

## Musikinstrument als lineares System (LTI)

Generator (Wellenform) → Resonator (Klangformung / Filter) → Schallabstrahlung

### Aufteilung in 2 Klassen

#### a) Rückkopplungsfrei

Generator → Resonator 1 → Resonator 2 → ... → Resonator n → Schallabstrahlung

Bsp. Gitarre:

Gezupfte Saite / Kraft auf Steg → Decke → Korpus → ... → Schallabstrahlung

#### b) Rückgekoppelt

Generator ↔ Resonator 1 → Resonator 2 → ... → Schallabstrahlung

Bsp. Flöte:

Schneidenton → Rohrresonanz (steuert Klangerzeugung im Generator) → ... → Schallabstr.

## Klassen von Musikinstrumenten

Name	Klangerzeuger
Aerophon	Luft
Chordophon	Saite
Idiophon	Selbsterzeuger
Membranophon	Membran
Elektrophon	Elektronik

## Aerophone

Generator:

- Luftlamelle (Schneidenton) → Flöten
- Durchgesteuertes Ventil → „Blechblasinstrumente“
- Strömungsgesteuertes Ventil → „Rohrblattinstrumente“, linguale Orgelpfeifen

Resonator:

- Röhren:
  - o Rohr, einseitig offen
  - o Rohr, beidseitig offen
  - o Konus
  - o Horn
  - o (+ Helmholzresonatoren)

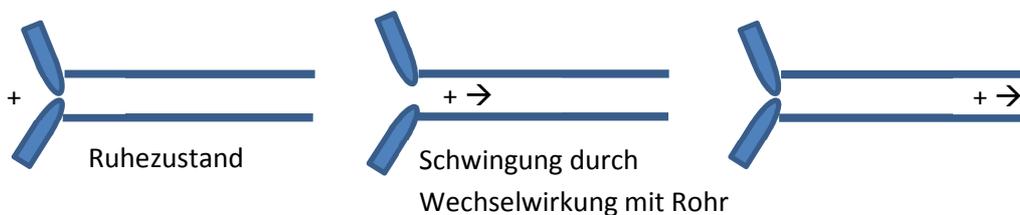
## Betrachtung der Generatoren von Aerophonen

### Flöten:

- Gehören zu den ersten Instrumenten, gemeinsam mit Trommeln
- Einfache Umsetzung möglich → Wirkung meist als altertümlich
- Keine bewegten Teile → Luft ist als Generator in Bewegung
- Luft zum Schwingen → Schneidenton → periodische Verwirbelung an einer scharfen Kante
- Flötenvarianten:
  - o Querflöte: ohne Mundstück, scharfe Kante ist eingebaut und erhält direkten Luftzug, Schwingung mit charakteristischer Frequenz entsteht (→ Bernoulli-Kraft)
  - o Blockflöte: Luftzug wird durch Block gesteuert und trifft auf Kante (→ variable Parameter der Blockflöte)
- Orgelpfeifen:
  - o Mensur (Größe des Rohrs / Durchmesser) sorgt für Grundtonanteil im Signal (enge Mensur: obertönig, weite Mensur: Grundtonlastig → Sinus)
  - o Periode teilt sich nicht gleichmäßig in Halbwellen auf → Obertöne dominieren das Signal
  - o Konstanter Energiefluss in den Generator sorgt für ein streng harmonisches System (Einschwingen beachten!!)
  - o Mensur verändert nur quantitativ das Spektrum (Oberton ↔ Grundton)
  - o Luftzug wird je nach Mensur länger im Rohr gehalten → Steuerung der Halbwelle → Steuerung der Frequenzanteile

### Druckgesteuertes Ventil

Lippen als Generator → Normalzustand verschlossen → Überdruck wird erzeugt

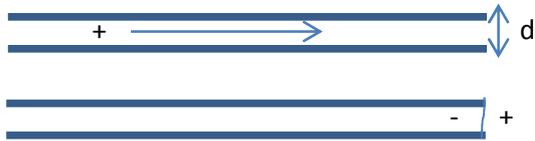


### Strömungsgesteuertes Ventil



## Resonatoren der Aerophone

### Röhrenresonator mit offenen Enden



$$d \leq \frac{\lambda}{6} \rightarrow \text{eindimensionale Schallausbreitung}$$

- Schallweiche Reflexion (Reflexion mit Phasenumkehr am offenen Ende)
- Diskontinuität  $\rightarrow$  Ende des Rohres  $\rightarrow$  Wellenwiderstand

### Röhrenresonator mit geschlossenen Enden



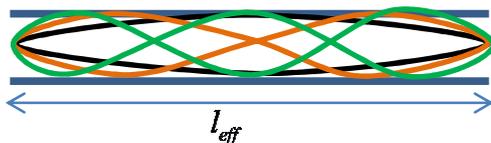
$$\begin{array}{ll} \hat{p} = \max & \hat{p} = 0 \\ \hat{u} = 0 & \hat{u} = \max \end{array}$$

- Reflexion ohne Phasensprung
- Schallharte Reflexion  $\rightarrow$  geschlossenes Ende

### Stehende Wellen in Röhrenresonatoren

a) Offenes Rohr

$$f_n = \frac{n \cdot c}{2l} \quad ; \quad f = \frac{c}{\lambda} \quad \text{bzw.} \quad \lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{Temperatur-Abhängigkeit beachten!!})$$



$f_1$	$\rightarrow$ schwarze Kurve
$f_2$	$\rightarrow$ orange Kurve
$f_3$	$\rightarrow$ grüne Kurve

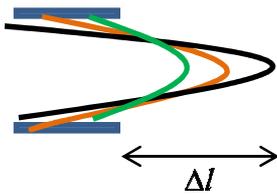
Frequenzberechnung:

$$f_1 = \frac{c}{2l}, f_2 = \frac{c}{l}, f_3 = \frac{3c}{2l}, f_4 = \frac{2c}{l}, f_5 = \frac{5c}{2l}, f_6 = \frac{3c}{l}$$

$$f_n = \frac{n \cdot c}{2l} \Leftrightarrow \frac{c}{\lambda} = \frac{n \cdot c}{2l} \Leftrightarrow \lambda = \frac{2l}{n} \Leftrightarrow l = n \cdot \frac{\lambda}{2}$$

$\rightarrow$  Bezeichnung  $\frac{\lambda}{2}$  - Resonator

Fokus auf das Rohrende



$$\Delta l \rightarrow \text{Mündungskorrektur}$$

$$l = l_{\text{eff}} + 2 \cdot \Delta l$$

Betrachtung im Spektrum:

- Einfluss der Mündungskorrektur führt zu Abweichung
- Generator erzeugt nur streng harmonische Klangbilder → Resonatorfilter
- Verschiebung, bis die Eigenfrequenz wieder erreicht ist → deutlicher Einfluss auf Klang
- Einfluss auf Generator durch Ziehbereich → z.B. Blockflöte ca. 1 Halbton

b) Einseitig geschlossenes Rohr



$$f_n = \frac{(2n-1) \cdot c}{4 \cdot l_{\text{eff}}}, \quad l_n = (2n-1) \cdot \frac{\lambda}{4}$$

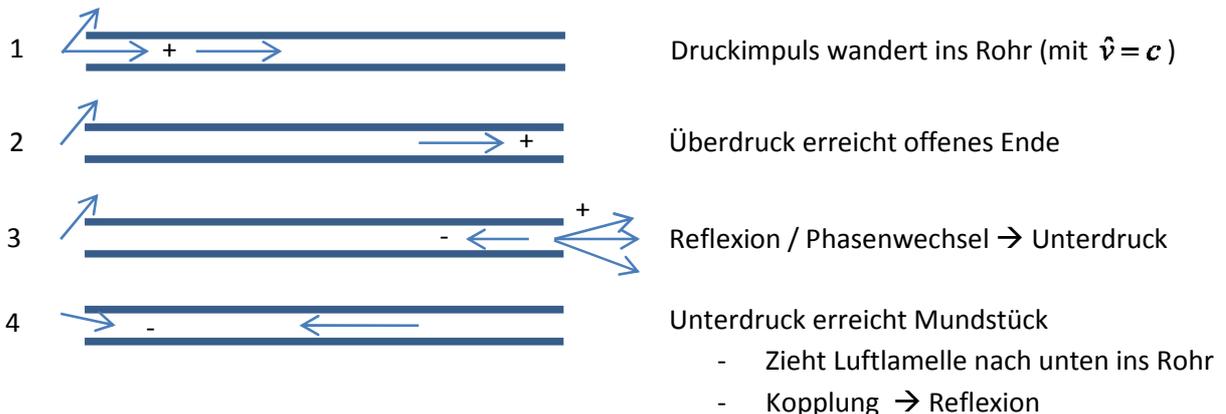
Frequenzberechnung:

$$f_1 = \frac{c}{4 \cdot l_{\text{eff}}}, \quad f_2 = \frac{3c}{4 \cdot l_{\text{eff}}}, \quad f_3 = \frac{5c}{4 \cdot l_{\text{eff}}}$$

→ Bezeichnung  $\frac{\lambda}{4}$  - Resonator (Resonanz bei ungeraden Vielfachen von  $\frac{\lambda}{4}$ )

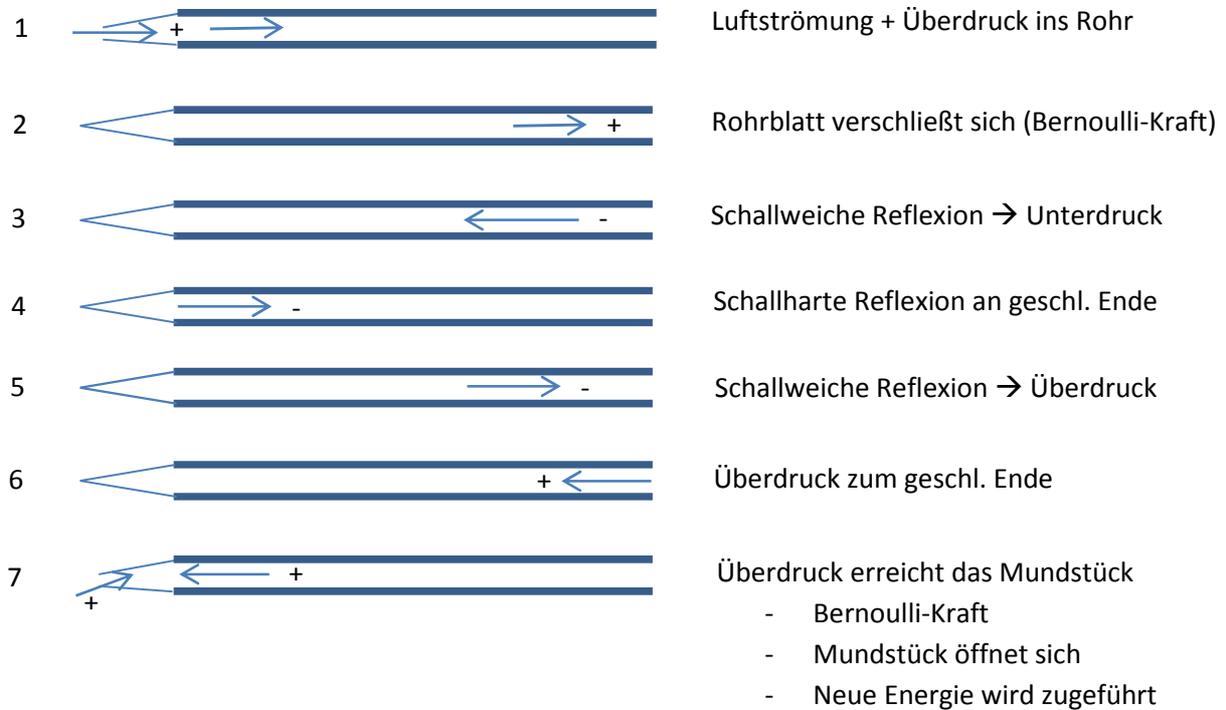
**Betrachtung der Kopplung aus Generator und Resonator bei Aerophonen**

Beispiel 1: Flöte (Längsflöte) → Modell: Offenes Rohr



5 = 1 

### Beispiel 2: Klarinette (geschlossenes Ende)



Welle durchläuft das Rohr 4-mal →  $\frac{\lambda}{4}$ -Resonator

### Steuerung der Tonhöhe

- Naturtonreihe (z.B. Waldhorn) → Löcher / Ventile
- Rohr bei  $f_2$ -Nullpunkt →  $f_1$  wird abgeleitet →  $f_2$  klingt

### Schallabstrahlung

Blechbläser → Schalltrichter → eine Öffnung → sehr einfach zu beschreiben als Schallquelle  
 → Mikrophon vor Schalltrichter

Holzbläser → Schallaustrittsarray → Veränderung des Musters des Schalltrichters → Änderung der Charakteristik

→ Mikrophon senkrecht zum Instrument → Abstrahlcharakteristik variiert

## Bessel-Hörner

Resonator (Wdh.):

- Zur Tonerzeugung → Kopplung mit Generator
- Zur Klangformung
- (zur Schallabstrahlung)

Mögliche Resonatoren:

- Zylindrisches Rohr (Komplexität → Mündungskorrektur) → harmonische Frequenzverhältnisse
- Hörner (Punkt der Schallabstrahlung funktioniert besser → sind lauter)
- Jede beliebige Form des Horns kann nicht zum Musizieren verwendet werden → Problem: Eigenfrequenzen tauchen nicht auf
- Eine erlaubte Horn-Form → das Bessel-Horn
- Bessel-Hörner haben harmonische Frequenzverhältnisse der Eigenfrequenzen

Definition des Bessel-Horns:

- Durchmesser  $d = d_0 \cdot x^{-\varepsilon}$ ,  
wobei  $d_0$  → Durchmesser an der Hornmündung,  $\varepsilon$  → Krümmungskonstante
- Typische Bessel-Hörner:
  - o  $\varepsilon = 0$  → zylindrisches Rohr,  $\frac{\lambda}{2}$  → offen,  $\frac{\lambda}{4}$  → geschlossen
  - o  $\varepsilon = -1$  → Konus,  $\frac{\lambda}{2}$  → geschlossen!!
  - o  $\varepsilon = 0,7$  → Trompete, Posaune