

4 Ergebnisse

4.1 Anatomischer Aufbau der Außenohren des Schäferhundes

Die Abmessungen der einzelnen Abschnitte der Außenohre, die von den Negativabdrücken und den dazugehörigen Modellen des rechten und linken Außenohres von Tier 1 und 2 in der nach vorn gerichteten Ohrposition gewonnen wurden, sind in Tabelle 4-1 dargestellt. Die bildliche Darstellung der einzelnen gemessenen Strecken zeigen die Abb. 4-1, Abb. 4-2 und Abb. 4-3.

Der äußere Gehörgang beider Untersuchungstiere stellt eine langgestreckte Röhre mit einem vertikal und einem horizontal verlaufenden Abschnitt dar. Der Abdruck durch das Trommelfell und besonders die Einziehung (Umbo) durch den Stiel des Hammers ist an dem medialen Ende des knöchernen Bereichs des äußeren Gehörganges deutlich erkennbar. Die Trommelfellfläche ist von löffelförmiger Gestalt und steht in einem Winkel von ca. 30° zur Achse des Gehörganges. Der knöcherne Bereich ist durch eine gut sichtbare Furche vom knorpeligen Bereich des äußeren Gehörganges abgegrenzt. Der Durchmesser im knöchernen Bereich von durchschnittlich 5,5 mm erweitert sich im knorpeligen Bereich auf durchschnittlich 9 mm. Der horizontale Ast des äußeren Gehörganges besitzt einen fast runden Querschnitt. Kurz vor der Umknickungsstelle erscheint er stark abgeplattet und erhält damit einen ovalen Querschnitt. Ebenfalls ist dort wieder eine deutliche scharfe Furche erkennbar. Bei den Negativabdrücken des rechten und linken Außenohres von Tier 2 in der seitlich gerichteten Ohrposition ist diese Furche nicht mehr so deutlich und scharf abgesetzt. Durch die scharfe, fast rechtwinklige Umknickung geht der horizontale Ast in den vertikal verlaufenden Ast des äußeren Gehörganges über. Die äußere Gesamtlänge des horizontalen Astes (Strecke 1a + Strecke 3a) beträgt bei Tier 1 rechts 42 mm und links 44,5 mm, bei Tier 2 rechts 40 mm und links 38 mm; die innere Länge des horizontalen Astes (Strecke 1b + Strecke 3b) beträgt bei Tier 1 rechts 28 mm und links 29 mm, bei Tier 2 rechts 24 mm und links 24,5 mm. Der Querschnitt des vertikalen Astes des äußeren Gehörganges ist stark längsoval und geht ohne sichtbare Grenzen in die Concha über. Dabei erweitert er sich trichterartig. Die Concha wird dorsal durch eine quer verlaufende deutliche Knorpelleiste, die Anthelix, abgegrenzt. Dadurch wird die Concha deutlich von der äußeren Ohrmuschel (Pinna) abgesetzt. In der Concha selbst gibt es noch weitere Erhabenheiten, allerdings stellt die Anthelix die prominenteste Erhabenheit der Concha dar. Durch die Erhabenheiten kommt es in der Concha zur Ausbildung von höhlenartigen Vertiefungen. Die Abmessungen des

ventralen Astes des äußeren Gehörganges und die Conchaabmessungen sind bei beiden Tieren sehr ähnlich. Die Gesamtlänge des äußeren Gehörganges, ermittelt aus dem Mittelwert von der äußeren Länge des Gehörganges (Strecke 1a + Strecke 3a + Strecke 6a) und der inneren Länge des Gehörganges (Strecke 1b+ Strecke 3b + Strecke 6b), beträgt bei Tier 1 rechts 62,5 mm und links 65 mm und bei Tier 2 rechts 60 mm und links 59 mm.

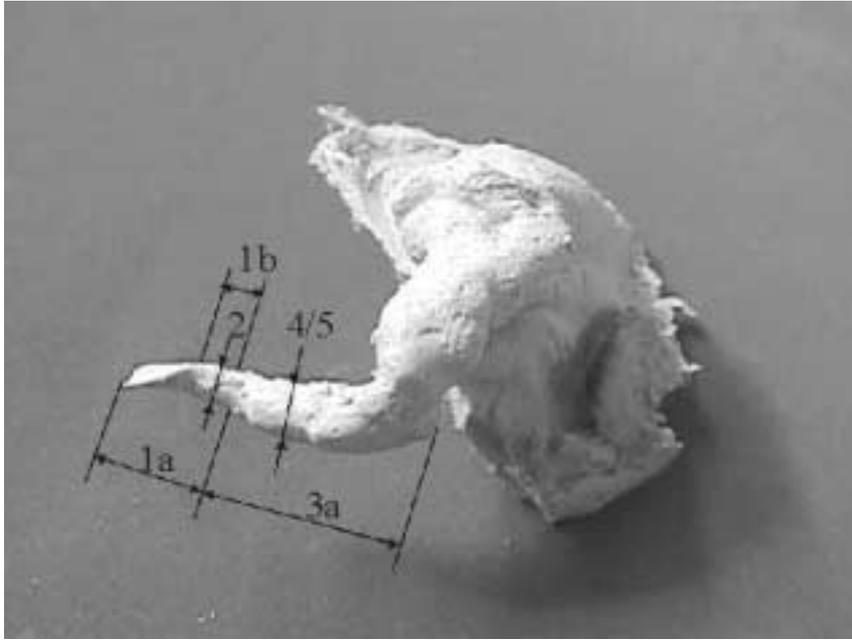


Abb. 4-1: Darstellung der gemessenen Strecken am rechten Abdruck von Tier 1: 1a – äußere Länge, 1b – innere Länge und 2 – Durchmesser des knöchernen Bereiches des äußeren Gehörganges; 3a – äußere Länge und 4/5 – Durchmesser des knorpligen, horizontalen Bereiches des äußeren Gehörganges

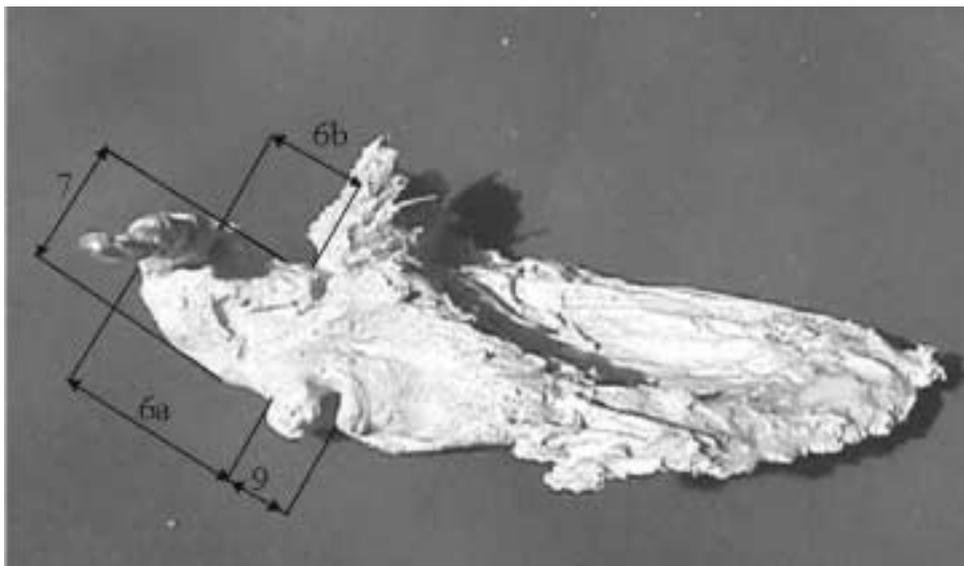


Abb. 4-2: Darstellung der gemessenen Strecken am rechten Abdruck von Tier 1: 6a – äußere Länge, 6b – innere Länge und 7 – Durchmesser des knorpligen, vertikalen Bereiches des äußeren Gehörganges; 9 – Höhe der Concha

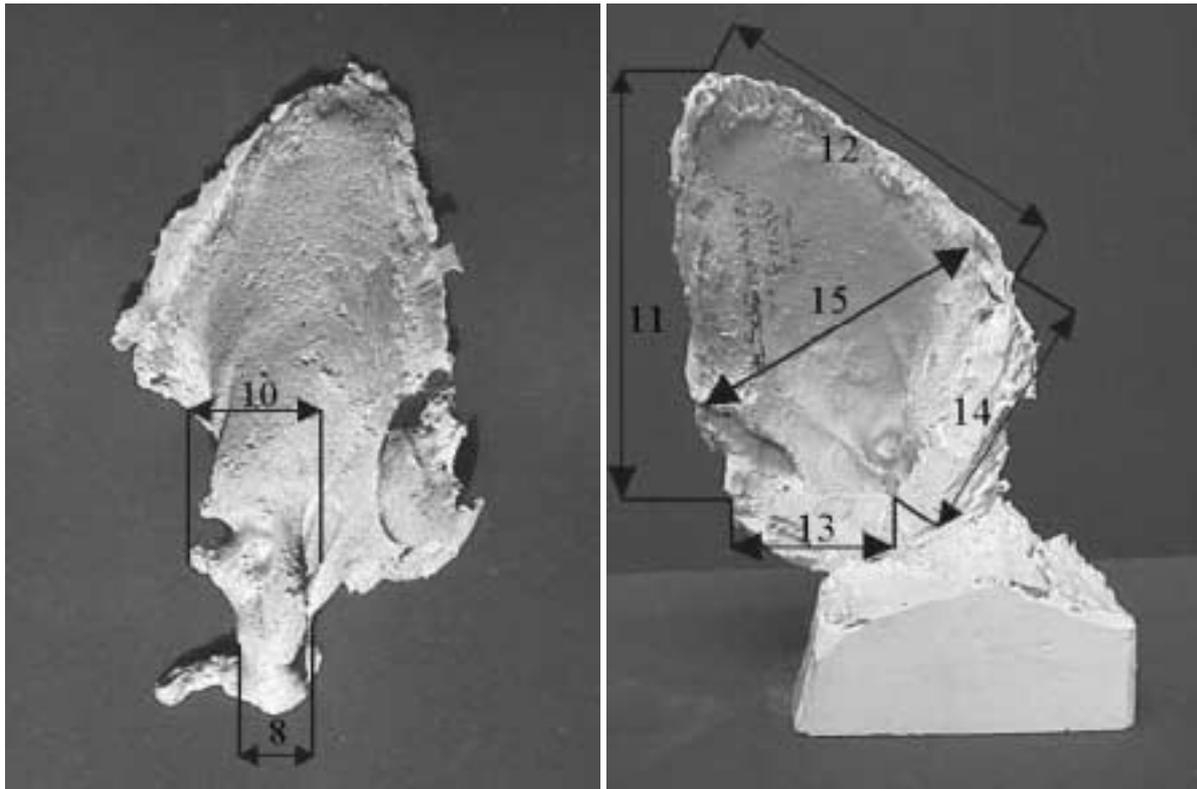


Abb. 4-3: Darstellung der gemessenen Strecken am rechten Abdruck und dem dazugehörigen Modell von Tier 1: 8 – Durchmesser des knorpligen, vertikalen Bereiches des äußeren Gehörganges; 10 – Breite der Concha; 11 – Länge des caudalen Muschelrands; 12 – Länge des rostralen Muschelrands; 13 – caudale Strecke des ventralen Tütenwinkels; 14 – rostrale Strecke des ventralen Tütenwinkels; 15 – Breite der äußeren Ohrmuschelspalte.

Tabelle 4-1: Abmessung der einzelnen Abschnitte des Außenohres von zwei adulten Schäferhunden

Strecke in mm	Tier 1		Tier 2	
	Rechts	Links	Rechts	Links
äußere Länge des knöchernen Bereiches des äußeren Gehörganges (Strecke 1a)	17	17	16	16
innere Länge des knöchernen Bereiches des äußeren Gehörganges (Strecke 1b)	7	7	6	6
Durchmesser des knöchernen Bereiches des äußeren Gehörganges (Strecke 2)	5/6	5/6	5,5/6	5,5/6
äußere Länge des knorpligen, horizontalen Bereiches des äußeren Gehörganges (Strecke 3a)	25	27,5	24	22
innere Länge des knorpligen, horizontalen Bereiches des äußeren Gehörganges (Strecke 3b)	21	22	18	18,5

Durchmesser des knorpligen, horizontalen Bereiches des äußeren Gehörganges (Strecke 4/5)	8/10	8/10	8/9	8,5/8,5
äußere Länge des knorpligen, vertikalen Bereiches des äußeren Gehörganges (Strecke 6a)	32	32	34	34
innere Länge des knorpligen, vertikalen Bereiches des äußeren Gehörganges (Strecke 6b)	23	24	22	22
Durchmesser des knorpligen, vertikalen Bereiches des äußeren Gehörganges (Strecke 7/8)	26/14	25,5/15	25,5/15	26,5/16
Höhe der Concha (Strecke 9)	19	19	19,5	19
Breite der Concha (Strecke 10)	28,5	30	32	32
Tiefe der Concha	36	35	38	38
Länge des caudalen Muschelrands (Strecke 11)	111,5	110	114	110
Länge des rostralen Muschelrands (Strecke 12)	80	84	81	90
caudale Strecke des ventralen Tütenwinkels (Strecke 13)	24	36	36	33
rostrale Strecke des ventralen Tütenwinkels (Strecke 14)	74	61	81	55,5
Breite der äußeren Ohrmuschelspalte (Strecke 15) in der vorwärts gerichteten Ohrposition	63	58	57	57
Breite der äußeren Ohrmuschelspalte (Strecke 15) in der seitwärts gerichteten Ohrposition			45	45

Auf der konkaven Oberfläche der äußeren Ohrmuschel sind deutliche faltenartige, unregelmäßige und längsverlaufende Erhabenheiten zu beobachten. Am caudalen Muschelrand befindet sich die sogenannte Hauttasche. In den Abmessungen der Pinna (äußere Ohrmuschel) bestehen deutliche Unterschiede zwischen den beiden Tieren, aber auch zwischen den beiden äußeren Ohrmuscheln eines Tieres. Die äußere Ohrmuschel der Haushunde ist sehr beweglich und in ihrer Positionierung sehr flexibel. Durch geringe Variationen in der frontalen Ausrichtung der äußeren Ohrmuschel und seiner Ausdehnung kommen diese Variationen zustande. Durch die Verlagerung der Ohrmuschel in die seitwärts

gerichtete Ohrposition ändert sich die Ausdehnung der äußeren Ohrmuschelspalte. Die Breite der äußeren Ohrmuschelspalte verringert sich dabei von 57 mm auf 45 mm (gemessen am vorwärts gerichteten und seitwärts gerichteten Außenohrmodell von Tier 2).

Die Abmessungen des Kopfes von Tier 2, die von seinem Gipsabdruck und dem davon angefertigten Kunstkopf gewonnen wurden, sind in Tabelle 4-2 dargestellt. Die lange und sich nach vorn verzüngende Schnauze mit ihrem längsovalen Querschnitt setzt sich deutlich vom Kopf ab. Die Außenohre sind seitlich in Augenhöhe mit breiter Basis am Kopf angesetzt und überragen ihn deutlich.

Tabelle 4-2: Abmessungen des Kopfes von Schäferhund 2, ermittelt am Gipsabdruck und dem dazugehörigen Kunstkopf sowie am Schädel

Abstand in mm	Kunstkopf von Tier 2	Schädel von Tier 2
Größte Länge	260	237
Größte Breite zwischen den Jochbögen	130	123
Größte Höhe zwischen Unterkiefers und Stirnbein	130	115
Länge der Schnauze bzw. Abstand zwischen Schneidezähne und rostralen Rand der Orbita	110	103
Breite: über den oberen Schneidezähnen – über den oberen zweiten Prämolaren – über den letzten oberen Prämolaren	58 – 72 – 85	37 – 45 – 66
Höhe: über den letzten Schneidezähnen – über den zweiten Prämolaren – vor den Reißzähnen	63 – 85 – 91	40 – 78 – 92
Abstand zwischen den inneren Augenwinkel	66	57

Der Abstand zwischen den beiden Außenohren von Tier 1 und 2, ermittelt an verschiedenen Messpunkten an den Außenohrmodellen, zeigt Tabelle 4-3. Bei den Abständen zwischen dem rechten und linken Außenohrmodell wurden die direkten Verbindungen zwischen den gewählten Messpunkten ermittelt. Bei Tier 2 wurden die Messungen nach dem Plazieren des Kunstkopfes zwischen den beiden Außenohrmodellen wiederholt. Auch hier wurde die direkte Verbindung gemessen, allerdings wurde das Vorhandensein des Kunstkopfes berücksichtigt. Die Messergebnisse von Tier 2 zeigen, dass die rostralen Muschelränder den Kopf so weit überragen, dass es hier durch den Kopf zu keiner Vergrößerung des Abstandes kommt. Wandert der Messpunkt an den Außenohrmodellen tiefer, d.h. in ventrale und laterale Richtung, besteht ein Einfluss durch den Kunstkopf bei der Abstandsermittlung.

Tabelle 4-3: Abstand zwischen der rechten und linken Ohrmuschel (mit und ohne Einfluss der Kopfkrümmung) gemessen an den Außenohrmodellen in der Versuchsanordnung

Abstand in mm	Tier 1 (gerade)	Tier 2 (gerade)	Tier 2 (mit Kopfkrümmung)
Abstand zwischen den distalen Enden der rostralen Muschelränder	127	115	115
Abstand zwischen den Mittelpunkten von Strecke 14	140	125	255
Abstand zwischen den Incisurae intertragicae	168	148	275
Abstand zwischen den distalen Enden der caudalen Muschelränder	225	195	285

4.2 Akustische Übertragungsfunktionen der Außenohren des Haushundes

4.2.1 Akustische Übertragungsfunktionen der isolierten Außenohrmodelle bei Frontalstellung

4.2.1.1 Freifeldübertragungsfunktion

In diesem Abschnitt werden die Messergebnisse von den Außenohrmodellen ohne Kunstkopf in der vorwärts gerichteten Ohrposition präsentiert. Abb. 4-4 zeigt die Freifeldübertragungsfunktionen der vier Modelle bei frontalem Schalleinfall. Beim Azimut von 0° kommt es in der Freifeldübertragungsfunktion bei allen Modellen zwischen 500 Hz und 1500 Hz zu einem schnellen Anstieg der Pegeldifferenzen von 3 dB auf über 20 dB. Die Freifeldübertragungsfunktion zeigt bei allen vier Modellen die Ausbildung eines ersten Gipfels bei ca. 1,7 kHz – bei den Modellen von Tier 1 links und rechts bei 1680 Hz mit 25 dB bzw. mit 21 dB; bei den Modellen von Tier 2 links und rechts bei 1640 Hz mit ca. 24 dB. Daran schließt sich ein kurzer Abfall der Pegeldifferenzen an (bei allen vier Modellen aber nicht mehr als 3 dB) mit einem anschließend weiteren Ansteigen der Pegeldifferenzen bis zum Erreichen des spektralen Maximum zwischen 2,5 kHz und 4 kHz (Tier 1 links bei 3100 Hz mit 26,5 dB, rechts bei 4180 Hz mit 25 dB; Tier 2 links bei 2580 Hz mit 25 dB, rechts bei 3060 Hz mit 26 dB).

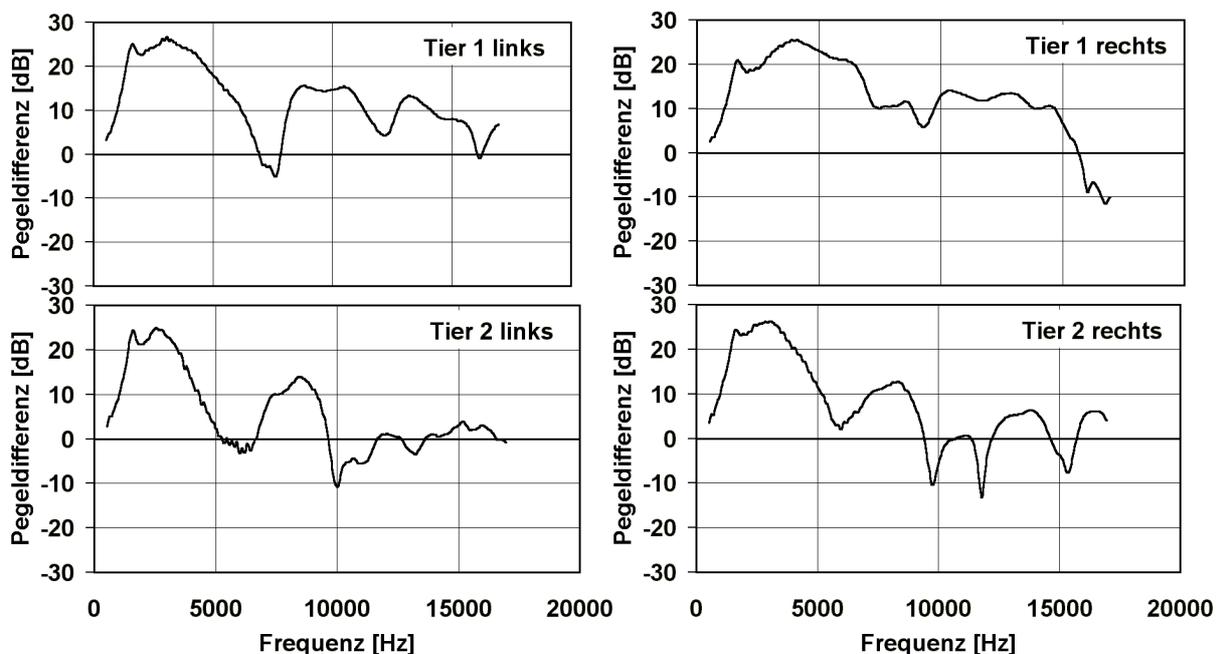


Abb. 4-4: Freifeldübertragungsfunktion bei frontalem Schalleinfall (Azimut 0°), gemessen an den rechten und linken Außenohrmodellen von beiden Haushunden

Danach fallen die Pegeldifferenzen allmählich ab bis zum Erreichen des ersten Einbruchs. Die vier Ohrmodelle unterscheiden sich in der Lage des ersten Einbruchs. Beim rechten Außenohr von Tier 1 befindet sich dieser Einbruch bei 9345 Hz, im linken Außenohr bei 7620 Hz. Bei den Ohrmodellen von Tier 2 liegt er sowohl rechts als auch links bei 5990 Hz. Auch die Ausprägung der Einbrüche stellt sich bei den vier Modellen nicht gleich dar. Während bei den rechten Außenohren von Tier 1 und 2 die Pegeldifferenzen noch im positiven Bereich liegen (Tier 1 = 6 dB, Tier 2 = 2 dB), findet man bei beiden linken Außenohren negative Werte vor (Tier 1 = -5 dB, Tier 2 = -3 dB). Im höherfrequenten Bereich kommt es weiterhin zur Ausbildung weiterer Gipfel und Einbrüche. Der weitere Kurvenverlauf der Übertragungsfunktionen stellt sich bei allen vier Modellen sehr unterschiedlich dar. Diese individuellen Unterschiede zeigen sich in den konkreten Werten bei der Ausprägung der spektralen Merkmale (Lage, Ausdehnung und Feinstruktur). Besonders bei höheren Frequenzen sind die individuellen Unterschiede größer.

Die Freifeldübertragungsfunktionen bei Schalleinfall aus dem frontalen Bereich (AZ 0°) unterscheiden sich deutlich von den entsprechenden Funktionen bei Schalleinfall von hinten (AZ 180°). Beispielgebend werden hier nur die beiden rechten Außenohrmodelle gezeigt (Abb. 4-5); die im folgenden beschriebenen Befunde treffen aber auch auf die linken Modelle zu.

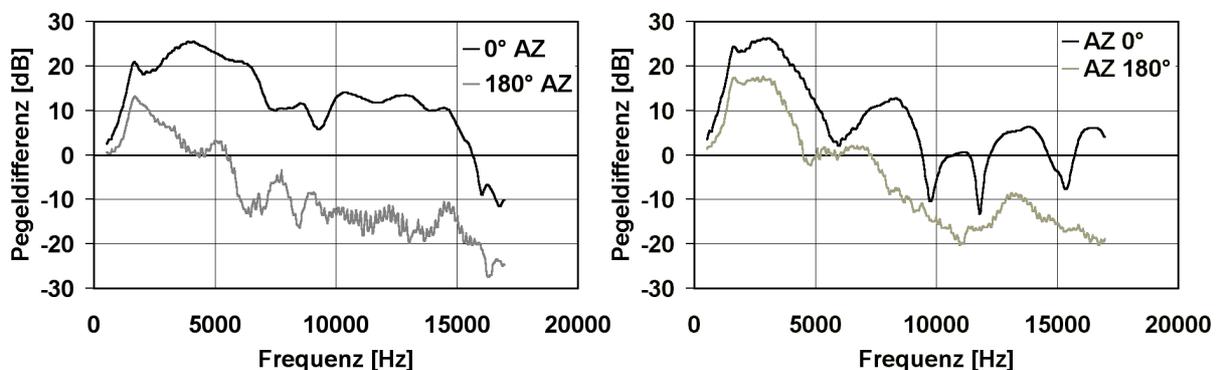


Abb. 4-5: Freifeldübertragungsfunktion bei frontalem und rückwärtigem Schalleinfall (Azimut 0° bzw. 180°), gemessen an den rechten Außenohrmodellen von beiden Haushunden (links – Tier 1; rechts – Tier 2)

Im niederfrequenten Bereich (bis etwa 1,5 kHz) kommt es sowohl bei frontalem als auch bei rückwärtigem Schalleinfall zu einem Ansteigen der Pegeldifferenzen bis zum ersten Gipfel und zur Ausbildung des ersten Verstärkungsbereiches. Die Frequenz des ersten Gipfels ist sowohl bei frontalem als auch bei rückwärtigem Schalleinfall identisch, allein die Pegeldifferenzen unterscheiden sich deutlich (Tier 1 rechts AZ 0° = 21 dB, AZ 180° = 13 dB; Tier 2 rechts AZ 0° = 24 dB, AZ 180° = 17 dB). Bei rückwärtigem Schalleinfall stellt der

erste Gipfel zugleich das spektrale Maximum dar. Danach kommt es bei rückwärtigem Schalleinfall zum stetigen Abfall der Pegeldifferenzen (das rechte Ohrmodell von Tier 2 zeigt erst eine kurze Plateau-Phase, bevor es zum Abfall kommt). Die Werte der Pegeldifferenzen liegen bei frontalem Schalleinfall jederzeit deutlich über den Werten bei rückwärtigem Schalleinfall. Bei Tier 1 (rechts) wird Schall mit Frequenzen ab 5,5 kHz bei rückwärtigem Einfall deutlich abgeschwächt, bei Tier 2 (rechts) ab Frequenzen über 7,4 kHz. Bei frontalem Schalleinfall kommt es bei Tier 1 (rechts) erst bei Schall mit Frequenzanteilen über 15,7 kHz zu Abschwächungen; bei Tier 2 (rechts) wird Schall mit Frequenzen zwischen 9,4 kHz und 12,2 kHz und Frequenzen zwischen 14,6 kHz und 15,6 kHz abgeschwächt. Alle anderen Frequenzen besitzen allerdings positive Pegeldifferenzen (Abb. 4-5). Es lässt sich also feststellen, dass Schall bei frontalem Einfall i.d.R. verstärkt wird, wobei bei rückwärtigem Schalleinfall vor allem hochfrequenter Schall stark abgeschwächt wird.

In Abb. 4-6 wird die Freifeldübertragungsfunktion des linken Außenohrmodells von Tier 1 in der 3D-Perspektive vom AZ 0° bis 360° dargestellt. Die Abbildung zeigt die Veränderungen der Pegeldifferenzen in den Freifeldübertragungsfunktionen in Abhängigkeit von der Schalleinfallrichtung. Es ist ersichtlich, dass Schallsignale mit niederen Frequenzen (500 Hz bis etwa 1500 Hz) bei Schalleinfall aus allen Richtungen zwischen 0 dB und 10 dB verstärkt werden. Wird Abb. 4-7 betrachtet, in der Freifeldübertragungsfunktionen einzelner ausgewählter Schalleinfallrichtungen des linken Ohrmodells von Tier 1 präsentiert werden, wird deutlich, dass sich diese Verstärkung in Form eines raschen Anstiegs der Pegeldifferenzen bis zum ersten Gipfel bei ca. 1,5 kHz bis 1,7 kHz darstellt. Bei rückwärtigem Schalleinfall bzw. Schalleinfall von der contralateralen Seite (Abb. 4-7: AZ – 60°, -40° und 80° bis 120°) stellt der erste Gipfel das spektrale Maximum dar. Bei Schalleinfall aus dem frontalem Quadranten schließt sich an den ersten Gipfel eine kurze Plateau-Phase an, gefolgt von einem weiteren Gipfel bei 3 kHz bis 4 kHz, der dort das spektrale Maximum darstellt (Abb. 4-7 beim AZ von -20° bis +60°). Auf die richtungsabhängige Ausprägung des spektralen Maximum wird an späterer Stelle noch detaillierter eingegangen. Der durch das spektrale Maximum gebildete erste Verstärkungsbereich, der bei allen Schalleinfallrichtungen auch der prominenteste ist, wird in Abb. 4-6 linksseitig durch das zusammenhängende dunkelgraue-schwarze Gebiet präsentiert. In dieser Abbildung wird die Verbreiterung des Verstärkungsbereiches bei Schalleinfall aus dem frontalen Bereich (AZ -50° bis +50°) sehr deutlich. Das bedeutet, hier wird Schall über einen immer breiter werdenden Frequenzbereich deutlich über 10 dB

verstärkt (Abb. 4-7: beim AZ 40° ist es Schall mit Frequenzen zwischen 1 kHz und 8 kHz, während es beim AZ -40° nur Frequenzen zwischen 1 kHz und 4 kHz sind).

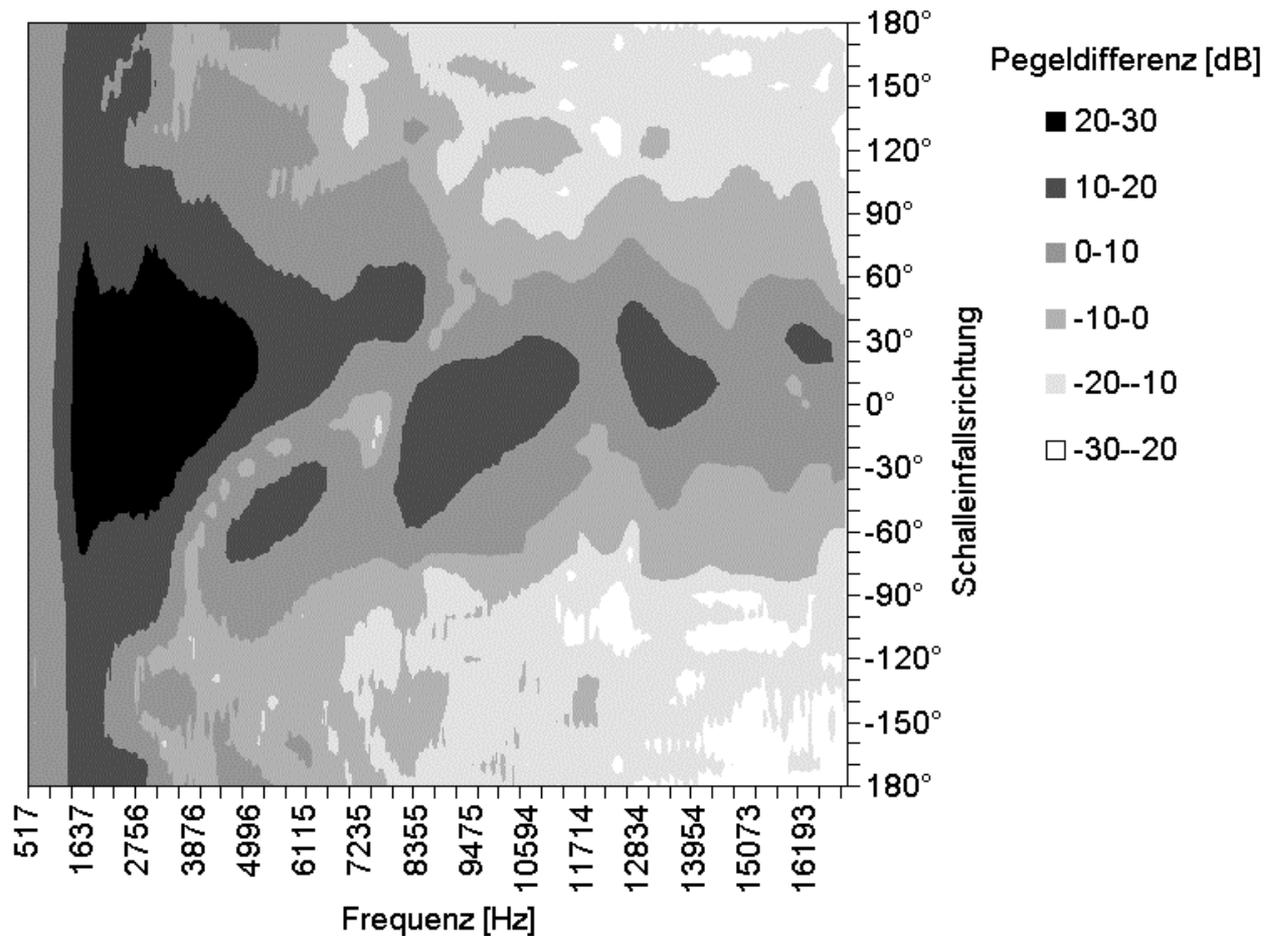


Abb. 4-6: Freifeldübertragungsfunktion des linken Außenohrmodells von Tier 1 ohne Kunstkopf in der 3D-Perspektive: Frequenzbereich von 500 Hz bis 17000 Hz; negative Einfallswinkel repräsentieren Schalleinfall von der contralateralen Seite, dagegen stehen positive Winkel für Schalleinfall von der ipsilateralen Seite; beim Azimut von 0° kommt das Signal genau von vorn, bei 180° genau von hinten; schwarze Gebiete repräsentieren Bereiche mit maximaler Verstärkung, in den weißen Bereichen wird das Schallsignal maximal abgeschwächt

Nach Erreichen des spektralen Maximum kommt es entweder zum raschen Abfall der Pegeldifferenzen, z.B. bei Schalleinfall von der contralateralen Seite (Abb. 4-7: AZ -60° bis -20°), oder der Abfall zieht sich über einen weiten Bereich hin, wie bei Schalleinfall von der ipsilateralen Seite (Abb. 4-7: AZ $+20^\circ$ bis $+60^\circ$). Dabei kann es zur Ausbildung von weiteren kleinen Gipfeln kommen (z.B. AZ 60°), bevor der erste Einbruch ausgebildet wird. Der erste Einbruch kann sehr prominent sein wie in Abb. 4-7 beim AZ 0° . Bei anderen Schalleinfallrichtungen können aber auch höherfrequent liegende Einbrüche den ersten Einbruch an Dominanz übertreffen (z.B. AZ $+120^\circ$). Die Lage und Ausprägung des ersten

Einbruchs ändert sich mit der Schalleinfallrichtung. Darauf wird an späterer Stelle noch genauer eingegangen.

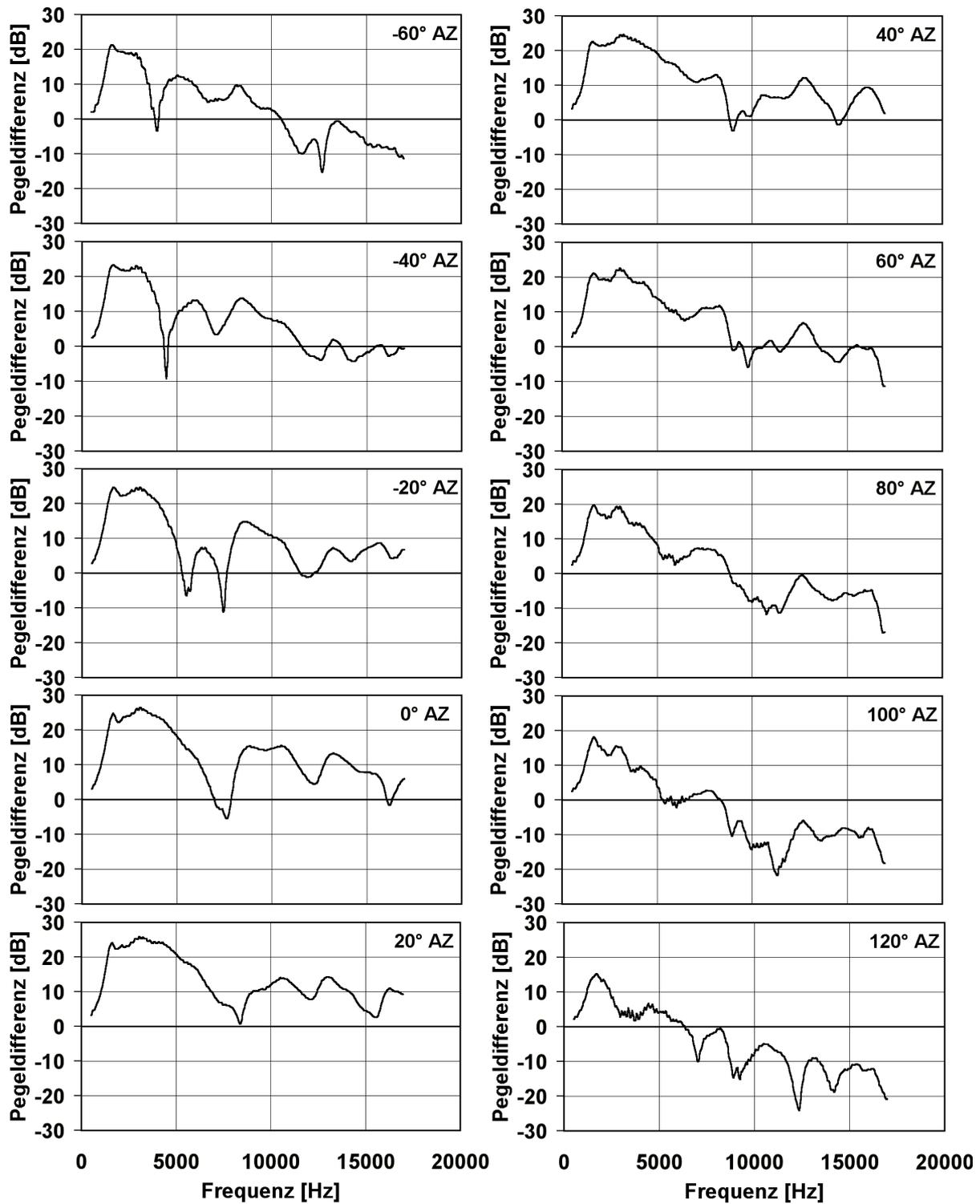


Abb. 4-7: ausgewählte Freifeldübertragungsfunktionen des linken Außenohrmodells von Tier 1: Frequenzbereich von 500 Hz bis 17000 Hz, Azimut von -60° bis $+120^\circ$ (frontaler und seitlicher Schalleinfall)

Im höherfrequenten Bereich kommt es zu größeren richtungsabhängigen Unterschieden in der Ausbildung der spektralen Merkmalen. Allgemein werden aber höherfrequente Signalanteile bei Schalleinfall besonders aus dem contralateralen und hinteren Quadranten abgeschwächt, während sie bei frontal-ipsilateralen Schalleinfall (AZ 0° bis 60°) i.d.R. noch verstärkt werden. So ist aus Abb. 4-7 ersichtlich, dass z.B. beim AZ von $+120^\circ$ alle Signalanteile über 6,4 kHz abgeschwächt werden, d.h. die Werte der Übertragungsfunktion liegen im negativen Bereich. Dagegen liegen beim AZ von 20° alle Werte im positiven Bereich, d.h. Schall mit Frequenzen zwischen 500 Hz und 17 kHz wird bei diesem Tier durch das linke Außenohr bei Einfall aus dem Azimut von 20° ausschließlich verstärkt.

In Abb. 4-8 (einzelne ausgewählte Schalleinfallrichtungen) und Abb. 4-21 (3D-Perspektive) in Abschnitt 4.2.2 werden die Freifeldübertragungsfunktionen des rechten Außenohres von Tier 2 dargestellt. Auch bei diesem Außenohr kommt es nach einem raschen Anstieg der Pegeldifferenzen, beginnend bei den tiefen Frequenzen, zur Ausbildung des spektralen Maximum und damit zur Ausformung des ersten prominenten Verstärkungsbereiches. Im Gegensatz zum linken Ohrmodell von Tier 1 wird bei diesem Ohrmodell der erste Gipfel bei 1,6 kHz nur beim AZ von 80° bis 120° deutlich ausgebildet und stellt auch nur beim AZ von 100° und 120° das spektrale Maximum dar (Abb. 4-8). Bei Schalleinfall aus dem AZ von -40° bis 80° wird das spektrale Maximum bei Frequenzen zwischen 2,8 und 3 kHz ausgebildet. Auch bei diesem Ohrmodell erfolgt das Absinken der Pegeldifferenzen gravierender, je mehr der Schall von der contralateralen Seite einfällt. So ist in Abb. 4-8 beim AZ -60° der Abfall am steilsten, während er bei Wanderung der Schallquelle auf die ipsilaterale Seite immer flacher wird. Beim AZ von 40° bis 120° werden vor dem Erreichen des ersten Einbruchs weitere kleinere Gipfel ausgebildet. Am stärksten wird auch beim rechten Außenohr von Tier 2 der erste Verstärkungsbereich bei frontal-ipsilateralen Schalleinfall ausgebildet (Abb. 4-21 AZ -30° bis 90° ; Abb. 4-8 AZ 40° - maximale Ausprägung). Das Ergebnis vom linken Ohrmodell von Tier 1 – Abschwächung höherfrequenter Signalanteile bei contralateralem und rückwärtigem Schalleinfall – wird auch durch die Daten vom rechten Ohrmodell von Tier 2 bestätigt. So werden bei Einfall aus dem AZ vom 100° alle Signalanteile über 10,3 kHz und bei 120° sogar alle über 8,7 kHz liegende Signalanteile abgeschwächt (negative Werte), während die Werte der Übertragungsfunktion beim AZ von 40° alle im positiven Bereich liegen (ausschließliche Verstärkung aller Signalanteile zwischen 500 Hz und 17 kHz).

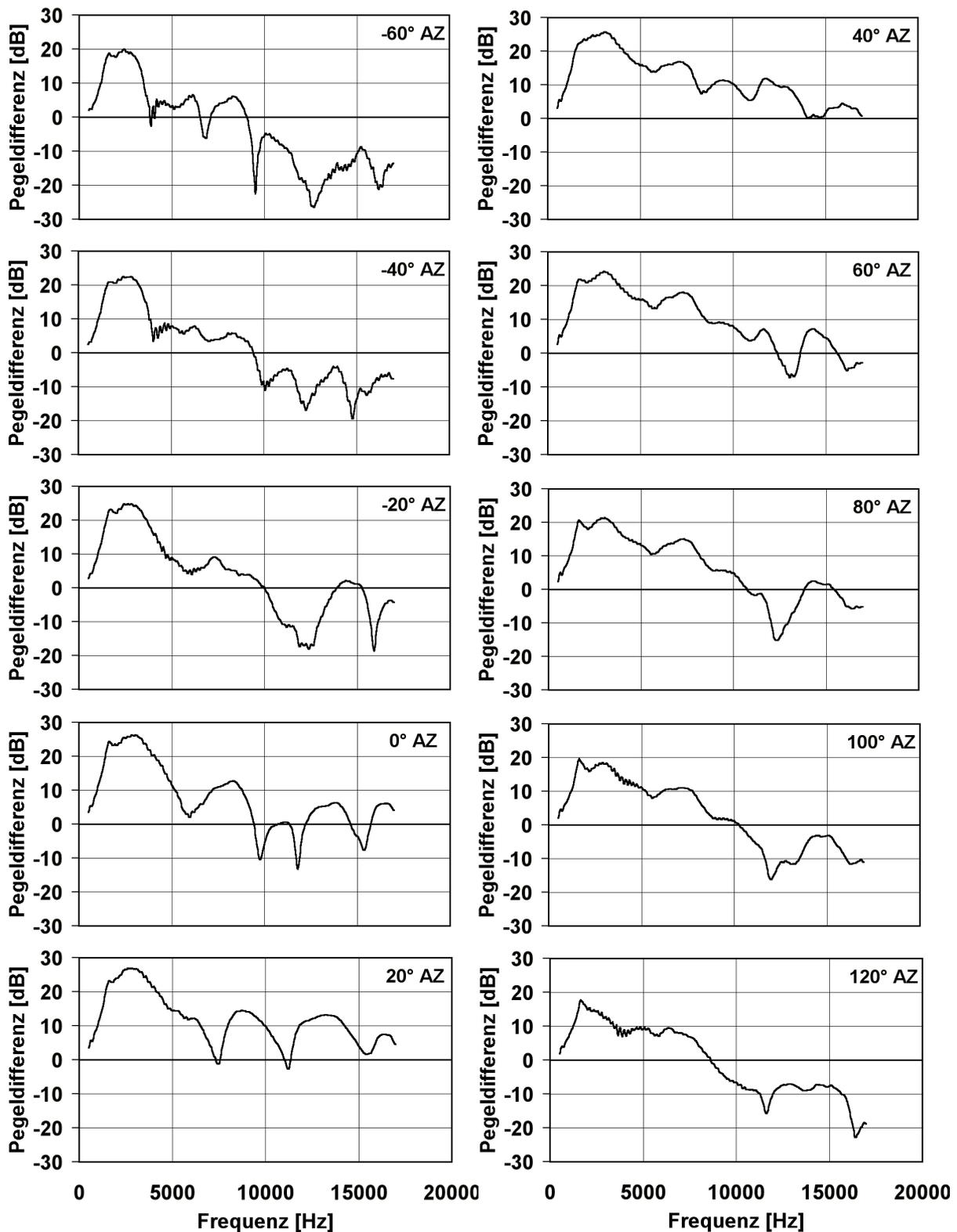


Abb. 4-8: ausgewählte Freifeldübertragungsfunktionen des rechten Außenohrmodells von Tier 2 ohne Kunstkopf: Frequenzbereich von 500 Hz bis 17000 Hz, Azimut von -60° bis $+120^\circ$ (frontaler und seitlicher Schalleinfall)

Die Ausbildung des ersten Verstärkungsbereiches, seine Prominenz im Frequenzbereich zwischen 1 kHz und (je nach Schalleinfallrichtung) 4 kHz bis 8 kHz und das dortige

Vorhandensein des spektralen Maximum ist in den Freifeldübertragungsfunktionen sowohl bei allen Schalleinfallrichtungen als auch bei allen Ohrmodellen zu beobachten. Individuelle Unterschiede, Unterschiede zwischen dem rechten und linken Außenohr eines Tieres und richtungsabhängige Unterschiede zeigen sich in den konkreten Werten bei der Ausprägung der spektralen Merkmale (Lage, Ausdehnung und Feinstruktur). Besonders bei höheren Frequenzen sind diese Unterschiede größer.

Wie bereits erwähnt, zeigen die Lage und/oder Ausprägung einiger spektraler Merkmale eine Abhängigkeit von der Schalleinfallrichtung. In Abb. 4-9 werden die spektralen Maxima der Freifeldübertragungsfunktionen von den beiden rechten Ohrmodellen bei Schalleinfall aus dem Azimut von 0° bis 360° dargestellt. Beim rechten (Abb. 4-9 links) und linken (nicht gezeigt) Außenohr von Tier 1 erreicht das spektrale Maximum beim AZ 0° seinen höchsten Wert. Bei Tier 2 erfolgt dies beim rechten (Abb. 4-9 rechts) Außenohr beim AZ von 10° und beim linken Außenohr bei 20° (nicht gezeigt). Damit existiert bei der vorwärts gerichteten Ohrposition die akustische spektrale Achse im frontalem Bereich zwischen 0° und 20° . Bei Schalleinfall aus dem hinteren und contralateralen Quadranten ist der Wert des spektralen Maximum deutlich kleiner als bei Schalleinfall aus dem frontalen und ipsilateralen Quadranten.

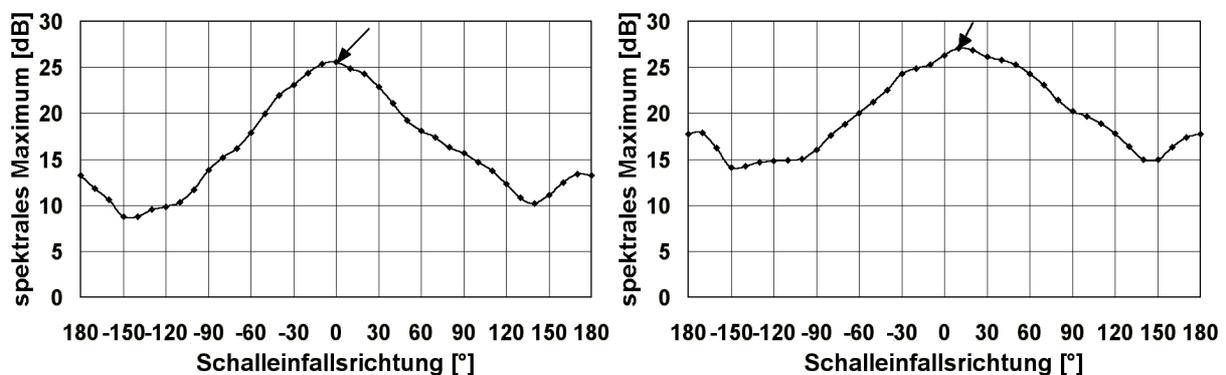


Abb. 4-9: spektrale Maxima der Freifeldübertragungsfunktionen: linke Abbildung – rechtes Außenohrmodell von Tier 1, rechte Abbildung – rechtes Außenohrmodell von Tier 2; jeder Messpunkt zeigt das spektrale Maximum (maximaler Wert) einer Freifeldübertragungsfunktion und die dazugehörige Schalleinfallrichtung im Azimut an; der Pfeil gibt die akustische spektrale Achse für dieses Modell an

Auch die Betrachtung der akustischen Frequenzachsen im untersuchten Frequenzbereich zeigt, dass bei der vorwärts gerichteten Ohrposition alle Frequenzen ihre maximale Verstärkung bei Schalleinfall aus der Richtung des Öffnungswinkels der äußeren Ohrmuschel erfahren (Abb. 4-10). Beim Tier 1 befinden sich die räumlichen Maxima für das rechte Ohr zwischen den Schalleinfallswinkeln von -20° bis $+30^\circ$ (im Durchschnitt beim AZ von 0°),

während beim Tier 2 die räumlichen Maxima für das rechte Ohr bei Schalleinfall aus dem Azimut von 0° bis 70° beobachtet werden können (im Durchschnitt beim AZ von 30°). Frequenzen unter 5 kHz zeigen in beiden Ohrmodellen einen diffusen Wechsel ihrer akustischen Frequenzachsen. Frequenzen über 5 kHz dagegen zeigen ein stufenförmiges Ansteigen und Abfallen der räumlichen Maxima mit dem Ansteigen der Frequenz. In den linken Ohrmodellen sind die Verhältnisse analog (nicht gezeigt).

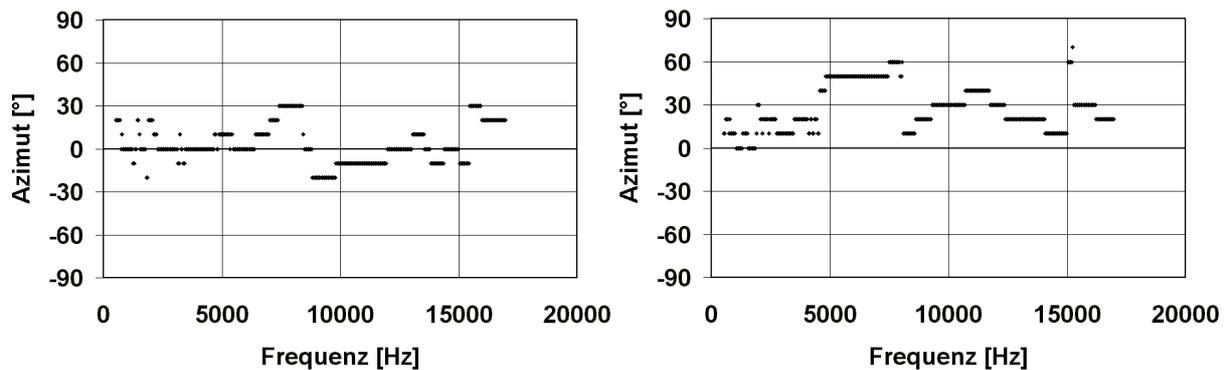


Abb. 4-10: räumliche Maxima der Frequenzen von 500 Hz bis 17 kHz in den Freifeldübertragungsfunktionen bei Schalleinfall von 0° bis 360° : linke Abbildung – rechtes Außenohrmodell von Tier 1, rechte Abbildung – rechtes Außenohrmodell von Tier 2; jeder Messpunkt zeigt die Schalleinfallrichtung im Azimut an, in der sich das räumliche Maximum (maximaler Wert) einer Frequenz befindet (akustische Frequenzachse)

Ausgehend von der richtungsabhängigen Ausprägung des ersten Verstärkungsbereiches erfolgt die Ausbildung des ersten Einbruchs in Abhängigkeit von der Schalleinfallrichtung im mittel- bis höherfrequenten Bereich. Bei Schalleinfall aus dem frontalen und ipsilateralen Quadranten befindet er sich zwischen 4 kHz und 14 kHz. Bei diesen Schalleinfallrichtungen treten nur wenige Einbrüche auf. Der erste Einbruch ist dann meist sehr prominent (z.B. beim AZ von 0° und 20° in Abb. 4-7 und Abb. 4-8). Mit zunehmender seitlicher Auslenkung der Schallquelle verschiebt sich die Lage des ersten Einbruchs. Zudem wird seine Ausprägung immer geringer wie beim AZ von -20° oder $+40^\circ$ in Abb. 4-8. Es kommen weitere Einbrüche hinzu und es wird zunehmend schwieriger, einen prominenten Einbruch festzustellen, z.B. beim AZ von 120° in Abb. 4-7 und beim Azimut von -60° und -40° in Abb. 4-8. Die richtungsabhängige Lage des ersten Einbruchs im Azimut von $+120^\circ$ bis -120° wird in Abb. 4-11 gezeigt. Der erste Einbruch stellt, wie bereits an früherer Stelle definiert, ein Minimum mit mindestens 5 dB hohen Flanken dar; die Frequenz des Minimum wird als zentrale Frequenz des Einbruchs bezeichnet. Die zentrale Frequenz des ersten Einbruchs variiert bei allen vier Ohrmodellen in Abhängigkeit von der Schalleinfallrichtung sehr stark. Ein systematisches Ansteigen bzw. Absinken der zentralen Frequenz durch den Wechsel der Schallquellenrichtung ist in bestimmten Bereichen erkennbar. Beim linken Außenohr von

Tier 1 steigt die zentrale Frequenz mit einem Wechsel des Azimut von -60° (3960 Hz) bis $+100^\circ$ (11330 Hz) stetig an; beim rechten Außenohr ist dies nur zwischen -50° (5860 Hz) bis 0° (9300 Hz) zu beobachten. Bei den Ohrmodellen von Tier 2 kommt es zum stetigen Ansteigen der zentralen Frequenz rechts zwischen 0° (5990 Hz) und $+50^\circ$ (13570 Hz) und links zwischen -40° (4000 Hz) und $+20^\circ$ (7110 Hz). Das systematisches Ansteigen der zentralen Frequenz des ersten Einbruchs mit der Schalleinfallrichtung ist bei allen vier Ohrmodellen demnach im frontalen Quadranten zu verzeichnen – mit unterschiedlicher Ausprägung, aber immer im Bereich um AZ 0° . Die Daten der Ohrmodelle von Tier 2 zeigen außerdem bei ipsilateralem Schalleinfall ein leichtes stetiges Absinken der zentralen Frequenz des ersten Einbruchs und zwar beim rechten Außenohr zwischen $+50^\circ$ (13570 Hz) und $+100^\circ$ (12020 Hz) und beim linken Außenohr zwischen $+70^\circ$ (10850 Hz) und $+110^\circ$ (9560 Hz). Außerhalb der genannten Bereiche ist kein kontinuierliches Wechseln der zentralen Frequenzen mit einer Änderung der Lage der Schallquelle über einen größeren Winkelbereich zu beobachten.

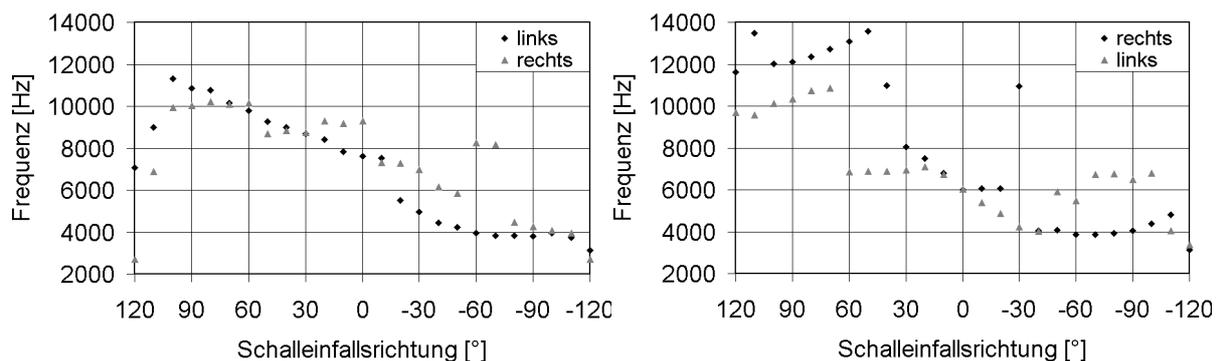


Abb. 4-11: zentrale Frequenz des ersten Einbruchs in Abhängigkeit von der Schalleinfallrichtung zwischen dem Azimut von 120° und -120° : linke Abbildung – rechtes und linkes Modell von Tier 1; rechte Abbildung – rechtes und linkes Modell von Tier 2

Abschließend kann gesagt werden, dass bei der vorwärts gerichteten Ohrposition Schallereignisse aus dem frontal-ipsilateralen Quadranten (AZ 0° bis 60°) maximal verstärkt werden, während außerhalb der Ohrmuschelöffnung einfallende Schallsignale – insbesondere hochfrequente Signalanteile – abgeschwächt werden. Sowohl das höchste spektrale Maximum als auch die räumlichen Maxima der einzelnen Frequenzen werden bei frontalem Schalleinfall beobachtet. Weiterhin zeigt die Lage des ersten Einbruchs bei frontalem Schalleinfall eine eindeutige Richtungsabhängigkeit.

4.2.1.2 Monaurale Übertragungsfunktion

In der monauralen Übertragungsfunktion werden die richtungsabhängigen Unterschiede in den Pegeldifferenzen einzelner Frequenzen und damit die richtungsabhängige Verlagerung einzelner spektraler Merkmale betont. Als Bezugssignal dient in dieser Arbeit das Ohrsignal bei einem Schalleinfall aus dem AZ von 0° (entspricht Nulllinie). Abb. 4-12 und Abb. 4-13 zeigen exemplarisch die monauralen Übertragungsfunktionen des rechten Außenohres von Tier 2 in der 3D-Perspektive vom AZ 0° bis 360° sowie einzelner ausgewählter Schalleinfallrichtungen. Die Pegeldifferenzen für Schall mit Frequenzen zwischen 500 Hz und 4 kHz bei einem Schalleinfallswinkel zwischen -10° bis $+60^\circ$ liegen im Bereich um 0 dB (Abb. 4-13).

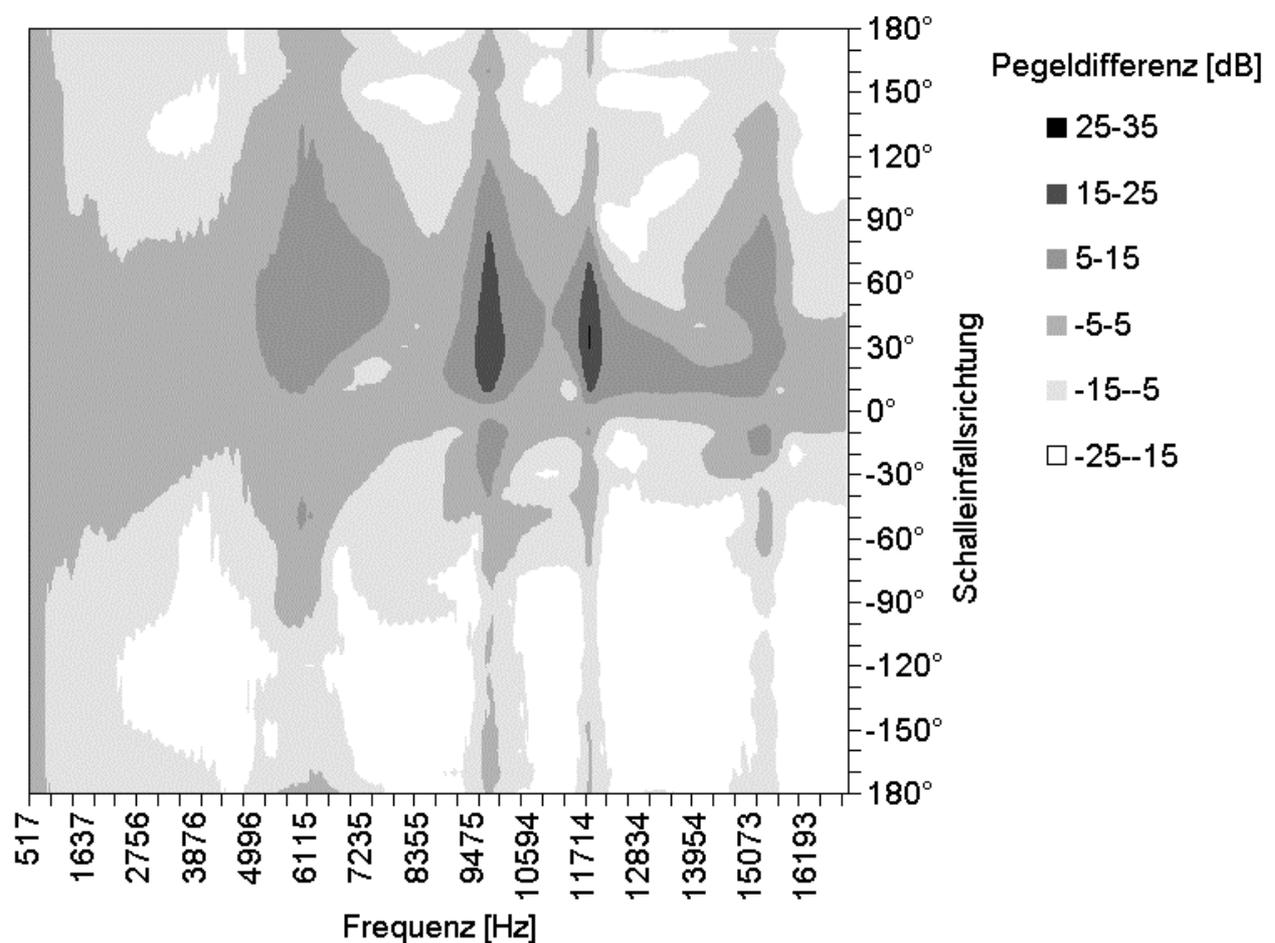


Abb. 4-12: Monaurale Übertragungsfunktion des rechten Außenohrmodells von Tier 2 ohne Kunstkopf in der 3D-Perspektive: Frequenzbereich von 500 Hz bis 17000 Hz; negative Einfallswinkel repräsentieren Schalleinfall aus der contralateralen Seite, dagegen stehen positive Winkel für Schalleinfall aus der ipsilateralen Seite; Pegeldifferenzen zwischen -5 und $+5$ dB (mittlere Graustufe) repräsentieren nur eine geringfügige Änderung vom Bezugssignal, je dunkler bzw. heller ein Bereich wird, desto größer ist seine Abweichung vom Bezugssignal

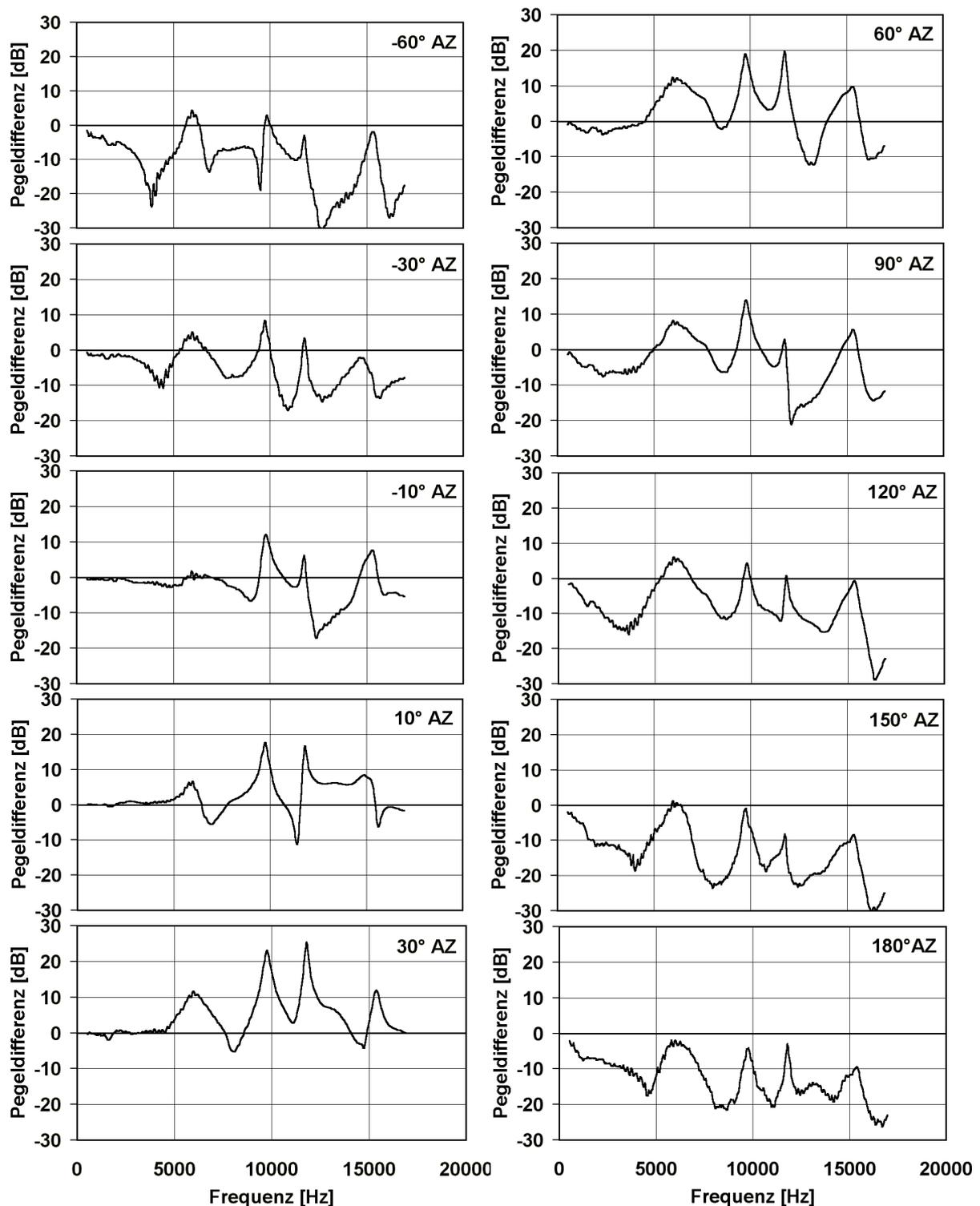


Abb. 4-13: ausgewählte monaurale Übertragungsfunktionen des rechten Außenohrmodells von Tier 2: Frequenzbereich von 500 Hz bis 17000 Hz, Azimut von -60° bis 180° , Bezugssignal AZ 0°

Auch bei Schalleinfall aus dem lateralen und hinteren Quadranten fallen die Werte der Pegeldifferenzen der Frequenzen bis ca. 1 kHz nur minimal ab (beim AZ von -100° bis -170° betragen die Werte ca. -6 dB). Erst oberhalb 5 kHz sind bei allen Schalleinfallrichtungen größere richtungsabhängige Abweichungen der Pegeldifferenzen von der Nulllinie zu

beobachten. Diese Abweichungen können zum Teil beachtliche Werte annehmen, z.B. beträgt die positive Abweichung von Signalanteile mit der Frequenz um 11,8 kHz bei Schalleinfall aus dem AZ von 30° im Vergleich zum Bezugssignal 25,4 dB und beim AZ von 150° kommt es zu einer negativen Abweichung von -8,2 dB (Abb. 4-13 AZ 30° und 150°). In Abb. 4-12 wird deutlich, dass die Lage einiger Bereiche mit positiven Abweichungen von der Schalleinfallsrichtung unabhängig ist, z.B. bei 6 kHz, 9,8 kHz, 11,8 kHz und 15,4 kHz. Der Wert der Pegeldifferenz variiert allerdings mit der Schalleinfallsrichtung. Er ist am höchsten bei ipsilateralen Schalleinfall (AZ 40° bis 60°), erreicht bei rückwärtigem und contralateralem Schalleinfall auch negative Werte (Abb. 4-13 AZ 150° und 180°). Im Gegensatz zu „diesen lagebeständigen Gipfeln“ werden in den monauralen Übertragungsfunktionen auch Bereiche mit negativen Werten beobachtet. Besonders bei frontalem Schalleinfall zeigt die zentrale Frequenz des ersten negativen Bereiches eine richtungsabhängige Verschiebung (Abb. 4-13). So wandert sie von 7 kHz beim AZ von +10° auf 8,5 kHz beim AZ von +50° (AZ +20° = 7,5°kHz; AZ +30° = 8,1 kHz; AZ +40° = 8,3 kHz).

In Abb. 4-14 und in Abb. 4-15 sind die monauralen Übertragungsfunktionen der linken Ohrmodelle von Tier 1 und 2 dargestellt. Dabei wurden aus Platzgründen nur einige ausgewählte Schalleinfallsrichtungen aus dem frontalen und ipsilateralen Quadranten dargestellt. Auch bei diesen beiden Ohrmodellen (sowie beim nicht gezeigten rechten Ohrmodell von Tier 1) weichen die Werte der Pegeldifferenzen bis ca. 1 kHz nur geringfügig von der Nulllinie ab. Beim linken Außenohr von Tier 1 beträgt die maximale Abweichung bei 990 Hz bei Einfall aus dem AZ von +170° bis -110° ca. -5 dB, beim rechten Ohr dieses Tieres sind es zwischen dem AZ von 180° bis -110° ca. -6 dB und beim linken Ohr von Tier 2 liegen die Werte beim AZ von +170° bis -150° zwischen -5 dB und -5,7 dB. Bei Schalleinfall aus dem frontalen Bereich sind die geringfügigen Abweichungen vom Bezugssignal auch für Frequenzen über 1 kHz zu beobachten – so erstreckt sich beim linken Außenohr von Tier 1 dieser Bereich bei Einfall aus dem AZ von -10° bis +30° bis ca. 4 kHz (Abb. 4-14).

Die Darstellungsweise von Abb. 4-14 und Abb. 4-15 lässt außerdem erkennen, inwieweit sich die monaurale Übertragungsfunktion bei einem Wechsel der Schalleinfallsrichtung um 20 Grad bei frontalem und ipsilateralem Schalleinfall ändert. Wandert die Schallquelle aus der direkten frontalen Position (AZ 0°) 10 Grad nach links bzw. nach rechts, so liegt die Abweichung der Werte bis ca. 4 kHz bei nahezu Null (linkes Ohrmodell Tier 1 Abb. 4-14). Die deutlichsten Abweichungen befinden sich hier im Bereich zwischen 4 kHz und 7,5 kHz,

wobei die Werte für den AZ 10° in den positiven Bereich wandern, während die Werte für den AZ -10° in den negativen Bereich fallen. Auch beim linken Ohrmodell von Tier 2 können ähnliche Tendenzen beobachtet werden, nur erstreckt sich hier der Bereich der deutlichsten Abweichung von 2 kHz bis 6 kHz (Abb. 4-15). Die monauralen Übertragungsfunktionen vom AZ -10° und AZ $+10^\circ$ zeigen in dem besprochenen Bereich somit sowohl eine starke Abweichung zum Bezugssignal selbst, als auch zueinander. Beim rechten Ohrmodell von Tier 2 ist dieses Verhalten beim AZ $-10^\circ/+10^\circ$ für Werte der Frequenzen zwischen ca. 5 kHz bis 9,5 kHz zu beobachten (Abb. 4-13). Eine Änderung um 20 Grad im frontalen Quadranten, z.B. vom AZ -10° auf -30° oder vom AZ $+10^\circ$ auf $+30^\circ$, erzeugt monaurale Übertragungsfunktionen, die sich in bestimmten Frequenzbereichen deutlich vom Bezugssignal als auch voneinander unterscheiden. Die deutlichsten Abweichungen der Pegeldifferenzen liegen vor allem in den Frequenzbereichen, in denen der erste negative Bereich fällt. Beim linken Ohrmodell von Tier 1 stellt sich das wie folgt dar: beim AZ -30° liegt die zentrale Frequenz des ersten negativen Bereiches bei 5 kHz mit einem Wert von -24 dB (die Funktion von AZ -10° besitzt dort einen Wert von -4 dB); beim AZ -10° ist die zentrale Frequenz 6,2 kHz mit einem Wert von -9 dB (AZ -30° : $+1$ dB) (Abb. 4-14 links oben); beim AZ $+10^\circ$ befindet sich die zentrale Frequenz bei 8,1 kHz mit einem Wert von $-4,5$ dB (AZ $+30^\circ$: $+0,6$ dB); beim AZ $+30^\circ$ bei 8,7 kHz mit einem Wert von $-22,5$ dB (AZ $+10^\circ$: -2 dB) (Abb. 4-14 links unten).

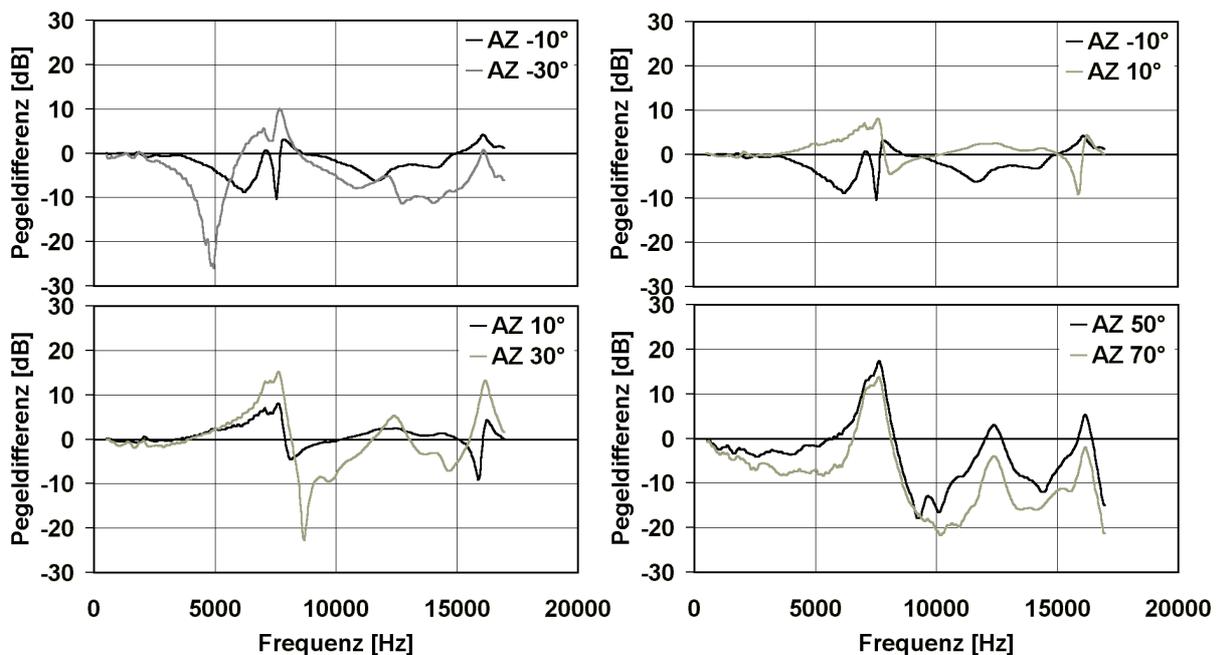


Abb. 4-14: ausgewählte monaurale Übertragungsfunktionen des linken Außenohrmodells von Tier 1: Frequenzbereich von 500 Hz bis 17000 Hz, Azimut von -30° bis 70° , Bezugssignal AZ 0°

Beim linken Ohrmodell von Tier 2 können aus Abb. 4-15 gleiche Tendenzen abgelesen werden: beim AZ -30° liegt die zentrale Frequenz bei 4 kHz mit einem Wert von $-12,5$ dB (die Funktion von AZ -10° besitzt dort einen Wert von -4 dB); beim AZ -10° bei 5 kHz mit einem Wert von $-8,5$ dB (AZ -30° : $+1$ dB); beim AZ $+10^\circ$ befindet sich die zentrale Frequenz bei 7,1 kHz mit einem Wert von -2 dB (AZ $+30^\circ$: -4 dB); beim AZ $+30^\circ$ bei 7,8 kHz mit einem Wert von -14 dB (AZ $+10^\circ$: -1 dB). Außer den deutlichen Unterschieden bei den Pegeldifferenzen kann wie beim rechten Ohrmodell von Tier 2 bei beiden linken Ohrmodellen eine richtungsabhängige Verschiebung der zentralen Frequenz des ersten negativen Bereiches bei frontalem Schalleinfall beobachtet werden (Abb. 4-14: Tier 1 vom AZ -30° bei 5 kHz bis AZ $+70^\circ$ bei 10,2 kHz.; Abb. 4-15: Tier 2 vom AZ -30° bei 4 kHz bis AZ $+70^\circ$ bei 8,5 kHz).

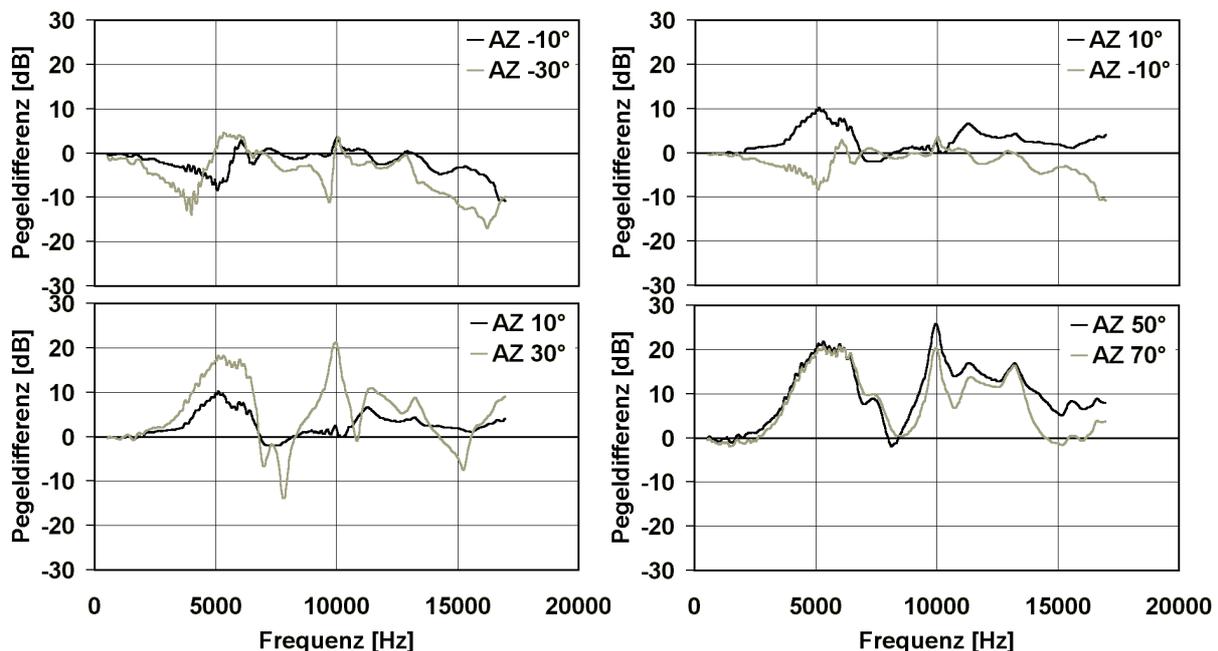


Abb. 4-15: ausgewählte monaurale Übertragungsfunktionen des linken Außenohrmodells von Tier 2: Frequenzbereich von 500 Hz bis 17000 Hz, Azimut von -30° bis $+70^\circ$, Bezugssignal AZ 0°

Bei ipsilateralem Schalleinfall weichen die monauralen Übertragungsfunktionen AZ $+50^\circ$ und AZ $+70^\circ$ zum Teil deutlich von der Nulllinie ab (Abb. 4-14 und Abb. 4-15 rechts unten). Die Veränderungen der beiden Funktionen zueinander durch den Wechsel der Schalleinfallrichtung um 20 Grad sind dagegen zum Teil recht gering. Beim linken Ohrmodell von Tier 1 liegen die Werte der Pegeldifferenzen der Funktionen AZ $+50^\circ$ und AZ $+70^\circ$ im Frequenzbereich von 6,4 kHz bis 9,5 kHz weniger als 5 dB auseinander (Abb. 4-14 rechts unten). Im gesamten Frequenzbereich von 500 Hz bis 17 kHz differieren die Werte maximal nur um 11 dB. Der Wechsel um 20 Grad bei frontalem Schalleinfall erzeugt dagegen höhere Abweichungen; z.B. liegt beim Wechsel vom AZ -30° auf -10° die maximale

Abweichung der beiden Funktionen zueinander bei 22 dB (vom AZ +10° auf +30° maximal 20,5 dB). Abb. 4-15 rechts unten zeigt, dass beim linken Modell von Tier 2 die Werte der Pegeldifferenzen der Funktionen AZ +50° und AZ +70° nur im Frequenzbereich von 9,2 kHz bis 11 kHz und von 13,8 kHz bis 16,6 kHz mehr als 5 dB voneinander abweichen (maximal 8,3 dB). Im übrigen Frequenzbereich sind die Abweichungen zueinander durch den 20 Grad-Wechsel geringfügig (unter 5 dB).

Abschließend lässt sich sagen, dass Schall mit niederen Frequenzen (bis etwa 1 kHz) durch Pegeldifferenzen wenig Informationen zur Änderung der Schalleinfallrichtung liefert. Bei Schalleinfall aus dem frontalen Quadranten lässt sich dies auch für Schall mit Frequenzen bis 2 kHz sagen (beim linken Außenohr von Tier 1 und beim rechten Außenohr von Tier 2 sogar bis 4 kHz). Erst hochfrequente Signalanteile zeigen deutliche Abweichungen zum Bezugssignal, d.h. sie liefern Informationen für die Bestimmung der Schalleinfallrichtung. Bei Änderungen der Schalleinfallrichtungen im frontalen Bereich zeigen die einzelnen Funktionen auch zueinander deutliche Abweichungen, besonders im höherfrequenten Bereich (ab 4 kHz). Bei ipsilateralem Schalleinfall weichen die monauralen Übertragungsfunktionen zwar deutlich vom Bezugssignal ab, die Veränderungen der Funktionen zueinander durch den Wechsel der Schalleinfallrichtung sind dagegen geringfügiger. Weiterhin kann analog zur Freifeldübertragungsfunktion auch bei der monauralen Übertragungsfunktion eine systematische richtungsabhängige Verschiebung der zentralen Frequenz des ersten negativen Bereiches bei frontalem Schalleinfall verzeichnet werden.