

Pseudorauschen gewonnenen Ergebnisse waren im frontalen Bereich (AZ -90° bis $+90^\circ$) nahezu identisch mit den durch das weiße Rauschen gewonnenen Ergebnissen. Das Pseudorauschen wies jedoch einen besseren Signal-Rausch-Abstand im hinteren Bereich auf. Als Fenstertyp für die FFT-Analyse wurde für das Pseudorauschen das Rechteckfenster mit einer Überlappung von 99% genutzt, für das weiße Rauschen das Hamming-Fenster. Mittels der FFT-Analyse wurde die spektrale Zusammensetzung der digitalisierten Zeitsignale (Freifeld- oder Ohrsignal) ermittelt und dargestellt. SpectraLAB gibt die Intensitäten der Frequenzen in einem Signal sowohl als Amplitudenwerte als auch als Schalldruckpegel an. In dieser Arbeit wurde ausschließlich mit dem Schalldruckpegel (in dB) gearbeitet. Die Schalldruckpegelwerte der Frequenzen aus den Spektren der Freifeld- oder Ohrsignale wurden im ASCII-Format zur weiteren Bearbeitung in Excel-Tabellen transportiert. Dort wurde für jedes Signal der Pegelwert der entsprechenden Frequenz zugeordnet. Im Anschluß wurden die Freifeldübertragungsfunktionen, die monauralen Übertragungsfunktionen und die interauralen Übertragungsfunktionen für jedes Signal berechnet.

Die Freifeldübertragungsfunktion ist als Verhältnis zwischen dem Schalldruck der Frequenzen im Ohrsignal und dem Schalldruck der analogen Frequenzen im Freifeldsignal definiert:

$$\ddot{U}F = \frac{\hat{p}_{Ohr}}{\hat{p}_{Freifeld}}$$

Das logarithmische Verhältnis der Schalldrücke kann durch folgende Gleichung ausgedrückt werden: $\Delta L_{\hat{p}}[dB] = 20 \log \frac{\hat{p}_{Ohr}}{\hat{p}_{Freifeld}} = 20 \log \hat{p}_{Ohr} - 20 \log \hat{p}_{Freifeld} = L\hat{p}_{Ohr}[dB] - L\hat{p}_{Freifeld}[dB]$

Daher wurde in dieser Arbeit die Freifeldübertragungsfunktion als Differenz der Schalldruckpegelwerte (in dB) jeder einzelnen Frequenz zwischen Freifeldsignal und Ohrsignal bestimmt. Abb. 3-11 zeigt die spektrale Zusammensetzung eines Freifeld- und Ohrsignals (A und B) und daraus berechnete Freifeldübertragungsfunktion (C).

Die monaurale Übertragungsfunktion ist als Verhältnis zwischen dem Schalldruck der Frequenzen im Ohrsignal aus einer Schalleinfallrichtung und dem Schalldruck der analogen Frequenzen im Ohrsignal aus einer Bezugsschalleinfallrichtung definiert. Als Bezugssignal dient das Ohrsignal bei der Schalleinfallrichtung aus dem Azimut von 0° und der Elevation von 0° .

$$monaurale\ddot{U}F(x)[dB] = 20 \log \frac{\hat{p}_{ohr(x)}}{\hat{p}_{ohr(0^\circ)}} = 20 \log \hat{p}_{ohr(x)} - 20 \log \hat{p}_{ohr(0^\circ)}$$

Im Gegensatz zu den in der Literatur bekannten Arbeiten wurde in dieser Arbeit bei der Berechnung der monauralen Übertragungsfunktionen statt dem Verhältnis der Ohrsignale das Verhältnis der entsprechenden Freifeldübertragungsfunktionen genutzt. Dies hat aber keinen Einfluss auf die berechnete monaurale Übertragungsfunktion, da das Verhältnis der Ohrsignale gleich dem Verhältnis der entsprechenden Freifeldübertragungsfunktionen ist. Dadurch wurde die monauralen Übertragungsfunktionen durch die Differenz der Pegeldifferenzen in den Freifeldübertragungsfunktionen und der Bezugsfreifeldübertragungsfunktion (AZ 0°) ermittelt (gezeigt in Abb. 3-11 D, E und F).

$$\text{monaurale}\ddot{U}F(x)[dB] = \text{Freifeld}\ddot{U}F(x)[dB] - \text{Freifeld}\ddot{U}F(AZ : 0^\circ)[dB]$$

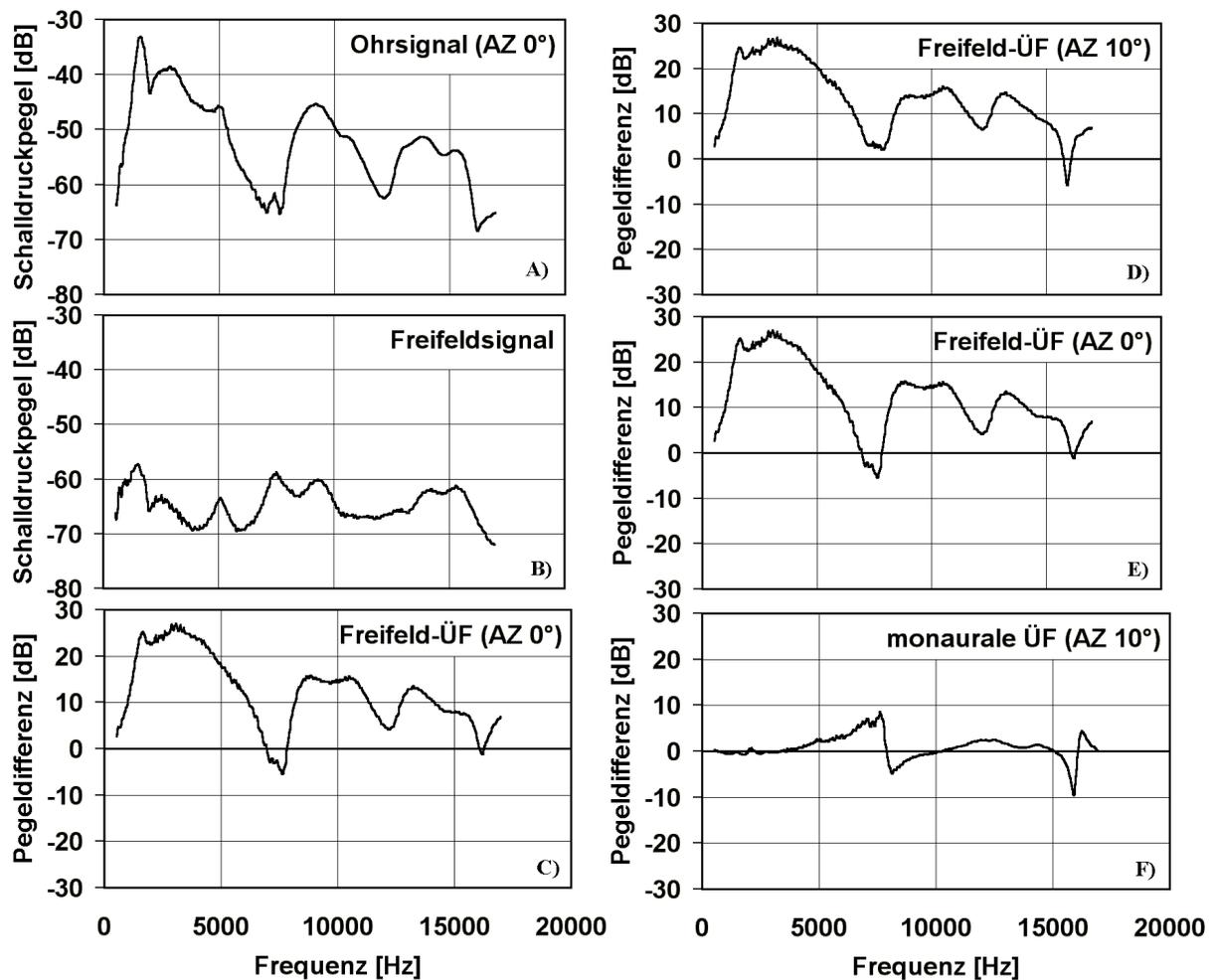


Abb. 3-11: spektrale Zusammensetzung eines Freifeld- und Ohrsignals und die daraus berechneten Übertragungsfunktionen (ÜF); Werte stammen vom linken Außenohrmodell von Tier 1: A bis C – Berechnung der Freifeld-ÜF bei Schalleinfall aus dem Azimut (AZ) von 0°(C) = die Schalldruckpegel jeder Frequenz des Freifeldsignals (B) wurden von den Schalldruckpegeln der analogen Frequenzen des Ohrsignals(A) subtrahiert (A-B=C); D bis F – Berechnung der monauralen ÜF bei Schalleinfall aus dem Azimut von 10° (F) = Die Pegeldifferenzen jeder Frequenz in der Freifeld-ÜF des Bezugssignals (E) wurde von den Pegeldifferenzen der analogen Frequenzen in der Freifeld-ÜF vom AZ 10° (D) subtrahiert (D-E=F)

Die interaurale Übertragungsfunktion wurde als binaurale Pegeldifferenz der Schalldrücke jeder Frequenz in den beiden Gehörgängen an einem analogen Messpunkt bei Schalleinfall aus der gleichen Richtung bestimmt. Dabei wurde die Differenz der Schalldrücke zwischen dem ipsilateralen und dem contralateralen Ohrsignal bei der Schalleinfallsrichtung (x) berechnet.

$$\text{interaurale}\ddot{U}F(x)[dB] = 20 \log \frac{\hat{P}_{\text{ipsilateralOhr}(x)}}{\hat{P}_{\text{contralateralOhr}(x)}} = 20 \log \hat{P}_{\text{ipsilateralOhr}(x)} - 20 \log \hat{P}_{\text{contralateralOhr}(x)}$$

Auch bei der Berechnung der interauralen Übertragungsfunktion (Abb. 3-12 C) wurde in dieser Arbeit mit den entsprechenden Freifeldübertragungsfunktionen (Abb. 3-12 B und Abb. 3-12 A) statt mit den Ohrsignalen gearbeitet.

$$\text{interaurale}\ddot{U}F(x)[dB] = \text{Freifeld}\ddot{U}F(\text{ipsilateral}_x)[dB] - \text{Freifeld}\ddot{U}F(\text{contralateral}_x)[dB]$$

Bei absoluter Symmetrie der anatomischen Strukturen muss die interaurale Übertragungsfunktion beim Azimut von 0° gleich Null sein. Da diese Symmetrie des Kunstkopfes und der Außenohrmodelle sowie keine absolute gleiche Ausrichtung der Ohrposition gegeben waren, traten auch bei Azimut von 0° interaurale Pegeldifferenzen auf. Somit besteht die gemessene interaurale Übertragungsfunktion aus einer konstanten, richtungsunabhängigen Komponente, beschrieben durch die interaurale Übertragungsfunktion bei Azimut von 0° , und einer richtungsabhängigen Komponente (Abb. 3-12 F). Diese wurde durch Subtraktion der konstanten, richtungsunabhängigen Komponente (Abb. 3-12 E) von der entsprechenden interauralen Übertragungsfunktion (Abb. 3-12 D) berechnet.

$$\text{richtungsabhängige, interaurale}\ddot{U}F(x)[dB] = \text{interaurale}\ddot{U}F(x)[dB] - \text{interaurale}\ddot{U}F(AZ : 0^\circ)[dB]$$

Bedingt durch den Frequenzgang des Systems, der Signalart und des Analysesystems wurde der im Ergebnisteil dargestellte Frequenzbereich auf 500 Hz bis 17 kHz begrenzt. Im Frequenzbereich über 17 kHz war der Signal-Rausch-Abstand nicht mehr ausreichend und es kam zu Rechenungenauigkeiten durch das Analyseprogramm. Die Freifeldübertragungsfunktion und die monaurale Übertragungsfunktion wurden für die Schalleinfallsrichtungen von -180° bis $+180^\circ$ berechnet. Die Berechnung der interauralen Übertragungsfunktion erfolgte nur für die Schalleinfallsrichtungen von 0° bis 180° (ipsilaterale Seite). Der frontale Quadrant erstreckt sich von -45° bis $+45^\circ$, der ipsilaterale Quadrant von $+45^\circ$ bis $+135^\circ$, der hintere Quadrant von $+135^\circ$ bis -135° und der contralaterale Quadrant von -45° bis -135° . Die Ergebnisse wurden entsprechend den verschiedenen Schalleinfallsrichtungen in Form von Punkt- oder 3D-Diagrammen dargestellt.

Durch die 3D-Darstellung kann Frequenz, Pegeldifferenz und Schalleinfallrichtung gleichzeitig betrachtet werden. Die verschiedenen Graunuanzen zeigen die Änderung der Pegeldifferenz in 10dB-Abstufung an. Die Änderung der Pegeldifferenzen einzelner ausgesuchter Frequenzen in den Übertragungsfunktionen in Abhängigkeit von der Schalleinfallrichtung wurden in Form von Netzdiagrammen dargestellt.

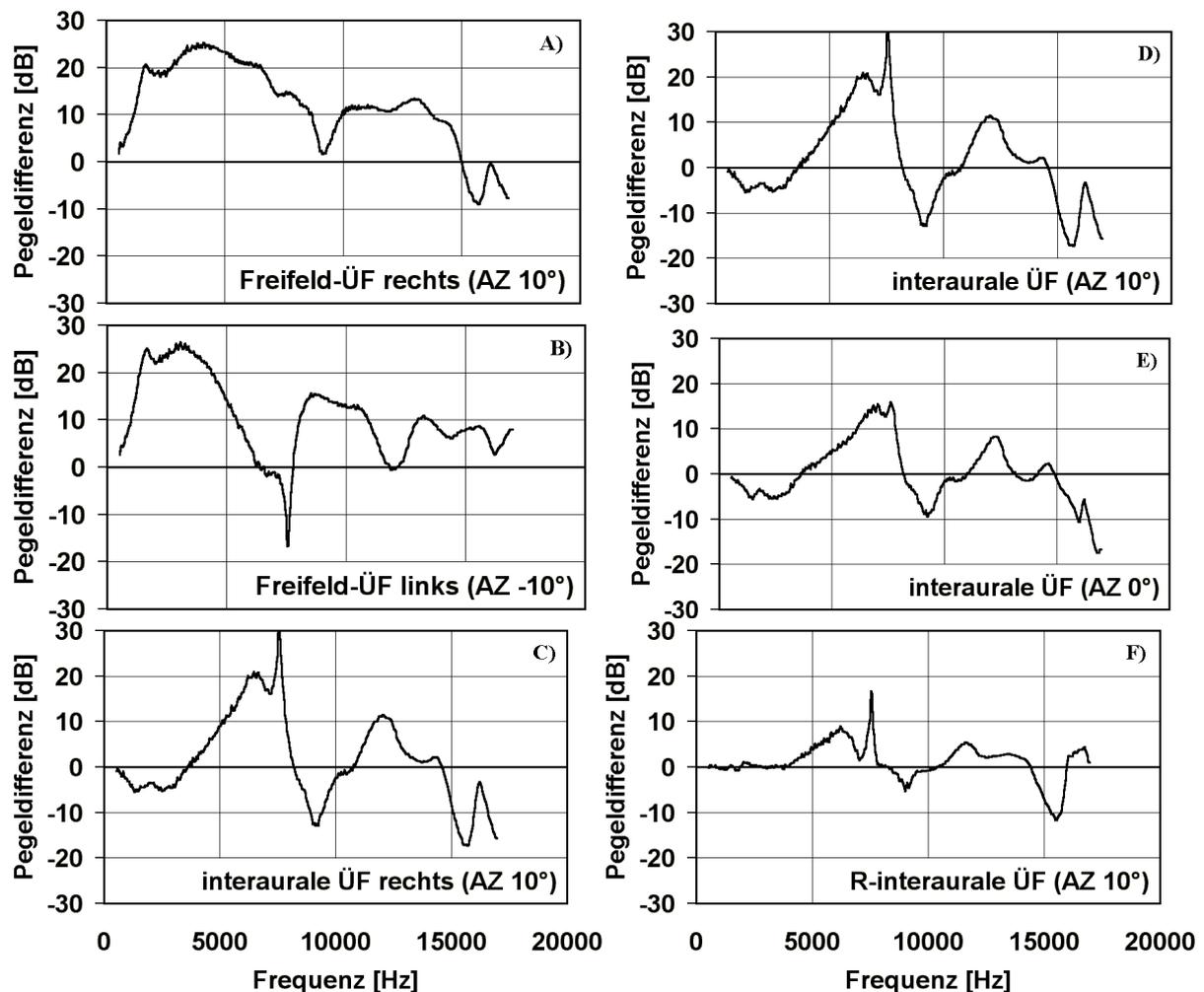


Abb. 3-12: Berechnung der interauralen Übertragungsfunktion (ÜF) und seiner richtungsabhängigen Komponente; die Werte stammen vom rechten und linken Außenohrmodell von Tier 1: A bis C – Berechnung der interauralen ÜF für das rechte Modell bei Schalleinfall aus dem Azimut (AZ) von 10° (C) = Die Pegeldifferenzen jeder Frequenz in der Freifeld-ÜF des contralateralen Modells (B) wurde von den Pegeldifferenzen der analogen Frequenzen in der Freifeld-ÜF des ipsilateralen Modells (A) subtrahiert ($A-B=C$); D bis F – Berechnung der richtungsabhängigen Komponente (R-interaurale ÜF) bei Schalleinfall aus dem Azimut von 10° (F) = Die Pegeldifferenzen jeder Frequenz in der interauralen ÜF beim AZ von 0° (E – konstante, richtungsunabhängige Größe) wurde von den Pegeldifferenzen der analogen Frequenzen in der interauralen ÜF beim AZ von 10° (D) subtrahiert ($D-E=F$)

Die akustischen Übertragungsfunktionen der Außenohre zeigen in Abhängigkeit von der Schalleinfallrichtung und der Frequenz des Signals spektrale Merkmale in Form von Gipfeln

(Peaks), Einbrüchen (Notches) und Plateaus. Als Einbruch wird ein Minimum definiert, das von mindestens 5 dB hohen Flanken eingefasst ist. Als prominente Einbrüche werden in dieser Arbeit Minima bezeichnet, die in ihrer Gestalt stark ausgeprägt sind und ein dominierendes Merkmal in der Übertragungsfunktion darstellen. Eine positive Pegeldifferenz ist gleichbedeutend mit einer Verstärkung des Schalldrucks im Verhältnis zum Bezugssignal, eine negative entsprechend mit einer Abschwächung. In Anlehnung an Middlebrooks & Pettigrew [1981], Musicant et al. [1990] und Chen et al. [1995] wird das spektrale Maximum und das räumliche Maximum bestimmt. Das spektrale Maximum (spectral maximum) gibt Auskunft über die am stärksten verstärkte Frequenzkomponenten im gesamten betrachteten Frequenzbereich bei einer gegebenen Schalleinfallrichtung im Bezug zum Freifeld (Abb. 3-13, linke Abbildung), wohin gehend das räumliche Maximum (spatial maximum) für eine einzelne Frequenz die Schalleinfallrichtung liefert, in der diese Frequenz ihren größten Druckgewinn besitzt (Abb. 3-14, linke Abbildung).

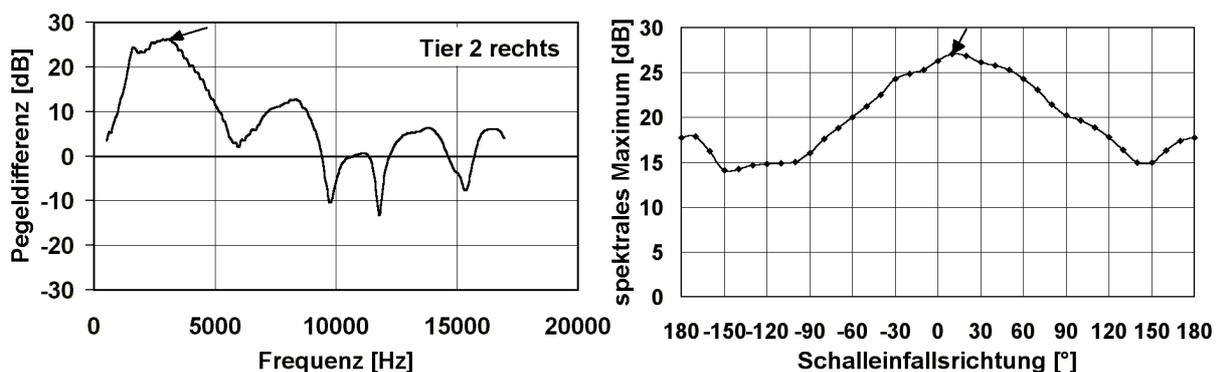


Abb. 3-13: Das spektrale Maximum: der Pfeil in der linken Abbildung weist auf das spektrale Maximum der Freifeldübertragungsfunktion bei frontalem Schalleinfall [AZ 0°] hin, gemessen am rechten Außenohrmodell von Tier 2; die rechte Abbildung zeigt die spektralen Maxima der Freifeldübertragungsfunktionen bei Schalleinfall von -180° bis 0° bis +180°, gemessen am gleichen Modell, der Pfeil gibt hier die akustische spektrale Achse für dieses Modell an

Die Schalleinfallrichtung, die sich auf das räumliche Maximum bezieht, wird auch als akustische Achse der jeweiligen Frequenz bezeichnet. Bei der Betrachtung einzelner spektraler Maxima unterschiedlicher Schalleinfallrichtungen kann ebenfalls eine Schalleinfallrichtung separiert werden, bei der das höchste spektrale Maximum beobachtet wird (Abb. 3-13 rechte Abbildung). Auf Grund der fehlenden Koinzidenz zwischen räumlichen und spektralen Maximum erhält der Begriff „akustische Achse“ eine etwas unklare Aussage [Rice et al., 1992]. Zur Schaffung einer besseren Übersichtlichkeit wird in dieser Arbeit der Ausdruck „akustische Frequenzachse“ für das räumliche Maximum und „akustische spektrale Achse“ für das spektrale Maximum verwendet.

Die Pegeldifferenzen einzelner Frequenzen ändern sich mit dem Wechsel der Schalleinfallrichtung unterschiedlich stark. Um eine quantitative Aussage über diese Richtungsabhängigkeit zu bekommen, wird die maximale Änderung der Pegeldifferenz (in dB) für jede Frequenz in Anlehnung an Middlebrooks & Pettigrew [1981], Coles & Guppy [1986] und Chen et al. [1995] dargestellt. Die „maximum directionality“ (ΔdB_{\max}) für jede Frequenz ist die Differenz zwischen ihrem maximalen und minimalen Wert der Pegeldifferenzen in den Freifeldübertragungsfunktionen verschiedener Schalleinfallrichtungen.

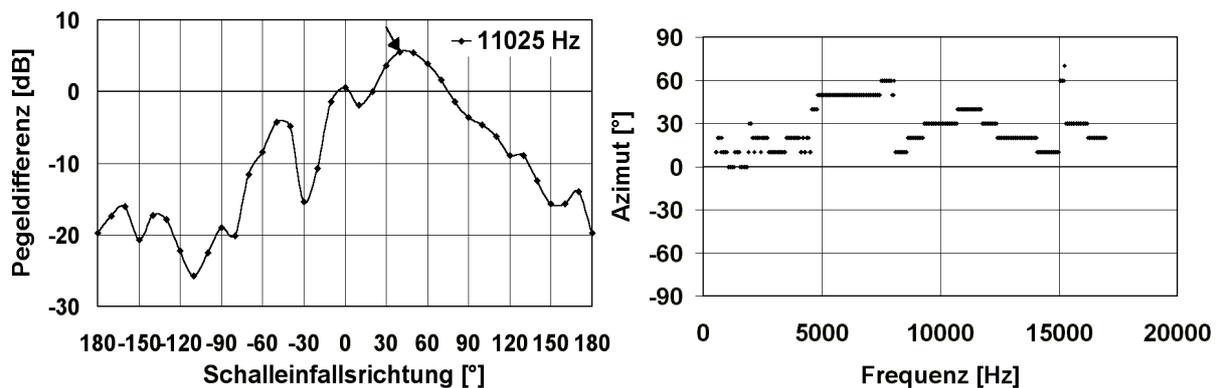


Abb. 3-14: Das räumliche Maximum: der Pfeil in der linken Abbildung weist auf das räumliche Maximum der Frequenz 11025 Hz in den Freifeldübertragungsfunktionen bei Schalleinfall von -180° bis 0° bis $+180^\circ$ hin; die rechte Abbildung zeigt die räumlichen Maxima der Frequenzen von 500 Hz bis 17 kHz in den Freifeldübertragungsfunktionen bei Schalleinfall von -180° bis 0° bis $+180^\circ$ (jeder Messpunkt stellt ein räumliches Maximum der jeweiligen Frequenz dar)

Bei Schalleinfall aus dem hinteren Quadranten trat in der Ergebnispräsentation (Diagrammkurven) eine zunehmende „Zittrigkeit“ auf. Dies wurde auf einen schlechteren Signal-Rausch-Abstandes zurückgeführt. Die durchschnittliche Pegeldifferenz im Frequenzbereich von 500 Hz bis 17 kHz betrug im linken Außenohrmodell bei Versuch 1 z.B. beim AZ 0° 12,3 dB, d.h. das Freifeldsignal wurde im Durchschnitt um 12,3 dB verstärkt. Dagegen trat beim AZ 180° eine durchschnittliche Pegeldifferenz von $-9,1$ dB auf, d.h. hier wurde das Freifeldsignal durch die Außenohrpassage im Durchschnitt um 9,1 dB abgeschwächt. Dadurch war die Aussteuerung des Signals nicht mehr optimal und gerade in den höheren Frequenzbereichen kam es zu Rechenungenauigkeiten durch das Analyseprogramm. Zur Verbesserung des Signal-Rausch-Abstandes für Signale aus der hinteren Hemisphäre hätte man den Abstrahlpegel der Signale erhöhen müssen, was dann aber wiederum zu Übersteuerungseffekten bei den anderen Schalleinfallswinkeln führen würde. Aus diesem Grund wurde nach einer anderen Methode zur Verbesserung der Ergebnisdarstellung gesucht. Dies wurde durch die Berechnung des gleitenden Mittels

(Mittelwert aus dem vorangehenden, dem eigentlichen und dem nachfolgenden Wert) erreicht. Trotz geringer Datenreduktion wurde damit eine bessere Übersichtlichkeit gewonnen. Bei den Schalleinfallrichtungen, bei denen der Signal-Rausch-Abstand optimal war, wurden durch die Verwendung des gleitenden Mittels bei der Ergebnisdarstellung nur minimale Auswirkungen festgestellt (siehe Abb. 3-15 AZ 0°). Bei Schalleinfallrichtungen aus dem hinteren Quadranten wurden die Diagrammkurven durch das gleitende Mittel geglättet, aber ihre spektralen Merkmale, wie Maxima und Minima, blieben erhalten bzw. wurden sogar noch übersichtlicher (siehe Abb. 3-15 AZ 180°).

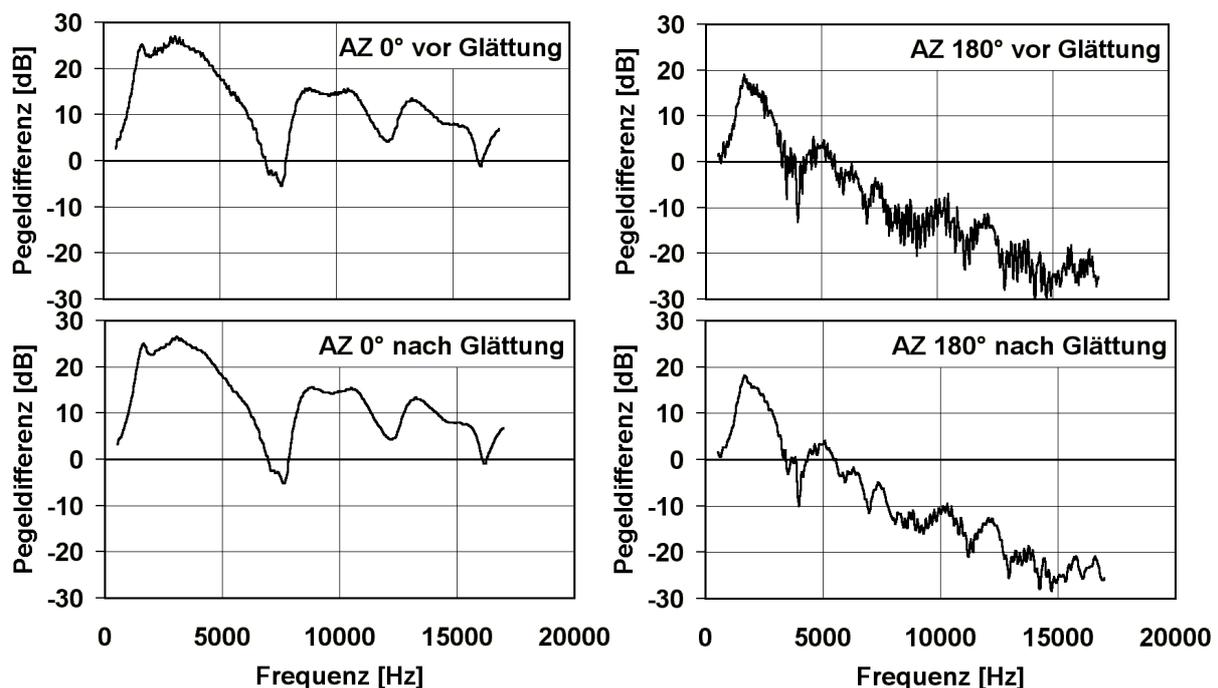


Abb. 3-15: Auswirkungen auf die Darstellung der Ergebnisse durch die Verwendung des gleitende Mittels bei verschiedenen Schalleinfallrichtungen (AZ – Azimut)

Die Bestimmung der Laufzeitdifferenzen erfolgte über die Verrechnung der Laufzeiten zwischen beiden Ohrsignalen. Dabei wurde die Phasenlage des Sinustones 500 Hz mittels Kreuzkorrelation berechnet. Als Analysesoftware wurde hier Avisoft-SASLAB Pro Version 2.5 (R. Specht) genutzt. Auch hier wurde wieder der Mittelwert der Daten aus den 3 Messungen für die Ergebnispräsentation verwendet. Die Ergebnisdarstellung erfolgt in Punktdiagrammen. Aus den an den Außenohrmodellen gemessenen Laufzeitdifferenzen (Δt) wurden die entsprechenden Wegdifferenzen (Δs) berechnet. Dazu wurde folgende Formel verwendet:

$$\Delta s = \Delta t \cdot c, \text{ wobei } c(\text{bei } 20^\circ\text{C}) = 343\text{m/s}$$

Die berechneten Wegdifferenzen wurden mit den gemessenen Abständen zwischen rechter und linker Ohrmuschel verglichen.

3.6 Validierung der Methodik mittels eines Katzenkunstkopfes

Um die Arbeitsweise der Außenohrmodelle und die mit ihnen erzielten Ergebnisse zu validieren, wurde nach einer Möglichkeit gesucht, die keine zusätzlichen Tierversuche erfordert. Da vom Haushund keine Messungen der Außenohrübertragungsfunktionen an narkotisierten bzw. toten Tieren vorliegen, rückte die Hauskatze in den Mittelpunkt der vergleichenden Betrachtungen. Aus dem amerikanischen Schrifttum existieren eine Vielzahl publizierter Außenohrübertragungsfunktionen (HRTF) der Hauskatze und deren Richtungsabhängigkeit beim narkotisierten Tier, die mit den eigenen Ergebnissen verglichen werden.

Es wurde ein Kunstkopf mit einem rechten und linken Außenohrmodell von einer Hauskatze geschaffen (Abb. 3-16). Für die Modellanfertigung wurde eine von einer Berliner Tierarztpraxis zur Verfügung gestellte, eingeschläferte adulte Hauskatze genutzt. Bei der otoskopischen Untersuchung des äußeren Gehörgangs und des Trommelfells wurde deren Unversehrtheit festgestellt. Es befanden sich keine Fremdkörper (Grannen, Schmutz, verfilzte Haare, getrocknetes Ohrenschmalz) im Ohrkanal. Am Kopf und Ohrmuschel wurden keine Verletzungen und sichtbaren Abnormitäten registriert. Bei der Erstellung des Kunstkopfes und der Außenohrmodelle wurde nach gleichem Prinzip wie in 3.2 beschrieben verfahren. Beide Außenohrmodelle waren in dem Kunstkopf integriert.

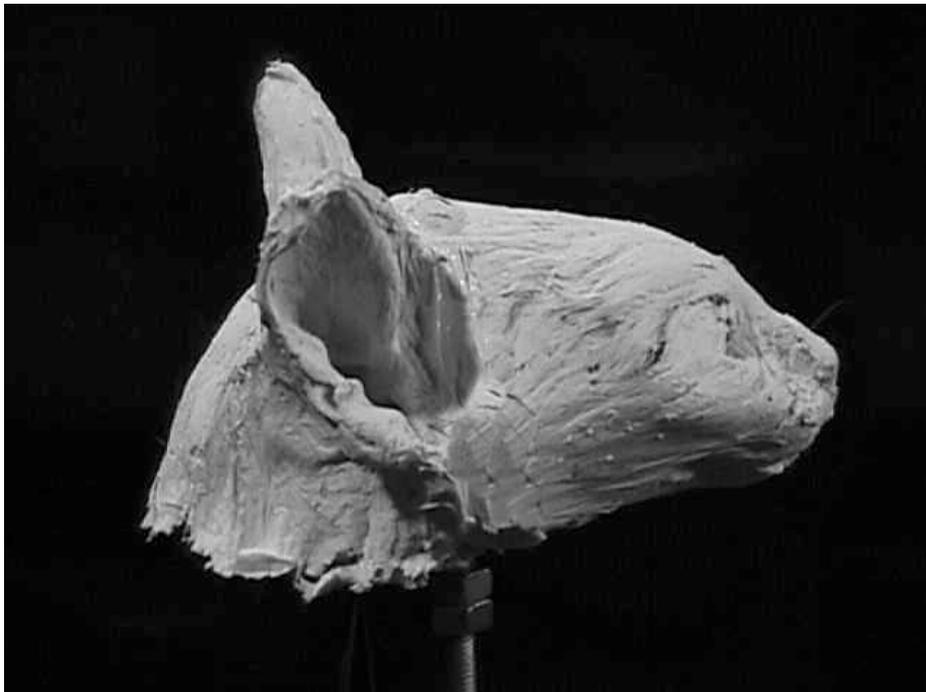


Abb. 3-16: Kunstkopf und Außenohrmodelle einer Hauskatze

Der Versuchsaufbau, die Messung der Übertragungsfunktion, sowie deren Berechnung und Darstellung sind wie in Kapitel 3.3 bis 3.5 beschrieben erfolgt. Der Darstellungsbereich wurde zwecks besserer Vergleichsmöglichkeit mit publizierten Daten von 2 kHz bis 17 kHz gewählt.

Im folgenden werden die mit diesem Modell gewonnenen Messergebnisse dargestellt und mit den publizierten Daten verglichen und diskutiert. Ein Schwerpunkt liegt dabei in der vergleichenden Darstellung der Richtcharakteristik des Außenohrmodells und des natürlichen Außenohres.

Abb. 3-17 zeigt die Freifeldübertragungsfunktion des rechten Außenohrmodells aus den eigenen Messungen bei frontalem Schalleinfall. Für einen direkten Vergleich ist die Abb. 11 a aus Rice et al. [1992] in Abb. 3-18 dargestellt, die die individuellen Freifeldübertragungsfunktionen von fünf Katzen zeigt. Zu beachten ist, dass in beiden Abbildungen eine unterschiedliche Abszisseneinteilung vorliegt (linear bzw. logarithmisch). Trotzdem ist deutlich erkennbar, dass der allgemeine spektrale Kurvenverlauf der Freifeldübertragungsfunktionen große Übereinstimmung zwischen dem Modell und den der fünf narkotisierten Tiere zeigt. Unterschiede sind in der Feinstruktur der Freifeldübertragungsfunktion sichtbar. Rice et al. [1992] weisen darauf hin, dass jede Katze eine individuelle HRTF besitzt, die sich im Gesamtverlauf sehr ähneln und beständige Merkmale, z.B. den Gipfel bei 3 kHz bis 5 kHz und einen Einbruch in der Nähe von 10 kHz bei frontalem Schalleinfall, besitzen. Schallsignale mit Frequenzen zwischen 3 kHz bis 5 kHz werden sowohl durch die Außenohrmodelle der Katze in den eigenen Untersuchungen als auch durch natürliche Außenohren bei Katzen um ca. 20 dB verstärkt [Wiener et al., 1966, ; Musicant et al., 1990, ; Rice et al., 1992]. In der feineren Struktur der HRTF gibt es dagegen Unterschiede, z.B. in der exakten Gestalt des Gipfels und der Tiefe des Einbruchs. Im höherfrequenten Bereich variiert die spektrale Gestalt beträchtlich. Die Ursache für die individuellen Unterschiede sind zum einen in der unterschiedlichen Größe der Tiere und damit in der variablen Geometrie der Außenohren gegeben [Rice et al., 1992; Xu & Middlebrooks, 2000]. Außerdem spielen die Position des Kopfes und der Ohren sowie die Position der Mikrofone eine Rolle. Auch Xu & Middlebrooks [2000] fanden bei der Untersuchung der HRTF von 24 Katzen große individuelle Unterschiede vor allem in der Frequenz und Ausprägung des prominenten Einbruchs in der mittelfrequenten Region. Diese Unterschiede sind zum Teil größer als die, die durch einen Wechsel der Ohrposition hervorgerufen werden. Die zentrale Frequenz des mittelfrequenten Einbruchs befindet sich bei 24

Katzen z.B. zwischen 8 kHz und 12,5 kHz; aber die richtungsabhängigen Verschiebungen dieser Frequenzen werden bei allen Tieren beobachtet. In Abb. 3-17 liegt die zentrale Frequenz des ersten Einbruchs bei 9,3 kHz, d.h. in der von Xu & Middlebrooks [2000] beobachteten Spannweite.

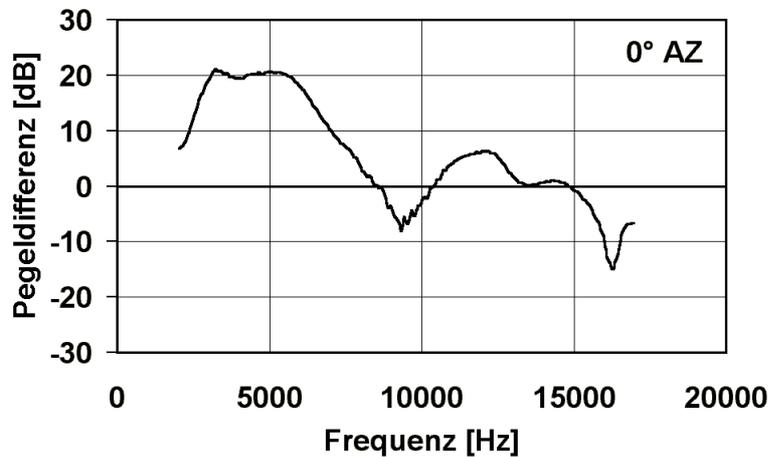


Abb. 3-17: Freifeldübertragungsfunktion des rechten Außenohrmodells der Katze bei frontalem Schalleinfall (AZ 0°, EL 0°), Frequenzbereich von 2 kHz bis 17 kHz

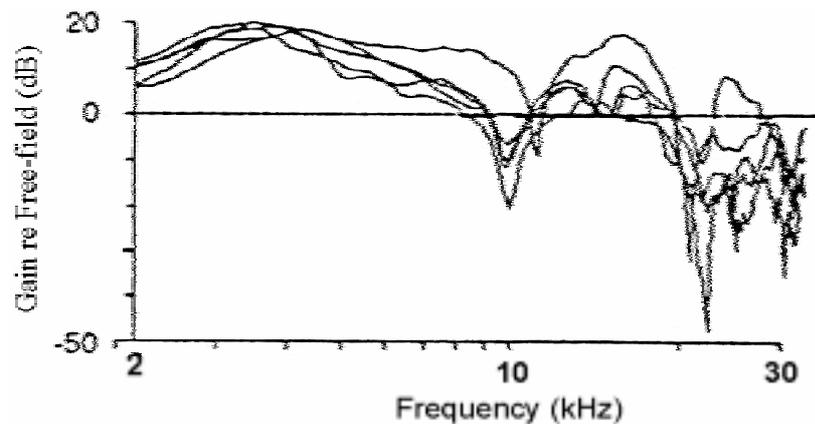


Abb. 3-18: ein Vergleich der Übertragungsfunktionen von 5 Katzen, ermittelt bei gleicher Schalleinfallrichtung (0° EL, 0° AZ) aus Rice et al. [1992] - Abb. 11a

Der allgemeine Kurvenverlauf der Freifeldübertragungsfunktion (gezeigt in Abb. 3-19) ist durch ein stetiges und schnelles Ansteigen der Pegeldifferenzen bis zum ersten Gipfel bei ca. 3 kHz bis 3,3 kHz mit einer anschließenden Plateau-Phase und einem zweiten Gipfel zwischen 5,2 kHz und 5,9 kHz bei einigen Schalleinfallrichtungen charakterisiert. Danach fällt die Pegeldifferenz ab. Der erste Gipfel stellt das spektrale Maximum jeder Freifeldübertragungsfunktion dar. Seine Frequenz ist relativ stabil und variiert nicht mit der Änderung des AZ. Die Pegeldifferenzen der Signalanteile mit Frequenzen zwischen 2 kHz und 6 kHz befinden sich immer im positiven Bereich, d.h. die durchschnittliche Verstärkung

eines Signals ist hier immer höher als in anderen Frequenzregionen. Diese Ergebnisse können durch frühere Untersuchungen an der Katze bestätigt werden [Wiener et al., 1966; Musicant et al., 1990; Rice et al., 1992]. In diesen Untersuchungen befindet sich das spektrale Maximum in der Freifeldübertragungsfunktionen ebenfalls zwischen 3 kHz bis 5 kHz.

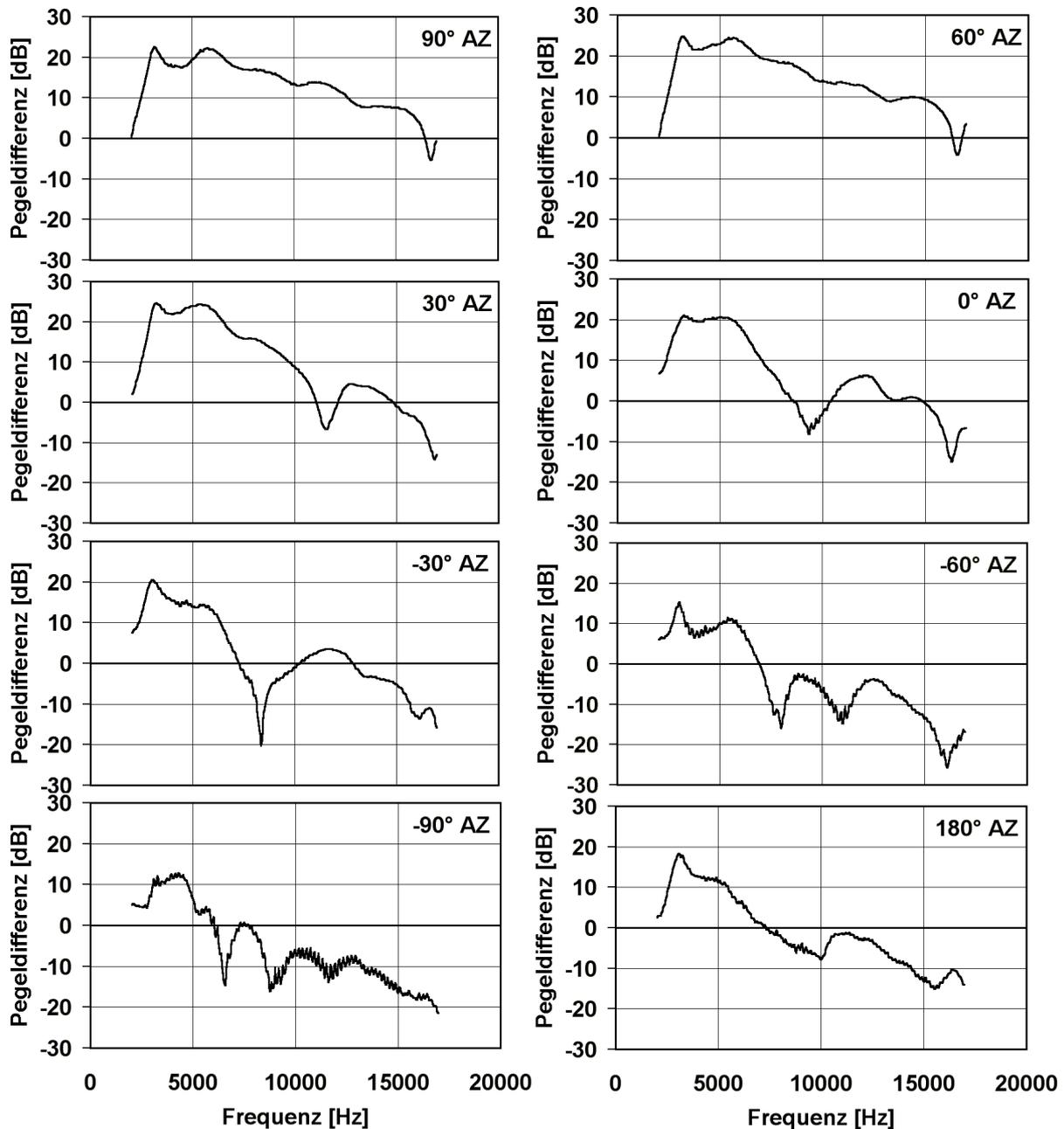


Abb. 3-19: ausgewählte Freifeldübertragungsfunktionen des rechten Außenohrmodells einer Katze bei verschiedene Schalleinfallrichtungen in der Horizontalebene (AZ) im Frequenzbereich von 2 kHz bis 17 kHz

Abb. 3-20 zeigt die richtungsabhängigen Änderungen der Pegeldifferenzen des spektralen Maxima und die räumlichen Maxima der Frequenzen zwischen 500 Hz und 17 kHz. Beim AZ von 50° erreicht das spektrale Maximum seinen höchsten Wert und signalisiert damit die

akustische spektrale Achse. Abb. 3-20 links stellt die spektralen Maxima für das rechte Außenohr dar (höchster Wert bei 3,14 kHz mit 25,15 dB); die Daten für das linke Modell sind aus Platzgründen nicht gezeigt (höchster Wert bei 4,5 kHz mit 24,69 dB). Bei den Studien von Wiener et al. [1966] wird das größte spektrale Maximum in der Freifeldübertragungsfunktion bei einem AZ von 45° bei 4 kHz mit 21 dB gefunden. Bei diesem Schalleinfall befindet sich die Ebene zum Eingang zur äußeren Ohrmuschel ungefähr senkrecht zur Lautsprecherachse. Die Außenohrmodelle der Katze zeigen eine analoge Positionierung wie von Wiener et al. [1966] beschrieben (Abb. 3-16).

Die Bestimmung der räumlichen Maxima offenbart, dass die Schalldrücke der meisten Frequenzen ihre maximale Verstärkung ebenfalls dann erfahren, wenn der Schall direkt in das Außenohr eintrifft. Für Frequenzen über 3 kHz liegen die akustischen Frequenzachsen im Öffnungswinkel der äußeren Ohrmuschel, und zwar zwischen dem AZ von 30° bis 80° (Abb. 3-20 rechts). Das zeigte sich auch in Untersuchungen von Musicant et al. [1990] und von Middlebrooks & Pettigrew [1981]. Bei tieferen Frequenzen ändert sich die Lage des räumlichen Maximum stärker. Aber das räumliche Maximum wird auch hier bei Schalleinfall aus dem der Ohrmuschelöffnung zugewandten Bereich ausgebildet.

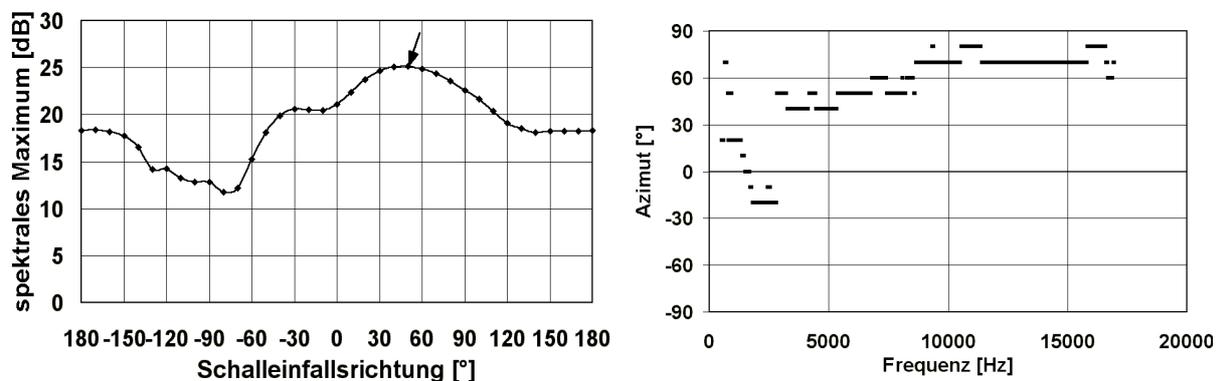


Abb. 3-20: spektrale und räumliche Maxima der Frequenzen von 500 Hz bis 17 kHz in den Freifeldübertragungsfunktionen des rechten Außenohrmodells der Katze bei Schalleinfall im Azimut von 0° bis 360° (linke Abbildung – spektrale Maxima, der Pfeil gibt die akustische spektrale Achse an; rechte Abbildung – räumliche Maxima)

Bei Frequenzen über 6 kHz zeigt der Graph der Freifeldübertragungsfunktionen einen starken Wechsel in Abhängigkeit vom Azimut. Diese Region wird von Rice et al. [1992] als Region des ersten Einbruchs (first notch) oder FN-Region bezeichnet. Auch die am Modell gewonnenen Freifeldübertragungsfunktionen sind durch das Vorhandensein des ersten Einbruchs in der FN-Region charakterisiert. Besonders im frontalen Quadranten ist dieser erste Einbruch sehr prominent (Abb. 3-19 beim Azimut von -60° bis +30°). Diese Prominenz

geht bei Schalleinfall aus dem hinteren und contralateralen Quadranten verloren (Abb. 3-19 beim Azimut von -90° und 180°). Zudem werden dann mehr Einbrüche beobachtet, die sich in ihrer Ausprägung (z.B. Tiefe) nur geringfügig unterscheiden. Abb. 3-21 zeigt die richtungsabhängige Lage des ersten Einbruchs. Bei Schalleinfall zwischen dem Azimut von $+50^\circ$ und $+120^\circ$ bleibt die zentrale Frequenz verhältnismäßig konstant. Zwischen dem Azimut von -20° und $+50^\circ$ ist dagegen ein stetiges Ansteigen der zentralen Frequenz zu beobachten. Bei Schalleinfall aus dem contralateralen Bereich kann wiederum kein systematischer richtungsabhängiger Wechsel wahrgenommen werden.

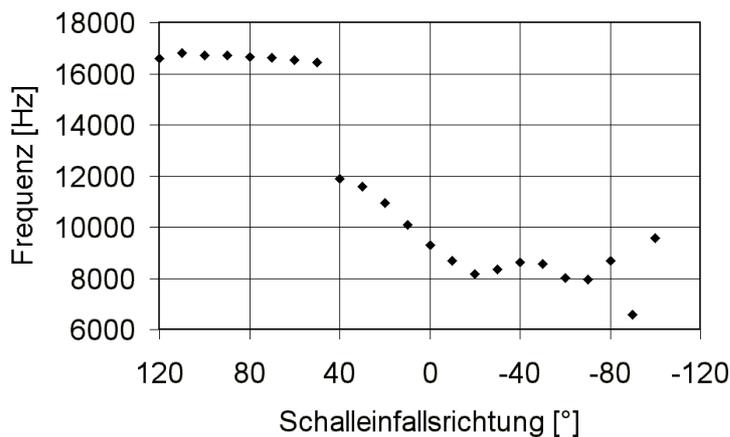


Abb. 3-21: zentrale Frequenz des ersten Einbruchs in der Freifeldübertragungsfunktion des rechten Außenohrmodells der Katze in Abhängigkeit von der Schalleinfallsrichtung (AZ von $+120^\circ$ bis 0° bis -100°)

Dieser Effekt konnte auch in früheren Untersuchungen an narkotisierten Katzen festgestellt werden [Musicant et al., 1990; Rice et al., 1992; Xu & Middlebrooks, 2000]. Damit deutet das richtungsabhängige Verschieben der Frequenz des ersten Einbruchs (FN-Frequenz) darauf hin, dass der erste Einbruch einen wichtigen Hinweis bei der Schalllokalisierung liefert. Allerdings gibt es eine gewisse Zweideutigkeit, da sowohl eine Steigerung des Azimut als auch der Elevation eine Steigerung der FN-Frequenz zur Folge hat. Aber mit den Informationen aus niederfrequenten und hochfrequenten Regionen, den interauralen Pegeldifferenzen sowie dem Vergleich der Frequenz des ersten Einbruchs zwischen ipsilateralem und contralateralem Spektrum stehen zusätzliche Hinweise zur Verfügung. Über einen großen Frequenzbereich gibt es zudem keine zwei identischen Freifeldübertragungsfunktionen bei unterschiedlichen Schalleinfallsrichtungen [Rice et al., 1992]. Die eigenen Ergebnisse bestätigen diese Aussagen, vor allem bei Schalleinfall aus dem frontalen Quadranten.

In Untersuchungen an der Katze [Middlebrooks & Pettigrew, 1981] wurden die maximalen Änderungen der Pegeldifferenzen jeder einzelnen Frequenz mit dem Wechsel der Schalleinfallrichtung ermittelt. Diese quantitative Aussage über die Richtungsabhängigkeit jeder einzelnen Frequenz zeigt Abb. 3-22 für das Katzenmodell. Middlebrooks & Pettigrew [1981] untersuchten nur Frequenzen zwischen 4 kHz und 20 kHz. Bei 4 kHz betrug die maximale Differenz 15 dB, bei 8 kHz 32 dB, bei 16 kHz 38 dB. Auch die eigenen Daten zeigen, dass die Pegeldifferenzen hoher Frequenzen im Gegensatz zu niedrigeren Frequenzen sich stark mit dem Wechsel der Schallquellenposition ändern. Frequenzen unter 3 kHz besitzen damit nur einen geringen richtungsabhängigen Informationsgehalt über ihre monaurale Änderung der Pegeldifferenzen.

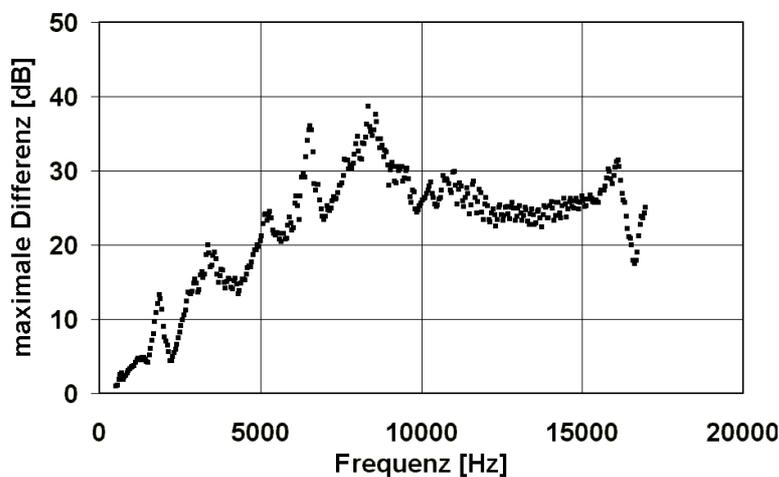


Abb. 3-22: maximale Änderungen der Pegeldifferenzen der Frequenzen zwischen 500 Hz und 17 kHz ermittelt am rechte Außenohrmodell der Katze: jeder Messpunkt stellt die maximale Differenz einer Frequenz dar, ermittelt aus der Differenz zwischen maximalem und minimalem Wert der Pegeldifferenzen dieser Frequenz bei Schalleinfall aus dem Azimut von -90° bis $+90^\circ$

Interaurale Pegeldifferenzen (ILD) von Schallsignalen mit Frequenzen zwischen 2 kHz bis 5 kHz liefern nach Rice et al. [1992] einen sicheren Hinweis für die Schalllokalisierung im Azimut. Bei der Berechnung der ILD in der Studie von Rice et al. [1992] werden die Freifeldübertragungsfunktionen eines Ohres (ipsilateral – contralateral) verrechnet, da die Messungen immer nur in einem Ohr vorgenommen wurden. Damit ist eine totale Symmetrie des Kopfes gegeben. Daher kann die richtungsabhängige Komponente der interauralen Übertragungsfunktion aus den eigenen Daten mit den ILD von Rice et al. [1992] verglichen werden. Auch hier können gleiche Tendenzen bei der Ausbildung der ILD mit der Änderung der Schalleinfallrichtung im Azimut festgestellt werden. In Abb. 3-23 wird ersichtlich, dass durch die laterale Auslenkung (AZ 60°) bei Schallsignalen mit Frequenzen bis etwa 10 kHz

größere ILD produziert werden. Signale mit höheren Frequenzen zeigen dagegen Abweichungen. Zwar sind die ILD bei 60° immer noch maximal. Aber die ILD für Signalanteile zwischen 11 kHz und 12 kHz beim AZ von 30° liegen z.B. unter denen von 0°. Auch in den Studien von Rice et al. [1992] und Musicant et al. [1990] lassen sich solche Abweichungen für höhere Frequenzen beobachten.

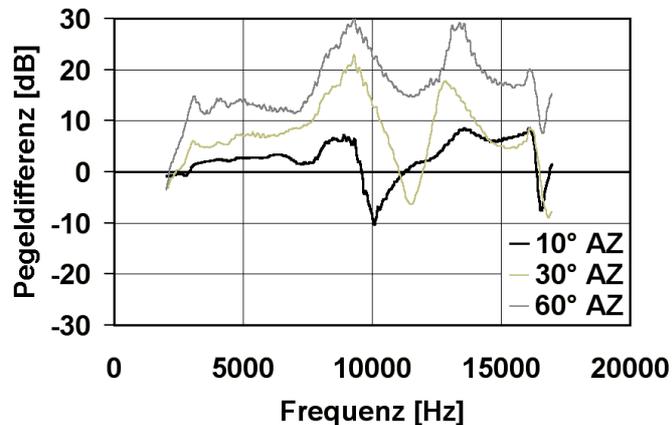


Abb. 3-23: richtungsabhängige Komponente der interauralen Übertragungsfunktion der Außenohrmodelle einer Katze (das rechte Außenohrmodell ist das ipsilaterale Außenohr)

Die mit den Modell gewonnenen Ergebnisse und deren Vergleich mit publizierten Daten zeigen gleiche Tendenzen in der von der Schalleinfallrichtung abhängigen Ausprägung binauraler und monauraler spektraler Merkmale. Damit eignen sich plastische Modelle, die in den geometrischen Abmessungen mit den natürlichen Verhältnissen übereinstimmen, für Untersuchungen zur Richtcharakteristik des Außenohres. Es können Daten gewonnen werden, mit denen gezielt nach möglichen Auswertmechanismen für die Bestimmung der Schalleinfallrichtung gesucht werden kann. Eine psychoakustische Überprüfung in Form von Verhaltensexperimenten oder neuronalen Untersuchungen ist allerdings notwendig, da erst dadurch eindeutige Aussagen getroffen werden können.