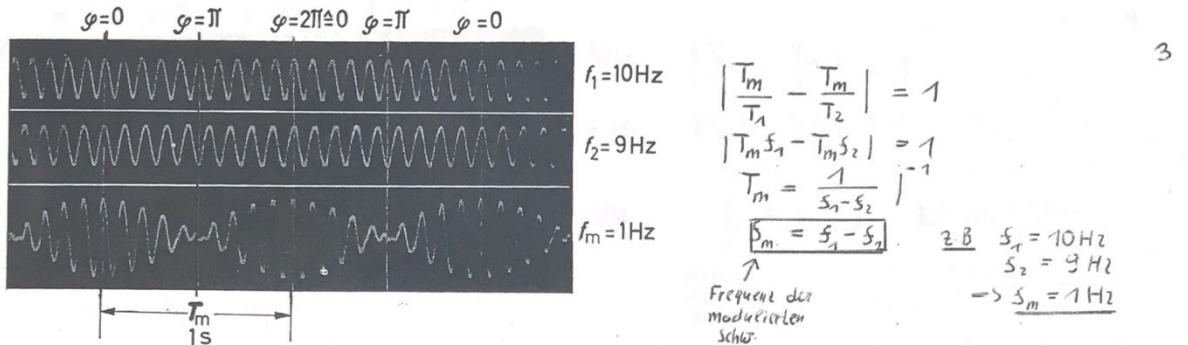


## SCHWEBUNG

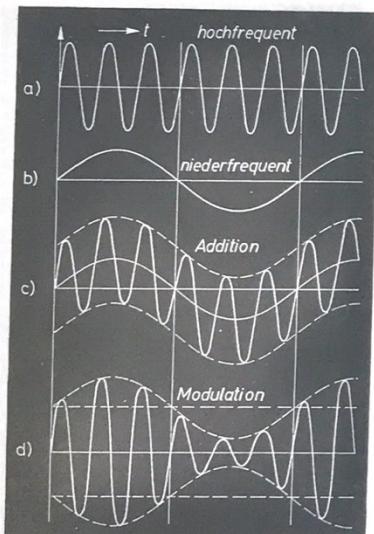
Überlagerung 2-er SINUSCHWINGUNGEN mit sost gleicher Frequenz  $\omega_1 \approx \omega_2$  (gleiche Schwingungsrichtung).  
Sührt zu einer Schwingung mit periodisch veränderlicher Amplitude genannt MODULIERTE SCHWINGUNG.  
Während der sog. Modulationsdauer  $T_m$  = Zeitspanne zwischen 2 Amplitudenmaxima bleibt die langsommere Schw. gegenüber der schnelleren um genau um 1 Periode zurück d.h. die schnellere führt genau eine Schw. mehr aus als die langsommere.



Überlagerung zweier Sinusschwingungen mit den Frequenzen 9 Hz und 10 Hz zu einer modulierten Schwingung mit der Modulationsfrequenz  $(10 - 9)$  Hz = 1 Hz (Photos Schreiner)

V: 2 Stimmäbeln mit sost gleicher Frequenz  
→ Man hört einen Ton veränderlicher Lautstärke (veränd. Amplitude)

## AMPLITUDEMODULATION AM



### Amplitudenmodulation

- ← a) Hochfrequente Schwingung (Trägerschwingung)  
 $y_0 = U_0 \sin \omega_0 t$
- ← b) niederfrequente Schwingung  
 $y_1 = U_1 \sin \omega_1 t$
- c) Addition (Überlagerung) der beiden Schwingungen aus a) und b)  
 $y = y_0 + y_1$
- d) Modulation der hochfrequenten Schwingung im Rhythmus der niederfrequenten Schwingung; die Modulation stellt keine einfache Addition der beiden Schwingungen dar (c), bei welcher die Elongationen addiert werden. Es wird vielmehr zur Amplitude der Trägerschwingung die Elongation der Niederfrequenzschwingung addiert  
 $y = (U_0 + y_1) \sin \omega_0 t$

Bei der AM wird die Amplitude einer hochfrequenten Trägerschwingung durch eine niederfrequente Schw. (z.B. Tonschwingung) moduliert. Die Information (Musik, Daten) wird der HF-Schw. dadurch ausgeprägt und mit ihr übertragen.

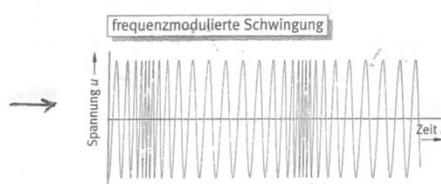
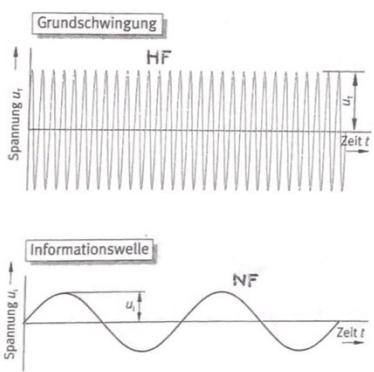
Nachteil:

- Störsäällig (Gewitter), die INFO in der Amplitude steckt
- Nicht beliebig große Lautstärke übertragbar

Anw:

- Rundfunk mit MW, LW, KW
- CB-Funk
- Flugnavigation

## FREQUENZMODULATION FM

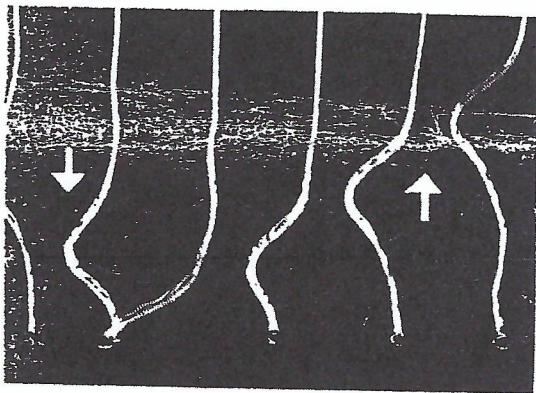
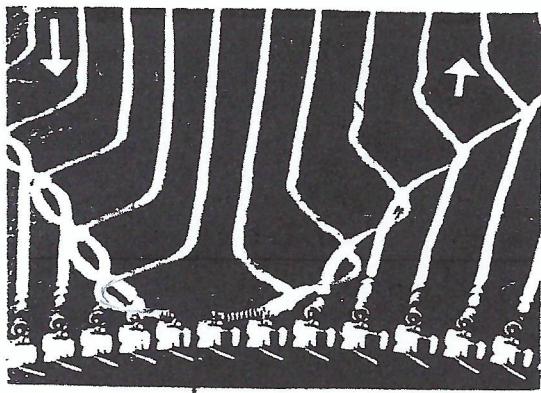


Anw:

- TV
- UKW (z.B. Ö3)

Die NF Informationswelle ändert periodisch die Frequenz der HF Trägerschwingung und prägt ihr dadurch INFO aus

## 2. STEHENDE WELLEN



REFLEXION einer SEILWELLE (Seile, Gummischlauch, Schraubfeder, ...)  
am FESTEN Ende

Aus einem WELLENBERG wird ein WELLENTAL.

Es tritt ein PHASENSPRUNG VON  $180^\circ \equiv \pi$  auf. (100%)

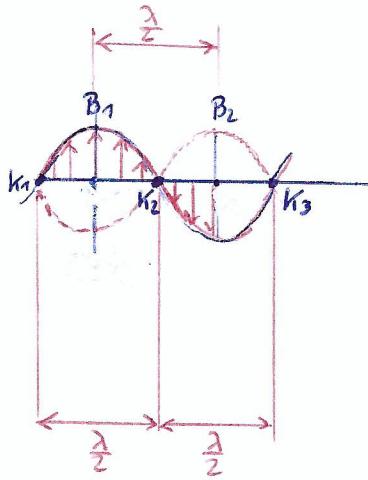
$$\begin{array}{c} \uparrow \\ \uparrow \end{array}$$

REFLEXION einer Seilwelle am LOSEN Ende (Seilende an langem dünnen Fäden befestigt  $\Rightarrow$  frei beweglich).

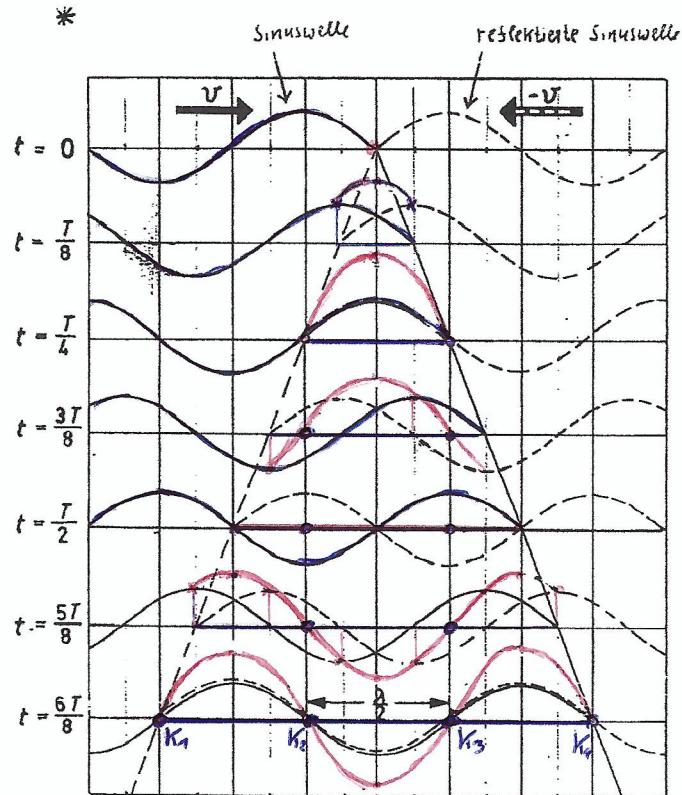
Ein Wellenbergs wird als WELLENBERG reflektiert.

Es tritt KEIN PHASENSPRUNG auf

Entstehung stehender Wellen:  
(stationäre Schwingungszustände)



$K_1, K_2, K_3$  — Knoten  
 $B_1, B_2, \dots$  Bärche



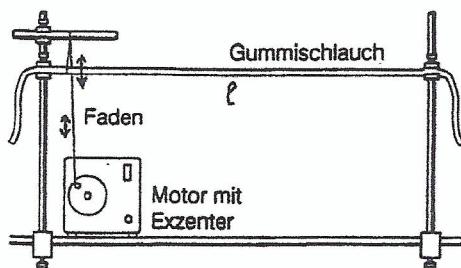
Überlagern (interferieren) sich eine sinusförmige Seilwelle und jene (ebenso sinusförmige) Seilwelle die durch Reflexion am Seilende entsteht, so entsteht als Summenwelle eine sog. STEHENDE WELLE mit folgenden Eigenschaften:

1. Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v=0$  ( $\Rightarrow$  Normale)
2. Es treten am Seil Punkte auf, die immerwährend ruhen, sog. SCHWINGUNGSKNOTEN und solche, die mit maximaler Amplitude schwingen, sog. SCHWINGUNGSBÄUCHE. Insbesondere schwingen alle Seipunkte mit gleicher Frequenz.
3. Punkte zwischen benachbarte Knoten schwingen gleichphasig. Punkte aus verschiedenen Seiten eines Knotens gegenphasig.
4. Der Abstand 2-er Knoten ist gleich der halben Wellenlänge oder lauen den Wellen.

# Stehende Transversalwellen

214

V:



- Versuchsablauf:  $\xi$  mit  $0 \text{ Hz}$  beginnend, immer mehr steigern.

- $\xi$  gering  $\Rightarrow$  Seil bewegt sich (sost) nicht
- $\xi = \xi_1 \Rightarrow$  Seil schwingt heftig (Resonanz = Anregung in der Eigenfrequenz  $\xi_1$  = Grundfrequenz)
- $\xi_1 < \xi < \xi_2$   $\Rightarrow$  Seil schwingt nicht
- $\xi = \xi_2 \Rightarrow$  Seil schwingt heftig (Resonanz: Anregung in der 1. Oberfrequenz - 1. Oberschwingung) u.s.w.

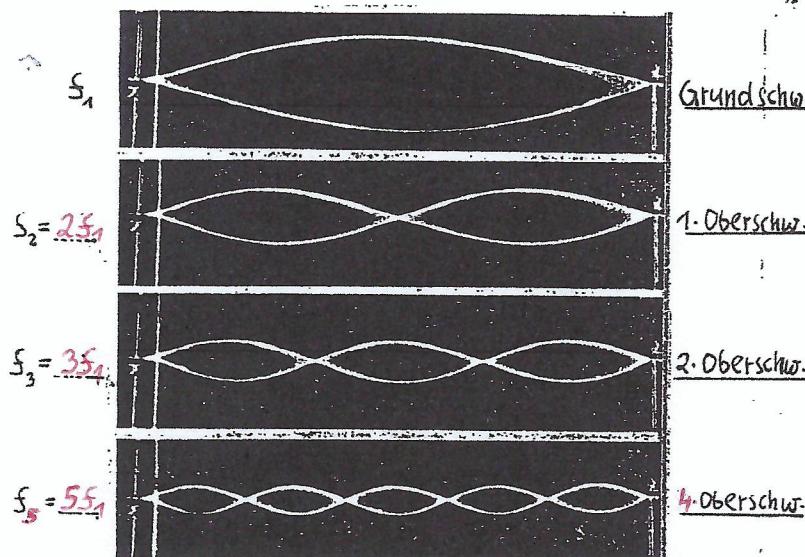
Zustoss:

Ein Seil besitzt unendlich Eigenfrequenzen  $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots$ . Bei Anregung in einer dieser Frequenzen gelößt das Seil in heftige Schwingungen (Resonanz). Die dabei entstehenden Schwingungsformen heißen STATIONÄRE SCHWINGUNGEN oder auch wegen ihrer Form STEHENDE WELLEN.

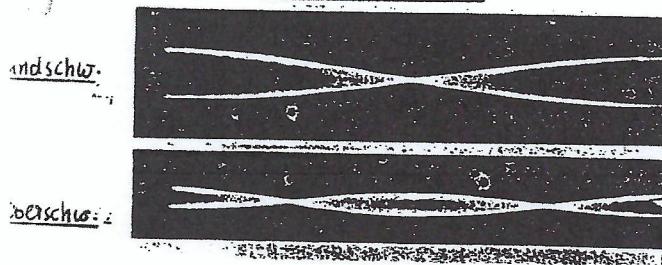
Diese Schwingungen müssen dabei stets folgende Randbedingungen erfüllen:

- Am festen Ende ist stets ein SCHWINGUNGSKNOTEN
- Am losen Ende befindet sich stets ein SCHWINGUNGSBAUCH (da das Seilende stets parallel zur Ruhelage sein muß)
- Stehende Wellen im begrenzten Seil entstehen durch Überlagerung der laufenden & reflektierten Welle nur dann, wenn die Wellenlänge  $\lambda$  der laufenden Welle ( $c = \lambda \cdot \xi$ ) in einem ganz best. Verhältnis zur Seillänge  $l$  steht. Der Knotenabstand  $\frac{l}{2}$  darf die Randbedingungen nicht verletzen.

- 2 feste Enden



- 2 lose Enden



Frequenzspektrum bei 2 festen o. 2 losen Enden?

$$l = n \cdot \frac{\lambda}{2} = n \cdot \frac{v}{2\xi} \quad | \cdot s, \div p$$

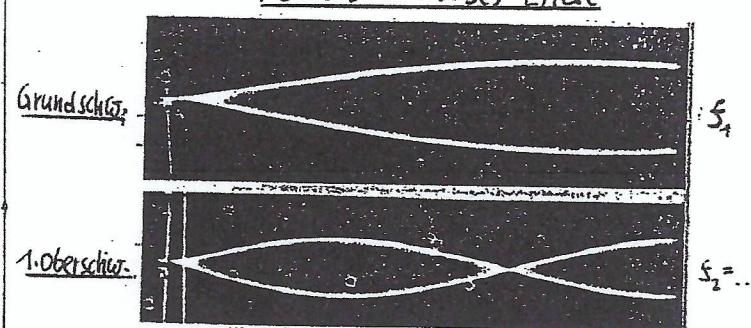
$$\Rightarrow \xi = \frac{v}{2l} \cdot n$$

$$\xi_1 = \frac{v}{2l} \quad \text{Grundfrequenz}$$

$$\xi = n \cdot \xi_1 \quad \text{Frequenzspektrum } n=1,2,3 \dots$$

Bei 2 festen o. 2 losen Enden besteht das Frequenzspektrum (= Menge aller Eigenschwing.) aus allen ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz  $\xi_1$ . Die Grundfrequenz ist dabei umso niedriger je größer die Seillänge  $l$  und je kleiner die Ausbreitungsg. v. der Seilwelle (laufend) ist.

- 1 festes + 1 loses Ende



Frequenzspektrum bei 1 festes + 1 loses Ende

$$l = (2n-1) \cdot \frac{\lambda}{4} = (2n-1) \cdot \frac{v}{4\xi} \quad | \cdot s, \div p$$

$$\Rightarrow \xi = \frac{v}{4l} \cdot (2n-1)$$

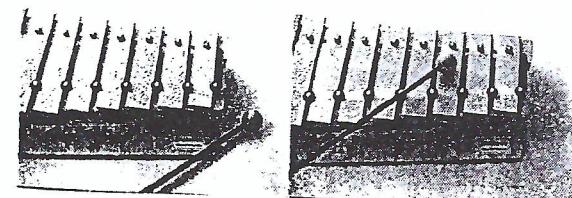
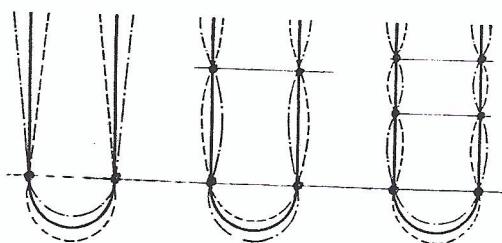
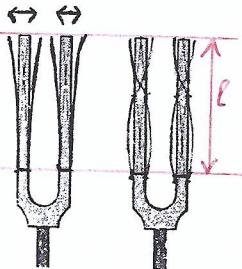
$$\xi_1 = \frac{v}{4l} \quad \text{Grundfrequenz}$$

$$\xi = \xi_1 \cdot (2n-1) \quad \text{Frequenzspektrum}$$

Bei einem festen + 1 losen Ende besteht das Frequenzspektrum aus allen ungeradzahligen Vielfachen der Grundfrequenz  $\xi_1$ .

Diese ist nur halb so groß wie die Grundfrequenz bei 2 festen o. 2 losen Enden.

a, 1 dimensionale Transversalschwingungen:



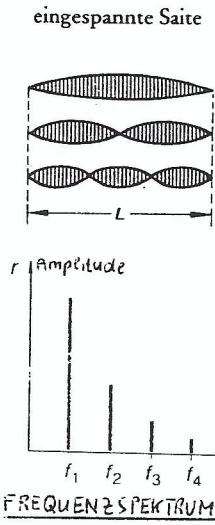
Die Salzkörper bleiben während des Spieles in der Nähe der Auflagepunkte der Klangstäbe liegen. Dort treten Knotenlinien auf.

$$s = \frac{v}{2L} \cdot n \quad \text{2 feste Ende}$$

- STIMMGABEL: Stets 1 Knoten bei der Hopterung. Oberschwingungen vernachlässigbar. Die Tonhöhe der Stimmgabel-Sinus-Schwingung (Grundschw.) ist umso größer je kleiner L und je größer die Schallgeschw. v im Stimmgabelmaterial ist

$$s = \frac{v}{4L} \cdot (2n-1) \quad \text{1 feste & 1 loses Ende}$$

• SCHWING. SAITEN

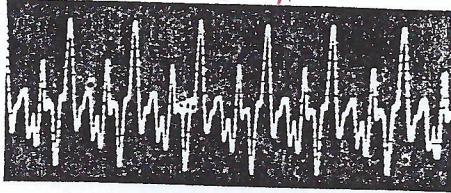


$$\text{Gestalt der Saite} \quad \text{Grundschwingung} \quad 1. \text{ Oberschwingung} \quad \text{Hörbereich des Menschen:}$$

$$\text{Seite} \triangleq \text{Seil mit 2 festen Enden.}$$

$$20 \text{ Hz} < s < 20000 \text{ Hz} \rightarrow 17 \text{ m} > \lambda > 17 \text{ mm.}$$

Durch Überlagerung der Grundschwingung  $s_1$  und den harmoischen Oberschwingungen entsteht ein sogen. KLANG. Seine Frequenz  $s$  ist gleich der Frequenz der Grundschwingung  $s_1$  (Grund: Periodendauer der Summenschw.  $T = k_0 V (T_1, T_2, T_3, T_4, \dots)$ )  $= k_0 V (T_1, \frac{T_1}{2}, \frac{T_1}{3}, \frac{T_1}{4}, \dots) = T_1 \Rightarrow s = s_1$ . Die Klangfarbe wird vom



OZILLOGRAMM EINES VIOLINENKLANGES

Amplitudenverhältnis der überlagerten Schwingungen bestimmt. Soll der Seitenklang eines Musikinstruments künstlich nachgeahmt werden (SYNTHESIZER MUSIK), so müssen die Sinusschwingungen (Grundschwingung + Oberschwingungen) im passenden Amplitudenverhältnis zusammengesetzt werden. (Umgekehrte FOURIERANALYSE)

„Tonhöhe“ einer Saite 2 feste Enden  $\Rightarrow s_1 = \frac{v}{2L}$

- $s$  ist umso höher:
  - je kurzer
  - je stärker
  - je kleiner
  - je kleiner

Schallg. im elast. Festkörper:  $v = \sqrt{\frac{F}{\rho A}}$   
 (A = Seitenquerschnitt,  $\rho$  = Dichte; F = Seitenspannkraft)  
 die Seite ist. (Anw: Seite an Stiel drücken  $\Rightarrow s$  wächst)  
 die Seite gespannt ist. (Anw: Beim Stimmen)  
 die Dichte des Seitenmaterials ist.  
 oder Querschnitt der Seite ist.

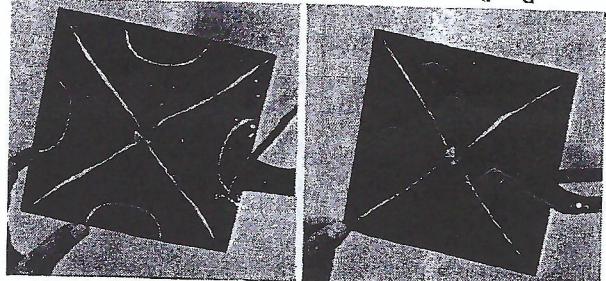
Anregung einer Saite:

- Durch schlagen  
 Durch streicheln  
 Durch zupfen

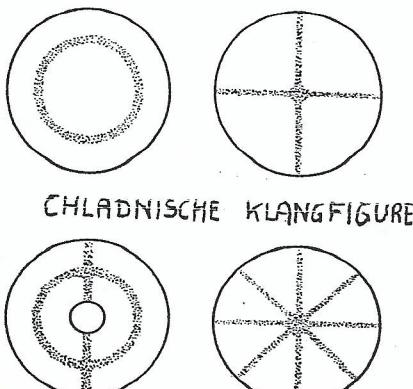
(Klavier, Hochbrett, ...)

(Streichinstrumente: Geige, Cello, Bratsche ...  
 (Gitarre, Harfe, Zither, ...)

b, 2 dimensionale Transversalschwingungen



Anregung einer Metallplatte zu Schwingungen,



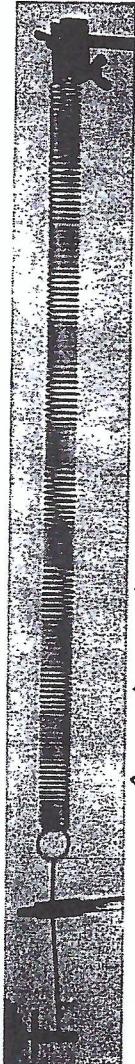
CHLADNISCHE KLANGFIGUREN

Metallplatten können zu Flächenhaften stehenden Wellen angelegt werden. Stellt Schwingungsknoten treten KNOTENLINIEN.

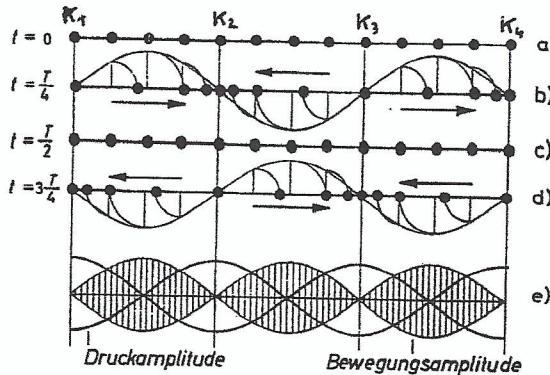
- Anw: • Glocken sind gebogene Platten  
 • Becken, Gong

# STEHENDE LONGITUDINALWELLEN

714



Stehende longitudinale Welle in einer Schraubenfeder. Ein Motor mit Exzenter zieht periodisch an der Feder. Die Schnur ist zur Verhinderung seitlichen Schwingens durch ein Loch geleitet. An den Knoten ist die Feder völlig in Ruhe und daher trotz Zeitaufnahme scharf abgebildet. (Photo Schreiner)

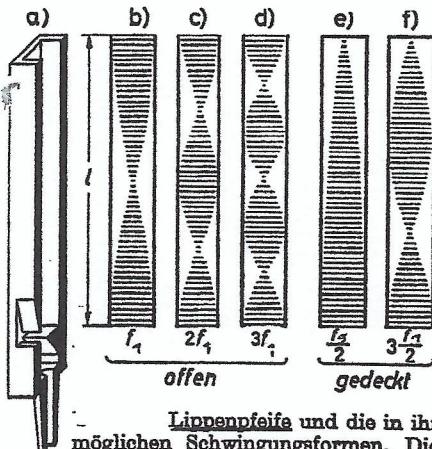


Bewegung und Druck (Dichte) in einer stehenden Longitudinalwelle

- Mediumteilchen in gleichmäßiger Verteilung ( $t = 0$ )
- Die erst transversal gezeichneten Elongationen der Teilchen wurden zu longitudinalen Elongationen umgeklappt. Die Zeichnung stellt die Verteilung der Teilchen zum Zeitpunkt  $t = T/4$  dar
- Verteilung zur Zeit  $t = T/2$
- Lage der Teilchen zum Zeitpunkt  $t = 3T/4$
- Bewegungs- und Druckamplitude (Dichteamplitude) als Funktion des Ortes

In longitudinalen stehenden Wellen sind die Bewegungsknoten - Druckbäuche - (Dichte bäsche) die Bewegungsbäuche hingegen sind Drucknöten (Dichtknöten)

## Anwendung: BLASINSTRUMENTE



Lippenpfeife und die in ihr möglichen Schwingungsformen. Die Amplitudenverteilung in den longitudinalen stehenden Wellen ist transversal gezeichnet

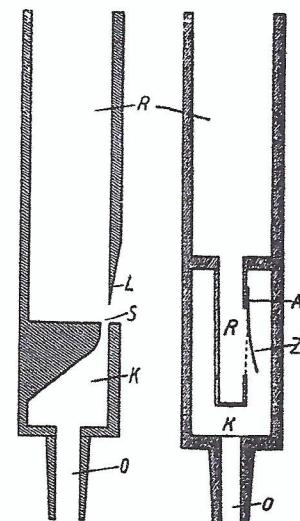
Grundfrequenz  $f_1 = \frac{v}{4l}$   
Frequenzspektrum besteht hier aus allen ungeradzahligen Vielfachen der Grundfrequenz.

## QUINCKESCHES RESONANZROHR

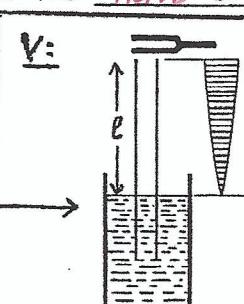
Resonanz bei Wellenlängen  $l = \frac{3}{4}, \frac{31}{4}, \frac{51}{4}, \dots$

Bei Blasinstrumenten wird <sup>die</sup> in einem Rohr R (O-Schalltrichter) befindliche Luft durch Anblasen in Eigenschw. versetzt (stehende Longitudinalwellen). Je nach Art der Schwingungsanregung unterscheidet man zwischen O<sub>1</sub> LIPPENPFEIFEN und O<sub>2</sub> ZÜNGENPFEIFEN

- o<sub>1</sub> Das dem Spieler zugewandte Rohrende wirkt als loses Ende. Bei der - sog. offenen LIPPENPFEIFE ist auch das dem Spieler abgewandte Rohrende loses Ende ( $\approx 2$  Enden)
- $\Rightarrow$  Grundfrequenz:  $f_1 = \frac{v}{2l}$
- Das Frequenzspektrum enthält alle geradzahligen Vielfachen der Grundfrequ.
- Bei der gedeckten Lippenpfeife (1. loses Ende + 1. festes Ende) ist die



O<sub>1</sub> LIPPENPFEIFE O<sub>2</sub> ZÜNGENPFEIFE



Messung der Schallg. in Luft bei Zimmertemp. 21°C  
Stimmgabekl.:  $f = 440 \text{ Hz}$

Länge der Luftsäule bei Auftreten der Grundschnurung  $l = 19 \text{ cm} \Rightarrow \lambda_1 = 4 \cdot 19 = 76 \text{ cm} = 0,76 \text{ m}$

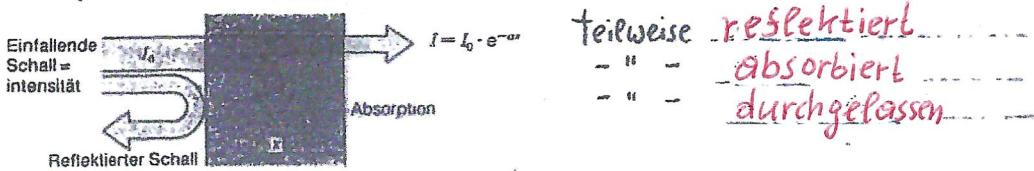
$$v = \lambda \cdot f \Rightarrow v = 0,76 \cdot 440 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 334 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

FRAGEN: 1. Wie verändert ein Blasinstrument Spieler die Tonh.  
2. Wie lange muß eine Orgelpfeife sein, wenn sie

# SCHALLABSORPTION, SCHALLDÄMMUNG



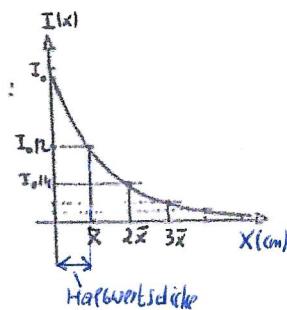
1. Was passiert mit Schall der auf eine Wand trifft?



2. Die Absorption des Schalles wird durch ein Exponentiellgesetz beschrieben:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\alpha x}$$

$I_0$  ... In die Wand eindringte Schallintensität  
 $I(x)$  ... Schallintensität nach Eindringen in die Wand um den Weg  $x$   
 $\alpha$  ... Schallabsorptionsgrad  
 $x$  ... Halbweltdicke



3. Wovon hängt die durch die Wand durchgelassene Schallintensität ab?

Wandstärke, Material, Frequenz (höher Freq. werden besser absorbiert)

4. Was ist ein schalltotter Raum + Beispiel?

Die Schallwellen werden zu 100% von den Wänden absorbiert z.B. Raum mit spezieller Dämmstoffe

5. Was ist ein Hallenraum und wozu dient er?

Die Wände absorbieren 0% und reflektieren 100% der Schallenergie

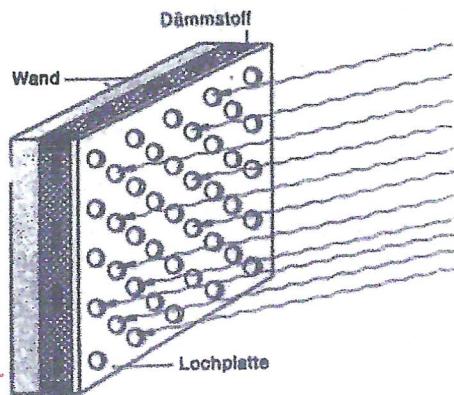
Bsp: Raum in dem Schallleistung gemessen wird.

6. Wie sind Schallschluckstoffe (Schalldämmstoffe) aufgebaut, wodurch wird hohe Schallabsorption erreicht, Beispiele für Materialien?

- Aufbau: Porös & filzig

- Mechanismus der Schallabsorption Unelastische Vielfachreflexion an Poren und Kanalwundungen zehrt die Schallenergie auf (Reibung)

- Beispiele: Telwolle, Styropor, Wölle, polymere Schäume, Filze, Holzfaserstoffe, Herdfeile, Teppiche, Textilien, Kork, Mineralwolle



7. Wie arbeitet ein Schalldämpfer? (Auspusanganlage: Auto, Motor, -)

Schall wird durch ein System von Kanalwundungen gestreut = unelast. Reflexion  $\Rightarrow$  Absorption teilt d.h. Dämpfung Vielfachreflexion

8. Wodurch kann das Hallen (= Schallreflexion an Wänden)  $\Rightarrow$  Dämpfung vermindert werden?

- Wandverkleidung, Teppichböden, Vorhänge

9. Wie werden Rohre (Gas, Wasser, -) verlegt? Worum?

Nicht einbetoniert, sondern mit einer Dämmstoffmanschette umgeben

10. Was ist Trittschall und wie wird er vermieden?

Begriff: Schallweiterleitung wie Schritte, Stühle rücken - trampeln  $\Rightarrow$  Schall kann nicht vom Rohr auf die Mauer übertragen werden.

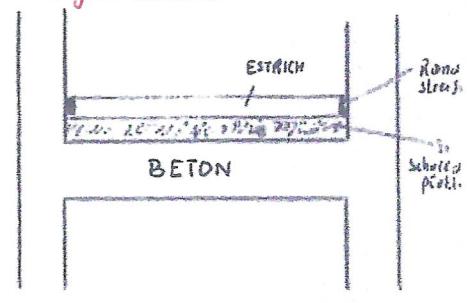
Vermeidung: Schwere Platten (Estrich: Mörtelschicht) auf weichem Schumstoff (Herdfeile, Telwolle): „Schwimmender Estrich“



11. Wie sind Lärmschutzwände (Stadtautobahn!) aufgebaut? (Bild e.o.)

- Möglichst hoch (Vermind. der Brüllung)
- Mit Öffnungen (Schallentritt  $\rightarrow$  Vielfachreflexion  $\rightarrow$  Absorption)
- Möglichst breit

12. Werden durch Lärmschutzwände neue oder tiefe Töne besser abgeschirmt? (Grund!)



## Informationen, Hinweise

Seit dem Popkonzert der britischen Gruppe »Deep Purple« ist ein sechzehnjähriger Zuhörer auf einem Ohr taub geworden. Er hatte es unterlassen, so wie einige seiner Freunde, vor Beginn des Konzerts sich die Ohren mit Wattepropfen zu verstopfen. (Zeitungsausschnitt)

## LAUTSTÄRKE

- Schalleistung  $P$  einer Schallquelle ist die gesamte je  $\Delta t$  in den Raum abgestrahlte (Energiestrom)
 

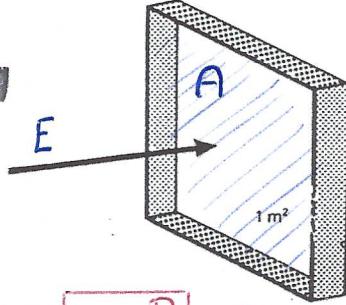
$$P = \frac{E}{\Delta t} \quad (P) = 1 \frac{W}{s} (-1W) - \text{WATT}$$

(Vgl: Hubarbeit einer 100g Schokolade für 1m in 1s:  $P = \frac{W}{t} = \dots$ )

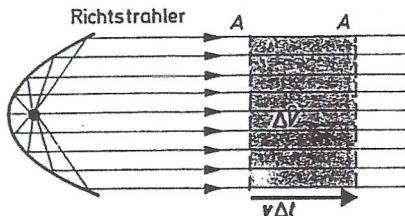
TABELLE:

Schallquelle	sprache	Geige	Trompete	Orchester	Orgel	Lautspr.	Alarmsire
Schalleistung	$< 10^{-5} W$	$< 10^{-3} W$	$< 0,3 W$	$< 5 W$	$< 10 W$	$< 100 W$	$< 3000$

- Schallintensität  $I$  an einer Stelle  $P$  des Raumes (z.B. Ohr, Mikrofon, ...) ist die (Schallstärke, Schallenergiestromdichte) Schallenergie, die je  $\Delta S$  bei senkrechtem Einfall durch  $1m^2$  Fläche durchtritt.

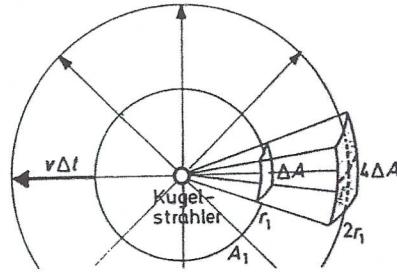


$$\text{Def: } I = \frac{P}{A} = \frac{\text{Schalleistung}}{\text{Fläche}}$$



In einem ebenen Wellenbündel ist die Intensität fast konstant.

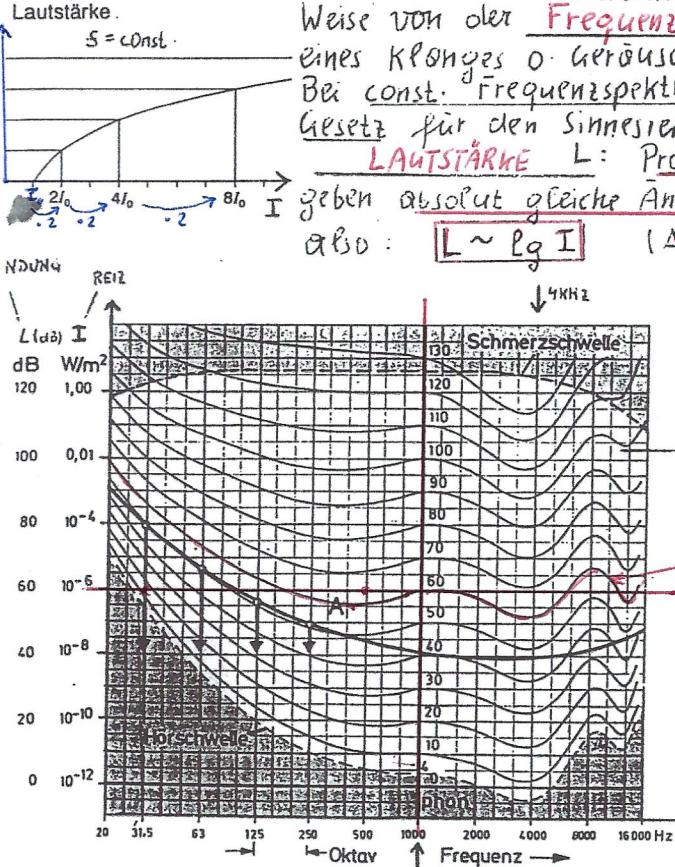
$$I = \frac{P}{A} = \text{const.} \quad (\text{unabh. von } r)$$



In einer Kugelwelle ist die Intensität zu  $r^2$  verkehrt proportional; das gilt für Schall ebenso wie für Licht.

$$I = \frac{P}{A} = \frac{P}{4\pi r^2} = \left(\frac{P}{4\pi}\right) \cdot \frac{1}{r^2} \sim \frac{1}{r^2}$$

- Lautstärke  $L$ : Die Sinnesempfindung Lautstärke hängt von der am Ohr herrschenden Schallintensität  $I$  und in komplizierter Weise von der Frequenz  $f$  eines Tones (bzw. vom Frequenzspektrum eines Klänges o. Geräusches) ab.
- Bei const. Frequenzspektrum gilt annähernd das WEBER-FECHNERSCHE Gesetz für den Sinnesreiz Schallintensität  $I$  und der Sinneswahrnehmung LAUTSTÄRKE  $L$ : Prozentuelle gleiche Änderungen der Schallintensität  $I$  geben absolut gleiche Änderungen der Lautstärke  $L$ . (Vgl: 1 Geige  $\rightarrow$  2 Geigen  $\rightarrow$  1 Motorrad  $\rightarrow$  2 Motorräder)
- also:  $L \sim \log I$   $(\Delta L = \log \frac{I_2}{I_1} = \log I_2 - \log I_1 = L_2 - L_1)$



Phonskala der Lautstärke

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

- BEM: • Hörschwellen  $\approx$  Ophon, Schmerzschwellen  $\approx$  130phon, Schallintensität des sog. Normaltones 1kHz an der Hörschwellen:  $I_0 = 10^{-12} \frac{W}{m^2}$
- Doppelte  $I$  führt jeweils zu einer Steigerung der  $L$  um  $\Delta L = 3 \text{ phon}$  (1kHz) von  $\Delta L = 10 \text{ phon}$  (1kHz)

Intensität jenes 1kHz Tones der von einer Versuchsgruppe gleich Paul wie der zu mess. Schall (Klang) empfunden wird.

Schallintensität des sog. Normaltones 1kHz an der Hörschwellen:  $I_0 = 10^{-12} \frac{W}{m^2}$

$$10 \log 2 \approx 3$$

• TABELLE

$I (W/m^2)$	$L (\text{phon})$	Beispiele
$10^{-12}$	0	Hörschwelle
$10^{-10}$	20	Flüstersprache
$10^{-8}$	40	Unterhaltungssprache
$10^{-6}$	60	Schreibmaschinenklappern
$10^{-4}$	80	Motorrad mit Schalldämpfern, Disco
$10^{-2}$	100	Motorrad ohne Schalldämpfer, Disco
$10^0$	120	Flugzeugmotor in 4m Entf.
$10^1$	130	Schmerzschwelle

• Bsp2: 40 phon Unterhaltungsspr.  $I = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{10^{-12}}{10^{-12}} / : 10$   
 $I = \log \frac{I}{10^{-12}} / \text{Depog.}$   
 $10^4 = \frac{I}{10^{-12}} / \cdot 10^{-12}$   
 $I = 10^{-8} \frac{W}{m^2}$

• SCHALLPEGEL  $L$ , dB-Skala der Lautstärke:

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

→ Schallintensität des Schallleidmises.

$10^{-12} \frac{W}{m^2}$  = Hörschwelle des 1kHz Tones

→ Vorteil: Physik mit Schallpegel  
meßgerölt leicht messbare phys. Größe  
(Mikrofon, Verstärker, Anzeige in dB)

→ Nachteil: Die dB-Skala stimmt nur für  $f = 1\text{kHz}$  mit der Phonskala überein  
und ist daher für diese Frequenz ein Maß für die Sinnesempf. Lautstärke

→ Da die Schallintensität  $I \sim$  zum Quadrat des Schalldruckes  
also  $I \sim p^2$  d.h.  $I = Kp^2 \Rightarrow L = 10 \log \frac{Kp^2}{Kp_0^2} = 10 \log \left( \frac{p}{p_0} \right)^2$   
d.h.  $L = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0}$ ,  $p$  --- Schalldruckamplitude  
 $p_0$  --- Schalldruckamplitude bei der Hörschwelle des 1kHz Tones  
 $\Rightarrow$  Auch Name Schalldruckpegel üblich.

Ü: Geg: SIN-Töne 31,5 Hz, 500 Hz, 4000 Hz erzeugen im Ohr eine Schallintensität von  $10^{-6} \frac{W}{m^2}$   
Ges: Schallpegel & Lautstärke

$f$	$I (W/m^2)$	$L$	$L_N$
31,5 Hz	$10^{-6}$	60dB	$\approx 15 \text{ phon}$
500 Hz	$10^{-6}$	60dB	$\approx 65 \text{ phon}$
4000 Hz	$10^{-6}$	60dB	$\approx 68 \text{ phon}$
1000 Hz	$10^{-6}$	60dB	60 phon

gleich viel dB  
aber unterschiedlich  
laut

ENDE

+ • Bewerteter Schallpegel (dB(A), dB(B), dB(C))

(praktisches Lautstärkemaß)

- Nachteil der Phonskala: Man braucht eine Versuchsgruppe

- Nachteil der dB-Skala: Sie ist nur für 1kHz ein Maß für die Lautstärke

Für die (ungefähre) techn. Best. der (subjekt. Lautstärke) ohne Versuchspersonen müßte ein Meßgerät die dB-Werte abhängig von  $f$  (kompliziert) schwächen (dämpfen) um phonwerte zu erhalten: z.B. 40dB Anzeige: Bei 1kHz  $\rightarrow 40$  phon (Schwach. 0dB)  
 $63\text{Hz} \rightarrow 15$  phon (Schwach. ....)

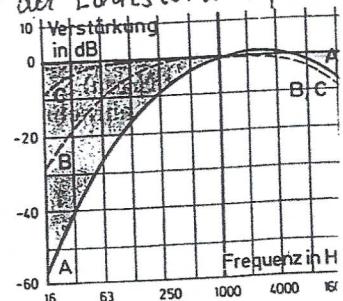
zur Überprüfung von Lärmschutzmaßnahmen: Ersetzen der Kurven gleicher Lautstärke durch einfache Kurven und gendormte Abschwächung via BewertungsfILTER A (B oder C, genormt  $\Rightarrow$  dB(A) Werte  $\approx$  phon Werte)

Def: Der bewertete Schallpegel  $L_A (L_B, L_C)$  ist eine durch Normung definierte meßbare Größe, Einheit dB(A) (dB(B), dB(C)), der ungefähr gleich der Lautstärke in phon.

+ • PEGLABSTAND

$\Delta L = 10 \log \frac{I_2}{I_1}$  heißt Pegelabstand der Schallintensität  $I_2$  von  $I_1$   
(Einheit: dB) Pegelangaben sind wie Höhenangaben relativ, so lange kein Nullpegel als Nullwert gewählt wird: z.B.  $I_0 = 10^{-12} \frac{W}{m^2}$   
 $\rightarrow$  Lautstärkepegel L

z.B. Verstärker  $P = 30\text{W}$  Sinusleistung mit Störpegelabstand -63dB  
d.h.  $\Delta L = 10 \log \frac{P}{P_0}$  Ges. Störleistung  $P_0 = 10^{-12} \frac{W}{m^2}$



Bewertungskurven nach DIN 45633 bzw. Verord. d. BA. f. Eichwesen v. 29.6.1979

# Wissenscheck Schwingungen & Wellen

1/2

## 1. a) Gib 4 Beispiele für Schwingungen

Federpendel, Fadenpendel, Stimmfabel, Gebäudeschwingung, Schallschwingung, ...

b) Was bedeuten die Begriffe Elongation, Amplitude, Periodendauer & Frequenz? gib auch die jeweiligen Formelsymbole sowie deren Einheiten im SI-System an!

Elongation = Auslenkung aus der Ruhelage zum Zeitp. t

Amplitude = Maximale Auslenkung aus der Ruhelage

Periodendauer = Dauer einer ganzen Schwingung

Frequenz = Anzahl der Schwingungen je s

Symbol:  $y(t)$ , Einheit:  $m$  (cm)

Symbol:  $y_{max}, r$ , Einheit:  $m$  (cm)

Symbol:  $T$ , Einheit:  $s$

Symbol:  $f$ , Einheit:  $Hz$

c) Geg: Frequenz 50Hz Ges: Periodendauer (+ Formel)

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} s = 0,02s$$

- Gläser klirren im Schrank (LkW)
- Kinderschaukeln (Kind + Erw.)

2. a) Was ist Resonanz? (Begriff, wann ist sie stark ausgeprägt?, 3 Beispiele)

Erzwungene Schwingung in der Eigenfrequenz. Die Amplitude wird dabei besonders groß.

Stark Ausprägung bei kleiner Dämpfung (wenig Reibung) z.B. 440Hz Stimmfabel + 440Hz Stimm.

b) Eine Sinusschw. besitzt 0,5Hz Frequenz, und 5cm Amplitude,  $y(0)=0$   
Gib ihre Gleichung an:  $y(t) = r \sin \omega t \Rightarrow y(t) = 5 \cdot \sin(\pi t)$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 0,5 = \pi$$

3. a) Werden 2 Sinusschwingungen gleicher Frequenz & gleicher Schwingungsrichtung addiert

$$y_1(t) = r_1 \sin \omega t \quad y_2(t) = r_2 \sin(\omega t + \varphi)$$

Sonderfälle ausstrelen

$$\varphi = 0 \quad y(t) = y_1(t) + y_2(t) = (r_1 + r_2) \cdot \sin(\omega t)$$

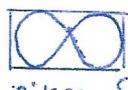
Man spricht von Konstruktive Interferenz. Die Amplitude  $r = r_1 + r_2$

$$\varphi = \pi \quad y(t) = y_1(t) + y_2(t) = r_1 \sin \omega t + r_2 \sin(\omega t + \pi) = (r_1 - r_2) \cdot \sin \omega t$$

Man spricht von Destruktiver Interferenz. Die Amplitude  $r = r_1 - r_2$

b) LISSAJOUFIGUREN sind Schwingungsfiguren (geschlossen), die sich ergeben, wenn man 2 Sinusschw. addiert die aufeinander NORMAL stehen & in einem rationalem Frequenzverhältnis stehen. (z.B. 2:3, 4:1, 3:5 ...)

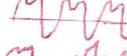
Eine Ellipse  ergibt sich wenn  $\frac{f_y}{f_x} = \frac{2}{3}$ .  $\frac{2}{3} \in \mathbb{Q}$

  $\frac{f_y}{f_x} = 2:1$  · Lissajoufiguren werden benutzt um die Frequenz einer Schwingung zu bestimmen. (unbekanntes)

4. a) Hörschall 16Hz  $\leq f \leq 20.000$  Hz

- Ultrahörschall: Schall mit  $f > 20.000$  (Hörbar für Hunde, Fledermäuse, Delphine)
- Infraschall: Schall mit  $f < 16$  Hz (Erzeugung durch z.B. Elefanten, Nilpferde, Wale)

b) 3 wichtige Arten von Schallereignissen

Schallereignis	Erzeuger	Oszilloskopbild
TON	Stimmfabel, Tongenerator	 SIN Kurve
KLANG	Musikinstrumente, <u>Vokale</u>	 Periodisch (aber keine SIN-Kurve)
GERÄUSCH	Blätterknirschen, Wasserfall	 Nicht periodisch

c) Ein Ton ist umso höher, je höher seine Frequenz ist.  
Ein Ton ist umso lauter, je größer seine Amplitude ist.

## 5. a. Gib 3 Beispiele für Wellen an

Wasserwellen, Seilwellen, Schallwellen, Elektrom. Wellen, Gravitationswellen,

b. Die Wellenlänge  $\lambda$ , ist der Abstand 2-er benachbarter Wellenberge und wird (im SI-System) gemessen in m.c. Die Grundgleichung der Wellenlehre gibt einen Zusammenhang zwischen  $\lambda$ ,  $f$ ,  $c$  an und lautet:  $c = \lambda \cdot f$ Schallwellen in Luft  $c \approx 330 \frac{m}{s}$  (bei 0°C), Elektrom. Wellen  $c = 300\ 000 \frac{km}{s}$  (im Vakuum)

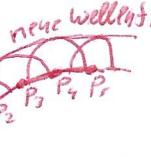
d. Eine Sämmigabel schwingt mit 1000Hz.

Berechne die Wellenlänge (Formel, Rechnung)

$$c = \lambda \cdot f \Rightarrow \lambda = \frac{c}{f} = \frac{330}{1000} = 0,33 \text{ m} = 33 \text{ cm}$$

e. Radio Wien sendet auf 89,8 MHz. Berechne die Wellenlänge. (Formel, Rechnung)

$$c = \lambda \cdot f \Rightarrow \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{89,8 \cdot 10^6} = 3,34 \text{ m}$$

6. a. Wellenstrahlen sind gedachte Linien, die die Ausbreitungsrichtung einer Welle angeben. Falls die Wellenzschw.  $c$  in alle Richt. gleich groß ist gilt.  $\nearrow$  (Wellenstrahlen, Wellenfläche) ist 90°b. Prinzip von Huygens (Gleich formulieren, Skizze + Beschreibung)  
Jeder Punkt der Wellenfront ist Ausgangspunkt einer Elementarwelle.  
Die Einfüllende dieser Elementarwellen ergibt die neue Wellenfront zu7. a. Reflexionsgesetz: Einfallswinkel  $\alpha$  = Reflexionswinkel  $\beta$ . Lot, einfallende Strahl & reflektierte Strahl in einer Ebene. WellenfrontReflexion = Zurückwerfung einer Welle an einem großen Hindernis (d.h.  $d \gg \lambda$ )

2 Bsp: Echo = reflektierte Schallwelle, Lichtreflexion an Spiegel, Refl. von H2O-Wellen an Kaimouren.

b. Brechung ist Richtungsänderung einer Welle beim Übergang von einem Gebiet größerer Ausbreitungsgeschw. in ein Gebiet kleinerer Ausbreitung (z. B. Umg.)

c. Interferenz = Überlagerung von Wellen. Dabei können sich Wellen verstärken (Konstruktive Interferenz) oder schwächen (Destruktive Interferenz)

Bsp: Überl. der Kugelwellen am See beim Regnen.

d. Beugung ist das Eindringen einer Welle in geometrischen Schallraum  $d \gg \lambda$  (fast) Keine Beugung,  $d \lesssim \lambda$  starke Beugung.e. Streuung tritt auf, wenn eine Welle auf ein KLEINES Hindernis. ( $d \leq \lambda$ ) trifft. Von dem Objekt geht dann eine Kugelwelle aus.

Bsp: Heller Taghimmel: Sonnenlich wird an Luftmollekülen gestreut.

Licht an einer Stadt: Licht von Straßenlaternen an Staubpartikeln der Luft gestreut.

8. Dopplereffekt ist ein Effekt, der auftritt, wenn sich Beobachter B &amp; Wellenquelle relativ zueinander bewegen. Beim aufeinander Zutreiben nimmt der Beobachter höhere Frequenz wahr, d.h. bei Schallwellen höherer Ton, bei Lichtwellen Blauverschiebung, beim voneinander Wegbewegen nimmt der Beobachter niedrigere Frequenz d.h. bei Schallwellen tieferer Ton wahr &amp; bei Licht eine Rotverschiebung

9. a. Ein Motorradfahrer fährt mit  $v = 56 \frac{m}{s}$  auf eine Sirene mit  $f = 500 \text{ Hz}$  zu.Ges: Wahrnehmene Frequenz:  $f_B = f_A \cdot \left(1 + \frac{v}{c}\right) = 500 \cdot \left(1 + \frac{56}{330}\right) \approx 585 \text{ Hz} (> 500 \text{ Hz})$ b. Ein Motorrad mit Sirene von 500Hz bewegt sich auf einen ruhenden Polizisten zu. Welche Tonhöhe nimmt er wahr?  $f_B = f_A \cdot \frac{1+v}{c} = 500 \cdot \frac{1+56}{330} \approx 602 \text{ Hz}$  mit  $56 \frac{m}{s}$

## Wissenscheck

Stehende Wellen  
Schalldämmung  
Lautstärke

AM, FM, Schwebung  
Reflexion des Lichtes bis  $5^{\circ}$ -Spiegel

1. a) Quinckesches Resonanzrohr (Skizze + Beschriftung, Ausgabe, Resonanz bei 18cm & 440Hz → berechne  $C_s$ )



Dient der Messung  
der Schallgeschwindigkeit in Luft:

$$C = \lambda f$$

$$5 = 440 \text{ Hz}$$

$$l = \frac{\lambda}{4} = 18 \text{ cm} \mid \cdot 4$$

$$\lambda = 72 \text{ cm}$$

$$\lambda = 0,72 \text{ m}$$

$$C = 0,72 \cdot 440$$

$$C = 317 \text{ m}$$

(FRAGE TAG!!)

b) • Eine offene Lippenpfeife hat 440Hz =  $\alpha'$  Grundfrequenz Ges: Erste 3 Overtöne

$$s_2: 2 \cdot 440 = 880 \text{ Hz} \quad s_3: 3 \cdot 440 = 1320 \text{ Hz} \quad s_4: 4 \cdot 440 = 1760 \text{ Hz}$$

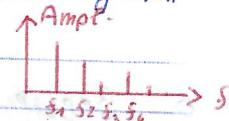
• Die obige Lippenpfeife als gedeckte Lippenpfeife hat Grundfrequenz 220Hz =  $\alpha$  und die Frequenzen der ersten 3 Overtöne sind:  $s_5 = 3 \cdot 220 = 660 \text{ Hz}$

$$s_5 = 5 \cdot 220 = 1100 \text{ Hz} \quad s_7 = 7 \cdot 220 = 1540 \text{ Hz} = 660 \text{ Hz}$$

2. a) Warum klingt ein  $\alpha = 440 \text{ Hz}$  einer Gitarre & eines Klaviers nicht gleich

Es treten zwar die selben Overtöne auf, ihre Amplituden

sind aber unterschiedlich d.h. unterschiedliches Frequenzspektrum



b) Was ist Fourieranalyse & was Fourniersynthese?

Fourieranalyse = Zerlegung eines Klangs in seine sinusförmigen (harmonischen) Bestandteile

Fourniersynthese = Synthese eines Klangs durch Addition seiner sinusförmigen Bestandteile (Synthesizer)

3. a) Gib das Gesetz der Schallabsorption an  $I(x) = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x}$



b) Aufbau von Schalldämmstossen: Porös und filzig

Mechanismus der Schallabsorption: Unregelmäßige Vielfachreflexion an Wänden des Dämmstoffs

3 Schalldämmstoffe: Telwolle, Hauklith, Styropor

4. a) Trittschall (Begriff, Vermeidung, Skizze)

Begriff: Schall, der durch Trampeln, Stühle rücken u.s.w. entsteht

Vermeidung Trittschall dämmung mit schwimmenden Estrich auf wie wird das Happen von Räumen vermieden? Dämmstoff

Durch weiche Materialien wie Teppichböden, Vorhänge, Decken,

Ein leerer Raum hallt, da der Schall von den Wänden kaum absorbiert & gut reflektiert wird.

5. a) Was ist Schwebung? (Begriff, Oszilloskopbild, berechne  $s_H$ :  $s_1 = 200 \text{ Hz}$  &  $s_2 = 200,25 \text{ Hz}$ )

Begriff Überlagert man 2 Sinusschw. fast gleicher Frequenz, so entsteht als Summenschw. eine Schw. mit einer Amplitude die schwankt. Man hört einen Ton, da abwechselnd Reuter & leiser wird

$$s_H: s_H = s_2 - s_1 = 200,25 - 200 = 0,25 \text{ Hz} \quad (T_H = \frac{1}{s_H} = 4 \text{ s})$$

b) AM & FM (Begriffe, Anw., Vorteile / Nachteile)

AM: Die Amplitude einer hochfrequenten Schwingung wird durch eine niedrigfrequente Schwingung moduliert. Anw: CB-Funk, MW, LW, UKW

FM: Die niedrigfrequente Schwingung moduliert die Frequenz einer hochfrequenten Schwingung. Anw: TV, UKW

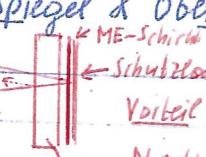
6. a) Weber-Fechnersches Gesetz für den Zusammenhang von Schallintensität I und Lautstärke formulieren:

Prozentuelle gleiche Änderungen der Schallintensität führen zu absolut gleichen Änderungen der Lautstärke

b) Berechne die Lautstärke eines Tons mit  $10^{-5} \text{ W/m}^2$  Schallintensität (Formel, Rechnung)

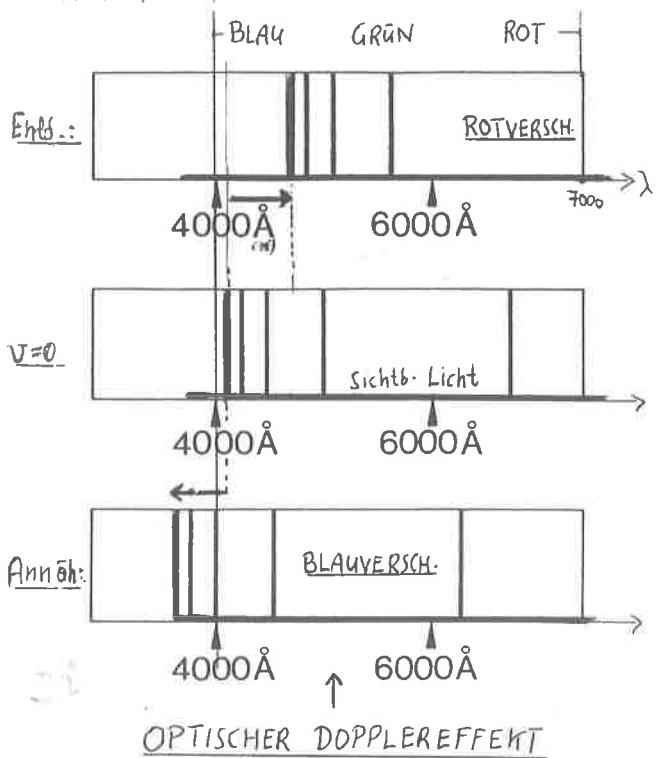
$$L_N = 10 \lg \frac{I_N}{I_0} = 10 \cdot \lg \frac{10^{-5}}{10^{-12}} = 10 \lg 10^7$$

$$L_N = 70 \text{ phon}$$

7. a. 1 Gelse erzeugt 1 Lautstärke von 10phon  $10 = 10 \lg \frac{I_N}{10^{-12}} \mid : 10$   
 Wie viele Gelsen erzeugen 30phon zusammen?  $1 = \lg \frac{I_N}{10^{-12}} \mid \text{Def.} \cdot 10^3 = \frac{I_N}{10^{-12}} \mid \cdot 10^{-12} \Rightarrow I = 10^{-11} \frac{W}{m^2}$  Intensität einer Gelse
- $30 = 10 \lg \frac{10^{-11} \cdot x}{10^{-12}} \mid : 10 \Rightarrow 10^3 = 10x \mid : 10 \Rightarrow x = 100 \text{ Gelsen}$
- b. Für welche Frequenz stimmt die Dezibelskala mit der Phonskala überein und für welche schlecht?  
 Nur für 1kHz = 1000Hz - Je weiter man davon abweicht, desto schlechter stimmt die dB-Skala mit der Phonskala (Skala der wahrgen. Lautstärke) überein.
- Wie hilft man sich, damit der dB-Wert ein geeignetes Maß für die Lautstärke wird. Man schaltet Filter vor, die bestimmte Frequenzen schwächen bzw. verstärken, sodass man eine annähernde Übereinstimmung der mit dem Ohr wahrgenommenen Lautstärke erreicht.
8. a. Was versteht man unter der Schallintensität an einer bestimmten Stelle des Raumes? (Def., Definitionsgleichung, Skizze) 
- Das ist die Schallenergie, die pro  $1m^2$  (senkrecht) an einer Stelle des Raumes tritt  $I = \frac{E}{A} = \frac{P}{A} = \frac{\text{Schallleistung}}{\text{Fläche}} \quad [I] = 1 \frac{W}{m^2}$
- b. Begriffe Hörschwelle & Schmerzschwelle + zugehörige Phonwerte  
 Hörschwelle: Jene Schallintensität, bei der ein Ton der Frequenz  $f$  unhörbar wird  $\approx 0$  phon  
 Schmerzschwelle: Jene Schallintensität, bei der ein Ton der Frequenz  $f$  im Ohr schmerzt,  $\approx 130$  phon
9. a. Optik = Lehre vom Licht  
 Geometrische Optik: Optik, unter Vernachlässigung von Beugungserscheinungen.  
 Sichtbares Licht:  $380\text{nm} \leq \lambda \leq 750\text{nm}$  → Licht nimmt geometr. Weg. (z.B. Licht durch Brillenglas ⇒ fast keine Beugung, da  $d \gg \lambda$ )
- b. Reflexionsgesetz (Genau formulieren, Skizze, von wem es stammt)  
 Einfallswinkel  $\alpha$  = Reflexionswinkel  $\beta$   
 2. Lot, einfallender & reflekt. Strahl liegen in einer Ebene
10. a. Arten der Reflexion (Nomen, Eigenschaften, Skizze, je 1 Bsp.)
- |   |   |  |
|---|---|--|
| Reguläre Reflexion<br>an glatten Flächen<br>z.B. Spiegel, ruhiger See | Diffuse Reflexion<br>an rauer Fläche<br>z.B. Sand, Schnee, Indir. Beleuchtung, Leinwand | Gemischte Reflexion<br>raue Fläche mit glatten Stellen gemischt<br>z.B. Glitzerkleid, Granit |
|---|---|--|
- b. Unterschied Gewöhnlicher Spiegel & Oberflächenspiegel (Ausbaus, Skizze, Vorteile Nachteile)
- |  |   |  |
|--|---|--|
| Gewöhnlicher Spiegel<br>Hinten verriegelt<br>Anw: Taschenspiegel |  | Oberflächenspiegel<br>Vorderseite verriegelt<br>⇒ leicht zerkratzbar<br>Beim Putzen vorsichtig<br>Anw: Spiegel-Teleskope |
|--|---|--|
11. a. Einer Spiegel  
 Bilder: Virtuell, aufrechtes, seitengespiegelt,  $1:1$   
 Anw: Taschenspiegel, Spiegelbrücke, Wandspiegel
- b. Was ist ein Parallelaxenfehler und wie lässt er sich bei Zeigerinstrumenten vermeiden?  
 Ablesefehler bei Zeigerinstrumenten infolge schrägen Einblicks auf die Skala.  
 Abhilfe: Spiegelshala. (Senkrecht Einblick ist erreicht, wenn Zeiger & sein Spiegelbild sich decken)

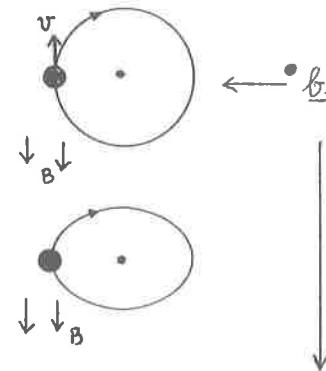
$$* 1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$$

# ANWENDUNGEN DES OPTISCHEN DOPPLEREFFEKTES

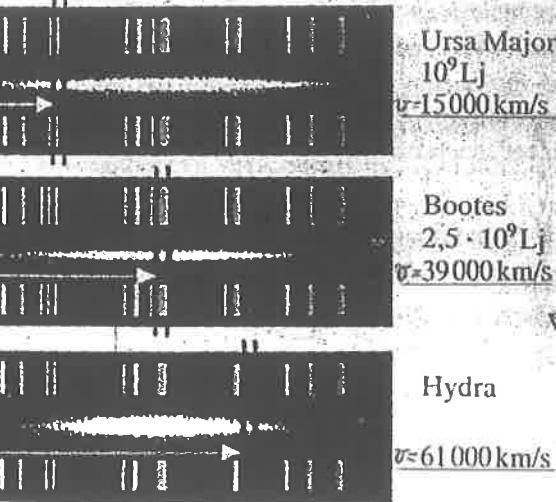
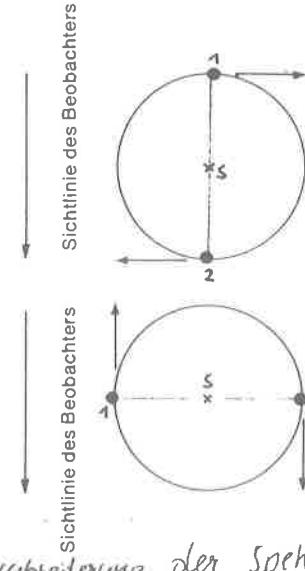


## OPTISCHER DOPPLEREFFEKT

Bei manchen eng stehenden Doppelsystemen erhält man nur ein Spektrum der helleren Komponente. Diese wird sich uns infolge der Bahnbewegung des Paares abwechselnd nähern und sich von uns entfernen, so daß es aufgrund des Dopplereffekts zu regelmäßigen Verschiebungen der Spektrallinien kommt. Sie ermöglichen eine Berechnung der Bahngeschwindigkeiten. Die obere Geschwindigkeitskurve zeigt eine ungefähr kreisförmige Bahn an, die untere eine elliptische.



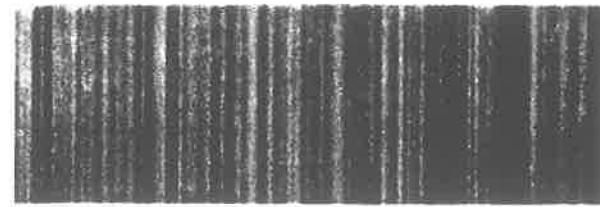
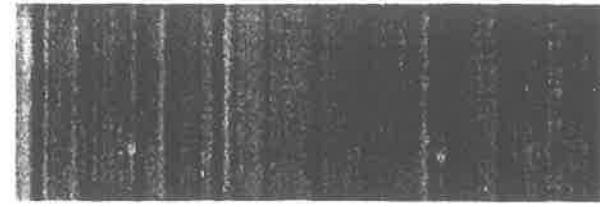
Rechts: Das Spektroskop ermöglicht die Entdeckung von Doppelsternen, die wegen ihrer großen Entfernung kein Teleskop auflösen kann. Die Abbildung veranschaulicht, wie dies geschieht. Zeitweilig (obere Reihe) nähert oder entfernt sich keiner der zwei Sterne. Sie bewegen sich quer zur Sichtlinie und erzeugen gewöhnliche Spektrallinien. Später (untere Reihe) nähert sich einer der beiden, der andere entfernt sich von uns. Die Spektrallinien des ersten werden zum blauen, die des anderen zum roten Ende hin verschoben. Außerdem verdoppeln sich ihre Spektrallinien (AUFSPLITUNG).



Die Spektren von vier in unterschiedlichen Entfernungen befindlichen Galaxien. Die mit der Entfernung wachsende Verschiebung der Absorptionslinien H und K ist deutlich erkennbar.

- a) Nachweis der Expansion des Weltalls durch HUBBLE  $v = H_0 \cdot r$  ( $H_0 = \frac{1}{6 \cdot 10^{17} \text{ s}}$ ) (Weltradius:  $C = \frac{1}{6 \cdot 10^{17}} \cdot r$ ,  $r = 3 \cdot 10^8 \cdot 6 \cdot 10^{17} = 18 \cdot 10^{26} \text{ m} = 18 \cdot 10^3 \text{ Lj}$  !)

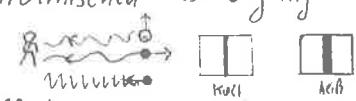
- b) Nachweis spektroskopischer Doppelsterne (Doppelsterne die mit Fernrohren nicht auflösbar sind.)



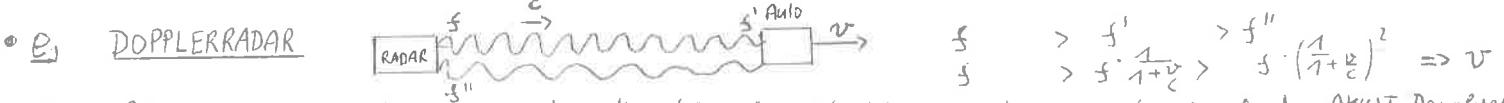
- c) Natürliche Dopplerverschiebung der Spektrallinien aufgrund der thermischen Bewegung der Moleküle (Lichtquellen)  $\rightarrow$  Rückschluß auf Temperatur eines Sternes.

- d) Nachweis der Rotation von Himmelskörpern:

- Flächig erscheinende:  $\rightarrow$  z.B. Sonne
- Punktförmig erscheinende:  $\rightarrow$  Sterne  $\Rightarrow$  Linienverschiebung

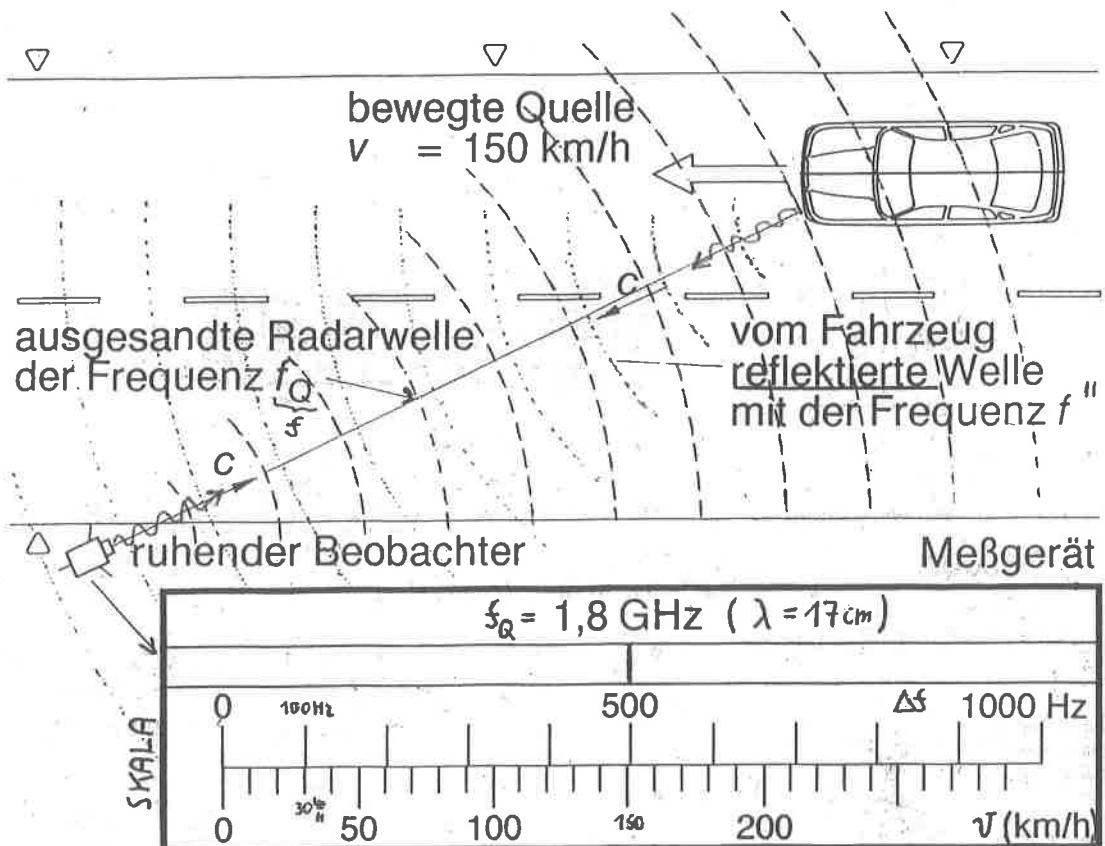


- e) DOPPLERRADAR



- f) ALARMANLAGEN (ULTRASCHALL), die bewegte Objekte registrieren. (Einbrecher) - Akust. Dopplereffekt

## DOPPLEREFFEKT: DOPPLERRADAR



Die Frequenz der vom Auto reflektierten Radarwelle ist umso höher, je rascher sich das Auto der „Radarfalle“ nähert.

$$\bullet v: \frac{f}{\text{ausges. Welle}} \rightarrow f' = f \cdot \frac{1}{1 - \frac{v}{c}} = f \left(1 + \frac{v}{c} + \frac{v^2}{c^2} \dots\right) \rightarrow f'' = f \left(1 + \frac{v}{c}\right)^2$$

Vom Auto empfangene Welle  $\approx 0$       Vom Radargerät empfangene Welle

$$f'' = f \left(1 + \frac{v}{c}\right)^2 = f \left(1 + \frac{2v}{c} + \frac{v^2}{c^2}\right) = f + \frac{2vf}{c} - f + \frac{v^2}{c}$$

$$\Rightarrow \frac{2vf}{c} = \Delta f \quad , \quad v = \frac{c \Delta f}{2f}$$

Genauigkeit: Wegen  $\Delta f \approx 2 \text{ Hz} \Rightarrow \Delta v = \frac{c \cdot \Delta f}{2 \cdot f} = \frac{\lambda}{2 \cdot f} \approx \frac{0,5 \text{ m}}{1,8 \cdot 10^9 \text{ Hz}}$  der Radarw

$f = 1,8 \text{ GHz} \Rightarrow \Delta v = 17 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \approx 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

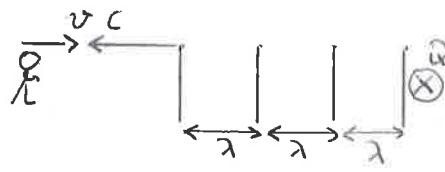
• je größer  $f$  (je kleiner  $\lambda$ ) desto größer Meßgenauigkeit.

Beispiel: Radargerät registriert  $\Delta f = 500 \text{ Hz}$   
 Geschwindigkeit des Autos:  $v = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 500}{2 \cdot 1,8 \cdot 10^9} = 62 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 150 \frac{\text{km}}{\text{h}}$

## Doppler-Effekt Formeln

### A. AKUSTISCHER DOPPLEREFFEKT

- Beobachter aus Q zubewegt



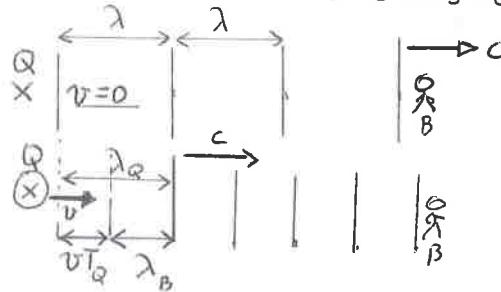
$$T_B = \frac{\lambda}{c+v} \quad |^{-1}$$

$$S_B = \frac{c+v}{\lambda_Q} = \frac{c+v}{\frac{c}{S_Q}} = S_Q \cdot (1 + \frac{v}{c}) \Rightarrow \boxed{S_B = S_Q \cdot (1 + \frac{v}{c})} \dots S\text{-Erhöhung}$$

- Beobachter von Q mit  $-v$  wegbewegt.  $v \rightarrow -v \Rightarrow S_B = S_Q \cdot (1 - \frac{v}{c}) \dots S\text{-Erniedr.}$

$$v=c \Rightarrow S=0$$

- Quelle aus Beobachter zubewegt



$$\lambda_B = \lambda_Q - v T_Q$$

$$T_B = \frac{\lambda_B}{c} = \frac{\lambda_Q - v T_Q}{c} \quad |^{-1}$$

$$S_B = \frac{c}{\lambda_Q - v T_Q} = \frac{c}{c T_Q - v T_Q} = \frac{1}{T_Q} \cdot \frac{c}{c - v}$$

$$\boxed{S_B = S_Q \cdot \frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}} = S_Q \cdot (1 + \frac{v}{c} + \frac{v^2}{c^2} + \frac{v^3}{c^3} + \dots) \geq 0$$

- Quelle von Beobachter wegbewegt  $v \rightarrow -v \Rightarrow S_B = S_Q \cdot \frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}} \geq 0$

### B. OPTISCHER DOPPLEREFFEKT

Für Lichtwellen gilt stets Ausbreitungsgesch.  $c$

$$\Rightarrow \boxed{S_B = S_Q \cdot \frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}}$$

v ... Reziproz.  
 $v > 0 \dots \text{Annäh.}$   
 $v < 0 \dots \text{Entf.}$

Bsp:  $S_Q = 440 \text{ Hz}$

a) Beobachter mit  $100 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  aus Q zubewegt:  $S_B = S_Q \cdot (1 + \frac{v}{c}) = 440 \cdot (1 + \frac{100}{330}) = \frac{573 \text{ Hz}}{\downarrow} > 440 \text{ Hz}$

b) Quelle aus B mit  $100 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  zubewegt:  $S_B = S_Q \cdot \frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}} = 440 \cdot \frac{1 - \frac{100}{330}}{1 + \frac{100}{330}} = \frac{631 \text{ Hz}}{\downarrow} > 440 \text{ Hz}$

c) Beobachter mit  $100 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  von Q wegbewegt:  $S_B = S_Q \cdot (1 - \frac{v}{c}) = 440 \cdot (1 - \frac{100}{330}) = \frac{279 \text{ Hz}}{\downarrow} < 440 \text{ Hz}$

d) Quelle von B mit  $100 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  wegbewegt:  $S_B = S_Q \cdot \frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}} = 440 \cdot \frac{1 + \frac{100}{330}}{1 - \frac{100}{330}} = \frac{338 \text{ Hz}}{\uparrow} < 440 \text{ Hz}$

Bsp:  $\lambda_Q = 583 \text{ nm} \xrightarrow{\text{gez.}} \text{in Galaxie}$

a) Galaxie mit  $\frac{c}{3}$  zubewegt:  $S_Q = \frac{c}{\lambda_Q} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{583 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 5,083 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$

$$S_B = S_Q \cdot \frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}} = 5,083 \cdot 10^{14} \cdot \frac{1 - \frac{1}{3}}{1 + \frac{1}{3}} = 7,64 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

$$\lambda_B = \frac{c}{S_B} = \frac{3 \cdot 10^8}{7,64 \cdot 10^{14}} = 3,927 \cdot 10^{-7} \text{ m} \approx 393 \cdot 10^{-9} \text{ m} = \frac{393 \text{ nm}}{\uparrow} \text{ violett}$$

b) Galaxie mit  $\frac{c}{3}$  wegbewegt:  $S_Q = 5,083 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ ,  $S_B = S_Q \cdot \frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}} = 5,083 \cdot 10^{14} \cdot \frac{1 + \frac{1}{3}}{1 - \frac{1}{3}} = 3,82 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$

$$\lambda_B = \frac{c}{S_B} = \frac{3 \cdot 10^8}{3,82 \cdot 10^{14}} = 7,85 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 785 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$= 785 \text{ nm} = 1R$$

ROTVERSCHIEBUNG