

# *Physical Modelling 1*

## *Waveguides*

*(Wellenleiter)*

*Madjid Tahriri (11.06.2007)*

---

---

# *Physical Modelling*

Physical Modeling ist ein Klangerzeugungsverfahren, welches für alle *physikalischen Eigenschaften eines Instruments* mathematische Modelle nutzt, um dieses möglichst realitätsgetreu abzubilden. Nebeneffekt dabei ist, dass die jeweiligen Eigenschaften im Modell frei veränderbar und kombinierbar werden und somit komplett neue Klänge und/ oder virtuelle Instrumente kreiert werden können.

---

---

# Prinzip des Physical Modelings

Prinzip des Physical Modelings ist es, das zu imitierende Instrument in seinem Aufbau und in seiner Funktion zu analysieren und dementsprechend in Module aufzugliedern. Ein Saxophon besteht vereinfacht aus einem Mundstück, einem Resonanzrohr und einem Trichter. Im Mundstück werden die Schallwellen durch anblasen auf ein Holzblättchen erzeugt; die Länge des Rohres, veränderbar durch die Druckklappen, verändert die Tonhöhe; durch den Trichter tritt der Großteil des Schalls aus, er beeinflusst Abstrahlcharakteristik und Frequenzgang.


---

---

# *Karplus-Strong*

Kevin Karplus und Alex Strong (1983)

Zuerst haben Sie auf die Wavetable-Synthese geforscht.

Danach  Waveguide

# *Problem*

absolut periodisch

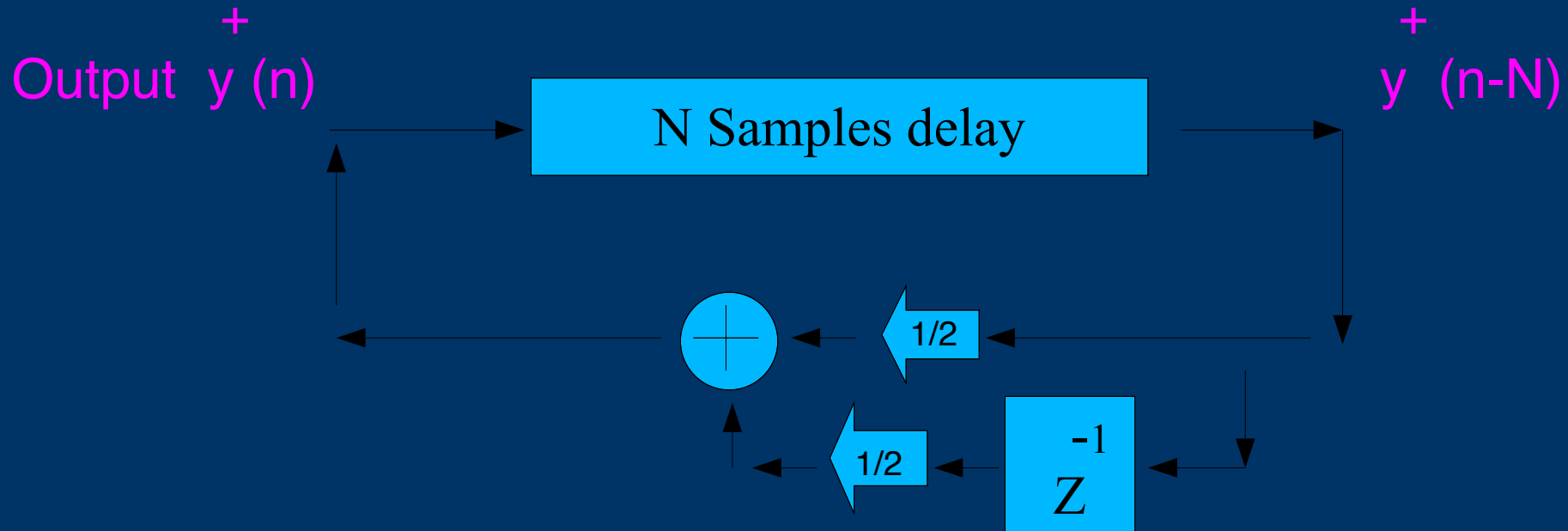
*(oscil liest table periodisch)*

also, statischer Klang

---

---

# Karplus-Strong



$f = SR/(N + 0.5)$  ( $F$  = Grundfrequenz des outputssignals) ( $N$  = gesamt Verzögerung) ( $0.5$  = ein halbes Sample)

Moving Averaging Filter:  $y(t) = 0.5 * (y(t) + y(t-1))$

(Bewegung durchschnitt Filter)

Tiefpass 1. Ordnung ( $f_c$  bei  $SR/4$ )(6dB/oct Dämpfung)

# Waveguide Theorie

Waveguides beruhen auf der Fortpflanzung von Wellen in einem Medium. Waveguide bedeutet soviel wie "Führung einer Welle entlang eines Mediums".

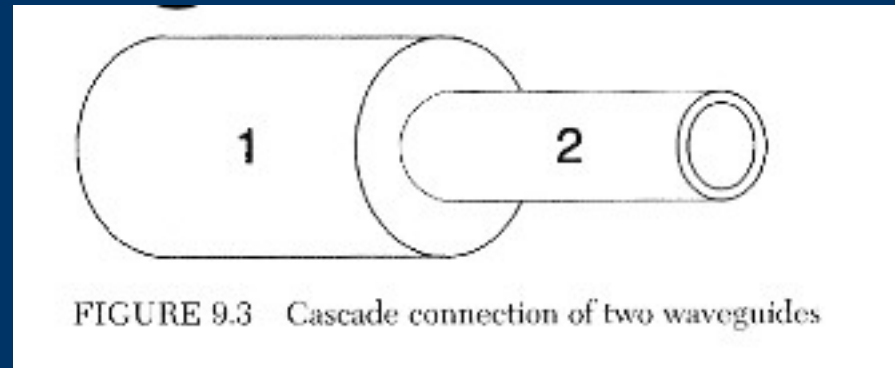
Waveguides bestehen aus Verzögerungselementen und digitalen Filtern. Im ungedämpften Fall bewegt sich die Welle in einem eindimensionalen Medium je zur Hälfte nach links und nach rechts und wird am Ende des Mediums reflektiert.

Die Art der Reflektion, phasengleich oder gegenphasig ist davon abhängig, ob die Begrenzung des Mediums freischwingend oder fixiert ist. Bei festen Körpern erzeugen freischwingende Begrenzungen eine gleichphasige Reflektion, während fixierte Begrenzungen gegenphasige Reflektionen erzeugen. Im Fall der Luftsäule erzeugt ein offenes Ende eine gegenphasige, ein geschlossenes Ende eine gleichphasige Reflektion.

---

---

# Waveguide Theorie



- Druckwellen “wandern” durch Zylinder

Widerstand des Rohres

$$R = \frac{2\rho c}{d}$$

$\rho$  = Luftdichte

$c$  = Schallgeschwindigkeit (300 bis 330 m/s)

$d$  = Durchmesser der Röhre



# Waveguide Theorie

- Verbindung zwischen zwei waveguides (scattering junction)

Streuungs-koeffizient :

$$k = \frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1}$$

einsetzen :  $R = \frac{2\rho c}{d}$  ( $p$  &  $c$  sind konstant)

zusammengefasst :  $k = \frac{d_1 - d_2}{d_1 + d_2}$

# Waveguide Theorie

- Verhältnis zwischen den Vorwärts und Rückwärtswellen an einer scattering junction :

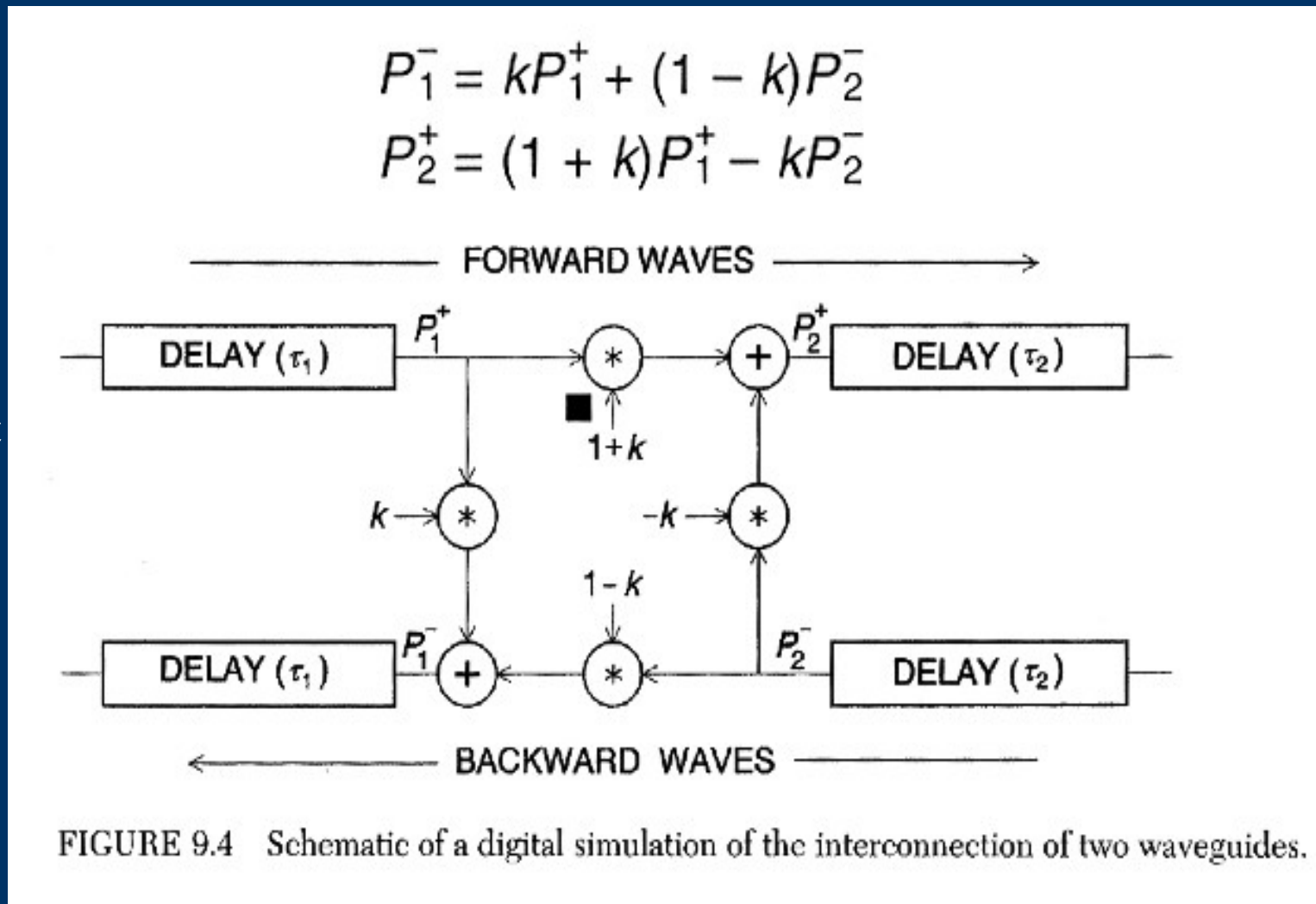
T=Zeit, um die das  
Signal verzögert  
wird.

$T = \frac{\text{Länge des Zylinders}}{\text{Schallgeschwindigkeit}}$

P = Schalldruck

+ = Vorwärts

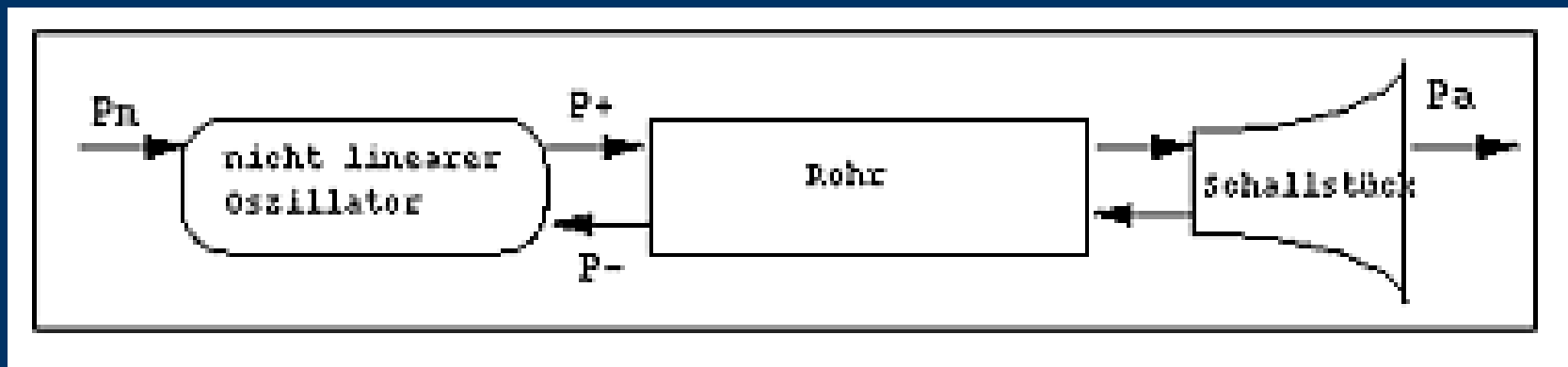
- = Rückwärts



# Waveguide Theorie

## Das Modell der Klarinette

Das Modell ist dreiteilig: Mundstück, Rohr und Schallstück. Das Mundstück erzeugt das Signal, die Tonhöhe wird vom Rohr bestimmt und der Klang wird durch das Schallstück freigestzt.



*(Vorwärts und Rückwärts im Rohr)*

# Waveguide Theorie

In dem Rohr werden die Klänge übertragen. Das Rohr lässt aber nicht alle Frequenzen passieren. Es verstärkt bestimmte Töne, andere können sich im Rohr nicht entwickeln. Um das Verhalten des Rohres zu erklären, können wir den Schalldruck  $p(t)$  in 2 Teile  $p^+(t)$  und  $p^-(t)$  beschreiben.

Der Teil  $p^+(t)$  steht für die Schallwelle, die vom Mundstück zum Schallstück läuft.

Der Teil  $p^-(t)$  steht für die Schallwelle, die vom Schallstück zur Mundstück zurück läuft.

$$p(t) = p^+(t) + p^-(t)$$

---

---

# Waveguide Theorie

Das Rohr wird als eine Verzögerungseinheit modelliert, und zwar mit einem Hinweg, für  $p^+(t)$  und einem Rückweg für  $p^-(t)$ .

Am Eingang des Rohres liegt das Signal aus dem Mundstück an. Das Rohr führt das Signal zum Ausgang, aber das Signal wird nicht in die Luft insgesamt übertragen. Abhängig von der Geometrie des Ausgangs, wird ein Teil von  $p^+(t)$  im Rohr reflektiert. So entsteht die rückwärts laufende Schallwelle  $p^-(t)$ . Diese Schallwelle kommt zurück zum Mundstück und überlagert sich mit dem Druck aus dem Mund  $p_m$ , um eine neue Schallwelle  $p^+(t)$  zu erzeugen.

---

---

# Waveguide Theorie

Wenn die Länge des Klarinettenrohres  $L$  ist,  $c$  die Schallgeschwindigkeit in der Luft, dann wird die Dauer der Verzögerung auf

$$T = L/c$$

eingestellt. Aus der musikalischen Akustik hier ist es bekannt, daß ein Rohr der Länge  $L$  mit einem geschlossenen Ende (Mundstück) und einem offenen Ende (Schallstück) nur die Frequenzen

$$f_n = (2n + 1) c / (4L)$$

übertragen kann.

Das ist die Reihe der ungeraden harmonischen Teiltöne des Grundtones

$$f_0 = c / (4L)$$

Deshalb kann man ein Rohr der Länge  $L$  durch eine Verzögerungseinheit der Zeit  $T$  ersetzen.

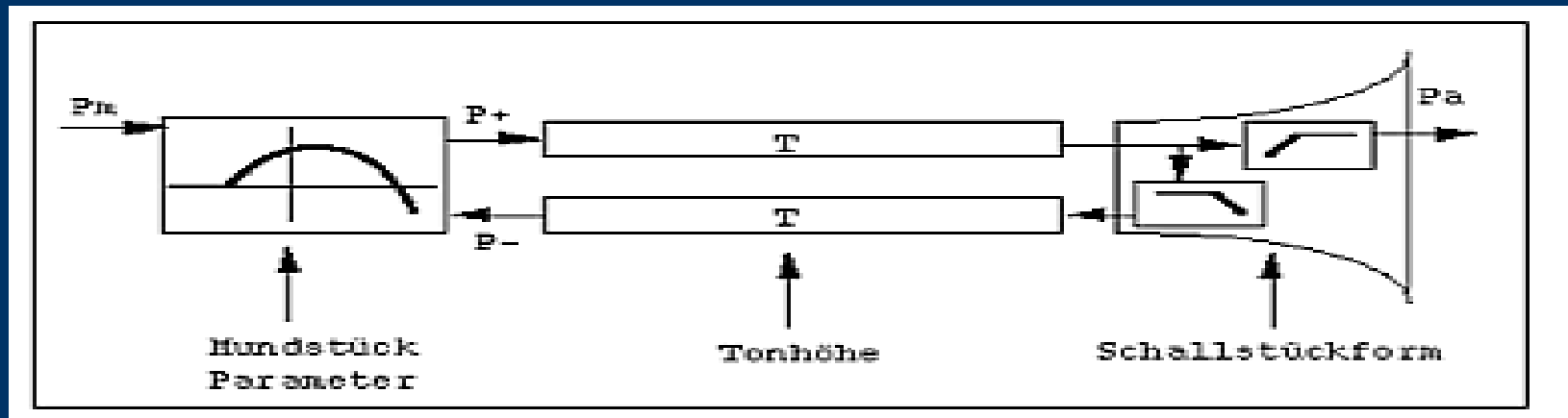
---

---

# Waveguide Theorie

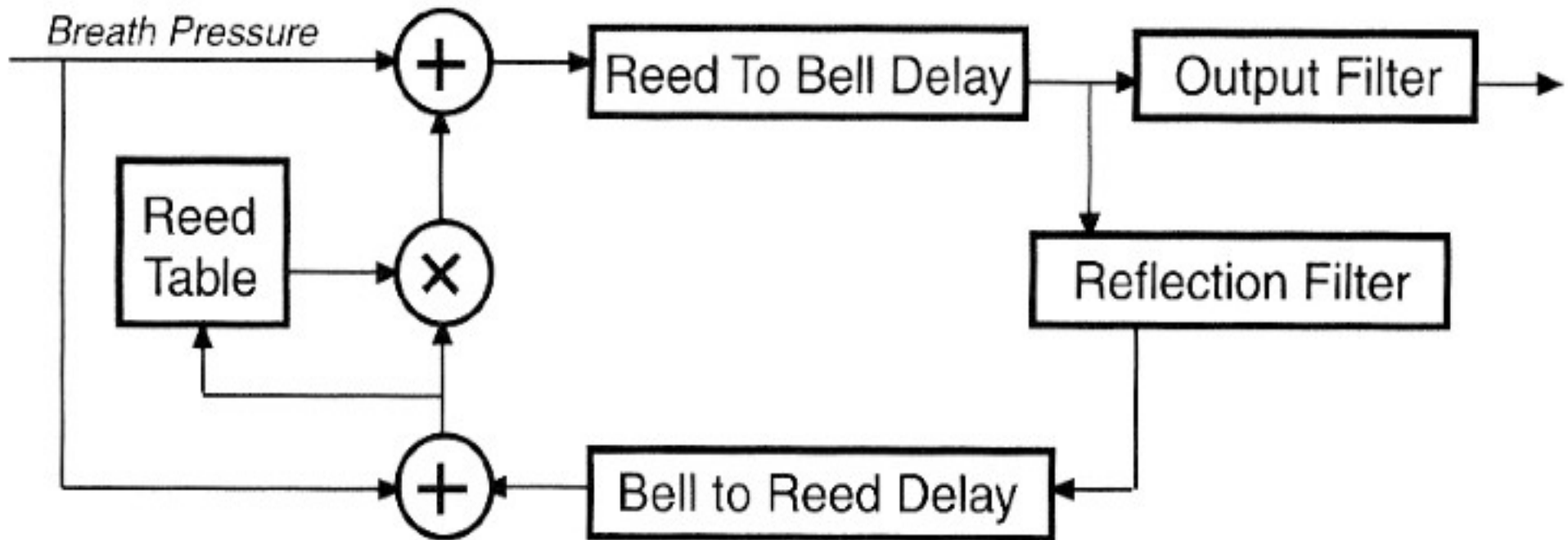
Wir haben gesagt, daß die Schallwelle  $p^-(t)$  aus einer Reflektion der vorwärts laufende Schallwelle  $p^+(t)$  am Schallstück entsteht. Diese Reflektion ist eigentlich frequenzabhängig.

Der Durchmesser des Schallstücks bestimmt eine Grenzfrequenz  $f_c$ . Unterhalb dieser Frequenz werden die Teiltöne ins Rohr reflektiert, oberhalb werden sie in die Luft übertragen. Wir können sagen daß der Schallstück aus einem Paar von Filtern besteht; ein Tiefpass Filter zum Rohr zurück, ein Hochpassfilter zur Luft hin.



# Waveguide Theorie

## Klarinette



**Figure 19.5** A block diagram of a waveguide clarinet.

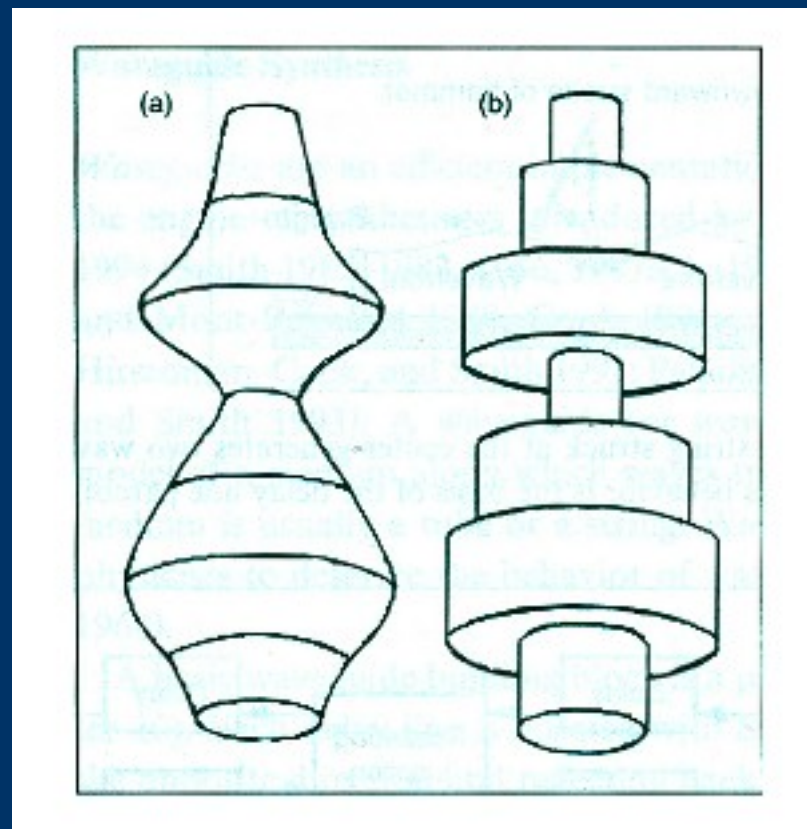
Reed = Mundstück

Bell = Trichter



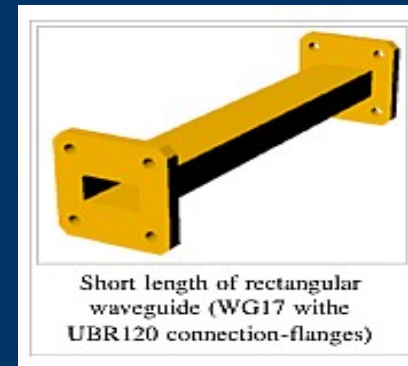
# Waveguide Theorie

Modellierung von Klangkörpern durch  
Annäherung/”Quantisierung” an Zylinder :

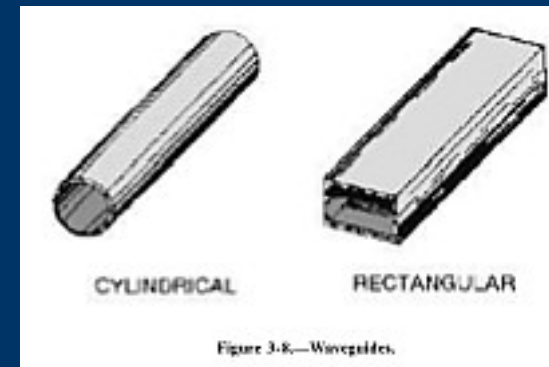


# verschiedene Waveguides für unterschiedliche Wellen

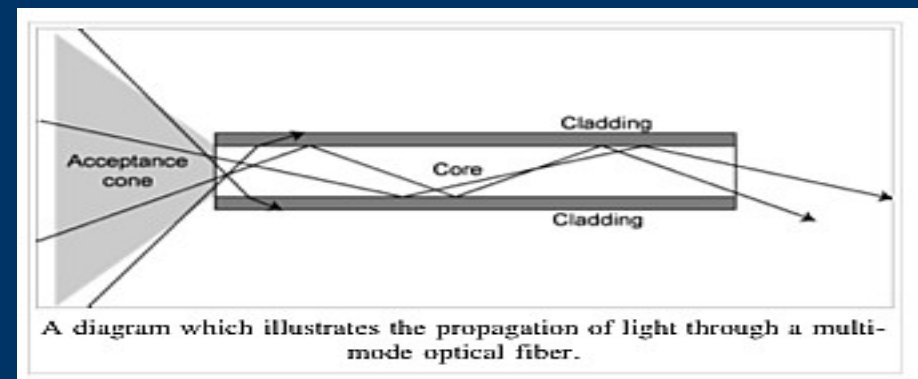
## 1-Electromagnetic waveguides (elektromagnetische Wellen)



## 2-Acoustic waveguides (Schallwelle)



## 3-Optical waveguides (Lichtwelle)



# verschiedene Modelle der Waveguides



Short length of rectangular waveguide (WG17 with UBR120 connection-flanges)

Rectangular Waveguide Well-Matched Tees and Hybrids

Waveguide Magic Tees						
WG Size	Optimum Freq Range (GHz)	Bandwidth%	VSWR Max E H	Max Unbalanced +/- dB	Standard Model No.	Dimension(MM)
WR430	1.90 - 2.30	10~20	1.2 , 1.5	0.25	CMI430-MTA-2-2-2-2	200×100×100
WR340	2.30 - 2.60	10~20	1.2 , 1.5	0.25	CMI340-MTA-2-2-2-2	185×92.5×73
WR284	2.90 - 3.20	10~20	1.2 , 1.5	0.25	CMI284-MTA-5-5-5-5	185×92.5×73
WR229	3.70 - 4.20	10~20	1.2 , 1.3	0.25	CMI229-MTA-2-2-2-2	120× 60× 60
WR187	4.40 - 5.00	10~20	1.2 , 1.3	0.25	CMI187-MTA-5-5-5-5	110× 55× 55
WR159	5.90 - 6.40	10~20	1.2 , 1.3	0.25	CMI159-MTA-2-2-2-2	120× 60× 55
WR137	5.90 - 6.40	10~20	1.2 , 1.3	0.25	CMI137-MTA-2-2-2-2	100× 50× 40
WR112	7.90 - 8.40	10~20	1.2 , 1.3	0.25	CMI112-MTA-5-5-5-5	100×50×40
WR102	8.50 - 9.80	10~20	1.2 , 1.3	0.25	CMI102-MTA-5-5-5-5	100×50×50
WR90	9.00 - 10.0	10~20	1.2 , 1.3	0.25	CMI90-MTA-5-5-5-5	80×40×40
WR75	13.5 - 14.5	10~20	1.2 , 1.5	0.25	CMI75-MTA-5-5-5-5	70×35×35
WR62	14.0 - 15.0	10~20	1.2 , 1.5	0.25	CMI62-MTA-5-5-5-5	70×35×35
WR42	20.0 - 23.0	10~20	1.2 , 1.5	0.25	CMI42-MTA-5-5-5-5	45×23×23
WR28	34.0 - 37.0	10~20	1.2 , 1.5	0.25	CMI28-MTA-5-5-5-5	32×20×20

Prominente Vertreter des  
Waveguideverfahrens sind das  
Institut CCRMA an der Stanford  
University

Die wichtigsten Vertreter dort sind  
Julius O. Smith III und Perry  
Cook.

*CCRMA : Center for Computer Research in Music and Acoustics*

---

---

# Rücktransformation

## ClariSaune

Die Rücktransformation eines einfachen auf Waveguides basierenden Klarinettenmodells.

Es handelt sich um ein extrem vereinfachtes und daher leicht und effizient zu

implementierendes Waveguidemodell einer „ClariSaune“, einer Art

Mischung aus Klarinette und Posaune.

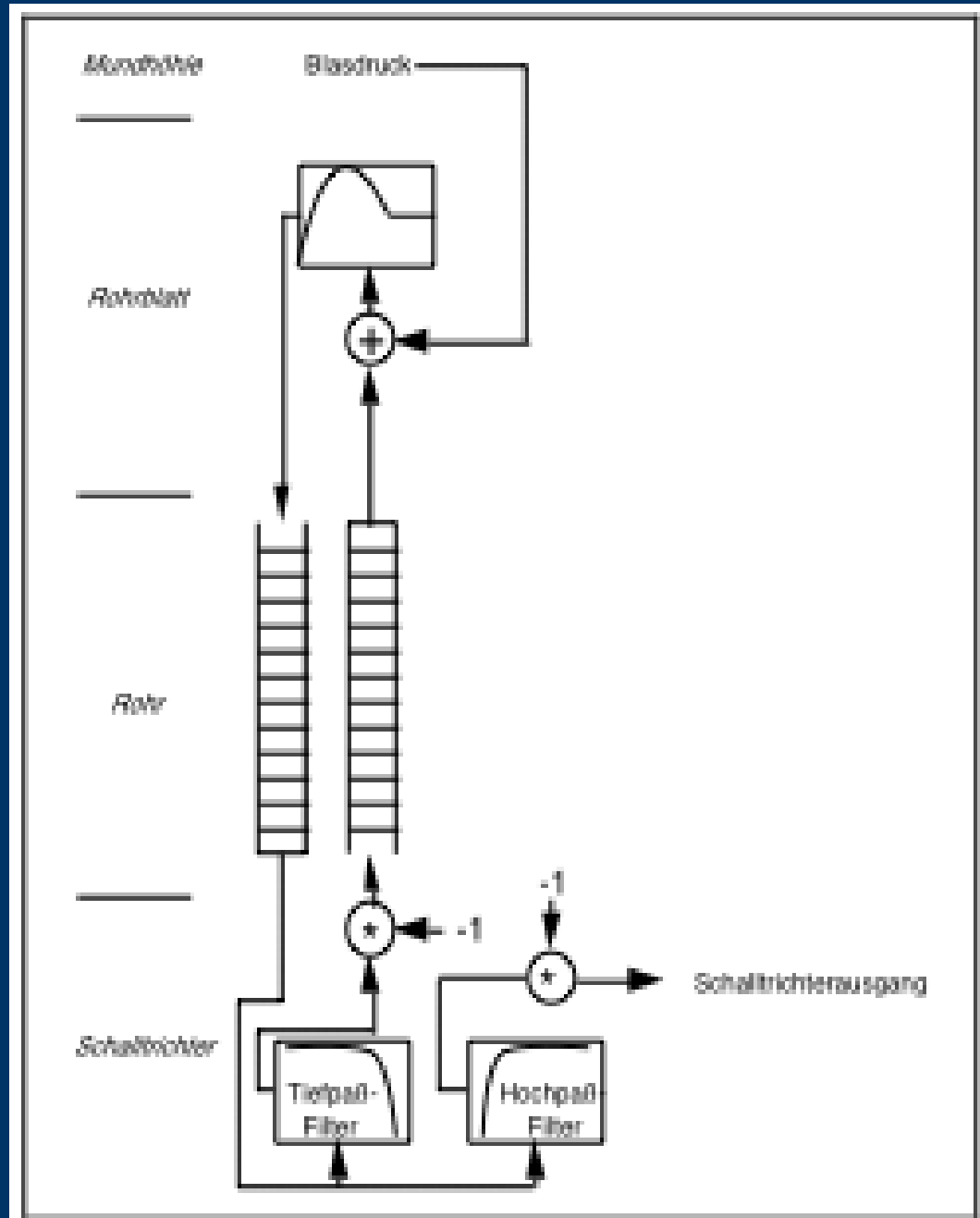


Abb. 9: Die (einfache) Clari-saune

## *Vorteile & Nachteile*

Der Hauptvorteil des Waveguide-Verfahrens ist die effiziente Berechenbarkeit im Fall homogener Medien.

Ein weiterer Vorteil ist die zumindest näherungsweise leicht zu bestimmende Frequenz des Grundmodus des Körpers.

Der Hauptvorteil ist allerdings auch ein Nachteil, bei häufigen Dichteschwankungen des Mediums, wie sie in realen Körpern zumindest in kleinem Maße immer vorhanden sind, wird das Verfahren etwa genauso aufwendig wie das Masse-Feder-Modell, ohne jedoch deren physikalische Anschaulichkeit zu besitzen.

---

---

# Modellierungsprobleme

Probleme treten in verschiedenen Formen auf. Schon bei der Theorie der Funktion des Doppelrohrblattes können sich die Physiker nicht einigen, was im Kanal des Rohrblattes eigentlich geschieht. Man ist sich zwar mehr oder weniger einig, daß durch die hohe Flußgeschwindigkeit durch den engen Spalt Bernoulli- Kräfte eine wesentlich höhere Rolle spielen als beim einfachen Rohrblatt, eine praktische Angabe für die Modellierung und Simulation gibt es jedoch nicht.

Die Modellierung der partiellen Verzögerung durch lineare Interpolation in Waveguides birgt praktische Probleme, da die hierzu notwendigen Filter in einigen Fällen eine höhere Dämpfung besitzen als im Modell notwendig ist.

---

---

# Csound Opcodes

pluck repluck wgpluck wgpluck2

wgbow wgbowedbar

wgbrass wgclar wgflute

---

---



# Csound Opcodes

Opcodes, die Waveguides verwendet,  
um ein Signal zu abändern,  
sind wie folgt:

streson

wguide1

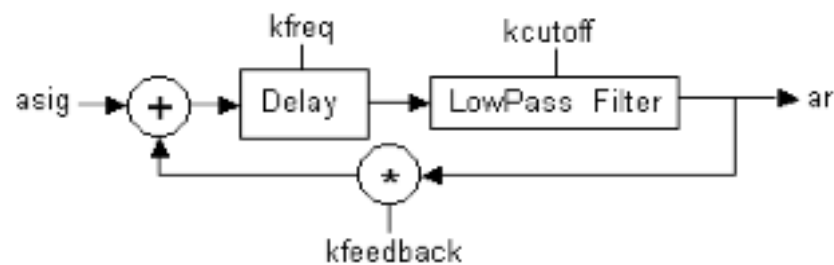
wguide2

---

---

# Csound Opcodes

ar **wguide1** asig, xfreq, kcutoff, kfeedback



ar **wguide2** asig, xfreq1, xfreq2, kcutoff1, kcutoff2, kfeedback1, kfeedback2

