



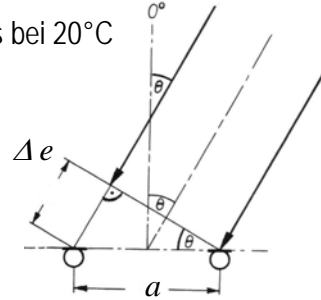
# Laufzeitdifferenz und Phasenverschiebung

Zwischen unseren Ohren erscheint als **interaurale Zeitdifferenz ITD** (Interaural Time Difference) eine Verzögerung von  $\Delta t = 0,5 \text{ ms}$  bei parallelem Schalleinfall aus seitlicher  $\theta = 53^\circ$ -Richtung - wobei von einem üblichen "wirksamen" Ohrabstand  $a = 21,5 \text{ cm}$  ausgegangen werden kann. Zur Berechnung benötigt man folgende Formeln:

Laufzeitdifferenz:  $\Delta t = \Delta e / c$   $c = 343 \text{ m/s}$  bei  $20^\circ\text{C}$

Wegdifferenz:  $\Delta e = a \cdot \sin \theta$

Laufzeitdifferenz:  $\Delta t = \frac{a \cdot \sin \theta}{c}$



Wirksamer Ohrabstand  $a = 21,5 \text{ cm}$   
 $\Delta t = 0,5 \text{ ms}$   
 $\theta = 53^\circ$

UdK Berlin  
 Sengpiel  
 06.2002  
 NH

## Differenz = Unterschied

Die interaurale Laufzeitdifferenz *ITD* ist eine wichtige Lokalisierungshilfe, denn man wird bei einer schräg von vorn einfallenden Schalldruckwelle bei tiefen Frequenzen zwischen beiden Ohren kaum einen Pegelunterschied messen. Jedoch wird der Schall am entfernteren Ohr ein wenig später eintreffen – wie bei diesem Beispiel hier. Also bei einer Schalleinfallrichtung von  $\theta = 53^\circ$  ist  $\Delta t = 0,5 \text{ ms}$ . Bei einem wirksamen Ohrabstand von  $a = 21,5 \text{ cm}$  und einem seitlichen  $90^\circ$ -Schalleinfall kann die erreichbare interaurale Laufzeitdifferenz maximal  $0,625 \text{ ms}$  betragen. Betrachten wir die Wirkung der Verzögerung von  $0,5 \text{ ms}$  bei einem Sinuston von  $2000 \text{ Hz}$ . Da bei  $2000 \text{ Hz}$  die Periodendauer  $T = 1/f$  genau  $0,5 \text{ ms}$  beträgt, erreicht das Signal hierbei exakt eine volle Schwingung oder  $\varphi^\circ = 360^\circ \Rightarrow 0^\circ$ . Deshalb kann die Phasenverschiebung bei der Richtungslokalisierung nicht helfen. Sehen wir mal, was bei Frequenzen unter  $2000 \text{ Hz}$  passiert. Offensichtlich ändert sich die interaurale Zeitdifferenz *ITD* nicht, denn die Schallgeschwindigkeit  $c$  ist nicht frequenzabhängig. Und bei tieferen Frequenzen kann die interaurale Pegeldifferenz *ILD* durch die Kopfbeugung höchstens noch geringer werden.

**Merke:** Es sind die Phasenverschiebungen  $\Delta \varphi$ , die bei Frequenzen unter  $2000 \text{ Hz}$  größere Bedeutung bei der Richtungslokalisierung des natürlichen Hörens haben.

Eine Verzögerung (Delay) geht immer einher mit frequenzabhängigen Phasenänderungen - wobei wir bei Sinus-signalen vom **Phasenwinkel** zwischen zwei Signalen sprechen können – **nicht aber bei Musiksignalen.** (!)

Der Vorteil der Rechnung mit der Laufzeitdifferenz ist, dass die Frequenzabhängigkeit nicht vorkommt. Der Zusammenhang zwischen dem Phasenwinkel  $\varphi_{\text{Bogen}}$  im Bogenmaß und der Laufzeitdifferenz  $\Delta t$  ist ( $2 \pi = 360^\circ$ ):

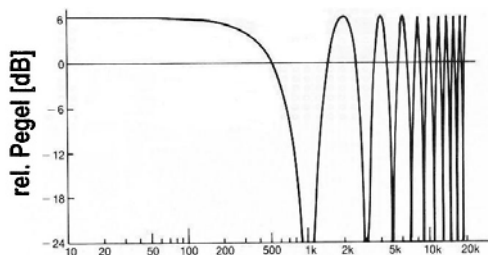
$\varphi_{\text{Bogen}} = \omega \cdot \Delta t = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \Delta t$   $\Delta t = \varphi_{\text{Bogen}} / \omega = \varphi_{\text{Bogen}} / 2 \cdot \pi \cdot f$   $c = 343 \text{ m/s}$   
 und in Grad:  $\varphi^\circ = 360 \cdot f \cdot \Delta t$   $\Delta t = \varphi^\circ / 360 \cdot f$   $\lambda = c / f$

Für ein festes Delay von  $\Delta t = 0,5 \text{ ms}$  ergibt sich folgende **frequenzabhängige Phasenverschiebung  $\varphi^\circ$** :

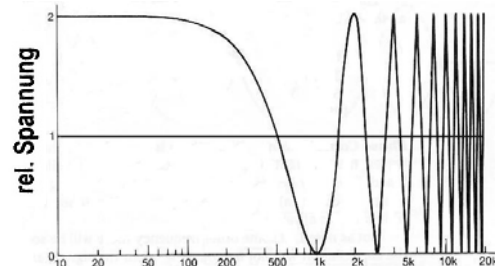
$\varphi^\circ$	$\varphi_{\text{Bogen}}$	$f$	$\lambda$
$360^\circ$	$2 \pi$	<b>2000 Hz</b>	$0,1715 \text{ m}$
$180^\circ$	$\pi$	<b>1000 Hz</b>	$0,3430 \text{ m}$
$90^\circ$	$\pi / 2$	<b>500 Hz</b>	$0,6860 \text{ m}$

$\varphi^\circ$	$\varphi_{\text{Bogen}}$	$f$	$\lambda$
$45^\circ$	$\pi / 4$	<b>250 Hz</b>	$1,372 \text{ m}$
$22,5^\circ$	$\pi / 8$	<b>125 Hz</b>	$2,744 \text{ m}$
$11,25^\circ$	$\pi / 16$	<b>65,5 Hz</b>	$5,237 \text{ m}$

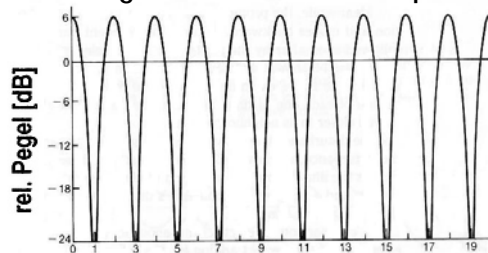
Nur wenn dieses unverzögerte und um  $0,5 \text{ ms}$  verzögerte Signal mit gleichem Pegel **elektrisch** addiert wird, erscheint durch die Phasenverschiebung der nachfolgend abgebildete Kammfiltereffekt, der beim **natürlichen Hören** zwischen beiden Ohren zwar vorhanden ist, aber gehörmäßig **nicht als störend erkannt wird**.



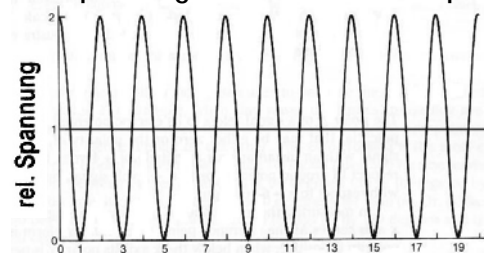
Frequenz in Hz - logarithmisch  
 rel. Pegel in Abh. von der Frequenz



Frequenz in Hz - logarithmisch  
 rel. Spannung in Abh. von der Frequenz



Frequenz in Hz - linear  
 rel. Pegel in Abh. von der Frequenz



Frequenz in Hz - linear  
 rel. Spannung in Abh. von der Frequenz