

Physik und Musik

Wolfgang Hillert

Physikalisches Institut, Universität Bonn

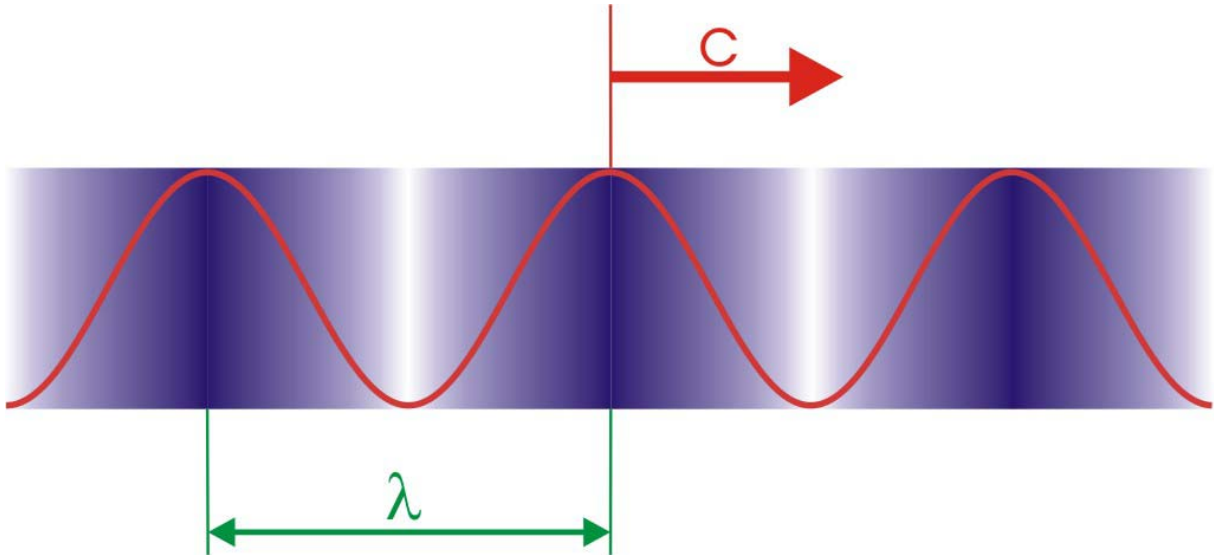
ELEKTRON-STRETCHER-ANLAGE



Inhalt:

- **Schwingungen und Wellen**
- **Spektralanalyse und Klangsynthese**
- **Tonsysteme der Musik**
- **Tonerzeugung in Musikinstrumenten**

Wellen



Phasengeschwindigkeit c hängt nicht von der Amplitude ab!

$$c = \lambda \cdot f$$

Schallgeschwindigkeit bei 20°C:

$$c = 343 \text{ m/s}$$

„Hörbarer“ Frequenzbereich:

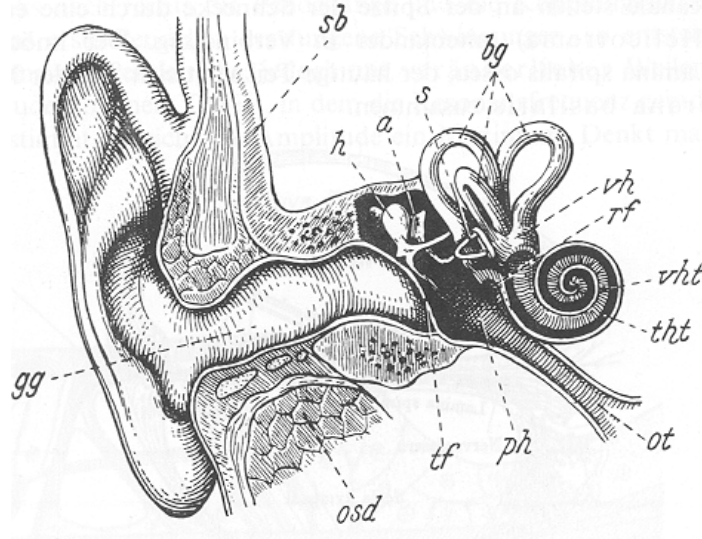
$$16 \text{ Hz} < f < 16 \text{ kHz}$$

In der Akustik relevante Wellenlängen:

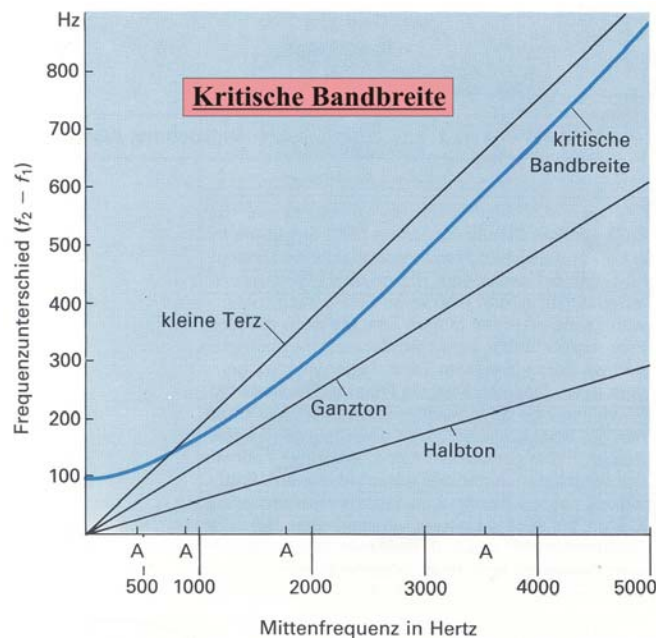
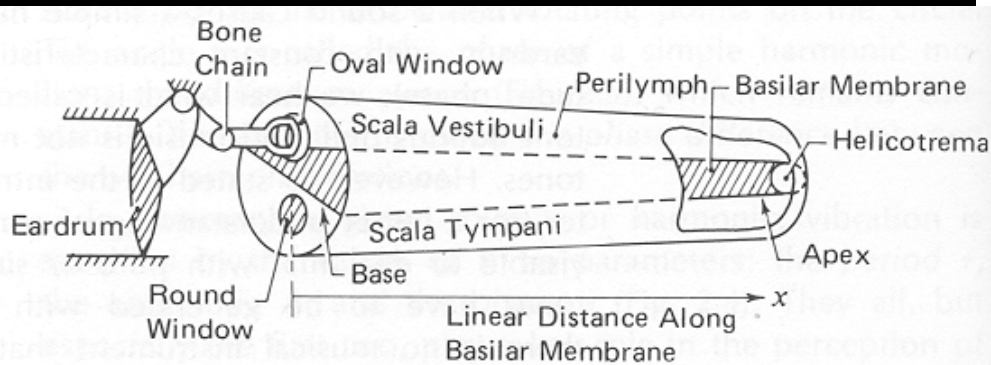
$$21 \text{ m} > \lambda > 2,1 \text{ cm}$$

Das menschliche Ohr

Querschnitt durch das Ohr:



Vereinfachte Darstellung der Basilarmembran:



Schallwellen

Schallwelle \leftrightarrow Druckschwankungen Δp :

$$p(t) = p_0 + \Delta p \cdot \sin(\omega t - kz)$$

Intensität \leftrightarrow Energieflussdichte:

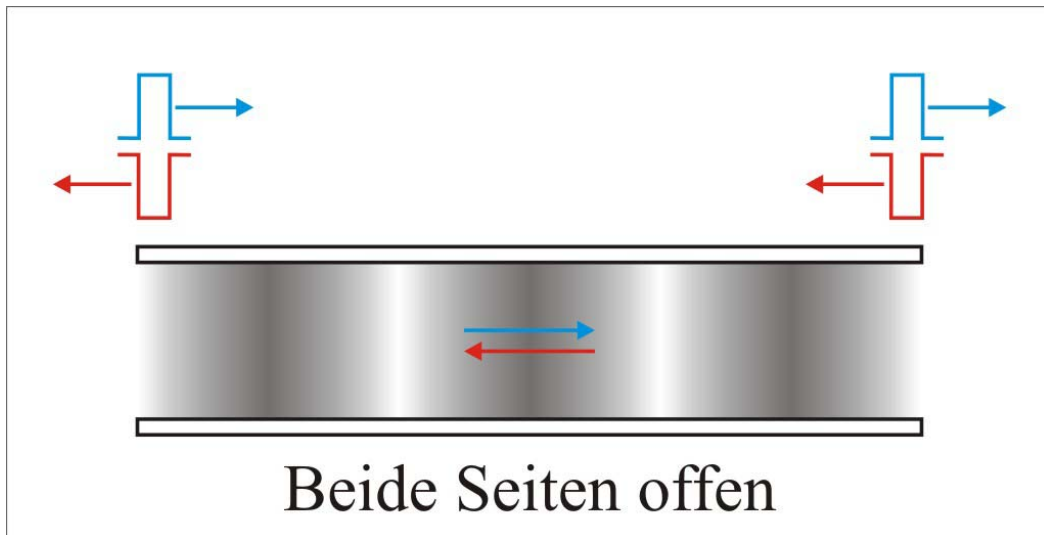
$$I = c \cdot \frac{dE}{dV} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta p^2}{\rho \cdot c}$$

Schalldruckpegel:

$$L_p = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\Delta p^2}{p_s^2} \right) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\Delta p}{p_s} \right)$$

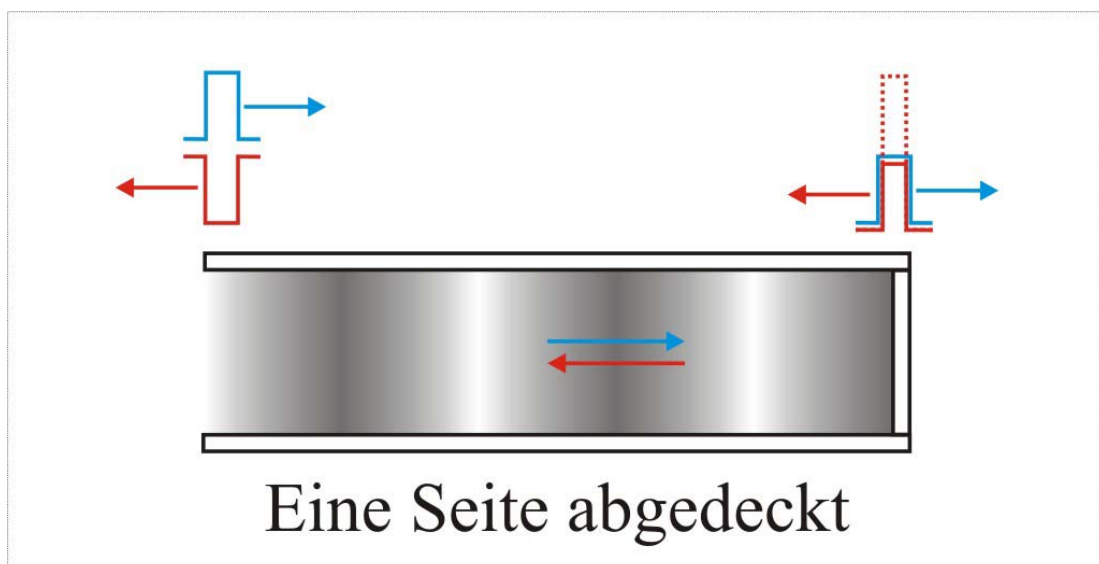
Lautstärke	Druck mbar	Intensität W / m ²	Pegel db
Schmerzgrenze	0,2	1	120
<i>fff</i>	$6,3 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	90
<i>ff</i>	$2 \cdot 10^{-3}$	10^{-4}	80
<i>f</i>	$6,3 \cdot 10^{-4}$	10^{-5}	70
<i>mf</i>	$2 \cdot 10^{-4}$	10^{-6}	60
<i>p</i>	$6,3 \cdot 10^{-5}$	10^{-7}	50
<i>pp</i>	$2 \cdot 10^{-5}$	10^{-8}	40
<i>ppp</i>	$6,3 \cdot 10^{-6}$	10^{-9}	30
Hörschwelle	$2 \cdot 10^{-7}$	10^{-12}	0

Stehende Longitudinalwellen



Am offenen Ende ändert der reflektierte Puls sein Vorzeichen!

Der resultierende Druck verschwindet!



Am geschlossenen Ende findet kein Vorzeichenwechsel statt!

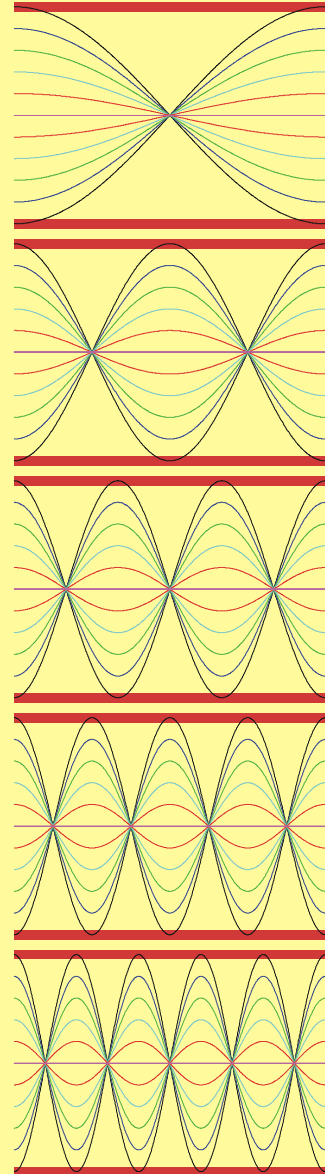
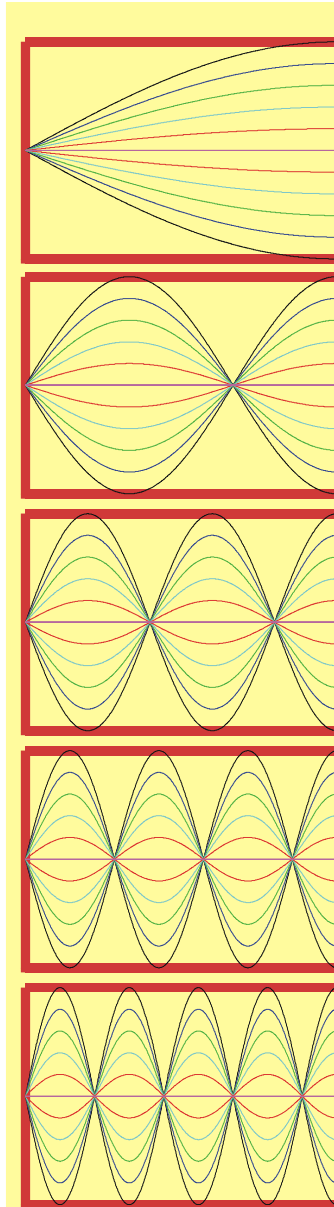
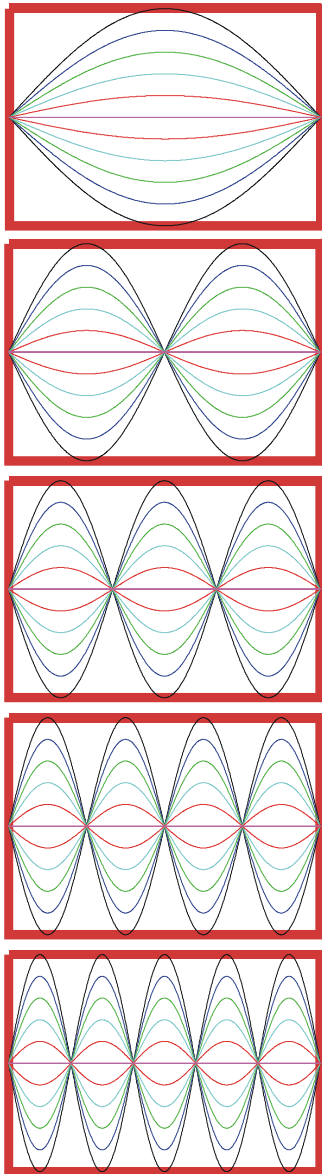
Die Druckpulse addieren sich!

Oberschwingungen

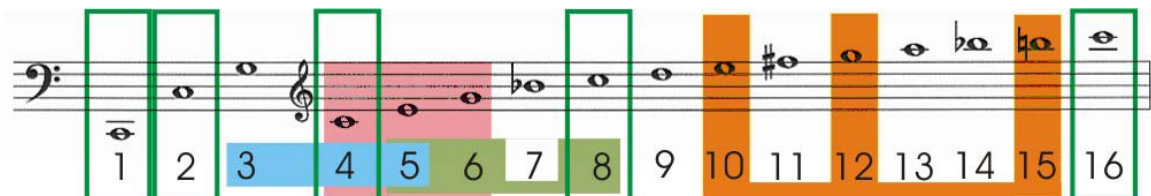
2x geschlossen

geschlossen/offen

2x offen

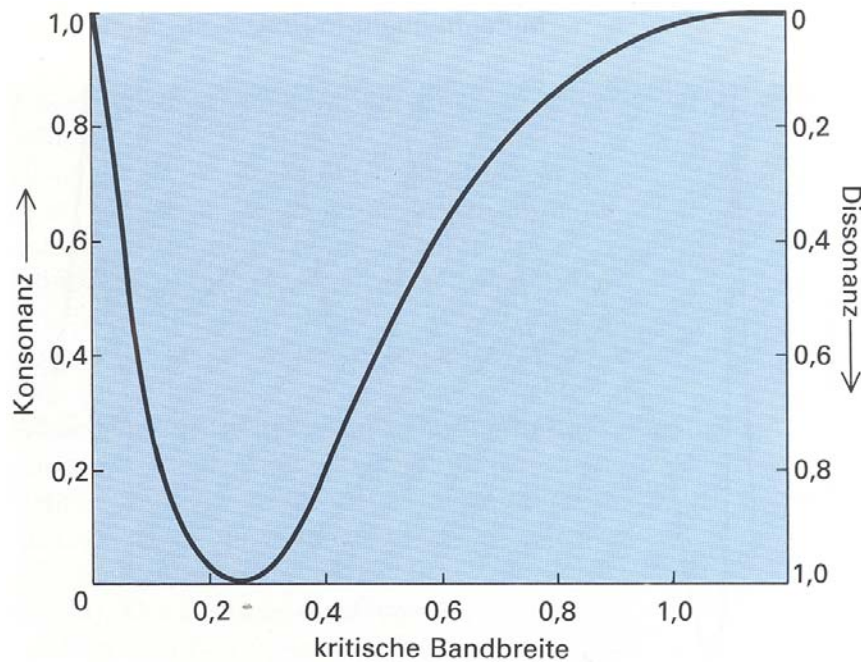


→ **Obertonreihe:**

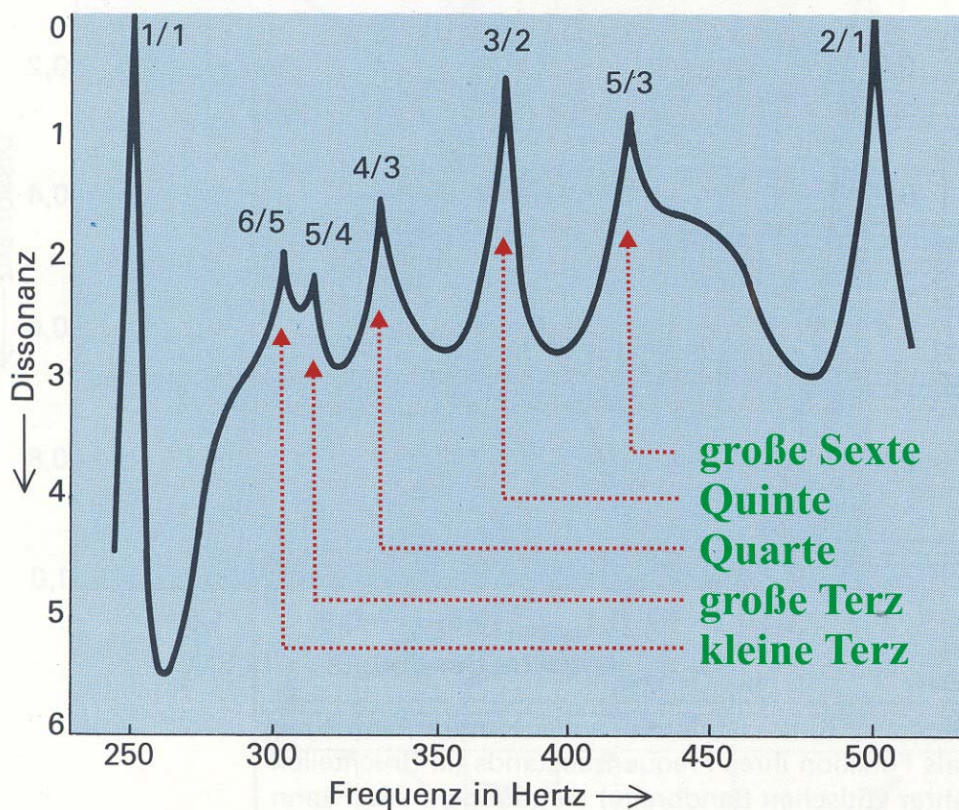


Konsonanz und Dissonanz

Konsonanz zweier Sinustöne:

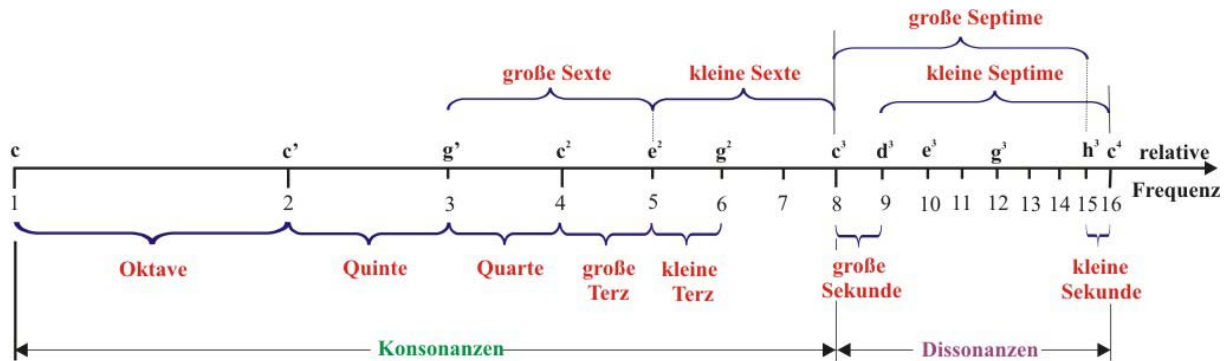


Konsonanzkurve (2 Töne aus je 6 Harmonischen):



Natürliches Tonsystem

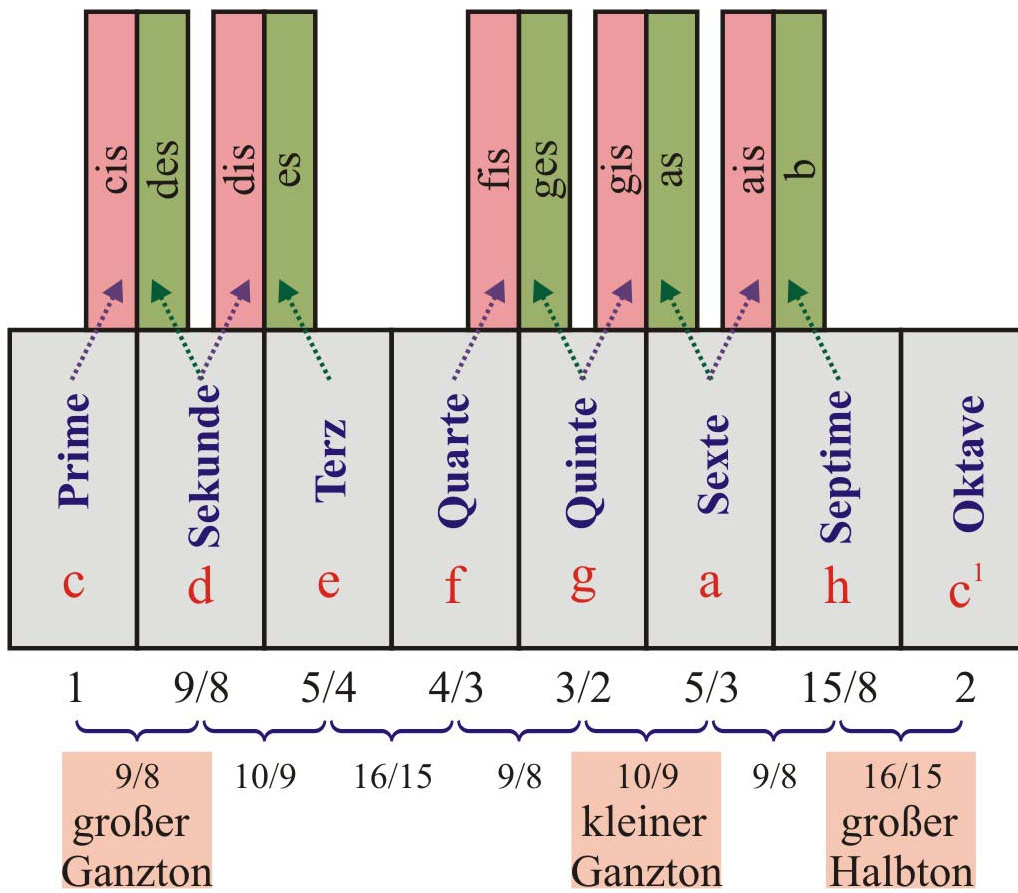
Konsonanzen und Dissonanzen:



Intervall	$f_2 : f_1$	Töne, die das Intervall bilden	
Prime	1 : 1	c – c	↑ zunehmend konsonant
Oktave	2 : 1	c – c ¹	
Quinte	3 : 2	c ¹ – g ¹	
Quarte	4 : 3	g ¹ – c ²	
große Sexte	5 : 3	g ¹ – e ²	
große Terz	5 : 4	c ² – e ²	
kleine Terz	6 : 5	e ² – g ²	
kleine Sexte	8 : 5	e ² – c ³	↓ zunehmend dissonant
kleine Septime	9 : 5	e ² – d ³	
große Sekunde	9 : 8	c ³ – d ³	
große Septime	15 : 8	c ³ – h ³	
kleine Sekunde	16 : 15	h ³ – c ⁴	

Die Tonleiter

Natürliche diatonische Tonleiter:



..... → 25/24 kleiner Halbton: $25/24 \cdot 16/15 = 10/9$

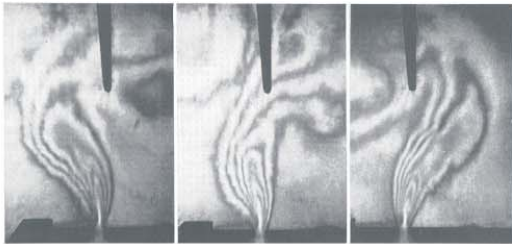
$$\frac{9}{8} - \frac{10}{9} = \frac{80}{81} \text{ "syntonisches Komma"}$$

Wohltemperierte Tonskala:

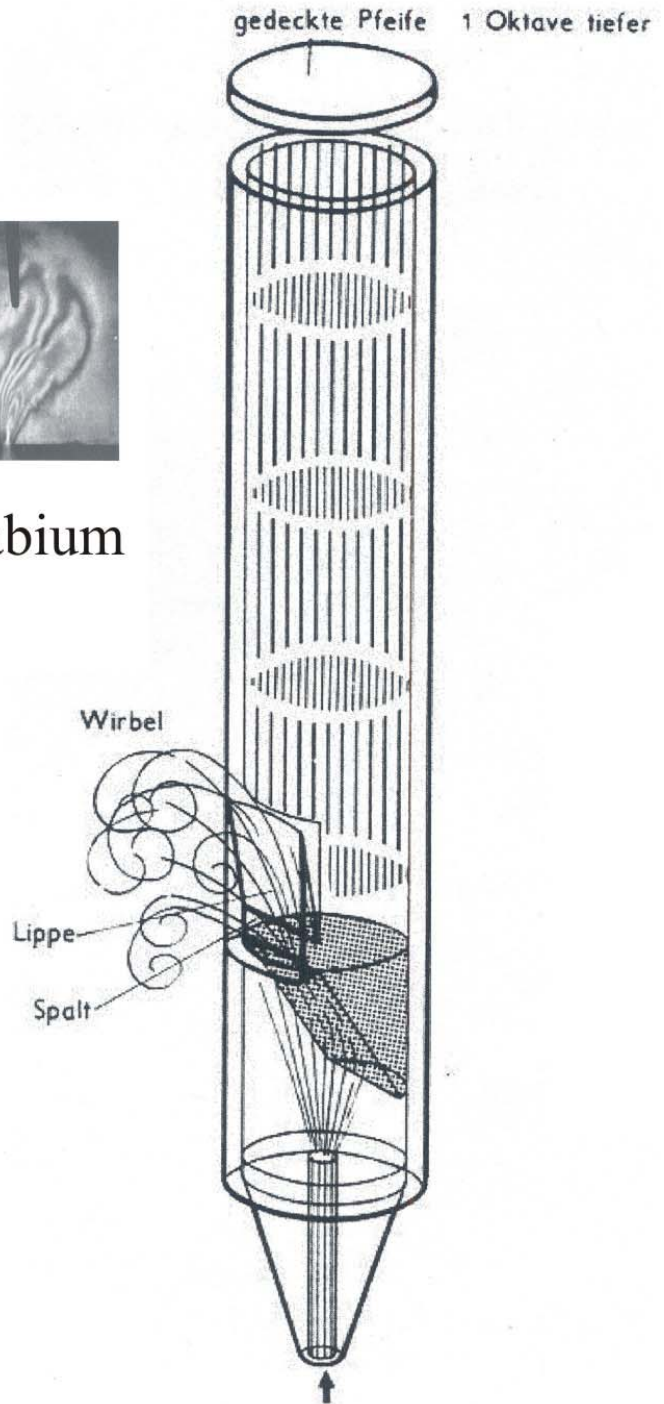
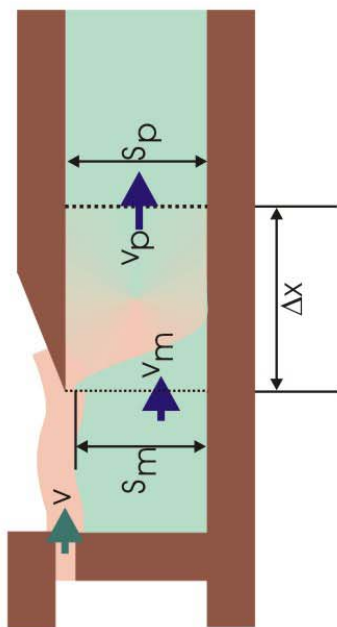
12 gleiche Halbtöne: $f_2/f_1 = \sqrt[12]{2} \approx 1,05946$

	Sekunde	Terz	Quarte	Quinte	Sexte	Septime
rein	1,125	1,25	1,33	1,50	1,667	1,875
temp.	1,1225	1,26	1,335	1,498	1,682	1,888

Resonator I



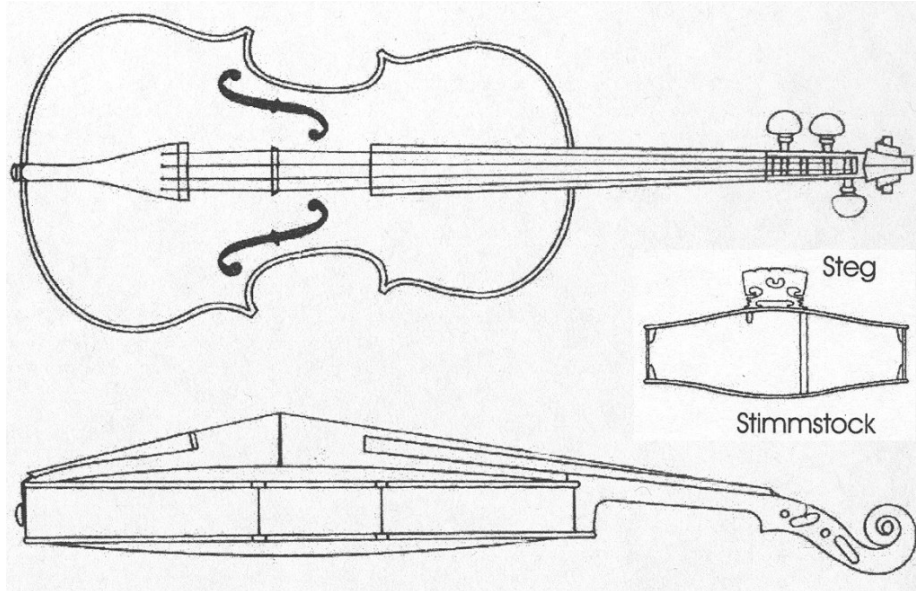
Luftstrom am Labium



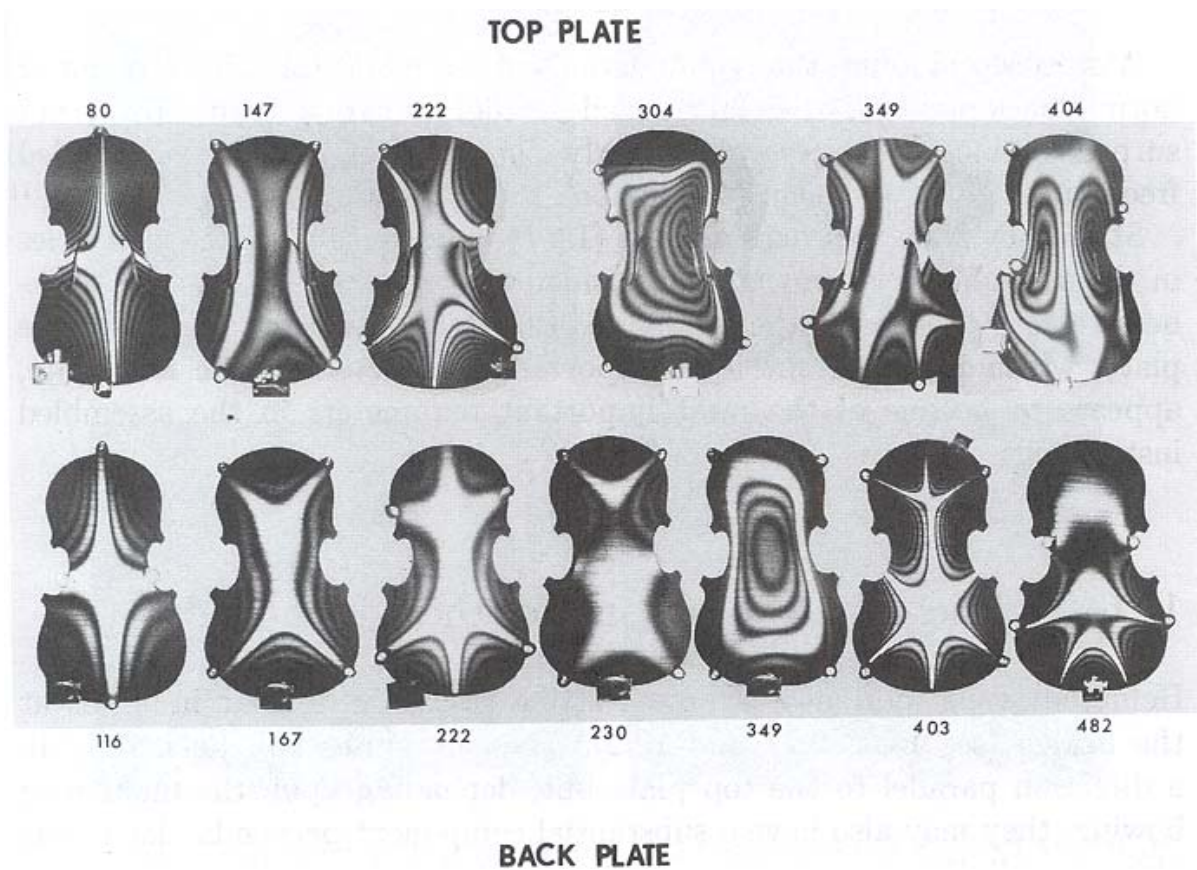
**Der Resonator zwingt dem Luftstrom seine
Eigenschwingungen auf!**

Resonator II

Querschnitt durch eine Violine:

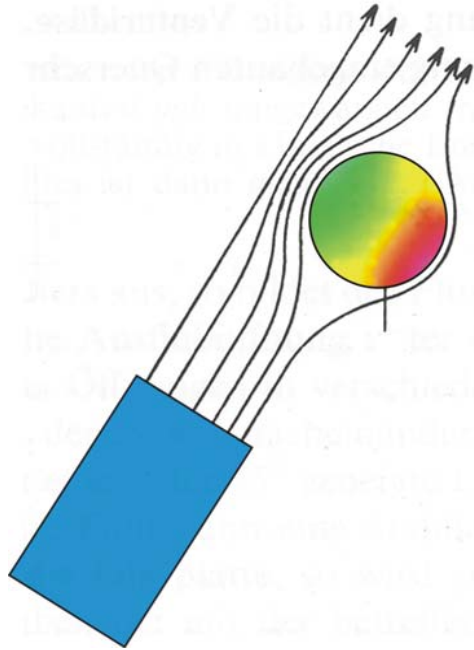


Hologramme der Eigenresonanzen:

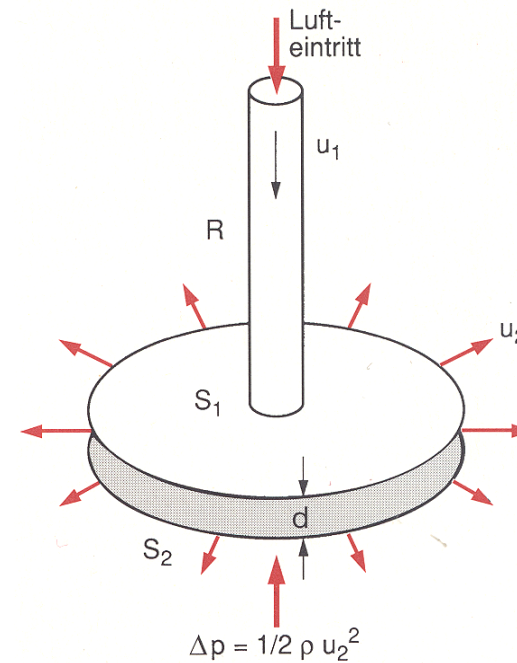


Staudruck und statischer Druck

Schweben eines Balls im Luftstrom:



Hydrodynamisches Paradoxon:

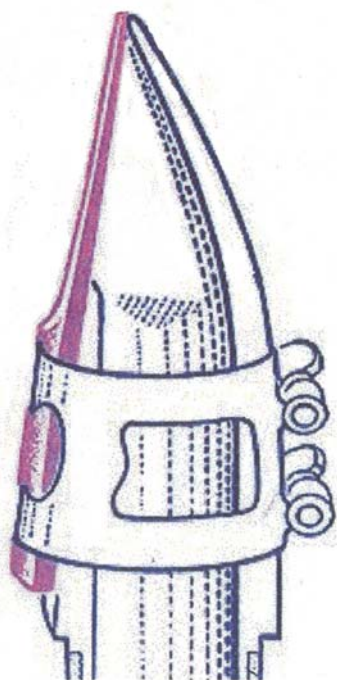


$$p + \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 = p_0 = \text{konstant}$$

Bernoulli-Gleichung

Schwingende “Zungen“

Rohrblattinstrumente:

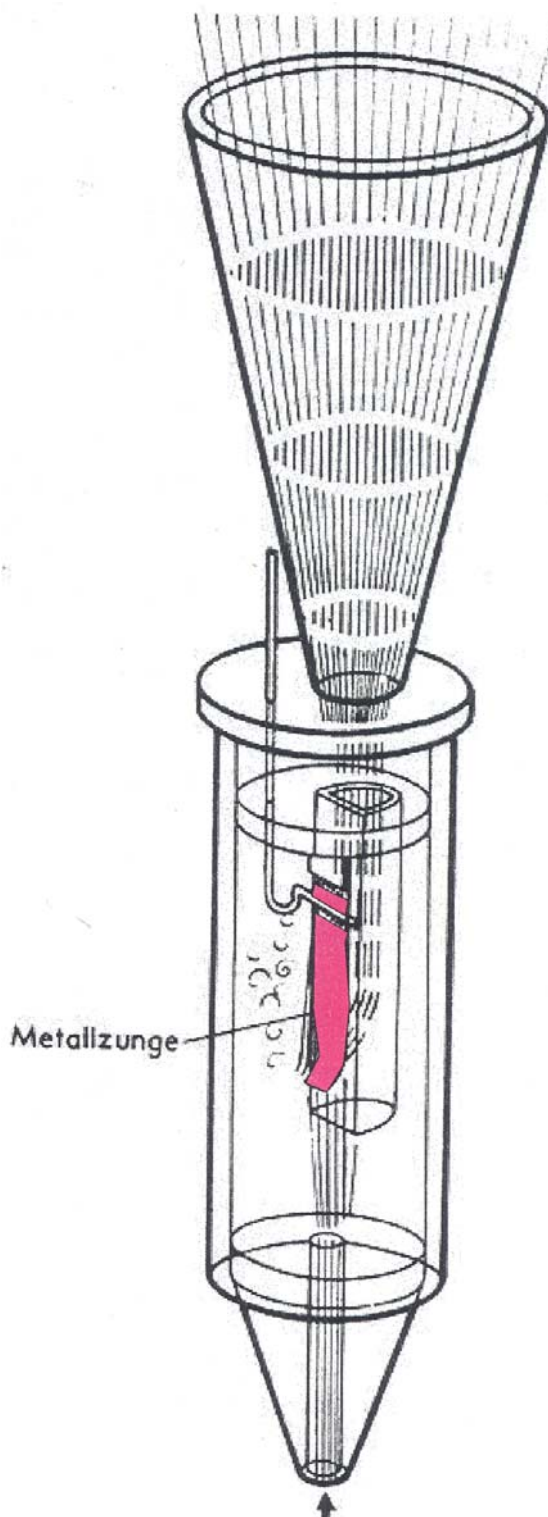


Klarinette



Oboe

Zungenpfeife:



Pause

Für alle „weiter“ Interessierte:

In der Vorlesung benutzte Software:

Diton V 1.0

„Akustik-Experimente für den Unterricht“

Wird von der Universität Erlangen kostenlos als Internet-Download angeboten unter der Adresse

<http://www.didaktik.physik.uni-erlangen.de/>

(→ Downloads → Windows Programme)

Cool-Edit 2000

“powerful and easy to use digital audio recorder, editor, and mixer”

Syntrillium Software Corporation

P. O. Box 62255

Phoenix, AZ 85082-2255

USA

URL: <http://www.syntrillium.com>

email: info@syntrillium.com

(Leider nicht ganz kostenlos)