

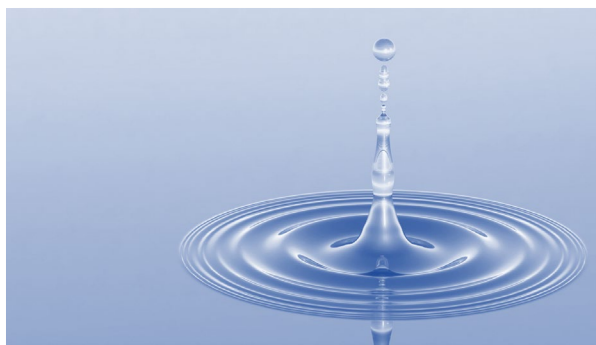
Über dieses Dokument

<i>Inhalt</i>	Das vorliegende Dokument ist die erste von drei Application Notes über räumliches Hören und binaurale Messtechnik. Das erste Kapitel erläutert die verschiedenen Mechanismen, die das menschliche Gehör nutzt, um eine Geräuschquelle zu lokalisieren. Im zweiten Kapitel wird die menschliche Außenohrübertragungsfunktion beschrieben.
	<ul style="list-style-type: none"> 1. Binaurale Signalverarbeitung _____ 1 2. Außenohrübertragungsfunktion _____ 4
<i>Zielgruppe</i>	Der nachfolgende Text richtet sich an Akustiker ¹ , die mehr über binaurale Signalverarbeitung, räumliches Hören und Schallquellenlokalisierung mit dem menschlichen Gehör erfahren wollen.
<i>Fragen?</i>	Sie haben Fragen? Wir freuen uns über Ihre Rückmeldungen! Fragen zum Inhalt dieses Dokument: Imke.Hauswirth@head-acoustics.com Technische Fragen zu unseren Produkten: SVP-Support@head-acoustics.com

Räumliches Hören

1. Binaurale Signalverarbeitung

<i>Einleitung</i>	<p>Das menschliche Gehör ist in der Lage, den Ursprungsort einer Geräuschquelle zu erkennen, Geräuschquellen aus unterschiedlichen Richtungen zu trennen und störende Geräusche teilweise zu unterdrücken. Dies alles ist vor allem deshalb möglich, weil der Mensch mit zwei Ohren hört.</p> <p>Das Hören mit zwei Ohren wird auch binaurales Hören genannt (zusammengesetzt aus den beiden lateinischen Wörtern „bi“ für zwei und „auris“ für Ohr). Beim binauralen Hören wertet das menschliche Gehör die beiden Ohrsignale aus und bildet daraus ein Hörereignis. Die Merkmale dieser Signale liefern dem Gehör Informationen über das eigentliche Geräusch sowie Informationen, die für die Lokalisierung, also der Bestimmung der Richtung und Entfernung, der Schallquelle benötigt werden.</p>
-------------------	--



¹ Im nachfolgenden Text wird verallgemeinernd das generische Maskulinum verwendet. Dies soll ausschließlich der besseren Lesbarkeit dienen. Selbstverständlich möchten wir gleichermaßen alle Geschlechter ansprechen bzw. einbeziehen.

Interaurale Unterschiede

In Abhängigkeit von der Position der Schallquelle können sich die Signale, die die beiden Ohren einer Person erreichen, unterscheiden. Die Unterschiede zwischen den Ohren werden auch interaurale Unterschiede genannt. Sie werden hervorgerufen durch:

ITD

Interaurale Laufzeitunterschiede (engl. Interaural Time Difference, ITD): Sie entstehen durch die unterschiedliche Weglänge, die der Schall zurücklegen muss, wenn die Schallquelle nicht exakt in der Medianebene (siehe Seite 4) liegt. Die unterschiedlichen Weglängen verursachen zeitliche Verzögerungen beim Auftreffen des Schalls auf das linke bzw. rechte Ohr. Siehe Beispiel in Abbildung 1: Schall von rechts erreicht das rechte Ohr eher als das linke Ohr

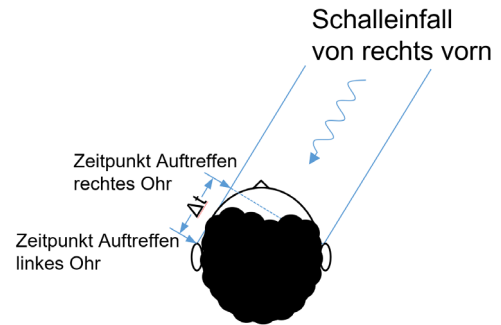


Abbildung 1: Laufzeitunterschied zwischen rechtem und linkem Ohr

ILD

Interaurale Pegelunterschiede (engl. Interaural Level Difference, ILD): Sie entstehen durch die akustische Abschattung des Schalls durch den Kopf. Durch die Abschattung ist der Schallpegel am von der Schallquelle abgewandten Ohr etwas niedriger. Siehe Beispiel in Abbildung 2: Schall von rechts besitzt am rechten Ohr eine höhere Lautstärke als am linken

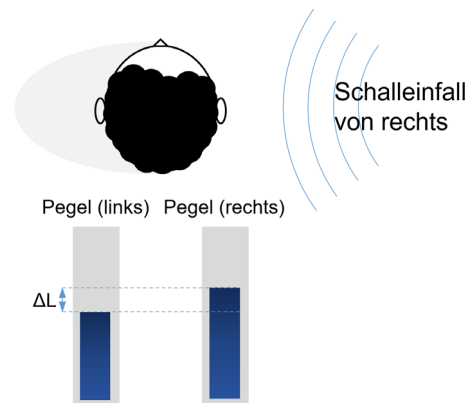


Abbildung 2: Pegelunterschied zwischen rechtem und linkem Ohr

Schallquellenlokalisation

Die Bestimmung der Position einer Schallquelle ist in allen Raumrichtungen möglich. Das heißt, der Hörer kann bestimmen, ob die Schallquelle rechts oder links von ihm bzw. vor oder hinter ihm liegt und auch, ob die Schallquelle bezogen auf seinen Kopf über oder unter ihm liegt. Zur Bestimmung der seitlichen Einfallsrichtung (von links, von rechts) analysiert das menschliche Gehör sowohl die interauralen Laufzeitunterschiede als auch die interauralen Pegelunterschiede. Obwohl diese Unterschiede nicht bewusst wahrgenommen werden, kann das Gehirn eine Richtung ableiten.

Spektralen Unterschiede

Für bestimmte Schalleinfallsrichtungen treten keine interauralen Unterschiede auf. So gelangt der Schall einer direkt vor einer Person befindlichen Schallquelle zeitgleich am linken und rechten Ohr an. Dennoch kann auch in diesen Situationen die Schalleinfallsrichtung bestimmt werden. Die Unterscheidung Oben/Unten bzw. Vorn/Hinten wird durch die richtungsabhängige Filterung des Schalls durch das Außenohr ermöglicht. Je nach Einfallsrichtung wird das eintreffende Signal unterschiedlich gefiltert, d. h., das Spektrum des Signals wird durch Beugung und Reflexion der einfallenden Schallwellen an Oberkörper, Schultern, Kopf und Ohrmuschel modifiziert (siehe nächstes Kapitel). Indem spezifische Verzerrungen bestimmten Richtungen zugeordnet werden, können diese spektralen Unterschiede vom Gehirn als Richtung interpretiert werden.

Auch die spektralen Unterschiede werden nicht bewusst wahrgenommen, sondern unterbewusst durch das Gehirn in eine Information über den Ursprungsort der Schallquelle übersetzt. Die Genauigkeit dieser Lokalisation ist allerdings geringer als die, die auf der Auswertung der interauralen Unterschiede basiert.

*Störschall-
unterdrückung*

Die binauralen Signalverarbeitungsprozesse ermöglichen aber nicht nur die Lokalisation. Darüber hinaus ist das menschliche Gehör mithilfe der beiden Ohrsignale in der Lage, einzelne Geräusche aus einem Signalgemisch zu selektieren, z. B. zur Verbesserung der Sprachverständlichkeit in störschallerfüllter Umgebung. So ist es z. B. möglich, sich auf einer Party trotz der vielen verschiedenen Geräuschquellen auf einen bestimmten Gesprächspartner zu konzentrieren und andere Geräusche auszublenken (sogenannter Cocktail-Party-Effekt). Andere Geräusche können unterdrückt werden (binaurale Störschallunterdrückung von bis zu 15 dB ist möglich).

*Direktschall und
Reflexionsschall*

Außerdem wird das Verhältnis zwischen Direktschall und Reflexionsschall ausgewertet. Trifft ein Schallsignal aufgrund von Reflexionen zeitverzögert aus unterschiedlichen Richtungen ein, wird trotzdem nur die Richtung des zuerst eingetroffenen Schallsignals wahrgenommen (Gesetz der ersten Wellenfront oder Präzedenzeffekt). Das heißt, auch wenn der Schall in einem Raum mit viel Nachhall von den Wänden und Fenstern reflektiert wird und somit von allen Seiten auf den Hörer trifft (siehe Abbildung 4), kann er den Ort der ursprünglichen Schallquelle bestimmen.

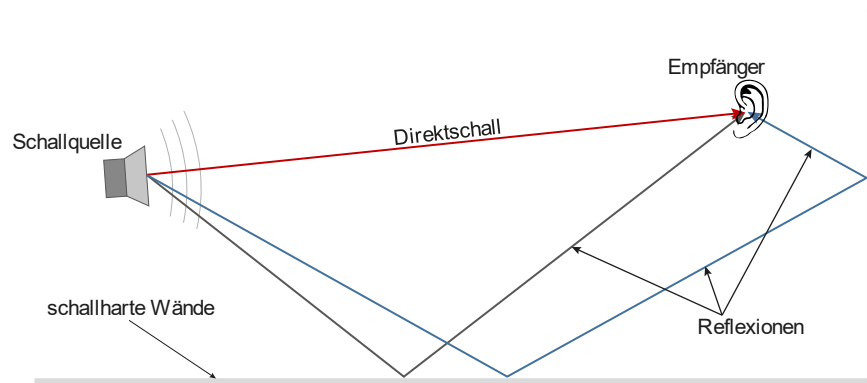


Abbildung 3: Direktschall und Reflexionen

2. Außenohrübertragungsfunktion

Zusammenfassung

Bevor der Schall auf das Trommelfell trifft, wird er durch den menschlichen Körper klanglich verändert (gefiltert). Zu den akustisch relevanten Körperteilen gehören der Oberkörper, die Schultern, der Kopf, die Ohrmuschel und der Ohrkanal. Die Veränderungen sind abhängig von der Richtung, aus der der Schall auftritt. Sie können mithilfe von Mikrofonen im Ohrkanal einer Versuchsperson gemessen und als Außenohrübertragungsfunktion dargestellt werden. Da jeder Körper und jedes Ohr individuell geformt sind, unterscheidet sich auch die Außenohrübertragungsfunktion von Mensch zu Mensch.

Kopfbezogenes Koordinatensystem

Kopfbezogenes Koordinatensystem

Im kopfbezogenen Koordinatensystem steht die **Medianebene** senkrecht auf der Ohrkanalachse, der Verbindungsstrecke zwischen den beiden Ohren. Die **Horizontalebene** liegt auf der Ohrkanalachse parallel zum Boden und senkrecht zur Medianebene. Die Auslenkung einer Schallquelle in der Horizontalebene wird durch den **horizontalen Schalleinfallswinkel** φ beschrieben (auch Azimutwinkel genannt). Der horizontale Schalleinfallswinkel ist positiv bei Auslenkung im Uhrzeigersinn. Eine Erhebung der Schallquelle aus der Horizontalebene wird über den **vertikalen Schalleinfallswinkel** δ angegeben (auch Elevationswinkel genannt). Der vertikale Schalleinfallswinkel ist positiv bei Auslenkung nach oben. Der Ort einer Schallquelle bezogen auf den Ursprung des kopfbezogenen Koordinatensystems lässt sich durch die folgenden Angaben definieren:

- Entfernung r
- horizontaler Schalleinfallswinkel φ
- vertikaler Schalleinfallswinkel δ

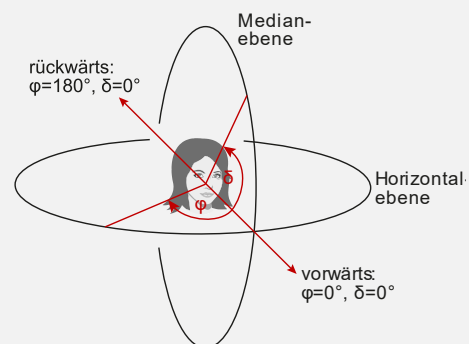


Abbildung 4: Kopfbezogenes Koordinatensystem

Richtungsabhängige Filterung

Das Außenohr² prägt den Schallsignalen ein von der Einfallsrichtung abhängiges signifikantes Muster auf. Es ist somit ein richtungsabhängiges Filter, das den Schalldruckpegel in Abhängigkeit von Schalleinfallswinkel und Frequenz um +15 dB bis -30 dB verändert.

HRTF

Die Außenohrübertragungsfunktion (engl. head related transfer function, HRTF) zeigt den Schalldruck an einem Referenzpunkt in Anwesenheit des Außenohrs bezogen auf den Schalldruck im ungestörten Schallfeld. Die Außenohrübertragungsfunktion wird immer in Bezug auf eine bestimmte Schalleinfallsrichtung angegeben (z. B. Schalleinfall direkt von vorn auf Höhe des Ohrkanals). Aus diesem Grund gibt es für jede Person viele verschiedene Außenohrübertragungsfunktionen. Die Außenohrübertragungsfunktionen können in einem reflexionsarmen Raum mithilfe eines Messmikrofons gemessen werden, das im Ohrkanal einer Versuchsperson platziert ist.

² Mit dem Begriff „Außenohr“ ist im Folgenden eine Zusammenfassung von allen akustisch wirksamen Parametern gemeint, bestehend aus Oberkörper, Schulter, Kopf, Ohrmuschel und Ohrkanal.

Beispiel einer Außenohrübertragungsfunktion

Außerdem wird für die Messung eine Schallquelle benötigt, die sich an einer definierten Position befindet (bezogen auf die Versuchsperson).

Abbildung 5 zeigt Beispiele von gemessenen Außenohrübertragungsfunktionen einer individuellen Person. Auf der x-Achse ist die Frequenz aufgetragen und auf der y-Achse der Schalldruckpegel. Das Diagramm beinhaltet vier Kurven, die die frequenzabhängige Außenohrübertragungsfunktion des linken Ohres einer Versuchsperson für vier verschiedene horizontale Schalleinfallswinkel φ darstellen:

- $\varphi = 0^\circ$: Schalleinfall von vorn
- $\varphi = -90^\circ$: Schalleinfall von links
- $\varphi = 180^\circ$: Schalleinfall von hinten
- $\varphi = 90^\circ$: Schalleinfall von rechts

Die dargestellten Kurvenverläufe unterscheiden sich sehr stark, d. h. der Schall wird je nach Schalleinfallrichtung unterschiedlich stark durch das Außenohr gedämpft bzw. verstärkt. Mit steigender Frequenz nehmen auch die Veränderungen zu.

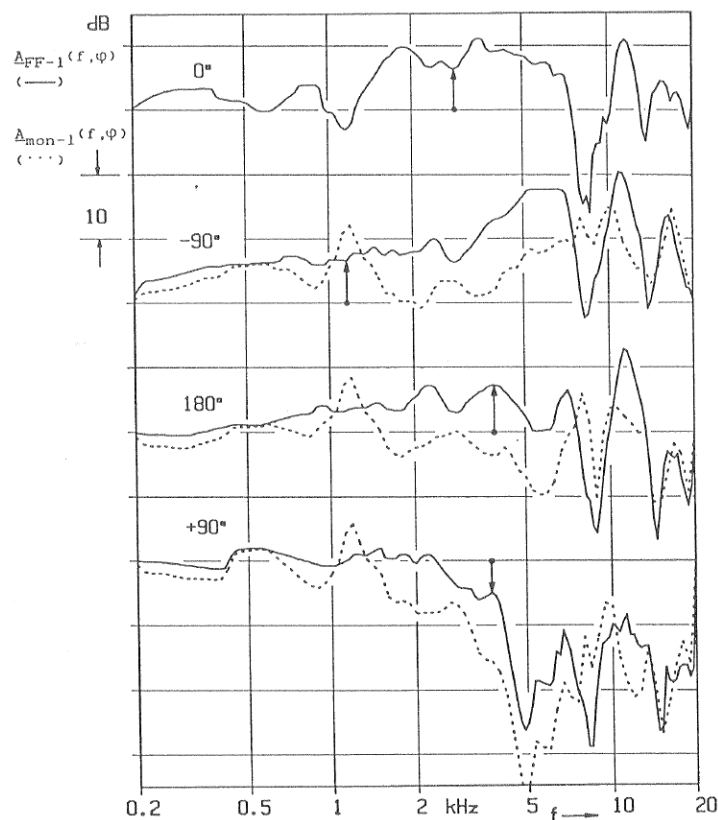


Abbildung 5: Gemessene Außenohrübertragungsfunktion (durchgezogene Linie: Freifeld, gestrichelte Linie: monaurale Übertragungsfunktion) des linken Ohres einer Versuchsperson für die vier Hauptschalleinfallrichtungen in der Horizontalebene (Genuit: Ein Modell zur Beschreibung von Außenohrübertragungseigenschaften, Dissertationsschrift, 1984)

Einfluss der menschlichen Geometrie

Die Übertragungsfunktion des menschlichen Außenohres steht in einem funktionalen Zusammenhang zur äußeren Geometrie des Menschen. Sie wird durch Reflexionen und Beugungen am Oberkörper, an den Schultern, am Kopf und an der Ohrmuschel sowie durch Resonanzen in der unteren Ohrmuschelvertiefung (Cavum conchae, siehe Abbildung 6) und im Gehörgang (Ohrkanal) determiniert.

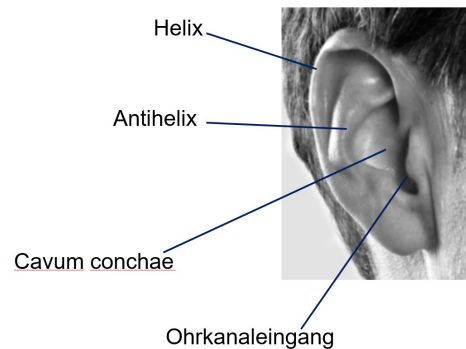


Abbildung 6: Aufbau der Ohrmuschel

Da jedes Ohr und jeder Körper individuell geformt sind, ist der Verlauf der Außenohrübertragungsfunktion von Person zu Person unterschiedlich ausgeprägt. Aus diesem Grund kann es selbst bei den Außenohrübertragungsfunktionen des linken und rechten Ohres einer Person zu Unterschieden kommen.

*Akustisch relevante
Körperteile*

Im Folgenden sind die qualitativen Veränderungen aufgelistet, die durch die verschiedenen, akustisch relevanten Körperteile verursacht werden:

- Die Kombination **Oberkörper und Schulter** beeinflusst speziell in der Medianebene das Richtungs- und Entfernungshören. Der Einfluss entsteht durch die Überlagerung der direkt einfallenden Schallwelle im Ohrkanaleingang mit einer von Oberkörper bzw. Schulter reflektierten Schallwelle und ist im tieffrequenten Bereich besonders deutlich.
- Der **Kopf** und insbesondere die **Position des Ohrkanaleinganges** am Kopf bestimmen signifikant die Richtcharakteristik bei Schalleinfall aus der Horizontalebene. Die Ursache dafür sind Reflexionen sowie Beugungs- und Abschattungseigenschaften. Bei Schalleinfall aus der Medianebene dagegen übt der Kopf einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Außenohrübertragungsfunktion aus.
- Die **Helix** bestimmt für höhere Frequenzen (>3 kHz) die Richtcharakteristik in der Horizontalebene.
- Die Reflexion an der **Antihelix** beeinflusst im Spektralbereich oberhalb von 6 kHz die Richtcharakteristik in der Medianebene.
- Das Spektrum des einfallenden Schalls wird zusätzlich noch durch anatomische Faktoren beeinflusst, die für alle Schalleinfallsrichtungen identisch und somit richtungsunabhängig sind. Dazu gehören der **Ohrkanal** und die **Cavum-conchae-Höhlung**. Der Ohrkanal und die Cavum-conchae-Höhlung beeinflussen die Struktur der Außenohrübertragungsfunktion bei höheren Frequenzen durch ihre Resonanzeigenschaften.

➔ Weiter zur [zweiten Application Note über binaurale Aufnahmetechnik](#)