

## 2 Literaturbesprechung

### 2.1 Das Außenohr

Das Ohr der Säugetiere, das man als ein Doppelorgan betrachten kann, vereint morphologisch die beiden Sinnesorgane Hör- und Gleichgewichtssinn. Daher wird das Ohr auch als *Organum vestibulocochleare* bezeichnet. Es wird in drei Abteilungen unterteilt: 1. das äußere Ohr, *Auris externa*, 2. das Mittelohr, *Auris media* und 3. das Innenohr, *Auris interna*. Dem äußeren Ohr von Säugetieren wurde in frühen Untersuchungen oftmals nur die Funktion des schallauffangenden Teils des Hörorgans zugebilligt. Intensive Studien offenbarten dagegen eine viel komplexere Funktion des Außenohres und seinen Einfluss auf des Hörereignis. Der anatomische Aufbau des Außenohres hat dabei einen entscheidenden Einfluss.

#### 2.1.1 Anatomischer Aufbau des Außenohres

Der anatomische Aufbau des Außenohres ist bei den Säugetieren prinzipiell gleich. Das äußere Ohr setzt sich aus der trichterförmigen Ohrmuschel, *Auricula*, dem äußeren Gehörgang, *Meatus acusticus externus*, und dem Bewegungsapparat der Ohrmuschel zusammen (Abb. 2-1). Die Grundlage der Ohrmuschel, eine elastische Knorpelplatte (*Cartilago auriculae*), ist in ihrer Gestalt und Elastizität artspezifisch [Koch & Berg, 1985]. Sie ist dünn und biegsam an ihrem distalen Ende, dicker und weniger biegsam an ihrem proximalen Ende, wo sie in eine Röhre aufgerollt ist [Miller & Witter, 1942; Getty et al., 1956]. Beim Menschen ist ein Teil des Ohrmuschelrandes besonders stark eingerollt und bildet dadurch die *Helix*. Bei den meisten Säugetierarten wird die Ausbildung einer *Helix* nicht beobachtet [Koch & Berg, 1985]. Der freie Rand der Ohrmuschel und die benachbarten Bereiche entsprechen allerdings der *Helix* vom menschlichen Ohr [Miller & Witter, 1942]. Bei Hund, Rind und Schwein befindet sich eine quer verlaufende deutliche Knorpelleiste im Bereich des Muscheltrichters, die wie beim Menschen als *Anthelix* bezeichnet wird. Der ventrale Tütenwinkel wird rostral durch den *Tragus* und kaudal durch den *Antitragus* gebildet [Getty et al., 1956; Koch & Berg, 1985; König, 1994]. Der Muschelknorpel wird von mehr oder weniger stark behaarter Haut überzogen. Beim Hund unterscheidet sich die Behaarung der Haut auf der konvexen Oberfläche des Ohres wenig von der des restlichen Körpers; dagegen ist das Fell auf der konkaven Oberfläche schütter und fein [Miller & Witter, 1942]. Durch die trichterförmige Einrollung der Ohrmuschel entsteht eine Höhlung, die auch als *Scapha* bezeichnet wird. Besonders beim Hund findet man hier faltenartige, unregelmäßige

Erhabenheiten, die meist allein durch die Haut gebildet werden, sowie längere, gröbere Schutzhaare [Koch & Berg, 1985; König, 1994]. Die Haut, die die Innenoberfläche vom peripheren Teil der Ohrmuschel überzieht, enthält außerdem Talgdrüsen und einige Ohrschmalzdrüsen (apokrine Drüsen). Sie wird im weiteren Verlauf des Ohrkanals dünner, die Anzahl der Drüsen nimmt ab und es gibt nur noch vereinzelt Haare [Fraser et al., 1970]. Bei Hund und Katze befindet sich am caudalen Muschelrand die sogenannte Hauttasche, *Saccus cutaneus marginalis* [König, 1994]. Ventral der *Anthelix* geht die *Scapha* in das *Cavum conchae* bzw. die *Concha auriculae* über. Die *Concha* ist der tiefste Teil der konkaven Oberfläche der Ohrmuschel [Miller & Witter, 1942].

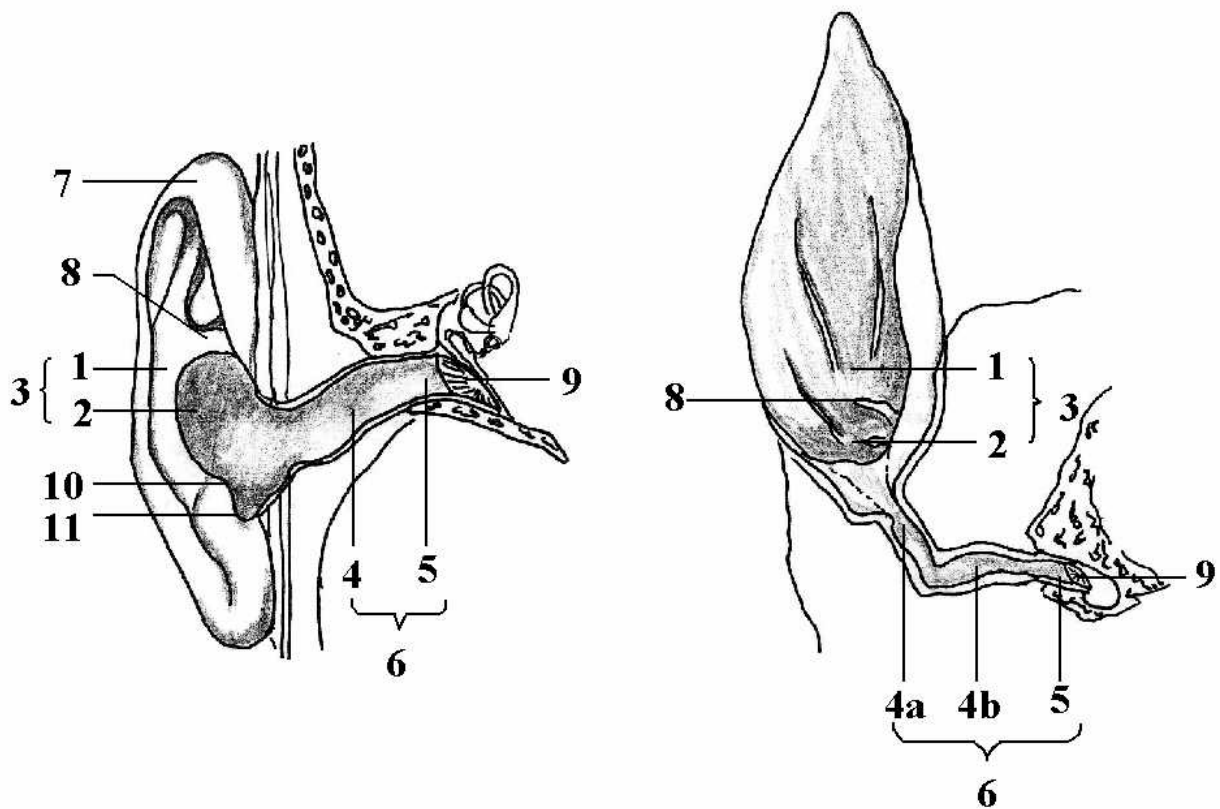


Abb. 2-1: Anatomischer Aufbau des Außenohres von Mensch und Hund (mit Stehohren, z. B. Schäferhund): 1 – Pinna, 2 – Concha auriculae, 3 – Ohrmuschel bzw. Auricula, 4 – Meatus acusticus externus cartilagineus, 4a – vertikaler Teil, 4b – horizontaler Teil, 5 – Meatus acusticus externus osseus, 6 – äußere Gehörgang, 7 – Helix, 8 – Anthelix, 9 – Trommelfell bzw. Membrana tympani, 10 – Antitragus, 11 – Incisura intertragica

Der Ohrmuschelknorpel geht weiter schädelwärts ohne Grenzen in den halbringförmigen Knorpel über, der den Anschluß zum äußeren Gehörgang, *Meatus acusticus externus*, bildet. Der äußere Gehörgang wird unterteilt in einen knorpeligen (*Meatus acusticus externus cartilagineus*) und einen knöchernen (*Meatus acusticus externus osseus*) Bereich und reicht bis zum Trommelfell, *Membrana tympani* (Abb. 2-1). Die knorpelige Grundlage des äußeren

Gehörganges bildet der halbringförmige Knorpel (*Cartilago semicircularis*) und der Kürassknorpel (*Cartilago anularis*); die knöcherne Grundlage wird durch die *Pars tympanica* des *Os temporale* gebildet [Koch & Berg, 1985]. Die Interposition des halbringförmigen Knorpels zwischen dem *Os temporale* und dem Ohrmuschelknorpel sorgt teilweise für die freie Beweglichkeit des Ohres und die Sicherheit vor Verletzung [Miller & Witter, 1942; Getty et al., 1956].

Starke Variationen gibt es in der Ausprägung der einzelnen Bestandteile des Außenohres. Wie in Abb. 2-2 zu sehen ist, variiert die Größe der Ohrmuschel extrem zwischen verschiedenen Säugetieren (siehe Elefant und Seehund). Länge, Gestalt und Verlauf des äußeren Gehörganges weisen ebenfalls tierartliche und individuelle Unterschiede auf [Koch & Berg, 1985].



Abb. 2-2: Variationen des Außenohres bei verschiedenen Säugetieren: Die Größe der äußeren Ohrmuschel kann beträchtliche Ausmaße wie beim Elefanten (A) annehmen, aber auch nur noch rudimentär wie beim Seehund (B) sein. Die Mobilität des Außenohres kann ebenfalls stark zwischen den Säugetieren schwanken, wie die sehr bewegliche Ohrmuschel beim Reh (C) und die fast unbewegliche Ohrmuschel beim Gorilla (D).

Auch die Beweglichkeit zeigt starke tierartige Unterschiede (Abb. 2-2), wobei die Ursache sicherlich z.T. in der Ausprägung der Bemuskelung zu suchen ist. Die Ohrmuskeln sind beim Menschen nur noch rudimentär vorhanden. Der Grad der Mobilität der äußeren Ohrmuschel rangiert von 180° beim Pferd bis zu der unbeweglichen äußeren Ohrmuschel beim Menschen [Heffner & Heffner, 1992]. Durch die äußeren Muskeln kann die Ohrmuschel der Haustiere um ihre vertikale Achse rotieren, so dass die Schallwellen ohne Kopfbewegung aufgenommen und zum Trommelfell weiter geleitet werden können [Fraser et al., 1970]. Dabei wird jedes Ohr unabhängig vom anderen kontrolliert. Es wurde bei Raubtieren und Huftieren beobachtet, dass beide Ohrmuscheln gleichzeitig in entgegengesetzte Richtungen zeigten [Getty et al., 1956]. Die Position des Außenohres am Kopf und das Größenverhältnis des Kopfes zum Außenohr variiert ebenfalls zwischen den einzelnen Säugerarten (siehe Abb. 2-2). So ist z.B. das Außenohr beim Mensch im Verhältnis zur Kopfgröße viel kleiner und befindet sich relativ mittig rechts und links am Kopf. Bei anderen Säugetieren ist die Ohrmuschel nur noch rudimentär vorhanden (z.B. Seehund und Maulwurf). Dagegen gibt es Säugetiere wie die Huftiere, bei denen die Ohrmuschel viel höher am Kopf plaziert ist und damit den Kopf um ein weites überragt. Hier hat die Ohrmuschel fast die Größe des Kopfes. Dazwischen gibt es zahlreiche Abstufungen in Ohrmuschelgröße und Höhe der Plazierung des Außenohres an der Seite des Kopfes.

Auch beim Hund ist die Ohrmuschel eines der variabelsten Gebilde in Bezug auf Gestalt, Größe und Position [Miller & Witter, 1942; Getty et al. 1956]. Die verschiedenen rassespezifischen Ohrformen sind auf Größe, Dicke und Beschaffenheit des Ohrknorpels, sowie die Stärke der Bemuskelung zurückzuführen [König, 1994]. Durch die Domestikation und Züchtung des Haushundes kam es zur Ausbildung rassespezifischer Variationen des Außenohres, wie das lange Stehohr (Deutscher Schäferhund), das kurze Stehohr (Wolfspitz), das Fledermausohr (Französische Bulldogge), das überlange Hängeohr (Bloodhound), das Rosenohr (Whippet), das Kippohr (Foxterrier) und das schlaffe Hängeohr (Pointer). Grützmacher [1962] zeigte durch Untersuchungen des äußeren Gehörganges an 17 Hunderassen deren rassemäßige Differenzen. Die Gesamtlänge des äußeren Gehörganges, der eine mehr oder weniger langgestreckte Röhre darstellt, ist beim Hund zwischen 37 und 65 mm lang mit einem längsovalen Querschnitt; der knöchern gestützte Teil beträgt zwischen 7 und 13 mm und ist von mehr rundlicher Form. Im Bereich des Überganges vom halbringförmigen Knorpel zum Kürassknorpel zeigt der äußere Gehörgang beim Hund eine fast rechtwinklige Abknickung, die so stark sein kann, dass sie fast senkrecht zur

Medianebene steht (beim Hängeohr größer als  $110^\circ$ , beim Stehohr zwischen  $100^\circ$  und  $110^\circ$ ). Diese Umknickungsstelle ist durch eine tiefe einschneidende Furche gekennzeichnet.

### 2.1.2 Funktionen des Außenohres

Das Außenohr wird außer zur auditiven Wahrnehmung auch für weitere Funktionen benötigt. Zu diesen zählt zum einen die Thermoregulation bei einigen Säugetieren, wie z.B. beim Elefanten [Buss & Estes, 1971] und beim Kaninchen [Hill et al, 1980]. Beim Elefanten steigt z.B. die Anzahl der Ohrbewegungen während heißer, windstiller Perioden stark an, während bei kaltem oder Regenwetter keine oder nur vereinzelte Ohrbewegungen beobachtet werden. An heißen windigen Tagen spreizt der Elefant seine Ohrmuschel weit ab. Zu dieser Zeit wird dieses Verhalten von anderen Elefanten nicht als Warnsignal interpretiert, obwohl das weite Abspreizen und Flattern mit den Ohr sonst auf Gefahren hinweist [Buss & Estes, 1971]. Bei einigen anderen Säugetieren, z.B. bei den Hundartigen [Eisfeld, 1966], kommt dem Außenohr bei der intraspezifischen mimischen Kommunikation (Ausdrucksverhalten) eine wichtige Rolle zu. Beim Wolf deuten vorwärts gerichtete Ohren auf eine soziale Initiative hin, während stark zurückgezogene Ohren auf alle Möglichkeiten der Unsicherheit, Ergebenheit oder Furcht hinweisen. Eine Auswärtsdrehung der Ohröffnungen erfolgt in Kampfstimmungen, bei Abwehrbereitschaft werden die Ohrmuscheln seitwärts gesenkt [Schenkel, 1947]. Nicht zuletzt dient das Außenohr dem mechanischen Schutz des Trommelfells und der nachfolgenden Bestandteile des Mittel- und Innenohres.

Die akustische Funktion des Außenohres von Säugetieren besteht in der Sammlung der Schallwellen in Form eines Kollektors, in der Weiterleitung der Schallsignale und der Ankopplung an das Mittelohr sowie in der Transformation der Schallsignale und damit der Bereitstellung eines akustischen Reizes für die Schalllokalisierung durch die Ausnutzung der Richtungsabhängigkeit dieses Prozesses. Durch Außen- und Mittelohr wird der Schall an die neuronalen Strukturen des inneren Ohres übertragen. Dort werden die Schallwellen durch Anregung der Cochlea in elektrische Impulse im Nervensystem verwandelt [Eger & Lindsay, 1997]. Ein quantitativer Vergleich der Leistung des Außenohres bei verschiedenen Säugetieren zeigt größere Unterschiede. Das Audiogramm von unterschiedlichen Säugetieren weist z.B. in einigen Frequenzbereichen erhebliche Differenzen auf [Rosowski, 1994]. Im allgemeinen reagieren größere Landsäugetiere empfindlicher auf Frequenzen unter 10 kHz, während kleinere Säugetiere im hochfrequenten Bereich sensibler antworten [Heffner & Heffner, 1992]. Zwischen den Strukturmerkmalen von Außen- und Mittelohr und der Hörfunktion gibt es einige Korrelationen. So werden in Abhängigkeit von der Größe der

Außenohrbestandteile bestimmte Frequenzbereiche ausgeprägter verstärkt. Auch weisen einige Untersuchungen darauf hin, dass die obere Hörgrenze bei einigen Arten mit dem Ausmaß des Trommelfells und den Gehörknöchelchen negativ korreliert [Rosowski, 1992]. Über weitere Korrelationen, z.B. Außenohrresonanzfrequenz und Länge des äußeren Gehörganges, wird in den Ausführungen von Rosowski [1994] ausführlich diskutiert. Die bisher bekannten Korrelationen wurden aber in erster Linie bei einigen Säugetierarten mit ähnlichen Ohrstrukturen festgestellt und daraus resultiert ein gewisses Unverständnis der genauen Beziehungen zwischen den Strukturmerkmalen von Außenohr und Hörfunktion [Rosowski, 1994]. Es gibt verschiedene Ansätze, diese Korrelationen zu erklären. Eine davon sind die „peripheren Filter-Hypothesen“, die postulieren, dass die akustischen und mechanischen Einschränkungen von Außen- und Mittelohr die Gestalt des Audiogramms bestimmen [Rosowski, 1991]. Mittels dieser Theorien kann z.B. der Kraftfluss durch das Ohr abgeschätzt werden. Diese Schätzungen des Kraftflusses sind für das Verständnis der Außen- und Mittelohrfunktionen und dem Vergleich dieser Funktionen zwischen den Arten brauchbar. Infolgedessen können Hörschwellkurven für eine Reihe von Säugerarten vorhergesagt werden [Rosowski, 1994].

Durch verhaltensbedingte Untersuchungen der Hörschwelle konnte der Einfluss der Ohrmuschel auf des Hörvermögen gezeigt werden. Untersuchungen an der Katze [Flynn & Elliott, 1965], am Chinchilla [Heffner et al., 1996] und am Frettchen [Parsons et al., 1999] zeigten, dass der Verlust der Ohrmuschel zu einer Verschlechterung der Hörfähigkeit bei bestimmten Frequenzen – insbesondere im höherfrequenten Bereich – führt.

Eine wichtige akustische Eigenschaft des Außenohres ist seine Richtcharakteristik, d.h. die selektive Verstärkung und Abschwächung verschiedener Frequenzen in Abhängigkeit von der Schallquellenposition [Heffner & Heffner, 1992]. Somit kommt dem Außenohr bei der Schalllokalisation eine große Bedeutung zu. Dies soll in den folgenden Abschnitten eingehender betrachtet werden.

## 2.2 Das Richtungshören

Säugetiere sind in der Lage, Schallereignisse hinsichtlich ihrer Richtung und Entfernung zu lokalisieren. Diese Fähigkeit wird als räumliches Hören bezeichnet [Hudde & Pössel, 1988]. Dazu liefern die am Trommelfell anliegenden Schallsignale (Ohrsignale) die wichtigsten Informationen. Außerdem werden noch weitere Parameter verarbeitet, wie Dreh-, Nick- und Kippbewegungen des Kopfes, optische Reize, der Knochenschall und Informationen des

Vestibularsinns [Thurlow et al., 1967; Blauert, 1974]. Das Richtungshören stellt nur einen Teilaspekt des räumlichen Hörens dar. Dabei wird die Auslenkung eines Hörereignisses in der Horizontal- und Vertikalebene betrachtet. Die Einschätzung der Entfernung eines Schallereignisses bleibt bei der Betrachtung des Richtungshörens unberücksichtigt. Es wurde schon früh erkannt, dass eine Umformung des einfallenden Schalls durch das Außenohr für seine Lokalisation notwendig ist, besonders in der Vertikalebene [Batteau, 1967]. Um den Prozess des Richtungshörens vollständig erfassen zu können, sind daher genaue Kenntnisse über die am Trommelfell anliegenden Ohrsignale notwendig [Blauert, 1974].

### 2.2.1 Grundprinzipien des Richtungshörens

Um die Richtung eines Schallereignisses durch das Gehör festzulegen, müssen die Ohrsignale Merkmale enthalten, die für den Schallquellenort kennzeichnend sind. Der Azimut (AZ) gibt den Auslenkungswinkel des Schallereignisses in der Horizontalebene an, die Elevation den Erhebungswinkel in der Vertikal- bzw. Medianebene. Es gibt richtungsabhängige Merkmale, für deren Wertung prinzipiell nur ein Ohr notwendig ist (monaurale Merkmale). Interaurale Merkmale beschreiben das Verhältnis bzw. den Unterschied zwischen beiden Ohrsignalen [Blauert, 1974]. Beim binauralem Hören, d.h. dem Hören mit zwei funktionierenden Ohren, erhält das Gehör in Abhängigkeit von Schallquellenrichtung sowohl binaurale Unterschiede wie interaurale Zeitdifferenzen (ITD) und Schalldruckpegeldifferenzen (ILD), als auch Änderungen der monauralen spektralen Merkmale des Ohrsignals. Dem Gehör stehen mit der Änderung von binauralen und monauralen Merkmalen zwei Methoden zur Richtungsbestimmung zur Verfügung.

Interaurale Zeitdifferenzen kommen durch das zeitlich verzögerte Eintreffen eines Signals an dem schallabgewandten Trommelfell zustande. Bei frontalem Schalleinfall trifft eine ebene Schallwelle gleichzeitig an beiden Trommelfellen ein. Bei schrägem Schalleinfall dagegen fällt eine ebene Schallwelle in Abhängigkeit von der Schalleinfallsrichtung auf eines der beiden Trommelfelle eher ein. Die Verzögerungszeit bis zum Eintreffen am zweiten Trommelfell (Laufzeitdifferenz) ist abhängig von der Differenz zwischen den Schallwegen zu den beiden Trommelfellen. Die maximale Wegdifferenz besteht bei seitlichem Schalleinfall in einem Winkel von  $90^\circ$ . Abb. 2-3 zeigt die Wegdifferenzen und Laufzeitdifferenzen in Abhängigkeit von der Schalleinfallsrichtung.

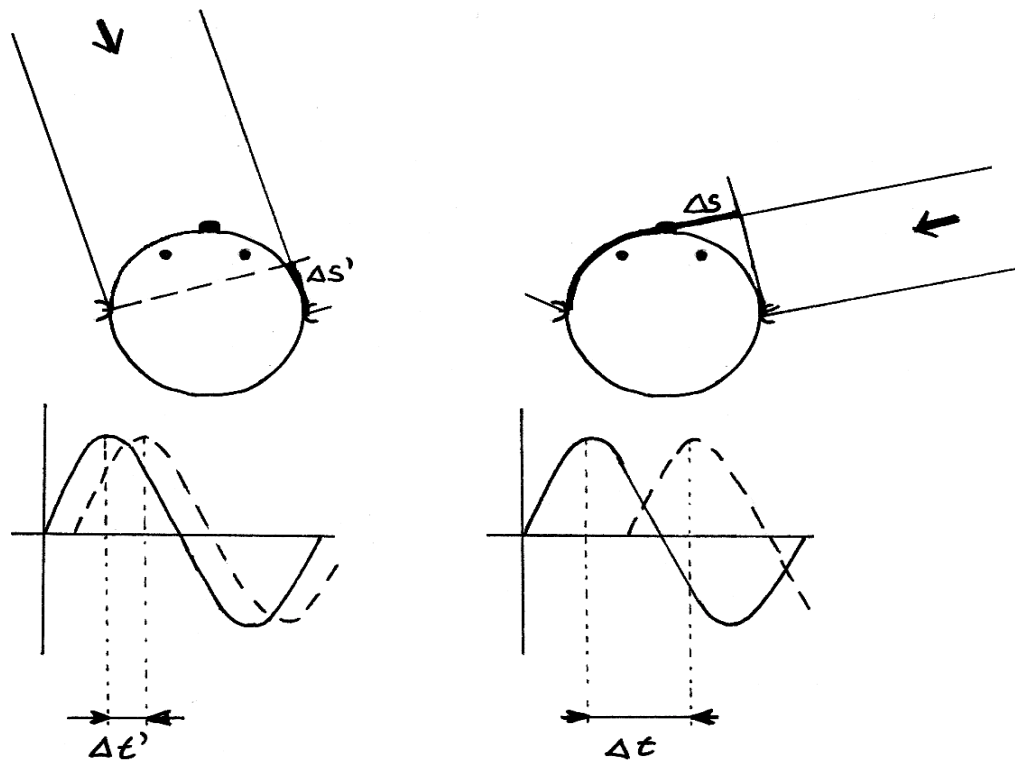


Abb. 2-3: Darstellung der Abhängigkeit der Wegdifferenzen ( $\Delta s$ ) und der Laufzeitdifferenzen ( $\Delta t$ ) von der Schalleinfallrichtung: Bei Schalleinfall aus dem seitlichen Bereich sind  $\Delta s$  und  $\Delta t$  größer als  $\Delta s'$  und  $\Delta t'$  bei frontalem Schalleinfall. Die Laufzeitdifferenzen führen zu einer entsprechenden Phasenverschiebung. (angelehnt an Abb. 1 und 2 aus Hudde & Pösselt, 1988)

Bei Kenntnis der Wegdifferenz  $\Delta s$  kann man die zugehörige Laufzeitdifferenz  $\Delta t$  gemäß der Formel  $\Delta t = \Delta s/c$  berechnen ( $c$  – Schallgeschwindigkeit). Untersuchungen am Menschen zur Fähigkeit, Zeitverzögerungen in einem Signal wahrzunehmen und zu differenzieren, belegen, dass sehr kurze Verzögerungszeiten von  $20 \mu s$  (das würde einer Wegdifferenz von ca. 7 mm entsprechen) detektierbar sind [Wright et al, 1974]. Damit ist das Gehör in der Lage, Laufzeitdifferenzen für das Richtungshören zu nutzen. Entsprechend der Laufzeitdifferenz kommt es zu einer interauralen Phasenverschiebung  $\varphi$  der beiden Ohrsignale. Die Beziehung zwischen Laufzeitdifferenz und Phasenverschiebung ist frequenzabhängig und lautet  $\varphi = 2\pi \cdot f \cdot \Delta t$  [Hudde & Pösselt, 1988]. Bei sinusförmigen Schallsignalen wird die Ankunftszeit einer bestimmten Phase (z.B. Amplitude der Sinuswelle) in den beiden Ohrsignalen verglichen. Es ist möglich, dass die Amplitude einer Sinuswelle das schallabgewandte Trommelfell erst erreicht, wenn am schallzugewandten Trommelfell schon die Amplitude einer weiteren Sinuswelle anliegt. Das nervale System kann dann nicht unterscheiden, ob die beiden Amplituden zu der gleichen Sinuswelle gehören oder ob die zeitliche Verzögerung so groß war, dass am schallzugewandten Trommelfell schon die nächste Sinuswelle anliegt.



Dadurch kann es bei der Bestimmung der Schalleinfallrichtung über binaurale Phasenunterschiede zu Zweideutigkeiten kommen. Bei Schalleinfall aus dem Azimut von  $90^\circ$  beginnen diese Zweideutigkeiten für Sinustöne dort, wo die Distanz zwischen beiden Ohren gleich  $\frac{1}{2}$  der Wellenlänge  $\lambda$  des Tones ist [Heffner & Heffner, 1992].

Die physikalische Beschränkung der Nutzung von Laufzeitdifferenzen für die Richtungsbestimmung ist von der Frequenz, dem Kopfdurchmesser und dem Azimut abhängig. Bei Tieren mit einem kleinen Kopf oder bei geringen Auslenkungen der Schallquelle aus der frontalen Position können höhere Frequenzen für die Schalllokalisierung genutzt werden. In gegenteiligen Situationen sind nur tieffrequente Signale nützlich [Heffner & Heffner, 1992; Brown, 1994]. Für einen Hund mit einem Kopfradius von 47,5 mm liegt die Frequenz der Phasenzweideutigkeit beim Azimut von  $90^\circ$  bei 1,21 kHz, während sie beim Azimut von  $30^\circ$  bei 2,41 kHz liegt [aus Tab. 31.1 von Heffner & Heffner, 1992]. Die Richtungsbestimmung von Signalen mittels Laufzeitdifferenzen kann somit beim Fehlen von tieffrequenten Anteilen zu Fehlinterpretationen führen.

Durch die physikalische Beeinflussung des Schalles durch den Kopf und den Körper sowie durch die Bestandteile des Außenohres (Abschattung und Beugungsmechanismen) ist der Schalldruck in Abhängigkeit von der Schalleinfallrichtung an beiden Trommelfellen unterschiedlich. Diese Unterschiede werden als interaurale Schallpegeldifferenzen bezeichnet. Durch die alleinige Änderung der interauralen Pegeldifferenz lässt sich ebenfalls eine seitliche Auslenkung des Ortes des Hörereignisses erzielen [Brunzlow, 1925]. Interaurale Pegeldifferenzen sind im niederfrequenten Bereich gering, wobei sie ab Frequenzen über 1 kHz deutlich ansteigen [Harrison & Downey, 1970; Shaw, 1974b]. Ein Körper beeinflusst ein Schallfeld um so stärker, je größer er im Vergleich zur Wellenlänge des Schallsignals ist. Ein Ton mit einer Frequenz von 1000 Hz besitzt eine Wellenlänge von 34 cm, dagegen hat ein 3000 Hz-Ton eine Wellenlänge von 11 cm. Höhere Frequenzen werden daher stärker durch Kopf und Außenohr beeinflusst und so können interaurale Pegeldifferenzen erst im höheren Frequenzbereich stärker ausgeprägt werden. Die Nutzung von interauralen Pegeldifferenzen für die Schalllokalisierung ist für komplexen Schall mit hohen Frequenzen sehr zuverlässig, besonders wenn es sich um einen breitbandigen Stimulus handelt [Heffner & Heffner, 1992; Brown, 1994]. Es lässt sich also sagen, dass sich interaurale Zeit- und Pegeldifferenzen auf den Ort des Hörereignisses in der Horizontalebene in gleicher Weise auswirken [Blauert, 1974]. Die relative Bedeutung der beiden interauralen Merkmalsklassen bei der Ortsbestimmung hängt unter anderem stark von der Art des Schallsignals ab

(Frequenzanteile, Lautstärke). Es ist weiterhin möglich, dass bei einigen Säugetieren in Abhängigkeit von ihrer Kopfgröße sowie ihrer Morphologie und Größe der Ohrmuschel die Wichtigkeit eines der Auswertmechanismen deutlich höher ist als der andere [Heffner & Heffner, 1992]. Im allgemeinen kann man die Schalllokalisation als ein Doppelwahrnehmungssystem (duplex perceptual system) betrachten [Brown, 1994]. Untersuchungen, welches der interauralen Merkmale (Zeitdifferenz oder Pegeldifferenz) bei der Bestimmung der Schalleinfallrichtung vorherrschend bewertet wird, können durch die Konstanthaltung eines Merkmales und die Veränderung des anderen und sein Einfluss auf die seitliche Auslenkung des Hörereignisses realisiert werden [Blauert, 1974; Wightman & Kistler, 1992]. In früheren Untersuchungen waren nach Meinung vieler Autoren die interauralen Zeitdifferenzen das wesentlichste Merkmal der Ohrsignale für die Bestimmung des Azimuts. Experimente zeigten, dass Signale mit Frequenzanteilen unterhalb 1,6 kHz durch die zeitliche Verschiebung der Trägerschwingung zu einer seitlichen Auslenkung des Hörereignisses führen. Bei höherfrequenten Signalen wird dagegen die interaurale zeitliche Verschiebung der Signalhüllkurven (Envelopen) bewertet. Brunzlow`s Untersuchungen [1925] zeigten dagegen auch den Einfluss der interauralen Pegeldifferenz auf die seitliche Auslenkung des Hörereignisses. Spätere Untersuchungen wiesen dabei auf eine starke Frequenzabhängigkeit der Pegeldifferenzen der Ohrsignale hin. Im niederfrequenten Bereich wiesen Ohrsignale des Menschen bei 500 Hz interaurale Pegeldifferenzen von maximal 6 dB und bei 1 kHz maximal 10 dB auf. Ab Frequenzen über 1 kHz stiegen die interauralen Pegeldifferenzen deutlich an (bei 7 kHz bis zu 20 dB, bei 12 kHz sogar bis zu 24 dB) [Shaw, 1974b]. Die seitliche Auslenkung wird daher bei tieffrequenten Signalen ohne Frequenzanteile oberhalb 1,6 kHz offenbar durch sein "time-image" bestimmt, d.h. die interaurale zeitliche Verschiebung seiner Trägerschwingung der Ohrsignale wird ausgewertet. Bei Signalen mit Anteilen oberhalb 1,6 kHz dominiert ein zweiter Auswertmechanismus, der das "intensity-image" des Signals berücksichtigt. Hier steht die Auswertung interauraler Schalldruckpegeldifferenzen und interauraler zeitlicher Hüllkurvenverschiebungen im Vordergrund [Blauert, 1974]. Blauert [1974] folgerte daraus, dass interaurale Schalldruckpegeldifferenzen und Hüllkurvenverschiebungen die wesentlichen interauralen Merkmale sind, da natürliche Schallsignale meistens spektrale Anteile oberhalb 1,6 kHz enthalten. Bei der Bestimmung der Schalleinfallrichtung in der Horizontalebene unter Nutzung von Breitbandstimuli ergaben Experimente von Wightman & Kistler [1992], dass interaurale Zeitdifferenzen aber einen viel größeren signifikanten Beitrag für die Richtungsbestimmung liefern als interaurale Pegeldifferenzen. Diese Dominanz kann

allerdings nur geltend gemacht werden, so lange tiefe Frequenzen im Signal enthalten sind. Signale, die keine Frequenzen unter 5 kHz enthielten, wurden ausschließlich über interaurale Pegeldifferenzen lokalisiert. Signale mit Frequenzanteilen ab 500 Hz wurden immer über interaurale Zeitdifferenzen lokalisiert, Signale mit Anteilen ab 1 kHz i.d.R. über interaurale Zeitdifferenzen. Trotz der sekundären Rolle der interauralen Intensitätsdifferenz bei Stimuli mit niederfrequenten Anteilen, darf man ihren Beitrag nicht außer acht lassen. Erst die Verbindung von allen verfügbaren Schlüsseln führt zu einer noch genaueren Lokalisation [Wightman & Kistler, 1992].

Die dritte Möglichkeit Informationen über die Richtung der Schallquelle zu erlangen, ist die Nutzung von monauralen spektralen Merkmalen. Infolge der Richtcharakteristik des Außenohres kommt es zu richtungsabhängigen Variationen im Spektrum eines Stimulus. In Situationen, wo binaurale Unterschiede fehlen oder begrenzt sind, muss das Gehör Änderungen der monauralen Merkmale der Ohrsignale in Abhängigkeit vom Schalleinfallswinkel auswerten können. Dies konnte in einer Reihe von Untersuchungen beim Menschen gezeigt werden [Blauert, 1969/1970; Damaske, 1969/1970; Gardner & Gardner, 1973; Hebrank & Wright, 1974b; Musicant & Butler, 1984]. Für die Nutzung von monauralen spektralen Merkmalen zur Schalllokalisierung sind allerdings hohe Frequenzen im Signal notwendig [Heffner & Heffner, 1992].

### 2.2.2 Richtcharakteristik des Außenohres

Durch die physikalische Beeinflussung des Schalles durch die Bestandteile des Außenohres sowie durch den Kopf und den Körper kommt es zu einer Deformation der Schallwelle, d.h. dem einfallenden Schall wird eine lineare Verzerrung in Abhängigkeit von Schalleinfallsrichtung aufgeprägt. Dadurch werden räumliche Informationen in spektrale Informationen kodiert. Das Hörorgan ist dann wiederum in der Lage, diese spektralen Informationen zu dekodieren. Es kommt zur räumlichen Wahrnehmung eines Schallereignisses [Blauert, 1974; Blauert, 1997]. Die in den Ohrsignalen enthaltenen spektralen Veränderungen können durch Übertragungsfunktionen beschrieben werden. In der Literatur werden die Außenohrübertragungsfunktionen heute meist als "head-related transfer functions (HRTF) bezeichnet. Durch physikalische Phänomene wie Reflexion, Abschattung, Streuung, Beugung, Interferenz und Resonanz kommt die akustische Wirksamkeit des Außenohres zum tragen [Shaw, 1974a; Blauert, 1974]. Es gibt zwei wesentliche Ansätze, die Funktion der Ohrmuschel zu erklären, nämlich im Zeit- und Frequenzbereich. Batteau [1967]

betrachtet die Interferenzen zwischen direktem und dem an den hervortretenden Erhabenheiten der Ohrmuschel reflektierten Schall. In Abhängigkeit von der Schalleinfallrichtung kommt es zu wechselnden Wegunterschieden und damit Zeitunterschieden zwischen direktem und reflektiertem Schall, die für die Bestimmung der Schalleinfallrichtung genutzt werden können. Er betrachtet die Ohrmuschel als ein kontinuierliches Reflexions- und Verzögerungssystem, wobei die vollständige Umformung des Schalls durch die Summe von allen Verzögerungsgliedern infolge der Geometrie der Ohrmuschel gegeben ist. Um Batteau's Hypothese zu überprüfen, untersuchten Wright et al. [1974] die menschliche Fähigkeit, Zeitverzögerungen in einem Signal wahrzunehmen und zu differenzieren. Die Ergebnisse zeigten, dass sehr kurze Verzögerungszeiten von 20  $\mu$ s detektierbar sind. Das würde einem Wegunterschied zwischen direktem und reflektierten Schall von ca. 7 mm entsprechen, der sehr wohl durch die Strukturen des Außenohres hervorgerufen werden kann. Der andere Ansatz besteht in der Untersuchung der Schallvorgänge in der Ohrmuschel im Frequenzbereich. Ein Vergleich der Schallwellenlänge mit den Abmessungen der verschiedenen anatomischen Strukturen des Außenohres (z.B. Gehörgangslänge, Conchadurchmesser) ermöglicht es, die verschiedenen Beiträge des akustischen Druckgewinns diesen Strukturen zuzuordnen und damit auch eine frequenzabhängige Schalldruckumformung darzulegen [Shaw, 1974a]. Oberkörper, Schulter, Kopf, Ohrmuschel mit Cavum conchae, Ohrkanal und Trommelfell stellen also einzelne Teilsysteme dar. Durch die komplexe Überlagerung der durch sie hervorgerufenen Resonanzen, Reflexions- und Beugungswellen resultiert die Außenohrübertragungsfunktion [Genuit, 1984]. Durch die Arbeit mit menschlichen plastischen Ohrmodellen, die in ihrem akustischen Verhalten gut mit den natürlichen Verhältnissen übereinstimmen, konnten eine Reihe von diesen Eigenresonanzen des Ohrmuschel-Gehörgangssystems des Menschen nachgewiesen werden. Diese Eigenresonanzen stellen sich in Form von Maxima in den Übertragungsfunktionen dar [Shaw & Teranishi, 1968; Blauert, 1974]. Man kann das Außenohr vereinfacht als ein akustisches Resonatorsystem betrachten, wobei die Erregbarkeit der einzelnen Eigenresonanzen des Systems von der Richtung der Schallquelle abhängt [Blauert, 1974]. Der Gehörgang stellt zwar ebenfalls einen Resonator dar; sein Beitrag an der Gesamtübertragungsfunktion des Außenohres wird aber nicht von der Richtung bestimmt. Die Übertragungsfunktion des Außenohres enthält demzufolge richtungsabhängige als auch richtungsunabhängige Anteile, je nach dem durch welchen Bestandteile des Außenohres sie gebildet werden [Wiener & Ross, 1946; Genuit, 1984; Hudde & Pösselt, 1988]. Nennenswerte lineare Verzerrungen beim Menschen auf Grund der anatomischen

Abmessungen verursacht der Kopf für Frequenzen ab etwa 500 Hz, die Ohrmuscheln ab etwa 1500 Hz und der Gehörkanal mit angekoppelter Ohrmuschel ab etwas 3000 Hz [Blauert, 1985]. Genuit [1984] untersuchte den Einfluss der einzelnen Teilsysteme auf die HRTF des Menschen. Er konnte eine Richtungsabhängigkeit für Oberkörper, Schulter, Kopf und Teile der Ohrmuschel nachweisen. Der Einfluss des Oberkörpers und der Schulter erstreckt sich auf den Frequenzbereich von ca. 150 Hz bis 3 kHz in einer Größenordnung von +3 dB bis -6 dB. Der Kopf bestimmt die Übertragungsfunktion maßgeblich ab etwa 500 Hz über einen breiten Frequenzbereich. Die Ohrmuschel erzeugt um 8 kHz bei frontalem Schalleinfall ein erstes Minimum im Spektralbereich auf Grund von Reflexionen am inneren Rand des Cavum conchae. Das Cavum conchae und der Ohrkanal wiesen eine Richtungsunabhängigkeit auf. Eine vom Cavum conchae erzeugte Grundresonanz bestimmt demnach einen breiten Anhebungsbereich im Spektralbereich von 2 kHz bis 5 kHz. Der äußere Gehörgang verursacht auf Grund seiner Resonanzeigenschaften Maxima im Spektralbereich um 2,5 kHz, 7 kHz und 14,5 kHz sowie Minima um 3,2 kHz, 10 kHz und 18 kHz.

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass durch die Passage des Schalls durch das Außenohr ein Ohrsignal entsteht, das monaurale Merkmale enthält, die für den Schallquellenort kennzeichnend sind und für die Festlegung des Hörereignisortes durch das Gehör genutzt werden [Blauert, 1974].

### 2.2.3 Rolle des Außenohres beim Richtungshören in der Vertikalebene

Interaurale Unterschiede liefern in der Horizontalebene wichtige Informationen für die Schalllokalisierung. Es gibt aber auch Situationen, in denen binaurale Merkmale nur eine geringe Verwendung finden. Das ist vor allem in der Vorn/Hinten-Diskrimination der Fall, bei der binaurale Differenzen nur gering ausgeprägt sind. Ein weiterer Spezialfall stellt das Hören in der Vertikalebene dar, bei der eine Schallquelle in der Medianebene der Kopfes ansteigt oder abfällt. Hier liegen im Idealfall an beiden Ohren fast identische Ohrsignale an. Allerdings gibt es durch geringe Asymmetrien des Kopfes und kleine geometrische Unterschiede in der Gestalt der Außenohre auch in der Vertikalebene binaurale Ungleichheiten, die für die Lokalisation in der vertikalen Ebene wichtig sind [Searle et al., 1975]. Nichtsdestotrotz spielen monaurale spektrale Merkmale in der vertikalen Lokalisation eine essentielle Rolle [Blauert, 1985; Heffner & Heffner, 1992; Heffner et al., 1995]. Schon in früheren Hörversuchen gaben Versuchspersonen an, dass sie Klangunterschiede bei der Bestimmung der Schalleinfallrichtung „vorn – hinten“ nutzten [Damaske & Wagener, 1969].

Für Frequenzen über 4 kHz ist das Außenohr für die Identifizierung der Lage der Schallquelle im vorderen oder hinteren Bereich verantwortlich. Wird das Außenohr teilweise verschlossen, kommt es zu einem dramatischen Anstieg der Vorn/Hinten-Verwechslungen [Musicant & Butler, 1984]. Frettchen ohne äußere Ohrmuschel waren im Vergleich zu normalen Frettchen bei der Rechts/Links-Bestimmung gleich gut. Dagegen machten sie im vorderen und hinteren Bereich größere Lokalisationsfehler und die Vorn/Hinten-Verwechslungen nahmen zu [Parsons et al., 1999].

Für die Unterscheidung der Schalleinfallrichtungen in der Vertikalebene ist speziell die Ohrmuschel von besonderer Bedeutung [Genuit, 1984]. Durch Verschließung der Hohlräume der Ohrmuschel kam es zu einer Verschlechterung der Lokalisationsfähigkeit in der Vertikalebene. In Abhängigkeit von den Abstufungen der Reduktion der Hohlräume stieg mit immer weiterer Verringerung des Reliefs der Ohrmuschel der Fehler bei der Bestimmung der Schalleinfallrichtung an. Somit stellt das Relief der Ohrmuschel, d.h. alle Erhabenheiten und Höhlungen, für die Lokalisation des Schalles in der Medianebene eine wichtige Bedeutung dar [Gardner & Gardner, 1973]. Hebrank & Wright [1974b] stellten die Hypothese auf, dass durch Reflexionen des Schalls vom Rand der Concha und durch Interferenzen mit dem direkt in den äußeren Gehörgang einfallenden Schall ein Schlüssel für das Richtungshören in der frontalen Vertikalebene generiert wird. Das Prinzip entspricht dem von Batteau [1967] postulierten Reflexions- und Verzögerungssystem innerhalb der Ohrmuschel. Hebrank & Wright [1974b] und Rodgers [1981] zeigten durch Übereinstimmung von mathematisch vorhergesagten Abschwächungen in Form von engen Einbrüchen und physikalisch nachgemessenen, dass die Wegunterschiede und damit die Zeitunterschiede zwischen direktem und reflektiertem Schall Einbrüche produzieren, die für die Bestimmung der Schalleinfallrichtung genutzt werden können. Die Ohrmuschel wirkt demnach wie ein winkelabhängiger Kammfilter auf den einfallenden Schall und verursacht Reflexionen, die sich in der Frequenzdomäne als spektrale Anhebungen oder Einbrüche manifestieren [Rodgers, 1981]. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass bei Breitbandsignalen, d.h. Signalen mit Anteilen über einen breiten Frequenzbereich, die häufigste Richtungskoinzidenz von Schallquelle und Hörereignis besteht, was auf den höheren Informationsgehalt über den Schallquellenort im breitbandigen Ohrsignal zurück zu führen ist [Gardner & Gardner, 1973; Blauert, 1974]. Erst wenn die morphologischen Strukturen des Außenohres Ausmaße in der Größenordnung der Wellenlänge des Signals erreichen, kommt es zu Wechselwirkung zwischen Signalanteilen und Außenohr und zur Ausbildung der monauralen Merkmale im

Ohrsignal [Shaw, 1974a]. Schmalbandsignale enthalten keinerlei vom Gehör auswertbare Informationen über die vertikale Schalleinfallrichtung. Die Hörereignisrichtung wird nur auf Grund der Frequenz der Ohrsignale gebildet. Es kommt zur Ausbildung von sogenannten "richtungsbestimmenden Frequenzbändern". Diese korrespondieren beim Richtungshören in der Medianebene mit Anhebungsbereichen des Schalldruckpegels (ermittelt aus physikalischen Messungen der HRTF) bei unterschiedlichen Schalleinfallrichtungen. Eine Vorwärtsrichtung beim Menschen wird durch richtungsbestimmende Frequenzbänder bzw. durch Anhebungsbereiche in der HRTF im Frequenzbereich von 125 Hz bis 500 Hz und 3 kHz bis 6 kHz hervorgerufen; Signale bei ca. 8 kHz werden häufiger von oben gehört, Signale zwischen 600 Hz und 2000 Hz und zwischen 11 kHz und 13 kHz häufiger von hinten [Blauert, 1969/1970]. Hebrank & Wright [1974b] gehen davon aus, dass der spektrale Schlüssel für die Richtungsbestimmung durch eine Kombination von einfachen Merkmalen, wie spektralen Gipfeln und Einbrüchen, decodiert wird. Ein 1/4-oktavbreiter Gipfel zwischen 7 kHz und 9 kHz ist der Schlüssel für die Lokalisation von oben; für die Lokalisation von Schall von hinten ist ein schmaler Gipfel zwischen 10 kHz und 12 kHz mit einem Energieabfall vor und hinter diesem Gipfel notwendig. Diese Ergebnisse stimmen mit den von Blauert beschriebenen richtungsbestimmenden Bändern überein. Die Vorwärtsrichtung wird durch einen oktavbreiten Einbruch zwischen 4 kHz und 8 kHz und einer Anhebung oberhalb 13 kHz charakterisiert. Das Ansteigen der Elevation im frontalen Bereich wird durch das Ansteigen der ein oktavbreiten Einbruchsfrequenz von 5 kHz bis 11 kHz signalisiert. Auf Grund der Auswertung von diesen monauralen Merkmalen ist für das eindeutige Richtungshören in der Vertikalebene ein Frequenzbereich von 4 kHz bis 16 kHz im Signal notwendig [Hebrank & Wright, 1974b].

Beim Hören stehen den Subjekten für gewöhnlich zwei funktionsfähige Ohren zur Verfügung. Die Frage, die sich hier aufdrängt, ist, ob zwei Ohren für die Schalllokalisierung in der Medianebene notwendig sind. Dazu führten Hebrank & Wright [1974a] Untersuchungen durch. Die Ergebnisse zeigten, dass durch binaurale Lokalisation, d.h. dem zeitgleichen Vorhandensein von sowohl rechtem als auch linkem monauralen Ohrsignal, eine Verbesserung der korrekten Antworten erzielt werden kann. Zurückzuführen ist dies wahrscheinlich auf Grund der zusätzlichen Informationen infolge von asymmetrischen Ohrmuscheln und der für die Versuchspersonen ungewohnten monauralen Schalldarbietung. Allerdings haben sowohl monaural als auch binaural hörende Subjekte ähnliche Schwierigkeiten bei der Lokalisation von unbekanntem Schall. Bemerkenswert ist außerdem,

dass nach einem schnellen "monauralen" Training der Versuchspersonen die gleiche Genauigkeit bei der monauralen Lokalisation in der Medianebene erreicht wurde, wie beim normalen Hören mit zwei Ohren. Das impliziert, dass zwei Ohren keinen Vorteil bei der Lokalisation von spektral unbekanntem Schall in der Vertikalebene anbieten [Hebrank & Wright, 1974a].

#### 2.2.4 Rolle des Außenohres beim Richtungshören in der Horizontalebene

Beim binauralem Hören in der Horizontalebene erhält das Gehör in Abhängigkeit von Schallquellenrichtung und Schallquellenentfernung interaurale Laufzeitdifferenzen und interaurale Schalldruckpegeldifferenzen, aber auch Änderungen der monauralen Merkmale des Ohrsignals. Allerdings räumt man der Nutzung von interauralen Merkmalen korrespondierender Spektralanteile beider Ohrsignalen bei der Bestimmung der seitlichen Auslenkung eine größere Rolle ein. Hingegen kann durch monaurale Merkmale (pinnae-based spectral cues) die Genauigkeit der Schallortung verbessert werden. Unterbindet man die Ausbildung von monauralen Merkmalen durch Verschließung der Ohrmuschelhöhlungen, verschlechtert sich die Ortungsgenauigkeit eines Signals innerhalb des selben Quadranten in Bezug zum normalen binauralen Hören. Des weiteren dienen die monauralen Merkmale der Erkennung, ob ein Signal vom vorderen oder hinteren Quadranten in der Horizontalebene einfällt [Musicant & Butler, 1984]. Somit spielen auch monaurale spektrale Merkmale eine wichtige Rolle in der horizontalen Lokalisation [Heffner & Heffner, 1992]. Auch beim Elefanten zeigte sich die Wichtigkeit der Ohrmuschel beim Richtungshören in der Horizontalebene. Während ein Elefant bei der Bestimmung der absoluten Hörschwelle und bei Frequenzdiskriminationsexperimenten nie seine Ohrmuscheln bewegte, dehnte das Tier während Lokalisationstests bei Schalleinfall aus der Horizontalebene von  $0^\circ$  bis  $60^\circ$  seine Ohrmuschel beinahe senkrecht zu seinem Kopf aus. In einer Versuchssitzung zur Schalllokalisierung erweiterte das Tier zu Beginn seine Ohrmuscheln nicht. Er macht dabei deutlich mehr Fehler als sonst. Nachdem das Tier seine Ohrmuscheln wieder ausrichtete, stiegen seine Leistungen deutlich an [Heffner et al., 1982].

In psychoakustischen Untersuchungen beim Menschen wird die beste Lokalisation bei frontalem Schalleinfall und einem breitbandigen Stimulus beobachtet [Musicant & Butler, 1984; Chandler & Grantham, 1992; Abel et al. 2000]. Schon Brunzlow [1925] betonte, dass Geräusche leichter zu lokalisieren sind als einfache Töne. Heffner & Heffner [1992] geben im Azimut von  $0^\circ$  einen Auflösungsinkel ca.  $1,3^\circ$  für den Menschen an. Katzen konnten bei



Schalleinfall aus dem Azimut von  $0^\circ$  bis  $10^\circ$  eine Winkeländerung von  $4,1^\circ$  detektieren [Huang & May, 1996b]. Beim Frettchen war die Bestimmung des minimalen hörbaren Winkel (MAA) im Azimut vor allem von der Dauer des Signals abhängig, da dann eine Kopfbewegung in Richtung der Schallquelle erfolgen konnte. Beim Azimut von  $0^\circ$  betrug der MAA eines 500 ms langen Signals  $10^\circ \pm 5^\circ$  und beim Azimut von  $45^\circ$   $18^\circ \pm 10^\circ$  [Parsons et al., 1999].

### 2.2.5 Die akustischen Übertragungsfunktionen des Außenohres

Die besprochenen Veränderungen des Schallsignals können vollständig durch die zugehörigen Übertragungsfunktionen (im Frequenzbereich) des Außenohres oder durch die Impulsantwort des Systems (im Zeitbereich) beschrieben werden [Blauert, 1997]. Die frequenzabhängige Richtcharakteristik des Außenohres ist auf Grund ihrer Abhängigkeit von den anatomischen Abmessungen des Außenohres artspezifisch. Blauert [1974] definierte für das Außenohr drei gebräuchliche Übertragungsfunktionen:

1. Die Freifeldübertragungsfunktion (Freifeld-ÜF) des äußeren Ohres gibt das Verhältnis zwischen dem Schalldruck an einem Messpunkt im Gehörgang der Versuchsperson (vorzugsweise am Trommelfell) und demjenigen Schalldruck an, den man bei gleicher Schallquellenanordnung am Ort des Kopfmittelpunktes ohne Anwesenheit der Versuchsperson mißt.
2. Die monaurale Übertragungsfunktion (monaurale ÜF) des äußeren Ohres gibt das Verhältnis zwischen dem Schalldruck an einem Messpunkt im Gehörgang bei einer beliebigen Schalleinfallrichtung und Schallquellenentfernung, und dem Schalldruck am gleichen Messpunkt bei Schalleinfall von einer Bezugsschallquelle in einer Bezugsrichtung und Bezugsentfernung an (in der Regel kommt der Bezugsschall aus  $AZ=0^\circ$  und  $EL=0^\circ$ ).
3. Die interaurale Übertragungsfunktion (interaurale ÜF) ist das Verhältnis der Schalldrücke in den beiden Gehörgängen an einem vergleichbaren Messpunkt (der Bezugsschalldruck ist der am schallzugewandtem Ohr gemessenen Schalldruck).

Mittels dieser drei Außenohrübertragungsfunktionen können verschiedene Informationen zum Verständnis des Richtungshörens gewonnen werden. Die Freifeldübertragungsfunktion beschreibt die Umformung eines Schallsignals bei seiner Passage durch das Außenohr. Dadurch können Aussagen über lineare Verzerrungen, die das Außenohr dem einfallenden Schall aufprägt, getroffen werden, d.h. welche Frequenzen werden durch das Außenohr

verstärkt, welche Frequenzen werden abgeschwächt. Die Abhängigkeit spektraler Merkmale im Ohrsignal von der Schalleinfallrichtung werden besser durch die monaurale Übertragungsfunktion beschrieben. Bei der Bestimmung des Ortes des Hörereignisses wertet das Hörorgan die Änderungen spektraler Merkmale im Ohrsignal aus, hervorgerufen durch Richtungsänderungen des einfallenden Schalls. Je nach Schalleinfallrichtung erfolgt die Umformung in Beziehung zu einem Bezugssignal in einem anderen Verhältnis. Die monaurale Übertragungsfunktion gibt über dieses sich verändernde Verhältnis Auskunft. Beim binauralen Hören, speziell beim Hören in der Horizontalebene, stehen dem Gehör interaurale Pegeldifferenzen für die Richtungsbestimmung zur Verfügung, die durch die interaurale Übertragungsfunktion beschrieben werden. In Abhängigkeit von der Frequenz werden die richtungsabhängigen Änderungen des Verhältnisses der Schalldrücke angegeben. Somit tragen die Erkenntnisse aus der interauralen Übertragungsfunktion zum Verständnis des Richtungshörens in der Horizontalebene bei.

Die Erfassung der Übertragungsfunktionen erfolgt durch Messungen des Schalldrucks an verschiedenen Stellen in Außen- und Mittelohr mittels Sonden- oder Miniaturmikrofonen. Die Messungen können je nach Versuchsanordnung an wachen, narkotisierten oder toten Versuchssubjekten durchgeführt werden. Als erstes führten Wiener und Ross [1946] solche Messungen bei Menschen durch. Durch detaillierte anatomische Erfassung des Aufbaus von Außen- und Mittelohr können diese Untersuchungen auch an plastischen und mathematischen Modellen [Genuit, 1984] stattfinden. Eine der ersten plastischen Modelle zur Messung der menschlichen Außenohrübertragungsfunktion und speziell zur Darstellung der Resonanzräume in der Ohrmuschel wurden von Shaw & Teranishi [1968] entwickelt. Dabei wurden die anatomischen Verhältnisse und Abmessungen des menschlichen Außenohres nachempfunden. Die am Modell gemessenen Übertragungsfunktionen zeigen bis 6 kHz eine gute Übereinstimmung mit durchschnittlichen Kurven von menschlichen Versuchspersonen. Durch die weitere Entwicklung von künstlichen Ohrmodellen und des Kunstkopfes ist eine immer bessere Anpassung auch im hochfrequenten Bereich möglich [Kleiner, 1978]. Die Messungen werden in der Regel in reflexionsarmen Räumen durchgeführt. Es gibt verschiedenste Messverfahren, die sich hinsichtlich des Einsatzes der Stimulusart und -dauer (z.B. Impuls-Methode, FFT-Analysatoren, MLSSA), des Versuchsaufbaus und der Messtechnik, des Mittelungsverfahrens usw. unterscheiden. Eine gängige Art der Berechnung der Frequenzspektren bei Bestimmung der Übertragungsfunktionen ist heute die Nutzung der Fast Fourier Transformation (FFT). Dies stellt einen Rechenalgorithmus zur schnellen

Bestimmung der spektralen Zusammensetzung eines digitalen Zeitsignals dar. Im Anhang I werden weiterführende Betrachtungen zur FFT-Analyse und ihren Parametern aufgeführt.

Untersuchungen der Außenohrübertragungsfunktion beim Menschen liegen unter den verschiedensten experimentellen Bedingungen vor. Dabei wurden Untersuchungen sowohl an Versuchspersonen [z.B. Wiener & Ross, 1946; Blauert, 1969/70; Shaw, 1974b; Genuit, 1984; Middlebrooks, 1999] als auch an plastischen [Shaw & Teranishi, 1968; Bauer & Rosenheck., 1967; Damaske & Wagener, 1969; Damaske, 1969/70; Hudde & Schröter, 1980] und mathematischen Ohrmodellen [ Genuit, 1984; Stinson & Khanna, 1989] durchgeführt. Der Erkenntnisstand über die Außenohrübertragungsfunktion bei Säugetiere ist dagegen geringer und beschränkt sich größtenteils auf Untersuchungen bei typischen kleinen Labortieren, z.B. Maus [Chen et al., 1995], Chinchilla [Von Bismark & Pfeiffer, 1967; Drescher & Eldredge, 1974], Kaninchen [Fattu, 1969], Meerschweinchen [Benson & Eldrege, 1955], Frettchen [Parsons et al., 1999] und Rhesus Affe [Spezio et al., 2000]. Die Katze ist eines der am besten untersuchten Säugetiere [z.B. Wiener et al., 1966; Tonndorf & Khanna, 1966; Moore & Irvine, 1979; Musicant et al. 1990; Rice et al. 1992; Xu & Middlebrooks, 2000]. Auch an Fledermäusen wurden umfangreiche Untersuchungen zu Außenohrübertragungsfunktionen durchgeführt [z.B. Coles et al., 1989; Guppy & Coles, 1988; Obrist et al., 1993; Fuzessery, 1996]

### 2.3 Hörleistungen des Haushundes

Durch audiometrische Untersuchungsmethoden kann die Hörfähigkeit eines Tieres bestimmt werden. Psychoakustische Methoden basieren auf dem Verhalten eines Tieres in Antwort auf einen Schallstimulus unter natürlichen Umweltbedingungen oder künstlichen Bedingungen im Labor. Die Beobachtungen des Verhaltens des Untersuchungsobjektes auf den Stimulus werden in Form eines Audiogramms dargelegt [Rose, 1977b]. Die Bestimmung von Hörschwellen erfolgt mittels Konditionierungstests (operante Konditionierung auf Futter oder Wasser oder Schockvermeidungskonditionierung). Dabei wird das Tier zuerst dressiert, auf jeden Ton zu antworten. Danach wird die Intensität einer vorgegebenen Testfrequenz in kleinen Schritten bis zur Annäherung an die Hörschwelle und darunter reduziert. Bei hohen Intensitäten reagiert das Tier bei jedem Test; nähert man sich der Schwelle, reagiert es manchmal, aber nicht immer; bei einer weiteren Absenkung zeigt es keine Anzeichen des Hörens mehr. Als Schwelle gibt man den Bereich an, in dem das Tier in 50 % der Tests auf das Signal reagiert hat [Lipman & Grassi, 1942].

Das Hören kann ebenfalls durch die Verwendung von elektrodiagnostischen Prozeduren untersucht werden. Die Messung von auditorisch evozierten Potentialen, einer dieser nicht-invasiven Tests, bewertet den Anteil von peripheren und zentralen auditorischen Komponenten, wie Teile des Außen-, Mittel- und Innenohres, craniale Nerven und selektive Gebiete des Hirnstammes und des Cortex, an der Hörfähigkeit. Hörschwellen, die durch auditorisch evozierte Potentiale ermittelt werden (z.B. BAER-Schwelle) sind allerdings nicht die gleichen wie die psychophysikalisch gewonnenen Schwellen. Für die Absicht eines Vergleichs zwischen verschiedenen Hunden liefert die BAER-Schwelle aber stichhaltige Informationen [Kay et al., 1984]. Die Objektivität und die Vielzahl der elektrophysiologischen Methoden deuten auf ihre große Bedeutung bei der Untersuchung von Hörprozessen und Hörphänomenen auch in der Veterinärmedizin hin. Sie stellen eine diagnostische Untersuchungsmethode bei Hörbeeinträchtigungen dar und dienen dem Überprüfen von akustischen Schutzreflexen.

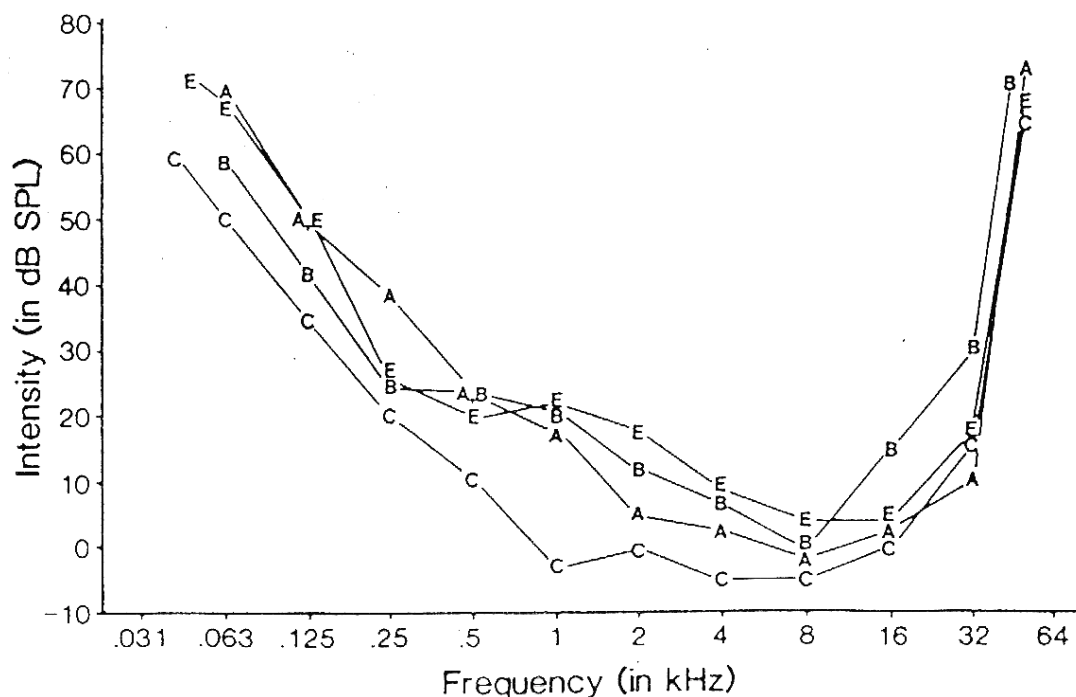


Abb. 2-4: Audiogramm von vier Hunden (A, Chihuahua; B, Dachshund; C, Pudel; E, Saint Bernard): aus Heffner, 1983, Abb. 3

Rose [1977a] gibt für den Hund einen Hörbereich von 15 Hz bis 50 kHz an. Haushunde variieren sehr in ihrer Größe. Trotzdem zeigten Audiogramme von verschieden großen Hunden nur geringe Variationen (Abb. 2-4). Die Audiogramme zeigen ein stufenweises Ansteigen der Sensitivität beginnend bei der tiefsten Frequenz bis zum Erreichen der Frequenz mit der absolut besten Sensitivität (bei etwa 8 kHz). Für Frequenzen über 8 kHz

fällt die Sensitivität in den Audiogrammen wieder ab, besonders für Frequenzen über 32 kHz ist dieser Abfall relativ steil. Töne mit einer Intensität von 60 dB (SPL) werden im Bereich von 67 Hz bis 45 kHz wahrgenommen [Heffner, 1983]. Eine Korrelation zur Körpergröße konnte weder zur interauralen Distanz noch zur Fläche ihrer Trommelfelle gefunden werden. Auch beim hochfrequenten Hören, d.h. der höchsten hörbaren Frequenz bei 60 dB, beim besten tieffrequenten Hören und bei der absolute besten Sensitivität konnte kein klarer Zusammenhang zwischen den Parametern (interaurale Distanz und Trommelfellfläche) und der Größe der Tiere ausgemacht werden [Heffner, 1983].

Bei vergleichenden psychoakustischen Untersuchungen der Hörempfindlichkeit von Mensch und Hund zeigte sich, dass beide im tieffrequenten Bereich gleich gut hören, dass die Hörschwelle des Hundes aber in den höheren Frequenzbereichen deutlich niedriger liegt als die des Menschen, d.h. der Hund kann höhere Frequenzen besser hören [Lipman & Grassi, 1942]. Diese Ergebnisse können durch den Vergleich der BAER-Schwellen von Hunden und Menschen bestätigt werden. Dabei ist die BAER-Schwelle auf Klicks mit einer Zentralfrequenz von 2,5 kHz bei Hunden der Rasse Jack Russell 10-15 dB und bei Hunden der Rasse Dalmatiner 5-10 dB besser als die beim Menschen gemessene Schwelle [Shiu et al., 1997].

Zum Richtungshören beim Haushund finden sich in der Literatur nur spärliche Angaben. So wird in der Arbeit von Heffner & Heffner [1992] erwähnt, dass bei Schalleinfall aus dem Azimut von 0° der Hund in der Lage ist, eine Winkeländerung der Schallquellenposition von 8° zu erkennen. Wie diese Ergebnisse erzielt wurden, geht leider aus dieser Arbeit nicht hervor.

#### 2.4 Lautäußerungen des Haushundes

Das Gehör spielt bei der akustischen Kommunikation mit Artgenossen eine große Rolle. Herre [1979] sieht einen engen Zusammenhang zwischen den Lautäußerungen von Tieren und der jeweiligen Hörfähigkeit.

Tembrock [1976] gibt für den Haushund 9 verschiedene Lautklassen an, während Althaus [1982] für den Siberian Husky 6 Grundformen angibt. Es wurden aber zusätzlich noch einige andere Lautäußerungen registriert, die z.T. kaum klar abgrenzbar zu definieren waren. Im Vergleich zum Lautrepertoire des Wolfes kommt es beim Haushund auf der einen Seite zu einer Zunahme von Vokalisationen, auf der anderen Seite aber zu einer Verarmung im Lautgebrauch und in dem Informationsgehalt der Lautäußerungen [Herre, 1979]. An dieser

Stelle sollen die Lauttypen „Fiepen“, „Winseln“, „Heulen“, „Knurren“ und „Bellen“ näher dargestellt werden. Bei der Betrachtung des Einsatzes der Lauttypen fällt auf, dass atonale (geräuschhafte) Laute nur agonistische Verhaltensweisen begleiten, während tonale (klanghafte) Laute dagegen nur nicht-agonistische [Feddersen-Petersen & Ohl, 1995]. Agonistische Verhaltensweisen führen i.d.R. zu einer Distanzvergrößerung, während nicht-agonistische Verhaltensweisen zu Distanzerhaltung und Distanzverminderung führen. Die Sonagramme verschiedener Lautgruppen des Großpudelrepertoires aus Feddersen-Petersen & Ohl [1995] zeigen, dass die Laute oberhalb 8 kHz kaum Frequenzanteile besitzen. Ihre Hauptanteile liegen zwischen 100 Hz und 4 kHz. Das Knurren kann als ein Droh- und Warnlaut betrachtet werden, der im Nahbereich eingesetzt wird. Es ist ein atonaler, tieffrequenter Dehnungslaut mit einer langen Anstiegszeit und führt i.d.R. zur Distanzvergrößerung. Das Bellen ist beim Haushund stärker ausgeprägt als beim Wolf. Es kommt zur Ausbildung von Untergruppen: das infantile Bellen, das Spielbellen, das „Tannenbaum“-Bellen, das Spielaufforderungsbellen und das Droh- und Warnbellen [Feddersen-Petersen & Ohl, 1995]. Das Bellen, ein Kurzlaut mit kurzer Anstiegszeit und starker Wiederholungstendenz, kann sowohl als tonaler als auch als atonaler Laut geäußert werden. Die Grundfrequenz liegt dabei zwischen 150 Hz und 600 Hz, die dominante Frequenz zwischen 350 Hz und 800 Hz [Löhn, 1993]. Das Droh- und Warnbellen ist dabei der tieffrequenteste der atonalen Laute aus dieser Gruppe [Feddersen-Petersen & Ohl, 1995]. Im Gegensatz zum Wolf wird das Bellen vorwiegend im Nahfeld eingesetzt [Herre, 1979]. Das Heulen, ein tonaler Dehnungslaut mit langer Anstiegszeit und der Tendenz zum Wiederholen, wird bei den einzelnen Hunderassen unterschiedlich häufig genutzt. Beim Siberian Husky kann das Heulen schon bei den Welpen beobachtet werden [Althaus, 1982]. Andere Hunderassen bedienen sich dieser Lautäußerung dagegen nur selten [Herre, 1979]. Das Heulen kann in Form des Chorheulens zur Sicherung der Zusammenhaltung eingesetzt werden, es wird aber auch häufig im Distanzfeld zur Gruppenanzeige genutzt bzw. zur Lokalisation eigener Rudelmitglieder über große Distanzen [Tembrock, 1996]. Das Winseln, ein tonaler Langlaut mit langer Anstiegszeit und wechselnder Wiederholungsrate, wird an Artgenossen gerichtet, die sich im Nahbereich aufhalten und dient der Distanzverminderung. Dagegen wird das Fiepen, ein tonaler Langlaut mit hoher Grundfrequenz (meistens deutlich über 1 kHz) und mittlerer Anstiegszeit, bei aktiver und passiver Unterwerfung sowie als Schmerz- oder Schreckschrei benutzt.

## 2.5 Krankheiten des Außenohres beim Haushund

Beschwerden durch das Ohr bei Hunden sind in allen Ländern der Welt verbreitet. In der Veterinärmedizinischen Fakultät in Edinburgh zum Beispiel hat einer von acht Hunden (12,07 %), der im Rahmen einer Tierübungslehreinheit vorgestellt wird, eine klinische Otitis, und es gibt keinen Grund, anzunehmen, dass dieses Auftreten in anderen Teilen der Welt bedeutend weniger ist [Fraser et al., 1970]. Erkrankungen der Ohrmuschel und des äußeren Gehörganges beim Haushund stellen also in der tierärztlichen Praxis keine Seltenheit dar. Folgende Krankheiten kann man beobachten [Dietz, 1996]:

- Othämatom, Blutohr
- Haut- und/oder Knorpelwunden an der Ohrmuschel
- Ohrmuschelphlegmone
- Nekrose der Ohrmuschelspitze
- Ohrtrandgeschwür, Ohrspitzengeschwür
- Geschwülste der Ohrmuschel
- Unregelmäßige Ohrstellung und Deformationen der Ohrmuschel
- Fremdkörper im äußeren Gehörgang
- Otitis externa
- Tumore im äußeren Gehörgang

Da das Außenohr einen bedeutenden Anteil am Hörprozess inne hat, haben diese Krankheiten einen kurzfristigen oder permanenten Einfluss auf das Hörvermögen. Hörverluste werden z.B. bei Hunden mit schweren Otitis-Erkrankungen registriert [Eger & Lindsay, 1997].

Erkrankungen der Ohrmuschel, die durch Bissverletzungen oder andere traumatische Einwirkungen entstehen, können zu leichten aber auch gravierenden Veränderung der Ohrmuschelform führen. So können nach schweren Bißverletzungen sogar Teile der Ohrmuschel fehlen bzw. infolge der Wundversorgung kann es zu einer Resektion der Ohrmuschel kommen. Schäden am Knorpel können so schwerwiegend sein, dass z.B. aufrechte Ohren zu Hängeohren werden, und dazu tendieren, den äußeren Gehörkanal zu verstopfen [Fraser et al., 1970]. Das Othämatom verursacht oftmals eine Verkrüppelung des Ohres. Es kommt zur Faltenlegung der Ohrmuschel. Auch durch Narbenkontraktionen infolge der Wundheilung wird die Ohrmuschel verändert. Ohrmuschelphlegmonen führen zur Nekrose des Muschelknorpels, die eine Ohrmuschelamputation zur Folge haben können. Geschwülste der Ohrmuschel, insbesondere wenn sie sich im Bereich der Concha befinden, bewirken eine Einengung der räumlichen Verhältnisse, was sich wiederum auf die

Resonanzeigenschaften des Außenohres auswirken kann. Gleiche Auswirkung können Fremdkörper im äußeren Gehörgang haben. Ohrschmalz- und Talgdrüsen des äußeren Gehörganges können durch Hyperplasien stimuliert werden und zu Adenomen oder Karzinomen ausarten [Fraser et al., 1970]. Größere Mengen von Cerumen, Schmutz und Exsudaten vor dem Trommelfell können eine Dämpfung des Schalles bewirken. Nach der Reinigung des Ohrkanals kann eine Verbesserung des Hörvermögens beobachtet werden [Eger & Lindsay, 1997]. Deformationen des Außenohres, z.B. genetische Defekte, wie die bilaterale Atresie des äußeren Gehörganges, führen zu einem teilweisem Hörverlust, der durch chirurgische Korrektur und Herstellung der natürlichen Verhältnisse verbessert bzw. aufgehoben werden kann [Harari et al., 1992].

Der Begriff Otitis, der die Entzündung des Ohres impliziert, wird verwendet, um Erkrankungen zu beschreiben, die sich von einer einfachen Entzündung bis zu einer chronischen exsudativen Otorrhoe erstrecken [Fraser et al., 1970]. Die Otitis externa beim Hund ist eine Krankheit mit multifaktorieller Ätiologie [Kiss et al., 1997]. Durch eine Otitis externa, die durch Fremdkörper (Grannen, Schmutz, verfilzte Haare, getrockneter Ohrenschmalz), Parasiten, Mycosen, Allergien, Hautkrankheiten, Polypen usw. hervorgerufen werden, kommt es zu einer initialen Irritation der Schleimhaut mit anschließender Inflammation und Exsudation. Bei chronischen Entzündungen kann es zu Wucherungen und Krustenbildung im äußeren Gehörgang kommen. Chronische Otitis kann zu Stenosen oder einer Unkenntlichmachung des vertikalen Ohrkanals und Verstopfung mit Exsudaten führen [Eger & Lindsay, 1997]. In 73,59 % der Fälle von einer Otitis externa waren beide Ohren involviert, außerdem neigten Springer-Spaniel (37,39 %), Cocker-Spaniel (28,09 %) und Zwergpudel (29,07 %) <sup>1</sup> zu einem signifikant höherem Auftreten der Otitis externa, sowie Hunde zwischen 3 und 6 Jahren [Fraser et al., 1970]. Untersuchungen von Pugh et al. [1974] zeigten ähnliche Ergebnisse, allerdings waren hier auch verhältnismäßig junge Hunde betroffen. Bei einer anderen Untersuchung waren in nur 65 % beide Ohren betroffen; 28,54 % der Otitis-Fälle waren Schäferhunde, 19,03 % Cocker-Spaniel, 9,9 % großwüchsige Mischling und 8,3 % Zwergpudel <sup>2</sup>; 51,84 % aller betroffenen Hunde war zwischen 2 und 5 Jahre alt [Kiss et al., 1997]. Durch sehr schwere Otitis kann ein Hörverlust von ungefähr

---

<sup>1</sup> Die prozentuale Angabe bezieht sich hier auf die Rassepopulation, d.h. erkrankte Tiere bezogen auf nicht betroffene Tiere einer Rasse. Würde man die Angaben auf die gesamte Anzahl der Otitis-Fälle beziehen, würden die Zwergpudel 17,7 % und die Cocker-Spaniel 15,41% aller Fälle ausmachen, die der Springer-Spaniel nur 2,94 %.

<sup>2</sup> In diese Untersuchung gingen nur Hunde mit einer Otitis externa ein.



40 dB auftreten [Eger & Lindsay, 1997]. Die Anpassung des Ohres, d.h. ob sie hängen oder stehen, die Gestalt und Größe des äußeren Gehörganges und die Menge der Haare im Kanal sind auch wichtige predisponierende Faktoren für eine Otitis [Fraser et al., 1970]. Bei einer Untersuchung von Sharma & Rhoades [1975] wurden die Hunde hinsichtlich ihrer Ohrform und der Anzahl der Haare im Gehörgang unterteilt. Otitis externa trat gewöhnlich bei Hunden mit Hängeohren und vielen Haaren im Ohr auf. Aber auch Hunde mit kurzen Stehohren, aber mit einer großen bis mittleren Anzahl von Haaren im Ohrkanal, litten verhältnismäßig häufig unter einer Otitis externa. Grützmaker [1962] konnte keine Beziehungen zwischen der Länge des Gehörganges, der Ohrstellung und der Häufigkeit der Otitis-Erkrankungen finden. Volumenmessungen des lateralen Gehörgangsabschnittes ließen dagegen Rückschlüsse auf die Häufigkeit der Otitis-Erkrankungen bei verschiedenen Rassen zu. Rassen, mit einem kleinen Volumen des lateralen Gehörgangsabschnittes, erkrankten häufiger an einer Otitis externa.

Die medizinische Versorgung der Erkrankungen der Ohrmuschel kann das Kupieren bzw. Resezieren der Ohrmuschel beinhalten. Die Behandlung der Otitis externa umfasst als erstes die otoskopische Inspektion des äußeren Gehörkanals und seine Reinigung sowie der Entfernung der initialen Irritation bzw. die Identifizierung der an der Infektion beteiligten Mikroorganismen [Fraser et al., 1970]. Schon die Reinigung des Ohrkanals erzielt eine messbare Verbesserung der Hörfunktion, was auf den profunden Effekt der physikalischen Obstruktion durch den Schmutz hindeutet [Eger & Lindsay, 1997]. Um größere Fremdkörper aus dem äußeren Gehörgang zu entfernen bzw. die Belüftungsverhältnisse zu verbessern, gibt es verschiedene Operationsmethoden (Abb. 2-5, Abb. 2-6 und Abb. 2-7).

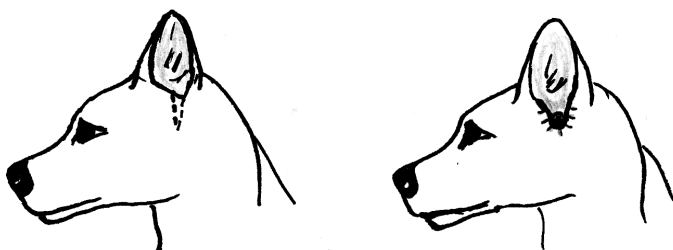


Abb. 2-5: Otitis-Operation nach Formston/McCunn, modifiziert von Hinz: Spaltung des knorpeligen Anteils des Gehörganges (links – Andeutung der Schnittführung; rechts – Verhältnisse nach der keilförmigen Exzision eines Teils der vertikalen Gehörgangswand); angelehnt an Abb. 222 aus Dietz & Henschel, 1988

Zum einen kann der knorpelige Anteil des Gehörganges gespalten werden (Otitis-Operation nach Formston/McCunn, modifiziert von Hinz - Abb. 2-5), zum anderen kann der äußere Gehörgang eröffnet werden nach Zepp (modifiziert von Müller und Szeligowski - Abb. 2-6) [Dietz & Henschel, 1988].

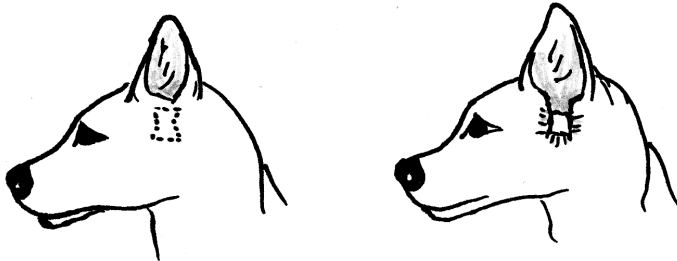


Abb. 2-6: Otitis-Operation nach Zepp (modifiziert von Müller und Szeligowski): Verlagerung des Tragus nach auswärts und unten (links – Andeutung der Schnittführung für die Exstriktion des Hautstücks; rechts – Verhältnisse nach der Verlagerung der Gewebestücke); angelehnt an Abb. 223 aus Dietz & Henschel, 1988

Bei chronischen Fällen der Otitis externa mit irreversiblen strukturellen Veränderungen, z.B. hyperplastischen Hautveränderungen oder Tumore, die den Hörkanal verschließen, empfiehlt sich eine Resektion der vertikalen Wand des Hörkanals [Fraser et al., 1970]. Die Operationsmethode bei einer schwerwiegenden Otitis externa richtet sich nach dem Grad der Ausdehnung der Veränderungen; eine Methode der Wahl auf Grund der anatomischen Gegebenheiten gibt es nicht [Grützmaker, 1962].

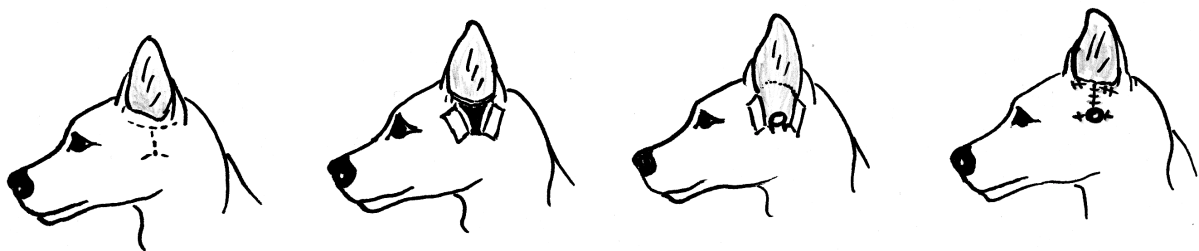


Abb. 2-7: Otitis-Operation: Resektion der vertikalen Wand des Hörkanals (von links nach rechts: 1. Schnittlinie, 2. Doppelter Türflügelschnitt, 3. Exstriktion des ventralen Teils des Gehörganges bis auf eine „Knorpelnase“, 4. Verhältnisse nach dem Umlegen der „Knorpelnase“ und dem Schließen der Nähte); angelehnt an Abb. 224 aus Dietz & Henschel, 1988 und Fig. 21 aus Fraser et al., 1970

Chronisch proliferative mit dem Ohrkanal verbundene Wucherungen, persistierende Mittelohrinfectionen, komplette Stenosis des äußeren Gehörganges, paraaurale Abszesse und neoplastische Erkrankungen des Ohrkanals oder des Mittelohres können eine Indikation für

die Durchführung einer totalen Ohrkanalabtrennung und lateralen Bulla-Osteotomy (total ear canal ablation and lateral bulla osteotomy – TECA/LBO) darstellen. Allerdings ist ein starker bis völliger Hörverlust die Folge dieser Operation. Die Tiere reagieren nur noch auf sehr hohe oder sehr laute Geräusche [White & Pomeroy, 1990].

Taubheit kann unilateral oder bilateral, partiell oder komplett, kontinuierlich oder sporadisch ausgeprägt sein. Außerdem lassen sich Hörverluste auf vielfältige Weise einteilen (konduktiver Hörverlust, nervale Taubheit, zentrale Taubheit, angeborene Taubheit, Mischtaubheit, simulierter Hörverlust). Das Außenohr ist im konduktivem Hörverlust involviert, der durch eine Unterbrechung der Übertragung des Schalles vom Außenohr zum ovalen Fenster (Innenohr) hervorgerufen werden kann sowie bei der angeborenen Taubheit durch Missbildungen des äußeren Ohres [Rose, 1977a]. Der konduktive Hörverlust ereignet sich auch infolge von Okklusion des äußeren Gehörkanals, Verdickung oder Disruption des Trommelfells, Steifheit oder Beschädigung der Gehörknöchelchen und den Verlust der Fügsamkeit von dem vestibulären und rundem Fenster [Eger & Lindsay, 1997]. Konduktive Hörstörungen sind rein peripherer Natur und resultieren in der Regel in einer Schwerhörigkeit (unvollständige Taubheit). Durch sorgfältige Otoskopie können die zu den konduktiven Hörverlusten führenden obstruktive Veränderungen des Gehörganges und Abnormitäten des Trommelfells aufgedeckt werden [Steffen & Jaggy, 1998]. Durch die Verwendung von elektrodiagnostischen Prozeduren können Hörfunktionen beurteilt werden. Die Anwendung der Messung von auditorisch evozierten Potentialen als objektiver Test für die Hörfunktion entwickelt sich in der Veterinärmedizin zunehmend zu einer Standardtechnik [Eger & Lindsay, 1997]. Sie leistet damit als diagnostisches Werkzeug einen wichtigen Beitrag in der Praxis der Veterinärmedizin, vor allem in neurologisch spezialisierte Praxen und veterinärmedizinischen Schulen [Strain, 1992]. Sie kann z.B. bei Hörmessungen und der Detektion von neuralen Läsionen eingesetzt werden [Kay et al., 1984; Munro & Cox, 1997]. Ein wichtige Hilfestellung liefert die Untersuchung bei der Feststellung von angeborenen und erworbenen Hörbeeinträchtigungen bei Welpen und Zuchttieren, besonders bei genetisch prädisponierten Rassen sowie bei Gebrauchshunden (Schäferhunde, Diensthunde), die sich auf ihr Gehör verlassen müssen [Munro & Cox, 1997]. Die Erfassung von einseitig tauben Tieren und deren folgender Ausschluss aus der Zucht mittels Einsatz von BAER, wie er schon in einigen Ländern praktiziert wird, stellt die zuverlässigste Methode zur Verringerung der vererbten Taubheit dar [Steffen & Jaggy, 1998].