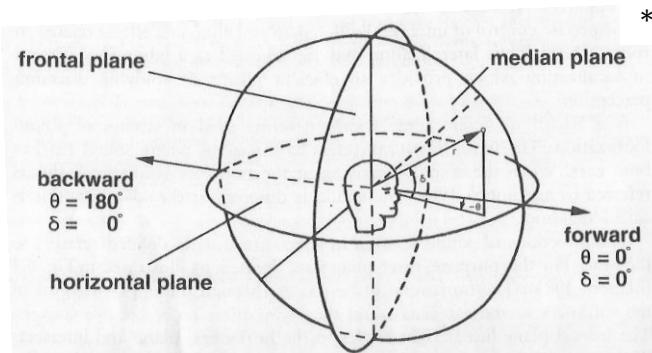


Binaurales Hören

In diesem Versuch betrachten wir die physikalischen Grundlagen des räumlichen Hörens.

Schallereignisse treten im dreidimensionalen Raum um uns herum auf - den Ort der Schallquelle könnten wir mit einem Ortsvektor \vec{r} beschreiben, wobei sich der Hörer im Koordinatenursprung befindet. Zweckmäßig sind Kugelkoordinaten, d.h. die Angabe zweier Winkel (in der horizontalen Ebene und azimutal) sowie des radialen Abstandes.

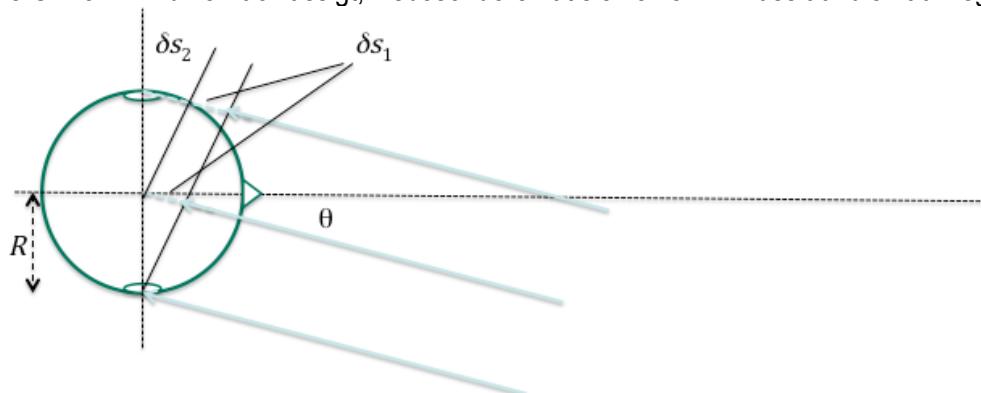


Das binaurale (=2-ohrige) Hören ermöglicht uns eine Richtungsorientierung und -filterung, also eine Aussage über den Winkel θ . Für diese Aussagen stehen zwei physikalische Informationen zur Verfügung:

- unterschiedliche Intensitäten der Schallwelle an beiden Ohren = Interaurale Intensitätsdifferenz oder -Pegeldifferenz IPD
- Laufzeitdifferenz auf dem Weg zwischen Ursprung und beiden Ohren = Interaurale Laufzeitdifferenz ILD

Wir betrachten zunächst die Laufzeitdifferenz - denn diese können wir modellhaft berechnen. Dazu kann folgende Modellvorstellung entwickelt werden:

- der Kopf ist eine Kugel mit Radius R . Mittlerer Kopfradius: $R = 8,075 \text{ cm}$.
- die Schallquelle ist weit entfernt vom Hörer (d.h. $r \gg R$) und die Schallwellen können am Kopf somit als ebene Wellen (Flächen gleicher Phase sind Ebenen, Ebenennormalen („Strahlen“) sind Parallelen und zeigen in Ausbreitungsrichtung) betrachtet werden.
- Es tritt keine Schallleitung durch den Kopf auf (keine Knochenleitung - realistisch, denn der Übergang von Luft in den Festkörper geschieht nur mit geringer Intensität).
- Die Ohrform wird vernachlässigt, insbesondere hat sie keinen Einfluss auf die Laufwege.



Dann ergibt sich aus den in der Abbildung ersichtlichen geometrischen Gegebenheiten: Der Schallweg zum abgewandten Ohr ist um die Summe $\delta s_1 + \delta s_2$ der Teilstrecken länger. δs_1 ist dabei die Dreiecksseite bis zum Kopf, δs_2 ist ein Stück des Kreisbogens entlang des Kopfes.

Für δs_1 gilt: $\sin \theta = \frac{\delta s_1}{R}$, gut abzulesen im unteren Dreieck im Kopf. δs_2 ist ein Ausschnitt eines Kreisbogens mit Radius R und Öffnungswinkel θ , d.h. $\delta s_2 = R \cdot \theta$.
 $\Rightarrow \delta s = \delta s_1 + \delta s_2 = R(\sin \theta + \theta)$.

Daraus folgt sofort die Laufzeitdifferenz, d.h. die Zeitdifferenz δt , um die die Schallwelle das abgewandte Ohr später erreicht als das der Schallquelle zugewandte:

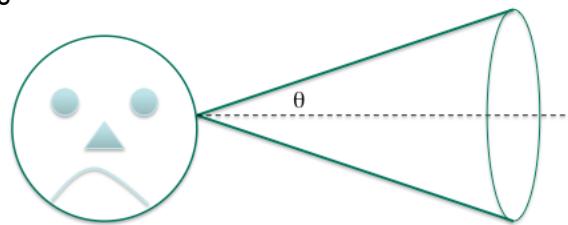
$$\delta t = \frac{1}{c} \delta s = \frac{R}{c} (\sin \theta + \theta)$$

Bei der Verwendung dieser Gleichung ist zu beachten:

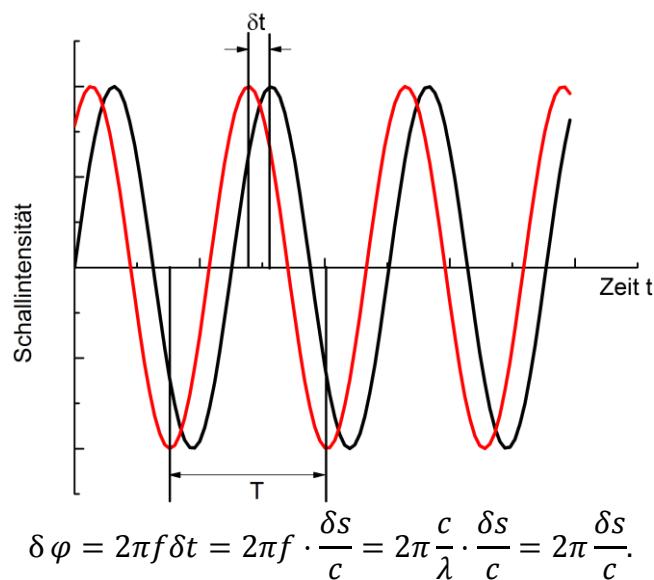
- Winkel sind unbedingt im Bogenmaß einzusetzen!
- Die Winkeldefinition berücksichtigt nicht, dass Schall von vorn und von hinten physikalisch gleichwertig ist, d.h. die gleichen Laufzeitdifferenzen hervorruft.

Die maximale Laufzeitdifferenz tritt bei einem Winkel $\theta = 90^\circ$ ein, dann ist $\delta s = 2R$!

Schallwellen, deren Quellen auf einer Kegeloberfläche mit Öffnungswinkel 2θ liegen, treffen an den Ohren mit gleicher Laufzeitdifferenz ein. Zwei derartige Schallquellen liegen auf dem so genannten *cone of confusion* - Auflösen der Quellen bzgl. ihrer Richtung allein aus den Laufzeitdifferenzen ist dann nur mit Kopfbewegung möglich.



Im Labor können wir computergestützt die Laufzeitunterschiede δt messen. Unser Gehirn wertet jedoch nicht die Zeitdifferenz δt selbst, sondern die Phasendifferenz $\delta \varphi$ der an beiden Ohren eintreffenden Signale aus.



Ein Problem tritt auf, wenn $\delta t > T$ bzw. $\delta s > \lambda$ wird - dann ist wegen der Periodizität der Sinus-Funktion die in φ enthaltene Information nicht mehr eindeutig.

Laufzeitdifferenzen sind für das Gehirn also für die Lokalisation des Ursprungs von Schallwellen mit großer Wellenlänge bzw. kleiner Frequenz („tiefe Töne“) uneingeschränkt nützlich. Das bedeutet nicht, dass für größere Frequenzen die Laufzeitunterschiede nicht unverändert vorhanden / messbar wären – die Verarbeitung im Gehirn macht diese Information jedoch schwer zugänglich.

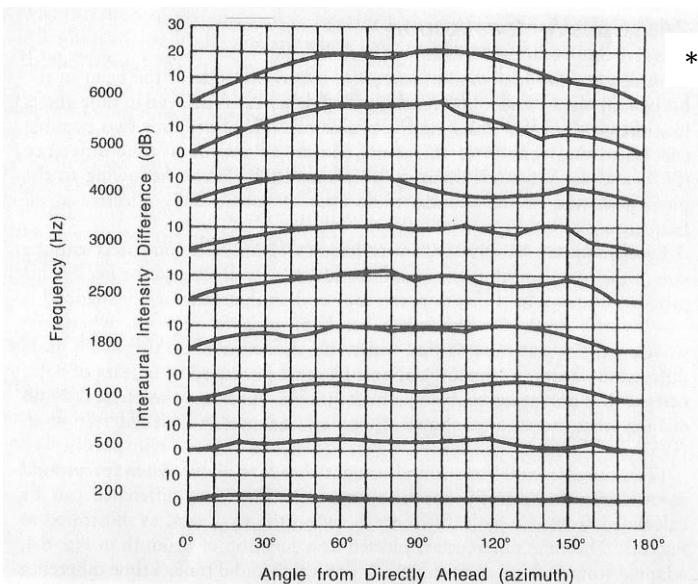
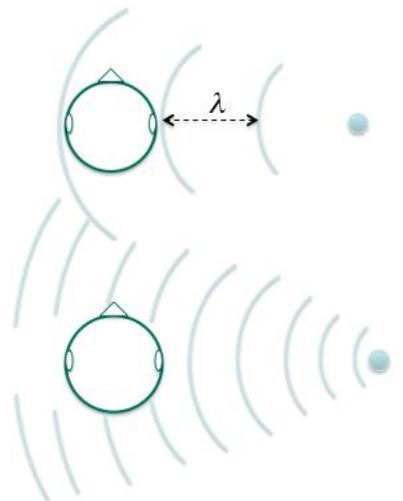
Überschlag für die Grenzfrequenz:

$$1 = f \cdot \delta t \text{ und } \delta t_m = 750 \mu\text{s} \Leftrightarrow f_m \approx 1300 \text{ Hz}$$

Für größere Frequenzen / kleinere Wellenlängen erhalten wir daher hauptsächl aus Pegeldifferenzen Informationen für das Richtungshören:

- Bei kleinen Frequenzen / großen Wellenlängen / tiefe Töne ist der Kopf ein Hindernis mit Abmessungen in der Größenordnung der Wellenlänge - durch Beugungerscheinungen greift die Schallwelle um den Kopf herum, es tritt kein Schallschatten auf.
- Bei großen Frequenzen / kleinen Wellenlängen / hohen Tönen entsteht dagegen ein Schallschatten, der Kopf bildet ein Hinderniss für die Schallwelle.

Abschätzen einer Grenzfrequenz: $\lambda = \frac{c}{f} = 2R \Rightarrow f = \frac{c}{2R} \approx 2 \text{ kHz.}$



Die Pegeldifferenzen sind nicht ohne weiteres analytisch angebar, sie hängen stark von der Frequenz ab. Im realen Ohr trägt auch die Ohrform in individueller Weise zu Pegeldifferenzen bei. Die Interpretation der Pegeldifferenzen ist erlernt.

Tatsächlich werden beide Informationen, ILD und IPD simultan zur Richtungsortung genutzt, eine scharfe Grenzfrequenz gibt es natürlich nicht.

Die beschriebenen Sachverhalte können mit einem Kunstkopf untersucht werden: Zwei Mikrofone werden in kopfähnlicher Situation positioniert und zeichnen getrennt auf. Damit ist es auch möglich, die ILD und IPD in Tonaufnahmen festzuhalten. Bei Wiedergabe mit Stereokopfhörern ist damit auch die die Information über die räumliche Anordnung der Schallquellen zum Aufnahmezeitpunkt hörbar. Ein Hörbeispiel für eine solche Kunstkopfaufnahme finden Sie bei der Aufgabenstellung verlinkt.

Physikalisches Praktikum

Binaurales Hören

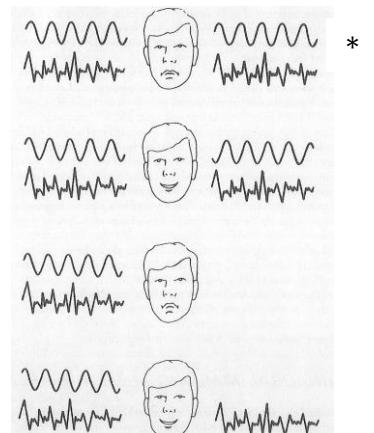
Entfernungsinformationen sind weder in ILD noch in IPD enthalten. Die Entfernungswahrnehmung beruht auf Intensität, Reflexionen, Spektrum, Luftabsorption - und Erfahrung. Bsp: hohe Frequenzen werden in Luft stärker absorbiert, daher werden Bass-dominante Geräusche in größerer Entfernung vermutet.

Das Kugelmodell des Kopfes lässt auch keine Beschreibung des Einflusses der Höhe über der Ohr-Ebene (Medianebene) zu. Individuelle Ohr- und Kopfform ändern jedoch das wahrgenommene Spektrum des Schallsignals (=Klangfarbe) in charakteristischer Weise je nach Erhebung über die Horizontalebene.

Vgl. dazu auch: Blauertsche Bänder, auch: richtungsbestimmende Frequenzbänder. Eine eintreffende Schallwelle kann je nach Frequenz mehr oder weniger sicher den Richtungen vorn / oben / hinten zugeordnet werden.

Auf der Basis von ILD und IPD können verschiedene Schallquellen diskriminiert werden. Sind Phasenlagen und/oder Pegelschwankungen dauerhaft zu unterscheiden, kann das Gehirn die Schallquellen trennen und selektiv der bewussten Wahrnehmung zuführen: Cocktailparty-Effekt.

Treten, z.B. durch defekte Kopfhörer, falsche Phasen- und/oder Pegelinformationen auf, führt dies auch zu falschen Richtungsortungen. Unangenehm wird die so genannte „In-Kopf-Lokalisation“ empfunden.



Die mit * markierten Abbildungen sind aus: B.C.J. Moore, *An Introduction to the psychology of hearing*, 4. Auflage, Kap. 6: Space perception, Academic Press San Diego 1997 entnommen.

Interaurale Pegeldifferenz in Abhängigkeit der Frequenz und des Kopfwinkels:
B. Seeber, *Untersuchung der auditiven Lokalisation mit einer Lichtzeigermethode*, Univ. München, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Diss. 2002 entnommen.

