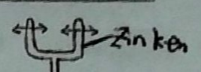
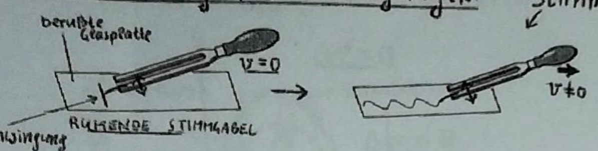
EINHEIT 9 - SCHWINGUNGEN & WELLEN

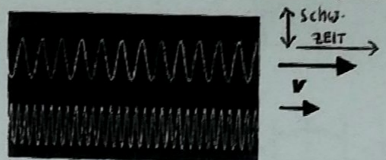
A, SCHWINGUNGEN

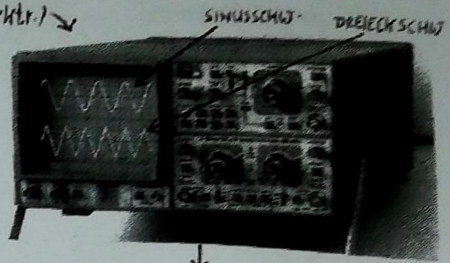


Beispiele für Schwingungen: Stimmgabelschwingung, Fadenpendel, Schw. des Donauturms (Gebäudeschw.) Schallschwingungen, Lichtschwingungen, elektrische Schwingungen, Sektgläser, ...

Aufzeichnung von Schwingungen: Stimmgabelschreiber (mech.), Oszillograph (elektr.)



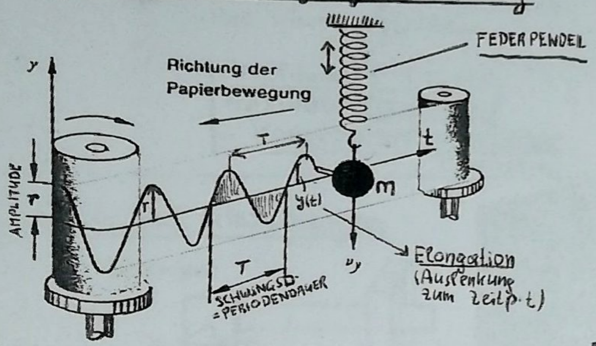


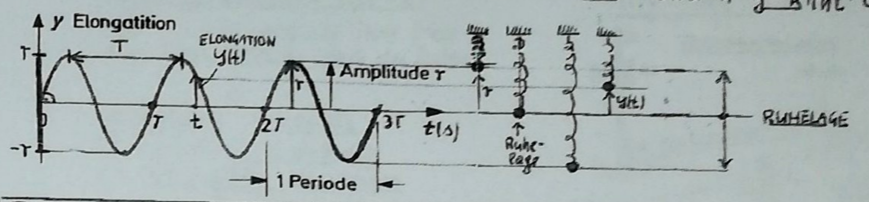


- e^--Strahl läuft von li nach re ($\hat{=}$ Zeitbasis) $\hat{=}$ x-Richt.
- Schw. wird in y-Richt. angezeigt

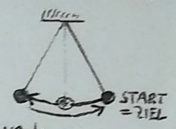
Ein Elektronenstrahloszillograph (kurz: Oszi) kann elektrische Schwingungen (EKG - Elektrokardiogramm -> Herz, EEG - Elektroencephalogramm -> Hirnströme, ...) aufzeichnen. Mechanische Schw. müssen zu ihrer Aufzeichnung vorher in el. Schw. verwandelt werden

Begriffe zur Schwingungsbeschreibung:



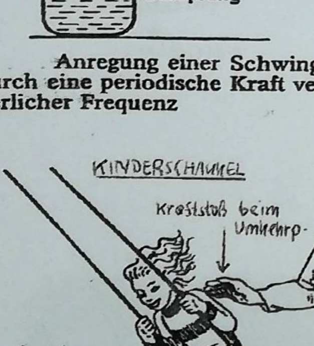


- **ELONGATION y(t)** = Auslenkung aus der Ruhelage zum Zeitpunkt t
- **AMPLITUDE** = Schwingungsweite $r = y_{max}$ = Größte Auslenkung aus der Ruhelage während einer Schw.
- **PERIODENDAUER T** = Schwingungsdauer = Dauer einer vollen Schwingung. $(T) = 1s$ (d.h. „hin & zurück")

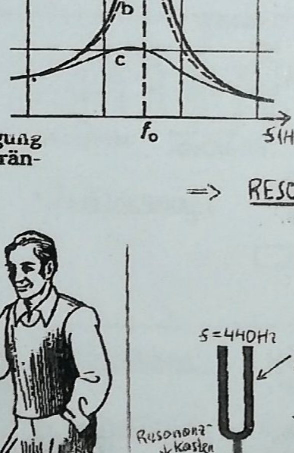


- **FREQUENZ f** = Anzahl der Schwingungen je 1 Sekunde
  $(f) = 1Hz$ (Hertz) = 1 Schw. je Sekunde
  z.B $f = 2Hz$ (2 Schw. je s)
  $T = ?$ $T = \frac{1}{2}s$ => $\boxed{f = \frac{1}{T}}$
  z.B $f = 1kHz$ (Kilohertz
  $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1000} = 0{,}001\,s$

- **RESONANZ:**



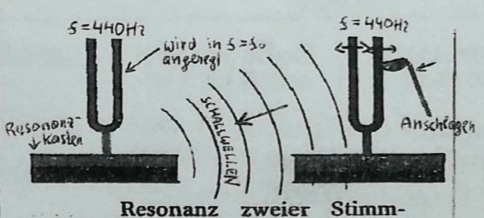
Anregung einer Schwingung durch eine periodische Kraft veränderlicher Frequenz



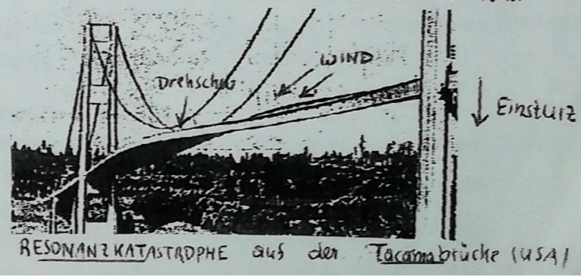
Ein sich selbst überlassener schw. Körper (Stimmgabel, Sektglas, Federpendel ...) schwingt mit einer für ihn typ. Frequenz f_0, der sog. EIGENFREQUENZ. Man kann ihn aber auch von außen durch eine ihm aufgezwungene Schw. der Frequenz f zu sog. ERZWUNGENE SCHWINGUNGEN anregen. Die erzielte Amplitude ist für $f \neq f_0$ aber klein, sie wird aber für $f = f_0$ maximal (RESONANZ)

=> RESONANZ = **Erzwungene Schwingungen in der Eigenfrequenz. Die Amplitude wird dabei besonders groß** !

z.B Gläser klirren im Schrank (Lkw fährt vorbei,
z.B Vibrieren von Autoteilen bei best. Drehzahl

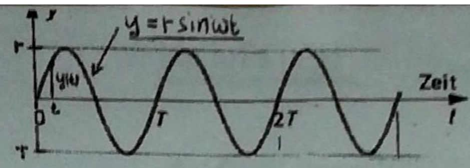


Resonanz zweier Stimmgabeln gleicher Frequenz



RESONANZKATASTROPHE auf der Tacomabrücke (USA)

[SI]NUSSCHWINGUNGEN



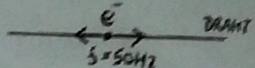
Eine Schw., die durch eine Sinusfunktion beschrieben wird, heißt SINUSSCHWINGUNG (harmonische Schwingung)

Es gilt: $\boxed{y(t) = r \cdot \sin \omega t}$ SINUSSCHWINGUNG

$r = y_{max}$ = Amplitude
$\omega = 2\pi f$ = Kreisfrequenz
t = Zeit

z.B Schw. eines Federpendels
z.B Schw. einer Stimmgabel (Ton!)
z.B Technischer Wechselstrom (230V, 50 Hz ⇒ $\underset{y}{U(t)} = \underset{r}{U_0} \cdot \sin \omega t$

Spannung, Spannungsamplitude



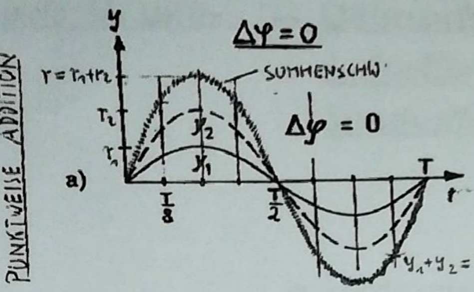
Addition ∥ Schwingungen:
(gleicher Frequenz)

$y_1(t) = r_1 \sin \omega t$
$y_2(t) = r_2 \sin(\omega t + \Delta\varphi)$ — Phasenverschiebung

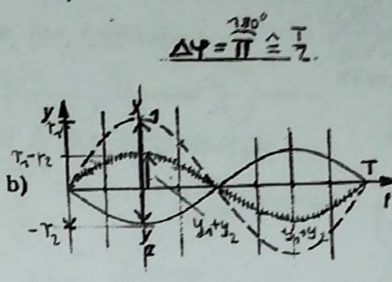
Ges: $y(t) = y_1(t) + y_2(t)$ Summenschwingung

PUNKTWEISE ADDITION

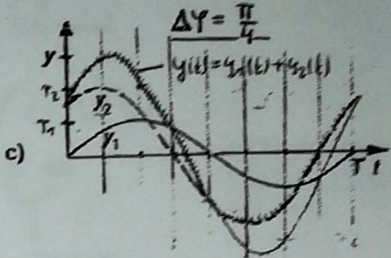
$\Delta\varphi = 0$



$\Delta\varphi = \pi \hat{=} \frac{T}{2}$ (180°)



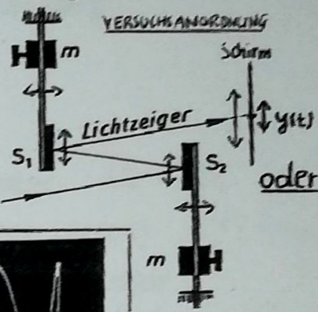
$\Delta\varphi = \frac{\pi}{4}$



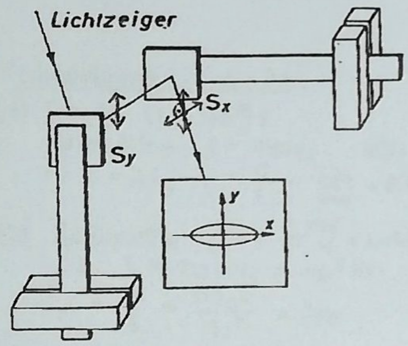
Keine Phasenverschiebung ($\Delta\varphi = 0$)
Beide Schw. beginnen gleichzeitig ihre Schwingungsperiode
↓
Amplitude $r = r_1 + r_2$
Maximale Verstärkung
= KONSTRUKTIVE INTERFERENZ (Überlagerung)

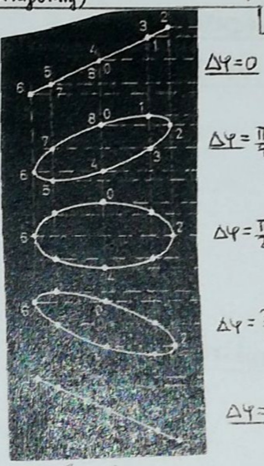
Phasenverschiebung ($\Delta\varphi = \pi$) (180°)
Die 2. Schw. beginnt ihre Schw. eine halbe Periode nach der Ersten.
↓
Amplitude: $r = r_1 - r_2$
Maximale Schwächung
= Destruktive Interferenz
($r_1 = r_2$ ⇒ $r = 0$ Auslöschung)

Allg. Fall: $\Delta\varphi \neq 0, \pi$

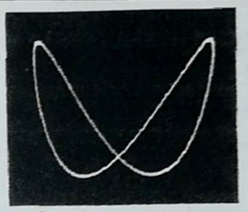


- ## Addition ⊥ Schwingungen:

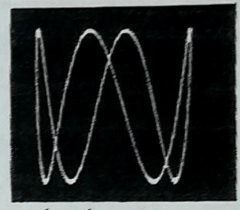




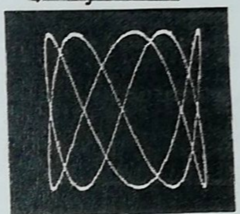
$f_1 = f_2$



$f_x : f_y = 1 : 2$



$f_x : f_y = 1 : 4$



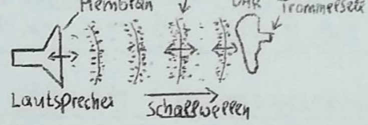
$f_x : f_y = 2 : 5$

Diese Schwingungsfiguren heißen **LISSAJOU-Figuren**

Anw: Überlagerung einer bekannten Schw. (f_x bekannt) mit einer unbekannten ⇒ Frequenz f_y der Unbekannten bestimmbar

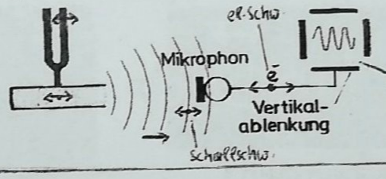
Frequenz einer unbekannten Schw. ermitteln

Schallschwingungen:
(AKUSTIK)
↓
Grundbegriffe

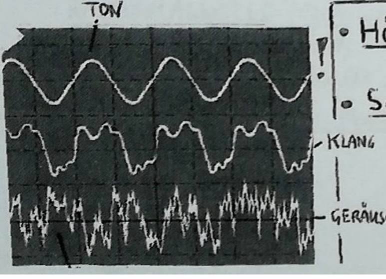


Schallschwingungen (in Luft) sind Schwingungen der Dichte und somit des Druckes der Luft (Verdichtungen, Verdünnungen)
⇒ Trommelfell im Ohr schwingt mit der Frequenz f des Schalls mit

- **Aufzeichnung:**



$\boxed{\text{Schallschw.} \xrightarrow[\text{Mikrofon}]{} \text{el. Schw.} \xrightarrow[\text{Oszi}]{} \text{Aufzeich.}}$

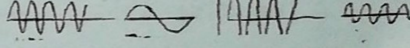


- **Hörbarkeit:**

Hörbarer Schall	Ultraschall	Infraschall
$16 \leq f \leq 20\,000$ Hz	$f > 20\,000$ Hz — Fledermäuse, Hunde	$f < 16$ Hz — spürbar, Vibrationen von Maschinen

- **Schallarten:**
  → TON = Sinusschw. (z.B Stimmgabel)
  → KLANG = Summe mehrerer Sinusschw. (z.B Grundton + Oberschwing. → Musikinstrumente; z.B Vokale a, e, i, o, u)
  → GERÄUSCH: Unregelm. Schw. (z.B Papier zerknüllen, Rauschender Wasserfall)

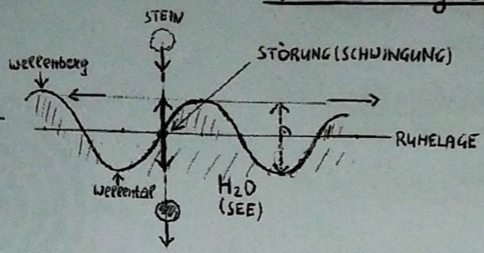
- **Tonhöhe:** Höhere Frequenz $\hat{=}$ Größere Tonhöhe
- **Lautstärke:** Größere Lautstärke $\hat{=}$ Größere Amplitude



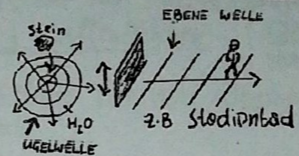
B.) WELLEN

1.) Grundbegriffe

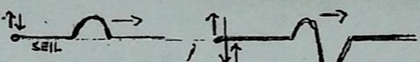
Begriff WELLE

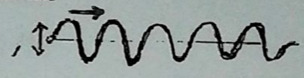


Wenn sich eine Schwingung (Störung) räumlich ausbreitet, so spricht man von einer WELLE.

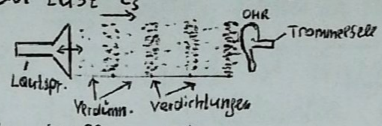


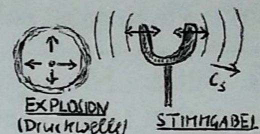
- **Beispiele für Wellen:**
  → Wasserwellen (Meer, See, Wellenbad, ...)
  → Seilwellen





  → Schallwellen: Dichte & Druckschwankungen der Luft c_s

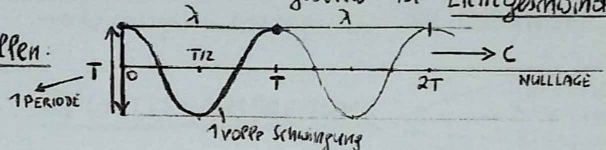




Schallgeschwindigkeit
$c_s = 330 \frac{m}{s} \approx 1 km/3s$
(0°C, Luft)

  → Elektromagnetische Wellen: Schwingung von elektr. & magn. Feldern. Ausbreitungsgeschw. ist Lichtgeschwindigkeit $c = 300\,000 \frac{km}{s}$

Größen zum Beschreiben von Wellen:
λ, T, f, c



→ WELLENLÄNGE λ = Abstand benachbarter Wellenberge. $[\lambda] = 1m$

→ PERIODENDAUER T = Dauer einer vollen Schwingung (PERIODE). $[T] = 1s$

→ FREQUENZ f = Anzahl der Schwingungen je Sekunde
$[f] = 1 Hz$ (HERTZ) = 1 Schw. je s
z.B. $10 Hz = 10$ Schw. je s
z.B. $1 kHz = 10^3 Hz$ (KILOHERTZ), $1 MHz = 10^6 Hz$ (MEGAHERTZ), $1 GHz = 10^9 Hz$ (GIGAHERTZ)

Zusammenhang T, f: $f = 10 Hz \to T = \frac{1}{10} s$
$\Rightarrow \boxed{f = \frac{1}{T}}$!

z.B. $T = \frac{1}{100} s \Rightarrow f = \frac{1}{0{,}01} = 100 Hz$

(*) Rechenbeispiele zu $c = \lambda f$

(1) Schall ($c_s = 330 \frac{m}{s}$)
Kammerton $f = 440 Hz$. Ges: λ
$\Rightarrow c = \lambda f, \ \lambda = \frac{c}{f} = \frac{330}{440} = 0{,}75 m = 75 cm$

(2) Radiowellen ($c = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ = Licht)
Ö3: $f \approx 100 MHz = 10^8 Hz$, Ges: λ
$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{10^8} = 3m$

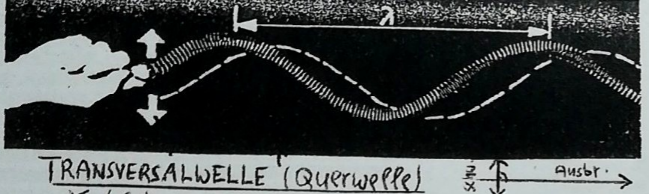
→ Ausbreitungsgeschw. c = Wellengeschw. = Geschw. mit der sich ein Wellenberg verschiebt.

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

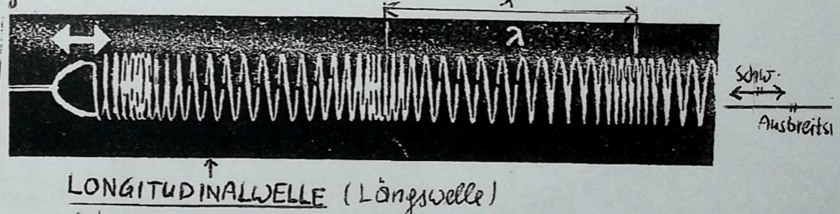
! $\boxed{c = \lambda f}$ Grundgl. der Wellenlehre (*)
const.

⇒ Bei einer Welle sind Frequenz f und Wellenlänge λ zueinander INDIREKT PROPORTIONAL ($f \to 2f \Rightarrow \lambda \to \frac{\lambda}{2}$). Je höher die Frequenz, desto kleiner ist die Wellenlänge.

Einteilung von Wellen nach der Schwingungsrichtung.



(2)

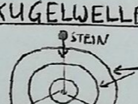


TRANSVERSALWELLE (Querwelle) Ausbr.
∢ (Schwingungsrichtung, Ausbreitungsrichtung) = 90°
z.B.: H_2O Welle, Seilwelle, Lichtwelle (alle elektrom. W)

LONGITUDINALWELLE (Längswelle)
Schwingungsrichtung ∥ Ausbreitungsrichtung.
z.B. Schallwellen, Längswellen in einer Schraubenfeder.

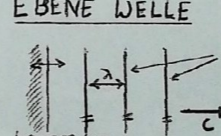
- **Einteilung nach der Form:**

KUGELWELLE



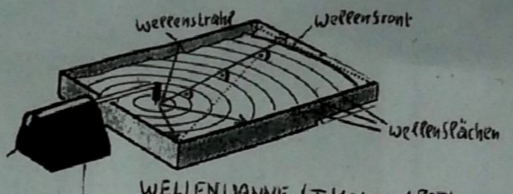
Wellenberge sind KREISE o. Kugelflächen

EBENE WELLE

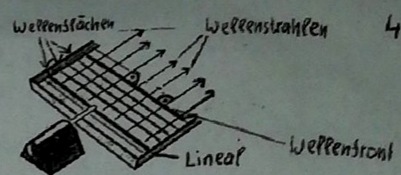


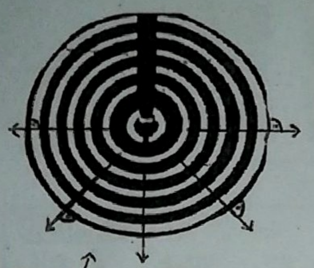
Wellenberge sind Gerade oder Ebene (z.B. Wellenbad)

Wellenflächen, Wellenstrahlen & Wellenfront:



WELLENWANNE (T. Young 1807)





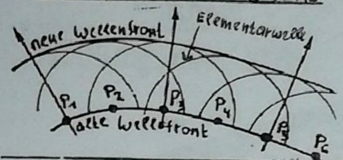
→ **Wellenflächen:** (Berge, Täler, ...) Flächen im Raum, die von der Welle gleichzeitig erreicht werden. Sie bestehen aus Punkten gleicher Schwingungsphase

→ **Wellenstrahlen:** Gerade Linien, die die Ausbreitungsrichtung angeben. Wellenstrahlen ⊥ Wellenflächen (falls Ausbreitsg.-unabh. von der Richtung ist)

→ **Wellenfront:** Vorderste Wellenfläche (trennt schwingende von noch nicht schwingende Punkte

Elementarwelle = Welle, die von 1 Punkt (Erregungspunkt) ausgeht
Elementarwellen sind Kugelwellen (falls das Medium isotrop ist d.h. Ausbreitsg. in alle Richt. gleich

PRINZIP VON HUYGENS (1680)



Jeder Punkt der Wellenfront ist Ausgangspunkt einer Elementarwelle. Die Einhüllende dieser Elementarwellen ergibt die Wellenfront zu einem späteren Zeitpunkt

!

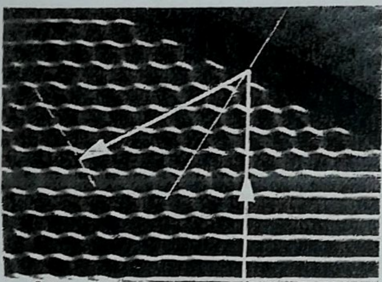
→ Wichtigstes Grundprinzip der Wellenlehre!

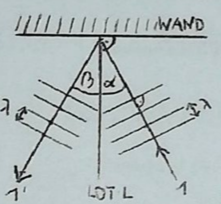
2, WELLENAUSBREITUNG

- Reflexion
- Brechung
- Beugung
- Interferenz
- Streuung
- (Absorption = Verschluckung, Auslöschung)

Das kann einer Welle bei ihrer Ausbreitung passieren

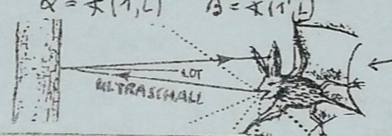
a, Reflexion einer Welle = Zurückwerfung von einem großen Hindernis ($d \gg \lambda$).
objekt durchmesser


Beisp.: Reflexion einer ebenen H_2O Welle an einer Wand.



Reflexionsgesetz

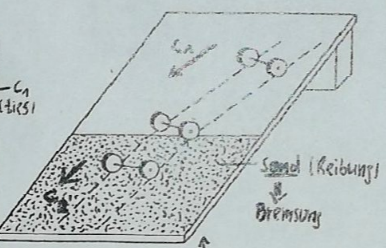
! $\boxed{\alpha = \beta}$ Reflexionswinkel
Einfallswinkel
1 ... einfall. Wellenstrahl
1' ... reflekt. Wellenstrahl
$\alpha = \sphericalangle(1,L)$ $\beta = \sphericalangle(1',L)$



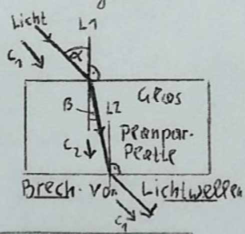
Beispiele:
→ Echo: Reflexion einer Schallwelle an einer Wand (Berg)
→ Sonarverfahren = Echolot: Bestimmung von Entfernungen (H_2O Tiefe) mittels Schall
→ Reflexion von Lichtwellen an einem Spiegel.
→ Fledermäuse orientieren sich durch Reflexion von Ultraschall
u.s.w.

b, Brechung einer Welle:

Brechung von H_2O Wellen



Mechanischer Analogversuch



Brech. von Lichtwellen

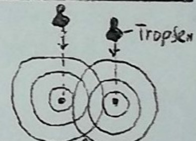
Brechung ist die Richtungsänderung einer Welle an der Grenzfläche 2-er Medien (Gebiete) unterschiedlicher Ausbreitungsgeschw. c_1 und c_2.

(BEM: Brechungsgesetz von SNELLIUS: $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{c_1}{c_2}$ wichtig in der OPTIK)

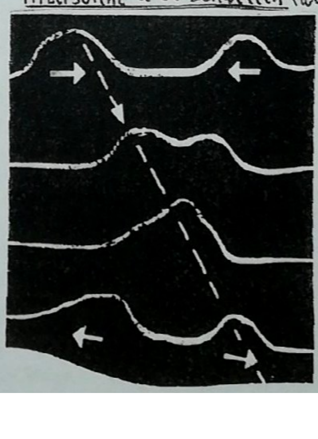
c, Interferenz von Wellen:

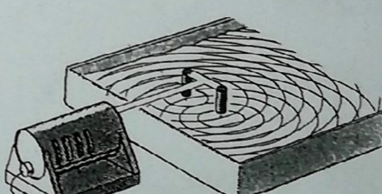
= Ungestörte Überlagerung (übereinander Hinweglaufen) von Wellen. Dabei kann es zu Verstärkung = KONSTRUKTIVE INTERFERENZ oder Schwächung = DESTRUKTIVE INTERFERENZ kommen.

z.B Regentropfen im See

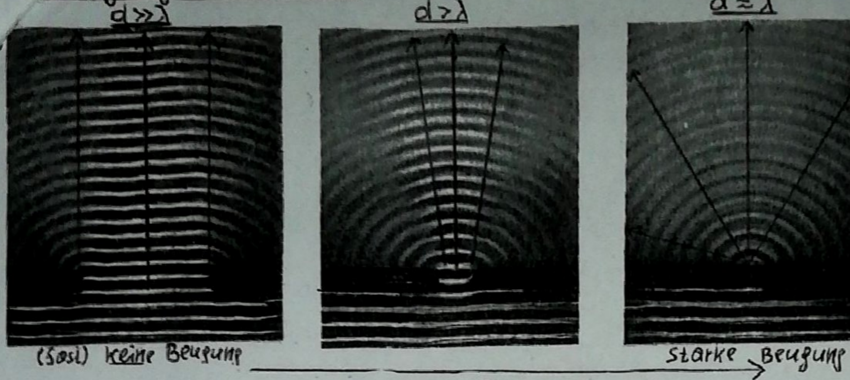


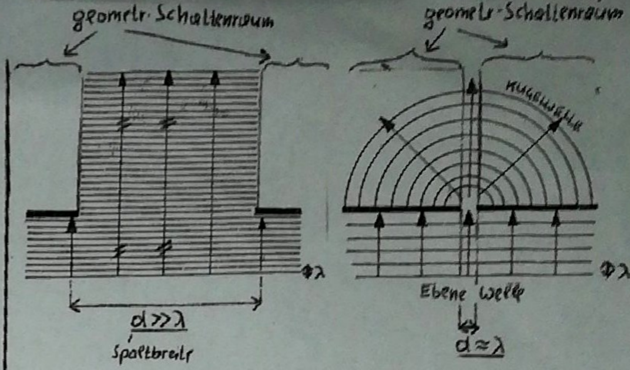
Interferenz 2-er Seilwellen (Wellenberge)




Interferenz 2-er Kugelwellen in der Wellenwanne.

Beugung von Wellen

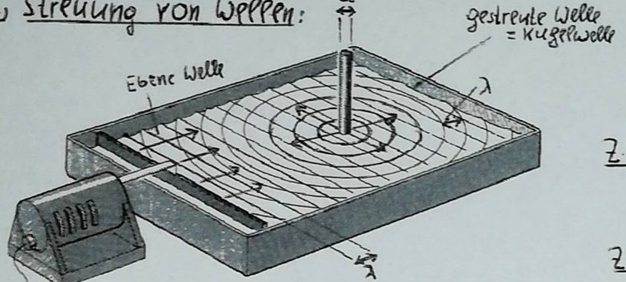




! **BEUGUNG** einer Welle ist das Eindringen der Welle in den geometrischen Schattenraum, d.h. das „ums Eck laufen" von Wellen beim Durchgang durch einen Spalt. (o. einem kleinen Hindernis, o. einer Kante)
$\lambda \ll d$: Keine Beugung $\lambda \approx d \Rightarrow$ Starke Beugung !

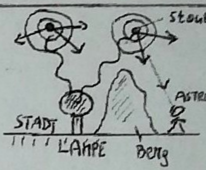
Bsp: • Licht ($\lambda \approx \frac{1}{2000}$ mm) geht beim Durchgang durch eine Tür ($d \approx 1$m) nicht ums Eck, da $\lambda \ll d$
$\Rightarrow$ geradlinige Ausbreitung. Man sieht nicht ums Eck ≙ keine Beugung.
• Schall ($\lambda \approx 1$m ≙ 330 Hz) $\Rightarrow$ Schall geht ums Eck, da $d \approx \lambda$ d.h. starke Beugung ≙ „ums Eck hören"

2, Streuung von Wellen:



! Trifft eine Welle auf ein kleines Hindernis d.h. $d \lesssim \lambda$ dann wird dieser zum Ausgangspunkt einer Kugelwelle gleicher (genauer: Elementarwelle) = STREUUNG (unabh. von der Form des Hin

Z.B Lichtdom einer Stadt = „Lichtverschmutzung) (Himmel erleuchtet)
≙ Streulicht von Licht der Straßenbel. an Staub & H_2O Tröpfchen der Luft ($d \lesssim \lambda$) ($\approx \frac{1}{2000}$ mm)

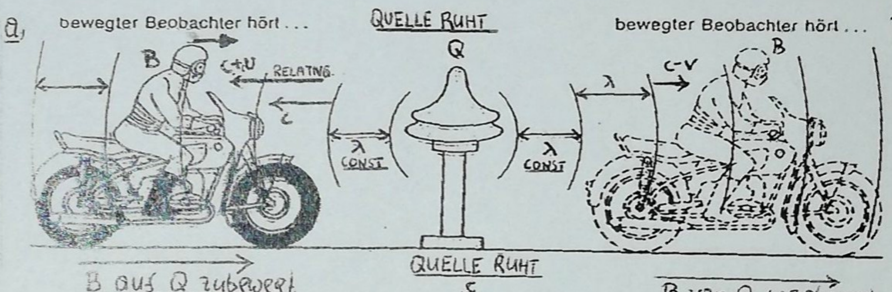


Z.B Himmelsblau: Streulicht der Sonne an Luftmolekülen. Blau wird stärker als Rot gebeugt.

3, Dopplereffekt

A, Akustischer Dopplereffekt (Schallwellen):

a,

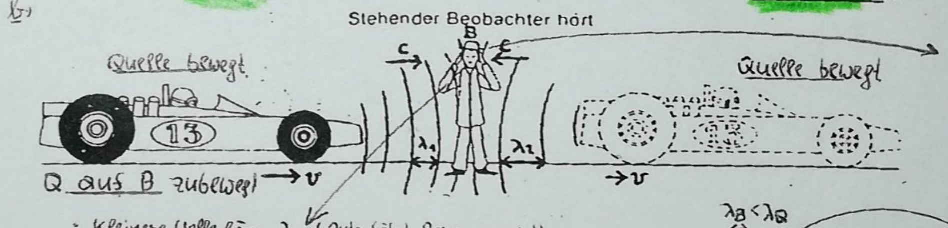


B auf Q zubewegt
• mehr Wellenberge je s
=> Höhere Frequenz $f_B > f_0$
=> Höherer Ton

f_0

B von Q wegbewegt
• Weniger Wellenberge je s
=> tiefere Frequenz $f_B < f_0$
=> tieferer Ton

b,

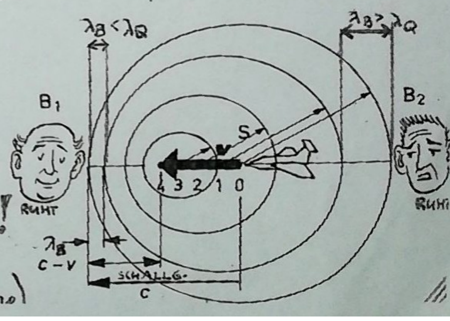


größere
• Wellenlänge λ
• tiefere Freq
• tieferer Ton

Q auf B zubewegt → v

• Kleinere Wellenlänge λ_1 (Auto fährt Bergen nach!)
=> mehr Frequenz (mehr Wellenberge je s)
=> höherer Ton

• *Christian Doppler (1803–1853)* *wurde in Salzburg geboren. Er war zunächst Mathematikprofessor an der technischen Lehranstalt in Prag, später Professor der Physik an der Universität Wien. Von seinen zahlreichen Abhandlungen haben sich die Untersuchungen über bewegte Schall- und Lichtquellen als besonders wertvoll erwiesen.*



AKUST. DOPPLEREFFEKT

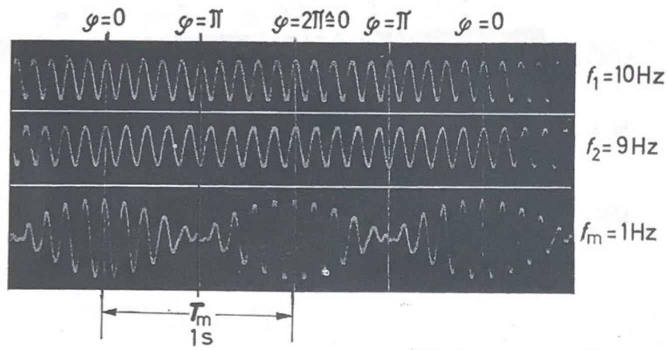
! Bewegen sich Schallquelle und Beobachter aufeinander zu (voneinander weg), dann registriert der Beobachter höhere Frequenz ≙ HÖHERER TON (tiefere Frequenz ≙ TIEFERER TON)

Astronomie wichtig!

B, OPTISCHER DOPPLEREFFEKT • Annäherung → Blauverschiebung (f größer) | Entfernung → Rotverschiebung (f kleiner)

SCHWEBUNG

Überlagerung 2-er SINUSSCHWINGUNGEN mit fast gleicher Frequenz $f_1 \approx f_2$ (gleiche Schwingungsricht.) führt zu einer Schwingung mit periodisch veränderlicher Amplitude genannt MODULIERTE SCHWINGUNG. Während der sog Modulationsdauer T_m = Zeitspanne zwischen 2 Amplitudenmaxima bleibt die langsamere Schw gegenüber der schnelleren um genau um 1 Periode zurück d.h. die Schnellere führt genau eine Schw. mehr aus als die Langsamere.



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*)

$$\left| \frac{T_m}{T_1} - \frac{T_m}{T_2} \right| = 1$$

$$|T_m f_1 - T_m f_2| = 1 \quad |^{-1}$$

$$T_m = \frac{1}{f_1 - f_2}$$

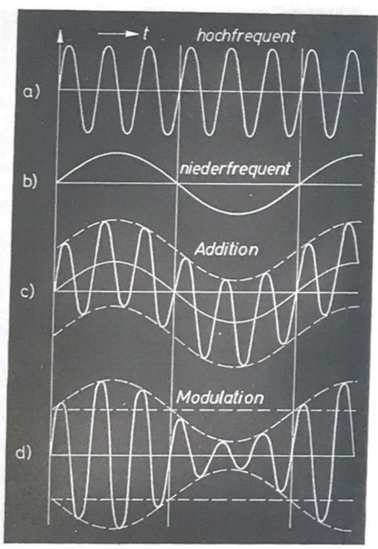
$$\boxed{f_m = f_1 - f_2}$$

Frequenz der modulierten Schw.

z.B $f_1 = 10\,Hz$, $f_2 = 9\,Hz$ $\rightarrow f_m = 1\,Hz$

V: 2 Stimmgabeln mit fast gleicher Frequen.
→ Man hört einen Ton veränderlicher Lautstärke (veränd. Amplitude)

AMPLITUDENMODULATION 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)
$y = y_0 + y_1$

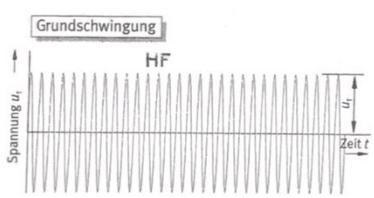
d) Modulation der hochfrequenten Schwingung im Rhythmus der niederfrequenten Schwingung; die Modulation stellt keine einfache Addition der beiden Schwingungen dar (c), bei welcher die Elongationen addiert werden. Es wird vielmehr zur Amplitude der Trägerschwingung die Elongation der Niederfrequenzschwingung addiert
$y = (U_0 + y_1) \sin \omega_0 t$

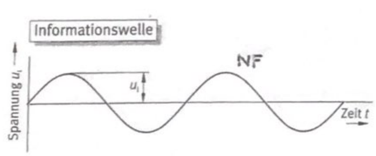
Bei der AM wird die Amplitude einer hochfrequenten Trägerschwingung durch eine niederfrequente Schw. (z.B Tonschwingung) moduliert. Die Information (Musik, Daten) wird der HF-Schw. dadurch aufgeprägt und mit ihr übertragen.

Nachteil:
- Störanfällig (Gewitter), da die INFO in der Amplitude steckt
- Nicht beliebig große Lautstärke übertragbar

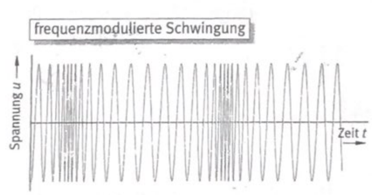
Anw:
- Rundfunk mit MW, LW, KW
- CB-Funk
- Flugnavigation

FREQUENZMODULATION FM





→

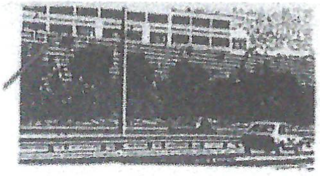


Frequenzmodulierte Welle (FM)

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

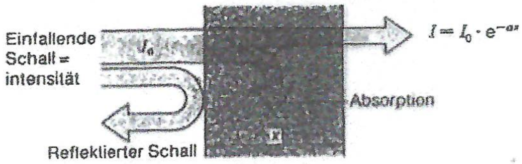
Anw:
- TV
- UKW (z.B Ö3)

SCHALLABSORPTION, SCHALLDÄMMUNG



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. (Zeitungsartikel)

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

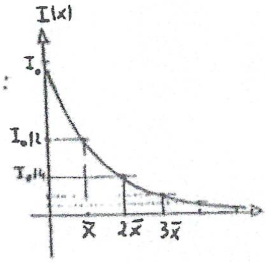


teilweise ...

– " – ... (verschluckt)

– " – ...

2. Die Absorption des Schalls wird durch ein Exponentialgesetz beschrieben:



I_0 ..... In die Wand eindringende Schallintensität
$I(x)$ ..... Schallintensität nach Eindringen in die Wand um den Weg x
α ..... Schallabsorptionsgrad
$\bar{x}$ ..... Halbwertsdicke

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

... , ... , ... (höhere Frequ. werden besser absorbiert)

4. Was ist ein schalltoter Raum + Beispiel?

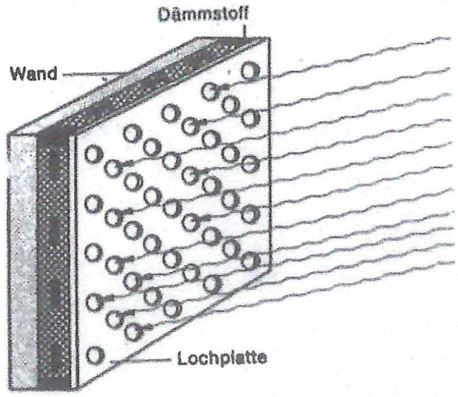
5. Was ist ein Hallraum und wozu dient er?

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

– Aufbau:

– Mechanismus der Schallabsorption

– Beispiele:



Schallschluckende Wand
Der Schall wird hinter der Lochplatte im Dämmstoff durch Reibungswiderstände aufgezehrt.

7. Wie arbeitet ein Schalldämpfer? (Auspuffanlage: Auto, Moped, ...)

Reflexion => Absorption teilw. d.h. Dämpfung

8. Wodurch kann das Hallen (= ...) vermindert werden?

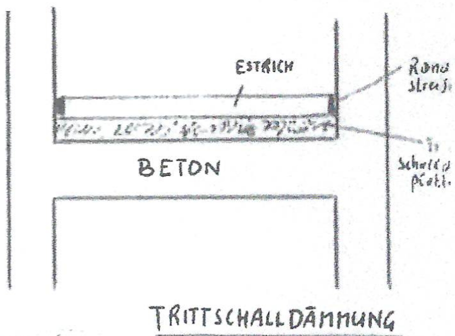
9. Wie werden (Häuser) Rohre (Gas, Wasser, ...) verlegt? Warum?

SCHALLDÄMPFER

10. Was ist Trittschall und wie wird er vermieden?

Begriff:

Vermeidung:



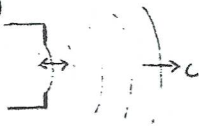
TRITTSCHALLDÄMMUNG

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

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

LAUTSTÄRKE

- **Schallleistung P** (POWER) (Energiestrom) einer Schallquelle ist die gesamte je ____ in den Raum abgestrahlte ____, also $\boxed{P = \frac{E}{t}}$ $(P) = 1$ ____ (____)

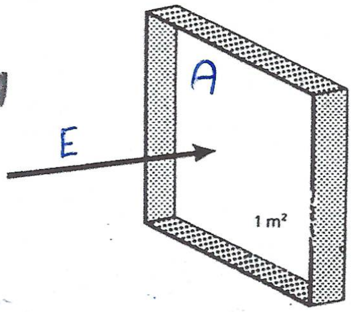


(Vgl.: Hubarbeit einer 100 g Schokolade für 1 m in 1 s: $P = \frac{W}{t} = \ldots =$

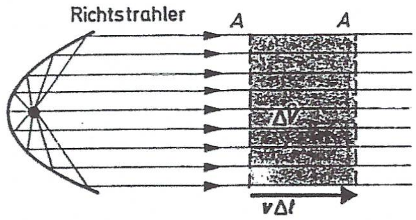
TABELLE:

Schallquelle	Sprache	Geige	Trompete	Orchester	Orgel	Lautspr.	Alarmsirene
Schallleistung	$< 10^{-5}$ W	$< 10^{-3}$ W	< 0,3 W	< 5 W	< 10 W	< 100 W	< 3000

- **Schallintensität I** (Schallstärke, Schallenergiestromdichte) an einer Stelle P des Raumes (z.B. Ohr, Mikrofon, ...) ist die ____ die je ____ bei senkrechtem Einfall durch 1 ____ Fläche durchtritt.

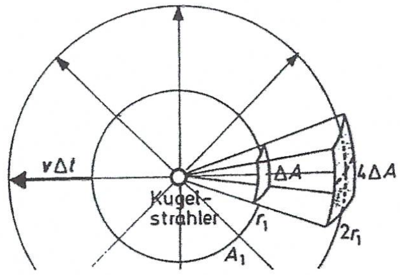


$I = \_\_\_ =$



In einem ebenen Wellenbündel ist die Intensität fast konstant.

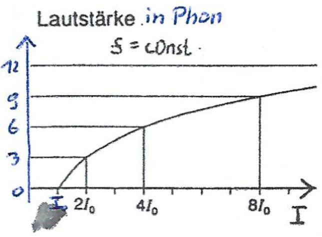
$I = \frac{P}{A} = const.$ (unabh. von r)

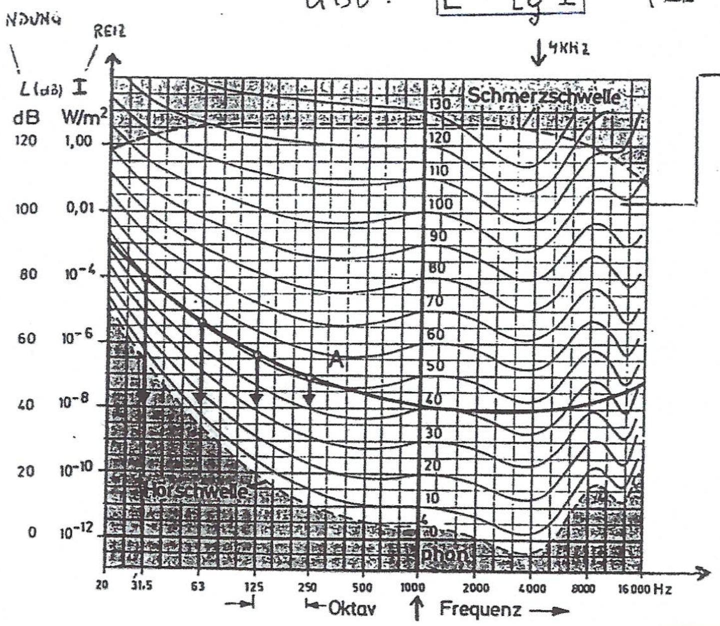


In einer Kugelwelle ist die Intensität zu r^2 verkehrt proportional; das gilt für Schall ebenso wie für Licht.

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

- **Lautstärke L:** Die Sinnesempfindung Lautstärke hängt von der am Ohr herrschenden ____ und in komplizierter Weise von der ____ eines Tones (bzw. vom ____ eines Klanges o. Geräusches) ab.
Bei const. Frequenzspektrum gilt annähernd das ____ Gesetz für den Sinnesreiz ____ und der Sinneswahrnehmung ____ L: Prozentuell gleiche Änderungen der ____ geben absolut gleiche Änderungen der ____. (Vgl.: 1 Geige → 2 Geigen, 1 Motorrad → 2 Motorräder)
also: $\boxed{L \sim \lg I}$ $\left(\Delta L = \lg \frac{I_2}{I_1} = \lg I_2 - \lg I_1 = L_2 - L_1\right)$





Hörfläche: (hier: weiß) Alle jene Zahlenpaare (f, I) für die ein SIN-TON ____ ist aber noch nicht ____. Sie umfaßt ...... Zehnerpot.-en

Hörschwelle: = Untere Grenze der Hörfläche. Sie zeigt jene Grenze an, bei der ein SIN-TON ____.
(für: 2 kHz: ....
125 Hz: ....
20 Hz: ....)

Schmerzschwelle: = Oberere Grenze der Hörfläche. Sie gibt für jede f eines Sinustones an, bei welcher ____ er ____ registriert wird.

Phonskala der Lautstärke $\boxed{L_N = 10 \lg \frac{I_N}{I_0}}$

I_N: Intensität jenes ____ Tones der von einer Versuchsgruppe ____ wie der zu mess. Schall (Klang, ...)

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

BEM.: • Hörschwelle ≈ .... , Schmerzschwelle ≈
• Doppelte I führt jeweils zu einer Steigerung der L um ΔL = ____ (1 kHz) $\Delta L = 10 \lg 2$
• 10-fache I " " " " " um ΔL = ____ (1 kHz) $\Delta L = 10 \lg 10$

%

• Bsp1: Schallintensität eines Motorrades ist $10^{-4}\,\frac{W}{m^2}$ Ges: Lautstärke

TABELLE

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

• Bsp2 Unterhaltungssprache 40 phon Ges: Schallintensität

• **SCHALLPEGEL L**, dB-Skala der Lautstärke: $\boxed{L = 10 \lg \frac{I}{I_0}}$

I … Schallintensität des Schallereignisses.

I_0 … $10^{-12}\frac{W}{m^2}$ = Hörschwelle des 1kHz Tones

-> Vorteil: Physik mit Schallpegel meßgerät leicht meßbare phys. Größe (Mikrofon, Verstärker, Anzeige in dB)

-> Nachteil: Die dB-Skala stimmt nur für $f =$ ____ mit der Phonskala überein und ist daher für diese Frequenz ein Maß für die Sinnesempf. Lautstärke

-> Da die Schallintensität I ~ dir. prop. zum Quadrat des Schalldrucks also $I \sim p^2$ d.h. $I = Kp^2$ => $L = 10 \lg \frac{\cancel{K}p^2}{\cancel{K}p_0^2} = 10 \lg \left(\frac{p}{p_0}\right)^2$

d.h. $L = 20 \cdot \lg \frac{p}{p_0}$, p … Schalldruckamplitude, p_0 … Schalldruckamplitude bei der Hörschwelle des 1kHz Tones

=> 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	$I\,(\frac{W}{m^2})$	L	L_N
31,5 Hz	10^{-6}		
500 Hz	10^{-6}		
4000 Hz	10^{-6}		
1000 Hz	10^{-6}		

ENDE

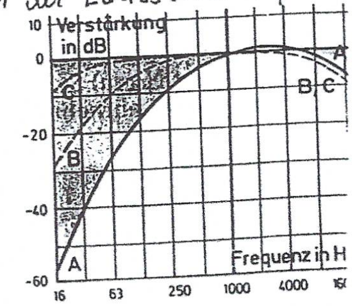
+ • **Bewerteter Schallpegel** (dB(A), dB(B), dB(C))
(praktisches Lautstärkemaß)

– Nachteil der Phonskala:
– Nachteil der dB-Skala:

Für die (ungefähre) techn. Best. der (subjekt. Lautstärke) ohne Versuchspersonen müßte ein Meßgerät die dB-Werte abhängig von f (kompliziert) schwächen (o. stärken) um Phonwerte zu erhalten: z.B. 40dB Anzeige: Bei 1kHz -> ____ phon (Schwäch. 0dB)
63Hz -> …. phon (Schwäch. …..)

Zur Überprüfung von Lärmschutzmaßnahmen: Ersetzen der Kurven gleicher Lautstärke durch einfachere Kurven und genormte Abschwächung via Bewertungsfilter A (B oder C, genorm
=> dB(A) Werte ≈ 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.



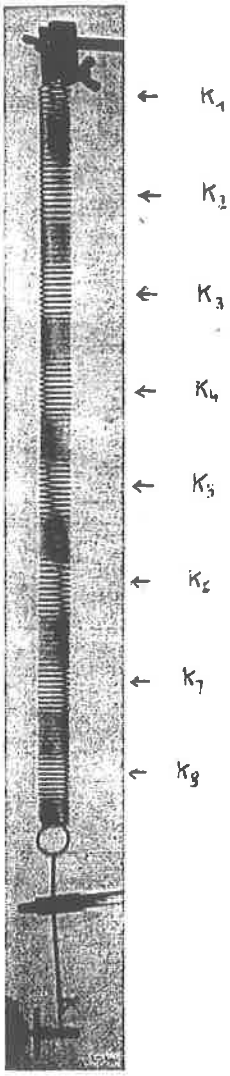
Bewertungskurven nach DI 45633 bzw. Verord. d. BA. f. Eich- u. …wesen v. 29. 6. 1979

+ • **PEGELABSTAND**

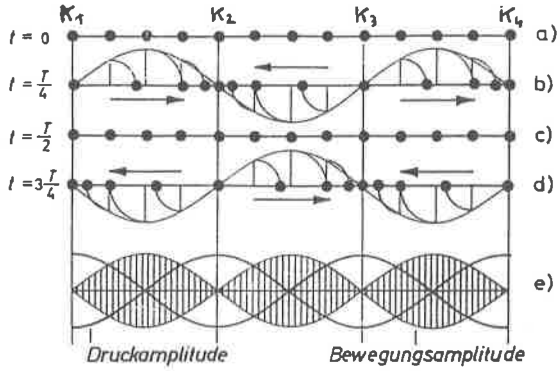
$\Delta L = 10 \lg \frac{I_2\,(P_2)}{I_1\,(P_1)}$ heißt Pegelabstand der {Schalleistung P_2 von P_1 / Schallintensität I_2 von I_1
(Einheit: dB   Pegelangaben sind wie Höhenangaben relativ, so lange kein Nullpegel als Nullniveau gewählt wird: z.B $I_0 = 10^{-12}\,W/m^2$
-> Lautstärkepegel L

z.B. Verstärker $P = 30W$ Sinusleistung mit Störpegelabstand -63dB
d.h. $\Delta L = 10 \lg \frac{P_0}{P}$ Ges. Störleistung P_0 o/o

STEHENDE LONGITUDINALWELLEN



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

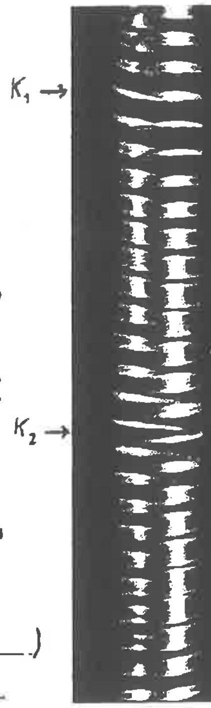
a) Mediumteilchen in gleichmäßiger Verteilung ($t = 0$)

b) 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

c) Verteilung zur Zeit $t = T/2$

d) Lage der Teilchen zum Zeitpunkt $t = 3\,T/4$

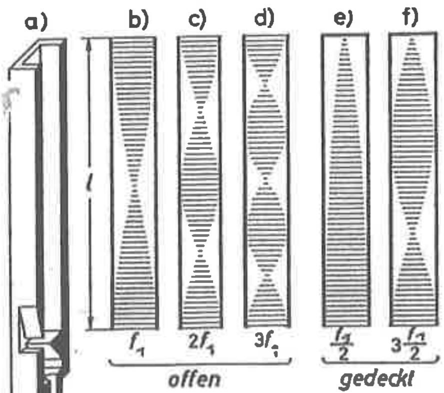
e) Bewegungs- und Druckamplitude (Dichteamplitude) als Funktion des Ortes



In longitudinalen stehenden Wellen sind die Bewegungsknoten ~~Druck~~ .... (Dichte ________)
die Bewegungsbäuche hingegen sind ________
(______________)

Anwendung: BLASINSTRUMENTE

Bei Blasinstrumenten wird die in einem Rohr R (o. Schalltrichter) befindliche Luft durch Anblasen in Eigenschw. versetzt (stehende ____________).
Je nach Art der Schwingungsanregung unterscheidet man zwischen
a) ____________
b) ____________



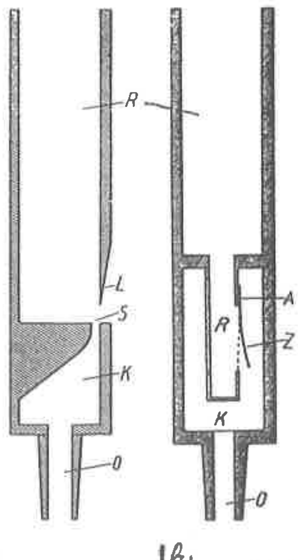
Lippenpfeife und die in ihr möglichen Schwingungsformen. Die Amplitudenverteilung in den longitudinalen stehenden Wellen ist transversal gezeichnet

ad a) Das dem Spieler zugewandte Rohrende wirkt als ____________. Bei der
- sog. offenen ____________ ist auch das dem Spieler abgewandte Rohrende ________. ($\hat{=}$ 2 ________ Enden)

=> Grundfrequenz: $\boxed{f_1 = \text{——}}$

Das Frequenzspektrum enthält alle ____________

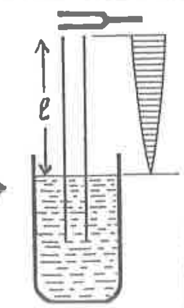
- Bei der gedeckten Lippenpfeife (1 .... Ende + 1 .... Ende) ist die



a) .... | b) ....

Grundfrequenz $\boxed{f_1 = \text{——}}$ also nur ________ so groß d.h. um eine ________ tiefer. Das Frequenzspektrum besteht hier aus allen ____________ ____________ der Grundfrequenz.

V:



Messung der Schallg. in Luft bei Zimmertemp. 21°
Stimmgabel: f = ________
Länge der Luftsäule bei Auftreten der Grundschwingung
l = cm => λ_1 = ________
v = · ________ => v = ________ $\frac{m}{s}$

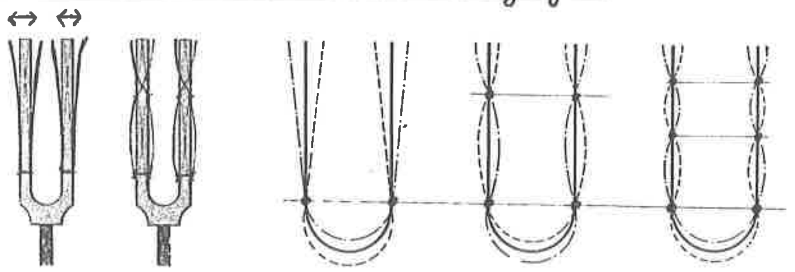
QUINCKESCHES RESONANZROHR

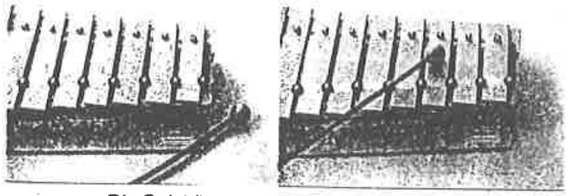
Resonanz bei Wellenlängen
l = ... , ... , ... , ...

FRAGEN: 1.) Wie verändert ein Blasinstrument Spieler die Tonhö
2.) Wie lange muß eine Orgelpfeife sein, wenn sie das Subkontra C spielen können. (a) offen b) gedeckt)

STEHENDE TRANSVERSALWELLEN IN DER MUSIK

a) 1 dimensionale Transversalschwingungen:





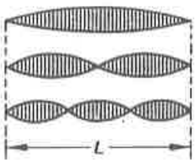
Die Salzkörner bleiben während des Spieles in der Nähe der Auflagepunkte der Klangstäbe liegen. Dort treten Knotenlinien auf.

- **STIMMGABEL:** Stets 1 Knoten bei der Halterung. Oberschwingungen vernachlässigbar. Die Tonhöhe der Stimmgabel-Sinusschwingung (Grundschw.) ist umso größer je ________, je ________ und je größer die ________ im Stimmgabelmaterial ist

- **Schwing. STÄBE:** XYLOPHON, ... Lagerungsstellen ________. Die Stäbe erzeugen durch Überlagerung der ________ und den ________ einen ________ der umso höher klingt je

- **SCHWING. SAITEN**

eingespannte Saite

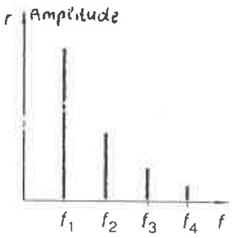


Gestalt der Saite — Grundschwingung — 1. Oberschwingung

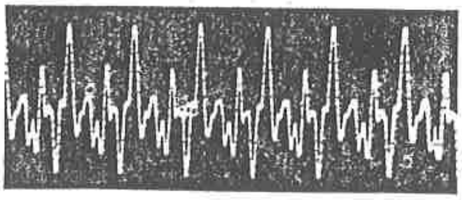
Hörbereich des Menschen:

20 Hz < f < 20 000 Hz → 17 m > λ > 17 mm.

Saite ≙ Seil mit 2 ______ Enden.
Durch Überlagerung der Grundschwingung f_1 und den harmonischen Oberschwingungen entsteht ein sog. ________. Seine Frequenz f ist gleich der ________ (Grund: Periodendauer der Summenschw. = kgV(T_1, , , ...) = kgV(, , , , ...) = ... => f = ...). Die Klangfarbe wird vom ________ der überlagerten Schwingungen bestimmt. Soll der Saitenklang eines Musikinstrumentes künstlich nachgeahmt werden (SYNTHESIZER MUSIK), so müssen die Sinusschwingungen (Grundschwingung + Oberschw.) im passenden Amplitudenverhältnis zusammengesetzt werden. (Umgekehrte FOURIERANALYSE)



FREQUENZSPEKTRUM



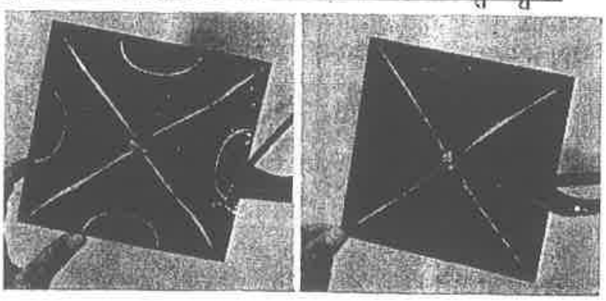
OSZILLOGRAMM eines VIOLINENKLANGES

„Tonhöhe" einer Saite: 2 feste Enden => f_1 = ---- , Schallg. im elast. Festkörper: $v = \sqrt{\frac{F}{\rho A}}$ (A ... Saitenquerschnitt, ρ ... Dichte; F ... Saitenspannkraft)

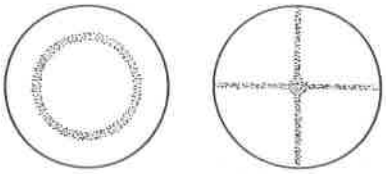
– f ist umso höher:
- je ________ die Saite ist. (Anw: Saite an Steg drücken => f wächst)
- je ________ die Saite gespannt ist. (Anw: Beim Stimmen)
- je ________ die Dichte des Saitenmaterials ist.
- je ________ der Querschnitt der Saite ist.

Anregung einer Saite:
Durch ________ (Klavier, ...
Durch ________ (Streichinstrumente: ________
Durch ________ (Gitarre, Harfe, Zither, ...

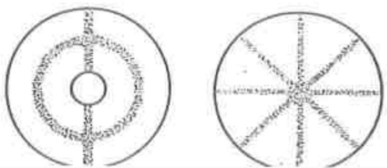
b) 2 dimensionale Transversalschwingungen



Anregung einer Metallplatte zu Schwingungen durch Anstreichen oder durch ...



CHLADNISCHE KLANGFIGUREN

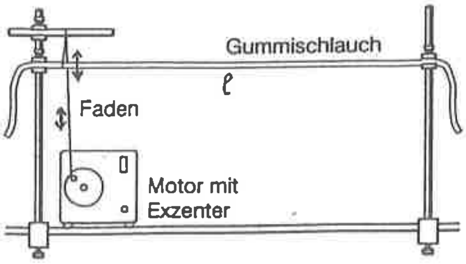


Metallplatten können zu flächenhaften stehenden Wellen angeregt werden. Statt Schwingungsknoten treten ________.

Anw: • Glocken sind gebogene Platten
• Becken, Gong

Stehende Transversalwellen

V:



• Versuchsablauf: f mit 0 Hz beginnend, immer mehr steigern.

- f gering => Seil ____ ____
- $f = f_1$ => ________ (Resonanz = Anregung in der Eigenfrequenz f_1 = Grundfrequenz)
- $f_1 < f < f_2$
- $f = f_2$ => ____ ____ (Resonanz: Anregung in der 1. Oberfrequenz – 1. Oberschwingung)

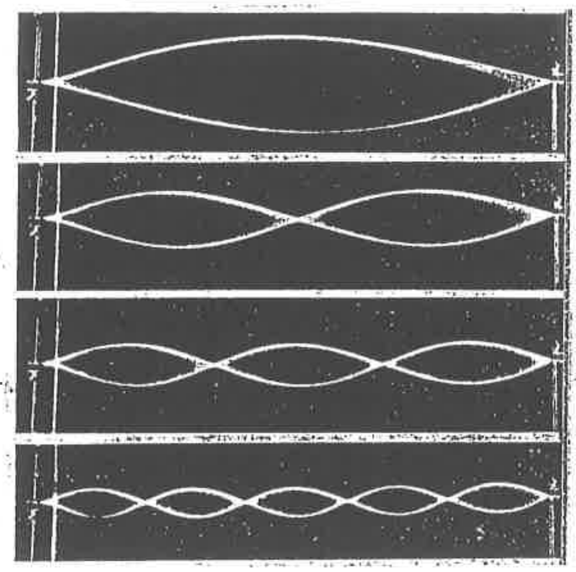
u.s.w.

Zusfass.: Ein Seil besitzt ________ Eigenfrequenzen $f_1, f_2, f_3, \ldots$. Bei Anregung in einer dieser Frequenzen gerät das Seil in heftige Schwingungen (________)
Die dabei entstehenden Schwingungsformen heißen ________ oder auch wegen ihrer Form ________.
Diese Schwingungen müssen dabei stets folgende Randbedingungen erfüllen:

- am festen Ende ist stets ein ________
- am losen Ende befindet sich stets ein ________ (da das Seilende stets parallel zur Ruhelage sein muß)

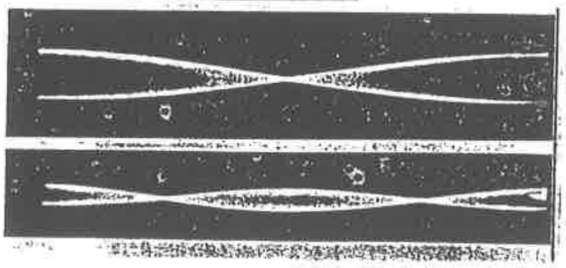
Stehende Wellen im begrenzten Seil entstehen durch Überlagerung der laufenden & reflektierten Welle nur dann, wenn die Wellenlänge λ der laufenden Welle ($c = \lambda \cdot f$) in einem ganz best. Verhältnis zur Seillänge ℓ steht. Der Knotenabstand ___ darf die Randbedingungen nicht verletzen.

• 2 feste Enden



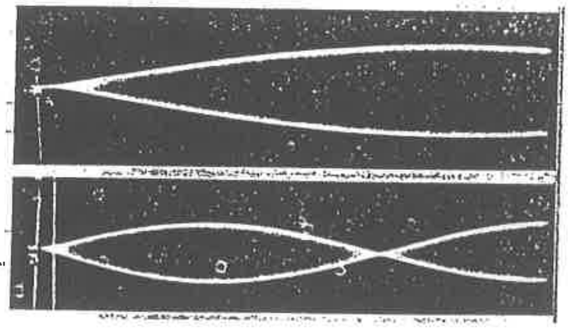
f_1 Grundschw.
f_2 = ... 1. Oberschw.
f_3 = ... 2. Oberschw.
f_4 = ... 3. Oberschw.

• 2 lose Enden



Grundschw. f_1
1. Oberschw. f_2 = ...

• 1 festes + 1 loses Ende



Grundschw. f_1
1. Oberschw. f_2 = ..

Frequenzspektrum bei 2 festen o. 2 losen Enden?

ℓ = ______ $\overset{v = \lambda c}{=}$ ______

=> f = ______

$\boxed{f_1 = \qquad}$ Grundfrequenz

$\boxed{f = \qquad}$ Frequenzspektrum

Bei 2 festen o. 2 losen Enden besteht das Frequenzspektrum (= Menge aller Eigenschwing.) aus allen ________ Vielfachen der Grundfrequenz f_1. Die Grundfrequenz ist dabei umso niedriger je ________ und je ________

Frequenzspektrum bei 1 festes + 1 loses Ende

ℓ = ______ =

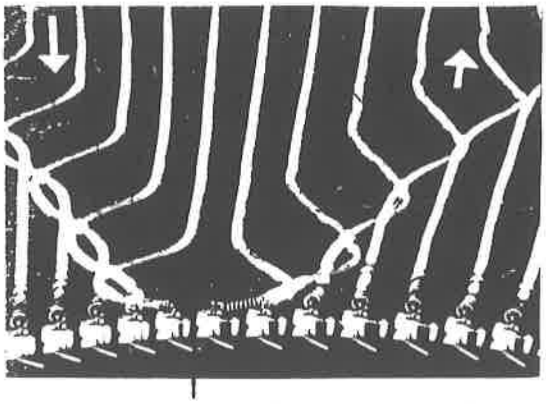
=> f = ______

$\boxed{f_1 = \qquad}$ Grundfrequenz

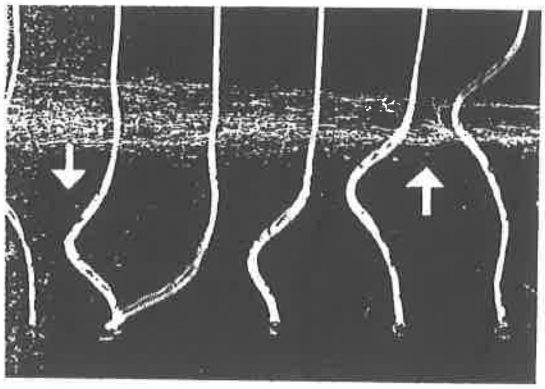
$\boxed{f = \qquad}$ Frequenzspektrum

Bei einem festen + 1 losen Ende besteht das Frequenzspektrum aus allen ________ Vielfachen der Grundfrequenz f_1.
Diese ist ________ wie die Grundfrequenz bei 2 festen o. 2 losen Enden

2, STEHENDE WELLEN



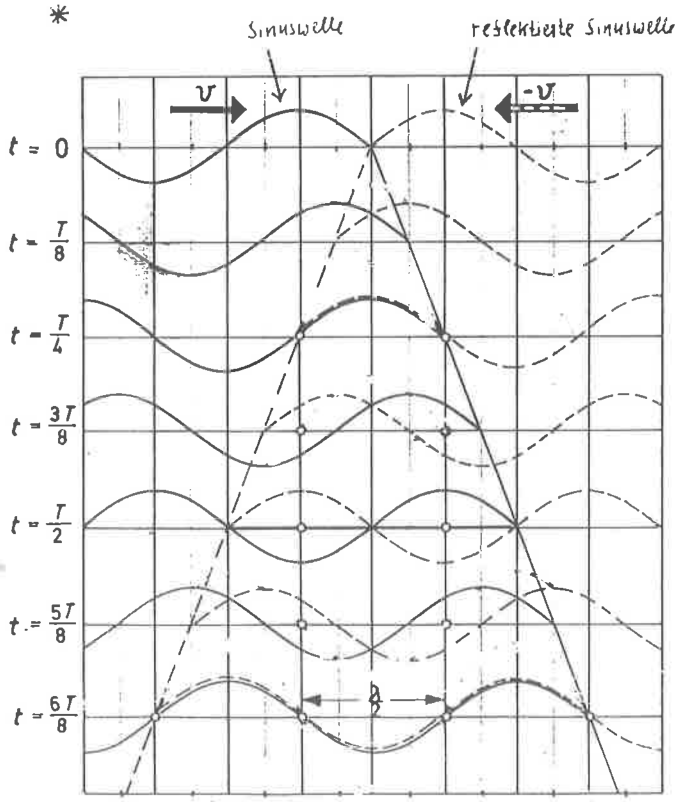
REFLEXION einer SEILWELLE (Seil, Gummischlauch, Schraubfeder, ...) am ______
Aus einem WELLENBERG wird ein ______
Es tritt ein ______ auf. (%)



REFLEXION einer Seilwelle am ______ (Seilende an langem dünnen Faden befestigt => frei beweglich).
Ein Wellenberg wird als ______ reflektiert.
Es tritt ______ auf

• Entstehung stehender Wellen:
(stationäre Schwingungszustände)

*

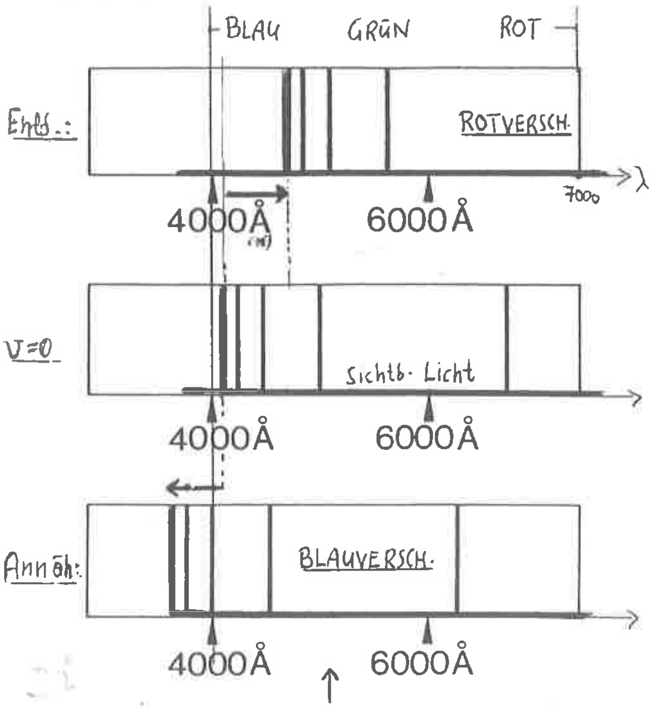


Überlagern (interferieren) sich eine sinusförmige Seilwelle und jene (ebenfalls sinusförmige) Seilwelle die durch Reflexion am Seilende entsteht, so entsteht als Summenwelle eine sog. ______ mit folgenden Eigenschaften: (%)

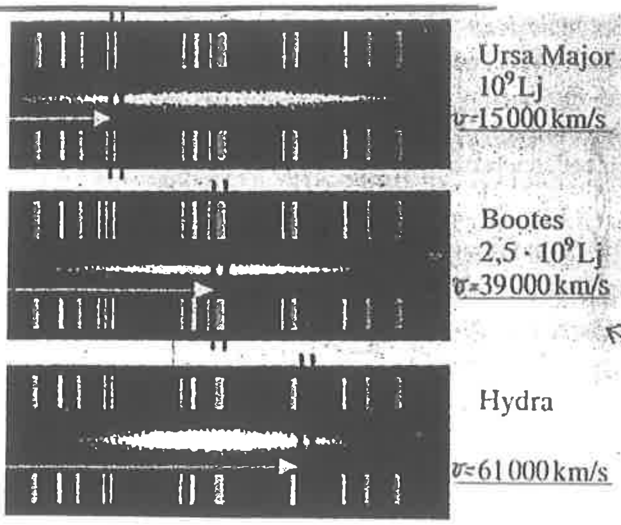
1, Ausbreitungsgeschwindigkeit ______ (=> Name)
2, Es treten am Seil Punkte auf, die immerwährend ruhen, sog. ______
und solche, die mit maximaler Amplitude schwingen, sog. ______
Insbesondere schwingen alle Seilpunkte mit ______
3, Punkte zwischen benachbarte Knoten schwingen ______ phasig
Punkte auf verschieden Seiten eines Knotens ______ phasig
4, Der Abstand 2-er Knoten ist gleich der ______ oder ______ fortschreitenden Wellen

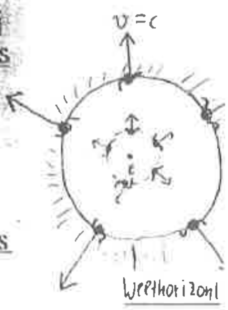
* $1 Å = 10^{-10}$ m
ANGSTRØM

ANWENDUNGEN DES OPTISCHEN DOPPLEREFFEKTES



OPTISCHER DOPPLEREFFEKT



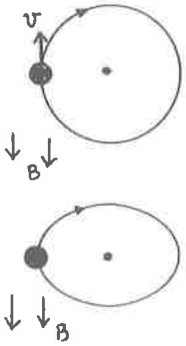


Die Spektren von vier in unterschiedlichen Entfernungen befindlichen Galaxien. Die mit der Entfernung wachsende Verschiebung der Absorptionslinien H und K ist deutlich erkennbar.

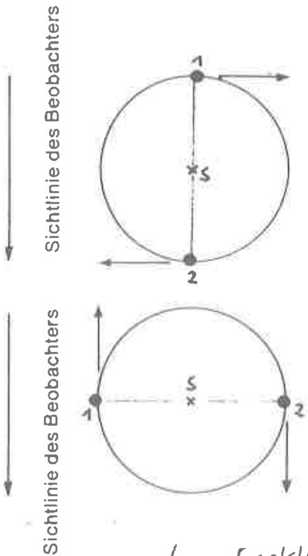
- a) Nachweis der Expansion des Weltalls durch HUBBLE $v = H_0 \cdot r$ ($H_0 = \frac{1}{6 \cdot 10^{17}} \frac{1}{s}$)
  (Weltradius: $c = \frac{1}{6 \cdot 10^{17}} \cdot r$, $r = 3 \cdot 10^8 \cdot 6 \cdot 10^{17} = 18 \cdot 10^{25}$ m $= 18 \cdot 10^{?}$ LQ !)

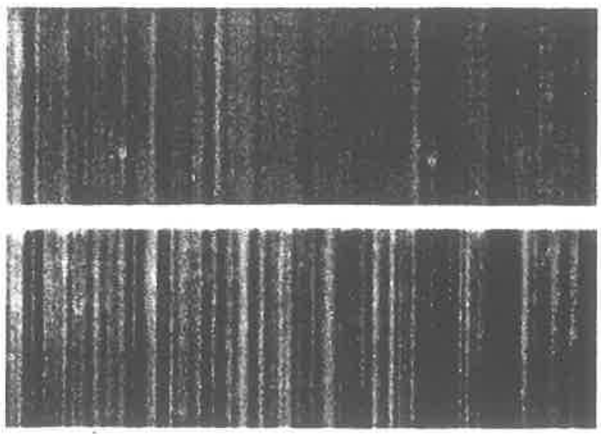
- b) Nachweis spektroskopischer Doppelsterne (Doppelsterne die mit Fernrohren nicht auflösbar sind.)

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.

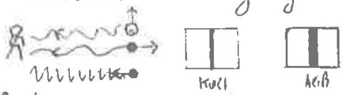


Rechts: Das Spektroskop ermöglicht die Entdeckung von Doppelsternen, die wegen ihrer großen Entfernung kein Teleskop auflösen kann. Die Abbildung veranschaulicht, wie dies geschieht. Zeitweilig (obere Reihe) nähert oder entfernt sich keiner der zwei Sterne. Sie bewegen sich quer zur Sichtlinie und erzeugen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





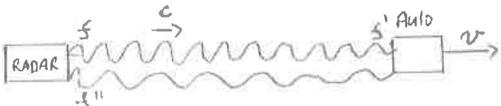
- c) Natürliche Dopplerverbreiterung der Spektrallinien aufgrund der thermischen Bewegung der Moleküle (Lichtquellen) → Rückschluß auf Temperatur eines Sternes.



- d) Nachweis der Rotation von Himmelskörpern: • Flächig erscheinende z.B. SONNE

  • Punktförmig erscheinende: Sterne ⇒ Linienverbreiterung

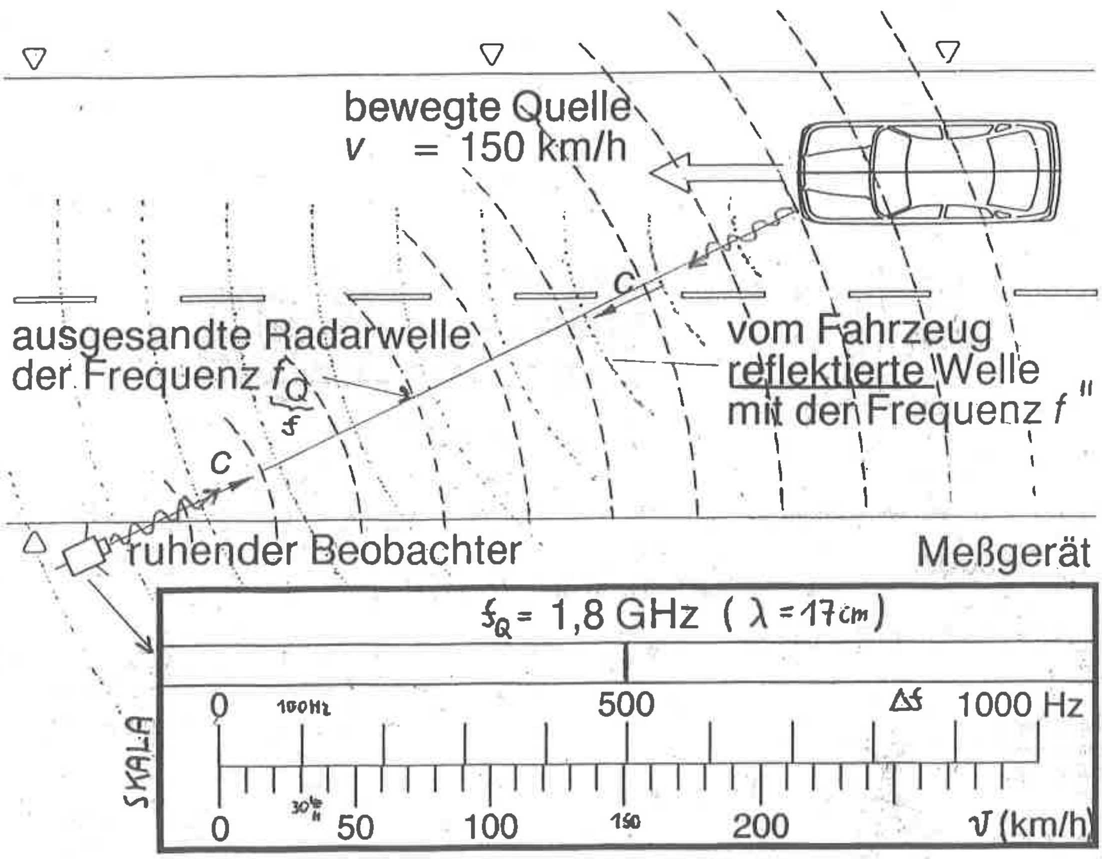
- e) DOPPLERRADAR



$f > f' > f''$
$f > f' \cdot \frac{1}{1+\frac{v}{c}} > f \cdot \left(\frac{1}{1+\frac{v}{c}}\right)^2 \Rightarrow v$

- f. ALARMANLAGEN (ULTRASCHALL), die bewegte Objekte registrieren. (Einbrecher) – AKUST. Dopplereff.

DOPPLEREFFEKT: DOPPLERRADAR



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

• v: $\underset{\text{ausges. Welle}}{f} \longrightarrow f' = f \cdot \frac{1}{1-\frac{v}{c}} = f\left(1+\frac{v}{c}+\underbrace{\frac{v^2}{c^2}-\dots}_{\approx 0}\right)$ $\longrightarrow f'' = f\left(1+\frac{v}{c}\right)^2$

Vom Auto empfangene Welle — Vom Radargerät empfangene Welle

$$f'' = f\left(1+\frac{v}{c}\right)^2 = f\left(1+\frac{2v}{c}+\overset{\approx 0}{\frac{v^2}{c^2}}\right) = f + \frac{2vf}{c} \quad \Big| -f, + \frac{2vf}{c}$$

$$\Rightarrow \frac{2vf}{c} = \overset{f''-f}{\Delta f}, \quad \boxed{v = \frac{c\,\Delta f}{2f}}$$

Genauigkeit: • Wegen Meßg. von $\Delta f \approx 2\,Hz \Rightarrow \underline{\Delta v} = \frac{c \cdot 2}{2 \cdot f} = \lambda$ der Radarw

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

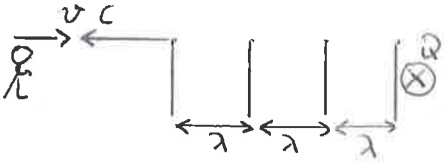
• je größer f (je kleiner λ) desto größer Meßgenauigkeit

Beispiel: Radargerät registriert $\Delta f = 500\,Hz$

Geschwindigkeit des Autos: $v = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 500}{2 \cdot 1{,}8 \cdot 10^9} \approx 42\,\frac{m}{s} \,\hat{=}\, \underline{150\,\frac{km}{h}}$

Dopplereffekt Formeln

A) AKUSTISCHER DOPPLEREFFEKT



- Beobachter auf Q zubewegt

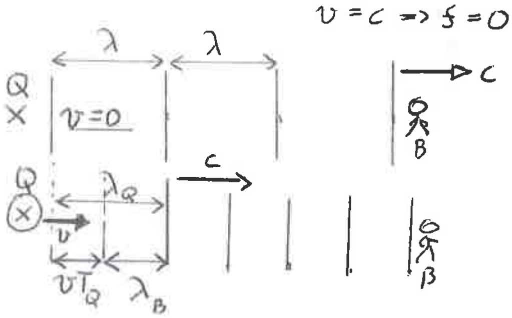
$$T_B = \frac{\lambda}{c+v} \quad |^{-1}$$

$$f_B = \frac{c+v}{\lambda_Q} = \frac{c+v}{\frac{c}{f_Q}} = f_Q\cdot\left(1+\frac{v}{c}\right) \Rightarrow \boxed{f_B = f_Q\cdot\left(1+\frac{v}{c}\right)} \text{ ... f-Erhöh.}$$

- Beobachter von Q mit $-v$ wegbew. $\quad v \to -v \Rightarrow f_B = f_Q\cdot\left(1-\frac{v}{c}\right)$ ... f-Erniedr.

$v = c \Rightarrow f = 0$

- Quelle auf Beobachter zubewegt



$$\lambda_B = \lambda_Q - vT_Q$$

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

$$f_B = \frac{c}{\lambda_Q - vT_Q} = \frac{c}{cT_Q - vT_Q} = \overset{f_Q}{\frac{1}{T_Q}}\cdot\frac{c}{c-v}$$

$$\boxed{f_B = f_Q\cdot\frac{1}{1-\frac{v}{c}}} = f_Q\left(1+\underbrace{\frac{v}{c}+\frac{v^2}{c^2}+\frac{v^3}{c^3}+\dots}_{\to 0}\right)$$

- Quelle von Beobachter wegbewegt $\quad v \to -v \quad f_B = f_Q\cdot\frac{1}{1+\frac{v}{c}}$

B) OPTISCHER DOPPLEREFFEKT

Für Lichtwellen gilt stets Ausbreitg. c

$$\Rightarrow \boxed{f_B = f_Q\cdot\frac{1}{1-\frac{v}{c}}}$$

nichtrelativ.

v ... Relativg.
$v>0$ ... Annäh.
$v<0$ ... Entf.

Bsp: $f_Q = 440\,Hz$

a) Beobachter mit $100\frac{m}{s}$ auf Q zubewegt: $f_B = f_Q\cdot\left(1+\frac{v}{c}\right) = 440\cdot\left(1+\frac{100}{330}\right) = \underline{573\,Hz} > 440\,Hz$

b) Quelle auf B mit $100\frac{m}{s}$ zubew. $f_B = f_Q\cdot\frac{1}{1-\frac{v}{c}} = 440\cdot\left(\frac{1}{1-\frac{100}{330}}\right) = \underline{631\,Hz} > 440\,Hz$

a, b ungleich

c) Beobachter mit $100\frac{m}{s}$ von Q wegbewegt: $f_B = f_Q\cdot\left(1-\frac{v}{c}\right) = 440\cdot\left(1-\frac{100}{330}\right) = \underline{279\,Hz} < 440\,Hz$

d) Quelle von B mit $100\frac{m}{s}$ wegbewegt: $f_B = f_Q\cdot\frac{1}{1+\frac{v}{c}} = 440\cdot\frac{1}{1+\frac{100}{330}} = \underline{338\,Hz} < 440\,Hz$

c, d ungleich

Bsp: $\lambda_Q = 589\,nm$ (gelb) in Galaxie

a) Galaxie mit $\frac{c}{3}$ zubewegt: $f_Q = \frac{c}{\lambda_Q} = \frac{3\cdot10^8\frac{m}{s}}{589\cdot10^{-9}m} = \underline{5{,}093\cdot10^{14}\,Hz}$

$$f_B = f_Q\cdot\frac{1}{1-\frac{v}{c}} = 5{,}093\cdot10^{14}\cdot\frac{1}{\underbrace{1-1/3}_{2/3}} = \underline{7{,}64\cdot10^{14}\,Hz}$$

$$\lambda_B = \frac{c}{f_B} = \frac{3\cdot10^8}{7{,}64\cdot10^{14}} = 3{,}927\cdot10^{-7}m \approx 393\cdot10^{-9}m = \underline{393\,nm} \text{ violett}$$

BLAUVERSCHIEBUNG

b) Galaxie mit $\frac{c}{3}$ wegbewegt $\quad f_Q \overset{a)}{=} 5{,}093\cdot10^{14}\,Hz$, $\quad f_B = f_Q\cdot\frac{1}{1+\frac{v}{c}} = 5{,}093\cdot10^{14}\cdot\frac{1}{\underbrace{1+1/3}_{4/3}} = \underline{3{,}82\cdot10^{14}\,Hz}$

$$\lambda_B = \frac{c}{f_B} = \frac{3\cdot10^8}{3{,}82\cdot10^{14}} = 7{,}85\cdot10^{-7}m = 785\cdot10^{-9}m = \underline{785\,nm} \geq IR$$

ROTVERSCHIEBUNG