeichnungen: Eine Welle mit sinusförmiger Auslenkung y heißt harmonisch.Die Gleichung für die Auslenkung heißt Wellengleichung: $y(t,x) = \hat{y} \cdot \sin(2\pi \cdot [t/T - x/\lambda])$ Geplante SchülerfolieVerspätung: $t_v = x/c = 0,84\text{m}/[336\text{m/s}] = 0,0025\text{s}$.Die Welle trifft mit der Verspätung $0,0025$ s ein.Zeitverlauf: Bei $x = 0$: $p = \hat{p} \cdot \sin(\omega t) \rightarrow \varphi = \omega \cdot t$ Bei $x = 0,84$ m: $\varphi = \omega \cdot (t - t_v) \rightarrow p = \hat{p} \cdot \sin(\omega[t - t_v]) = \hat{p} \cdot \sin(\omega[t - 0,0025 \text{ s}])$ Einsetzen: $p = \hat{p} \cdot \sin(\omega[t - x/c])$

$$p = \hat{p} \cdot \sin(2\pi f [t - x/c]) = \hat{p} \cdot \sin(2\pi \cdot [t/T - x/c])$$

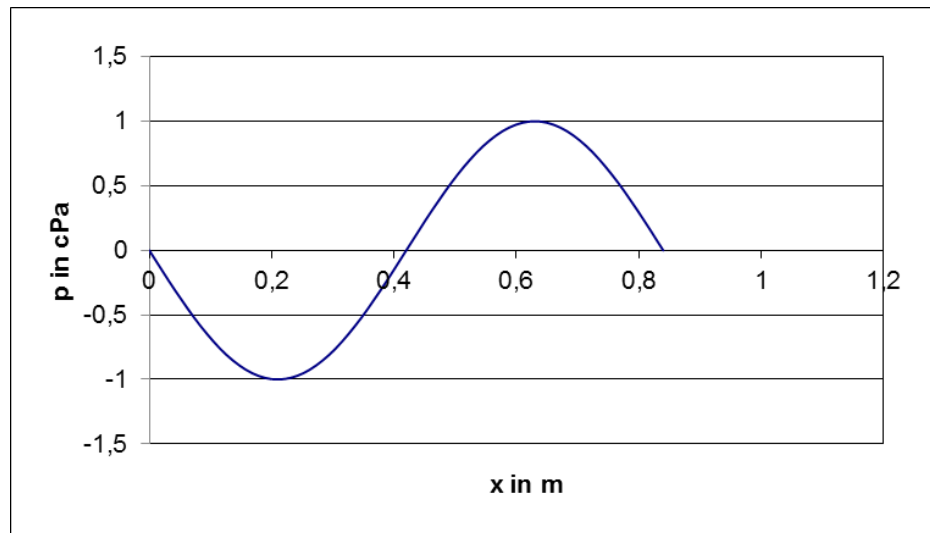


Die **Wellenfeldsynthese** (WFS) ist ein räumliches Audiowiedergabeverfahren mit dem Ziel, virtuelle akustische Umgebungen zu schaffen (Wikipedia).

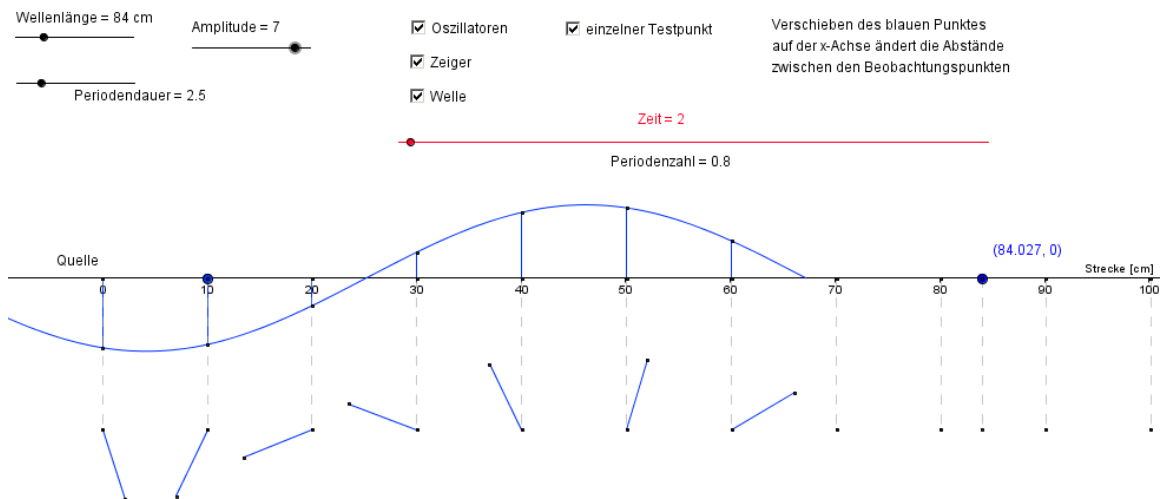
Lautsprecher 1 erzeugt mit Hilfe eines Schwingkreises der Periodendauer 2,5 ms den Schalldruck $p(t, x=0) = \hat{p} \cdot \sin(\omega t)$. Er wird zum Zeitpunkt $t = 0$ eingeschaltet. Für eine WFS muss der verursachte Schalldruck $p(t, x=84 \text{ cm})$ beim Zuhörer bestimmt werden.

Hinweise: Die Abnahme des Schalldrucks mit der Entfernung soll vernachlässigt werden.

Schallgeschwindigkeit $c = 336 \text{ m/s}$. $\hat{p} = 1 \text{ cPa}$



- 1) Ein Schnappschuss der Welle wurde für die Zeit $t = 2,5$ ms mit Excel dargestellt.
 - a) Erstellen Sie mit Excel Schnappschüsse für die Zeiten 0,625 ms; 1,25 ms und 3,75ms.
 - b) Stellen Sie jeweils die Phase bei $x = 0$ m und bei $x = 0,5$ m als Zeiger dar.



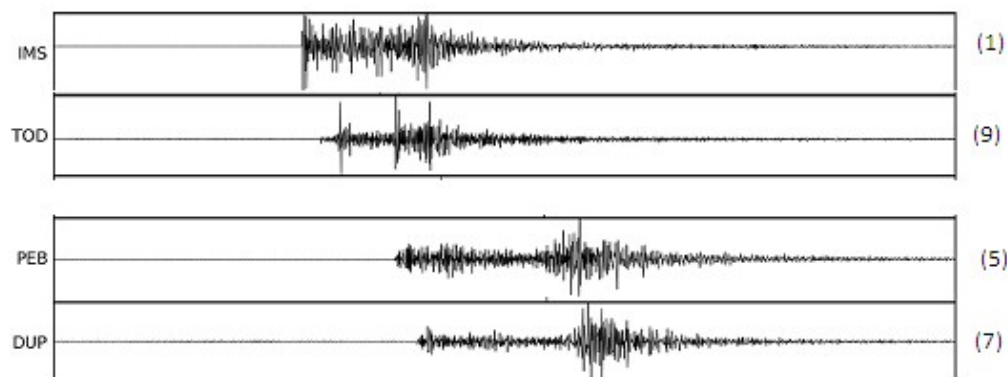
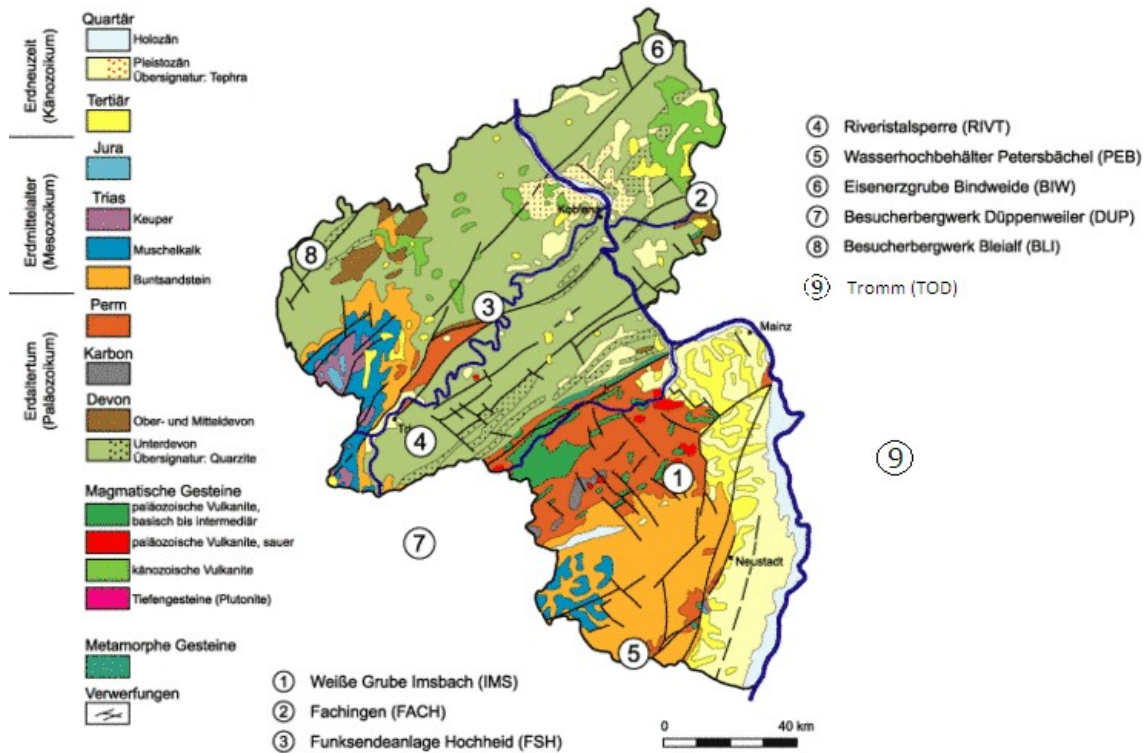
- 2) Ein Schnappschuss der Welle wurde für die Zeit 2 ms mit Geogebra dargestellt.
 - a) Erläutern Sie die Zeiger.
 - b) Stellen Sie Schnappschüsse für die Zeitpunkte 2,4 ms; 2,6 ms; 2,8 ms und 3 ms.
 - c) Erläutern Sie die Auslenkung und den Zeiger beim Zuhörer bei $x = 0,84$ m.

Erdbeben erschüttert ? ? ?

23.12.2010

"Ging ein Ruck durchs Haus"

**Die Möbel wackelten als ob ein Lastwagen durch die Wohnung
rast, Menschen schreckten aus dem Schlaf - um halb drei Uhr
nachts hat in ? ? ? die Erde gebebt.**



- 1) Beschreiben Sie die Ausbreitung des Erdbebens anhand der Seismogramme.
- 2) Das Erdbebenmaximum erreichte die beiden Stationen (1) und (9) etwa gleichzeitig. Später kam es ebenfalls ungefähr zugleich bei den Messstationen (7) und (5) an. Konstruieren Sie die Lage des Epizentrums.

Kurzentwurf für eine Physikstunde

Athenaeum

PH EN 11

Thema der Unterrichtseinheit: Wellen

...

Entdeckung der Überlagerung von Wellen**Didaktik:** SLZ: Die SuS sollen die additive Überlagerung von Wellen begründen können.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
LV: laufende Welle	Erläutern, Anregen
TLZ: Monsterwelle	Beschreiben
TLZ: Entstehung der Monsterwelle durch Überlagerung	Erläutern, Experimentelles Begründen
TLZ: Additive Überlagerung	Berechnen, Darstellen am GTR

Methodik: Dominantes Lehrverfahren: Entdeckenlassend

Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
5	<u>Einstieg:</u> Monsterwelle	Beschreiben, OHP	LSG
10	<u>Problemstellung:</u> Beschreibungen	Leitfrage entwickeln	LSG
25	<u>Analyse:</u> Überlagerung, Seilwellenversuch, Wellenkanal	Ideen, Versuchsplanung	MuG
70	<u>Lösung:</u> Versuche, Auswertung	Binnendifferenziert, AB 1	GA
80	<u>Sicherung:</u> s.u.	Reflexion, Rückkopplung	SV
90	<u>Festigung:</u> AB 2	Teils HA	EA/PA

Geplanter TA

Wie entsteht eine Monsterwelle?Beschreibung: Eine Monsterwelle ist besonders hoch (höher als benachbarte Wellen).Ideen: Überlagerung, Addition, $y_{\text{Ü}}(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t)$ Vermutungen:

- Wellenberge treffen aufeinander.
- Die Höhen der Wellenberge addieren sich dabei.

Kontrollversuche:Aufeinander zulaufende Seilwellen mit Kamera filmen und untersuchen
Wellenkanal (Videoanalyse)Ergebnisse:

Eine Monsterwelle entsteht durch Überlagerung von (wenigstens) zwei Wellen.

Bei der Überlagerung von zwei Wellen addieren sich deren Amplituden.

Kurz: $y_{\text{Ü}}(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t)$

Schnell laufende Wasserwellen können langsam laufende Wasserwellen einholen.

Treffen Wellenberge auf Wellenberge, so entstehen Wellenberge doppelter Höhe.

Treffen Wellenberge auf Wellentäler, so entsteht die Höhe 0.

Bezeichnungen:Die Überlagerung von Wellen heißt auch Interferenz.Treffen Wellenberge auf Wellenberge, so tritt konstruktive Interferenz auf.Treffen Wellenberge auf Wellentäler, so tritt destruktive Interferenz auf.

$$\text{Lösung zu 4) } c_1 = \sqrt{\frac{g \cdot 100\text{m}}{2\pi}} = 12,5 \text{ m/s; } c_2 = 13,1 \text{ m/s}$$

Zwei Berge starten bei $x = 0$. Der schnellere Berg muss den nächsten der langsamen Welleeinholen. Dieser hat 100 m Vorsprung: $c_2 \cdot t = 100\text{m} + c_1 \cdot t \rightarrow (c_2 - c_1) \cdot t = 100\text{m}$ $\rightarrow t = 100\text{m}/(0,6\text{m/s}) = 167 \text{ s} \rightarrow s_2 = 167\text{s} \cdot 13,1\text{m/s} = 2188 \text{ m}$

Täler treffen schon nach 1094 m aufeinander.



**Todes-Drama bei Kreuzfahrt
Monsterwelle tötet deutschen Passagier
(Bildzeitung)**

Sind 8 m hohe Wellen im Mittelmeer möglich?

Sie kommen gewöhnlich nicht vor, erklärt Dr. Rosenthal von der Gesellschaft für angewandten Umweltschutz und Sicherheit im Seeverkehr in Bremen. ... In diesem Fall war die Welle doppelt so hoch wie der umgebende Wellengang von 4 m bis 5 m.
(Hamburger Abendblatt 5.3.2010)



- 1) Experiment mit der Seilwelle: Nehmen Sie die Überlagerung von zwei aufeinander zulaufenden Seilwellen mit der Hochgeschwindigkeitskamera auf. Übertragen Sie die Aufnahme auf das Notebook und untersuchen Sie diese mit der Software VirtualDub (virtuelles Überspielen).
- 2) Auswertung zur Seilwelle: Untersuchen Sie die ausgedruckte Bildfolge in Bezug auf die Fragestellungen.



- 3) Wellenkanal: Analysieren Sie das Video in Bezug auf die Fragestellungen.



- 4) Aufeinandertreffen von Wasserwellen: Typische Meereswellen werden vom Wind aufgebaut. Für ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit c gilt: $c = \sqrt{\frac{g \cdot \lambda}{2\pi}}$
 - a) Im Mittelmeer laufen zwei Wasserwellen mit den Wellenlängen 100 m und 110 m in die gleiche Richtung. Bestimmen sie die Geschwindigkeiten.
 - b) Bestimmen Sie die Abstände, in denen zwei Wellenberge aufeinandertreffen.
 - c) Stellen Sie die Überlagerung für $t = 0$ und eine Strecke von 4 km mit dem GTR dar. Für jede Welle gilt $y(x, t) = 4m \cdot \sin\left(2\pi \left[\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right]\right)$ mit dem Winkel im Bogenmaß.

5 Wasserwellen

In dieser Unterrichtssequenz lernen die SuS grundlegende Konzepte zur Ausbreitung von Wellen in mehreren Dimensionen kennen. Wesentlich sind die Wellenfront, der Wellenstrahl, die Elementarwelle, die Beugung in den Schattenraum, die Brechung sowie die Beugung am Doppelspalt und am Gitter.

Nr.	Stundenthema	Stundenlernziel
1	Beschreibung von Wasserwellen	Die SuS sollen Wasserwellen mithilfe von Wellenfronten und Wellenstrahlen beschreiben können.
2	Entdeckung der Beugung von Wasserwellen am Spalt	Die SuS sollen Beugung in den Schattenraum beschreiben und zeichnerisch mithilfe von Elementarwellen deuten können.
3	Entdeckung und Deutung der Brechung von Wasserwellen	Die SuS sollen die Brechung erläutern und zeichnerisch Brechungswinkel vorhersagen können.
4	Entdecken der Beugung von Wasserwellen am Doppelspalt	Die SuS sollen die Beugung am Doppelspalt beschreiben sowie mithilfe von Elementarwellen deuten können.
5	Entdecken der Beugung von Wasserwellen am Gitter	Die SuS sollen die Beugung am Gitter beschreiben und die Beugungsformel herleiten können.

Tabelle 6: Unterrichtssequenz Wasserwellen

Hier präsentiere ich einen Kurzentwurf für die Stunde zur Beugung am Doppelspalt. Denn diese Stunde illustriert gut die Anwendbarkeit der Overlayfolie und ist für das Folgende grundlegend.

Kurzentwurf für eine Physikstunde

Athenaeum

PH EN 11

Thema der Unterrichtseinheit: Wellen

..

Entdeckung der Beugung am Doppelspalt**Didaktik:** SLZ: Die SuS sollen die Beugungsformel herleiten können.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
LV: Beugung	Beschreiben, Zeichnen
LV: Huygens'sches Prinzip	Anwenden
TLZ: Beugung am Doppelspalt	Beschreiben, Deuten durch Elementarwellen
TLZ: Beugungsformel	Herleiten

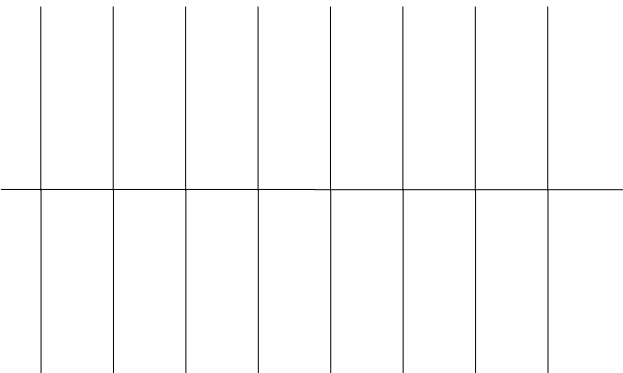
Methodik: Dominantes Lehrverfahren: Problemlösend

Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
10	<u>Hinführung:</u> Wellen hinter Doppelspalt	Foto, Beschreiben, TA	LSG
15	<u>Problemstellung:</u>	Leitfrage entwickeln	LSG
20	<u>Analyse:</u> Konstruktion	Vermuten	MuG
45	<u>Lösung:</u> Overlayfolien, Zeichnen, Herleiten	Binnendifferenziert	GA
55	<u>Sicherung:</u> s.u.	SV, Reflexion	LSG
	<u>Festigung:</u> AB	Zeichnen	EA/PA

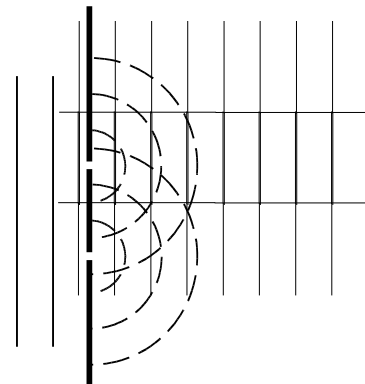
Geplanter TA

Wie können wir die Beugungswinkel vorherbestimmen?Beobachtung: Hinter dem Doppelspalt breiten sich die Wellen in bestimmte Richtungen aus.Bezeichnung: Diesen Ausbreitungsrichtungen entsprechen Ordnungszahlen $n = 0, 1, 2, \dots$ Die ursprüngliche Ausbreitungsrichtung entspricht $n = 0$. Die beiden angrenzenden Richtungen entsprechen $n = 1$, u.s.w. Der von der 0. und n-ten Ordnung eingeschlossene Winkel α heißt Beugungswinkel der n-ten Ordnung.Vermutung: Prinzip von Huygens, KonstruktionErgebnis: Die Wellenfronten der am Doppelspalt gebeugten Wellen können wir mit der Tangentenkonstruktion bestimmen. Daher ist beim Abstand d der Spalte der Beugungswinkel α der n-ten Ordnung bestimmt durch: $d \cdot \sin \alpha = n \cdot \lambda$

Overlayfolie

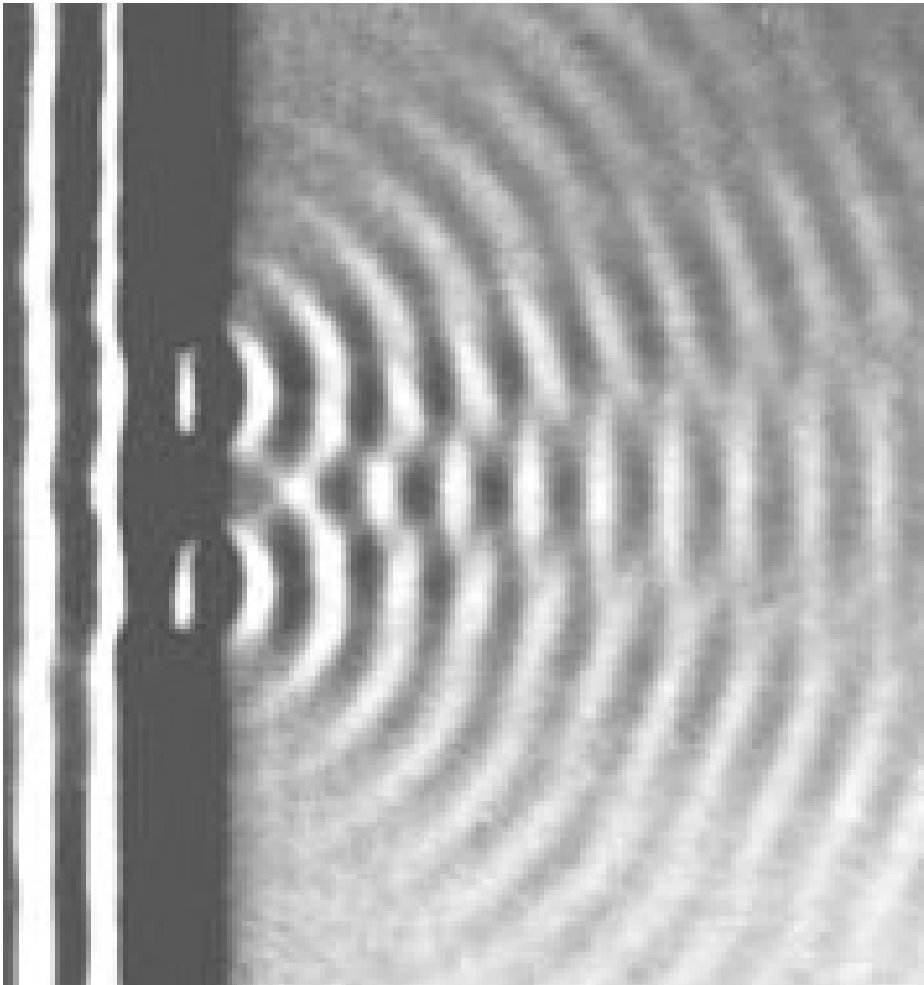
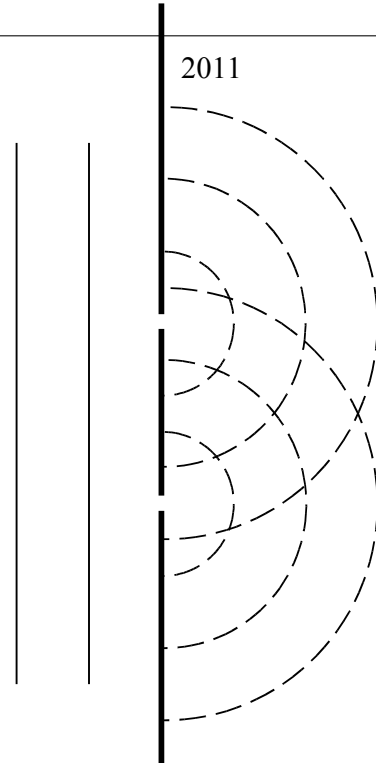


geplante Schülerlösung



Wasserwellen der Wellenlänge 1 cm und mit geradlinigen parallelen Wellenfronten treffen senkrecht auf einen Doppelspalt mit Spaltabstand $d = 2,5$ cm.

- Zeichnen Sie mit Hilfe der Tangentenkonstruktion verschiedene Wellenfronten hinter dem Doppelspalt!
- Zeichnen Sie die zugehörigen Wellenstrahlen!
- Bestimmen Sie die eingeschlossenen Winkel!
- Vergleichen Sie mit dem Foto!



6 Interferenz bei Lichtwellen

Diese Unterrichtssequenz überträgt sofort das Konzept der Beugung von Wasser auf Licht. Es folgen diverse technologisch interessante Varianten gemäß dem Kerncurriculum.

Nr.	Stundenthema	Stundenlernziel
1	Entdeckung der Beugung von Licht am Gitter	Die SuS sollen Lichtbeugung durchführen, deuten und zur Lichtwellenlängenbestimmung nutzen können.
2	Entdeckung der Beugung von Licht am Spalt	Die SuS sollen die Beugung von Licht am Spalt durchführen, erläutern und die Beugungswinkel berechnen können.
3	Analyse der Speicherkapazität von CD und DVD	Die SuS sollen die Speicherkapazitäten erklären können.
4	Subjektive Messung der Lichtwellenlänge	Die SuS sollen die Lichtwellenlänge von LEDs subjektiv messen können.
5	Bestimmung der Wellenlänge von Licht mit dem Michelson-Interferometer	Die SuS sollen die Lichtwellenlänge mit dem Michelson-Interferometer bestimmen können.

Tabelle 7: Unterrichtssequenz Interferenz bei Lichtwellen

Hier präsentiere ich einen Kurzentwurf für die Stunde zur Speicherkapazität. Denn diese Stunde ist technologisch interessant und vernetzt die Optik mit der digitalen Revolution.

Kurzentwurf für eine Physikstunde

Athenaeum

PH EN 11

Thema der Unterrichtseinheit: Wellen

... Analyse der Speicherkapazität von CD und DVD

Didaktik: SLZ: Die SuS sollen die Speicherkapazitäten erklären können.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
LV: Lichtwellenlängen	Erläutern
LV: Beugung am Gitter	Erläutern, Durchführen, Auswerten
LV: CD, DVD	Beschreiben, Anwenden
LV: Beugungsformel $\sin \alpha = n \cdot \lambda / d$	Anwenden
TLZ: Beugung an Spuren	Planen, Durchführen, Auswerten
TLZ: Hohe Speicherkapazität der DVD	Erklären

Methodik: Dominantes Lehrverfahren: Problemlösend

Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
5	<u>Hinführung:</u> Besprechung der HA	OHP	LSG
10	<u>Problemstellung:</u> CD/DVD, Ablesen	Leitfrage entwickeln	LSG
20	<u>Analyse:</u> Grund	Vermuten, Versuch Planen	MuG/LSG
45	<u>Lösung:</u> Versuch	Durchführen, Auswerten, binnendifferenziert	GA
60	<u>Sicherung:</u> s.u.	OHP, Rückkopplung, Reflexion	SV
	<u>Festigung:</u> Speicherkapazitäten	Abschätzung	PA/SV

Geplanter TA

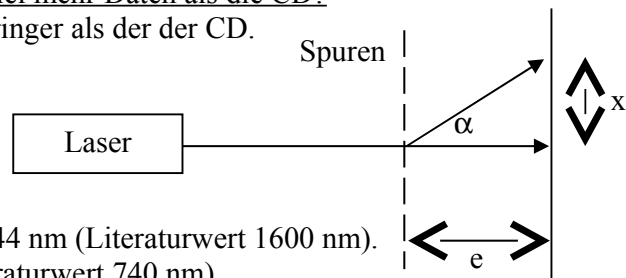
Warum speichert die DVD viel mehr Daten als die CD?

Vermutungen: Der Spurabstand der DVD ist geringer als der der CD.

Idee: Beugung an Spuren der CD und DVD

Versuchsskizze:

Passend machen für Reflexion



Ergebnisse: Der Spurabstand der CD beträgt 1544 nm (Literaturwert 1600 nm).

Der Spurabstand der DVD beträgt 748 nm (Literaturwert 740 nm).

Der Spurabstand der BD beträgt 317 nm (Literaturwert 320 nm).

Typische Folien:

DVD - Grün

gegeben: $\lambda = 535 \text{ nm}$
 gemessen: $x = 1,534 \text{ m}$
 $n = 1$
 $e = 1,5 \text{ m}$

$\sin \alpha = \frac{n \cdot \lambda}{d}$ $\tan \alpha = \frac{x}{e}$
 $d = \frac{n \cdot \lambda}{\sin \alpha}$ $d = \frac{x}{\tan^{-1} \frac{x}{e}}$

$d = \frac{n \cdot \lambda}{\sin(\tan^{-1} \frac{x}{e})}$

$d = \frac{1 \cdot 535 \text{ nm}}{\sin(\tan^{-1} \frac{1,534 \text{ m}}{1,5 \text{ m}})}$

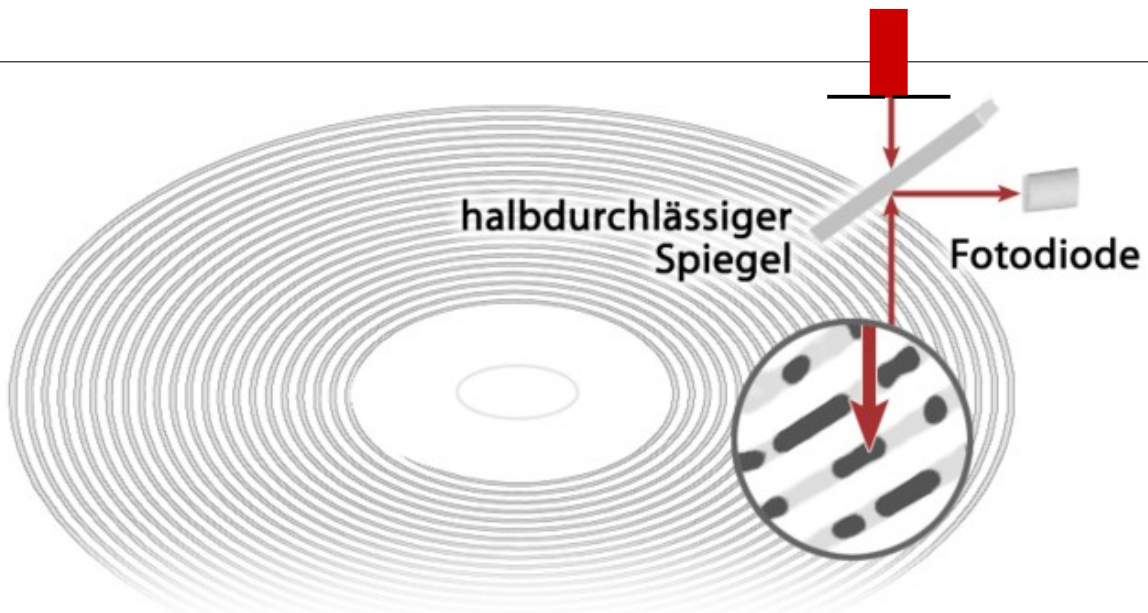
$d \approx 748 \text{ nm}$

$d_{\text{DVD}} = 11,9 \text{ cm}$ $r_{\text{DVD}} = 5,95 \text{ cm}$
 $r_{\text{innerer Ring-DVD}} = 2,2 \text{ cm}$
 $A_{\text{DVD}} = \pi \cdot (5,95^2 \text{ cm}^2 - 2,2^2 \text{ cm}^2)$
 $\approx 96 \text{ cm}^2 = 9,6 \cdot 10^{15} \text{ nm}^2$

$d_m = 748 \text{ nm}$
 $d_m^2 = 559504 \text{ nm}^2$

$n = \frac{A_{\text{DVD}}}{d_m^2} \approx 1,7158 \cdot 10^{10} \approx 17 \text{ Mrd. Markierungen}$

$n = 2,12 \text{ Mrd. Bytes}$
 $= 2,12 \text{ GB}$



Licht durchquert eine Öffnung, trifft eine Markierung und wird erfasst.

CD: 0,7 GB

DVD: 4,7 GB

Blue Disc: 25 GB

7 Schallwellen

Schallwellen wurden bereits bei der Stunde zur Wellenfeldsynthese angesprochen. Hier werden sie ausführlicher behandelt. Das Echolotverfahren ist in der Schifffahrt sowie in der Natur bei Fledermäusen oder Delphinen wichtig. Es gibt Anlass zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in der ersten Stunde. Die zweite Stunde vernetzt die Akustik mit der Beugung gemäß dem Kerncurriculum. Die dritte Stunde ist grundlegend für die Einführung der Radiowellen und propädeutisch für die Behandlung von stehenden Wellen im Laser und bei Atomen sowie für die Analyse atomarer Orbitale. Daher stelle ich diese Stunde im Kurzentwurf vor.

Nr.	Stundenthema	Stundenlernziel
1	Messung der Schallgeschwindigkeit	Die SuS sollen die Schallgeschwindigkeit mit Hilfe von Echos bestimmen können.
2	Messung der Wellenlänge von Schall	Die SuS sollen die Wellenlänge von Schall mit zwei Sendern bestimmen können.
3	Entstehung stehender Wellen in Musikinstrumenten	Die SuS sollen die überlagerte Entstehung von Grund- und Oberschwingungen in der Blockflöte beschreiben, erklären und berechnen können.

Tabelle 8: Unterrichtssequenz Schallwellen

Kurzentwurf für eine Physikstunde

Athenaeum

PH EN 11

Thema der Unterrichtseinheit: Wellen**... Entstehung stehender Wellen in Musikinstrumenten**

Didaktik : SLZ: Die SuS sollen die überlagerte Entstehung von Grund- und Oberschwingungen in der Blockflöte beschreiben, erklären und berechnen können.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
LV: stehende Welle, Grundschiwingung, Oberschwingung	Erläutern, Berechnen, Skizzieren
LV: Frequenzanalyse mit Audacity	Durchführen
LV: $c = f \cdot \lambda$ mit $c = 340$ m/s	Nennen, Anwenden
TLZ: konstante & variable Klänge	Hören, Erkennen
TLZ: $f_k = k \cdot f_1$	Messen, Herleiten, Berechnen
TLZ: Wandernde Frequenzmaxima	Messen
TLZ: Grundprinzip stehende Welle	Erläutern, Begründen

Methodik: Dominantes Lehrverfahren: Problemlösend

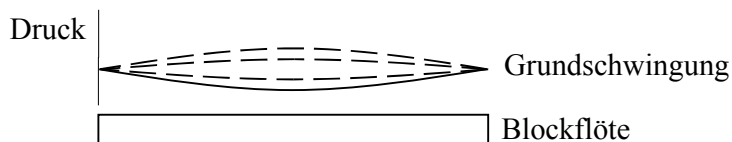
Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
5	<u>Einstieg</u> : 3 Geräusche, Flöten	Hören, Beschreiben	LSG
8	<u>Problemstellung</u> :	Leitfrage entwickeln	LSG
35	<u>Analyse</u> : Ideen, Funktionsweise der Flöte, Vermutungen, Planung	LH	MuG/LSG
65	<u>Lösung</u> : s.u.	Audacity, Berechnung (TD)	GA
85	<u>Sicherung</u> : s.u.	SV, Reflexion, Rückkopplung, Prinzip, Deutungen	SV
	<u>Festigung</u> : Weitere Klanganalysen	AB, HA	EA

Geplanter TA

Wir hören: C-Flöte; F-Flöte; Synthesizer. Jedes Musikinstrument hat seinen Klang.

Wie entsteht der Klang der Blockflöte?

Ideen:



Vermutungen: In der Flöte entstehen auch Oberschwingungen.

Die C-Flöte klingt anders als die F-Flöte, weil sie andere Oberschwingungen hat.

Untersuchung: Messung der Frequenzmaxima $f_{\max,k}$ mit Audacity

Vergleich die Frequenzmaxima bei C-Flöte und F-Flöte

Berechnung der Frequenzen der Grund- und Oberschwingungen: $f_k = c/\lambda_k$ und $\lambda_k = 2L/k$

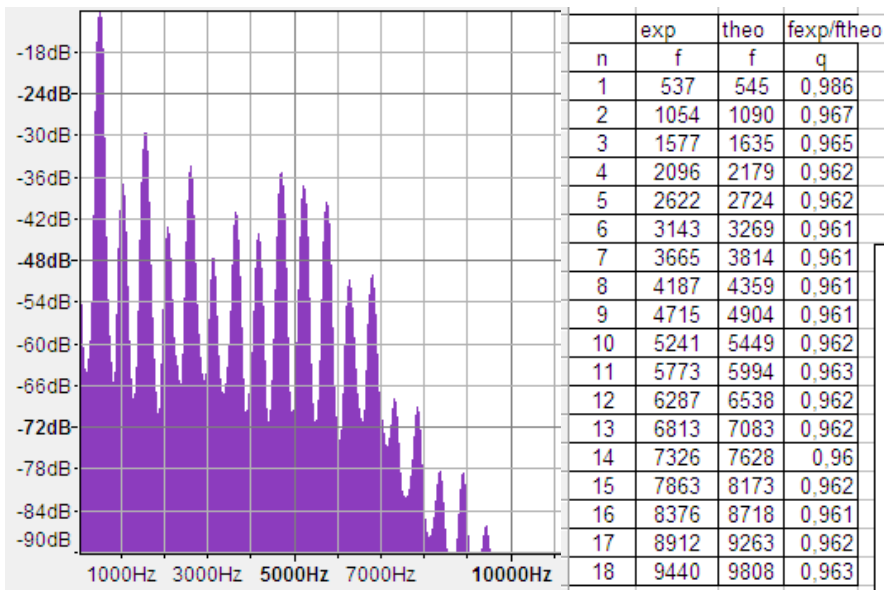
Sind $f_{\max,k} = f_k$, so entsprechen die Grund- und Oberschwingungen den Frequenzmaxima.

Analyse des Synthesizer-Klangs mit Audacity

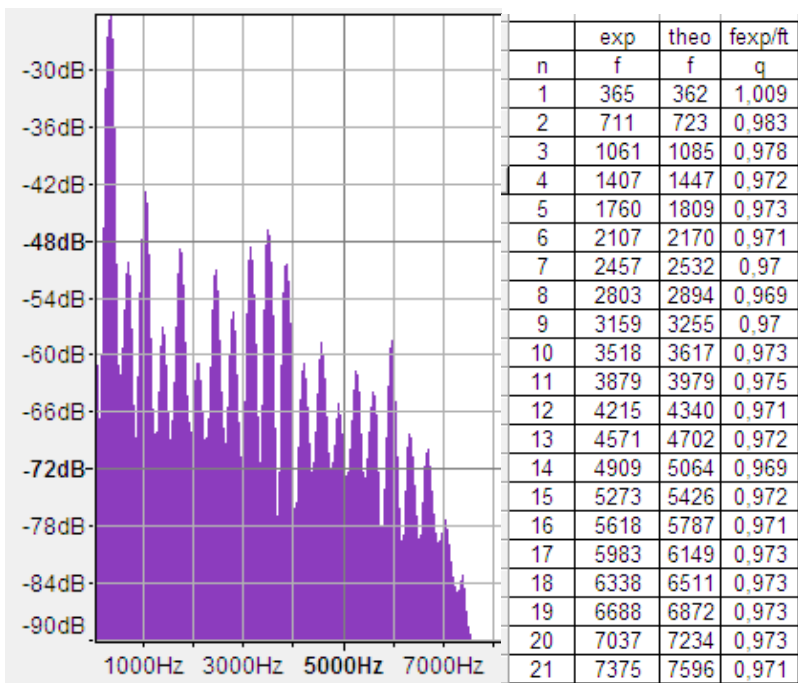
Ergebnisse mit Deutungen:

- Die C-Flöte erzeugt eine Grundschiwingung und 16 messbare Oberschwingungen, die F-Flöte 20. Also sind deren Klänge unterschiedlich.
- Die Grund- und Oberschwingungen entsprechen den Frequenzmaxima.
- Der Synthesizer-Klang zeigt Maxima mit sinkender Frequenz, die bei hoher Frequenz sanft erneuert werden. So entsteht der Eindruck eines sinkenden Tons, obwohl die Frequenz im Mittel gleich bleibt.

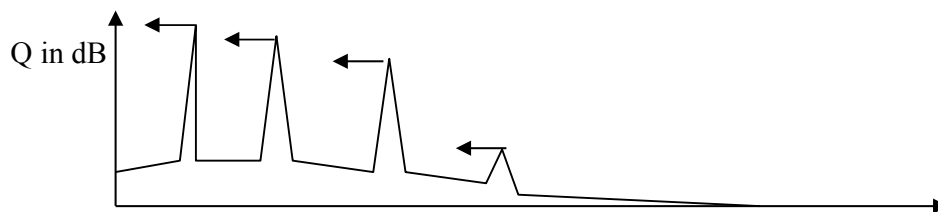
Geplante Schülerfolien



C-Flöte: $\lambda_k = 2L/k \rightarrow f_k = c/\lambda_k = 0,5 \cdot c \cdot k/L \rightarrow f_1 = 544,9 \text{ Hz}$



F-Flöte



Synthesizer-Klang

f in Hz

8 Elektromagnetische Wellen

In dieser Sequenz werden zunächst Radiowellen erzeugt und untersucht. Dann werden Mikrowellen als Variante eingeführt und analysiert. In der vierten Stunde dienen die Mikrowellen zur visuell an Gitterstäben nachvollziehbaren Polarisation elektromagnetischer Wellen. In den folgenden drei Stunden wird die Bedeutung der Polarisation in der Optik an verschiedenen Beispielen behandelt.

In den Stunden 8 und 9 der Unterrichtssequenz dienen die Mikrowellen nochmals zur visuell nachvollziehbaren Einführung eines neuen Konzepts, des Glanzwinkels. Dieses Konzept wird anschließend in die Optik und Röntgenspektroskopie übertragen. Wegen der weitreichenden Anwendbarkeit dieses Konzepts stelle ich zu dessen Einführung zwei Kurzentwürfe vor.

Nr.	Stundenthema	Stundenlernziel
1	Entdeckung von Radiowellen	Die SuS sollen ihre Entdeckung von Radiowellen als elektromagnetische Wellen erläutern können.
2	Messung der Lichtgeschwindigkeit mit Mikrowellen (s. O'Hare (2009))	Die SuS sollen die Lichtgeschwindigkeit mit stehenden Mikrowellen messen können.
3	Bestimmung der Wellenlänge von Mikrowellen mit dem Michelson-Interferometer	Die SuS sollen diese Wellenlänge mit dem Michelson-Interferometer bestimmen können.
4	Entdecken der Polarisation von Mikrowellen	Die SuS können die Polarisierung von Mikrowellen begründen und deuten können.
5	Entdecken der Polarisierung von Licht	Die SuS sollen die Polarisierung von Licht mit Filtern und Spiegeln durchführen und deuten können.
6	Anwendung der Polarisierung bei LC-Displays	Die SuS sollen die Anwendung der Polarisierung des Lichts bei LC-Displays erklären und durch Überprüfungsversuche bestätigen können.
7	Entdeckung der Funktionsweise der Polarisationsfilter in der Fotografie	Die SuS sollen die Funktionsweise erklären können.
8	Entdeckung diskreter Glanzwinkel	Die SuS sollen diskrete Glanzwinkel experimentell begründen können.
9	Erklärung diskreter Glanzwinkel	Die SuS sollen die Entstehung der Glanzwinkel erklären können.
10	Anwendung der Bragg-Reflexion auf den akusto-optischen Modulator (AOM)	Die SuS sollen die Bragg-Bedingung auf den AOM anwenden können.
11	Entdeckung der Röntgenstrahlen	Die SuS können die Entdeckung sowie grundlegende Eigenschaften von Röntgenstrahlen erläutern.
12	Strukturanalyse mit Röntgenstrahlen	Die SuS können Strukturanalysen mit Röntgenstrahlen bei ein- und polykristallinen Materialien erläutern sowie die Messwerte mit der Bragg-Bedingung auswerten.

Tabelle 9: Unterrichtssequenz elektromagnetische Wellen

Kurzentwurf für eine Physikstunde

Athenaeum

PH EN 11

Thema der Unterrichtseinheit: Wellen**... Entdeckung diskreter Glanzwinkel****Didaktik:** SLZ: Die SuS sollen diskrete Glanzwinkel experimentell begründen können.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
LV: Mikrowelle mit $\lambda = 3,2 \text{ cm}$	Erläutern, Anwenden
LV: konstruktive Interferenz	Erläutern, Anwenden
LV: Reflexion am Stabgitter	Beschreiben, Anwenden, Deuten
TLZ: Reflexion am Raumgitter	Planen, Durchführen, Beschreiben
TLZ: Glanzwinkel	Experimentelles Begründen

Methodik: Dominantes Lehrverfahren: Entdeckenlassend

Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
5	<u>Einstieg:</u> Raumgitter	DE 1, Mikrowelle, beschreiben	LSG
8	<u>Problemstellung:</u> Leitfrage	Entwickeln	LSG
15	<u>Analyse:</u> Raumgitter, Vermuten $\alpha = \beta$, Ordnungen, Planen	Entwickeln	MuG, LSG
25	<u>Lösung:</u> Glanzwinkel	Entdecken, DE, Auswerten, AB 1	GA
30	<u>Sicherung:</u> s.u.	SV, Reflexion	SV
40	<u>Festigung:</u> AB 2	Bearbeiten	EA/PA

Geplanter TA

Wie werden die Mikrowellen am Stabgitter gebeugt?

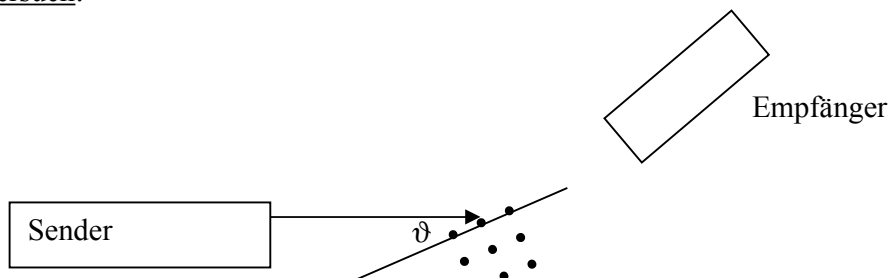
Sender



Räumliches Stabgitter

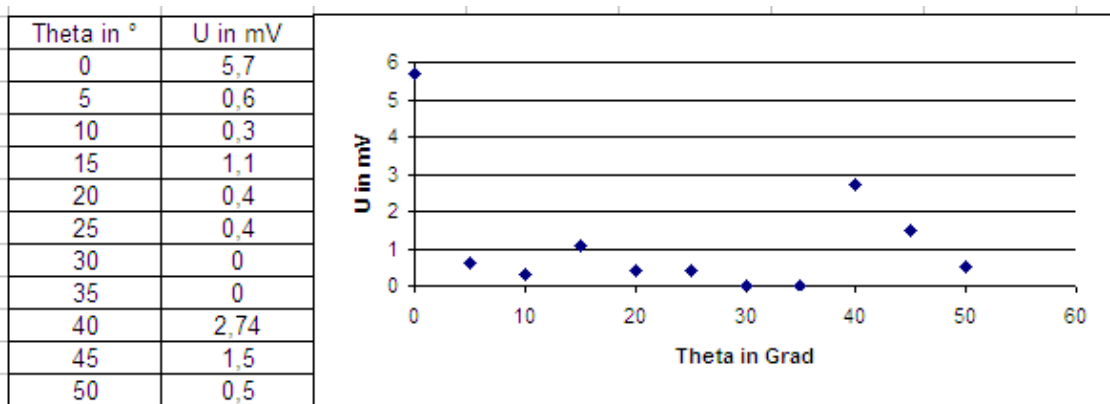
Vermutungen: Ordnungen 0, ± 1 , ± 2 , ...

Reflexion wie beim Stabgitter

Versuch:

Beobachtung: Die Mikrowelle wird nur bei bestimmten Winkeln vom räumlichen Stabgitter reflektiert. Dabei gilt das Reflexionsgesetz. Die Maxima sind bei $\vartheta = 15^\circ$ und 40° . Die Wellenlänge ist $\lambda = 3,2 \text{ cm}$. Benachbarte Netzebenen haben voneinander den Abstand 5 cm .

Ergebnis: Ein räumliches Gitter reflektiert eine Welle bei bestimmten Winkeln.Bezeichnungen: Eine Gitterebene, die periodisch Gitterpunkte enthält, heißt Netzebene.Der Winkel, den der einfallende Wellenstrahl mit der Netzebene einschließt, wird ϑ genannt.Ein Winkel ϑ , bei dem eine Welle am räumlichen Gitter reflektiert wird, heißt Glanzwinkel.



Charakterisieren Sie die Messwerte.

Kurzentwurf für eine Physikstunde

Athenaeum

PH EN 11

Thema der Unterrichtseinheit: Wellen

... Entdeckung diskreter Glanzwinkel

Erklärung diskreter Glanzwinkel

Didaktik: SLZ: Die SuS sollen die Entstehung der Glanzwinkel erklären können.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
LV: Glanzwinkel, Messwerte der Vorstunde	Experimentelles Begründen
LV: Wellenfronten, konstruktive Interferenz, Prinzip von Huygens	Erläutern, Anwenden
TLZ: Bedingung für konstruktive Interferenz	Legen (Overlay), Zeichnen, Herleiten

Methodik: Dominantes Lehrverfahren: Entdeckenlassend

Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
5	<u>Einstieg:</u> Glanzwinkel	DE 1, Erläutern	LSG
9	<u>Problemstellung:</u> Leitfrage	Entwickeln	LSG
30	<u>Analyse:</u> Ideen, s.u.	Entwickeln, Overlayfolien	MuG, LSG
	<u>Lösung:</u> Planfigur	Legen, Overlayfolien, Zeichnen	GA
	Alternatives Stundenende		
60	Formel	Herleiten, binnendifferenziert	GA
70	<u>Sicherung:</u> s.u.	SV, Reflexion	SV
90	<u>Festigung:</u> Simulation	Applet	SSG

Geplanter TA

Wie entstehen die Glanzwinkel?

Ideen: konstruktive Interferenz, Reflexion, $\alpha = \beta$, verschiedene Netzebenen

Ergebnisse:

- Die Wellenstrahlen verschiedener Netzebenen überlagern sich.
- Konstruktive Interferenz tritt nur bei bestimmten Winkeln auf.
- Messung an den Overlayfolien ergibt $\vartheta = 18,7^\circ$ (für $n=1$) und $\vartheta = 39,8^\circ$ (für $n=2$)

Ergebnisse:

- Trifft eine Welle mit $\lambda = 3,2$ cm unter einem Winkel ϑ auf ein Gitter, so werden die Wellen an Netzebenen reflektiert.
- Dabei tritt konstruktive Interferenz beim Wegunterschied $\Delta s = n \cdot \lambda$ auf.
- Bei benachbarten Netzebenen mit Abstand 5 cm gilt $\Delta s = 2 \cdot d \cdot \sin(\vartheta) = 10 \text{ cm} \cdot \sin(\vartheta)$

→ Konstruktive Interferenz tritt auf bei $n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin(\vartheta)$

→ $\vartheta = \arcsin(n \cdot \lambda \cdot 0,5/d) = 18,7^\circ$ (für $n=1$)

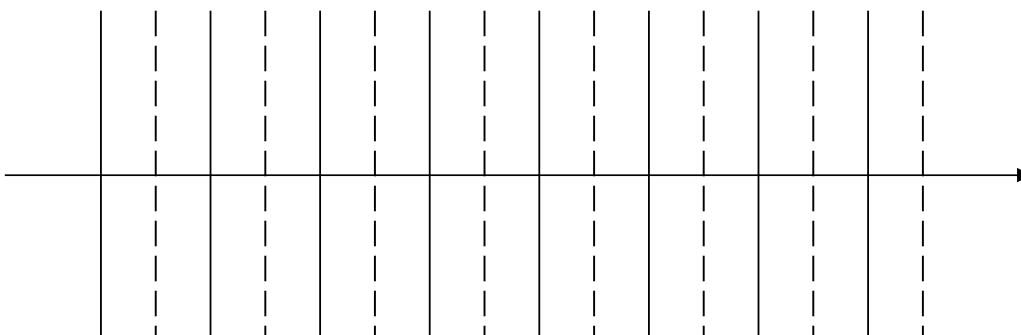
$\vartheta = 39,8^\circ$ (für $n=2$)

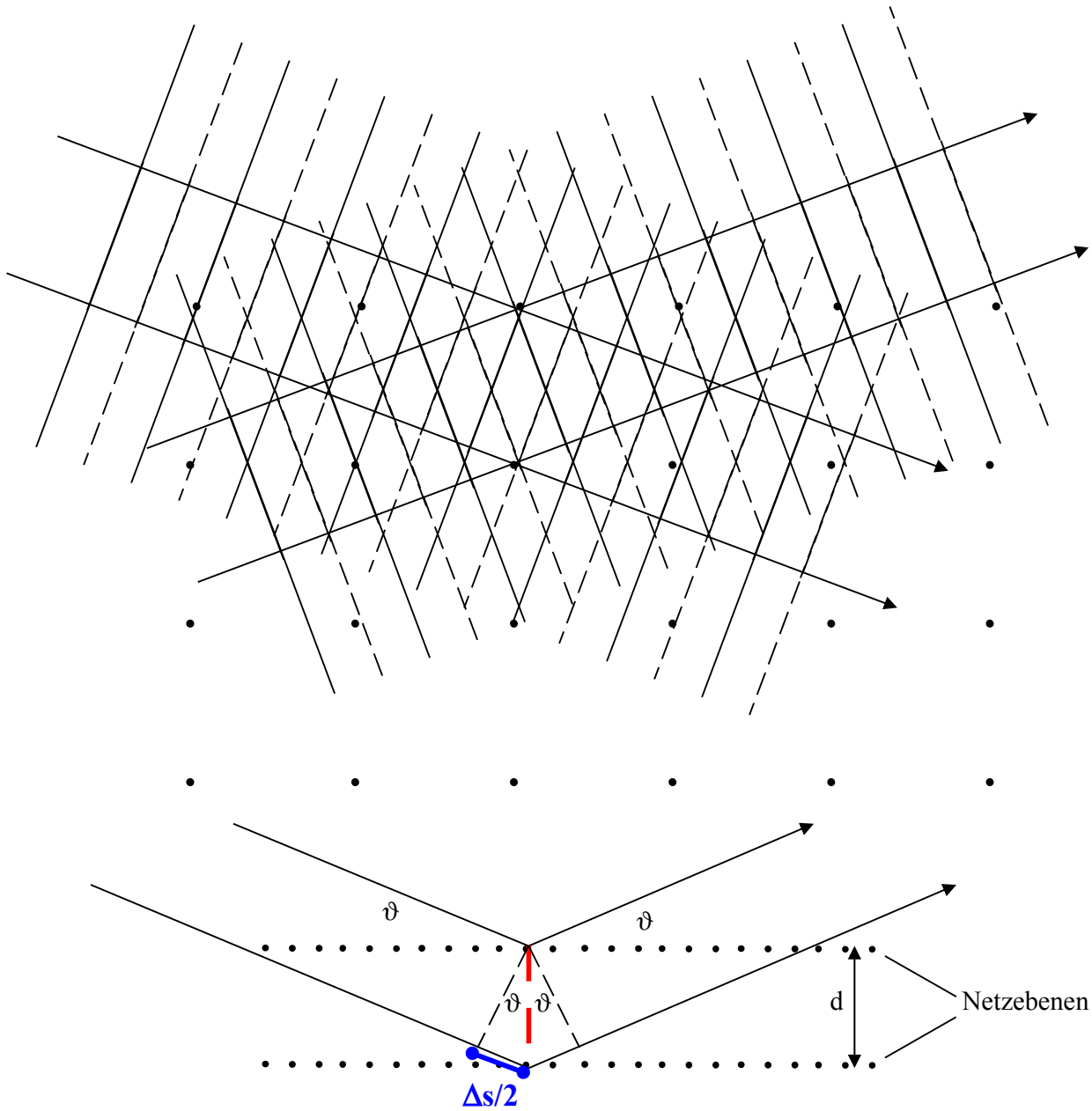
→ gemessen: $\vartheta = 15^\circ$ (für $n=1$)

$\vartheta = 40^\circ$ (für $n=2$)

Bezeichnung: Die hergeleitete Gleichung für konstruktive Interferenz am räumlichen Gitter heißt Bragg-Gleichung: $n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin(\vartheta)$

Overlayfolien



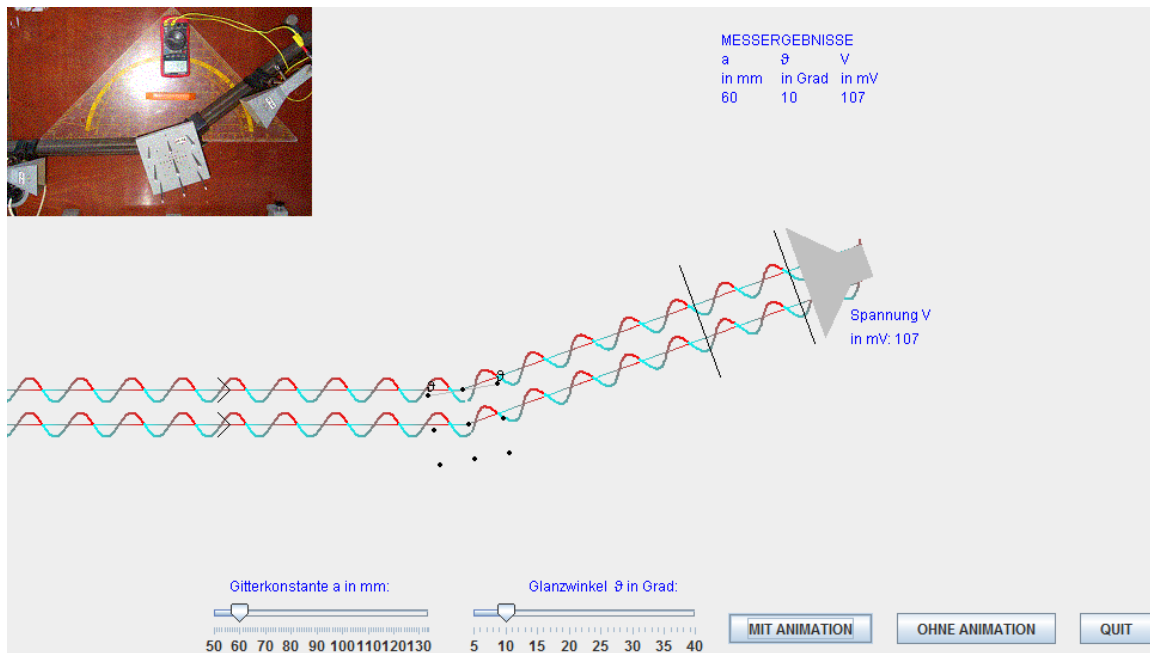


$$GK = HY \cdot \sin(\vartheta)$$

$$\Delta s/2 = d \cdot \sin(\vartheta)$$

$$\Delta s = 2 \cdot d \cdot \sin(\vartheta)$$

Konstruktive Interferenz bei $\Delta s = n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin(\vartheta)$



Applet zur Beugung am räumlichen Gitter

- 1) Simulieren Sie den durchgeführten versuch mit dem Applet.
- 2) Vergleichen Sie den simulierten Spannungsverlauf mit dem gemessenen.
- 3) Vergleichen Sie die simulierten Glanzwinkel mit den gemessenen und den berechneten.

9 Material

1. Analysieren Sie, welche Konzepte von Wellen die SuS im Laufe der UE kennenlernen.
2. Erstellen Sie eine Übersicht über die Phänomene, bei denen die Wellenlehre in dieser und in folgenden UEs angewendet wird.
3. Erläutern Sie Zusammenhänge zwischen der Schwingungs- und der Wellenlehre.
4. Nennen Sie Beispiele, bei denen die Schwingungs- und Wellenlehre bereits in der Sekundarstufe 1 vorkommen kann.
5. Nennen Sie Medien, die in dieser UE besonders hilfreich sind.
6. Nennen Sie Methoden der Schüleraktivierung, die in dieser UE besonders hilfreich sind.
7. Beantworten Sie die Frage bei Abb. 1.
8. Entwerfen Sie eine Stunde, welche die in der Haut befindlichen auf Vibration ansprechenden Nervenzellen nutzt.

10 Zusammenfassung

Die Welle ist neben dem Teilchen das grundlegende Konzept der Physik, nicht nur im Mikrokosmos. Die drei wichtigsten Sinne des Menschen, das Sehen, das Hören und über die auf Vibration ansprechenden Zellen der Tastsinn reagieren auf Schwingungen oder Wellen. Bei vielen Naturgewalten, Lebewesen und technischen Geräten sind Schwingungen und Wellen wesentlich.

Diese Vielfalt von Phänomenen wird durch ein klares System harmonischer sowie daraus linear zusammengesetzter Schwingungen und Wellen erschöpfend strukturiert.

Ich wünsche Ihnen, dass Sie bei Ihren SuS die Kompetenz entwickeln, Schwingungen und Wellen in der Natur und Technik zu entdecken, zu analysieren oder auch anzuwenden.

Literatur

[Beime u. a. 2012] BEIME, Christa ; HOPPE, Petra ; HUMMES, Klaus-Peter ; VÖPEL, Karl-Heinz ; VOSS, Christine ; ZEMANN, Winfried: *Kerncurriculum für die Integrierte Gesamtschule, Schuljahrgänge 5 - 10, Naturwissenschaften, Niedersachsen*. Hannover : Niedersächsisches Kultusministerium, 2012

[Brüning u. a. 2010] BRÜNING, Thomas ; DÖTZER, Susanne ; ELSASSER, Wolfgang ; HEIKE, Christina ; JÜTTNER, Horst ; MICHALSKI, Regina ; MOORKAMP, Michael ; SUTTMAYER, Beate: *Rahmenrichtlinien für das Fach Naturwissenschaft in der Klasse 12 der Fachoberschule, Niedersachsen*. Hannover : Niedersächsisches Kultusministerium, 2010

[Carmesin 2003] CARMESIN, Hans-Otto: Einführung der Wellenlehre mit Hilfe eines Kontrabasses. In: NORDMEIER, Volker (Hrsg.) ; Deutsche Physikalische Gesellschaft (Veranst.): *Tagungs-CD Fachdidaktik Physik*. Berlin : DPG, 2003

-
- [Carmesin u. a. 2020] CARMESIN, Hans-Otto ; EMSE, Anneke ; PIEHLER, M. ; PRÖHL, Inka K. ; SALZMANN, Wiebke ; WITTE, Lutz: *Universum Physik Sekundarstufe II Niedersachsen Qualifikationsphase*. Berlin : Cornelsen Verlag, 2020
- [Frenzel 2017] FRENZEL, Michael u. a.: *Kerncurriculum für das Gymnasium - gymnasiale Oberstufe, die Gesamtschule - gymnasiale Oberstufe, das Fachgymnasium, das Abendgymnasium, das Kolleg, Physik, Niedersachsen*. Hannover : Niedersächsisches Kultusministerium, 2017
- [Gehmann 2015] GEHMANN, Kurt u. a.: *Kerncurriculum für das Gymnasium, Schuljahrgänge 5 - 10, Naturwissenschaften, Niedersachsen*. Hannover : Niedersächsisches Kultusministerium, 2015
- [O'Hare 2009] O'HARE, Mick: *Wie man mit einem Schokoriegel die Lichtgeschwindigkeit misst und andere nützliche Experimente für den Hausgebrauch*. Frankfurt : Fischer Taschenbuch Verlag, 2009