

I. Überblick über das Hörsystem

Das menschliche Hörorgan besteht aus dem Außenohr (Ohrmuschel, äußerer Gehörgang, Trommelfell), dem Mittelohr (Paukenhöhle mit den Gehörknöchelchen Hammer, Amboß und Steigbügel) und dem Innenohr (Schnecke, Lat.: Cochlea). Das Innenohr hängt mit dem Gleichgewichtsorgan zusammen und ist über den Hörnerv (VIII. Hirnnerv = Nervus vestibulocochlearis oder N. statoakustikus) mit dem Hirnstamm verbunden. Im Gehirn wird die akustische Information in verschiedenen Stationen der Hörbahn weiterverarbeitet. Ein Überblick über die Anatomie des Gehörs gibt Abbildung 1.1.

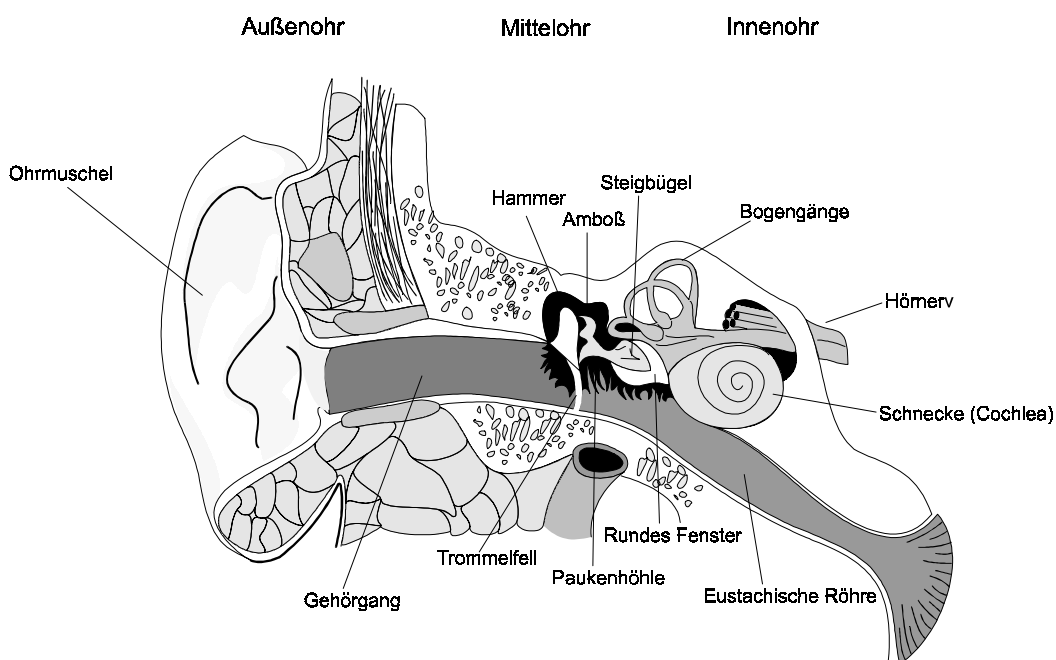


Abbildung 1.1: Übersicht über den Aufbau des Gehörs

I.1 Außenohr

Die Ohrmuschel und der erste Teil des äußeren Gehörgangs besitzt ein Gerüst aus elastischem Knorpel und ist individuell sehr verschieden ausgeprägt. Erst der weiter innen gelegene Anteil des äußeren Gehörgangs ist von Knochen umgeben. Der äußere Gehörgang ist etwas gekrümmt. Dadurch wird das Trommelfell erst von außen einsehbar, wenn diese Krümmung aufgehoben wird (z. B. durch Zug an der Ohrmuschel nach hinten oben). Dies wird bei der **Otoskopie** ausgenutzt, bei der die Durchgängigkeit des äußeren Gehörgangs, die Form und Beschaffenheit des Trommelfells und etwaige Auffälligkeiten durch Betrachtung mit einer Lupe oder einem Mikroskop untersucht wird.

Die Funktion des Außenohres besteht in einer Bündelung des Schalls (Trichterwirkung bei hohen Frequenzen) sowie in einer richtungsabhängigen Verformung (Filterung) des auf das Ohr einfallenden akustischen Signals. Diese je nach Einfallsrichtung unterschiedliche Klangverfärbung kann zur **Ortung** von Schallquellen verwendet werden. (Zusätzlich treten dabei zwischen den beiden Ohren Laufzeit- und Pegelunterschiede auf, die eine höhere Genauigkeit der Ortung durch Vergleich zwischen den beiden Ohren ermöglichen, aber anhand derer z. B. nicht entschieden werden kann, ob eine Schallquelle von vorne oder von hinten kommt). Bei tiefen Frequenzen wirkt vorwiegend die Form des Oberkörpers und des Kopfes auf die richtungsabhängige Klangveränderung, während die genaue Form der Ohrmuschel erst bei hohen Frequenzen eine Rolle spielt, bei denen die Schallwellenlänge die gleiche Größenordnung wie die Abmessungen des Außenohres besitzt. Diese einfallsrichtungsabhängige Klangverfärbung wird bei der **Kunstkopftechnik** ausgenutzt, die in der computergesteuerten Form als „virtuelle Akustik“ bezeichnet wird. Dabei wird ein Kunstkopf mit nachgebildeten Außenohren an den Aufnahmeort plaziert, so daß bei Abhören der Aufnahme über Kopfhörer der subjektive Eindruck entsteht, als befände man sich an der Stelle des Kunstkopfes im akustischen Feld. Abweichungen zwischen der Ohrform des Hörers und derjenigen des Kunstkopfes führen zu einem nicht originalgetreuen räumlichen Eindruck, bei dem leicht Verwechslungen (z. B. Vorne-hinten-Verwechslung) auftreten. Dies kann auf die individuelle Hörerfahrung jedes Menschen mit seinen eigenen, auf charakteristische Weise den Klang bei vorgegebener Schalleinfallsrichtung verformenden Außenohren zurückgeführt werden.

Störungen der Außenohrfunktion können zum einen angeborene oder erworbene Mißbildungen der Ohrmuschel oder des äußeren Ohrkanals sein. Die häufigste Störung ist der **Verschuß des äußeren Gehörgangs** durch einen Pfropf aus Ohrenschmalz (Cerumen), der sich bei falscher Ohrhygiene entwickeln kann (Säubern des Ohrkanals mit Wattestäbchen, die das Cerumen vor das Trommelfell positionieren, anstelle es auf physiologischem Weg austrocknen bzw. herausfließen zu lassen). Auch **Veränderungen des Trommelfells** (z. B. Verletzungen, Vernarbungen, oder tumorbedingte Veränderungen), die der HNO-ärztlichen Abklärung bedürfen, sind in diesem Zusammenhang zu nennen. Die Störungen der Außenohr-Funktionen lassen sich sowohl klinisch (d. h. anhand der Vorgeschichte und der ärztlichen Untersuchung) als auch durch die Otoskopie erfassen (vgl. Tabelle 1.1).

Tabelle 1.1: Funktion, Beispiele möglicher Störungen und Möglichkeiten zur Diagnostik von Anteilen des Gehörs

Anteil des Gehörs	Funktion	Störung	Audiologische Diagnostik
Außenohr	Richtungsabh. Filterung / Bündelung	Ohrmißbildung	
Mittelohr	Impedanztransformation Luft → Wasser	Schalleitungs-Schwerhörigkeit (z.B. Erguß, Otitis media)	
Innenohr	Umwandlung Wasserschall → Nerven-erregung, Frequenz-Orts-Transformation	Cochleäre Schwerhörigkeit (z.B. Lärm, Alter, ...)	
Hörnerv / Hirnstamm	Kodierung akustischer Information, Auswertung interauraler Unterschiede, Modulations-Kodierung	Retrocochleäre (neurale) Schwerhörigkeit, Lokalisationsstörung	
Cortex	Sprachwahrnehmung, komplexe Verarbeitung	zentrale Hörstörungen (z.B. Aphasie)	

I.2 Mittelohr

Das Mittelohr befindet sich in der luftgefüllten Paukenhöhle, die über die Eustachische Röhre mit dem Nasen-Rachenraum verbunden ist (Abb. 1). Beim Schlucken und Gähnen wird diese enge Röhre durch den Muskelzug geweitet, so daß ein Druckausgleich zwischen der Paukenhöhle und der Außenwelt stattfinden kann und an beiden Seiten des Trommelfells der gleiche atmosphärische Luftdruck vorliegt. Die Kontaktfläche zwischen Hammerkopf und Amboß ist ein Gleitreibungsgelenk, das bei starken, statischen Auslenkungen des Trommelfells (z. B. bei permanentem Unterdruck im Mittelohr) nachgibt und dadurch den optimalen „Arbeitspunkt“ des Mittelohres einstellt. Die Funktion des Mittelohres ist die **Impedanzanpassung** zwischen der akustischen Wellenfortbewegung in Luft (kleine Auslenkungskräfte bewirken eine hohe Auslenkung der Luftteilchen) und der sehr hohen Impedanz im flüssigkeitsgefüllten Innenohr. (Zur Erreichung derselben Auslenkung muß eine wesentlich höhere Kraft aufgewendet werden.) Erreicht wird dies durch die große Fläche des Trommelfells im Verhältnis zur kleinen Fläche des ovalen Fensters, durch das Hebelverhältnis zwischen dem langen Hammergriff und dem kurzen Amboßfortsatz und durch die Krümmung der Trommelfellmembran. Insgesamt ist damit die Kraft pro Flächeneinheit beim ovalen Fenster etwa 50 mal größer als beim Trommelfell. Ohne diese Impedanzanpassung (bzw. Kraftübersetzung) würde an der Grenzfläche zwischen Luft und Flüssigkeit der größte Teil der Schallenergie der Luft an der Wasseroberfläche reflektiert werden und nur ein kleiner Teil der Schallenergie in das Wasser übertragen werden, so daß eine wesentlich geringere Empfindlichkeit des Ohres resultieren würde. (Diese schlechte Schallübertragung zwischen Wasser und Luft ist auch ein Grund dafür, daß man beim Tauchen zwar alle Geräusche im

Wasser, jedoch kaum die Geräusche oberhalb der Wasseroberfläche hören kann).

Bei sehr hohen Schalldrucken tritt als eine Art Schutzfunktion der **Musculus stapedius** in Aktion, der am Steigbügelfußstück angreift und eine Veränderung der Mittelohrmechanik bewirkt. Den Einsatz dieser Muskelaktion kann man anhand der Änderung der akustischen Impedanz im Gehörgang nachweisen (s. u.). Dagegen kann die Wirkung des M. tensor tympani, der am Hammerhals ansetzt und das Trommelfell nach innen zieht, nicht anhand von audiologischen Messungen nachgewiesen werden. Bei einer Störung der Mittelohrfunktionen kommt es zu einer **Schalleitungsschwerhörigkeit**, d. h. einer Abschwächung der Fortleitung des Luftschalls in das Innenohr. Häufige Ursachen dafür sind Tubenbelüftungsstörungen (z. B. bei Erkältungskrankheiten oder bakteriellen Entzündungen), bei denen die im Mittelohr verbleibende Luft durch den Blutkreislauf entfernt (resorbiert) wird und sich das Ohr leicht mit wässriger Flüssigkeit anfüllt (Mittelohrerguß). Bei einer bakteriellen Besiedelung der Flüssigkeit kommt es zu einer **Mittelohrentzündung** (Otitis media), die zu einem Eiterdurchbruch durch das Trommelfell oder als schwerwiegende Komplikation zu einer Hirnhautentzündung (Meningitis) führen kann. Obwohl der zugrundeliegende Erkrankungsmechanismus sehr unterschiedlich sein kann (z. B. Festwachsen des Steigbügels bei der Otosklerose, Unterbrechung der Gehörknöchelchenkette beispielsweise nach einem Knalltrauma), ist die Auswirkung dieser Störung jeweils die gleiche.

Zur Funktionsprüfung und Diagnostik des Mittelohres wird die **Impedanzaudiometrie** verwendet, bei der die Schallreflexion am Trommelfell mit einem Mikrophon im abgedichteten Gehörgang gemessen wird, um auf die Impedanz und die Weiterleitung des Schalls in das Innenohr schließen zu können. Bei der **Tympanometrie** wird der Luftdruck im Gehörgang systematisch variiert, um das Maximum der Schallübertragung zu finden. Es tritt bei normaler Hörfunktion und Tubenbelüftung bei genau dem atmosphärischen Druck im Gehörgang auf (d. h. weder Über- noch Unterdruck). Aus der zeitlichen Veränderung der Impedanz bei der zusätzlichen Darbietung von Tönen mit hohem Pegel kann auf das Einsetzen des Stapedius-Reflexes geschlossen werden (**Reflexaudiometrie**). Außerdem ist bei Schalleitungsschwerhörigkeit die Knochenleitung nicht gestört, d. h. die Übertragung eines Schalls von einer schwingungsangeregten Stelle des Schädels zum Innenohr. (Dies wurde von Thomas Alva Edison, dem Erfinder des Phonographen, ausgenutzt, der zur Umgehung seiner Schalleitungsschwerhörigkeit auf das Gehäuse des Phonographen gebissen hat und dadurch die aufgezeichnete Musik

wieder besser hören konnte). Der Effekt wird auch bei klinischen Stimmgabeltests (Weber- und Rinne-Versuch) und bei der Tonaudiometrie mit einem Knochenleitungshörer ausgenutzt, da bei Vorliegen der Schalleitungsschwerhörigkeit die Knochenleitung des Schalls besser ist als die Überleitung des Schalls durch die Luft (bei entsprechender Kalibrierung von Knochenleitung und Luftleitung auf 0 dB HL).

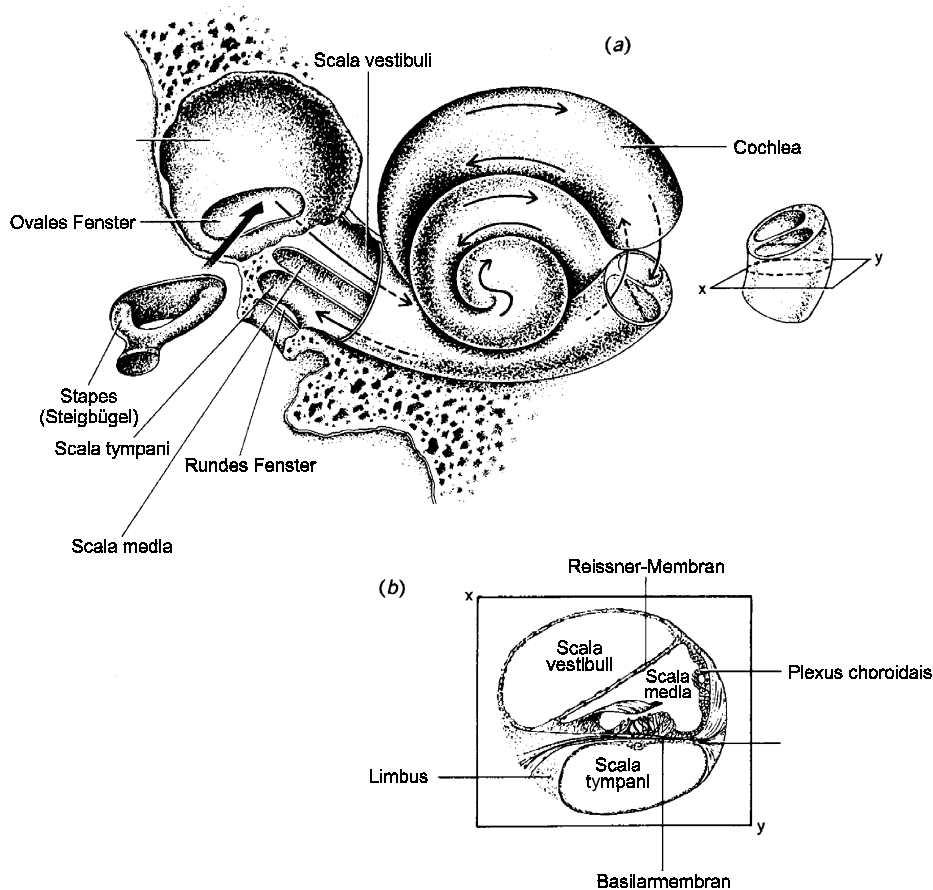


Abbildung 1.2: Schematischer Aufbau des Innenohrs (nach Gulick, W. L., Gescheider, G. A., Frisina, R. D.: Hearing. Oxford University Press, Oxford 1989)

1.3 Innenohr

Das Innenohr besteht aus einem schneckenförmig aufgerollten Schlauch, der sich aus drei Hohlräumen zusammensetzt (Abb. 1.2). Das ovale Fenster grenzt an die Scala vestibuli, die am oberen Ende der Schnecke, dem Helicotrema, mit der Scala tympani verbunden ist. Dazwischen befindet sich die Scala media, die gegenüber der Scala tympani durch die **Basilarmembran** abgegrenzt ist. Die Breite der Basilarmembran nimmt vom ovalen Fenster bis zum Helicotrema stetig zu, und ihre Steifigkeit nimmt ab. Bei Vorliegen eines Schallsignals am ovalen Fenster tritt quer zur Basilarmembran eine Druckdifferenz zwischen der Scala vestibuli und

der Scala tympani auf, die zu einer Auslenkung der Basilarmembran führt. Auf der Basilarmembran bildet sich eine **Wanderwelle** aus. (Sie kann anschaulich verglichen werden mit einem Gartenschlauch, der an einem Ende hin- und herbewegt wird und auf dem sich die Anregung bis zum Ende fortbewegt.) Bei hohen Frequenzen wird die Auslenkung am basalen Teil der Basilarmembran (in der Nähe des ovalen bzw. runden Fensters) maximal, während bei niedrigen Frequenzen eine maximale Auslenkung an ihrem Ende (in der Nähe des Helicotrema) auftritt (**Frequenz-Orts-Transformation**).

In der Basilarmembran sind als Auslenkungssensoren die inneren und äußeren Haarzellen angelegt (Abb. 1.3). An ihrer Oberseite sind Stereozilien angeordnet, die bei einer seitlichen Auslenkung zu einer Entladung des Membranpotentials der Haarzelle führen. Das Umsetzen der Auf- und Abbewegung der Basilarmembran in eine Querbewegung der Stereozilien erfolgt durch die Einbettung der Enden der Stereozilien in die gallertartige **Tektorialmembran**, die von oben den Haarzellen aufliegt. Während an den inneren Haarzellen eine große Zahl von afferenten Nervenfasern beginnen (d. h. Übertragung von den Rezeptoren zum Gehirn hin) enden an den äußeren Haarzellen vorwiegend efferente Nervenfasern (d. h. Übertragung vom Gehirn zu den Zellen). Unter Spannungseinfluß können sich die äußeren Haarzellen aktiv kontrahieren. Dies wird zur Verstärkung von Schwingungen bei niedrigen akustischen Eingangssignalpegeln ausgenutzt, bei denen eine Art aktive Rückkopplung die Sensitivität und gleichzeitig die Frequenzspezifität der Basilarmembran erhöht. Obwohl die genauen Mechanismen dieser „**aktiven Prozesse**“ im Innenohr noch nicht völlig geklärt sind, kommt ihnen eine große Bedeutung für das normale Hören insbesondere bei niedrigen Pegeln zu.

Nimmt die Rückkopplung von mechanisch-akustischer Energie auf elektrische Spannung und über die Kontraktion der äußeren Haarzellen wieder in mechanisch-akustische Energie einen zu großen Wert an, wird das System instabil und fängt an zu schwingen. Tatsächlich lassen sich im abgeschlossenen Gehörgang mit einem empfindlichen Mikrophon und entsprechenden Störgeräuschreduktionstechniken sehr niederenergetische Schwingungen aus dem Innenohr nachweisen, die spontanen **otoakustischen Emissionen**. Sie lassen sich auch durch akustische Anregungen mit einem kurzen Schallreiz oder einem Dauerton erzeugen (transitorisch evozierte otoakustische Emissionen bzw. simultan evozierte otoakustische Emissionen) und können zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Innenohrs eingesetzt werden.

Eine Störung der Innenohrfunktion führt zu einer **Schallempfindungsschwerhörigkeit**, die verschiedene Ursachen haben kann (z. B. fortdauernde Schallbelastung oder Knalltrauma, altersbedingte Rückbildung der Sinneszellen, Stoffwechselstörungen, Störung des Elektrolythaushalts). Zumeist ist die Funktion der inneren bzw. äußeren Haarzellen betroffen, die - beispielsweise bei der Lärmschwerhörigkeit - teilweise zerstört sind. Dies macht sich in einer verschlechterten Empfindlichkeit des Ohres gegenüber Schallreizen bei den entsprechenden Frequenzen bemerkbar. Beim (teilweisen) Ausfall der inneren Haarzellen sind die aktiven Prozesse noch intakt. Zwar findet eine Verschiebung der Hörschwelle zu höheren Pegeln statt, schwache akustische Signale werden jedoch noch verstärkt, so daß eine gewisse Adaptation auch an Signale mit geringen Pegeln möglich ist (Dynamikkompression). Beim (teilweisen oder vollständigen) Verlust der äußeren Haarzellen sind dagegen die aktiven Prozesse ebenfalls gestört, so daß die spezielle Adaptation an niedrige Pegel entfällt und ein steilerer Anstieg der empfundenen Lautstärke mit zunehmenden Pegel resultiert (**Recruitmentphänomen** oder Lautheitsausgleich, vgl. III.2.1).

Die Funktion des Innenohres kann zur Abgrenzung zwischen Schalleitungs- und Schallempfindungsschwerhörigkeit mit der Stimmgabel oder anhand des Tonaudiogramms von Luft- und Knochenleitung überprüft werden. Die Anwesenheit von otoakustischen Emissionen spricht für ein (nahezu) normales Hörvermögen, während die überschwelligen Tests und die Sprachaudiometrie zum Nachweis von überschwelligen Verzerrungen des Höreindrucks durch den Hörschaden (z. B. Recruitment oder verschlechterte Sprachwahrnehmung in Ruhe oder bei Störgeräusch) herangezogen werden. Als „objektiver“ Hörtest, mit dem auch die Funktion des Innenohres mit einbezogen wird, steht die **Hirnstammaudiometrie** (brainstem evoked response audiometry, BERA; frühe akustisch evozierte Potentiale, FAEP) zur Verfügung. Dabei wird die elektrische Spannungsveränderung an der Schädeloberfläche als Antwort auf einen akustischen Reiz registriert und gemittelt, um reizabhängige Teile von reizunabhängigen Teilen zu trennen. Bei Vorliegen einer normgerechten elektrischen Antwort auf einen Schallreiz kann damit auf ein normal funktionierendes peripheres Hörorgan geschlossen werden.

I.4 Hörbahn

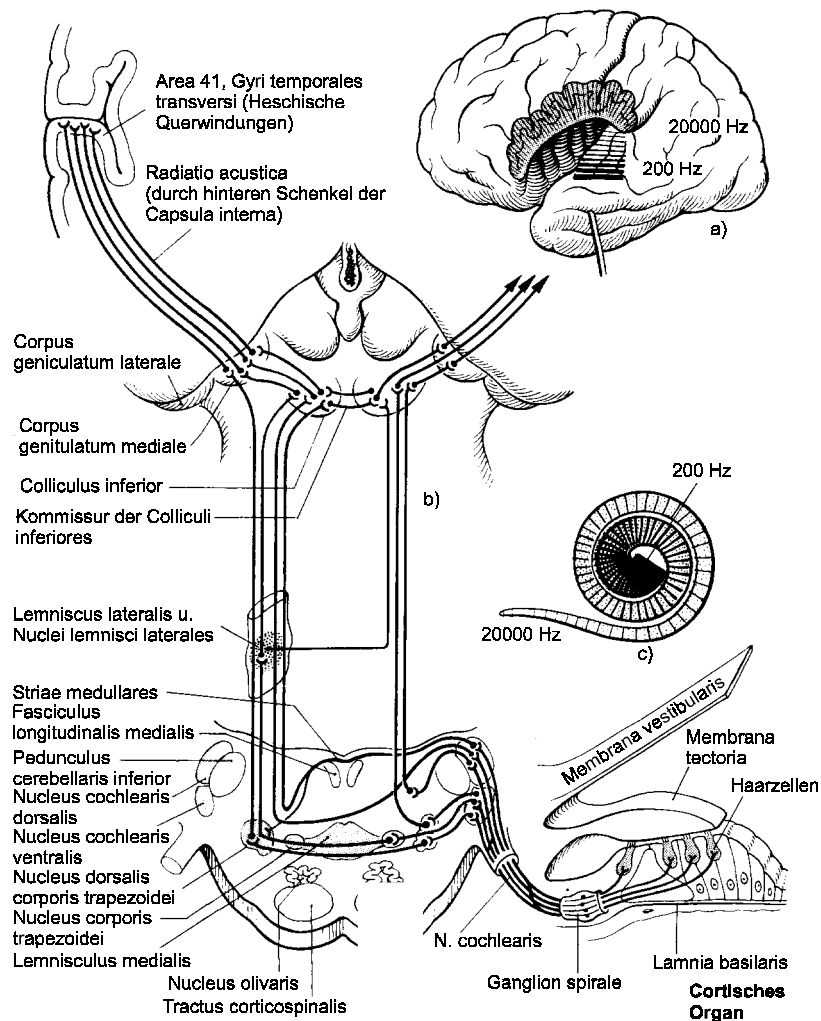


Abbildung 1.3: Schematischer Aufbau der Hörbahn (aus Duus, P.: Neurologisch-topische Diagnostik. Thieme, Stuttgart 1995).

a Primärer Hörkortex mit Tonotopie.

b Stationen der Hörbahn vom Innenohr bis zum Kortex.

c Schematische Frequenzanordnung (Tonotopie) im Innenohr.

Der **Hörnerv** entspringt aus der Mitte der Cochlea und führt durch den inneren Gehörgang zum **Hirnstamm**, wo er in den Nucleus cochlearis mündet. Von diesem Hirnnervenkern gehen eine Reihe von Verbindungen zu anderen Kerngebieten im Hirnstamm (zur oberen Olive, zum Nucleus accessorius und zu den seitlichen Schleifenkernen [Nuclei lemnisci laterales]) sowie weiter aufsteigende Bahnen über den Lemniscus lateralis und medialis in den Colliculus inferior (unteres Vierhügelpaar), das Corpus geniculatum mediale bis zum primären auditorischen **Kortex** der Area 41 im Schläfenlappen des Großhirns (Abb. 1.3). Auf diesen Stationen der

paarig angelegten Hörbahn finden verschiedene Kreuzungen zwischen beiden Seiten statt.

Die Funktion des Hörnerven und der Hörbahn besteht in der Codierung und Verarbeitung der akustischen Information in neuronalen Erregungsmustern und Strukturen. Im Hörnerv wird die akustische Information durch eine Erhöhung bzw. Synchronisation der Entladungsrate der verschiedenen Nervenfasern bei Stimulation der zugehörigen Haarzelle codiert, so daß zu jedem Zeitpunkt die Schallintensität für unterschiedliche Frequenzen verschlüsselt wird. Im Hirnstamm werden bereits komplexere Funktionen ausgewertet. Beispielsweise erfolgt in der oberen Olive ein **interaauraler Vergleich**, d. h. eine Auswertung der zwischen den beiden Ohren auftretenden Zeit- und Intensitätsunterschiede zur Lokalisation von Schallquellen. Zusätzlich werden im Colliculus inferior Modulationsfrequenzen (zeitliche Schwankungen der akustischen Energien in den verschiedenen Frequenzbändern) ausgewertet. Aufgrund der unmittelbaren Nachbarschaft zum Colliculus superior, der für das visuelle System und die Koordination von Motorik und visuellem System wichtig ist, findet hier bereits eine Verrechnung zwischen akustischer und visueller Information statt. In der gesamten Hörbahn läßt sich eine **tonotope Organisation** nachweisen, d. h. benachbarte akustische Frequenzen führen zu Nervenerregungen an benachbarten Orten im Gehirn. Ein ähnliches Ordnungsprinzip wird für die Abbildung der räumliche Anordnung von Schallquellen (spatiotope Abbildung) und für die Aufspaltung in Modulationsfrequenzen (periodotope Abbildung) im Gehirn vermutet. Während die ersten Stationen der Hörbahn noch relativ hohe Modulationsfrequenzen verarbeiten können, wird die höchste verarbeitete Modulationsfrequenz auf den weiteren Stationen der Hörbahn geringer.

Störungen von Funktionen des Hörnerven und der peripheren Anteile der Hörbahn (z. B. beim Acusticusneurinom, einem gutartigen, den Hörnerven jedoch verdrängenden Tumor) werden als **retrocochleäre** oder **neurale Hörstörungen** bezeichnet. Sie lassen sich durch die Hirnstammaudiometrie nachweisen, bei der eine verlängerte Überleitungszeit zwischen der cochleären Komponente und der aus dem Hirnstamm stammenden Potentiale nachweisbar ist, sowie durch bildgebende Verfahren der betreffenden Strukturen (z. B. Magnetresonanztomographie). Störungen der mehr zentral gelegenen Anteile der Hörbahn (z. B. durch Durchblutungsstörungen oder Verletzungen) können zu einer Reihe von verschiedenen neurologischen Symptomen führen, die sich beispielsweise bei der **Aphasie** in einer Störung des Sprachverstehens oder der Sprachproduktion äußern. Neben

den bildgebenden Verfahren werden hier zentrale Sprachtests zur näheren Eingrenzung der Funktionsstörung eingesetzt.

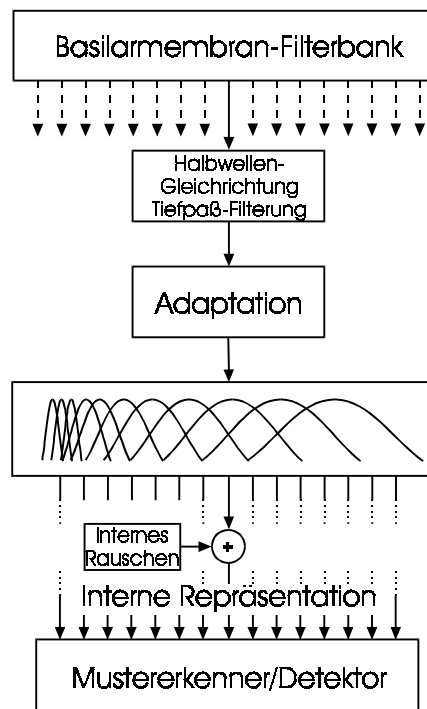


Abbildung 1.4: Modell der effektiven Signalverarbeitung nach Dau et al. (1997)

Physikalisch bzw. nachrichtentechnisch läßt sich die **Signalverarbeitung im Gehör** durch eine Reihe von Funktionselementen modellhaft beschreiben - unabhängig von der detaillierten anatomischen und physiologischen Grundlage. Ein wichtiges Element einer derartigen Beschreibungsweise ist eine Filterbank, die entsprechend der Funktionen der Basilmembran den ankommenden Schall in verschiedene Frequenzbänder aufteilt (Abb. 1.4). In jedem Frequenzkanal wird nun die Energie durch Bildung der Einhüllenden ermittelt, was durch eine Halbwellengleichrichtung mit Tiefpaßfilterung nachgebildet werden kann. Dieser Prozeß und die anschließende Adaptationsstufe sollen die Funktionen der Haarzelle und des Hörnervs simulieren, bei denen effektiv die Empfindlichkeit an den Mittelwert des jeweiligen Eingangssignals angepaßt wird und die detaillierte Phasenstruktur des Eingangssignals teilweise verworfen wird. An die Adaptation schließt sich ein binauraler Vergleich bzw. eine Auftrennung in verschiedene Modulationsfrequenzen an (Modulationsfilterbank), so daß sich als Ausgang der genannten Verarbeitungsstufen ein zweidimensionales Muster ergibt (Mittelfrequenz x Modulationsfrequenz, bei denen gegebenenfalls die interauralen Unterschiede mit verrechnet werden).

Dieses zeitliche Muster stellt näherungsweise (bei Zugabe eines

Rauschens, das die neuronalen Verarbeitungsfehler repräsentiert) die **interne Repräsentation** eines angebotenen akustischen Signals dar. Einer solchen internen Repräsentation liegt somit die Modellvorstellung zugrunde, daß wir die wesentlichen peripheren Verarbeitungsschritte des Hörsystems mit technischen Schaltkreisen adäquat nachbilden können. Auf diese Weise wird ein Abbild vom Zustand des Gehirns erstellt, auf dem die verschiedenen Hörleistungen aufbauen (z. B. die Spracherkennung oder die Unterscheidung von bestimmten akustischen Parametern wie der Tonhöhe oder der Intensität). Obwohl der derzeitige Stand derartiger Modelle der Signalverarbeitung im Gehör noch keine allzu detaillierte Beschreibung des akustischen Systems zuläßt, erscheint eine von technischer Seite geprägte Betrachtungsweise des Hörsystems insbesondere im Zusammenhang mit der Konstruktion und der Anpassung von Hörgeräten von großer Wichtigkeit.

