

# Die Physik der Kirchenorgel

Wolfgang Hillert

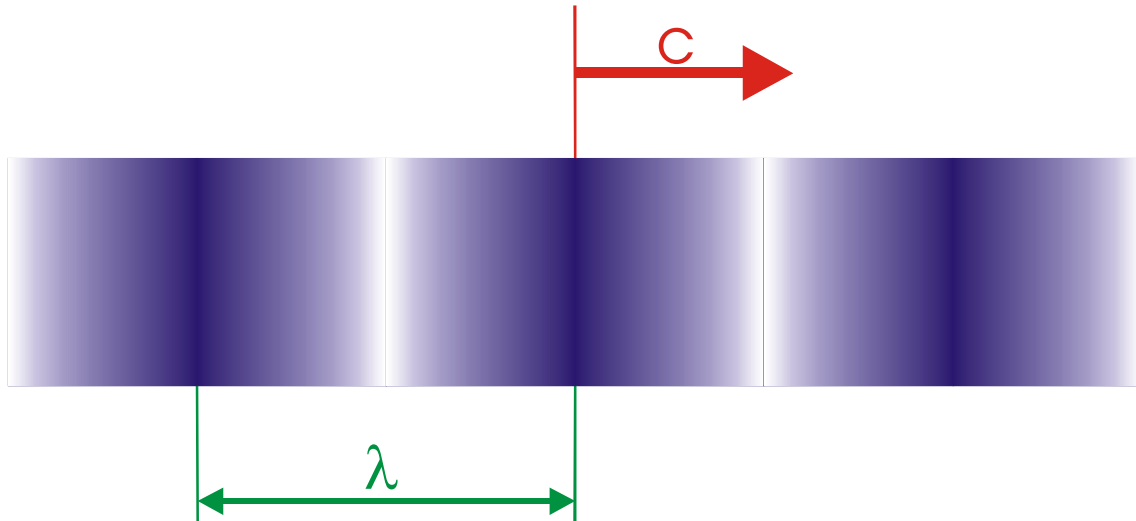
## Inhalt:

---

- **Schwingungen und Wellen**
- **Fourier-Analyse und Klangsynthese**
- **Lippenpfeifen**
- **Zungenpfeifen**
- **Aufbau des Orgelklanges**

# Longitudinalwellen

---



**Phasengeschwindigkeit  $c$  hängt nicht von der Amplitude ab!**

$$c = \lambda \cdot f$$

**Schallgeschwindigkeit bei 20°C:**

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

**„Hörbarer“ Frequenzbereich:**

$$15 \text{ Hz} < f < 10 \text{ kHz}$$

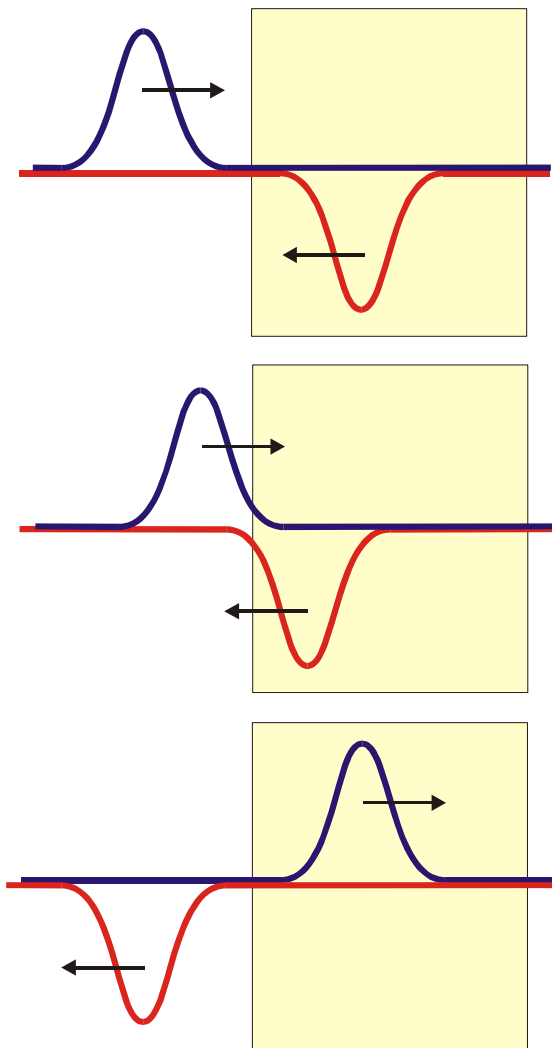
**In der Akustik relevante Wellenlängen:**

$$23 \text{ m} > \lambda > 3.4 \text{ cm}$$

# Reflexion von Wellen

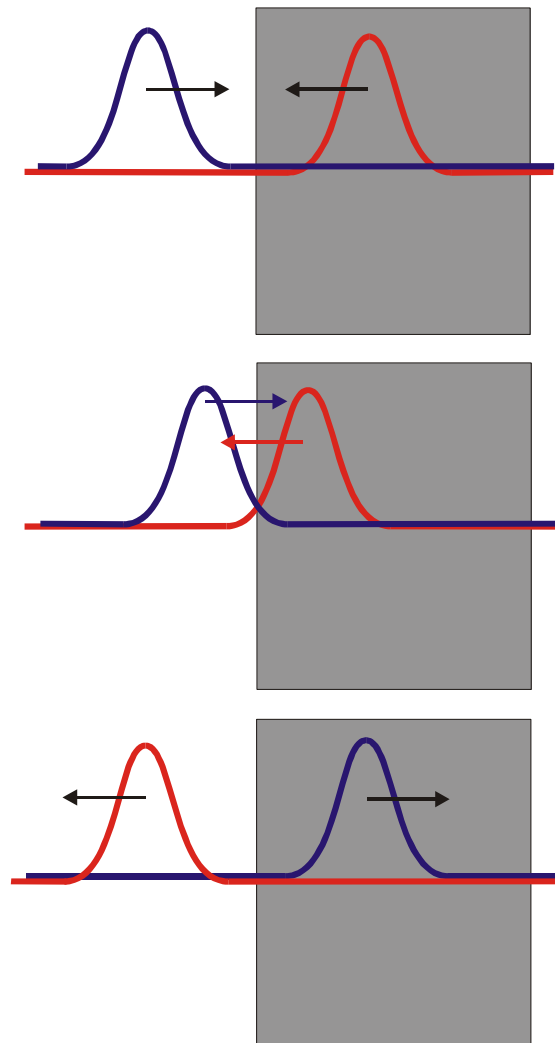
---

**Reflexion am  
offenen Ende:**



**Phasensprung von  $\pi$ !**

**Reflexion am  
geschlossenen Ende:**



**Kein Phasensprung!**

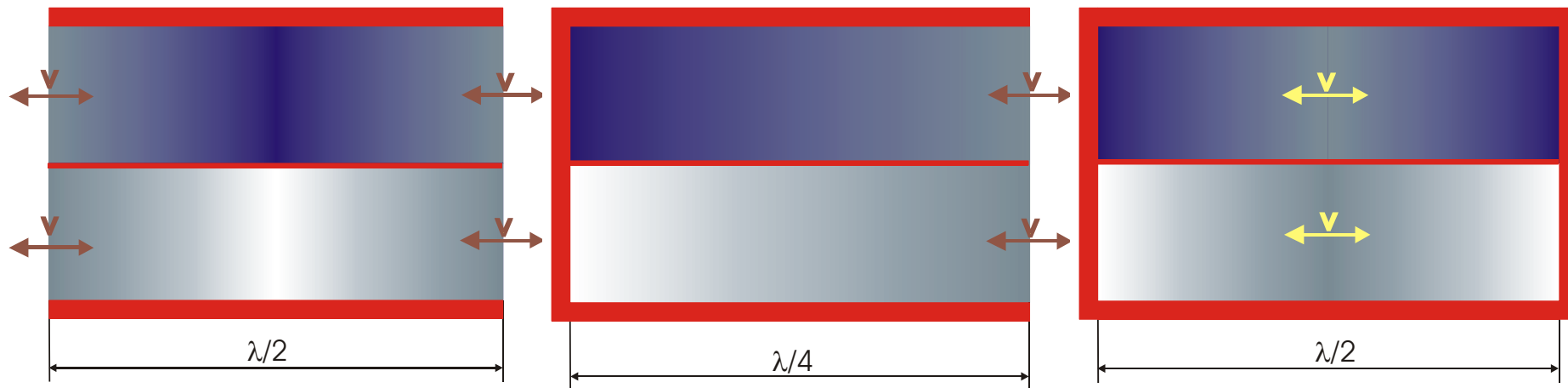
# Stehende Wellen

Das Rohr als Resonator:

2 offene Enden:

geschl. und off. Ende:

2 geschlossene Enden:



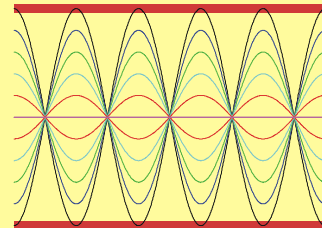
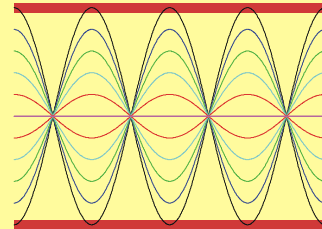
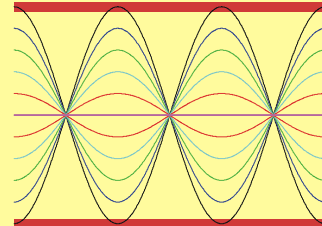
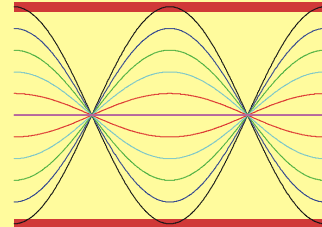
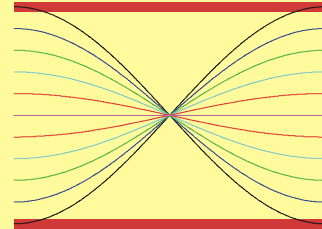
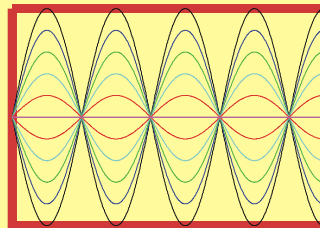
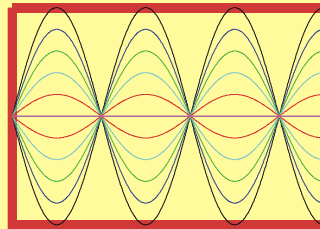
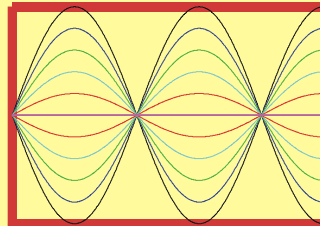
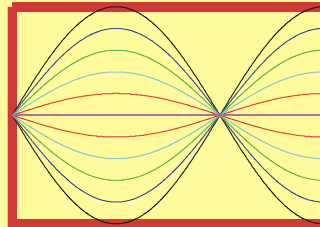
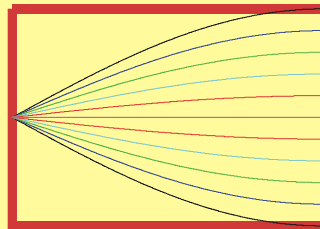
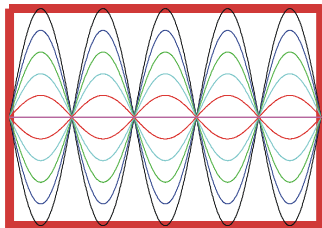
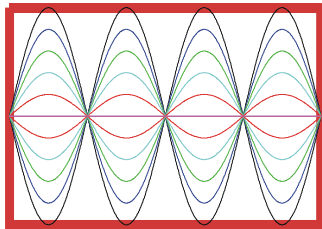
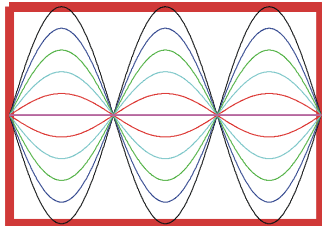
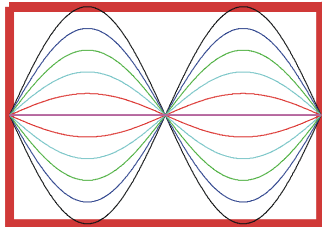
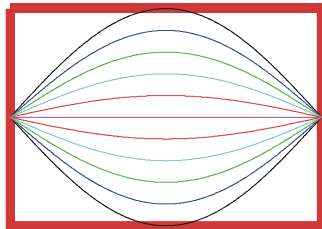
**Druckbäuche und Schnelleknoten am geschlossenen Ende**  
**Schnellebäuche und Druckknoten am offenen Ende**  
**Phasensprung von  $180^\circ$  am offenen Ende**

# Oberschwingungen

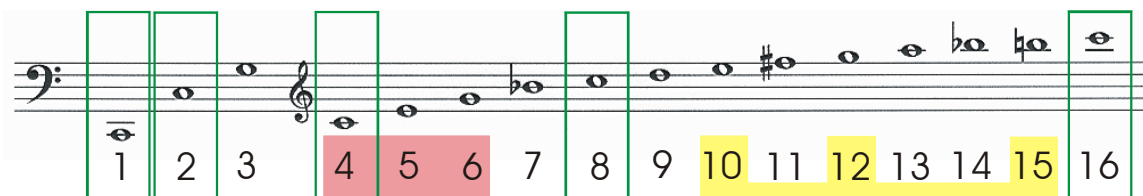
2x geschlossen

geschlossen/offen

2x offen



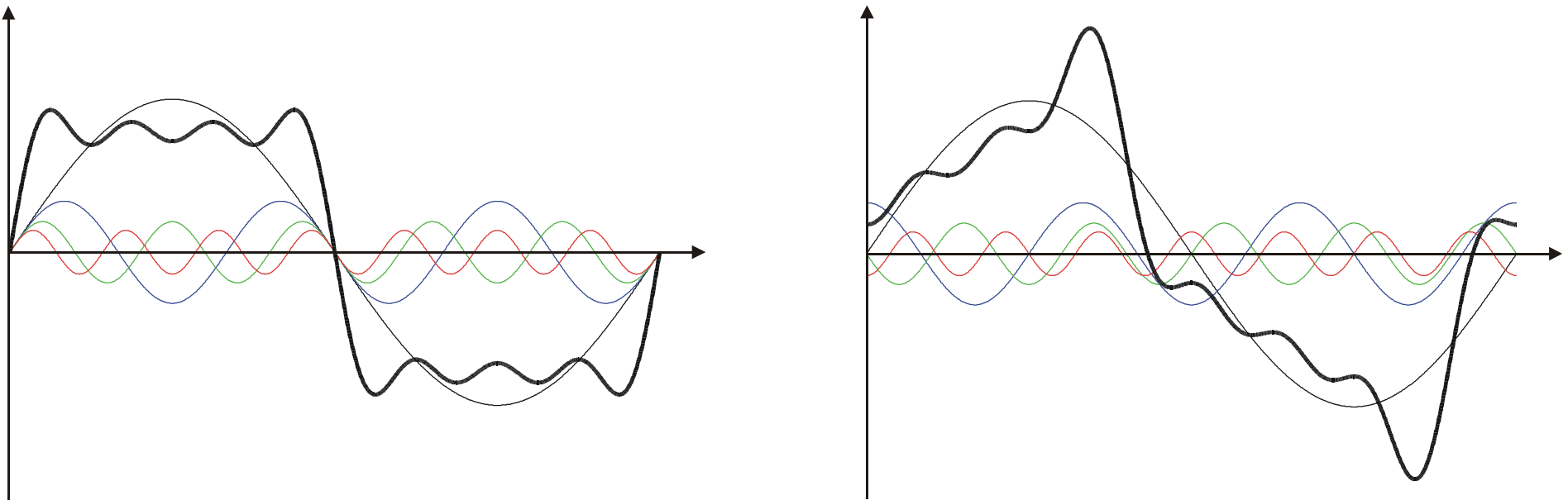
→ Obertonreihe:



# Fourier-Analyse

---

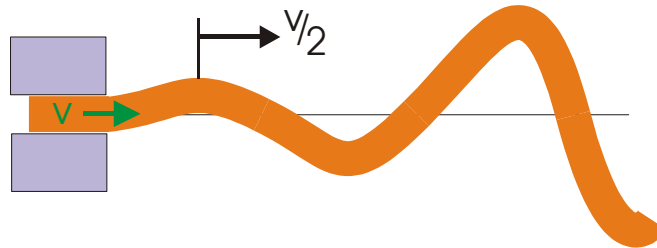
## Additive Synthese verschiedener Klänge:



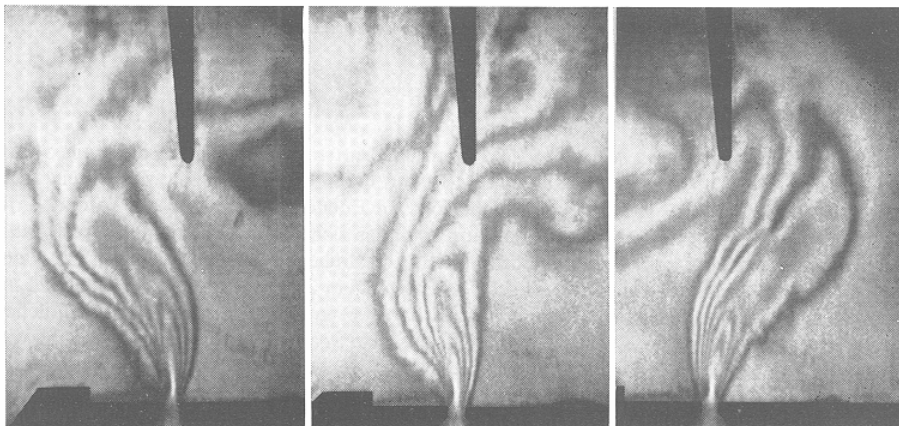
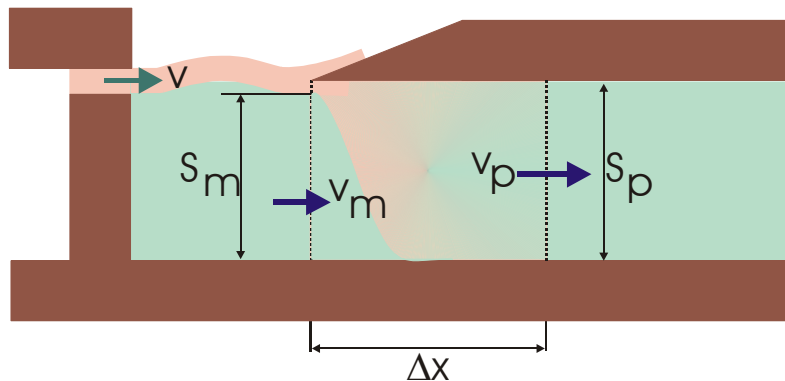
**Entscheidend ist die Amplitude der Oberschwingungen!**  
**Die Phasenbeziehung zur Grundschwingung spielt keine Rolle!**

# Tonentstehung

**Instabilität des Luftstroms:**



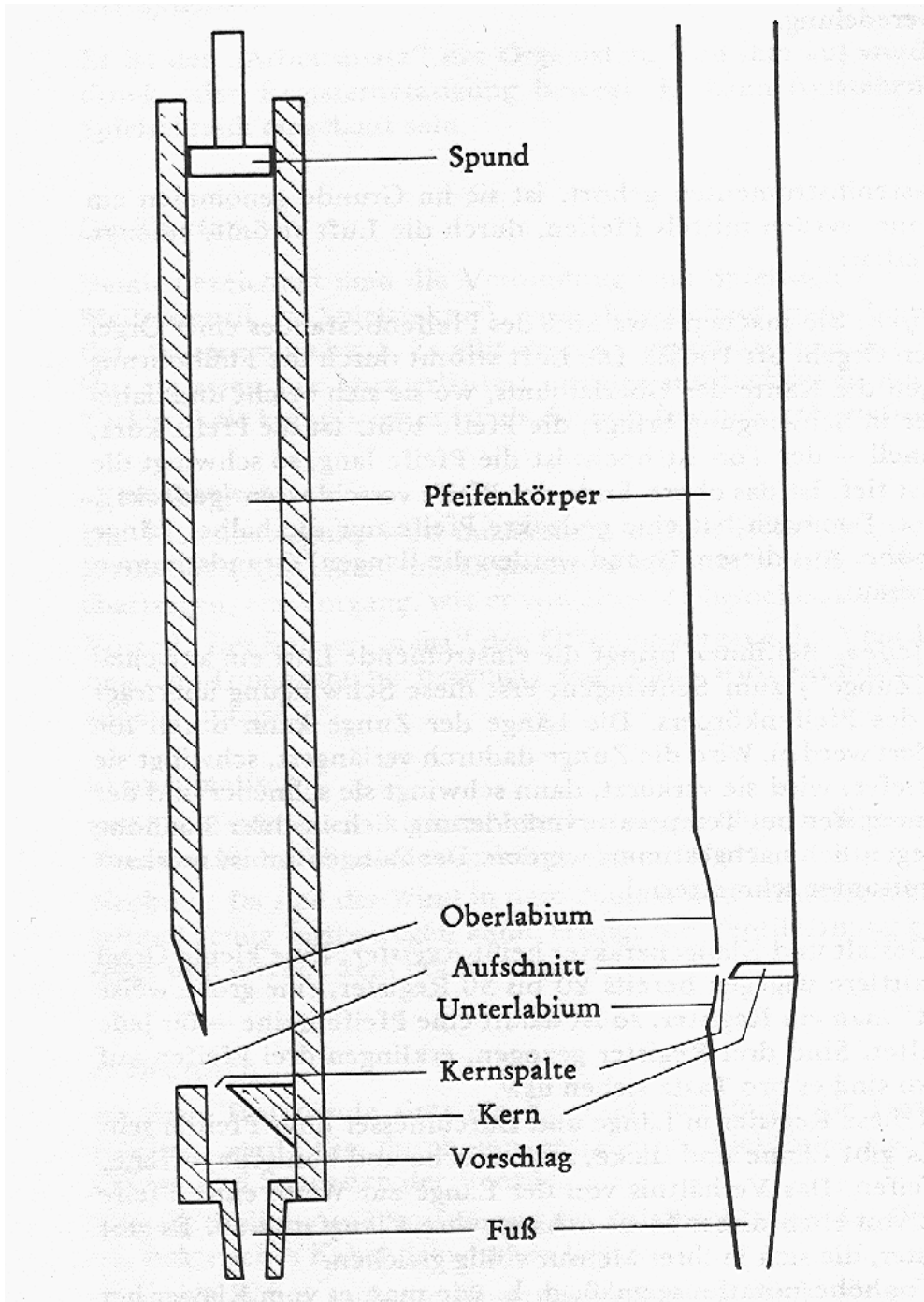
**Wechselwirkung mit dem Pfeifenresonator:**



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

# Lippenpfeifen I

---



**Gedckte Pfeife**

**Offene Pfeife**



# Lippenpfeifen II

---

**Energieverlust durch Reibung an der Wand:**

$$\Delta E_R \sim R \cdot L \cdot \sqrt{f} \cdot v^2$$

**Energieverlust durch Abstrahlung:**

$$\Delta E_S \sim R^4 \cdot f^2 \cdot v^2$$

**Gespeicherte Energie:**

$$E \sim R^2 \cdot L \cdot v^2$$

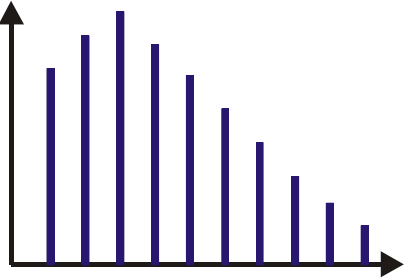
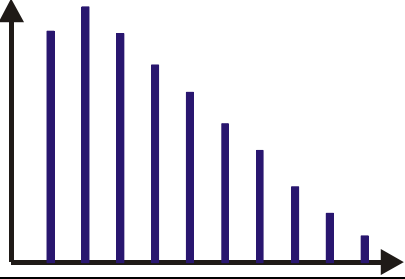
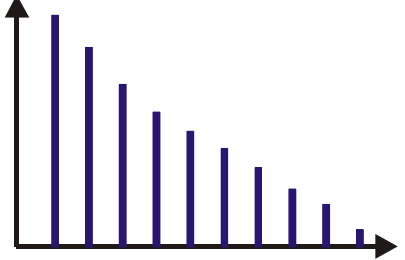
**Kreisgüte:**

$$Q = \frac{2\pi f \cdot E}{\Delta E_R + \Delta E_S} = \left[ a \cdot \frac{R^2 \cdot f}{L} + b \cdot \frac{1}{R \cdot \sqrt{f}} \right]^{-1}$$

**Skalierung des Pfeifenradius':**

$$R(f_1) = \left( \frac{f_0}{f_1} \right)^x \cdot R(f_0) , \quad x \approx 5/6$$

# Lippenpfeifen III

|                  | <b>R</b>   | <b>S</b>   |           | <b><math>\Sigma</math></b> | <b>Q<sub>0</sub></b> | <b>Spektrum</b>   |
|------------------|------------|------------|-----------|----------------------------|----------------------|---|
|                  |            | Kopf       | Labium    |                            |                      |   |
| <b>Streicher</b> | <b>9.7</b> | <b>0.8</b> | <b>4</b>  | <b>14.5</b>                | <b>70</b>            |    |
| <b>Prinzipal</b> | <b>5.7</b> | <b>2.4</b> | <b>12</b> | <b>20.1</b>                | <b>50</b>            |   |
| <b>Flöte</b>     | <b>3.5</b> | <b>6.7</b> | <b>34</b> | <b>44.2</b>                | <b>23</b>            |  |

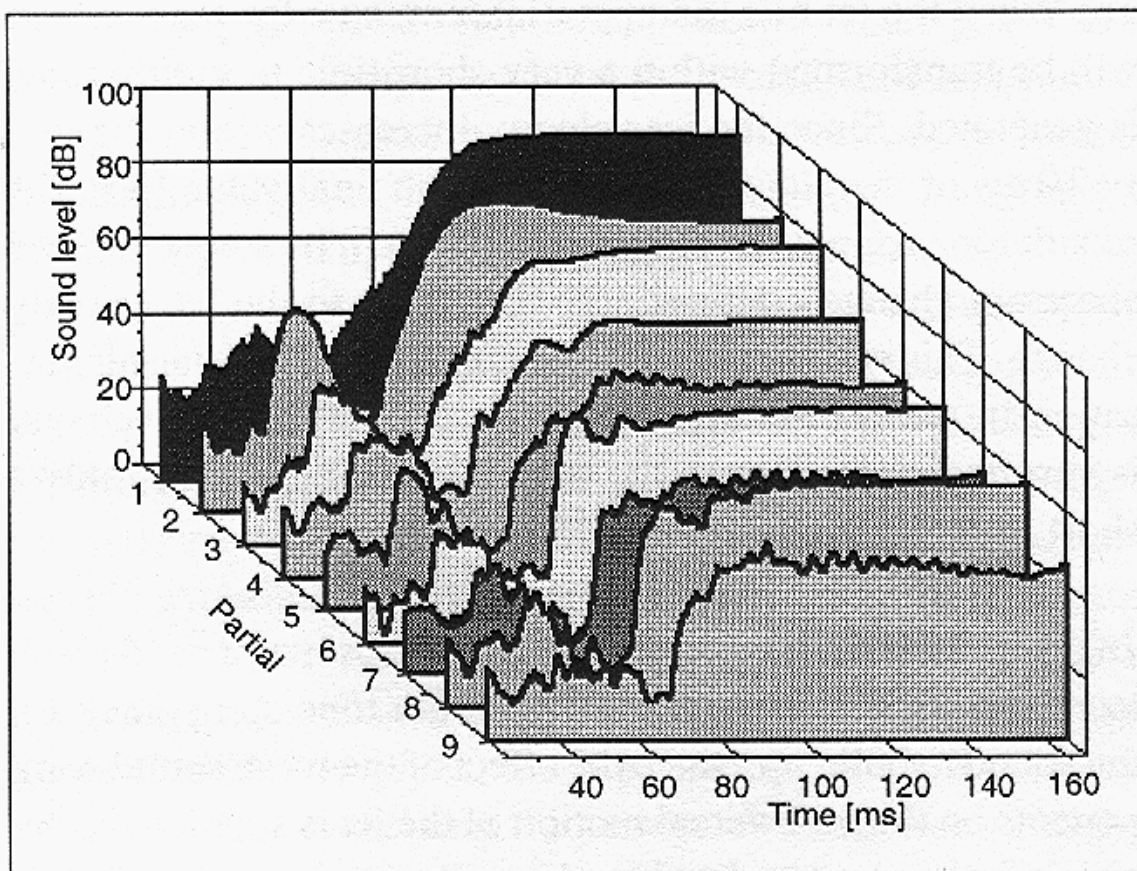
# Einschwingphase

---

**Tonentstehung in 3 Phasen:**

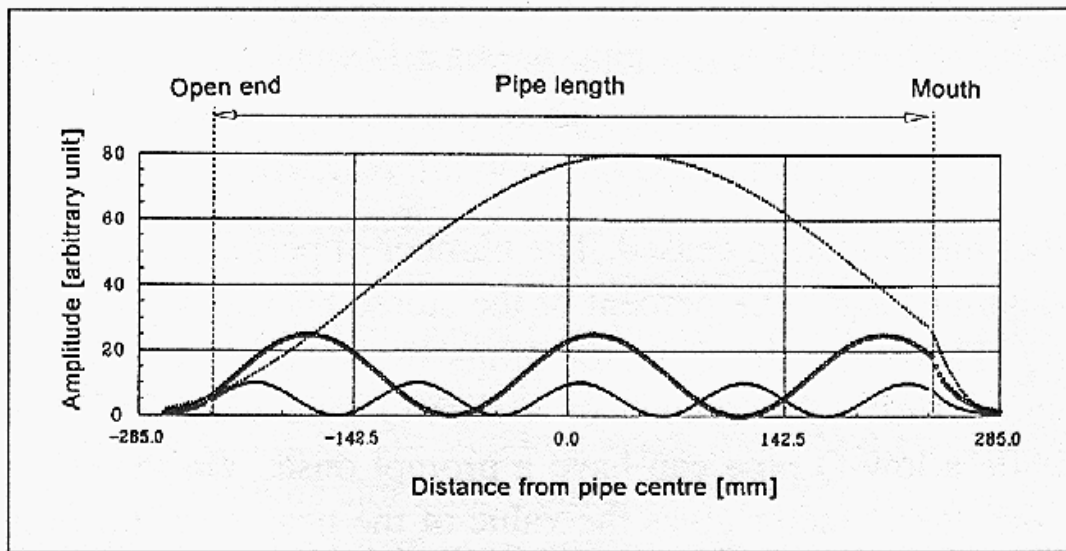
- 1. Schneidenton**
- 2. Vorton**
- 3. Stationärer Ton**

**Fourier-Spektrum der ersten 9 Teiltöne:**

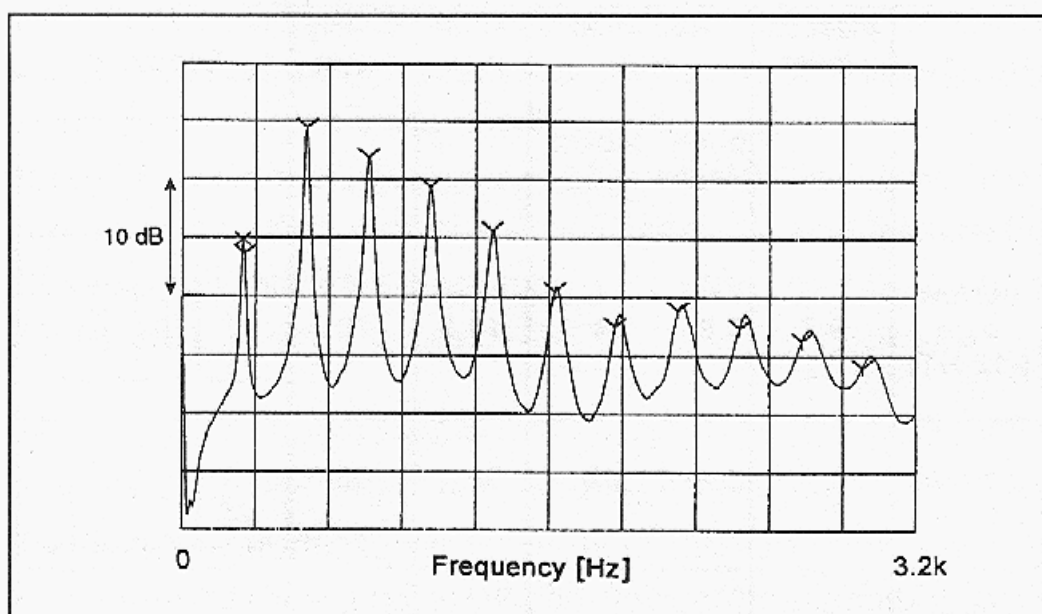


# Endkorrektur I

## Einfluß der Abstrahlung:



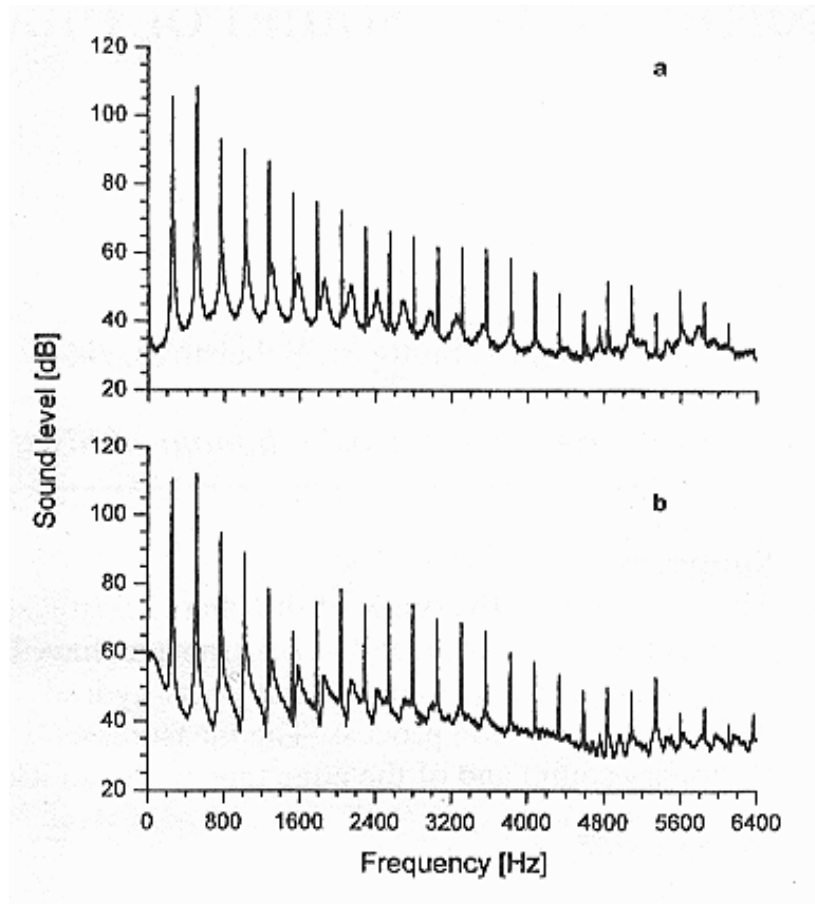
## Höhere Eigenresonanzen $\leftrightarrow$ Partialtöne:



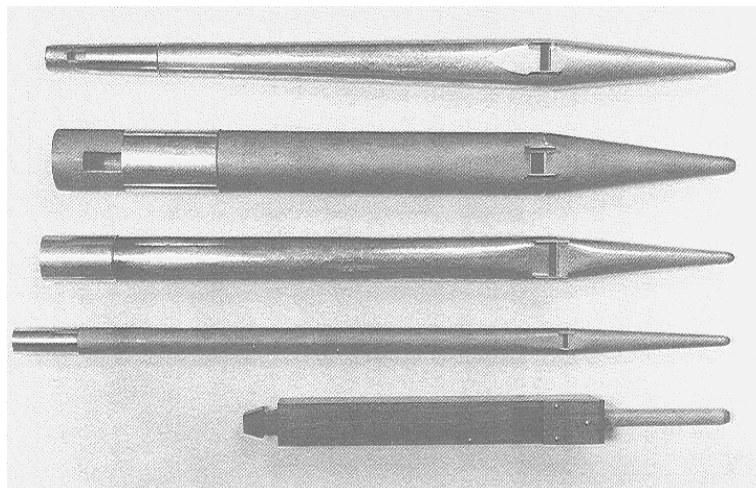
# Endkorrektur II

---

## Eigenmoden im Fourier-Spektrum:

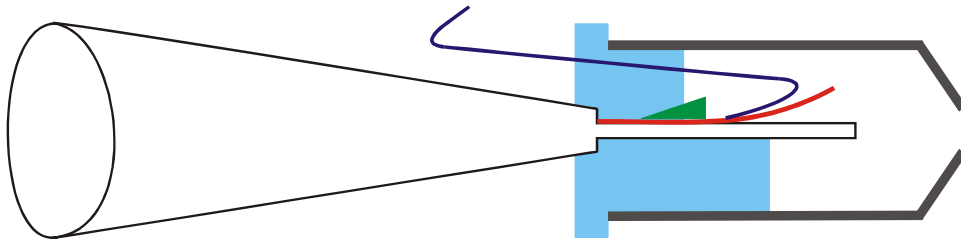


## Auswirkung auf die Pfeifenlänge:

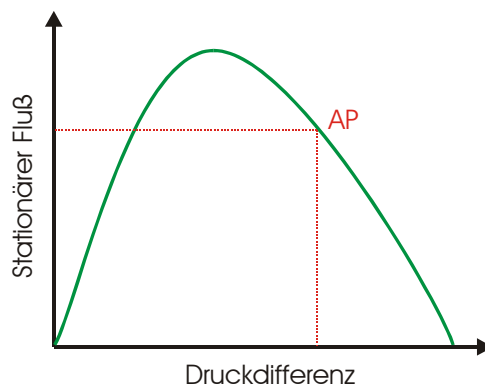
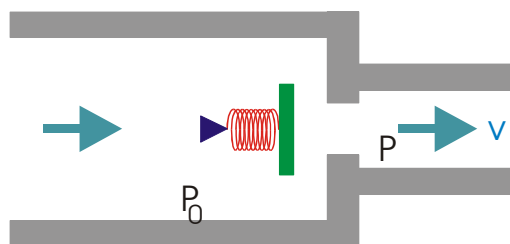


# Zungenpfeifen

## Querschnitt einer Zungenpfeife



## Funktionsprinzip:



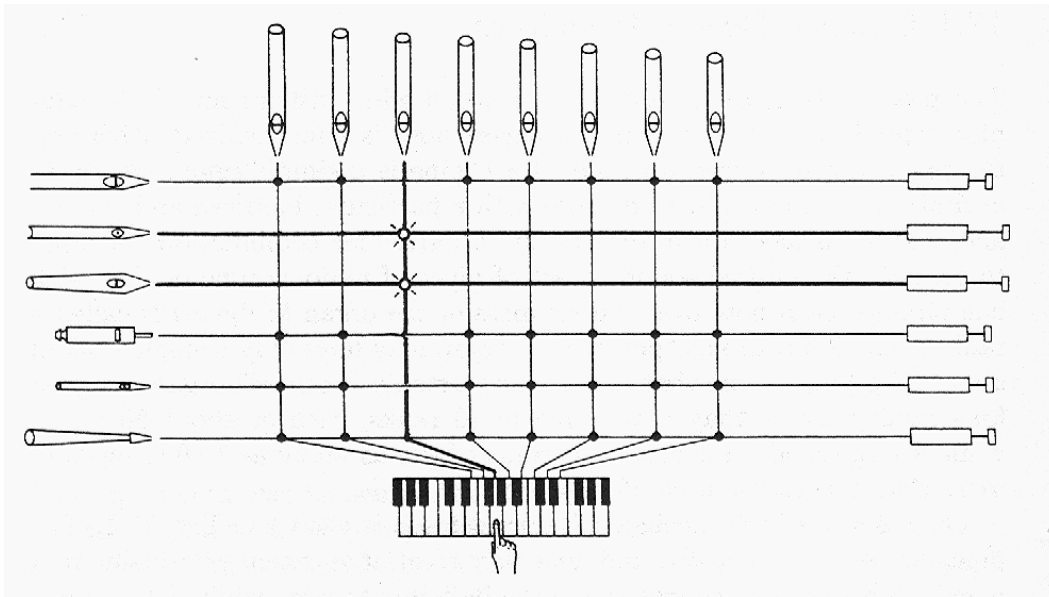
**Hohe Kreisgüte der schwingenden Metallzunge**

→ **Lose Ankopplung des Resonators**

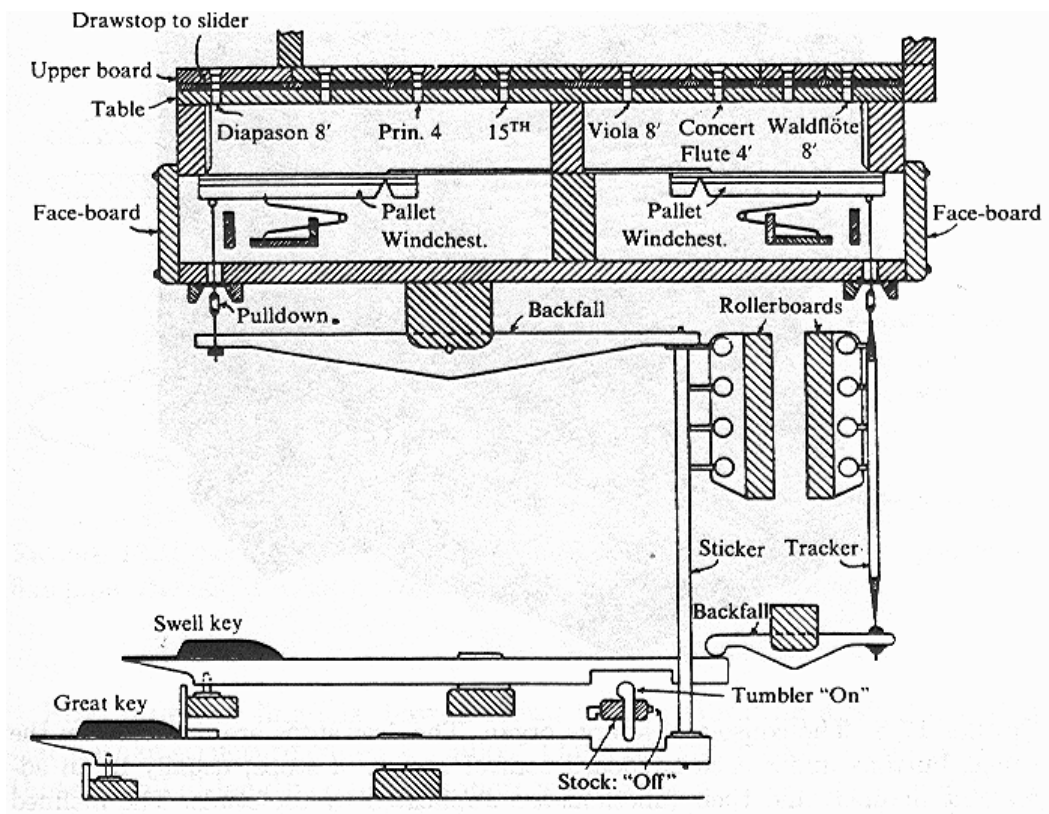
**Klang wird wesentlich durch die  
Formgebung der Kehle bestimmt**

# Die Kirchenorgel I

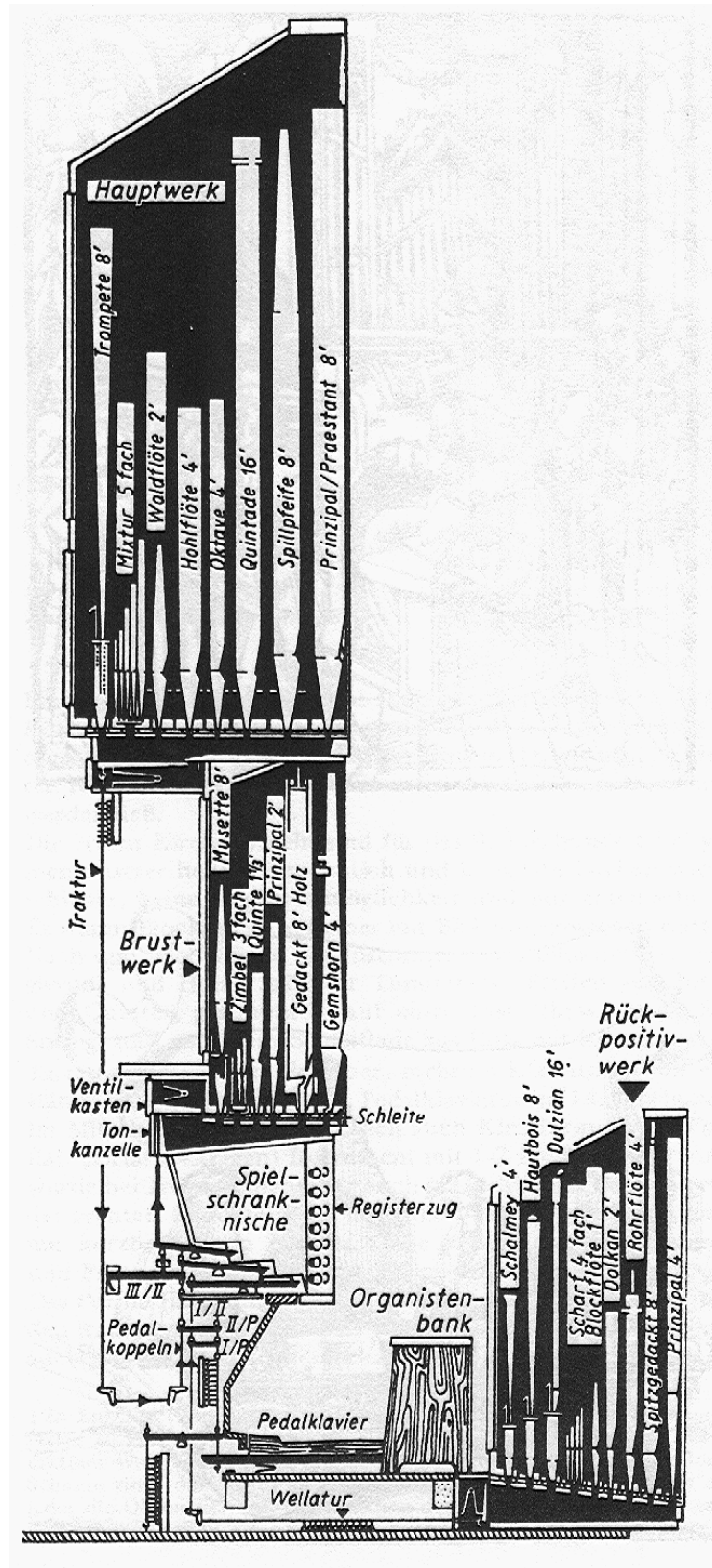
## Funktionsprinzip der Trakturen:



## Die Windlade:



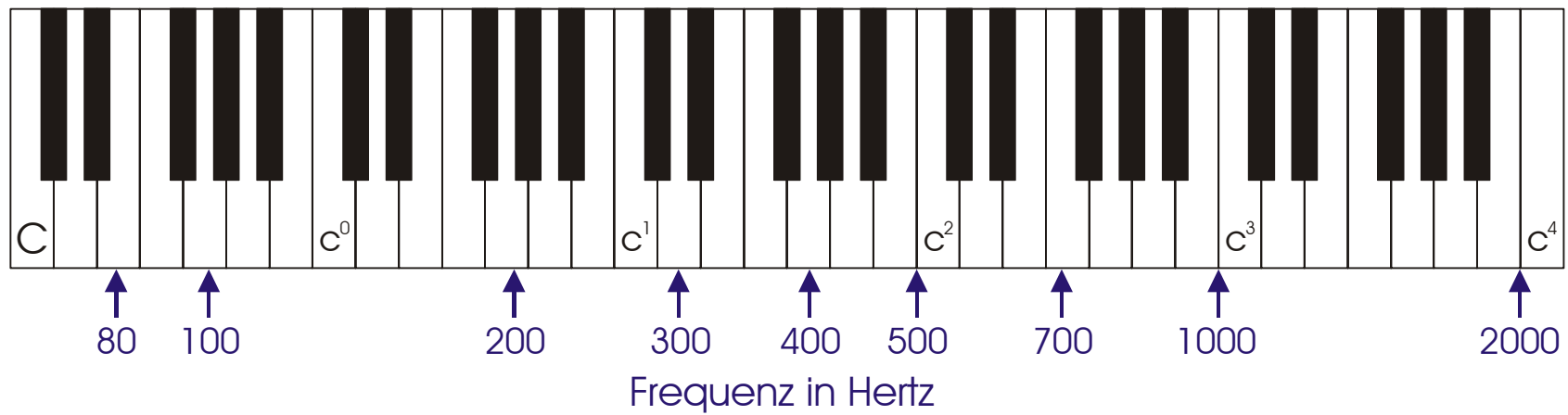
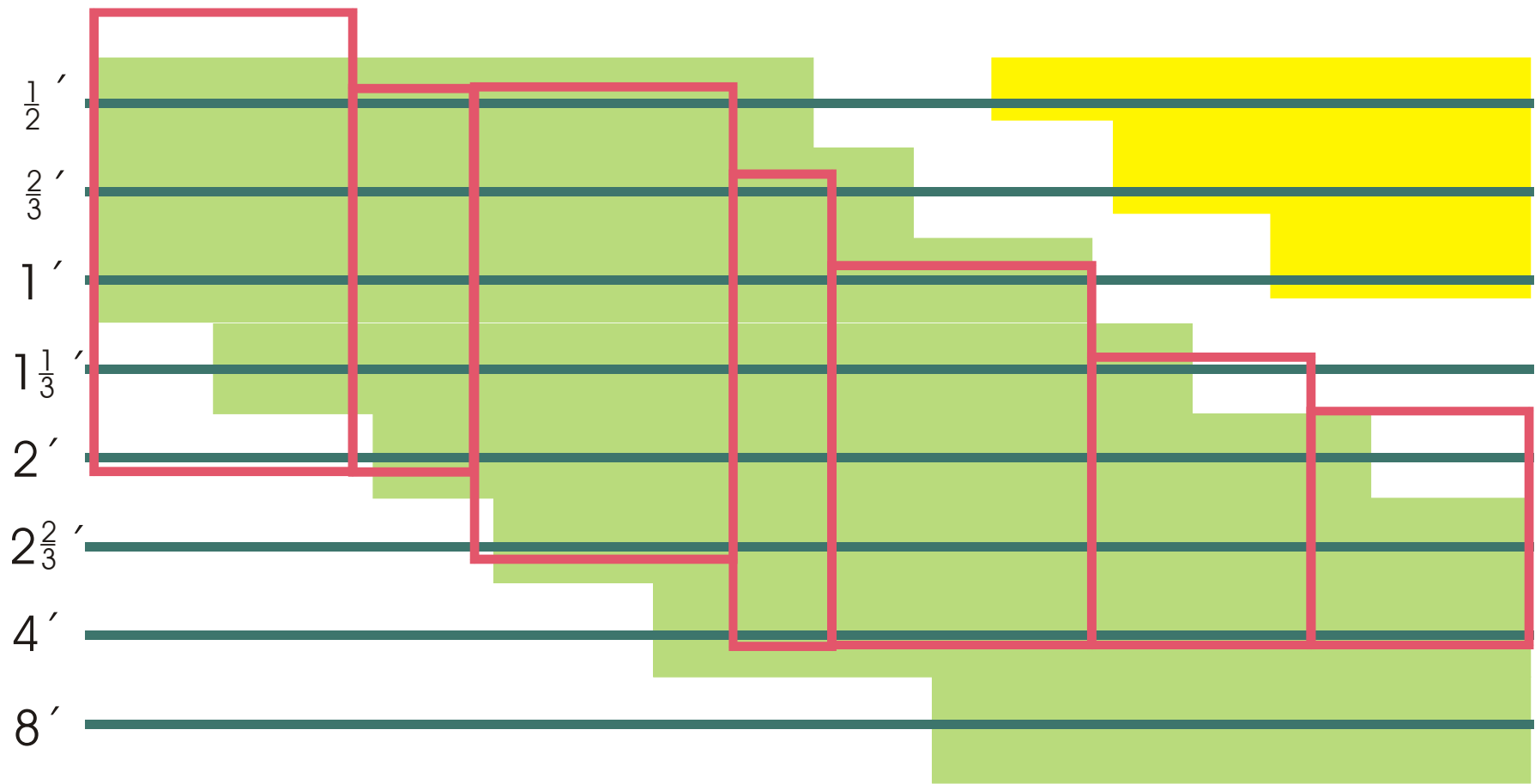
# Die Kirchenorgel II





# „Aufbau“ des Orgelklangs

|           |                 |                     |           |
|-----------|-----------------|---------------------|-----------|
| 5.Oberton | $1\frac{1}{3}'$ |                     |           |
| 4.Oberton | $1\frac{3}{5}'$ |                     |           |
| 3.Oberton | 2'              | 2'                  | (2')      |
| 2.Oberton | $2\frac{2}{3}'$ | ( $2\frac{2}{3}'$ ) |           |
| 1.Oberton | 4'              | 4'                  | 4'        |
| Grundton  | 8'              | 8'                  | 8'        |
|           | (16')           | (16')               | (16')     |
|           | Flöten          | Prinzipale          | Streicher |







# J.S. Bach: Präludium und Fuge G-Dur

| <u>Hauptwerk</u>  | <u>Rückpositiv</u>   | <u>Schwellwerk</u>   | <u>Pedal</u>  |
|---|--|--|---|
| Prinzipal 8'<br>Octave 4'<br>Superoctave 2'<br><b>Koppeln R,S→H</b> | Praestant 8'<br>Prinzipal 4'<br>Octave 2'<br>Scharff 5f<br>Cymbel 3f | Geigenprinzipal 8'<br>Weitoctave 4'<br>Octavin 2'<br>Fourniture 6f | Prinzipal 16'<br>Violon 16'<br>Octave 8'<br>Superoctave 4'<br>Posaune 16' |

# Ch. M. Widor: 5. Symphonie, 4. Satz

---

## Schwellwerk

Vox coelestis 8'

Gamba 8'

## Pedal

Offenflöte 4' (aus HW)

Blockflöte 4' (aus BW)

# L. Vierne: 1. Symphonie, 6. Satz

| <u>Rückpositiv</u>   | <u>Hauptwerk</u>  | <u>Schwellwerk</u>  | <u>Pedal</u>   |
|--|---|---|--|
| Praestant 8'<br>Holzgedackt 8'<br>Bifaria 8'<br>Prinzipal 4'<br>Rohrgedackt 4'<br>Cromone 8' | Prinzipal 8'<br>Doppelflöte 8'<br>Gemshorn 8'<br>Octave 4'<br>Offenflöte 4'<br>Cornett 5f<br>Trompete 8'<br>Trompete 4'<br><br><b>Koppeln R,S→H</b> | Geigenprinzipal 8'<br>Flute Harmon. 8'<br>Weitoctave 4'<br>Flute octaviante 4'<br>Salicat 4'<br>Bombarde 16'<br>Trompette Har. 8'<br>Clairon Harm. 4' | Praestant 32'<br>Prinzipal 16'<br>Subbass 16'<br>Violon 16'<br>Octave 8'<br>Spitzgedackt 8'<br>Superoctave 4'<br>Gedacktflöte 4'<br>Basszink 3f<br>Hintersatz 5f<br>Posaune 16'<br>Holztrompete 8'<br><b>Koppeln R,H,S→P</b> |





# Zusammenfassung

---

- **Klang  $\leftrightarrow$  Fourier-Spektrum der Obertöne**

- **Obertonreihe:**

**Basis der Akkorde und Tonleitern**

- **Lippenpfeifen:**

**Luftstrom  $\leftrightarrow$  Eigenresonanzen**

**Klang  $\leftrightarrow$  Dimensionierung des Resonators**

- **Zungenpfeifen:**

**Schwingendes Metallblatt**

**Klang  $\leftrightarrow$  Dimensionierung der Kehle**

- **Klangfarben einer Kirchenorgel:**

**Vielfältige Klangbausteine und Erweiterungen**

**Aufbau nach der Obertonreihe**