

4.2.1.3 Interaurale Übertragungsfunktion

Abb. 4-16 präsentiert die interauralen Übertragungsfunktionen von Tier 2 in der 3D-Perspektive. Dabei werden nur die Funktionen gezeigt, in denen der Schall aus der dem linken Außenohrmodell zugewandten Seite einfällt (d.h. links = ipsilateral).

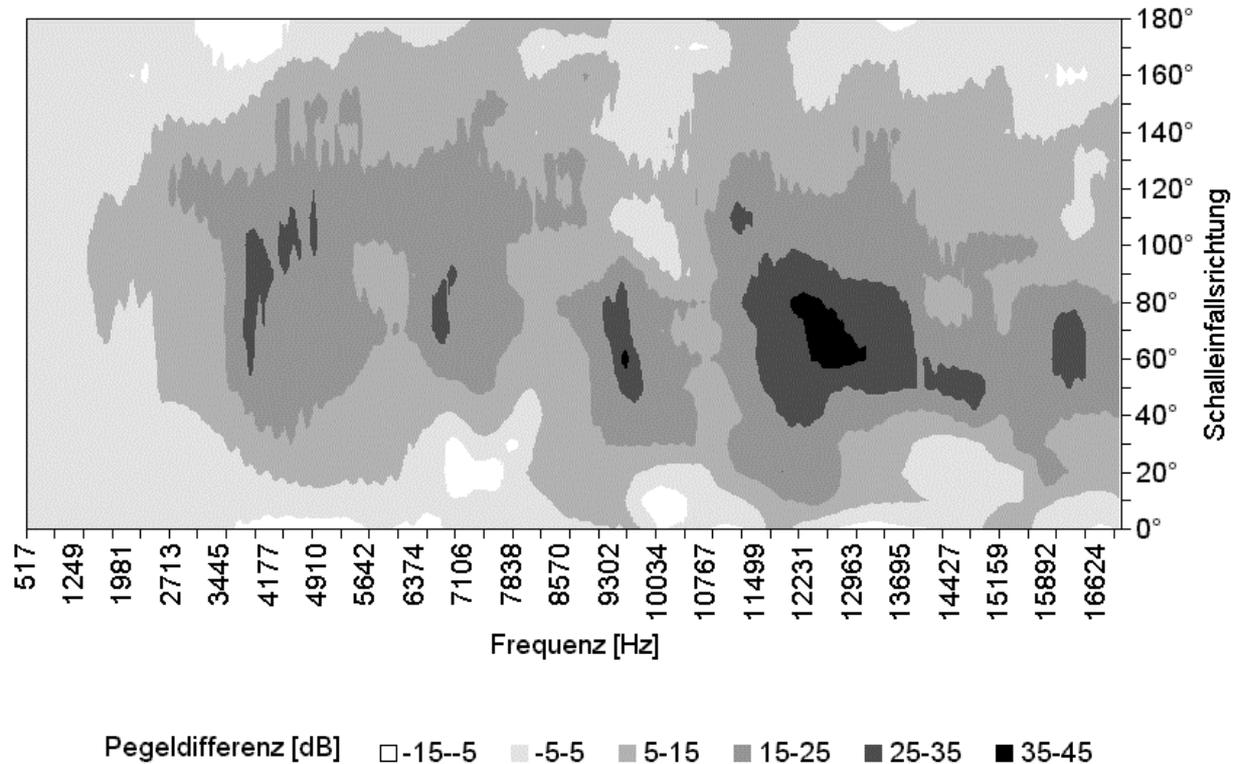


Abb. 4-16: Interaurale Übertragungsfunktion des schallzugewandten linken Außenohrmodells von Tier 2 in der 3D-Perspektive: Frequenzbereich von 500 Hz bis 17000 Hz; Azimut von 0° bis 180°

Aus Abb. 4-16 ist ersichtlich, dass bei frontalem Schalleinfall (AZ 0° - unterer Rand) die interauralen Differenzen nicht bei allen Frequenzen 0 dB betragen. Damit besteht keine absolute Symmetrie der Außenohren. Auch bei Tier 1 konnte dies beobachtet werden. Um eine Aussage über die richtungsabhängigen Änderungen der interauralen Pegeldifferenzen (ILD) zu treffen, wird sich die Ergebnisdarstellung auf die richtungsabhängige Komponente der interauralen Übertragungsfunktionen stützen. Für Tier 2 wird dies in Abb. 4-17 gezeigt. Im tieffrequenten Bereich (bis etwa 1,5 kHz) ändern sich beim linken Ohrmodell von Tier 2 die ILD mit dem Wechsel der Schalleinfallrichtung nur geringfügig; die Werte liegen unter 5 dB (Abb. 4-17: einheitlicher hellgrauer Bereich über den gesamten Schalleinfallsbereich). Dies wird auch in Abb. 4-18 ersichtlich, in der einige ausgewählte Funktionen der richtungsabhängigen Komponente vom schallzugewandten linken Außenohrmodell von Tier 2 gezeigt werden. Beim rechten Ohrmodell von Tier 2 werden ILD über 5 dB ebenfalls

erst von Signalen mit Frequenzen über 1,55 kHz erzeugt (Daten aus Platzgründen nicht gezeigt). Eine Änderung der Schalleinfallrichtung erzeugt bei Schallsignalen mit höheren Frequenzen dagegen deutliche ILD.

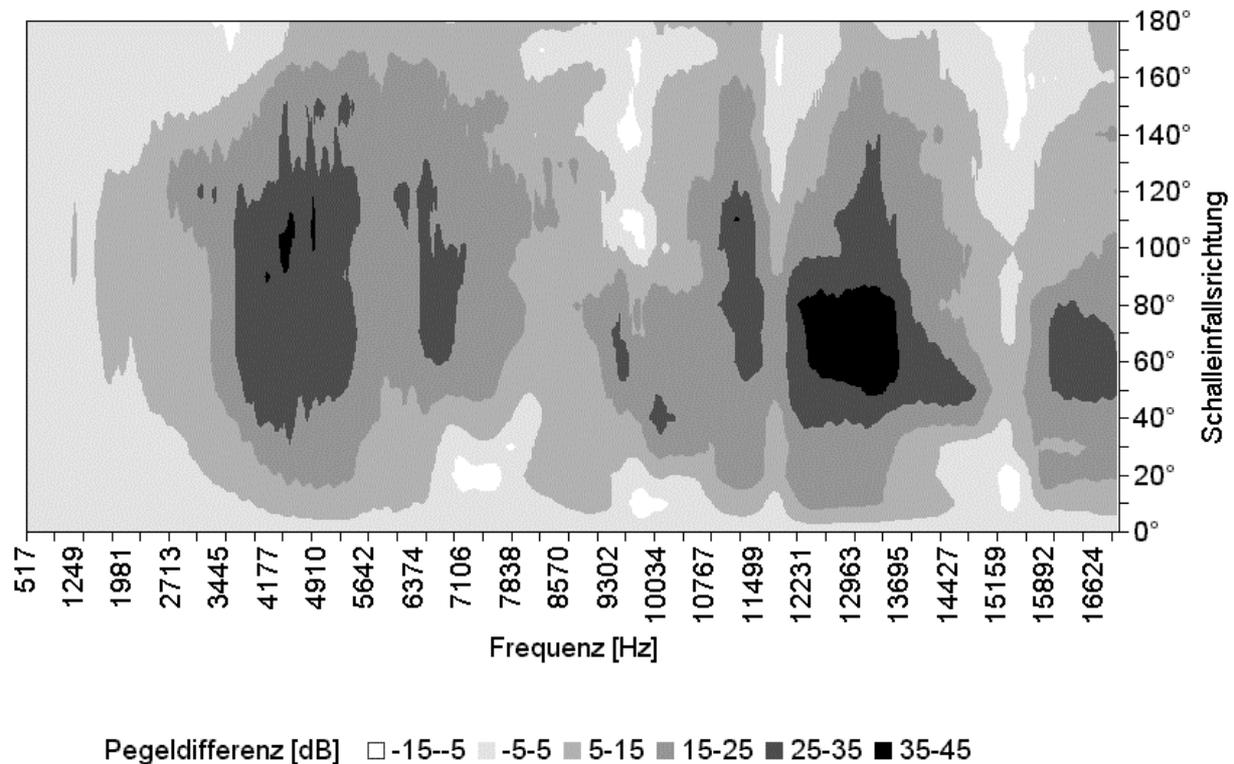


Abb. 4-17: Richtungsabhängige Komponente der interauralen Übertragungsfunktionen des schallzugewandten linken Außenohrmodells von Tier 2 in der 3D-Perspektive: Frequenzbereich von 500 Hz bis 17000 Hz; Azimut von 0° bis 180°; die Funktionen wurde durch die Subtraktion der konstanten, richtungsunabhängigen Komponente (ILD beim AZ 0°) von den jeweiligen gemessenen interauralen Übertragungsfunktionen (ILD AZ 10° bis 180°) berechnet

Abb. 4-17 zeigt, dass ILD über 25 dB bei Schalleinfall aus dem ipsilateralen Bereich beobachtet werden können, so z.B. für Signalanteile mit Frequenzen zwischen 4 kHz bis 5,6 kHz oder mit Frequenzen zwischen 12,2 kHz bis 14,4 kHz (dunkelgraue und schwarze Bereiche). Die ILD für Signalanteile mit Frequenzen aus diesem Bereich steigen bei dem Wechsel der Schallquelle aus dem frontalen in den seitlichen Bereich kontinuierlich an und erreichen dort ihren maximalen Wert, um danach wieder kontinuierlich abzufallen. So betragen die ILD für 4,5 kHz beim AZ von 10° 9,3 dB (Abb. 4-18 AZ 10°) und erreichen beim AZ von 100° einen Wert von 34 dB. Danach fallen die Werte wieder ab, so dass bei Schalleinfall aus dem AZ von 180° nur noch ILD von 6,1 dB vorliegen. Die ILD von 13 kHz betragen beim AZ von 10° 17 dB und erreichen hier beim AZ von 60° ihren höchsten Wert (44,4 dB). Beim AZ von 120° beläuft sich der Wert der ILD noch auf 24,7 dB und fällt weiterhin bis 7,2 dB ab beim AZ von 180° (Abb. 4-18).

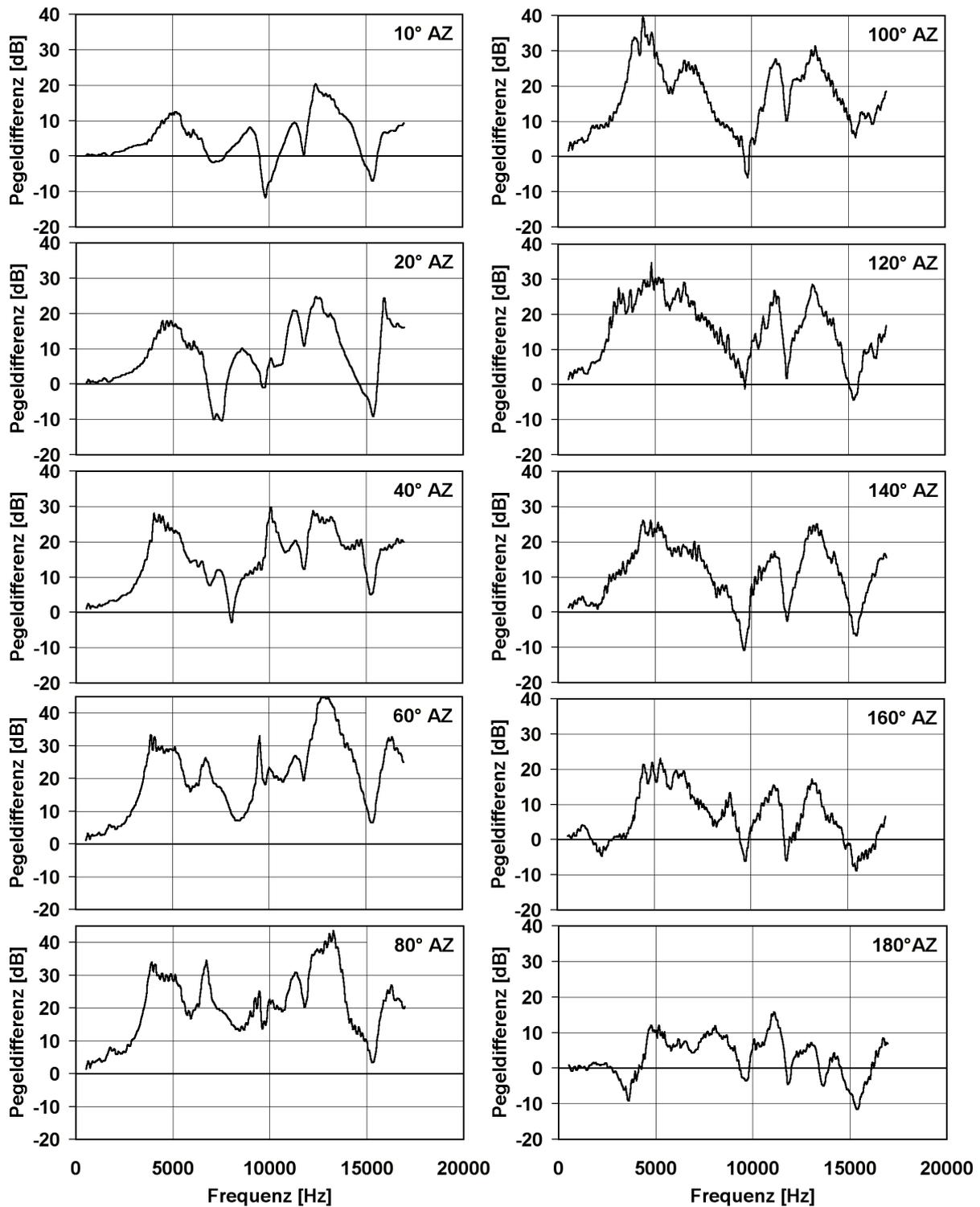


Abb. 4-18: ausgewählte richtungsabhängige Komponenten der interauralen Übertragungsfunktionen des schallzugewandten linken Außenohrmodells von Tier 2: Frequenzbereich von 500 Hz bis 17000 Hz; Azimut von 0° bis 180°; die Funktionen wurde durch die Subtraktion der konstanten, richtungsunabhängigen Komponente (ILD beim AZ 0°) von den jeweiligen gemessenen interauralen Übertragungsfunktionen (ILD AZ 10° bis 180°) berechnet

Es gibt auch Signalanteile mit Frequenzen, deren Schalldruckpegel je nach Schalleinfallswinkel auf der contralateralen Seite höher sein kann. Dadurch werden Einbrüche bis in den negativen Bereich produzieren, z.B. ist dies in Abb. 4-18 für die Frequenz von 9,5 kHz beim AZ von 10°, 100° und von 140° bis 180° ersichtlich. Die höchsten ILD für 9,5 kHz liegen aber auch hier bei seitlichem Schalleinfall, und zwar bei Einfall aus dem AZ von 60° mit 33 dB.

Die Größenordnung der Änderung der ILD (Δ_{ILD}) bei einer Verlagerung der Schallquelle stellt sich bei den Frequenzen unterschiedlich dar. Bei Signalanteilen mit niedrige Frequenzen wie 600 Hz erhöhen sich die ILD von 0,5 dB beim AZ 10° auf 3,6 dB beim AZ 100°, d.h. bei einer Änderung um 90 Grad beträgt Δ_{ILD} gerade mal 3,1 dB. Bei 4,5 kHz verursacht ein Wechsel um 20 Grad im frontalen Bereich (z.B. vom AZ 10° auf AZ 30°) ein beträchtliches Ansteigen der ILD – nämlich von 9,3 dB auf 23,6 dB. Das bedeutet, hier kommt es bei einer Änderung der Schalleinfallsrichtung um 20 Grad zu einem Δ_{ILD} von 14,3 dB. Bei der gleichen Frequenz bewirkt eine Änderung um 20 Grad im seitlichen Bereich z.B. vom AZ 60° (29 dB) zum AZ 80° (29,1 dB) bzw. vom AZ 80° zum AZ 100° (34 dB) nur ein Δ_{ILD} von 0,1 dB bzw. 4,9 dB. Bei 9,5 kHz erzeugt der Wechsel um 20 Grad sowohl im frontalen als auch im seitlichen Bereich ein großes Δ_{ILD} . Bei einem Wechsel vom AZ 10° (-1 dB) zum AZ 30° (10 dB) beträgt Δ_{ILD} 11 dB. Wandert die Schallquelle vom AZ 40° (13,4 dB) zum AZ 60° (33 dB) beträgt Δ_{ILD} sogar 19,6 dB. Aber auch die Verlagerung vom AZ 80° (22 dB) zum AZ 100° (4,5 dB) erzeugt ein großes Δ_{ILD} von 17,5 dB. Bei 13 kHz beträgt das Δ_{ILD} bei einer Änderung um 20 Grad im frontalen Bereich nur 3,1 dB (vom AZ 10° zum AZ 30°). Auch vom AZ 100° zum AZ 120° ist Δ_{ILD} nur 2,8 dB groß. Dagegen bewirkt die Verlagerung der Schallquelle vom AZ 40° zum AZ 60° ein Δ_{ILD} von 18,1 dB.

Durch das Ansteigen und Abfallen der ILD bei der Wanderung einer Schallquelle aus dem frontalen Bereich über den seitlichen Bereich in den rückwärtigen Bereich können Signalanteile mit gleichen Frequenzen bei weit auseinander liegenden Einfallswinkeln gleiche ILD besitzen. So beträgt die ILD von Schallsignalen mit der Frequenz 15 kHz sowohl beim AZ 40° als auch beim AZ 100° 10,6 dB (Abb. 4-18). Bei Schallsignalen mit der Frequenz von 5,5 kHz betragen die ILD beim AZ 40° 19,4 dB und beim AZ 160° 19,2 dB.

Abb. 4-19 zeigt ausgewählte Funktionen der richtungsabhängigen Komponente vom schallzugewandten linken Außenohr von Tier 1. Auch hier ändert sich im tieffrequenten Bereich (bis etwa 1,2 kHz) die ILD mit dem Wechsel der Schalleinfallsrichtung nur

geringfügig, d.h. die Werte liegen unter 5 dB. Bei Einfall zwischen dem AZ 0° bis AZ 90° gilt dies auch für Signale mit Frequenzen bis 3,6 kHz (Abb. 4-19: AZ 10° - 90°). Beim rechten Ohrmodell von Tier 1 liegen die ILD von Frequenzen bis 2,3 kHz unter 5 dB (Daten aus Platzgründen nicht gezeigt).

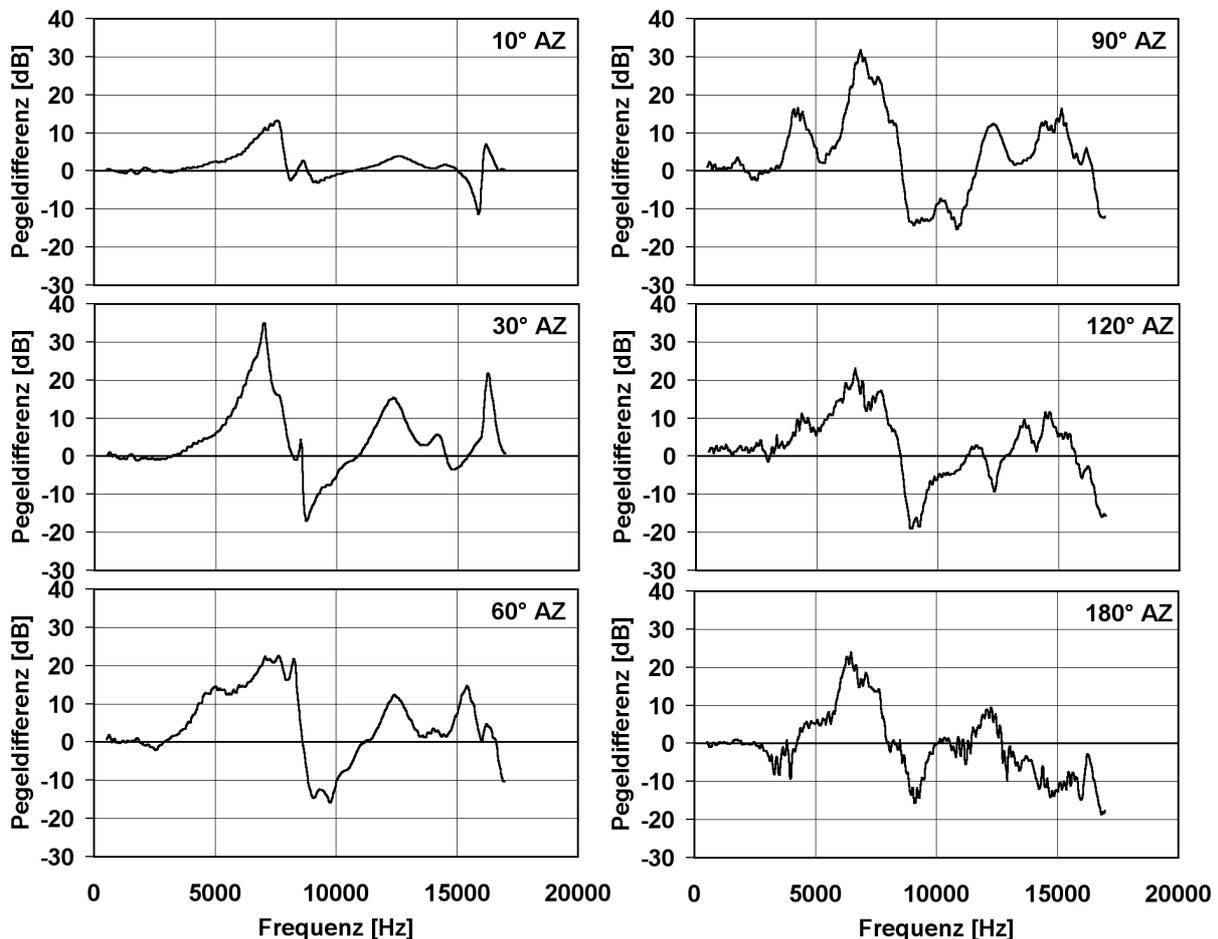


Abb. 4-19: ausgewählte richtungsabhängige Komponenten der interauralen Übertragungsfunktionen des schallzugewandten linken Außenohrmodells von Tier 1: Frequenzbereich von 500 Hz bis 17000 Hz; Azimut von 0° bis 180°; die Funktionen wurde durch die Subtraktion der konstanten, richtungsunabhängigen Komponente (ILD beim AZ 0°) von den jeweiligen gemessenen interauralen Übertragungsfunktionen (ILD AZ 10° bis 180°) berechnet

Schallsignale mit höheren Frequenzen erzeugen auch beim linken Außenohrmodell von Tier 1 deutliche ILD. ILD über 25 dB sind in Abb. 4-19 beim AZ 30° und AZ 90° für Frequenzen von 6,6 kHz bis 7,1 kHz zu beobachten. Schallsignale anderer Frequenzen produzieren dagegen wieder negative ILD, z.B. 9 kHz bei Schalleinfall aus dem AZ von 10° bis 180°. Beispiele für Frequenzbänder, die einen kontinuierlichen Anstieg der ILD bei dem Wechsel der Schallquelle aus dem frontalen in den seitlichen Bereich zeigen, sind wie folgt: Frequenzen zwischen 4 kHz und 4,9 kHz; zwischen 6 kHz und 8 kHz und zwischen 14 kHz und 15,5 kHz. So betragen die ILD für 4,2 kHz beim AZ von 10° 0,9 dB (Abb. 4-19 AZ 10°)

und erreichen beim AZ von 110° einen Wert von 15,5 dB. Danach fallen die Werte wieder ab, so dass bei Schalleinfall aus dem AZ von 180° nur noch ILD von $-0,2$ dB vorliegen (Abb. 4-19 AZ 180°). Die Frequenz 7,02 kHz erreicht ihre höchsten ILD schon bei Einfall aus dem AZ von 30° mit 34,9 dB; bei 14,7 kHz ist dagegen der AZ, der die höchsten ILD erzeugt, 70° (19,6 dB).

Die Größenordnung der Änderung der ILD (Δ) bei einer Verlagerung der Schallquelle stellt sich auch beim linken Außenohr von Tier 1 in Abhängigkeit von der Frequenz sehr unterschiedlich dar. Schallsignale mit niedrigen Frequenzen erzeugen selbst bei einem Wechsel von 90 Grad ein kleines Δ , z.B. 600 Hz mit $\Delta = 1,8$ dB (AZ 10° mit 0,6 dB, AZ 100° mit 2,4 dB). Bei 7,02 kHz verursacht ein Wechsel um 20 Grad im frontalen Bereich (z.B. vom AZ 10° auf AZ 30°) ein beträchtliches Ansteigen der ILD – nämlich von 11,0 dB auf 34,9 dB. Das bedeutet, hier kommt es bei einer Änderung der Schalleinfallsrichtung um 20 Grad zu einem Δ von 23,9 dB. Bei Schallsignalen mit gleicher Frequenz bewirkt eine Änderung um 30 Grad im seitlichen Bereich z.B. vom AZ 60° (21,7 dB) zum AZ 90° (29,6 dB) nur ein Δ von 7,9 dB. Bei Schallsignalen anderer Frequenzen wie 4,2 kHz ist das Δ durch eine Änderung um 30 Grad im frontalen Bereich kleiner als durch eine Änderung um 30 Grad im seitlichen Bereich (vom AZ 10° auf 40° $\Delta = 3,5$ dB, vom AZ 60° auf 90° $\Delta = 6,9$ dB).

Die Ergebnisse für die beiden rechten Außenohrmodelle wurden aus Platzgründen nicht dargestellt. Die zu den linken Außenohrmodellen getroffenen Aussagen treffen aber auch hier zu. Individuelle Unterschiede sind in den konkreten Werten zu sehen. So zeigen beim rechten Außenohr von Tier 1 die ILD für Schallsignalen mit Frequenzen zwischen 3 kHz und 4 kHz bzw. zwischen 8 kHz und 9,5 kHz den schon an früherer Stelle besprochenen kontinuierlichen Anstieg der Werte bei der Verlagerung der Schallquelle aus dem frontalen Bereich in den seitlichen mit nachfolgendem Abfall bei einer weiteren Verlagerung in den rückwärtigen Bereich. Solche Frequenzbänder findet sich beim rechten Außenohr von Tier 2 für Frequenzen zwischen 6,4 kHz bis 7,8 kHz und zwischen 14,4 kHz und 15,5 kHz.

4.2.2 Einfluss des Wechsels der Ohrstellung auf die akustischen Übertragungsfunktionen

Vom Tier 2 wurden zusätzlich Außenohrmodelle in der seitwärts gerichteten Ohrposition untersucht. Die im vorangegangenen Abschnitt besprochene Ausprägung der

Freifeldübertragungsfunktion⁵ ist auch bei der seitwärts gerichteten Ohrposition zu beobachten (Abb. 4-20). Für den direkten Vergleich ist die Freifeldübertragungsfunktion des selben Außenohres in der vorwärts gerichteten Ohrposition in Abb. 4-21 dargestellt.

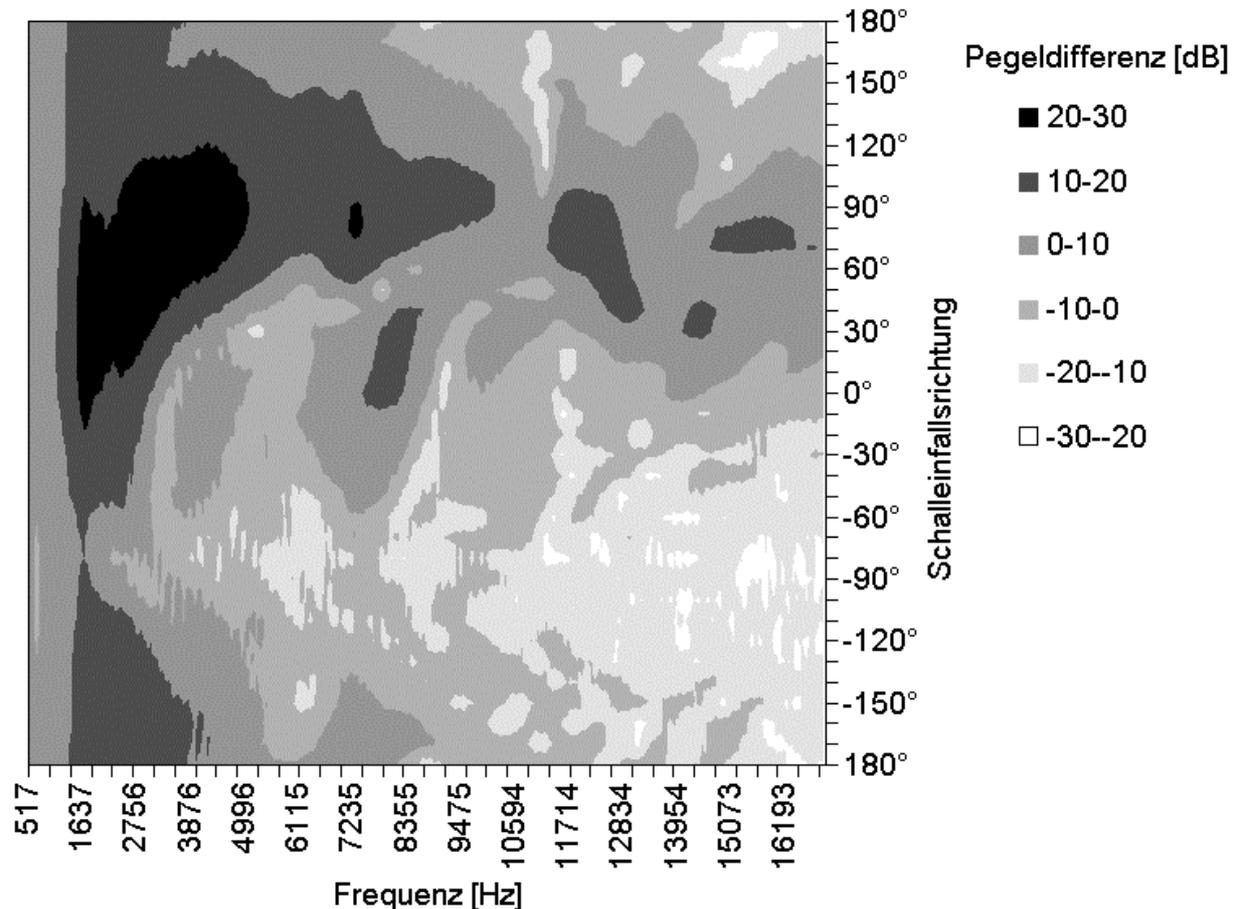


Abb. 4-20: Freifeldübertragungsfunktion des rechten Außenohrmodells von Tier 2 ohne Kunstkopf in der seitwärts gerichteten Ohrposition in der 3D-Perspektive: Frequenzbereich von 500 Hz bis 17000 Hz; negative Einfallswinkel repräsentieren Schalleinfall aus der contralateralen Seite, dagegen stehen positive Winkel für Schalleinfall aus der ipsilateralen Seite;

Die Drehung der Ohrmuschel von der frontalen Ausrichtung in die mehr laterale Ausrichtung führt zu einer seitlichen Verschiebung der Verstärkungsbereiche. In der vorwärts gerichteten Ohrposition werden Signalanteile bei Schalleinfall aus dem Azimut von -60° bis $+90^\circ$ über 20 dB verstärkt (Abb. 4-21 schwarzer Bereich). Dagegen finden eine Verstärkung von Signalanteilen über 20 dB bei seitlich ausgerichteten Ohrmuscheln bei Einfall aus dem

⁵ rasches Ansteigen der Pegeldifferenzen, beginnend bei den tiefen Frequenzen, und Ausformung des ersten und prominentesten Verstärkungsbereiches sowie der dortigen Ausbildung des spektralen Maximum; Ausbildung des ersten Einbruchs im mittel- bis höherfrequenten Bereich; Ausbildung weiterer Gipfel und Einbrüche im höherfrequenten Bereich mit starken individuellen Unterschieden in den konkreten Werten bei der Ausprägung

Azimut von -10° bis $+120^\circ$ statt (Abb. 4-20 schwarzer Bereich). Eine weitere Auswirkung der Verlagerung der Ohrmuschel in die seitliche Position besteht darin, dass sich ebenfalls die Bereiche der größten Signalabschwächung (in Abb. 4-20 und Abb. 4-21 weißer Bereich) verlagern, allerdings geringfügiger. Bei der vorwärts ausgerichteten Ohrmuschel liegt der niedrigste Wert der Pegeldifferenzen beim AZ von -110° (11,2 kHz mit -32 dB), bei den seitwärts ausgerichteten Außenohren beim AZ von -80° (15,5 kHz mit -27 dB). Zudem werden bei seitlich ausgerichteten Ohrmuscheln hochfrequente Signalanteile bei Schalleinfall aus dem hinteren und contralateralen Quadranten im Verhältnis zu der vorwärts gerichteten Ohrposition weniger stark abgeschwächt (siehe Pegeldifferenzen für Frequenzen über 10 kHz beim AZ von 180° bis -60° in den Abb. 4-20 und Abb. 4-21, sowie den zuvor schon erwähnten niedrigsten Wert der Pegeldifferenzen).

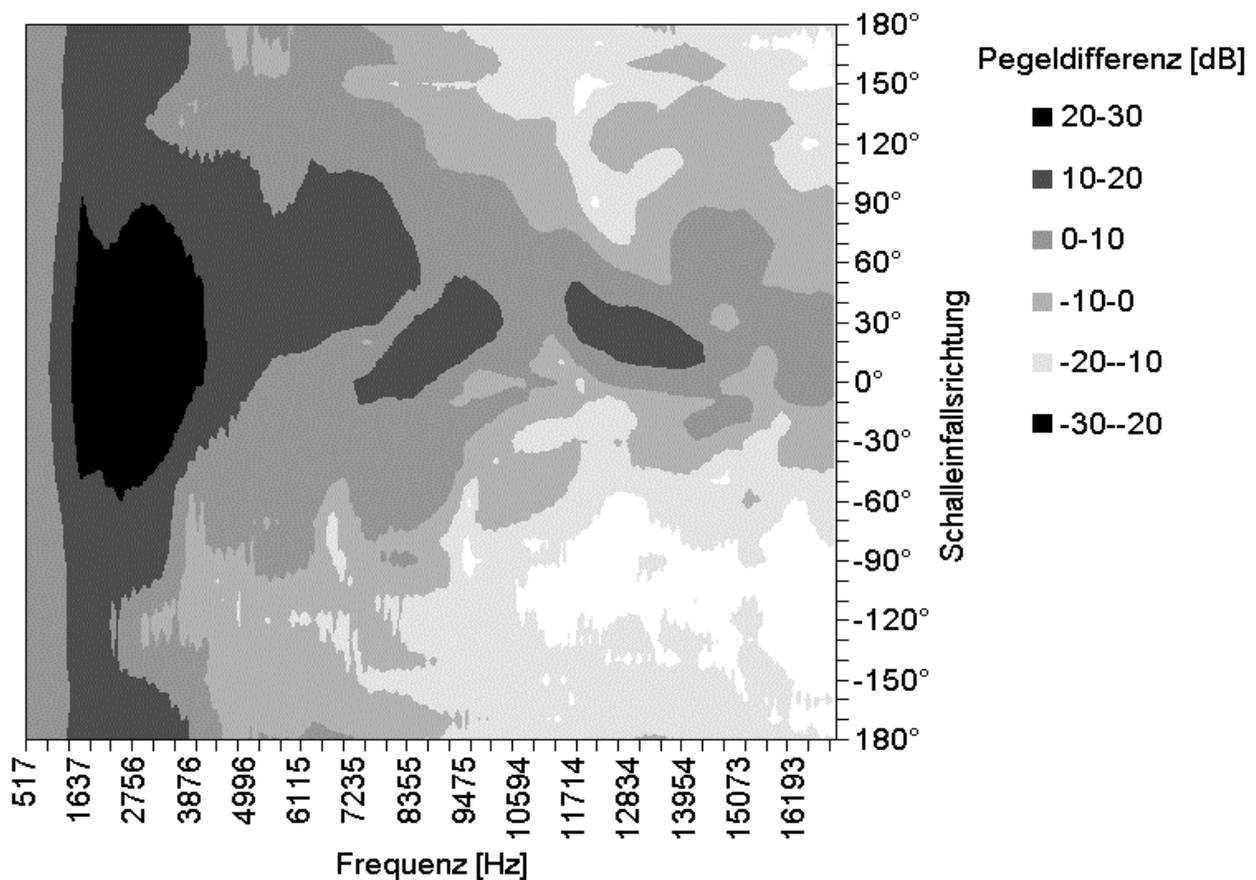


Abb. 4-21: Freifeldübertragungsfunktion des rechten Außenohrmodells von Tier 2 ohne Kunstkopf in der vorwärts gerichteten Ohrposition in der 3D-Perspektive: Frequenzbereich von 500 Hz bis 17000 Hz, negative Einfallswinkel repräsentieren Schalleinfall aus der contralateralen Seite, dagegen stehen positive Winkel für Schalleinfall aus der ipsilateralen Seite;

Die starken Vorn/Hinten-Unterschiede der Freifeldübertragungsfunktionen bei vorwärts ausgerichteten Ohrmuscheln verringern sich bei der Drehung der Ohren in die seitliche

Position (Abb. 4-22). Obwohl bei den Freifeldübertragungsfunktionen bei frontalem (AZ 0°) und rückwärtigem (AZ 180°) Schalleinfall in der seitwärts gerichteten Ohrposition die Lage von prominenten Einbrüchen und Gipfeln nicht identisch ist, sind die Unterschiede der Pegeldifferenzen nicht mehr so gravierend wie bei der vorwärts gerichteten Ohrposition.

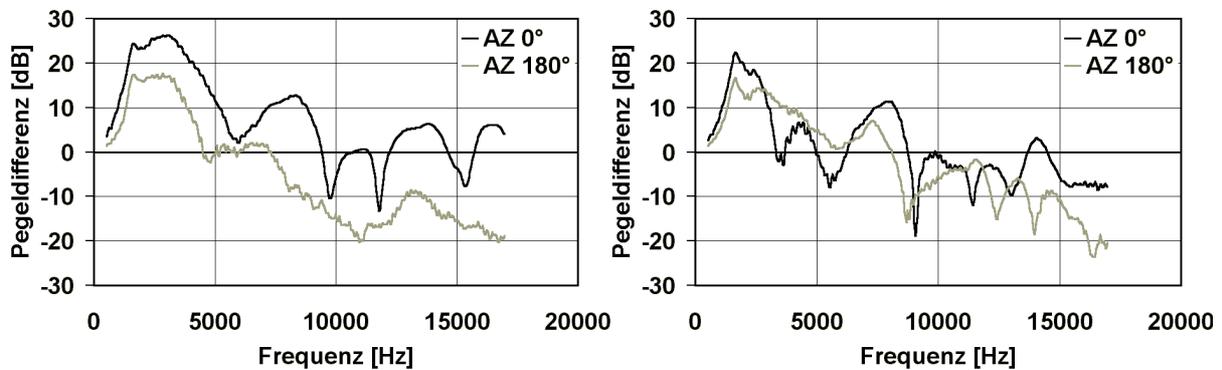


Abb. 4-22: Freifeldübertragungsfunktion des rechten Außenohrmodells von Tier 2 bei frontalem (AZ 0°) und rückwärtigem (AZ 180°) Schalleinfall: linke Abbildung – Verhältnisse bei der vorwärts gerichteten Ohrposition; rechte Abbildung – Verhältnisse bei der seitwärts gerichteten Ohrposition

Bei der Betrachtung der akustischen Frequenzachsen wird die Verlagerung des Verstärkungsbereiches deutlich. Während alle betrachteten Frequenzen bei der vorwärts gerichteten Ohrposition ihr räumliches Maximum im Durchschnitt beim Azimut von 30° besitzen (Abb. 4-23 links), bewirkt die Seitwärtsverlagerung der Ohrmuschel ein Abdriften der räumlichen Maxima in den lateralen Bereich - im Durchschnitt beim AZ von 70° (Abb. 4-23 rechts).

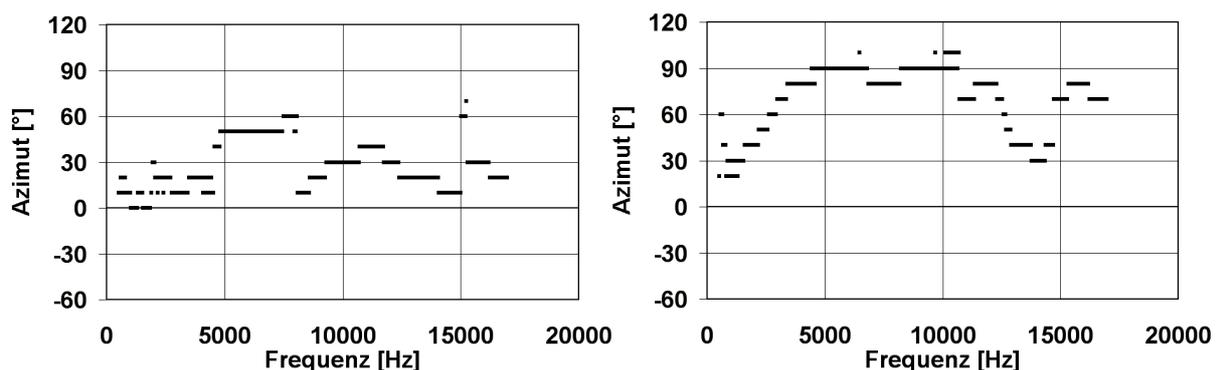


Abb. 4-23: räumliche Maxima der Frequenzen von 500 Hz bis 17 kHz in den Freifeldübertragungsfunktionen bei Schalleinfall von 0° bis 360°: linke Abbildung – rechtes Außenohrmodell von Tier 2 in der vorwärts gerichteten Ohrposition, rechte Abbildung – rechtes Außenohrmodell von Tier 2 in der seitwärts gerichteten Ohrposition; jeder Messpunkt zeigt die Schalleinfallrichtung im Azimut an, in der sich das räumliche Maximum (maximaler Wert) einer Frequenz befindet (akustische Frequenzachse)

Während bei Frequenzen zwischen 500 Hz und 2,5 kHz die akustischen Frequenzachsen noch bei ca. 30° liegen, wandern sie mit steigender Frequenz stetig immer weiter in den seitlichen Bereich. Schallsignale mit Frequenzen zwischen 4 kHz und 12 kHz erfahren ihre maximale Verstärkung bei Einfall aus dem Azimut zwischen 80° und 100°. Die räumlichen Maxima der Frequenzen zwischen 13 kHz und 14,5 kHz befinden sich zwar wieder bei ca. 30°; steigen die Frequenzen aber weiter an, kommt es zu einem weiteren Abdriften in den lateralen Bereich.

Die seitwärts gerichtete Ohrposition wirkt sich natürlich auch auf das spektrale Maximum aus, das schon die 3D-Perspektive der Freifeldübertragungsfunktion vermuten lässt. Die akustische spektrale Achse wandert in den seitlichen Bereich: beim rechten Modell von 10° nach 60° (Abb. 4-24); beim linken Modell von 20° nach 60° (nicht gezeigt).

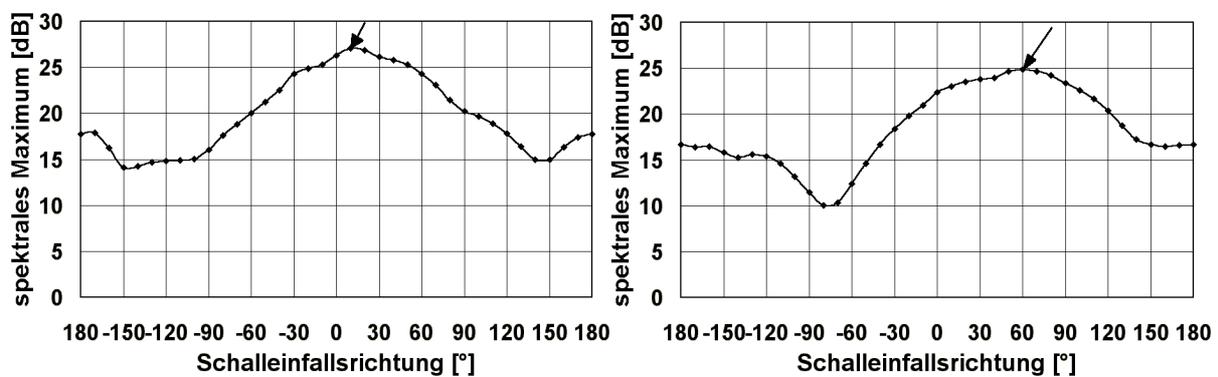


Abb. 4-24: spektrale Maxima der Freifeldübertragungsfunktionen: linke Abbildung – rechtes Außenohrmodell von Tier 2 in der vorwärts gerichteten Ohrposition, rechte Abbildung – rechtes Außenohrmodell von Tier 2 in der seitwärts gerichteten Ohrposition; jeder Messpunkt zeigt das spektrale Maximum (maximaler Wert) einer Freifeldübertragungsfunktion und die dazugehörige Schalleinfallrichtung im Azimut an; der Pfeil gibt die akustische spektrale Achse für dieses Modell an

Nicht nur die spektralen Maxima und die akustischen Frequenzachsen werden durch den Wechsel der Ohrposition um 40 Grad bis 50 Grad verschoben, auch die gesamte spektrale Gestalt der Freifeldübertragungsfunktionen erfährt diese Verschiebung (Abb. 4-25). Bei der Betrachtung einzelner Freifeldübertragungsfunktionen zwischen den beiden Ohrpositionen können Ähnlichkeiten in der Gestalt des Graphs dieser Funktionen festgestellt werden. Zum Beispiel zeigt der Graph der Freifeldübertragungsfunktion beim AZ von 20° bei der vorwärts gerichteten Ohrposition viele Analogien zum Graph der Freifeldübertragungsfunktion beim AZ von 40° bei der seitwärts gerichteten Ohrposition (z.B. in der Ausprägung einzelner spektraler Merkmale). Dies ist auch bei 40° (vorwärts) und 80° (seitwärts) sowie bei 80° (vorwärts) und 120° (seitwärts) zu beobachten und es ließen sich noch weitere ähnliche Schalleinfallrichtungen finden.

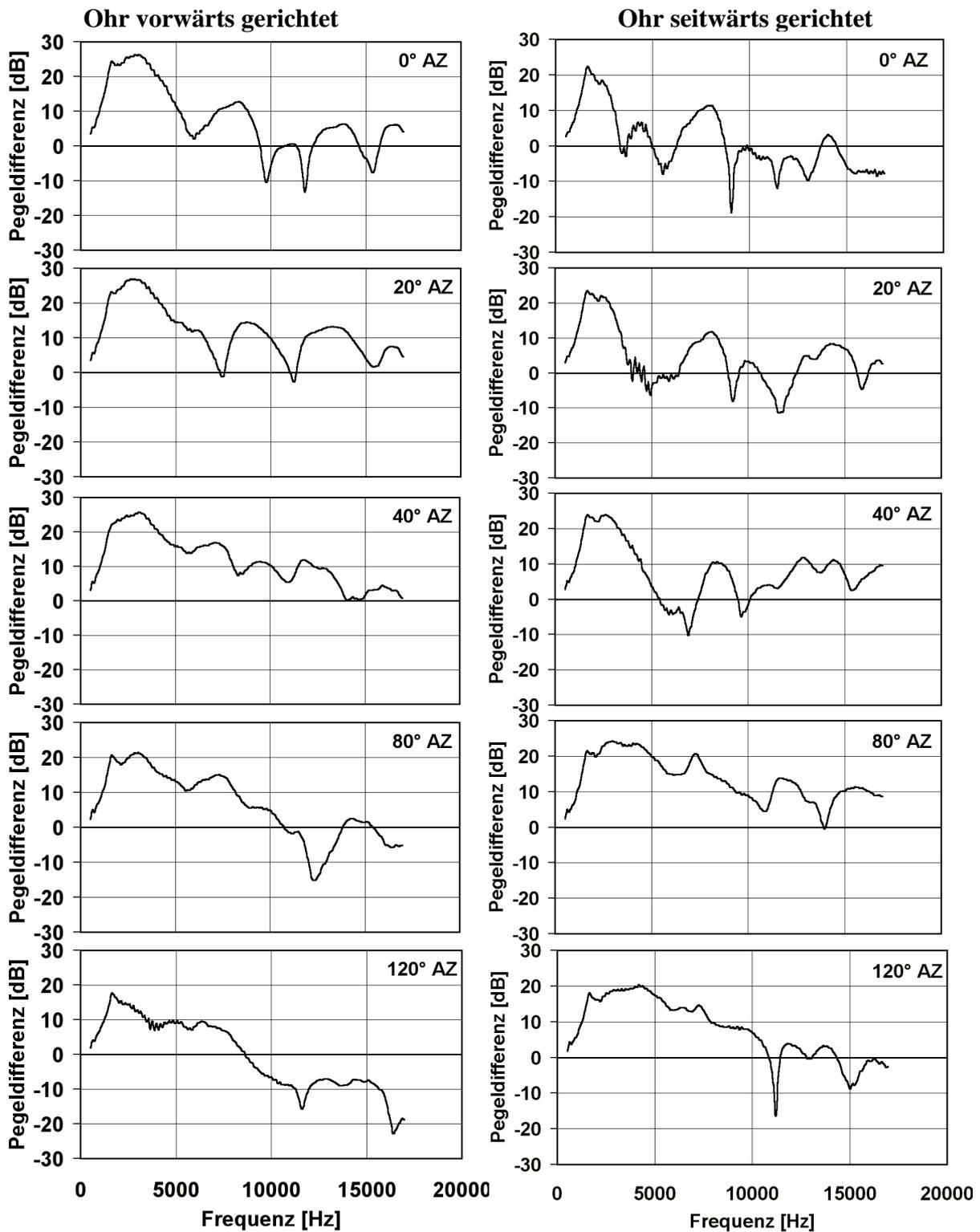


Abb. 4-25: Freifeldübertragungsfunktionen des rechten Außenohrmodells von Tier 2 in der vorwärts gerichteten Ohrposition (linke Seite) und der seitwärts gerichteten Ohrposition (rechte Seite) bei frontalem und seitlichem Schalleinfall (AZ 0° bis 120°): die spektrale Gestalt einiger Freifeldübertragungsfunktionen zeigen Ähnlichkeiten zwischen den beiden Ohrpositionen, nur die dazugehörige Schalleinfallrichtung ist verschoben

Die Ausbildung des ersten Einbruchs erfolgt in den Freifeldübertragungsfunktionen der seitwärts gerichteten Ohrmodelle analoge zu den vorwärts gerichteten Ohrmodellen. Die Schalleinfallrichtungen, in denen die ausgeprägte Richtungsabhängigkeit des ersten Einbruchs zu beobachten ist, verändert sich allerdings ebenfalls mit der Verlagerung der äußeren Ohrmuschel und wird in Abb. 4-26 gezeigt. Beim rechten Modell steigt die zentrale Frequenz des ersten Einbruchs von 3,8 kHz bei 10° auf 6,9 kHz bei 40° an. Beim linken Modell ist ein eindeutiges Ansteigen des ersten prominenten Einbruchs zwischen dem AZ von -50° bis 30° (von 3,4 kHz bis 6,8 kHz) zu verfolgen. Danach verliert der erste Einbruch seine systematische Richtungsabhängigkeit.

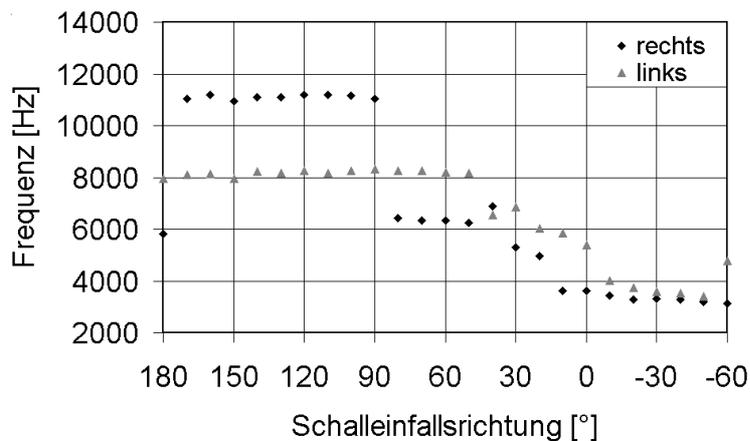


Abb. 4-26: zentrale Frequenz des ersten Einbruchs in den Freifeldübertragungsfunktionen in Abhängigkeit von der Schalleinfallrichtung zwischen dem Azimut von 180° und -60° bei den seitwärts gerichteten Außenohrmodellen von Tier 2

Für eine quantitative Aussage über die Richtungsabhängigkeit einzelner Frequenzen kann die maximale Änderung der Pegeldifferenzen ($\Delta\text{dB}_{\text{max}}$) in den Freifeldübertragungsfunktionen verschiedener Schalleinfallrichtungen genutzt werden. Abb. 4-27 stellt die Ergebnisse der vorwärts und seitwärts gerichteten Ohrpositionen für das rechte Außenohr von Tier 2 dar. In Abschnitt 4.2.1.1 konnte für das vorwärts gerichtete Ohr schon gezeigt werden, dass Schallsignale mit niedrigen Frequenzen (unter 1 kHz) nur eine geringfügige Änderung ihrer Pegeldifferenzen mit dem Wechsel des Schallquellenortes zeigen und somit keine Richtungsangabe zulassen. Signalanteile mit höheren Frequenzen zeigen dagegen einen beachtlichen Wechsel ihrer Werte mit der Änderung der Schalleinfallrichtung. Diese Aussagen lassen sich auch für das seitwärts gerichtete Ohr bestätigen. Bei Schallsignalen mit niedrigen Frequenzen liegt $\Delta\text{dB}_{\text{max}}$ unter 5 dB – dies gilt beim rechten seitwärts gerichteten Außenohr für Frequenzen unter 1,3 kHz, beim rechten vorwärts gerichteten Außenohr für Frequenzen unter 820 Hz (Abb. 4-27). $\Delta\text{dB}_{\text{max}}$ steigt dann stetig mit der Zunahme der

Frequenzen an. Bei dem seitwärts gerichteten Modell bilden Signalanteile mit Frequenzen über 3 kHz ein $\Delta\text{dB}_{\text{max}}$ über 20 dB aus; für das vorwärts gerichtete Modell gilt das für Frequenzen über 3,6 kHz. Das bedeutet, dass Schall mit Frequenzen, die den ersten prominenten Verstärkungsbereich ausbilden (d.h. in der Freifeldübertragungsfunktion am stärksten verstärkt werden), unter $\Delta\text{dB}_{\text{max}} = 20$ dB liegen. Die größten Änderungen ihrer Pegeldifferenzen mit der Änderung der Schalleinfallrichtung besitzen Schallsignale mit hohen Frequenzen. Sie zeigen eine starke Richtungsabhängigkeit. Für Frequenzen unter 9 kHz findet sich für beide Ohrmuschelausrichtungen ein ähnliches Verhalten des $\Delta\text{dB}_{\text{max}}$. Für höhere Frequenzen liegen die Werte von $\Delta\text{dB}_{\text{max}}$ bei der seitwärts gerichteten Ohrposition etwas tiefer, aber immer noch im Durchschnitt zwischen 20 dB und 30 dB. Die Ursache für dieses Verhalten ist in der Tatsache zu suchen, dass - wie bereits schon erwähnt - bei der seitwärts gerichteten Ohrposition Schall mit höheren Frequenzen bei Einfall aus dem hinteren und contralateralen Quadranten im Verhältnis zu der vorwärts gerichteten Ohrposition weniger stark abgeschwächt werden.

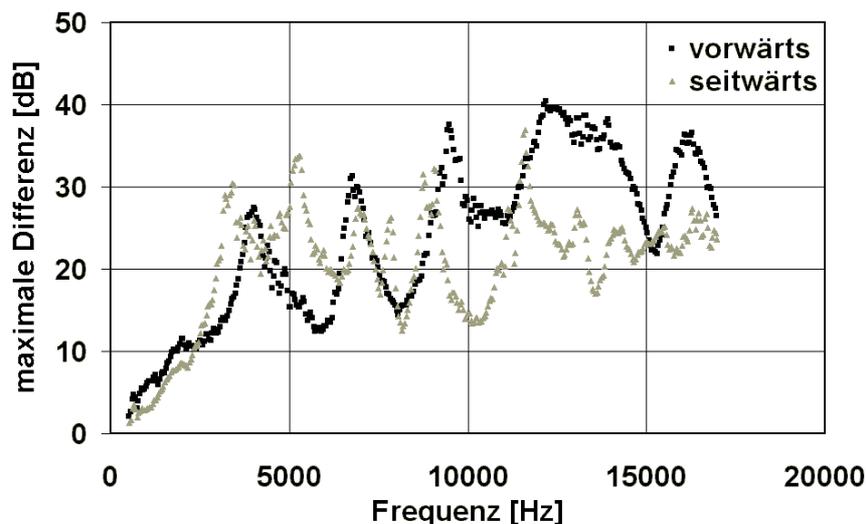


Abb. 4-27: maximale Änderung der Pegeldifferenzen ($\Delta\text{dB}_{\text{max}}$) der Frequenzen zwischen 500 Hz und 17 kHz, ermittelt am rechten vorwärts und seitwärts gerichteten Außenohrmodell von Tier 2: jeder Messpunkt stellt die Differenz zwischen dem maximalen und minimalen Wert der Pegeldifferenzen einer Frequenz in den Freifeldübertragungsfunktionen bei Schalleinfall aus dem Azimut von -90° bis $+90^\circ$ (vorwärts) bzw. von -30° bis $+150^\circ$ (seitwärts) dar

4.2.3 Einfluss des Kopfes

4.2.3.1 Akustische Übertragungsfunktion der Außenohrmodelle am Kunstkopf

Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass schon durch das Außenohr ein enormer Beitrag an der Umformung eines Signals geleistet wird. Passiert ein Signal vom freien Feld zum Trommelfell des Außenohr, so erhält es richtungsspezifische Informationen. Die Stellung der äußeren Ohrmuschel dient dabei der Optimierung dieses Prozesses je nach akustischer Situation (Schalleinfall aus dem frontalen oder seitlichen Bereich). Im nun folgenden Abschnitt soll der Einfluss des Kopfes auf die Übertragungsfunktionen betrachtet werden. In Versuch 3 wurden die beiden vorwärts gerichteten Außenohrmodelle von Tier 2 an dem Kunstkopf von Tier 2 befestigt und die daraus resultierenden Änderungen aufgezeichnet.

In Abb. 4-28 sind die Freifeldübertragungsfunktionen des rechten vorwärts gerichteten Außenohrmodells von Tier 2 mit dem Kunstkopf im Versuchsaufbau dargestellt.

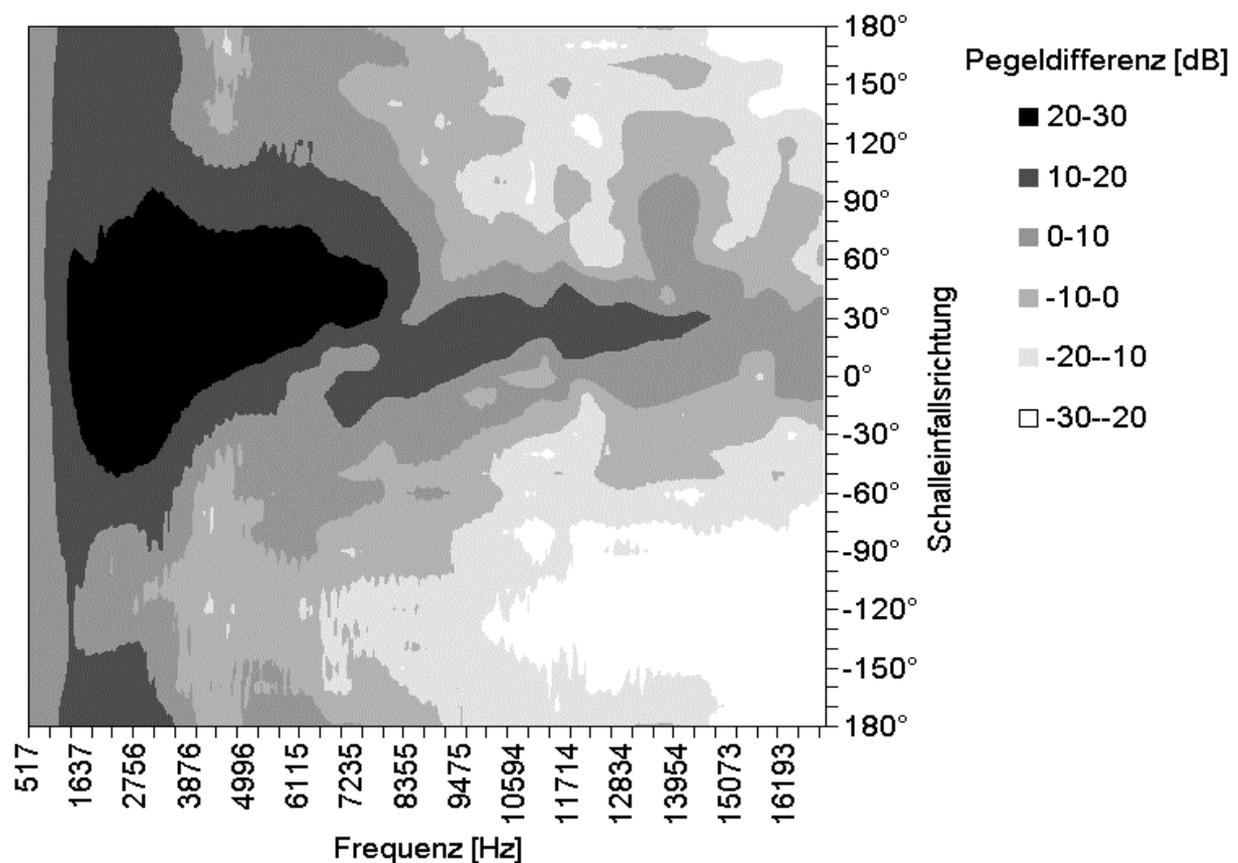


Abb. 4-28: Freifeldübertragungsfunktion des rechten vorwärts gerichteten Außenohrmodells von Tier 2 mit Kunstkopf in der 3D-Perspektive: Frequenzbereich von 500 Hz bis 17000 Hz, negative Einfallswinkel repräsentieren Schalleinfall aus der contralateralen Seite, dagegen stehen positive Winkel für Schalleinfall aus der ipsilateralen Seite

Als Vergleich dient die Abb. 4-21 aus Abschnitt 4.2.2 (Seite 86), die die analogen Freifeldübertragungsfunktionen ohne Vorhandensein des Kunstkopfes in der Versuchsdurchführung zeigen. Anhand dieser Abbildungen lässt sich der Einfluss des Kopfes sehr gut erkennen. Die Werte der Pegeldifferenzen niedriger Frequenzen (unter 1 kHz) werden durch den Kunstkopf kaum beeinflusst. Bei Schallsignalen mit Frequenzen zwischen 1,3 kHz und 3,5 kHz kann ein Einfluss des Kunstkopfes auf die Pegeldifferenzen bei contralateralem Schalleinfall (AZ -80° bis -140°) beobachtet werden. Die Werte der Pegeldifferenzen liegen hier unter den Werten in den Freifeldübertragungsfunktionen ohne Kunstkopf. Die Verstärkung von Schallsignalen mit diesen Frequenzen durch das Außenohr wird durch das Vorhandensein des Kunstkopfes vermindert, d.h. der Kunstkopf schwächt den Einfall von Schallsignalen mit Frequenzen zwischen 1,3 kHz und 3,5 kHz in das contralaterale Außenohr ab.

Des Weiteren zeigt die Anwesenheit des Kopfes auf die Pegeldifferenzen einiger höherer Frequenzen ebenfalls einen deutlichen Einfluss. Um dies besser zu verdeutlichen, werden in Abb. 4-29 ausgewählte Freifeldübertragungsfunktionen des rechten Außenohres von Tier 2 im direkten Vergleich dargestellt. Bei Schalleinfall aus dem frontalen Bereich bewirkt der Kunstkopf eine weitere Verstärkung von Signalanteilen mit Frequenzen zwischen 4 kHz bis 8 kHz (siehe Abb. 4-29: AZ von $+20^\circ$ bis $+60^\circ$ sowie Abb. 4-28 – deutliche Vergrößerung des schwarzen Bereiches beim AZ von 0° bis $+80^\circ$). So werden z.B. Schallsignale mit Frequenzen zwischen 1,3 kHz und 7,9 kHz bei Einfall aus dem AZ von $+40^\circ$ weit über 20 dB durch das Außenohr und den Kopf verstärkt.

Bei contralateralem Schalleinfall wird die Wirkungsweise der Außenohren durch den Kunstkopf bestärkt, d.h. der Kopf unterstützt die Abschwächung von Schall mit hohen Frequenzen (siehe Abb. 4-28). Bei Anwesenheit des Kunstkopfes werden Frequenzen zwischen 10 kHz und 17 kHz bei Schalleinfall aus dem AZ von -80° bis -150° im Durchschnitt rechts um 25,53 dB und links um 21,76 dB abgeschwächt, bei Abwesenheit des Kunstkopfes liegt die Abschwächung im analogen Bereich rechts bei 20,98 dB und links bei 19,05 dB.

Die zu beobachtende Veränderung der zentralen Frequenzen einiger Einbrüche bei gleicher Schalleinfallrichtung in den beiden Experimenten (z.B. Abb. 4-29 AZ 0°) könnte ein Artefakt darstellen, hervorgerufen auf Grund von Fehlern in der Ausrichtung des Versuchsaufbaus. Die Modellanordnung in den beiden Versuchen (mit und ohne Kunstkopf) scheint um ca. 10° zueinander verschoben zu sein. Dies kann dadurch hervorgerufen werden,

dass die Modelle im Kunstkopf angebracht werden, dadurch einige Ausrichtungspunkte verschwinden und damit eine exakte Plazierung erschwert wird.

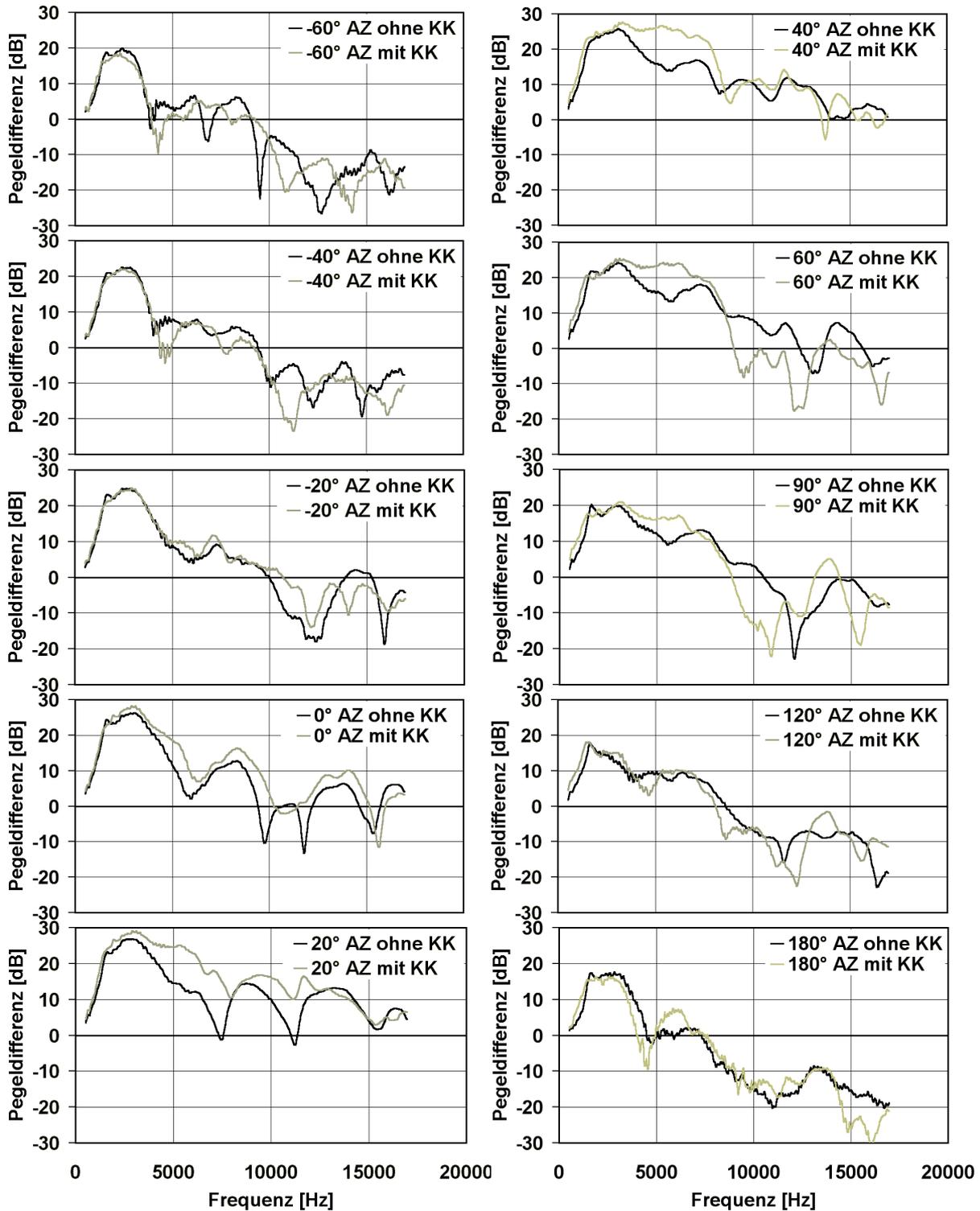


Abb. 4-29: ausgewählte Freifeldübertragungsfunktionen des rechten Außenohrmodells von Tier 2 mit und ohne Kunstkopf (KK) im Versuchsaufbau: Frequenzbereich von 500 Hz bis 17000 Hz, Azimut von -60° bis 180°

Die bisher getroffenen Aussagen zur Wirkung des Kunstkopfes (Abschwächung bei contralateralem Schalleinfall; Verstärkung bei frontalem Schalleinfall) können durch die Betrachtung der ermittelten spektralen und räumlichen Maxima bestätigt werden. Der Kunstkopf hat keinen Einfluss auf die Lage der akustischen spektralen Achse (Abb. 4-30). Allerdings wird der Wert der spektralen Maxima bei frontalem Schalleinfall erhöht, besonders beim AZ von -10° bis $+60^\circ$. Weiterhin wird der Wert der spektralen Maxima bei contralateralem Schalleinfall vermindert, besonders beim AZ von -70° bis -140° .

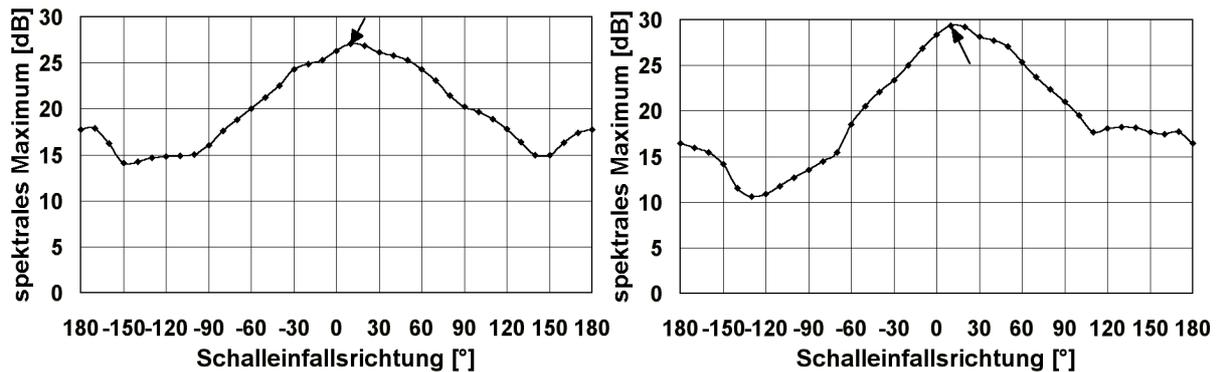


Abb. 4-30: spektrale Maxima der Freifeldübertragungsfunktionen: linke Abbildung – rechtes Außenohrmodell von Tier 2 ohne Kunstkopf, rechte Abbildung – rechtes Außenohrmodell von Tier 2 mit Kunstkopf; jeder Messpunkt zeigt das spektrale Maximum (maximaler Wert) einer Freifeldübertragungsfunktion und die dazugehörige Schalleinfallrichtung im Azimut an; der Pfeil gibt die akustische spektrale Achse für dieses Modell an

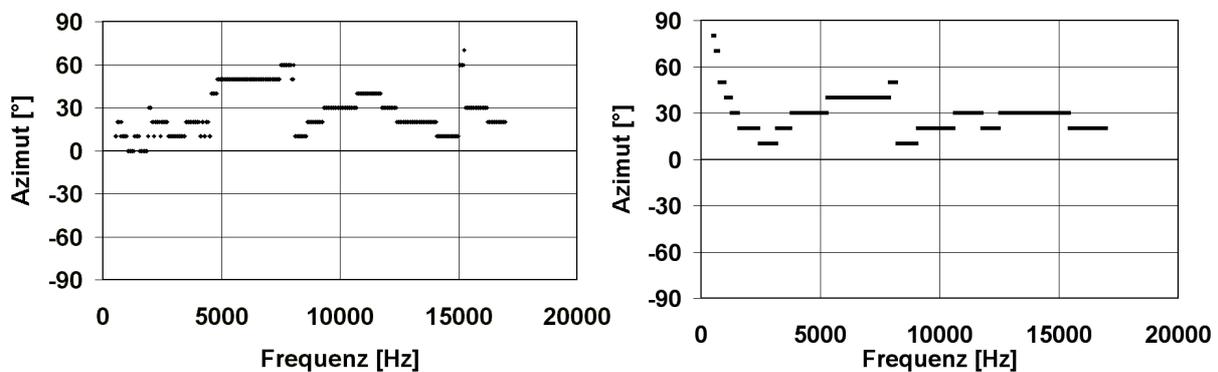


Abb. 4-31: räumliche Maxima der Frequenzen von 500 Hz bis 17 kHz in den Freifeldübertragungsfunktionen bei Schalleinfall von 0° bis 360° : linke Abbildung – rechtes Außenohrmodell von Tier 2 ohne Kunstkopf, rechte Abbildung – rechtes Außenohrmodell von Tier 2 mit Kunstkopf; jeder Messpunkt zeigt die Schalleinfallrichtung im Azimut an, in der sich das räumliche Maximum (maximaler Wert) einer Frequenz befindet (akustische Frequenzachse)

Die Ergebnisse des räumlichen Maximum jeder Frequenz zeigen ebenfalls einen Einfluss durch den Kunstkopf (Abb. 4-31). Andererseits liegen die Maxima auch hier im Durchschnitt bei 30° . Der Kunstkopf bewirkt eine Verringerung der Streuung der Werte von 0° bis 60°

(ohne Kunstkopf) auf 10° bis 40° (mit Kunstkopf). Einzig niedrige Frequenzen (unter 1 kHz) bilden eine Ausnahme. Sie erfahren ihre maximale Verstärkung bei seitlichem Schalleinfall.

Die richtungsabhängige Verschiebung der Lage des ersten Einbruchs wird durch den Kunstkopf nicht weiter beeinträchtigt (Abb. 4-32), sondern stabilisiert. So wird ein Ausreißer wie beim AZ von -30° - ohne KK liegt die zentrale Frequenz des ersten Einbruchs bei 11 kHz - durch den Kunstkopf verhindert. Des weiteren wird der Bereich, in dem ein systematisches Ansteigen der zentralen Frequenz beobachtet werden kann, durch den Kunstkopf vergrößert. Ohne Kunstkopf kann die richtungsabhängige Verschiebung der Lage des ersten Einbruchs beim rechten Außenohrmodell zwischen dem AZ von 0° bis $+50^\circ$ wahrgenommen werden. Durch den Kunstkopf findet das systematische Ansteigen der zentralen Frequenz zwischen dem AZ von -10° (6158 Hz) bis $+70^\circ$ (12016 Hz) statt. Beim linken Außenohr von Tier 2 (Daten aus Platzgründen nicht gezeigt) wird der Einfallsbereich von -40° bis $+20^\circ$ (ohne KK) auf -30° bis $+80^\circ$ (mit KK) ausgedehnt.

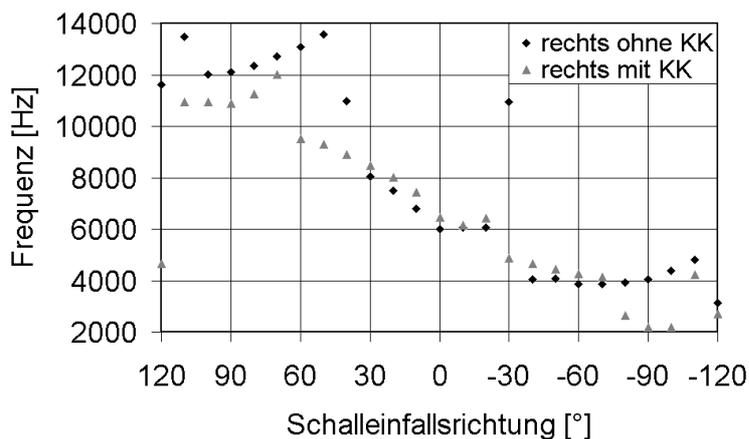


Abb. 4-32: zentrale Frequenz des ersten Einbruchs in Abhängigkeit von der Schalleinfallsrichtung zwischen dem Azimut von $+120^\circ$ und -120° beim rechten vorwärts gerichteten Außenohrmodell von Tier 2 mit und ohne Kunstkopf (KK)

Inwieweit das Vorhandensein eines Kopfes ΔdB_{\max} beeinflusst, zeigt Abb. 4-33. Es kann kein Abweichen in der Verlaufstendenz von ΔdB_{\max} bei den beiden Versuchsanordnungen beobachtet werden. Die höheren Werte von ΔdB_{\max} bei Frequenzen zwischen 2 kHz bis 4 kHz mit Kunstkopf sind auf die höhere Abschwächung dieser Frequenzen bei contralateralem Schalleinfall durch den Kopf zurück zu führen. Die Erhöhung der ΔdB_{\max} -Werte bei Frequenzen zwischen 4 kHz und 6,5 kHz ist in der Wirkungsweise des Kopfes bei frontalem Schalleinfall zu suchen (verstärkende Wirkung auf Frequenzen zwischen 4 kHz bis 8 kHz).

Die Ergebnisse zum Einfluss des Kopfes auf die Freifeldübertragungsfunktion werden durch die Daten vom linken Modell bestätigt (Daten aus Platzgründen nicht gezeigt).

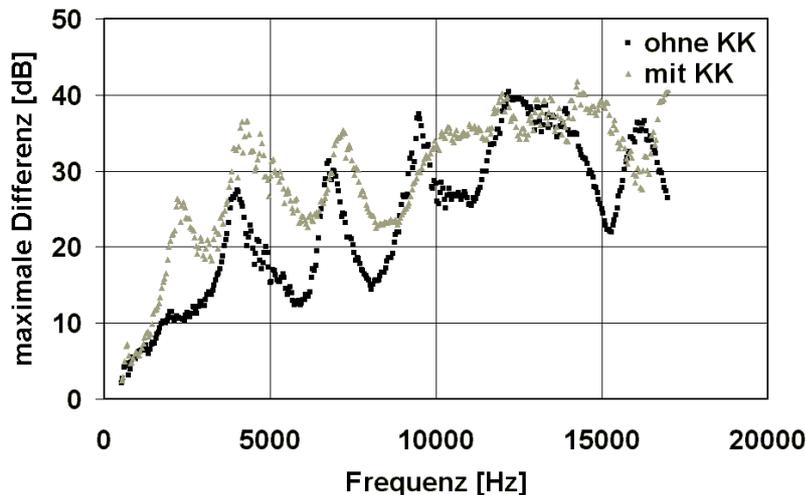


Abb. 4-33: maximale Änderung der Pegeldifferenzen (ΔdB_{\max}) der Frequenzen zwischen 500 Hz und 17 kHz, ermittelt am rechten vorwärts gerichteten Außenohrmodell von Tier 2 mit und ohne Kunstkopf (KK): jeder Messpunkt stellt die Differenz zwischen dem maximalen und minimalen Wert der Pegeldifferenzen einer Frequenz in den Freifeldübertragungsfunktionen bei Schalleinfall aus dem Azimut von -90° bis $+90^\circ$ dar

4.2.3.2 Laufzeitdifferenzen

Im folgenden sollen die Ergebnisse aus der Ermittlung der Laufzeitdifferenzen eines 500 Hz Sinustones in Abhängigkeit von dem Wechsel der Schalleinfallrichtung in der Horizontalebene dargelegt werden. Dabei sollen zuerst in Abb. 4-34 die Daten von Tier 1 und 2 ohne Kunstkopf präsentiert werden. Im Anschluss wird der Einfluss des Kunstkopfes auf die Laufzeitdifferenzen bei Tier 2 aufgezeigt.

Der Graph in Abb. 4-34 besitzt einen sinusförmigen Verlauf und erfährt seine maximale Auslenkung bei seitlichem Schalleinfall. Bei Schalleinfall aus dem AZ von 90° beträgt die aus der gemessenen Laufzeitdifferenz von $370 \mu s$ (Tier 1) berechnete Wegdifferenz 127 mm bzw. bei Tier 2 sind das bei Zugrundelegen von $427 \mu s$ 146,5 mm. Die mittels Bandmaß gewonnenen Abstände zwischen dem rechten und linken Außenohrmodell, dargestellt in Tabelle 4-3 in Abschnitt 4.1 (Seite 62), zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit diesen Werten. Bei Tier 1 beträgt der kürzeste Abstand zwischen dem rechten und linken Außenohrmodell (Abstand zwischen den distalen Enden der rostralen Muschelränder) 127 mm, bei Tier 2 sind es 115 mm. Der Abstand zwischen den Incisurae intertragicae beträgt bei Tier 2 148 mm. Damit liegt der Eintrittspunkt in das Außenohr für ein Signal bei seitlichem Schalleinfall zwischen der Incisura intertragica und dem rostralen Muschelrand. Die Laufzeitdifferenzen eines 500 Hz Sinustones zeigen eine starke Richtungsabhängigkeit.

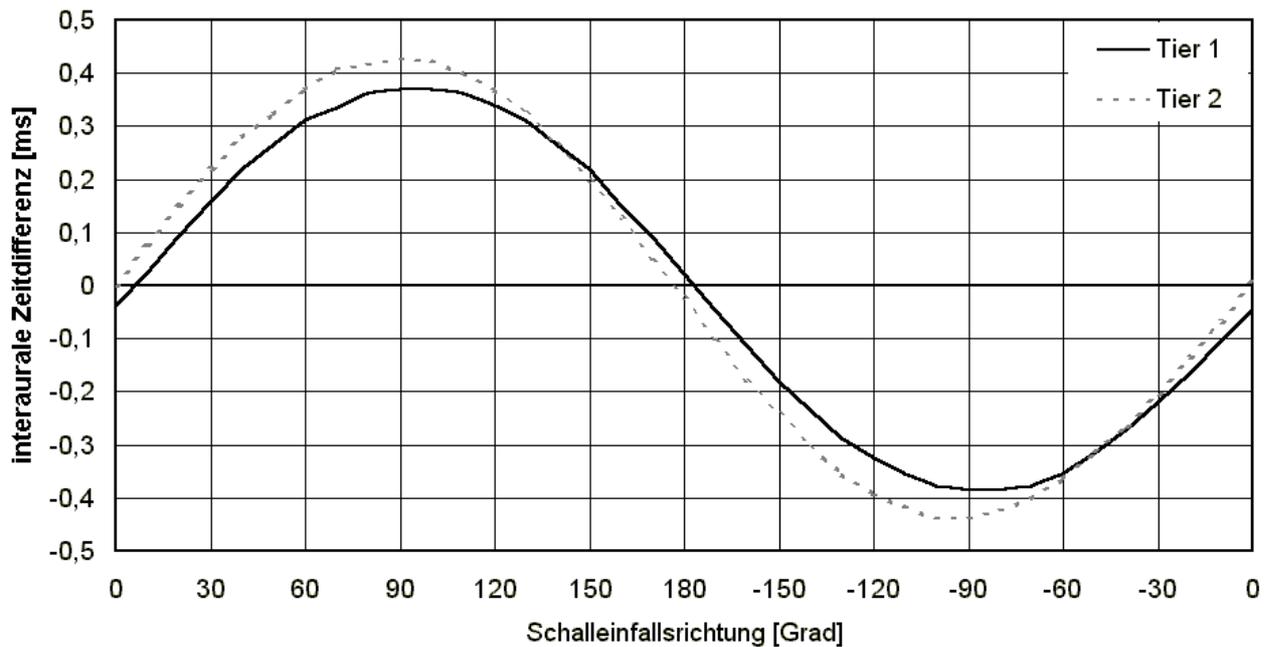


Abb. 4-34: Laufzeitdifferenzen (in ms) eines 500 Hz Sinustones bei verschiedenen Schalleinfallrichtungen, gemessen an den Außenohrmodellen von Tier 1 und Tier 2 ohne Kunstkopf

Bei Tier 2 konnte durch die Versuchsanordnung der Einfluss des Kopfes sowohl auf Pegeldifferenzen als auch auf Laufzeitdifferenzen dargestellt werden.

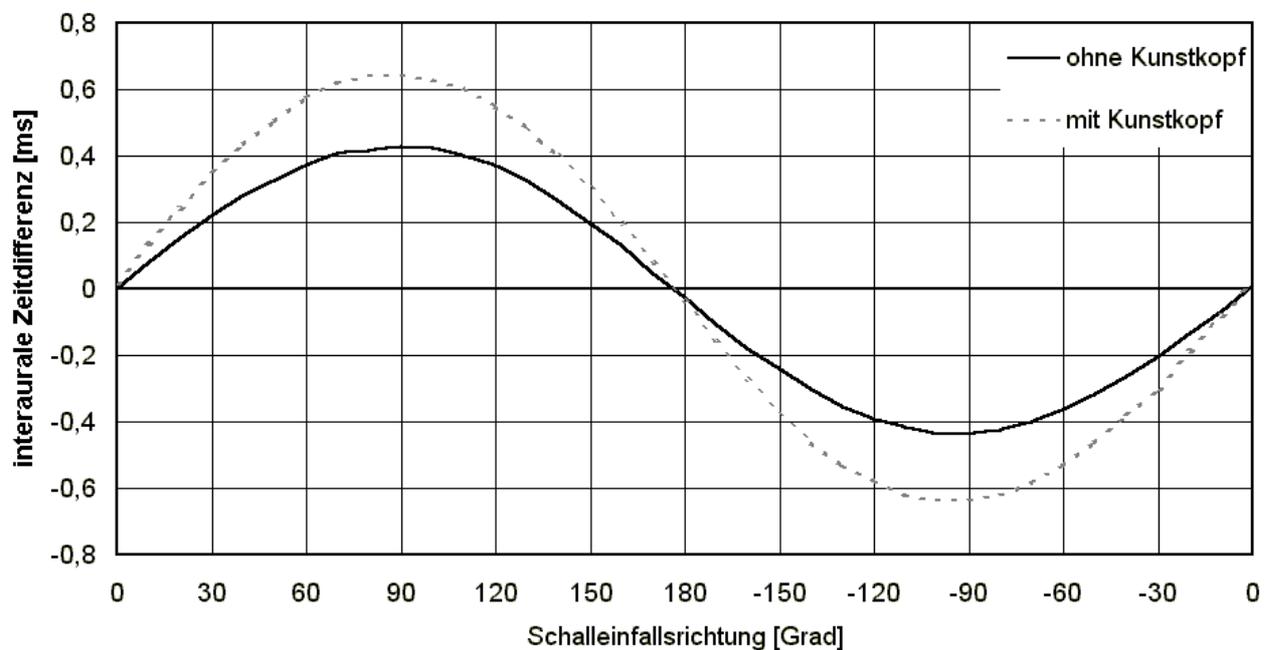


Abb. 4-35: Laufzeitdifferenzen (in ms) eines 500 Hz Sinustones bei verschiedenen Schalleinfallrichtungen, gemessen an den Außenohrmodellen von Tier 2 ohne (Versuch 2) und mit Kunstkopf (Versuch 3)

Die Pegeldifferenzen von Schallsignalen mit niedrigen Frequenzanteilen werden durch den Kunstkopf nicht beeinflusst. Bei den Laufzeitdifferenzen eines niederfrequenten Tones, z.B.

der 500 Hz Sinuston, ist dagegen ein Einfluss festzustellen (Abb. 4-35). Durch den Kunstkopf kommt es zu einer Vergrößerung der Laufzeitdifferenzen bei seitlichem Schalleinfall. Das Maximum beim Azimut von 90° erhöht sich von $427 \mu\text{s}$ (Messung ohne Kunstkopf) auf $643 \mu\text{s}$ durch das Vorhandensein des Kunstkopfes zwischen dem linken und rechten Außenohrmodell. $643 \mu\text{s}$ entsprechen einer Wegdifferenz von $220,5 \text{ mm}$. Bei der Bestimmung der interauralen Abstände am Modell mittels Bandmaß beträgt der Abstand zwischen den Mittelpunkten der Strecke „rostraler Muschelrand - Incisura intertragica“ durch die Einbeziehung der Kopfkrümmung 225 mm . Der gemessene Abstand zeigt damit auch hier eine gute Übereinstimmung mit der aus der Laufzeitdifferenz ermittelten Wegdifferenz.

4.2.4 Einfluss der Conchainenstrukturen auf die Übertragungsfunktionen

Der Einfluss der Conchainenstrukturen wurde am rechten Außenohrmodell von Tier 1 untersucht, in dem alle Vorsprünge und Erhabenheiten in der Concha, z.B. die Anthelix, entfernt wurden und damit auch alle höhlenartigen Vertiefungen. Dadurch ging die konkave Oberfläche der äußeren Ohrmuschel ohne besondere Grenzen in die Concha und weiter in den äußeren Gehörgang über. Hat das Fehlen der Strukturen aus der Concha einen Einfluss auf die Ausbildung von spektralen Merkmalen, müsste das deutlich in den monauralen Übertragungsfunktionen zum Tragen kommen. Abb. 4-36 stellt die monauralen Übertragungsfunktionen vom originalen und modifizierten Modell bei Schalleinfall aus dem frontalen Bereich gegenüber. Bei Schalleinfall aus dem AZ von -30° bis $+20^\circ$ liegen die Pegeldifferenzen der Frequenzen von 500 Hz bis 10 kHz in der monauralen Übertragungsfunktion des modifizierten Modells bei annähernd 0 dB , d.h. ein Wechsel der Schalleinfallrichtung im frontalen Bereich erzeugt dort nur geringfügige Änderungen im Vergleich zum Bezugssignal. Erst ab Schalleinfall aus dem Azimut von $+30^\circ$ liegen die Pegeldifferenzen für einige Frequenzen zwischen 500 Hz und 10 kHz – und zwar von $4,3 \text{ kHz}$ bis $7,5 \text{ kHz}$ und von $8,7 \text{ kHz}$ bis $11,5 \text{ kHz}$ – unter -5 dB .

Die monauralen Übertragungsfunktionen des originalen rechten Außenohres beim AZ -10° und AZ $+10^\circ$ zeigen im Frequenzbereich von $6,3 \text{ kHz}$ bis $10,5 \text{ kHz}$ sowohl eine Abweichung zum Bezugssignal selbst, als auch zueinander. Die Abweichung der Pegeldifferenzen der Funktionen zueinander (AZ -10° zu $+10^\circ$) betragen von $6,9 \text{ kHz}$ bis 8 kHz über 5 dB . Die größte Abweichung ist bei $7,3 \text{ kHz}$ mit $10,3 \text{ dB}$ zu verzeichnen. Die Werte der monauralen Übertragungsfunktionen des modifizierten rechten Außenohres beim AZ -10° und AZ $+10^\circ$ weichen zum Bezugssignal als auch zueinander nur sehr geringfügig ab – im Frequenzbereich

von 500 Hz bis 10 kHz beträgt die größte Abweichung zueinander 3,3 dB. Auch die Änderung der Schalleinfallrichtung vom AZ -10° zu -20° bzw. vom AZ $+10^\circ$ zu $+20^\circ$ erzeugt bei den monauralen Übertragungsfunktionen des modifizierten Außenohres keine deutlichen Abweichungen der Werte (im Bereich von 500 Hz bis 10 kHz deutlich unter 5 dB). In Abb. 4-36 ist beim originalen Ohrmodell ein richtungsabhängiges Verschieben der zentralen Frequenz des ersten negativen Bereiches vom AZ -30° bis $+20^\circ$ zu verzeichnen (zentrale Frequenz beim AZ $-30^\circ = 6,98$ kHz, beim AZ $+20^\circ = 9,3$ kHz). Diese Verschiebung verschwindet beim modifizierten Modell vollständig.

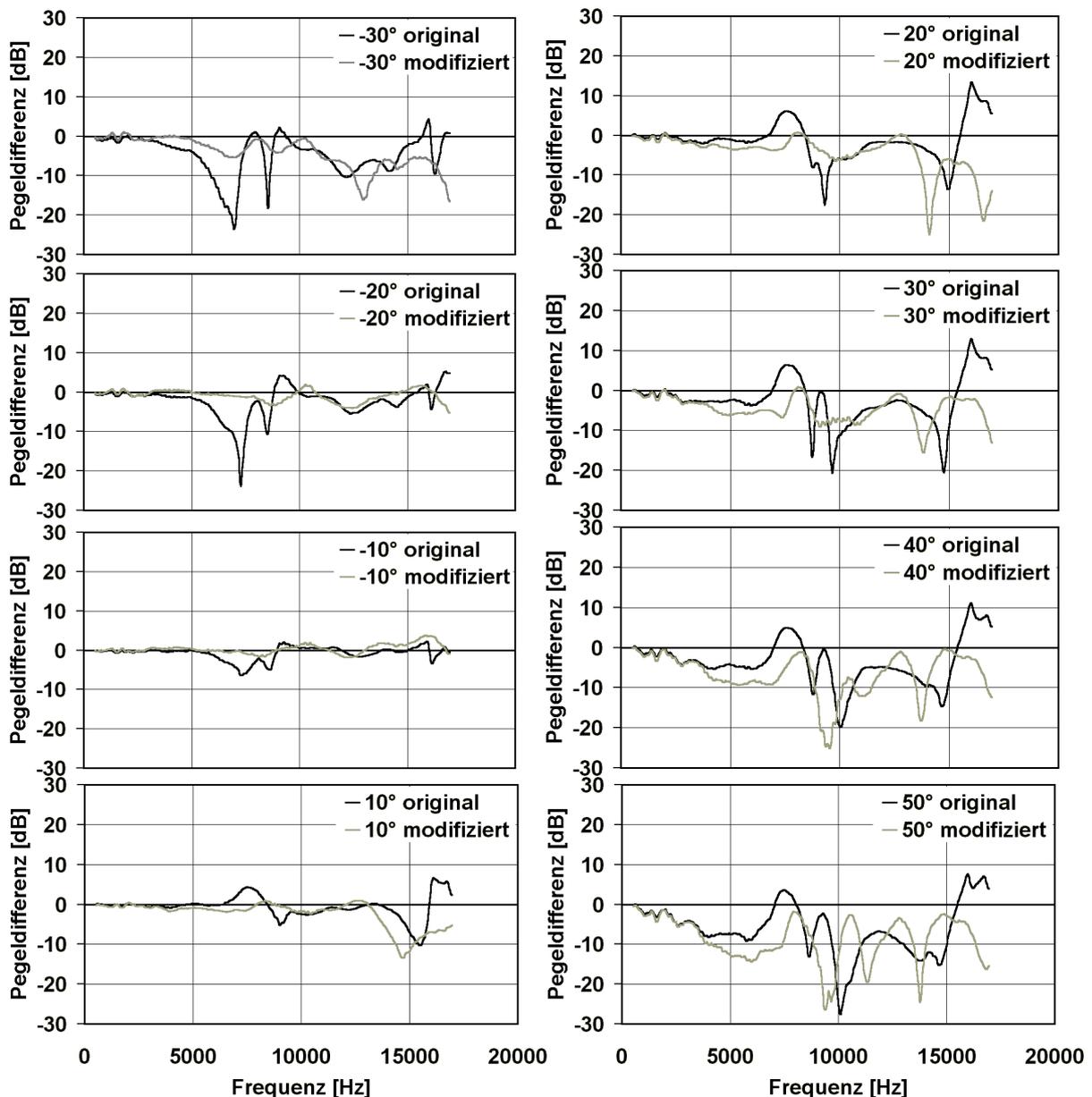


Abb. 4-36: Gegenüberstellung der monauralen Übertragungsfunktionen des rechten Außenohrmodells von Tier 1 bei normalen und modifizierten Verhältnissen in der Concha und bei frontalem Schalleinfall (Azimut von -30° bis $+50^\circ$): bei dem modifizierten Modell wurden die Erhabenheiten in der Concha entfernt

4.2.5 Auswirkung einer simulierten Otitis-Operation

Am linken vorwärts gerichteten Außenohrmodell von Tier 2 wurde eine Otitis-Operation nach Formston/McCunn, modifiziert von Hinz, simuliert. Die Länge des Keils, der entfernt wurde, betrug 10 mm. Durch die Bildung der Differenz der Pegelwerte nach $\Delta L = 20 \log \hat{p}_{vorOP} - 20 \log \hat{p}_{nachOP}$ werden die Frequenzbereiche sichtbar, in denen die simulierte Otitis-Operation einen Einfluss auf die Freifeldübertragungsfunktion hat. In Abb. 4-37 ist erkennbar, dass sich die simulierte Otitis-Operation nur bei bestimmten Schalleinfallrichtungen und nur auf einen eng begrenzten Frequenzbereich auswirkt.

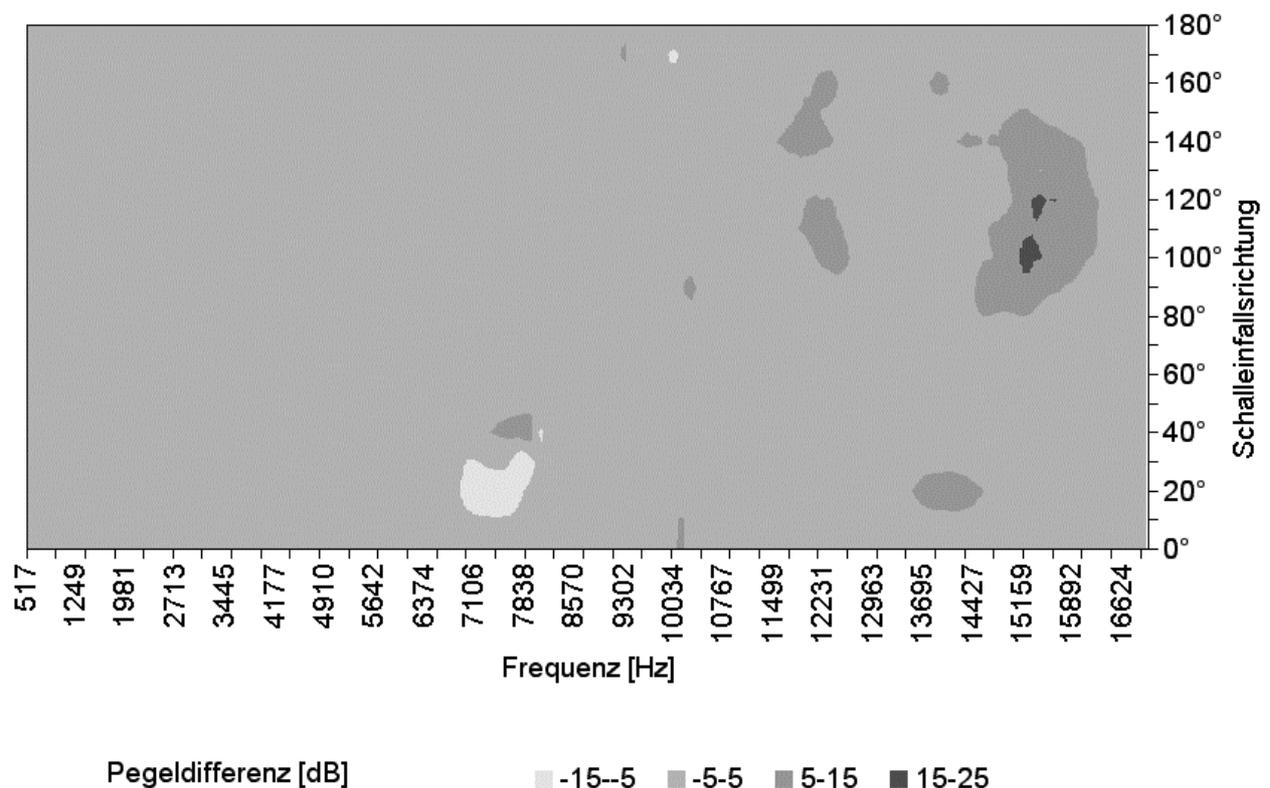


Abb. 4-37: Auswirkung einer simulierten Otitis-Operation: das 3D-Diagramm zeigt die Differenz der Pegelwerte vor der Operation zu den Pegelwerten nach der Operation an, d.h. $\Delta L = 20 \log \hat{p}_{vorOP} - 20 \log \hat{p}_{nachOP}$

Bei Schalleinfall aus dem vorderen Bereich (AZ 10° bis 30°) wird durch das Eröffnen eines Teils des vertikalen Astes des äußeren Gehörganges die Ausbildung des ersten Einbruchs verhindert (Abb. 4-38 beim AZ von 20°). Dagegen wird ein Einbruch bei 14 kHz erzeugt. Bei seitlichen Schalleinfall (AZ 80° bis 150°) werden zwei weitere Einbrüche im hochfrequenten Bereich (bei 12,2 kHz und 15,5 kHz) nach der simulierten Otitis-Operation beobachtet (Abb. 4-38 beim AZ von 100°). Weitere Auswirkungen auf die Freifeldübertragungsfunktion durch die simulierte Otitis-Operation konnten nicht beobachtet

werden. Ursache für das Fehlen bzw. die Neuausbildung von Einbrüchen kann in dem Fehlen des durch die simulierte Otitis-Operation entfernten vorderen Randes des vertikalen Astes des äußeren Gehörganges liegen.

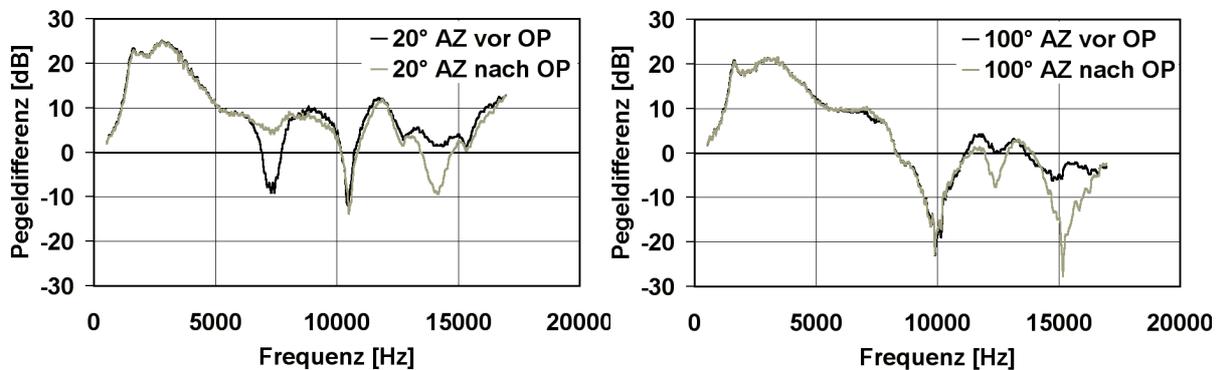


Abb. 4-38: Auswirkung einer simulierten Otitis-Operation bei ausgewählten Schalleinfallrichtungen: Gegenüberstellung der Freifeldübertragungsfunktionen vor und nach der Operation; links – frontaler Schalleinfall (AZ 20°); rechts – seitlicher Schalleinfall (AZ 100°)

4.2.6 Auswirkung des Fehlens der äußeren Ohrmuschel

Vom rechten Außenohr von Tier 1 wurde ein Modell angefertigt, bei dem die äußere Ohrmuschel vollständig fehlt, die Concha aber noch vorhanden ist. Durch eine vergleichende Darstellung der Freifeldübertragungsfunktionen wird die Auswirkung des Fehlens der äußeren Ohrmuschel sichtbar (Abb. 4-39). Bei Schall mit niedrigen Frequenzen (unter 1 kHz) ruft das Fehlen der äußeren Ohrmuschel keine nennenswerten Veränderungen hervor. Es kommt auch beim Fehlen der äußeren Ohrmuschel zum schnellen Anstieg der Pegeldifferenzen bis zum ersten Gipfel. Deutliche Auswirkungen werden dagegen bei Schall mit höheren Frequenzanteilen beobachtet. Bei frontalem Schalleinfall (AZ -30° bis +30°) werden Signalanteile mit Frequenzen von 2 kHz bis 5 kHz weniger ausgeprägt verstärkt. Ein konstanter richtungsunabhängiger Einbruch bei 9 kHz tritt klar bei Schalleinfall aus dem AZ von -60° bis +60° hervor. Das richtungsabhängig Ansteigen der zentralen Frequenz des ersten Einbruchs bei Schalleinfall aus dem frontalen Bereich fehlt vollständig. Es können zwei frequenz- und richtungsconstante Gipfel bei 1940 Hz und 3445 Hz beobachtet werden. Kommt ein Signal aus dem ipsilateralen und rückwärtigen Quadranten (siehe Abb. 4-40: AZ 90°, 120°, 180°) sowie aus dem contralateralen Quadranten (nicht gezeigt), werden hochfrequente Signalanteile weniger stark abgeschwächt.

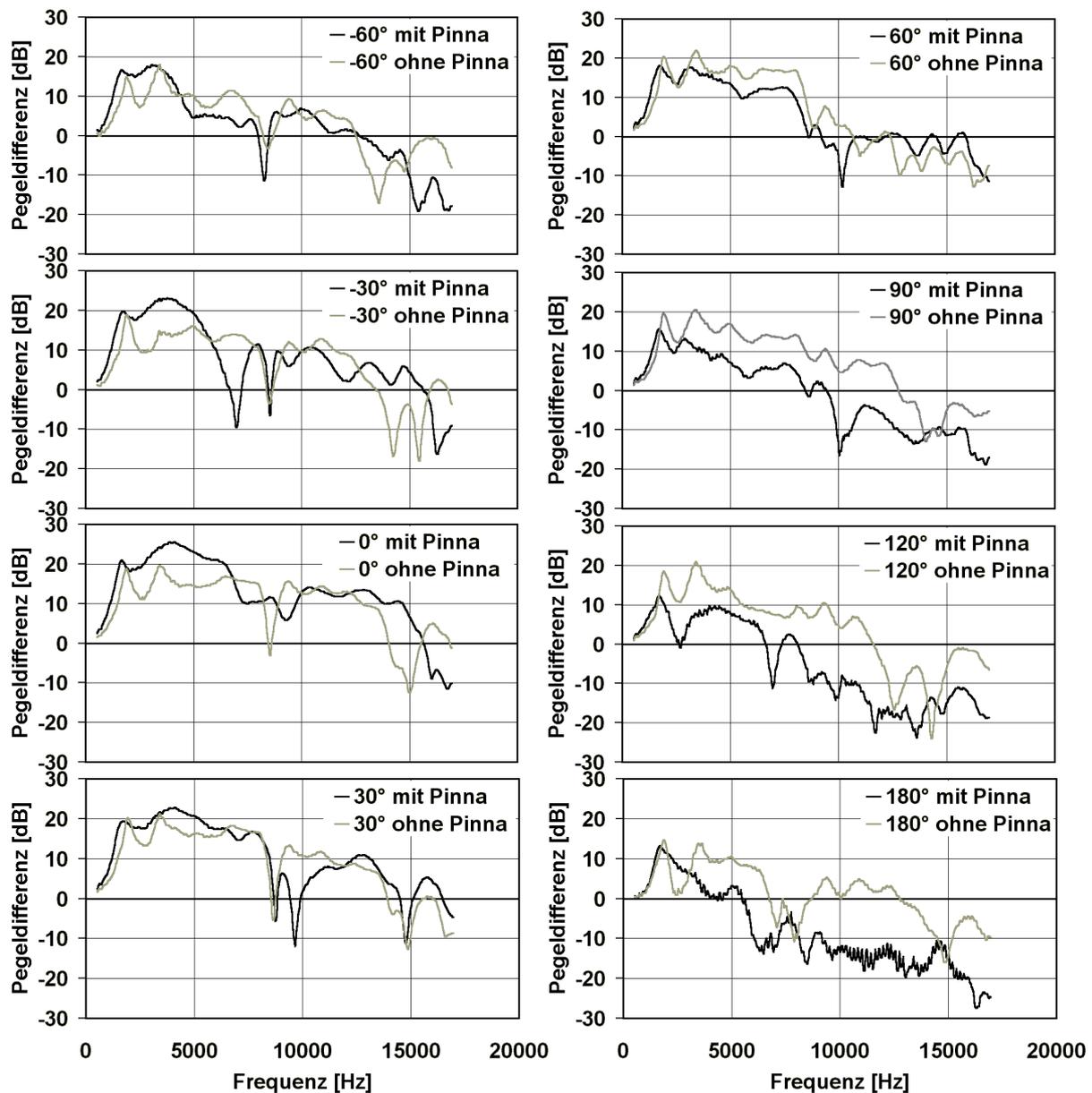


Abb. 4-39: Auswirkung des vollständigen Fehlens der äußeren Ohrmuschel auf die Freifeldübertragungsfunktion des rechten Außenohrmodells von Tier 1: Gegenüberstellung der Freifeldübertragungsfunktionen mit und ohne äußerer Ohrmuschel (Pinna) am Modell bei Schalleinfall aus dem Azimut von -60° bis 180°

Die einzelnen Freifeldübertragungsfunktionen des Außenohres ohne äußere Ohrmuschel bei frontalem Schalleinfall ähneln sich in ihren Graphen. Dies wird durch Darstellung der monauralen Übertragungsfunktion noch besser erkennbar (Abb. 4-40). Ein Wechsel der Schallquellenrichtung von -30° bis $+30^\circ$ bewirkt keine Veränderung der monauralen Übertragungsfunktion im Vergleich zum Bezugssignal und somit auch untereinander. Auch beim Azimut von 60° treten bis ca. 8 kHz keine Änderungen auf.

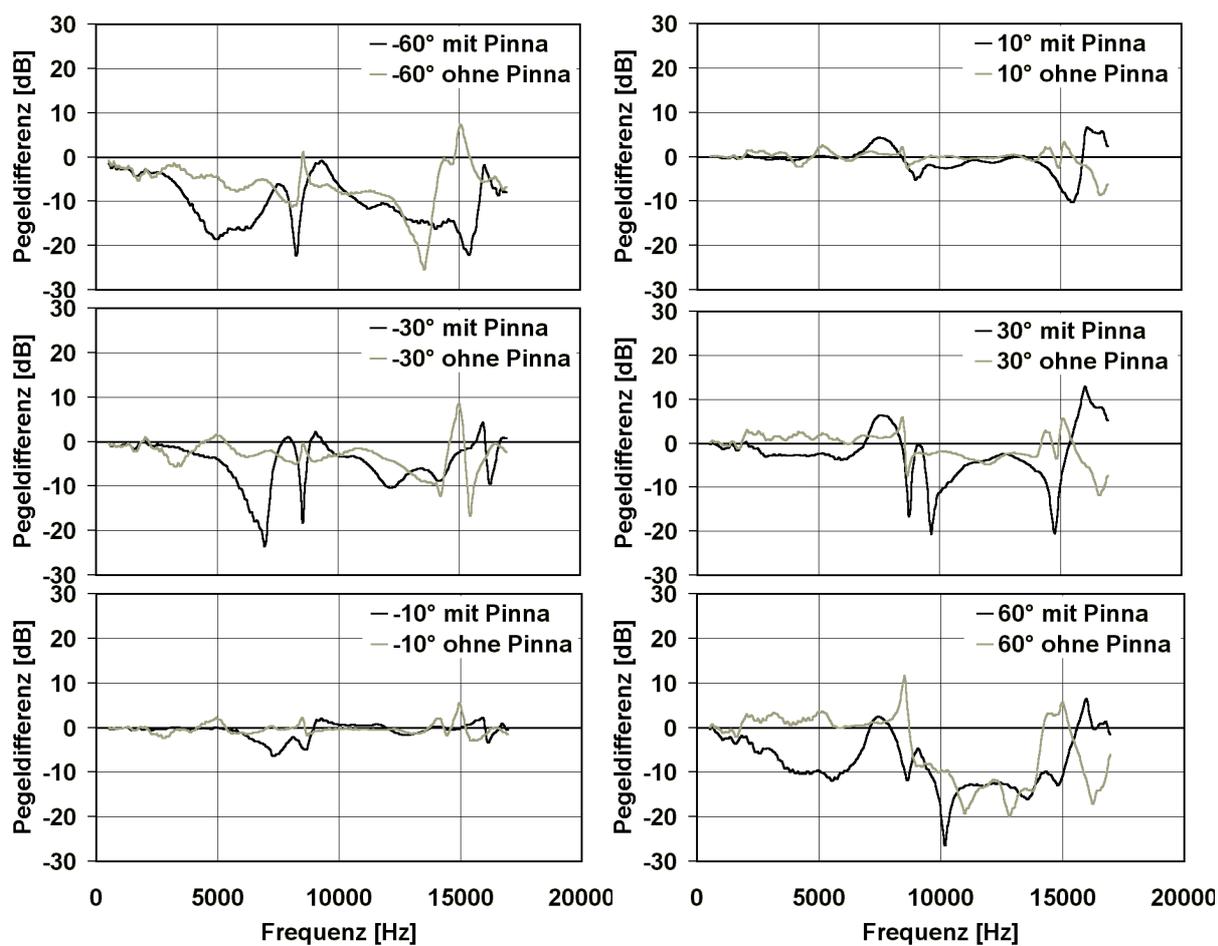


Abb. 4-40: Auswirkung des vollständigen Fehlens der äußeren Ohrmuschel auf die monaurale Übertragungsfunktion des rechten Außenohrmodells von Tier 1: Gegenüberstellung der monauralen Übertragungsfunktionen mit und ohne äußerer Ohrmuschel (Pinna) am Modell bei frontalem Schalleinfall aus dem Azimut von -60° bis $+60^\circ$

Die spektralen und räumlichen Maxima werden durch das Fehlen der äußeren Ohrmuschel ebenfalls beeinflusst (Abb. 4-41). Der Wert der spektralen Maxima verändert sich nur geringfügig bei Schalleinfall zwischen -30° und $+130^\circ$ (maximal 5 dB). Die akustische spektrale Achse verschiebt sich vom AZ 0° (aus Abb. 4-9 Seite 70 – Modell mit äußerer Ohrmuschel) zum AZ 50° (Abb. 4-41 links). Das Fehlen der abschwächenden Wirkung der äußeren Ohrmuschel von rückwärtigem und contralateralem Schalleinfall zeigt sich gleichfalls in den spektralen Maxima. Sie besitzen im Vergleich zu den spektralen Maxima beim Modell mit äußere Ohrmuschel dort höhere Werte.

Die Auswirkungen auf die räumlichen Maxima sind besonders klar bei Frequenzen unter 9 kHz sichtbar. Die Werte streuen zwischen -10° bis $+100^\circ$ (im Vergleich zu Abb. 4-10 Seite 71, dort streuen sie zwischen -20° bis $+30^\circ$).

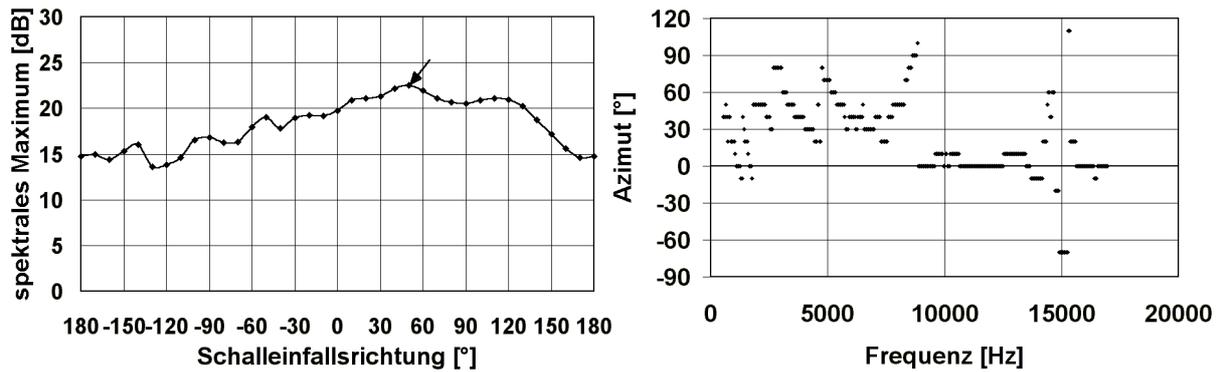


Abb. 4-41: spektrale und räumliche Maxima der Frequenzen von 500 Hz bis 17 kHz in den Freifeldübertragungsfunktionen des rechten Modells ohne äußere Ohrmuschel bei Schalleinfall im Azimut von 0° bis 360° (linke Abbildung – spektrale Maxima; rechte Abbildung – räumliche Maxima)

Abb. 4-42 zeigt die maximale Änderung der Pegeldifferenzen (ΔdB_{max}) der Frequenzen zwischen 500 Hz und 17 kHz beim rechten Modell mit und ohne äußere Ohrmuschel. Bei Frequenzen zwischen 3 kHz und 9 kHz und zwischen 14 kHz und 16 kHz ist der größte Einfluss der äußeren Ohrmuschel erkennbar. Durch das Fehlen der äußeren Ohrmuschel liegen die Werte von ΔdB_{max} (ohne Pinna) deutlich unter den Werten des originalen Modells - d.h. diese Frequenzen verlieren durch das Fehlen der äußeren Ohrmuschel im Verhältnis zu einem Außenohr mit äußerer Ohrmuschel an Richtungsinformationen.

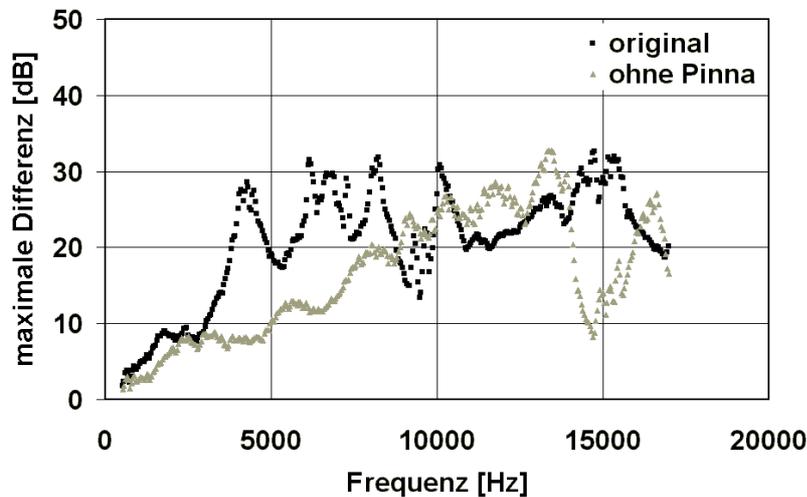


Abb. 4-42: maximale Änderung der Pegeldifferenzen (ΔdB_{max}) der Frequenzen zwischen 500 Hz und 17 kHz ermittelt am rechten vorwärts gerichteten Außenohrmodell von Tier 1 mit und ohne äußerer Ohrmuschel (Pinna): jeder Messpunkt stellt die Differenz zwischen maximalen und minimalen Wert der Pegeldifferenzen einer Frequenz in den Freifeldübertragungsfunktionen bei Schalleinfall aus dem Azimut von -90° bis +90° dar

Die Ergebnisse vom rechten Außenohr von Tier 1 zeigen, dass die äußere Ohrmuschel einen starken Anteil an der Verstärkung des Schalldruckpegels mittelfrequenter Schallsignale (2 kHz bis 5 kHz) hat. Sie ist maßgeblich an der Ausbildung der spektralen Maxima mit

beteiligt. Der erste Gipfel (1940 Hz) und ein weiterer Gipfel bei 3445 Hz scheinen auf Grund ihrer richtungsunabhängigen Lage ein Resonanzphänomen des äußeren Gehörganges zu sein. Die äußere Ohrmuschel ist auch für den Abschattungseffekt höherfrequenter Schallsignale bei seitlichem (contra- und ipsilateral) und rückwärtigem Schalleinfall verantwortlich.

Vom linken vorwärts gerichteten Außenohrmodell von Tier 2 werden ebenfalls Teile der äußeren Ohrmuschel entfernt. Dabei kommt es zu einer stufenweise Reduzierung der äußeren Ohrmuschel und deren Auswirkung auf die Freifeldübertragungsfunktionen. Eine Auswirkung auf die Freifeldübertragungsfunktion bei Reduzierung der äußeren Ohrmuschel um etwa 1/3 ihrer Größe, wie sie nach dem Kupieren der äußeren Ohrmuschel nach Rassestandard Deutsche Dogge auftritt, zeigt sich nur bei Schalleinfall aus dem hintern und contralateralen Quadranten. Dabei werden zum einen Frequenzen zwischen 3 kHz und 6 kHz bei Schalleinfall aus dem contralateralen Quadranten geringer abgeschwächt (Daten aus Platzgründen nicht gezeigt). Das selbe gilt für höherfrequenten Schall bei rückwärtigem Einfall. Wird die Größe der äußeren Ohrmuschel noch weiter reduziert, werden die Auswirkungen drastischer. Bei einer Reduzierung der Größe um 2/3 treten ähnliche Tendenzen wie bei Versuch 7 (rechts Außenohrmodell von Tier 1 ohne Pinna) hervor. Allerdings sind sie noch nicht ganz so stark ausgeprägt.

In Abb. 4-43 werden gleichzeitig die Freifeldübertragungsfunktionen vor und nach dem Kupieren dargestellt. Bei Schalleinfall aus dem vorderen Bereich (AZ 0° bis +60°) werden mittelfrequente Schallsignale (2 kHz bis 3,5 kHz beim AZ 0° bzw. 2 kHz bis 7,7 kHz beim AZ +60°) im Verhältnis zum unkupierten Außenohr geringer verstärkt. Der erste Einbruch zeigt weiterhin ein richtungsabhängiges Ansteigen seiner zentralen Frequenz bei Schalleinfall aus dem frontalen und ipsilateralen Bereich (Abb. 4-43: AZ -30° = 6,6 kHz, AZ +90° = 9,9 kHz). Der erste Gipfel bei 1,85 kHz wird bei Schalleinfall aus allen Richtungen prominenter. Je weiter der Schall aus dem ipsilateralen, hinteren und contralateralen Quadranten kommt, desto geringer werden hochfrequente Signalanteile abgeschwächt (Abb. 4-43: AZ 120° und 180°).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Kupieren der äußeren Ohrmuschel die Verstärkung bzw. Abschwächung einzelner Signalanteile verringert. Dabei nimmt diese Beeinträchtigung mit der Größe der Reduzierung zu. Das Entfernen des oberen Drittels der äußeren Ohrmuschel hat keine so drastischen Auswirkungen wie das vollständige Entfernen der äußeren Ohrmuschel. Je mehr Anteile der äußeren Ohrmuschel fehlen, desto schlechter

wird höherfrequenter Schall (über 4 kHz) bei rückwärtigem Schalleinfall abgeschwächt. Der erste Einbruch liefert bei Schalleinfall aus dem frontalen Bereich aber weiterhin richtungsabhängige Informationen, selbst wenn die Größe der Ohrmuschel um 2/3 reduziert wird.

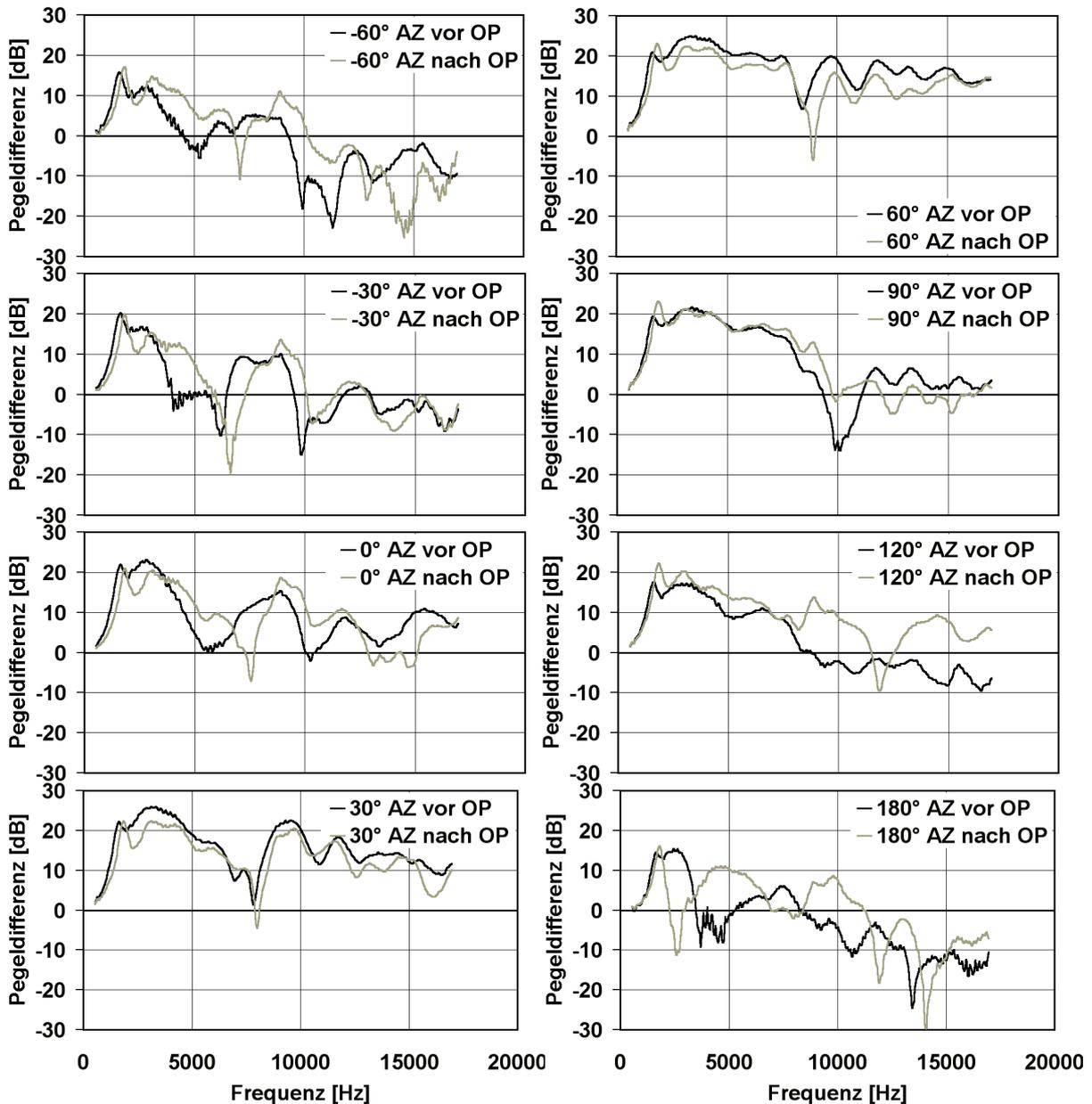


Abb. 4-43: Auswirkung des Fehlens eines Teils der äußeren Ohrmuschel auf die Freifeldübertragungsfunktion des linken Außenohrmodells von Tier 2: Gegenüberstellung der Freifeldübertragungsfunktionen vor dem Kupieren und nach dem Kupieren der äußeren Ohrmuscheln nach Rassestandard kaukasischer Schäferhund: 2/3 der äußeren Ohrmuschel wurde entfernt; Schalleinfall aus dem Azimut (AZ) von -60° bis 180°