

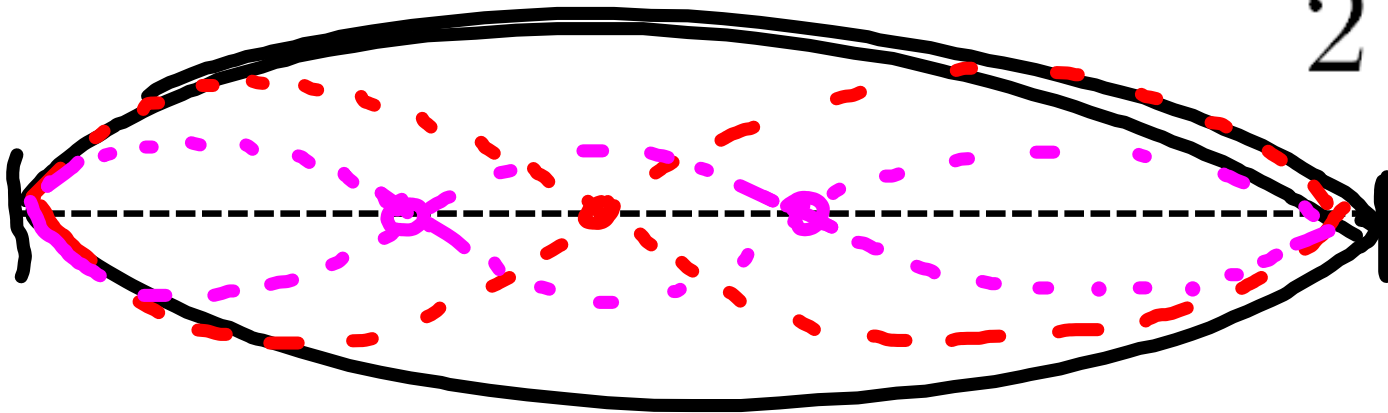
Mo. 11.03.13 Ph 2B

1. Rep.: Klänge &
Saitenschwingungen

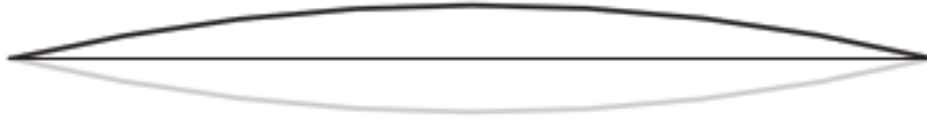
2. Lautstärke Intensität
Hörfähigkeit Dopplereffekt

Mögliche Anschwingarten einer Saite

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



Vertiefung im Experiment



Grundschwingung



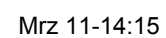
Erste Oberschwingung

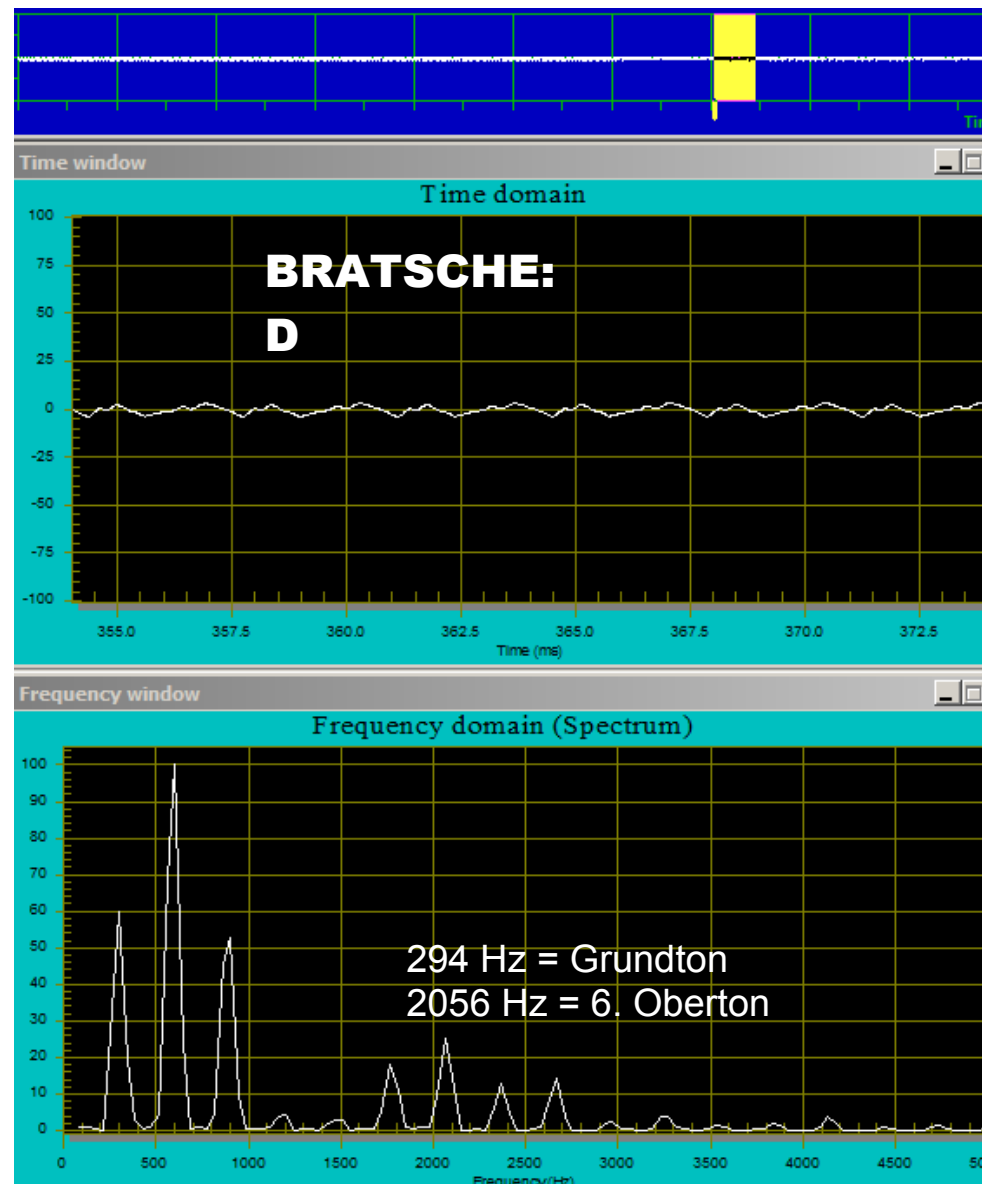


Zweite Oberschwingung

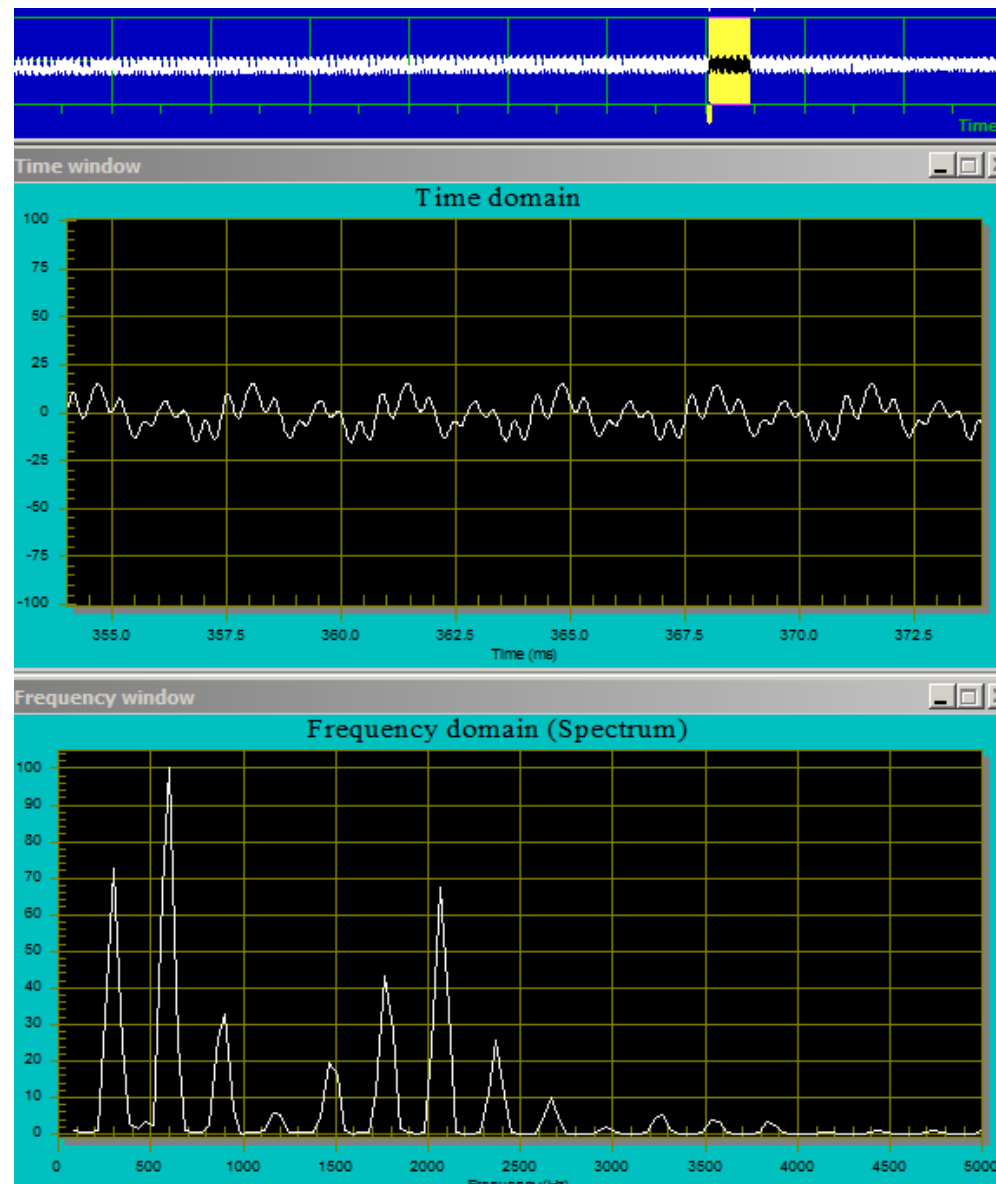


Dritte Oberschwingung

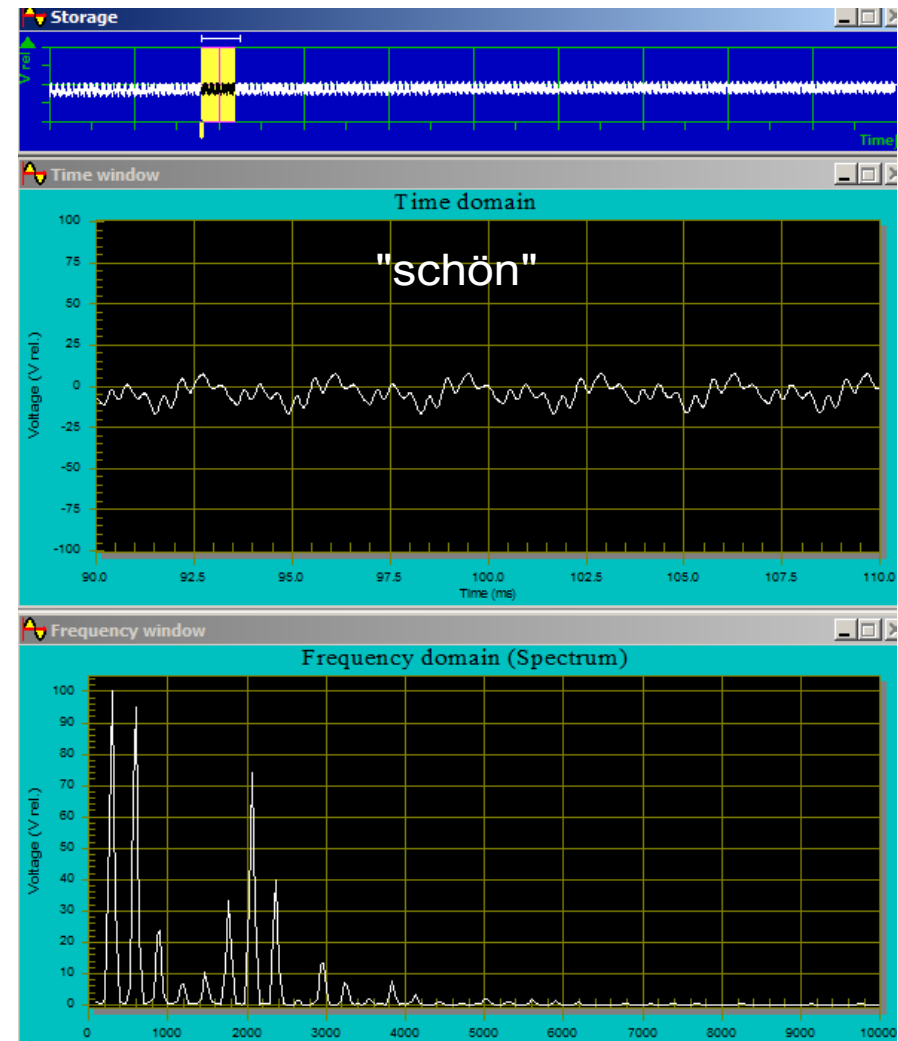
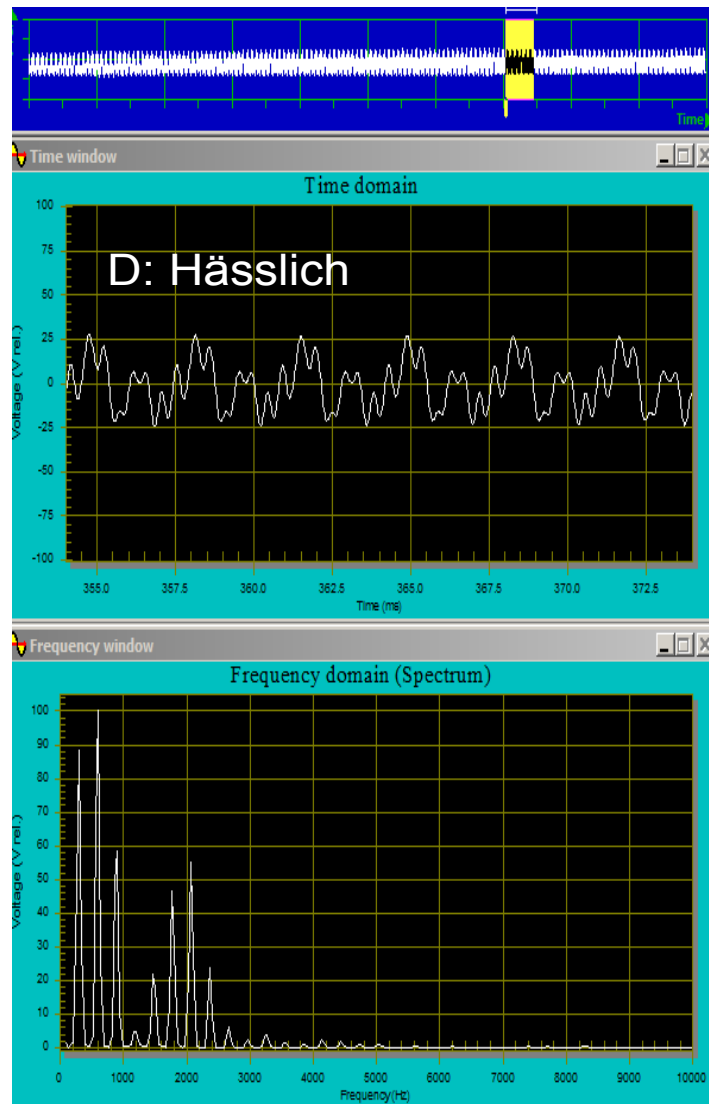




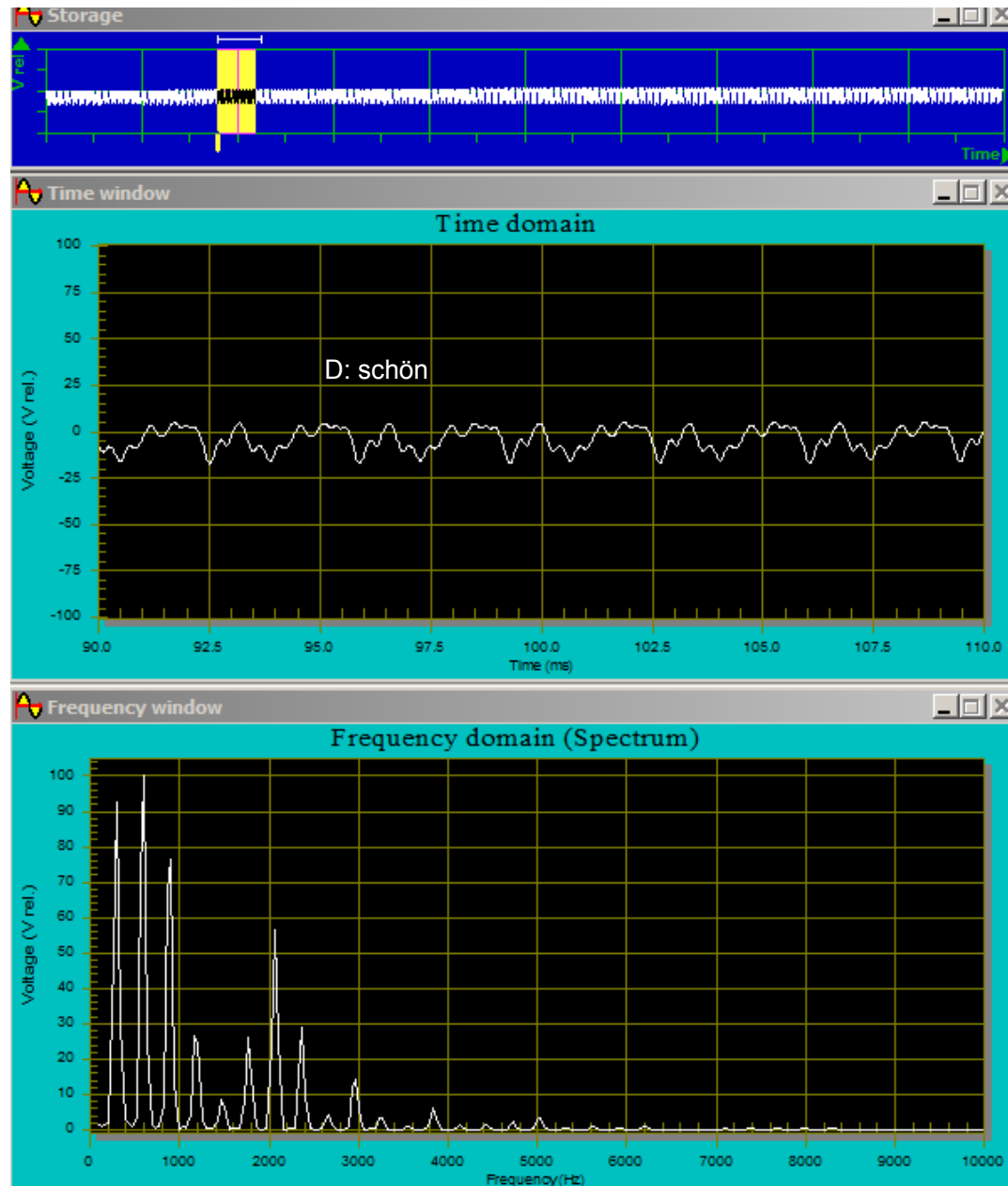
Mrz 11-14:16



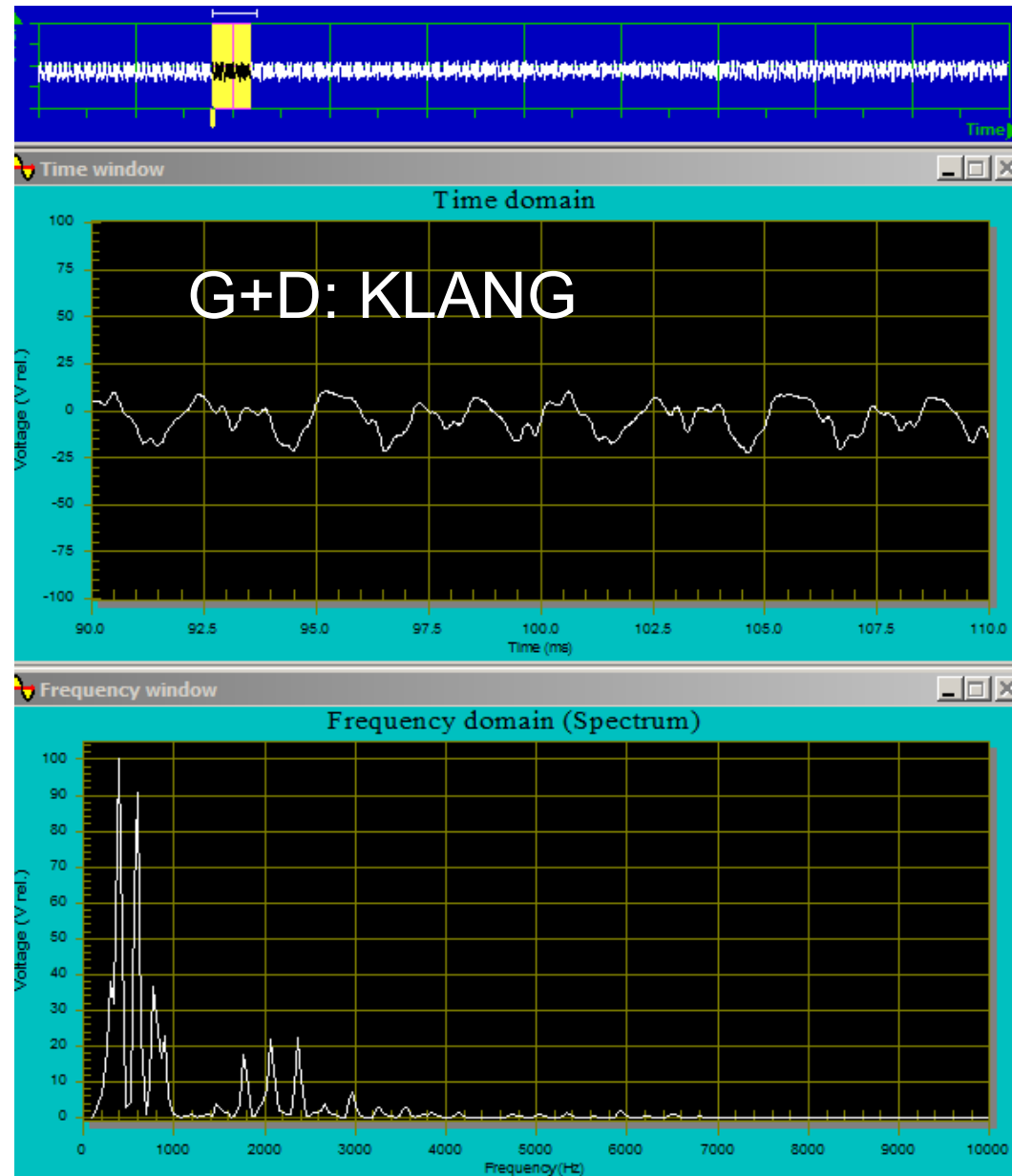
Mrz 11-14:25



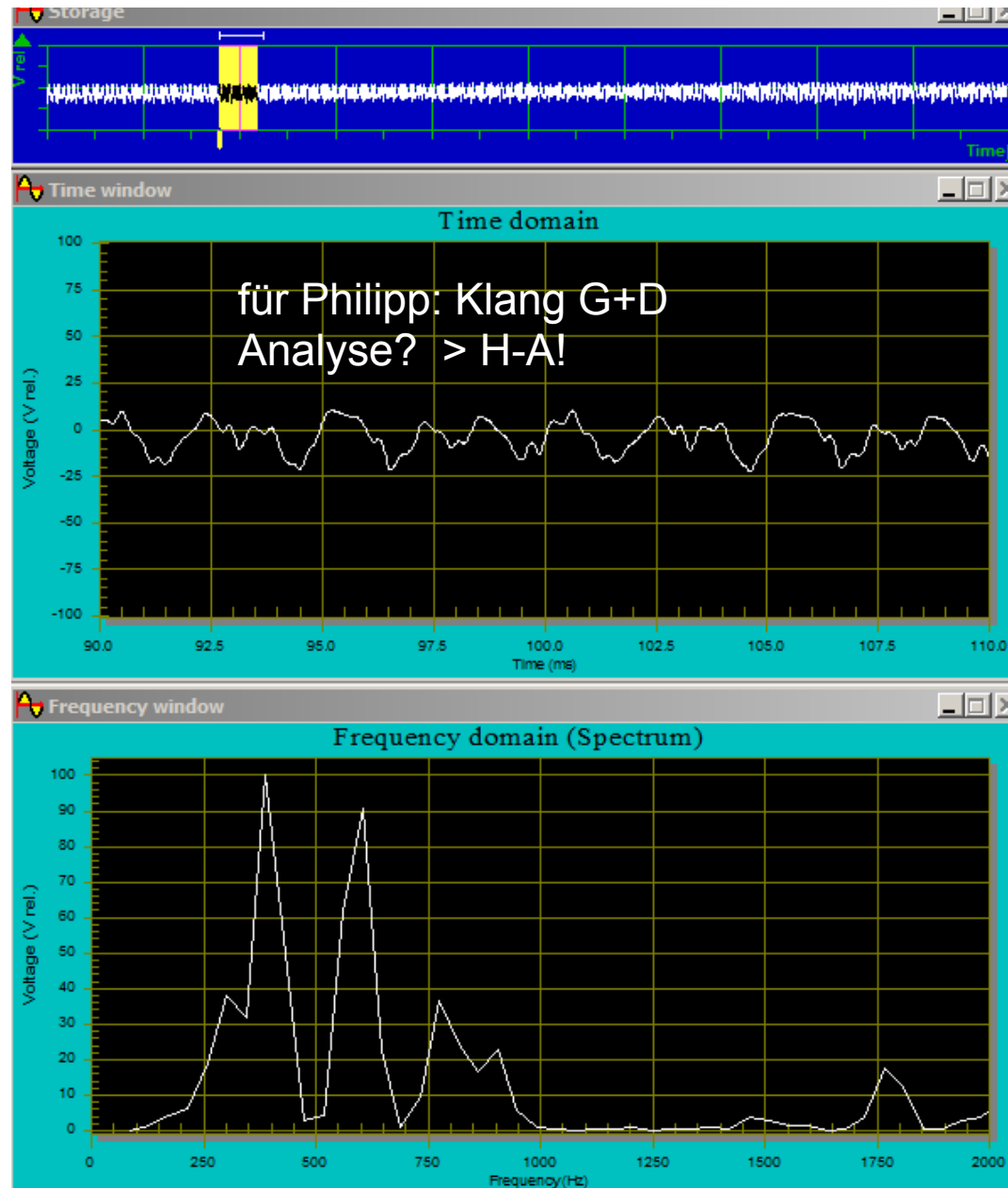
Mrz 11-14:26



Mrz 11-14:30



Mrz 11-14:30



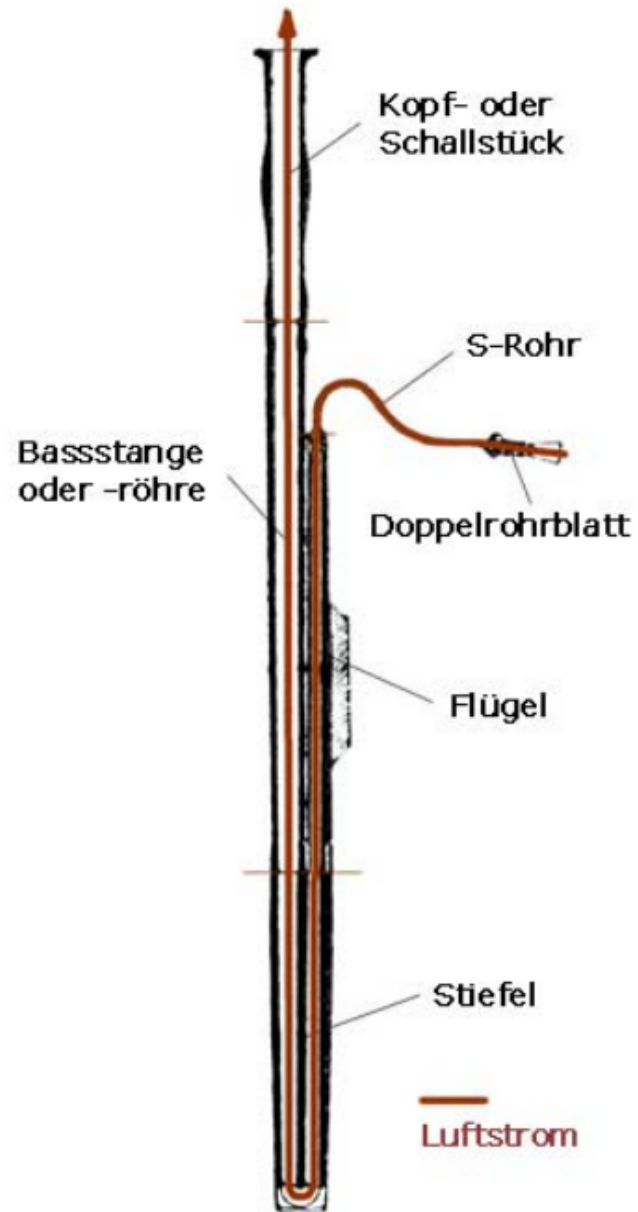
Mrz 11-14:33

Fragen zu den H-A: **Zusammenfassung?**

(u.a. Fagott und andere Instrumente, Details, die nicht in den Folien vorkommen!)

Höhe des Instrumentes: 1.37m, Gesamtlänge: 2.59m.

Zum Bau eines Fagotts benutzt man möglichst gleichmässig gefasertes, nicht zu schnell gewachsenes und sehr lange getrocknetes Ahornholz. In die entsprechend zugeschnittenen Rohstücke wird dann in jahrelanger Arbeit allmählich die Röhre gebohrt, wobei in ständiger Beobachtung jene Stücke, die sich verändern, ausgeschieden werden. Der Bau in Teilen wurde um 1650 ungefähr gleichzeitig wie bei Flöten und Oboen üblich.



Mrz 4-16:17

Das Mundstück ist ein wichtiger und zugleich sehr heikler Teil des Fagotts. Da es aus zwei gegeneinanderschwingenden Lamellen besteht, wird es Doppelrohrblatt genannt. Als Material benutzt man vorwiegend Schilfrohr, welches in Südfrankreich extra zu diesem Zweck angebaut wird. Besitzt man die speziellen (und teuren) Hobelmaschinen, kann man ganze Schilfrohre verarbeiten. Diese schneidet man zuerst in entsprechende Stücke und drittelt sie dann der Länge nach. Danach hobelt man den mittleren Teil ab. Hölzer in diesem Stadium kann man auch kaufen (was ich tue).



Als nächstes spannt man dieses Blatt ein und schneidet die Ränder ab.



Dann legt man es eine Weile ins Wasser, knickt es über einem Messer in der Mitte, umwickelt es fest mit einem Faden und befestigt die vorderste Zwinge. Denn hinteren Teil ritzt man ein und presst das ganze auf einen sogenannten Dorn, wodurch die runde Form gegeben wird. Nach dem Befestigen der noch fehlenden zwei Zwingen befindet sich das Rohr im "Puppen"-Stadium. In diesem Zustand sollte es vor der Weiterverarbeitung mehrere Tage gelagert werden.

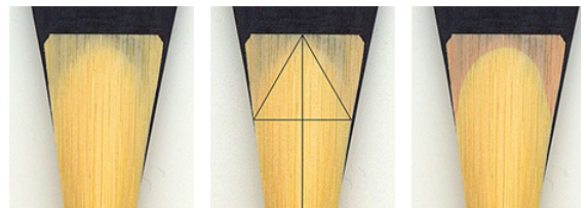


Nun werden alle Zwingen nachgezogen, die hinterste stark gekürzt und schliesslich der (Faden-)Wickel gemacht.



Der letzte und bei weitem schwierigste Teil des Rohrbaus ist das Schaben oder Schleifen. Es braucht viel Übung und Erfahrung, bis man seine Rohre so herrichten kann, dass man mit ihnen zufrieden ist. Die folgenden Abbildungen zeigen ungefähr den Bereich, den man relativ dünn schaben muss, damit das Rohr optimal schwingen kann.

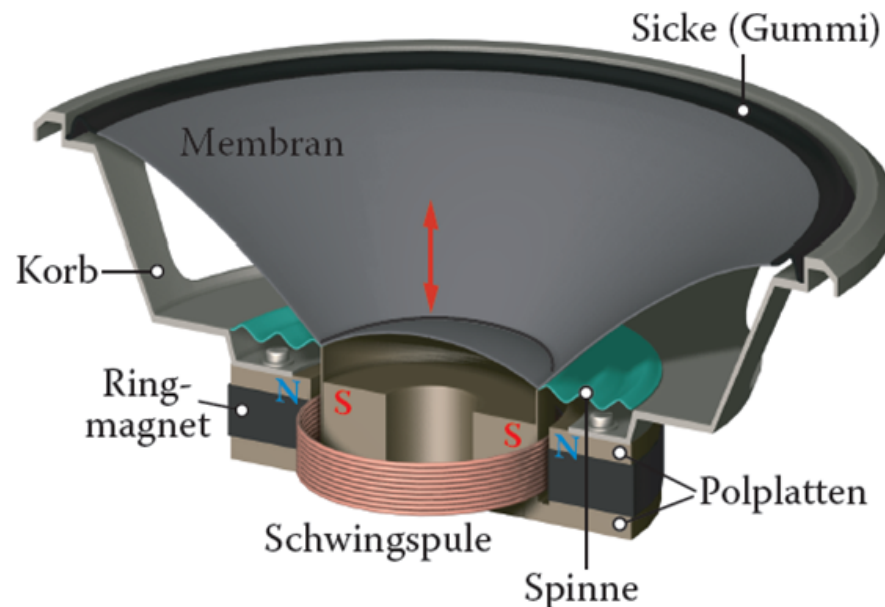
Ganz links: Original



Mrz 4-16:19

Auf ähnliche Weise entstehen Schallwellen in einem Lautsprecher. Ein elektrodynamischer *Lautsprecher* besteht aus einer trichterförmigen Membran, die im Takt des Tons längs ihrer Symmetrieachse hin und her bewegt wird, bei einem 1000-Hertz-Ton z.B. 1000-mal pro Sekunde. Diese Membran ist fest mit einer Spule verbunden, welche in einen Dauermagnet taucht. Schicken wir einen periodisch veränderlichen elektrischen Strom durch diese Spule, so

wirkt eine Lorentzkraft und bewegt sie samt Membran längs der Symmetrieachse nach vorn oder nach hinten und erzeugt in der umgebenden Luft kleine Druckänderungen Δp bzw. Dichteänderungen $\Delta \rho$, die sich als Schallwellen ausbreiten (Figur 43).



Figur 43 dynamischer Lautsprecher

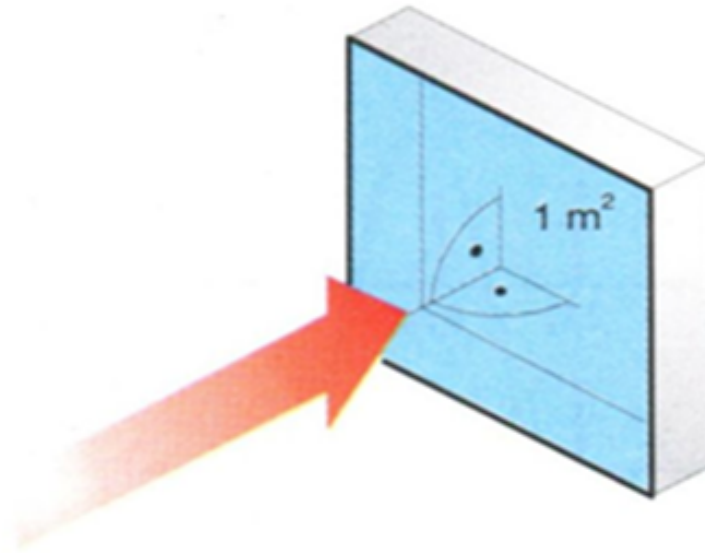
Bewegen wir die Membran eines Lautsprechers im Takt eines Sinustons längs seiner Symmetrieachse hin und her, so wird der Lautsprecher zum *Mikrofon*. In der Tauchspule wird dann ein elektrisches Signal induziert, welches dem Schallsignal entspricht.

dB(A)	
170	Sturmgewehr
160	Pistole 9mm
150	Bolzensetzgerät
140	Jetprüfstand
130	Schmerzschwelle
120	Pneumatischer Bohrjumbo
110	Motorkettensäge
100	Diskotheek
90	Fräsmaschine
80	Strassenverkehr
70	Unterhaltung
60	Büro
50	Wohnzimmer
40	Leseraum
30	Schlafzimmer
20	Radiostudio
10	
0	Hörschwelle

**Der
Schalldruckpegel
ist ein Mass für
die Lautstärke
von
Schallquellen**

$$10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Mrz 4-15:52



Zur Definition der Schallintensität. Der rote Pfeil versinnbildlicht jene Schallenergie, die pro Sekunde in senkrechter Richtung durch einen Quadratmeter tritt.

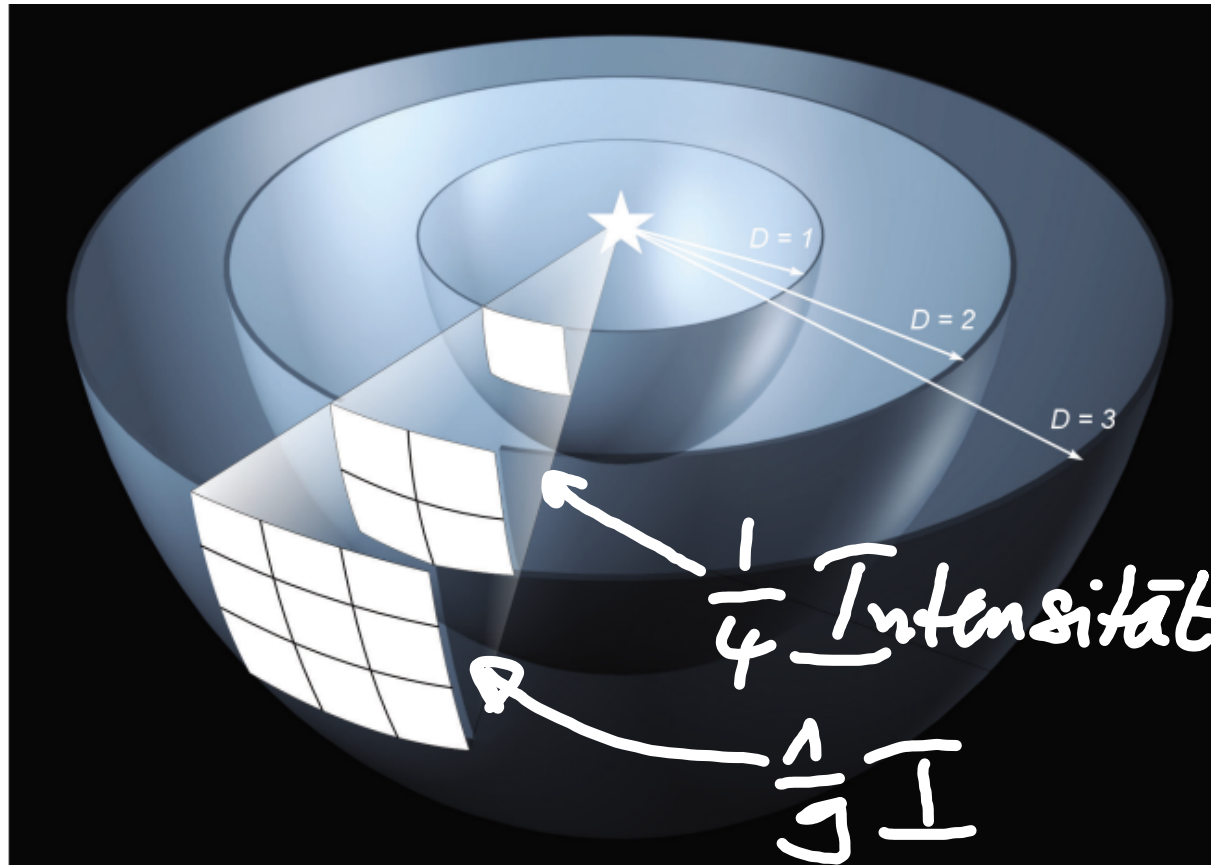


Abbildung 5: Intensität des Lichts

Diese Zeichnung beschreibt, wie der gleiche Betrag von Strahlung von einer Lichtquelle eine immer größer werdenden Fläche beleuchten muss, wenn die Entfernung von der Lichtquelle wächst. Die Fläche wächst mit dem Quadrat der Entfernung von der Quelle, folglich vermindert sich die Intensität pro Flächeneinheit verkehrt proportional zum Quadrat der Entfernung.

Schallintensität in W/m^2 :

$$\text{Schallintensität} = \frac{\text{Schallleistung}}{\text{Fläche}} = \frac{P_s}{A} = \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

Wieviel Schall-Energie geht pro Sekunde durch einen m^2 Fläche?

Lautstärke in Dezibel dB:

Gebräuchlich ist die Angabe des Betrags der Schallintensität als Schallintensitäts~~pegel~~ L_I in

Dezibel (dB):

$$L_I = 10 \log \left(\frac{|\vec{I}|}{I_0} \right) \text{ dB}$$

mit dem genormten Bezugswert $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$.

Lautsprecher:

130dB in 1m Abstand

Intensität?

$$\text{solve}\left(130=10\cdot\log_{10}\left(\frac{x}{10^{-12}}\right),x\right)$$

$$x=9.999999999999$$

In 4m Abstand: dB?

$$=10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$I \rightarrow \frac{1}{16} I$$

$$L_I = 10 \log \left(\frac{|\vec{I}|}{I_0} \right) \text{ dB}$$

$$L_1 = 118 \text{ dB}$$

$$I_0 = 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$\frac{I_1}{L_1} \quad \frac{I_2}{L_2} = 2 \frac{I_1}{L_1}$$

$$\Delta L = L_2 - L_1$$

$$= 10 \cdot \left(\log \frac{2I}{I_0} - \log \frac{I}{I_0} \right)$$

$$= 10 \cdot \left\{ \log 2I - \cancel{\log I_0} - (\log I - \cancel{\log I_0}) \right\}$$

$$= 10 \cdot (\log 2I - \log I)$$

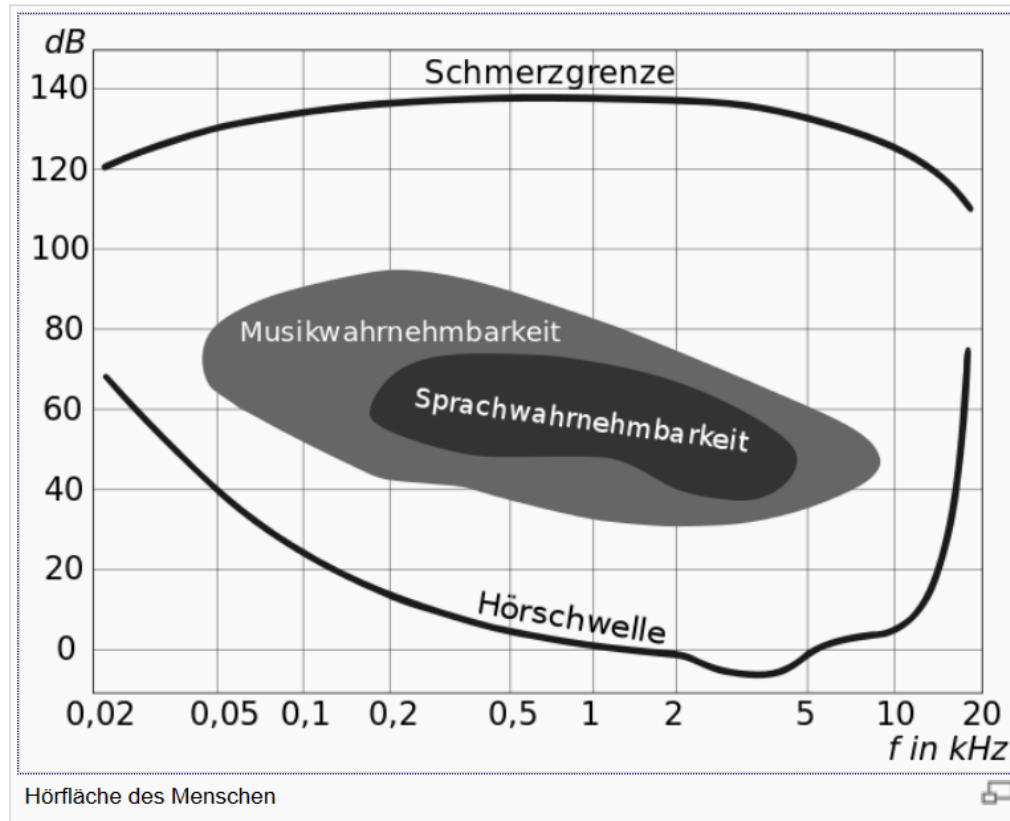
$$= 10 \cdot \left(\log \frac{2I}{I} \right) = 10 \cdot \log 2$$

$$\Delta L = L_2 - L_1 = \underline{\underline{3 \text{ dB}}}$$

$$\log(u \cdot v) = \log u + \log v$$

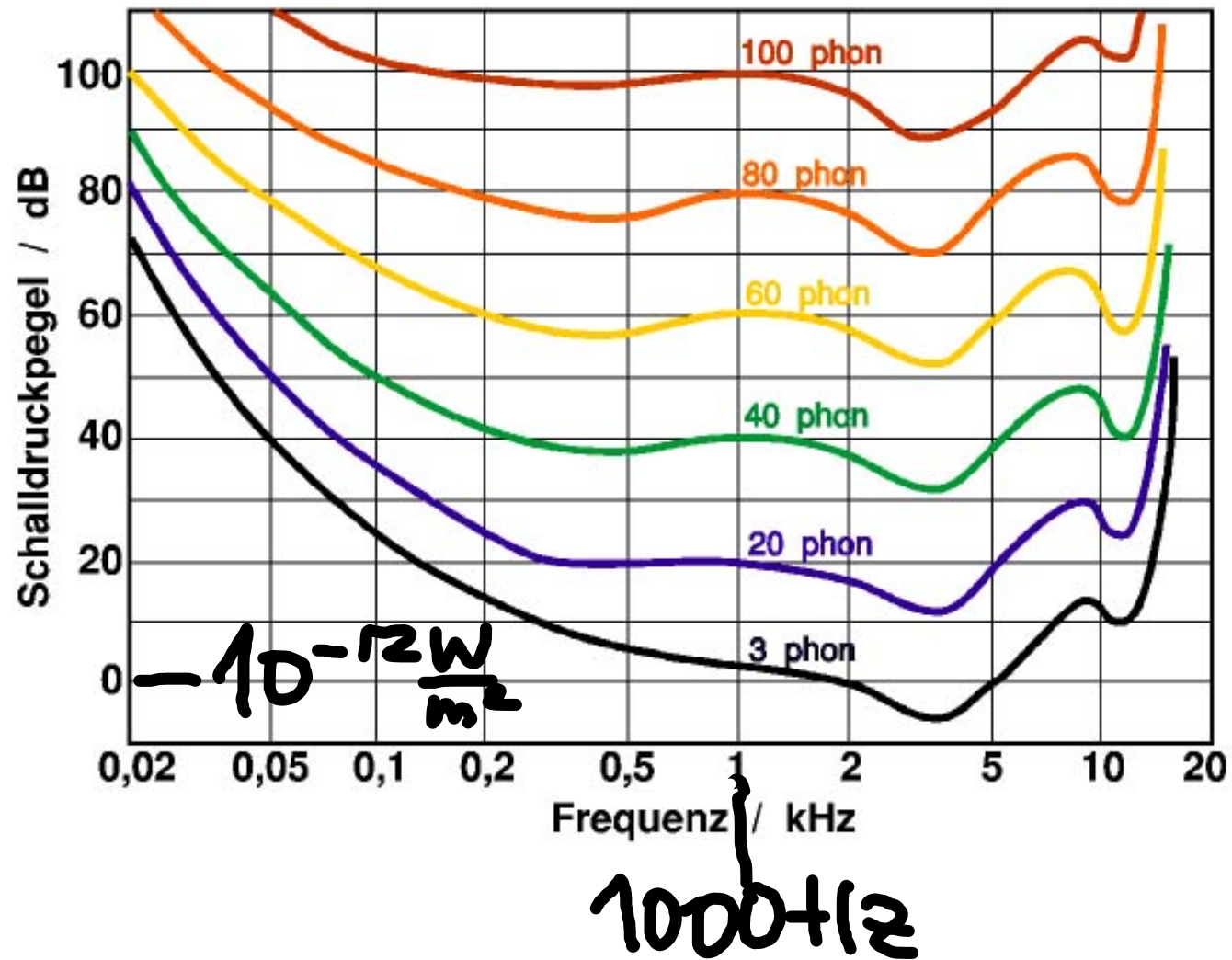
$$\log \frac{u}{v} = \log u - \log v$$

$$\log u^v = v \cdot \log u$$



Mrz 10-14:54

Der Lautstärkepegel ist ein psychoakustisches Vergleichsmass, das beschreibt, welchen Schalldruckpegel ein **Sinuston** mit einer **Frequenz** von 1000 Hz haben müsste, damit dieser Ton genauso laut empfunden wird, wie das betrachtete **Hörereignis**. Bei einer Schall-Frequenz von 1000 Hz stimmen Schalldruckpegel, gemessen in **Dezibel**, und Lautstärkepegel, gemessen in **Phon**, überein. Für Sinustöne anderer Frequenzen sowie für komplexe Schallereignisse sind dagegen andere Schalldruckpegel erforderlich, um den gleichen Lautstärkeindruck zu erzielen. Welcher Schalldruckpegel für einen Einzelton bei welcher Frequenz erforderlich ist, um jeweils den gleichen Lautstärkeindruck zu erzielen, ist in den "Kurven gleicher Lautstärkepegel" (Isophone) beschrieben. Die Kurven gleicher Lautstärkepegel sind festgehalten in DIN 45630 Blatt 2 und der ISO R 226 von 1961; siehe auch ältere Abbildung. Im Jahr 2003 wurde eine überarbeitete Version der Norm (ISO 226:2003) vorgelegt, in der die Kurven auf Basis der Forschungsergebnisse der vergangenen 20 Jahre neu festgelegt wurden.



Situation und Schallquelle	Schalldruck p Pascal	Schalldruck- pegel L_p dB re 20 μPa
Schmerzschwelle	100 Pa	134 dB
Gehörschäden bei kurzfristiger Einwirkung	20 Pa	ab 120 dB
Düsenflugzeug 100 m entfernt	6,3–200 Pa	110–140 dB
Presslufthammer, 1 m entfernt / Diskothek	2 Pa	~ 100 dB
Gehörschäden bei langfristiger Einwirkung	0,36 Pa	ab 85 dB
Hauptverkehrsstraße, 10 m entfernt	0,2–0,63 Pa	80–90 dB
Pkw, 10 m entfernt	0,02–0,2 Pa	60–80 dB
Fernseher in 1 m Zimmerlautstärke	0,02 Pa	ca. 60 dB
Normale Unterhaltung, 1 m entfernt	$2 \cdot 10^{-3}$ – $6,3 \cdot 10^{-3}$ Pa	40–50 dB
Sehr ruhiges Zimmer	$2 \cdot 10^{-4}$ – $6,3 \cdot 10^{-4}$ Pa	20–30 dB
Blätterrauschen, ruhiges Atmen	$6,3 \cdot 10^{-5}$ Pa	10 dB
Hörschwelle bei 2 kHz	$2 \cdot 10^{-5}$ Pa	0 dB

Zwei Klänge werden als wohlklingend (konsonant) empfunden, wenn sie viele gemeinsame Obertöne besitzen. Andernfalls sind die Klänge misstönend (dissonant).

Eine Saite kann auf vielerlei Arten zum Schwingen angeregt werden. Sie kann gezupft, mit einem Hammer geschlagen oder mit einem Bogen gestrichen werden.

Weil die Saite nur längs einer Linie die Luft zum Schwingen anregen kann und diese Schwingungen durch destruktive Interferenz einander grösstenteils auslöschen, ist eine Saite eine sehr schlechte Schallquelle. Man führt deshalb bei der Violine die gespannte Saite über einen Steg, der die Schwingungen auf die Geige überträgt. Diese gibt mit ihrer grossen Oberfläche die Schwingungen in verstärktem Mass an die umgebende Luft weiter, so dass deutlich wahrnehmbare Töne entstehen.

In den Pfeifen wiederum wird eine Luftsäule zu Schwingungen angeregt. Zwei Pfeifentypen finden bei den Musikinstrumenten vorwiegend Verwendung: die Zungenpfeife und die Lippenpfeife.

Bei den *Zungenpfeifen* wird die Luft durch einen schmalen Schlitz geblasen, der von einer Metallzunge fast völlig abgedeckt wird. Durch den Luftstrom kommt die Zunge in Schwingung und verschliesst in periodischer Folge mit der ihr eigenen Frequenz den Schlitz. Dadurch wird der Luftstrom periodisch unterbrochen und die Luftsäule zu Schwingungen angeregt. Zungenpfeifen werden im Harmonium, in der Mundharmonika, in der Klarinette, in der Oboe und im Fagott verwendet.

Bei der *Lippenpfeife* wird die Luft durch einen schmalen Spalt gegen eine Kante, die Lippe, geblasen. An beiden Seiten des Luftstrahls bilden sich Wirbel, die gegeneinander versetzt sind und teils in die Pfeife eintreten, teils aussen entlanglaufen. Dadurch gerät die Luftsäule im Pfeifenrohr in Schwingung und steuert nun ihrerseits den Rhythmus der Wirbelablösung (Rückkopplungsmechanismus!). Lippenpfeifen finden als Orgelpfeifen, aber auch in der Block- und in der Querflöte Verwendung.

4. Die Lautstärke

a) Definition der Lautstärke

Die Lautstärke, mit der ein Ton von uns empfunden wird, ist abhängig von der Energie, welche die Schallwelle pro Sekunde an unser Ohr transportiert. Ein geeignetes Mass, mit dem sich dieser Energietransport beschreiben lässt, ist die Schallintensität.

Unter der Schallintensität I versteht man jene Schallenergie, die pro Sekunde in senkrechter Richtung durch einen Quadratmeter tritt.

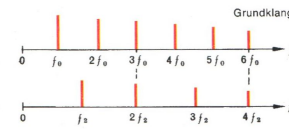
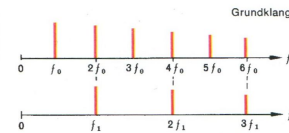
Die Einheit der Schallintensität ist daher 1 W/m^2 .

Als physikalische Messgrösse definiert man:

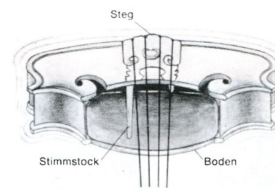
$$\text{Schallpegel } L = 10 \cdot \lg \frac{I}{10^{-12} \text{ W/m}^2}$$

Die dimensionslose Einheit des Schallpegels ist das Dezibel (dB).

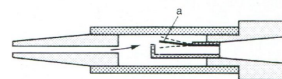
zum Nachlesen:



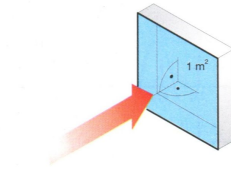
Die Obertöne der Oktave fallen mit den Obertönen des Grundklangs zusammen. Die Obertöne der Quinte fallen teilweise mit den Obertönen des Grundklangs zusammen. Die Konsonanz ist schlechter.



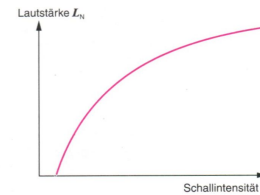
Bei der Violine werden die Schwingungen der Saiten durch den «Steg» und durch den «Stimmstock» auf den Geigenkörper übertragen, der mit seiner grossen Oberfläche die umgebende Luft in kräftige Schwingungen versetzt.



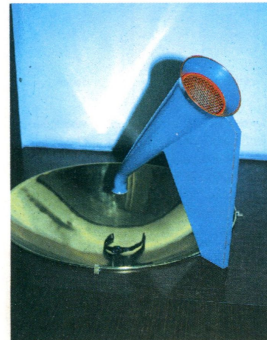
a) offene Zungenpfeife
b) offene Lippenpfeife
a Zunge, b Spalt, c Schneide, d Maulweite.



Zur Definition der Schallintensität. Der rote Pfeil versinnbildlicht jene Schallenergie, die pro Sekunde in senkrechter Richtung durch einen Quadratmeter tritt.



Das Fechnersche Gesetz. Die Lautstärke ist näherungsweise dem Logarithmus der Schallintensität proportional.

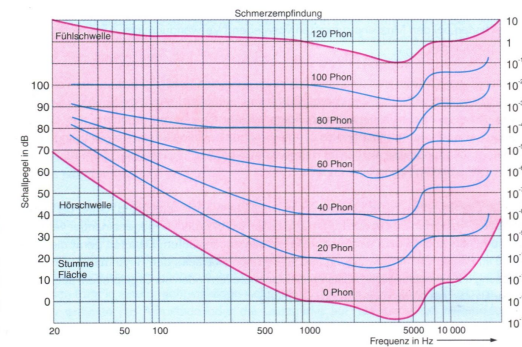


V: Der Trichter verstärkt das Ticken der Uhr.

Das menschliche Ohr ist aber für verschiedene Frequenzen verschieden empfindlich. Misst man die Schallintensität, die notwendig ist, um Töne verschiedener Frequenzen als «gleich laut» zu hören, erhält man Kurven gleicher Lautstärke (siehe nachfolgende Abbildung). Die kleinste Schallintensität, welche das Ohr eben noch wahrzunehmen vermag (Hörschwelle), liegt z. B. bei 1000 Hz bei 10^{-12} W/m^2 (also 0 dB), bei 20 Hz ist die 10^7 -fache Intensität notwendig (10^{-5} W/m^2 , 70 dB).

Die Dezibel-Skala hat also für physiologische Zwecke einen schwerwiegenden Nachteil. Töne verschiedener Frequenz, denen die gleichen Dezibel-Werte zugeordnet sind, erscheinen dem Menschen verschieden laut.

Um diesem Übelstand abzuhelfen, hat man als subjektives Mass die Lautstärke L_N mit der Einheit Phon (phon) eingeführt. Die Lautstärke stimmt bei 1000 Hz mit der Dezibelskala überein. Für andere Frequenzen hingegen wird die Phonzahl durch Hörvergleich mit einem 1000-Hz-Ton bekannter Lautstärke bestimmt. Töne gleicher Phonzahl sind daher stets gleich laut.



Eine Erhöhung der Intensität um den Faktor 10 bewirkt (bei 1000 Hz exakt, sonst näherungsweise) eine Vergrößerung der Phonzahl um 10 – es besteht ein logarithmischer Zusammenhang. Dies wird als *Weber-Fechnersches Gesetz* bezeichnet und gilt als Näherung auch für andere Reizempfindungen, z. B. die Wahrnehmung der Lichtstärke.

I in 10^{-12} W/m^2	L_N in Phon*	Beispiel
1	0	Hörschwelle
100	20	Flüstersprache
10 000	40	Unterhaltungssprache
1 000 000	60	Schreibmaschinengeklapper
100 000 000	80	Motorrad mit Schalldämpfer
10 000 000 000	100	Motorrad ohne Schalldämpfer
1 000 000 000 000	120	Flugzeugmotor in 4 m Abstand
10 000 000 000 000	130	Schmerzschwelle

Bei Lärmessungen ist es wichtig, die Empfindlichkeit des Messgerätes ungefähr an jene des Ohres anzupassen. Deshalb werden Schallpegelmessger mit Filtern («Filter A» für geringe, «Filter B» für hohe und «Filter C» für sehr hohe Lautstärken) ausgestattet. Der so gemessene «bewertete Schallpegel» L_A , L_B , L_C gibt zumindest ungefähr die Lautstärke L_N wieder und wird in dB (A), dB (B) bzw. dB (C) angegeben.

* L_N in Phon bezieht sich auf 1000 Hz.

20. Das freie Ende eines ausgespannten Seiles wird mit einer Frequenz von 4 Hz auf und ab bewegt. Es bildet sich eine stehende Welle aus. Der Abstand zweier benachbarter Knoten beträgt 1,60 m.
- a) Wie gross ist die Wellenlänge der einlaufenden Welle?
 - b) Wie gross ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit dieser Welle?

Schallwellen und Akustik

- 21. Ein Arbeiter schlägt schräg von oben mit dem Hammer auf das Ende einer langen Eisenschiene. Wieviele Schläge hört ein am anderen Ende stehender Arbeiter, wenn ein eventuelles Echo ausser Betracht bleibt?
- 22. Wie kann man an der Zeit, die zwischen Blitz und Donner liegt, die Entfernung eines Gewitters abschätzen?
- 23. Auf der Meeresoberfläche wird eine Sprengladung gezündet. Wie weit ist der Beobachter vom Explosionszentrum entfernt, wenn sich die Laufzeiten des Schalles in Luft und Wasser um 12 Sekunden unterscheiden?
- 24. Die Schallwellen, die durch Sprache oder Musik hervorgerufen werden, liegen in einem Frequenzbereich von 50 bis 5000 Hz. Welchem Wellenlängenbereich entspricht dies
 - a) in Luft ($c = 340 \text{ m/s}$), b) in Wasser ($c = 1480 \text{ m/s}$)?
 Welche Wellenlängen ergeben sich insbesondere für 440 Hz?
- 25. Eine Lochscheibe hat 30 Löcher in einer Reihe und macht 12 bzw. 15 bzw. 18 Umdrehungen pro Sekunde. Welche Frequenzen haben die entstehenden Töne, und welche Intervalle bilden sie?
- 26. Das Ohr kann bei 3000 Hz noch eine Schallintensität von ca. 10^{-11} W/m^2 wahrnehmen. Wie weit könnte man demnach eine Schallquelle dieser Frequenz hören, wenn die Quelle mit 1,26 Watt Leistung Kugelwellen aussendet und der Schall von der Luft nicht absorbiert würde?

20. a) $\lambda = 3,2 \text{ m}$, b) $c = 12,8 \text{ m/s}$.

21. Weil die longitudinale Schallwelle schneller läuft als die transversale Schallwelle, hört man am Ende der Eisenschiene zwei Schläge. Hinzu kommt noch der Schall durch die Luft.

22. $c \approx \frac{1}{3} \text{ km/s} \rightarrow \text{Entfernung in km} = \text{Zahl der Sekunden dividiert durch drei.}$

23. $c_L \cdot t_L = c_W \cdot t_W \quad \left. \begin{array}{l} t_L - t_W = \Delta t \end{array} \right\} \rightarrow \begin{cases} t_L = c_W \cdot \Delta t / (c_W - c_L), \\ t_W = c_L \cdot \Delta t / (c_W - c_L), \end{cases}$

$s = \frac{c_W \cdot c_L}{c_W - c_L} \cdot \Delta t \approx 5300 \text{ m.}$

24.

	50 Hz	440 Hz	5000 Hz
λ (Luft)	6,8 m	0,73 m	0,068 m = 6,8 cm
λ (Wasser)	29,6 m	3,36 m	0,296 m = 29,6 cm

25. $f_1 = 360 \text{ Hz}$, $f_2 = 450 \text{ Hz}$, $f_3 = 540 \text{ Hz}$.

$f_2/f_1 = 5/4$ (Terz), $f_3/f_1 = 3/2$ (Quint).

Die Töne bilden einen Dur-Dreiklang.

26. $1,26 \text{ W} = 4 \pi R^2 \text{ m}^2 \cdot 10^{-11} \text{ W/m}^2 \rightarrow R = 100 \text{ km.}$

27. Ruhende Quelle – bewegter Beobachter:

$2f_Q = f_Q \cdot (1 + v_B/c) \rightarrow v_B = c.$

Ruhender Beobachter – bewegte Quelle:

$2f_Q = f_Q / (1 - v_Q/c) \rightarrow v_Q = c/2.$

28. Annäherung: $f_B' = f_Q / (1 - v_Q/c)$
 Entfernung: $f_B'' = f_Q / (1 + v_Q/c)$ $\left. \begin{array}{l} \end{array} \right\} f_B' / f_B'' = 2 \rightarrow v_Q = c/3.$

29. Annäherung: $f_B' = f_Q / (1 - \omega r/c) = 456,9 \text{ Hz}$,

Entfernung: $f_B'' = f_Q / (1 + \omega r/c) = 424,3 \text{ Hz}.$

Mrz 10-15:36

Bewegte Wellenquelle, bewegter Wellenempfänger: Der Dopplereffekt

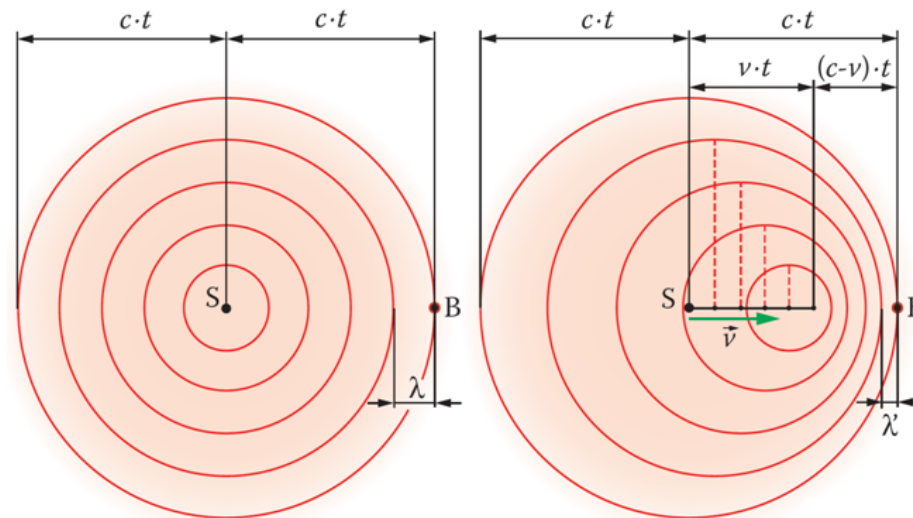
Fährt ein hupendes Auto oder ein Ambulanzfahrzeug mit Sirene an uns vorbei, so nehmen wir diesen Ton höher, also mit größerer Frequenz wahr, wenn sich dieses Fahrzeug auf uns zu, als wenn es sich von uns weg bewegt. Dieses Phänomen bezeichnen wir in der Physik als Doppler-Effekt, nach dem österreichischen Physiker und Mathematiker Christian Doppler, der ihn 1842 voraussagte.

Wir wollen nun diese Veränderungen der Tonhöhe (Frequenz) von bewegten Schallquellen berechnen. Dabei unterscheiden wir zwei Fälle:

- Die Beobachterin ist in Ruhe, die Schallquelle bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit.
- Die Schallquelle ist in Ruhe, der Beobachter bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit.

Wir gehen von einer Schallquelle, etwa der Sirene eines fahrenden Ambulanzfahrzeugs, aus, das einen Sinuston und in der umgebenden Luft eine Schallwelle der Frequenz $f=1000\text{ Hz}$ (Schwingungsdauer 1 Millisekunde) erzeugt, die sich mit Schallgeschwindigkeit ($c \approx 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$)

+



Figur 48 Dopplereffekt: ruhende Beobachterin

links; ruhende, rechts bewegte Schallquelle

ausbreitet. Für das ruhende Fahrzeug beträgt dann die Wellenlänge

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{340}{1'000} \text{ m} = 34 \text{ cm}$$

(Figur 48, links).

Eine ebenfalls ruhende Beobachterin auf der Strasse nimmt diesen Ton mit einer gewissen Zeitverzögerung aber mit derselben Frequenz wahr, weil pro Millisekunde *ein* Wellenberg, das heißt *eine* Verdichtung der Luft auf ihr Ohr trifft und als Schallereignis wahrgenommen wird.

In *einer* Sekunde also 1000 solche Schallereignisse. Dies entspricht einer Tonhöhe (Frequenz) von 1000 Hertz.

Die Situation ändert sich aber, sobald sich das Fahrzeug auf die Beobachterin zu bewegt (Figur 48, rechts). Hat das Fahrzeug beispielsweise eine Geschwindigkeit $v = 40 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, so verkürzt sich die Wellenlänge um diejenige Wegstrecke, die das Fahrzeug während einer Schwingungsdauer $T=1 \text{ ms}$ des Sirenentons zurücklegt, nämlich um

$\Delta s = v \cdot T = \frac{v}{f} = \frac{14}{1'000} \text{ m} = 4 \text{ cm}$. Die effektive Wellenlänge am Ort der ruhenden

Beobachterin beträgt dann nur noch $\lambda' = 30 \text{ cm}$, die wahrgenommene Frequenz des Tons

$$f' = \frac{c}{\lambda'} = \frac{340}{0.30} \text{ Hz} \approx 1'133 \text{ Hz}$$



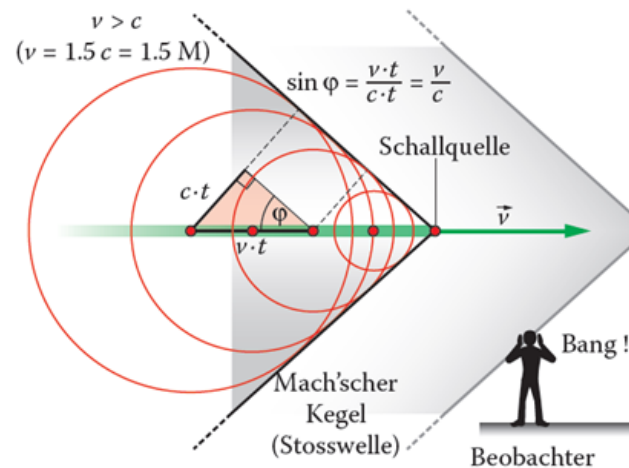
Dopplereffekt: Bewegte Schallquelle, ruhende Beobachterin

$$\lambda' = (c \pm v) \cdot T = \frac{c \pm v}{f} = \lambda \pm \frac{v}{f} \quad \text{oder} \quad f' = \frac{c}{\lambda'} = f \cdot \frac{c}{c \pm v}$$

Schallgeschwindigkeit c bleibt konstant, Wellenlänge λ und Frequenz f verändern sich.



Figur 49 Überschallflug und Mach'scher Kegel



Bewegt sich die Schallquelle mit Schallgeschwindigkeit oder schneller, so addieren sich die Wellenberge vieler Schallwellen zu einer Stoßwelle, einem Verdichtungsstoß, der als lauter Knall, den Überschallknall wahrgenommen wird.

Ein Überschallknall entsteht, wenn ein Flugzeug schneller fliegt als der Schall. Dann bleiben seine Schallwellen zurück und bilden den charakteristischen Mach'schen Kegel (Figur 49, rechts).

Bewegt sich ein Beobachter auf eine Schallquelle zu, so verändert sich die Zeit T die zwischen zwei wahrgenommenen Druckmaxima der Schallwelle verstreicht. Für diesen Fall gelten folgende Beziehungen:

Dopplereffekt: Ruhende Schallquelle, bewegter Beobachter

ruhender Beobachter $T = \frac{\lambda}{c} = \frac{1}{f}$

bewegter Beobachter $T' = \frac{\lambda}{c \pm v} = \frac{1}{f'}$ bzw. $f' = \frac{c \pm v}{\lambda} = \frac{f}{c} \cdot (c \pm v) = f \cdot \left(1 \pm \frac{v}{c}\right)$

Wellenlänge λ bleibt konstant, Schallgeschwindigkeit c und Frequenz f verändern sich.

In der Ultraschalldiagnostik der Medizin wird der Dopplereffekt zur Messung der Fließgeschwindigkeit des Bluts und zur Diagnose von Gefäßverengungen eingesetzt.

Dopplerradarsysteme werden von der Verkehrspolizei zur Messung der Geschwindigkeit von Fahrzeugen, in der Meteorologie zur Erfassung von Niederschlagsgebieten und zur Messung der Geschwindigkeitsverteilung der Schneemassen innerhalb von Lawinen eingesetzt.

- + 27. Wie schnell muss sich ein Beobachter zur ruhenden Schallquelle hinbewegen, um eine Frequenzverdopplung festzustellen? Wie schnell muss sich die Quelle auf den ruhenden Beobachter zu bewegen, damit derselbe Effekt eintritt?
- + 28. Wie rasch müsste sich eine Schallquelle bewegen, damit für einen ruhenden Beobachter der Ton beim Vorbeifahren um eine Oktav tiefer wird?
- 29. Am Rande einer Kreisscheibe ($r = 40 \text{ cm}$) ist eine Schallquelle befestigt, die einen Ton der Frequenz $f_Q = 440 \text{ Hz}$ aussendet. Zwischen welchen Frequenzen schwankt er für einen in der Scheibenebene in grosser Entfernung sitzenden Beobachter, wenn die Scheibe mit 5 Umdrehungen pro Minute umläuft?
- +30. Ein Zug fährt mit 72 km/h auf einen Tunnel zu und pfeift mit der Frequenz $f_Q = 500 \text{ Hz}$. Der Schall wird am Tunnelportal reflektiert.
 - a) Welche Höhe hat der direkte Ton, und welche Höhe hat das Echo für einen zwischen Zug und Tunnel stehenden Beobachter?
 - b) Welche Höhe hat der direkte Ton für diesen Beobachter, wenn der Zug vorbeigefahren ist?
 - c) Welche Höhe hat das Echo für einen Reisenden im Zug?

Anleitung:

Man kann das Echo als Pfeifton einer mit 500 Hz pfeifenden und mit 72 km/h entgegenfahrenden Lokomotive auffassen. (Pfeifton des Spiegelbildes!)

20. a) $\lambda = 3,2 \text{ m}$, b) $c = 12,8 \text{ m/s}$.

21. Weil die longitudinale Schallwelle schneller läuft als die transversale Schallwelle, hört man am Ende der Eisenschiene zwei Schläge. Hinzu kommt noch der Schall durch die Luft.

22. $c \approx \frac{1}{3} \text{ km/s} \rightarrow \text{Entfernung in km} = \text{Zahl der Sekunden dividiert durch drei.}$

$$23. \left. \begin{array}{l} c_L \cdot t_L = c_W \cdot t_W \\ t_L - t_W = \Delta t \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} t_L = c_W \cdot \Delta t / (c_W - c_L), \\ t_W = c_L \cdot \Delta t / (c_W - c_L), \end{array} \right.$$

$$s = \frac{c_W \cdot c_L}{c_W - c_L} \cdot \Delta t \approx 5300 \text{ m.}$$

24.

	50 Hz	440 Hz	5000 Hz
λ (Luft)	6,8 m	0,73 m	0,068 m = 6,8 cm
λ (Wasser)	29,6 m	3,36 m	0,296 m = 29,6 cm

25. $f_1 = 360 \text{ Hz}$, $f_2 = 450 \text{ Hz}$, $f_3 = 540 \text{ Hz}$.
 $f_2/f_1 = 5/4$ (Terz), $f_3/f_1 = 3/2$ (Quint).
 Die Töne bilden einen Dur-Dreiklang.

26. $1,26 \text{ W} = 4 \pi R^2 \text{ m}^2 \cdot 10^{-11} \text{ W/m}^2 \rightarrow R = 100$

27. Ruhende Quelle – bewegter Beobachter:
 $2f_Q = f_Q \cdot (1 + v_B/c) \rightarrow v_B = c$.
 Ruhender Beobachter – bewegte Quelle:
 $2f_Q = f_Q / (1 - v_Q/c) \rightarrow v_Q = c/2$.

28. Annäherung: $f_B' = f_Q / (1 - v_Q/c)$
 Entfernung: $f_B'' = f_Q / (1 + v_Q/c)$ $f_B' / f_B'' = 2 \rightarrow v_Q = c/3$.

29. Annäherung: $f_B' = f_Q / (1 - v/c) = 456,9 \text{ Hz}$,
 Entfernung: $f_B'' = f_Q / (1 + v/c) = 424,3 \text{ Hz}$.

30.

Direkter Ton	Echo
Annäherung: $f_B' = f_Q / (1 - v_Q/c) = 531,25 \text{ Hz}$	$\bar{f}_B' = f_Q / (1 - v_Q/c) = 531,25 \text{ Hz}$
Entfernung: $f_B'' = f_Q / (1 + v_Q/c) = 472,22 \text{ Hz}$	$\bar{f}_B'' = f_Q / (1 - v_Q/c) = 531,25 \text{ Hz}$

Echo für den Reisenden: $\bar{f} = f_Q \frac{1 + v_B/c}{1 - v_B/c} = 562,50 \text{ Hz}$.

PROGRAMM_Photonics Days 2011_1.&2. Sept.11.pdf