

Grundlagen

M. Walger, K. Neumann, S. Hoth, R. Mühler

2.1 Anatomische und physiologische Grundlagen – 6

- 2.1.1 Übersicht – 6
- 2.1.2 Geschichtliches – 6
- 2.1.3 Außenohr – 7
- 2.1.4 Mittelohr – 8
- 2.1.5 Innenohr – 10
- 2.1.6 Hörnerv und zentrale Hörbahn – 13
- 2.1.7 Physiologie der AEP – 15
- 2.1.8 Reifung des Gehörs – 16
- 2.1.9 Reifungsprozesse der AEP – 19

2.2 Pathophysiologie – 20

- 2.2.1 Historische Entwicklung des pathophysiologischen Verständnisses – 20
- 2.2.2 Einteilung von Hörstörungen – 21

2.3 Messtechnische Grundlagen – 26

- 2.3.1 Impedanzaudiometrie – 26
- 2.3.2 Otoakustische Emissionen und akustisch evozierte Potenziale – 31

Literatur – 51

In einem Ausmaß wie in wenigen anderen Bereichen der praktischen Medizin setzt die kompetente Anwendung objektiver Hörprüfungen eine Wissensbasis voraus, die sich aus vielen unterschiedlichen Fachrichtungen speist: Die Funktion des Hörsystems als einem äußerst empfindlichen und komplex aufgebauten biologischen Signaldetektor kann nur mit anatomischen und physiologischen Grundlagen- und Spezialkenntnissen verstanden werden, die weit über das Facharztwissen hinausgehen; Physik und Technik spielen bei der Beschreibung und Erzeugung der akustischen Reize eine beherrschende Rolle und der Nachweis der biologischen Signale beinhaltet neben der komplexen Technik eine mitunter durchaus anspruchsvolle mathematische Statistik. Die Schwierigkeiten des Signalnachweises können keineswegs allein durch ein klug konzipiertes und kompromisslos zum kommerziellen Produkt entwickeltes System zur Datenerfassung und Signalverarbeitung bewältigt werden. Objektive Audiometrie mag ohne die Lektüre des folgenden Kapitels möglich sein, aber ihre Möglichkeiten werden dann nicht ausgeschöpft. Den in den ► Kap. 3 bis 5 folgenden methodenspezifischen Abschnitten werden in diesem Kapitel die übergreifenden Aspekte, insbesondere in Bezug auf die akustischen Reize und die Prinzipien der Messung, vorangestellt.

2.1 Anatomische und physiologische Grundlagen

Die Kenntnisse der anatomischen und physiologischen Grundlagen der peripheren und zentralen Hörverarbeitung sind grundlegende Voraussetzung für Durchführung und Interpretation objektiver Hörprüfungen, da ihre wesentlichen Zielparameter aus der normalen oder gestörten Aufnahme, Weiterleitung und Verarbeitung akustischer Signale durch das Hörsystem resultieren. Darüber hinaus liefern sie die Basis, um pathophysiologische Veränderungen zu verstehen, die uns bereits im Säuglings- und Kleinkindesalter in den verschiedenen Schwerhörigkeitsformen begegnen. Sie gilt es, besonders in dieser frühen Lebensphase, mit objektiven Hörprüfungen näher einzugrenzen, die Art und den Grad einer Schwerhörigkeit so genau wie mög-

lich zu bestimmen, um eine frühzeitige Therapie und (Re-)Habilitation bereits in den sensiblen Phasen der Hörentwicklung einzuleiten.

2.1.1 Übersicht

Anatomisch und funktionell gliedert sich unser Gehör in das periphere Hörorgan mit Außen-, Mittel- und Innenohr (■ Abb. 2.1) sowie die zentrale Hörbahn. Das kompliziert gebaute und als Labyrinth bezeichnete Innenohr beinhaltet neben der Hörschnecke (Cochlea) das Gleichgewichtsorgan, das mit seinem Vorhof und den drei Bogengängen dem Lage-, Dreh- und Beschleunigungssinn dient. Die Funktion des Gehörs besteht in der Aufnahme, Weiterleitung, Transformation und Verarbeitung akustischer Signale bis zur bewussten Wahrnehmung.

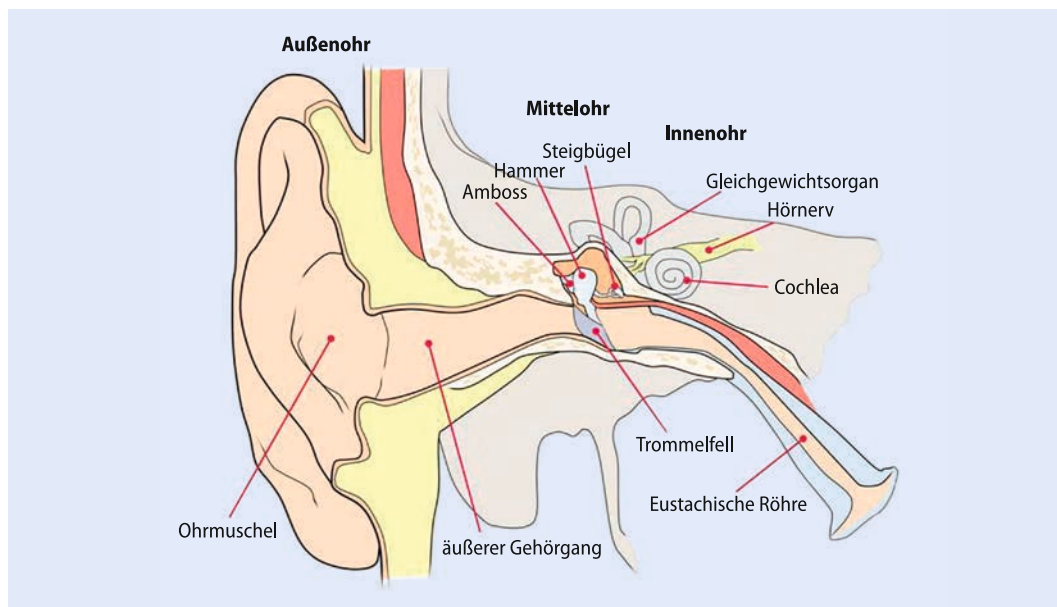
Der über das Außenohr aufgenommene Schall führt nach Weiterleitung und Verstärkung über das Mittelohr zur Ausbildung einer Wanderwelle in der Cochlea, die zu einer Abscherung der empfindlichen Stereozilien der Haarzellen an einem frequenzspezifischen Ort auf der Basilarmembran führt.

➤ **Die Abscherung der Stereozilien stellt den adäquaten Reiz für unser Gehör dar. Die dadurch ausgelöste Erregung der Sinneszellen führt in den afferenten Hörnervenfaser zur Entstehung von Nervenimpulsen, die über die zentrale Hörbahn bis zum auditorischen Kortex weitergeleitet werden. Die weitere Hörverarbeitung erfolgt in den assoziierten Feldern der Großhirnrinde.**

Ziel der objektiven Audiometrie ist die messtechnische Erfassung und Analyse der wesentlichen Schritte der Aufnahme, Weiterleitung, Verarbeitung, bewussten Wahrnehmung und Diskrimination akustischer Signale, ausgehend vom peripheren Hörorgan über den Hörnerv und Hirnstamm bis hin zum auditorischen Kortex mit seinen assoziierten Feldern.

2.1.2 Geschichtliches

Wesentliche Beiträge zur Erforschung des peripheren Hörorgans leistete der italienische Anatom Alfonso



■ **Abb. 2.1** Übersicht über das periphere Hörorgan mit Außen-, Mittel- und Innenohr

Giacomo Gaspare, Graf von Corti, bereits im 19. Jahrhundert, begünstigt durch die Weiterentwicklung von Lichtmikroskopie, Präparations- und Färbetechniken. Er forschte an der Universität Würzburg über die Anatomie des Innenohres und entdeckte 1851 das nach ihm benannte Rezeptorgebiet in der Cochlea. Die ersten grundlegenden Theorien über die Physiologie des Hörens wurden ebenfalls im 19. Jahrhundert durch den deutschen Physiker und Physiologen Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz gelegt, der als Professor für Physiologie an den Universitäten Königsberg, Bonn und ab 1858 in Heidelberg arbeitete. In dieser Zeit beschäftigte er sich mit der Physiologie des Hörens und Sehens und entwickelte eine mathematische Theorie zur Erklärung der Klangfarbe durch Obertöne, die Resonanztheorie des Hörens und darauf basierend »Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik«.

Die Wanderwellentheorie löste die Helmholtz'sche Resonanztheorie und damit die Vorstellung von schwingenden Hörsaiten im Innenohr ab. Sie erklärt die ortsabhängige Abbildung der Frequenzen auf der Basilarmembran und ist bis heute gültig, auch wenn die Erforschung der aktiven Verstärkungsmechanismen der Wanderwelle durch die äußeren Haarzellen als cochleären Verstärker unser Verständnis für den Hörvorgang mit seiner hohen Frequenzauflösung und ungeheuren Dynamik deutlich erweitert hat. Weitere bahnbrechende Entdeckungen, wie z. B. die der cochleären Mikrofonpotenziale (CM) durch Wever und Bray, die der akustisch evozierten Potentiale (AEP) durch Pauline und Hallowell Davis und auch die der otoakustischen Emissionen durch David Kemp haben unser Verständnis der peripheren und zentralen Hörverarbeitung entscheidend erweitert.

➤ **Bahnbrechende Erkenntnisse zur Physiologie des Innenohres lieferte der ungarisch-amerikanische Biophysiker und Physiologe Georg von Békésy mit seiner Wanderwellentheorie, für die er 1961 mit dem Nobelpreis für Physiologie und Medizin ausgezeichnet wurde.**

2.1.3 Außenohr

Das Außenohr dient mit seiner Ohrmuschel und dem äußeren Gehörgang der Aufnahme und Weiterleitung des Schalls bis zum Trommelfell, das die Schallenergie in Form von mechanischen Schwin-

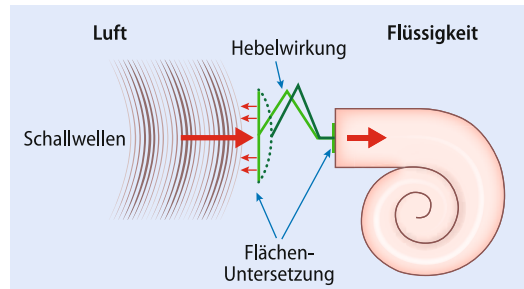
gungen an die Gehörknöchelchenkette weitergibt. Durch die charakteristischen Resonanzeigenschaften des Außenohres wird der Schalldruck bei Erwachsenen im Frequenzbereich von 2,5 kHz um bis zu 20 dB verstärkt. Bei Säuglingen und Kleinkindern liegt der Resonanzbereich aufgrund des kleineren Gehörgangsvolumens bei höheren Frequenzen. Diese Altersabhängigkeit ist im Rahmen der objektiven Audiometrie bei Kindern sowie der Anpassung von Hörhilfen zu beachten, da es frequenzabhängig zu Pegelabweichungen von bis zu 20 dB kommen kann (► Abschn. 2.3.2, ■ Abb. 2.17).

- **Für das Richtungshören hat das Außenohr eine besondere Bedeutung, da die Ohrmuschel und ihre benachbarten Strukturen den Schall in Abhängigkeit von der Einfallrichtung besonders im Hochtonbereich stark modifizieren. Bei lateralem Schalleinfall spielt das beidohrige Hören eine besonders wichtige Rolle. Die dabei entstehenden interauralen Laufzeit-, Phasen- und Intensitätsdifferenzen sowie die interauralen Frequenzunterschiede werden durch binaurale Interaktion bereits auf Hirnstammebene analysiert.**

Der funktionelle Zustand des Außenohres hat einen entscheidenden Einfluss auf die Schallübertragung zum Mittelohr. So können Verengungen des äußeren Gehörgangs durch Cerumen oder Fremdkörper, Verletzungen, entzündliche Prozesse oder Fehlbildungen sowie pathologische Veränderungen des Trommelfells zu Schallleitungsstörungen führen (► Abschn. 6.3).

2.1.4 Mittelohr

Die funktionelle Bedeutung des Mittelohres besteht in der Weiterleitung der Schallenergie in Form von Schwingungen der Gehörknöchelchenkette bis zur Steigbügel Fußplatte im ovalen Fenster und damit in das mit Flüssigkeit gefüllte Innenohr. Das Mittelohr stellt einen Impedanzwandler dar, der den hohen Schallwellenwiderstand der Innenohrflüssigkeit durch die Flächentransformation vom etwa 60 mm² großen Trommelfell auf das nur etwa 3 mm² große ovale Fenster und die Hebelwirkung der Gehörknöchelchen überwindet (■ Abb. 2.2). Dadurch

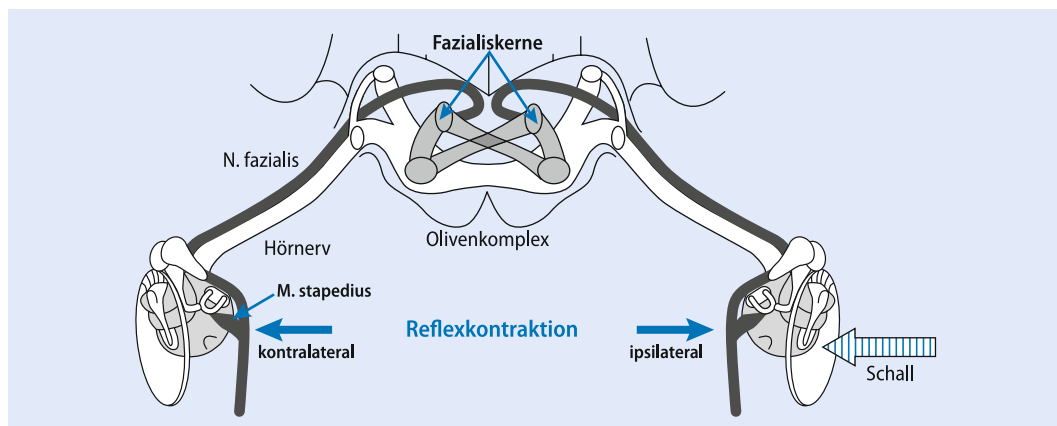


■ **Abb. 2.2** Prinzip der Impedanzwandlung durch das Mittelohr; der hohe Eingangswiderstand der Innenohrflüssigkeit wird durch die Flächenuntersetzung vom Trommelfell auf das ovale Fenster und Hebelwirkung des Trommelfell-Gehörknöchelchen-Systems (TGS) überwunden (modifiziert nach: Probst et al. 2008, mit freundlicher Genehmigung des Thieme Verlags)

werden frequenzabhängige Pegelerhöhungen von bis zu 50 dB erreicht. Ohne diese Impedanzwandlung würden mehr als 98 % der übertragenden Schallenergie an der Grenzfläche zum Innenohr reflektiert.

Durch die Bewegungen des Trommelfell-Gehörknöchelchen-Systems (TGS) kommt es zu einer Volumenverschiebung der Innenohrflüssigkeit hinter der Steigbügel Fußplatte, die mit einem elastischen Ringband im ovalen Fenster eingelagert ist. Die Schallübertragungsfunktion des Mittelohres ist wie die des Außenohres frequenzabhängig und beträgt maximal 30 dB bei 1 kHz. Treten große statische Druckschwankungen auf, wie dies beim Schlucken, Husten, Niesen, im Fahrstuhl, Schnelzug oder Flugzeug vorkommen kann, bewegen sich die Ossikel aufgrund ihrer gelenkigen Verbindung gegenläufig, um eine Druckübertragung auf das Innenohr zu verhindern.

Wird die Masse der schwingenden Strukturen des Mittelohres durch pathologische Veränderungen, wie z. B. einer Ergussbildung, erhöht, so wird besonders die Übertragung hoher Frequenzen gedämpft, sodass Schallleitungsschwerhörigkeiten im Hochtonbereich resultieren. Auch Veränderungen der Reibung wirken als Folge pathophysiologischer Veränderungen des Mittelohres auf die Schallübertragung besonders im hohen und mittleren Frequenzbereich. Verändert sich dagegen die Steifigkeit des schwingenden Systems, wie z. B. bei der Otosklerose, Pauken-Unterdruck oder Mittelohr-



■ **Abb. 2.3** Akustikofazialer Reflexbogen zur Auslösung des Stapediusreflexes; bei akustischer Reizung werden die Fasern des N. facialis über gekreuzte und ungekreuzte Fasern des Olivenkomplexes aktiviert (modifiziert nach Lehnhardt u. Laszig 2009, mit freundlicher Genehmigung des Thieme Verlags).

missbildungen, werden besonders die tieferen Frequenzen gedämpft.

Für die Erfüllung seiner physiologischen Funktion muss das Mittelohr luftgefüllt sein, damit auf beiden Seiten des Trommelfells der gleiche Druck besteht. Die Eustachische Röhre, die sich u. a. beim Schlucken oder Gähnen öffnen kann, unterstützt den Druckausgleich. Ändern sich Druckverhältnisse bei entzündlichen Schleimhautveränderungen, Insuffizienz der Tube oder unter dem Einfluss von Narkosegasen, können ebenfalls Schallleitungsstörungen entstehen.

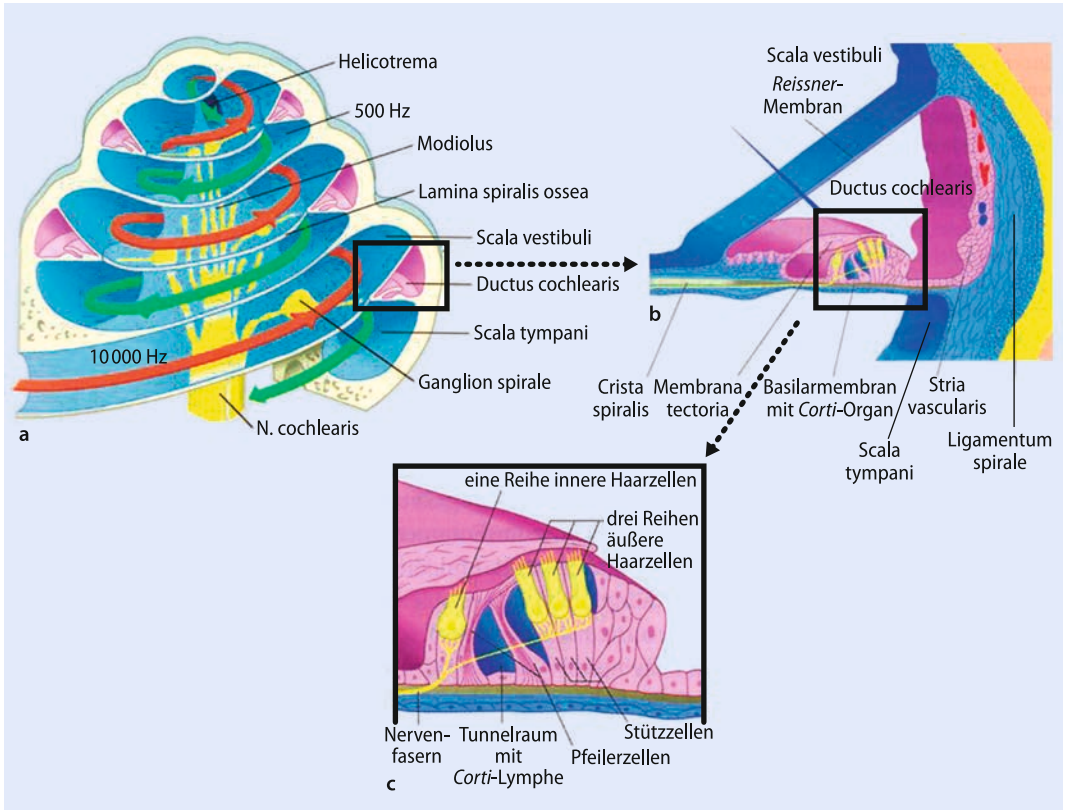
➤ **Der objektiven Überprüfung des funktionellen Status des Mittelohres, der sich bei Kindern täglich verändern kann, kommt im Rahmen kindlicher Hörprüfungen eine entscheidende Bedeutung zu. Die Schwingungsfähigkeit (Komplianz) des Trommelfell-Gehörknöchelchen-Systems (TGS) ist eine der wesentlichen Zielgrößen der objektiven Audiometrie im Kindesalter (► Kap. 3).**

Die beiden **Mittelohrmuskeln** regulieren und verändern den Spannungszustand des Schallleitungsapparates. Bei Kontraktion des M. tensor tympani wird das Trommelfell leicht nach innen gezogen und gespannt, woraus eine erhöhte Empfindlichkeit der Schallüberleitung auf das Innenohr resultiert. Die Kontraktion des M. stapedius erfolgt reflektorisch bei Einwirkung von Schalldruckpegeln ab etwa 80 dB HL über einen polysynaptischen akusti-

kofazialen Reflexbogen, dessen Kerngebiete im unteren Hirnstamm liegen (■ Abb. 2.3).

Die reflektorische Kontraktion des M. stapedius führt zu einer Versteifung der Aufhängung der Steigbügelfußplatte im ovalen Fenster und einer Versteifung des Gelenkes zwischen Amboss und Steigbügelkopf, wodurch die Schallüberleitung niedriger und mittlerer Frequenzen auf das Innenohr gedämpft wird. Es handelt sich dabei um ein extrem dynamisches System, das als Hochpassfilter wirkt. Es erleichtert die Kommunikation in schwierigen Hörsituationen durch Unterdrückung von Störschall niedriger und mittlerer Frequenz. Eine oft diskutierte Lärmprotektion ist aufgrund der hohen Latenz der Reflexkontraktion, die bis zu 200 ms beträgt und somit besonders von schädlichen Impulsschallen unterlaufen wird, sowie der fehlenden Dämpfung im Hochtonbereich und der Ermüdung der Kontraktion wohl eher von untergeordneter Bedeutung.

➤ **Die objektive Überprüfung der Auslösbarkeit des Stapediusreflexes im Rahmen der Impedanzaudiometrie ist ein weiterer wichtiger Bestandteil der objektiven Audiometrie im Kindesalter. Aus den Reflexschwellen oder einem bestimmten Ausfallmuster lassen sich Rückschlüsse auf die Art und den Grad einer Schwerhörigkeit ziehen und der Ort einer möglichen Funktionsstörung näher eingrenzen (► Kap. 3).**



■ **Abb. 2.4** a) Querschnitt durch die Cochlea; b) mit Ausschnitt aus der Scala media; und c) Detailansicht des Corti'schen Organs (modifiziert nach Lenarz u. Boenninghaus 2012)

2.1.5 Innenohr

Das Innenohr besteht aus einem häutigen und knöchernen Labyrinth, das von dem festen Knochen des Felsenbeines umgeben ist. Es gliedert sich funktionell in das Vestibularorgan mit dem Vorhof- und Bogengangsystem sowie die Hörschnecke (Cochlea), dem »eigentlichen« Hörorgan. Während das Vestibularorgan dem Gleichgewichts-, Dreh- und Beschleunigungssinn dient, sorgt die Cochlea für die Weiterleitung und Verarbeitung akustischer Reize, die sowohl über Luft- als auch Knochenleitung das Innenohr erreichen können. Die anatomisch-physiologischen Grundlagen der Cochlea sind für das Verständnis der Entstehung otoakustischer Emissionen (OAE) und auch der akustisch evozierten Potenziale (AEP) von großer Bedeutung.

Cochlea

Die Cochlea beinhaltet drei flüssigkeitsgefüllte übereinander liegende Gangsysteme: die am ovalen Fenster beginnende Scala vestibuli, die in der Mitte liegende Scala media (Ductus cochlearis) sowie die Scala tympani, die mit dem runden Fenster einen Abschluss zur Paukenhöhle bildet (■ Abb. 2.4). Die mit Perilymphe gefüllten Scala vestibuli und Scala tympani gehen an der Schneckenspitze (Helicotrema) ineinander über. Die Scala media ist mit Endolymphe gefüllt und enthält das Corti'sche Organ, die Tektorialmembran und seitlich die Stria vascularis, die mit ihrem feinen Kapillarnetz der Energieversorgung und Endolymphproduktion dient. Sie bildet das häutige Labyrinth, das mit den Endolymphräumen des Vestibularorgans verbunden ist (■ Abb. 2.4). Scala vestibuli und Scala media sind durch die Reissner'sche Membran voneinander

getrennt, die Basilarmembran trennt Scala media und Scala tympani voneinander.

Das Corti'sche Organ (■ Abb. 2.4) liegt auf der Basilarmembran und enthält drei Reihen äußerer und eine Reihe innerer Haarzellen (OHC, IHC), die an ihrer Oberfläche feine, regelmäßig angeordnete und über feine molekulare Brücken (*tip links* und *side links*) untereinander verbundene Stereozilien aufweisen. Eingebettet sind die OHC und IHC in ein System aus Stütz- und Nährzellen. Über dem Corti'schen Organ liegt die Tektorialmembran, die ausgehend von der Lamina spiralis ossea das Corti'sche Organ überdeckt und Kontakt zu den Stereozilien der OHC aufnimmt. Die Innervation des Corti'schen Organs erfolgt über die afferenten (aufsteigenden) und efferenten (absteigenden) Fasern des Hörnerven, dessen Zellkörper das Spiralganglion bilden. Die Axone bilden im inneren Kegel der Cochlea (Modiolus) den Hörnerven, der sich im inneren Gehörgang mit den Anteilen des Gleichgewichtsnervs zum Nervus vestibulo-cochlearis (VIII. Hirnnerv) zusammenschließt.

Wanderwellentheorie

Die Grundlage für die Beschreibung der mechanischen Vorgänge in der Cochlea liefert die Wanderwellentheorie nach Georg von Békésy, der zufolge sich bei Anregung der Stapesfußplatte eine Wanderwelle ausbreitet, deren Schwingungseigenschaften durch die Hydrodynamik der Innenohrstrukturen bestimmt werden. So ist die Basilarmembran am Schneckeneingang in der Nähe des ovalen Fensters schmal und steif, in der Nähe der Schnecken spitze (Helikotrema) jedoch breit und weich, wobei gleichzeitig die Kanaltiefe abnimmt. Bei akustischer Anregung wird die flüssigkeitsgefüllte Scala media mit all ihren Strukturen auf- und abwärts bewegt. Dabei erfährt die Amplitude der Welle entlang ihres Weges einen langsamen Anstieg bis zu einem Maximum, von wo aus sie abrupt abnimmt (■ Abb. 2.5a). Der Ort maximaler Auslenkung ist frequenzabhängig, wobei hohe Frequenzen in der Schneckenbasis und tiefe Frequenzen in der apikalen Windung abgebildet werden (Ortsprinzip). Somit findet auf der Basilarmembran im Innenohr eine Frequenzauflösung nach dem Ortsprinzip statt. Die Laufzeitunterschiede der Wanderwellen zwischen den höchsten und niedrigsten Frequenzen betragen bei

einer Länge der Basilarmembran von etwa 32 mm mehr als 10 ms. Diese Laufzeitdifferenz, die auch bei der Registrierung der OAE und AEP zum Ausdruck kommt, hängt nicht mit der Schallausbreitung in der Innenohrflüssigkeit zusammen. Sie würde für die Strecke vom Steigbügel bis zur Schnecken spitze nur etwa 20 μ s betragen.

➤ **Da von Békésy seine Experimente nicht am lebenden Innenohr durchführte, kannte er nur die passive Wanderwelle. Die aktiven Prozesse, die für die extrem hohe Empfindlichkeit und gute Frequenzauflösung des Gehörs verantwortlich sind, wurden erst durch die Entdeckung der Motilität der OHC nachgewiesen.**

Diese schnellen Oszillationen verstärken die Amplitude der passiven Wanderwelle um das bis zu 100-fache (■ Abb. 2.5 B). Der Motor für diese Beweglichkeit ist das Prestin, ein Eiweißmolekül, das in den Membranen der OHC zu finden ist. Bei einer Erregung der OHC werden die Moleküle zu schnellen Bewegungen von bis zu 30.000 Oszillationen pro Sekunde angeregt (■ Abb. 2.5 B). Neben dieser schnellen Motilität sind die OHC unter dem Einfluss des efferenten Systems auch zu langsamen Bewegungen in der Lage. Diese zentralnervöse Steuerung sorgt dafür, dass der cochleäre Verstärker in Abhängigkeit von der Umgebungslautstärke immer am optimalen Arbeitspunkt eingestellt wird.

Otoakustische Emissionen (OAE)

Die schnelle Motilität der OHC stellt die physiologische Grundlage der Entstehung otoakustischer Emissionen (OAE) dar. Im Jahre 1977 registrierte David Kemp Schallemissionen im äußeren Gehörgang des Menschen nach akustischer Stimulation mit Kurzzeitreizen, die auf die Aktivität der OHC zurückgeführt wurden (Kemp 1978). Die bis dahin nur postulierte Existenz eines cochleären Verstärkers, der für die hohe Empfindlichkeit und Frequenzselektivität des Innenohres verantwortlich ist, war damit indirekt bewiesen. Die Registrierung der OAE ist seit den 1990er Jahren zu einem festen Bestandteil der objektiven Audiometrie geworden.

Man unterscheidet die klinisch wenig bedeutsamen spontanen OAE (SOAE), die als lokale Störungen des aktiven Verstärkerprozesses interpretiert werden, von den evozierten OAE (EOAE). Deren

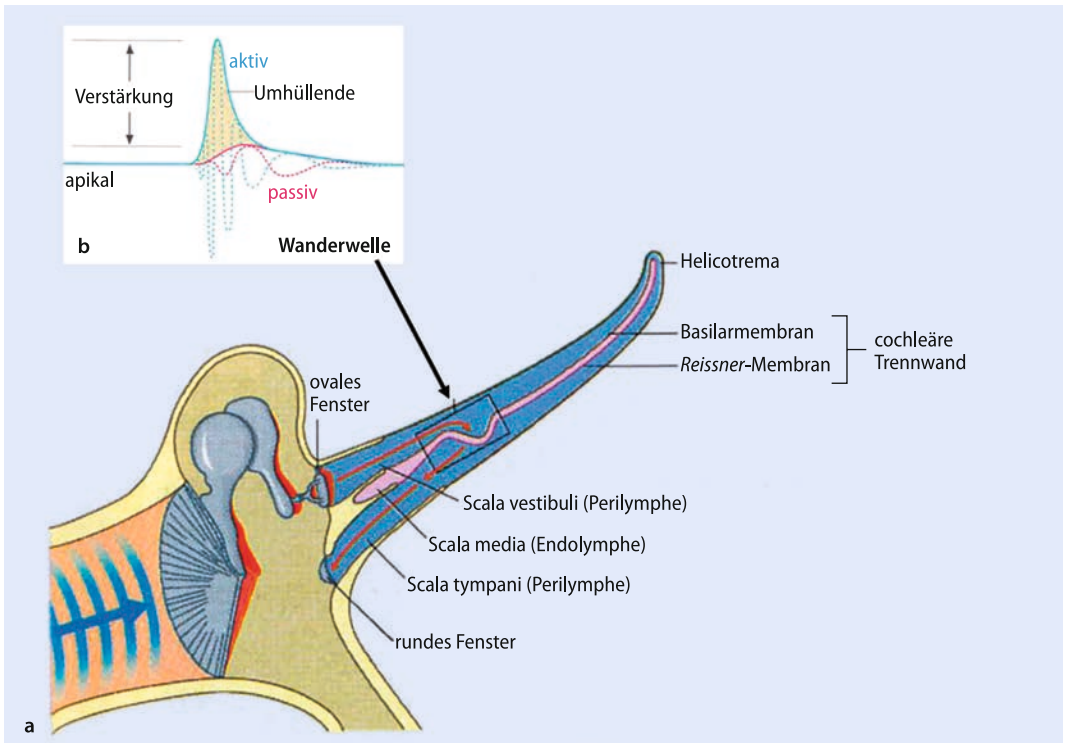


Abb. 2.5 Entstehung einer Wanderwelle bei akustischer Anregung. **a)** der Ort ihrer maximalen Auslenkung ist frequenzabhängig (Ortsprinzip) (modifiziert nach Lehnhardt u. Laszig 2009, mit freundlicher Genehmigung des Thieme Verlags); **b)** durch schnelle Oszillationen der OHC wird die passive Wanderwelle aktiv verstärkt und dabei die Frequenzelektivität erhöht (modifiziert nach Lenarz u. Boenninghaus 2012)

Entstehung wird dadurch erklärt, dass durch die schnellen Oszillationen der OHC nach oder während der akustischen Reizung eine retrograde Wanderwelle entsteht, die das Trommelfell-Gehörknöchelchen-System zur Schwingung bringt, so dass akustische Energie in den äußeren Gehörgang abgestrahlt wird. Das Frequenzspektrum der TEOAE spiegelt dabei den Frequenzgehalt des anregenden akustischen Signals wider (► Abschn. 4.1.3, ■ Abb. 4.7).

Die Messung der OAE erlaubt eine objektive Beurteilung der Funktionsfähigkeit der OHC und schließt damit eine diagnostische Lücke zwischen Impedanzaudiometrie und BERA (► Kap. 3 und ► Kap. 5). Da die TEOAE bei annähernd 100 % aller hörgesunden Neugeborenen zu registrieren sind, eignet sich das schnell durchführbare, nicht-invasive Verfahren ihrer Registrierung auch als Screeningmethode zur objektiven Früherkennung kindlicher Hörschäden bis zur Ebene der OHC.

Entstehung cochleärer Potenziale

Grundlage für die Entstehung cochleärer Potenziale ist die unterschiedliche Verteilung geladener Teilchen (Ionen) in den verschiedenen Flüssigkeitsräumen der Cochlea. Daraus resultiert bereits im Ruhezustand eine Spannungsdifferenz zwischen dem Zellinneren der OHC und IHC sowie der umgebenden Endolymphe der Scala media von mehr als 100 mV, die durch permanente Energiezufuhr aufrechterhalten wird.

Die Verstärkung der Wanderwelle durch die OHC liefert bei niedrigen Schalldruckpegeln von bis zu 50 dBHL die Energie zur Erregung der IHC. Bei der Auf- und Abwärtsbewegung der cochleären Trennwand kommt es zwischen Corti-Organ und der Tektorialmembran zu einer Relativbewegung. Die dadurch ausgelöste Abscherung öffnet wie auch bei den OHC die Ionenkanäle, sodass aufgrund unterschiedlicher Ladungsverteilungen in der Cochlea

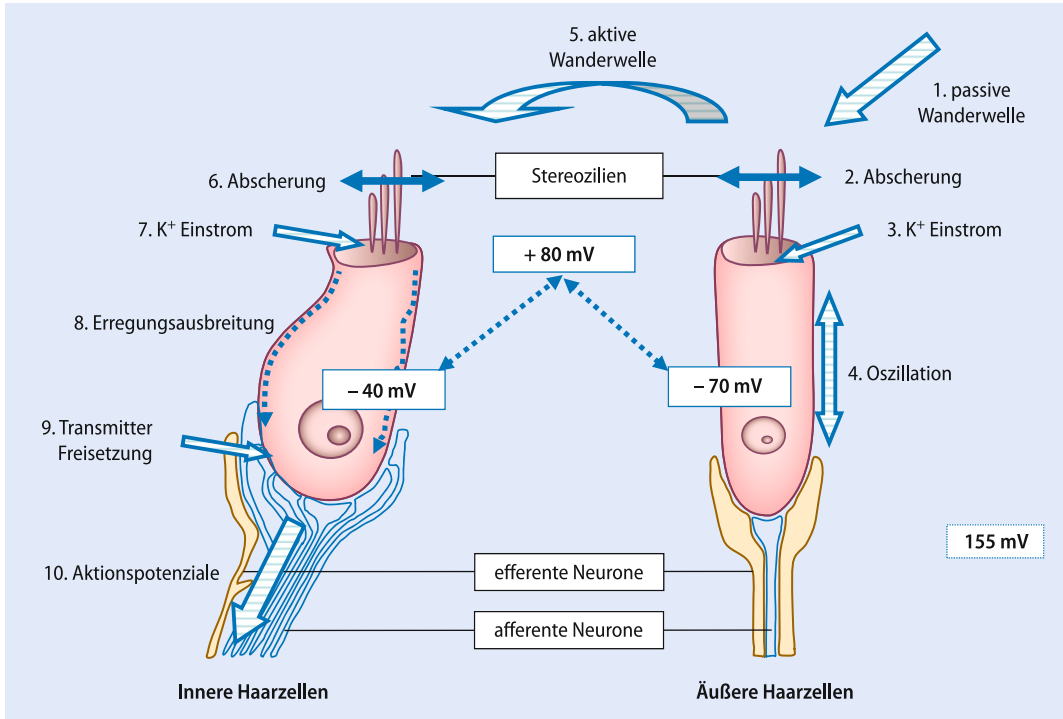


Abb. 2.6 Vorgänge der Reiz-Erregungstransformation an den inneren (IHC) und äußeren (OHC) Haarzellen sowie Entstehung und Weiterleitung von Nervenimpulsen (Aktionspotentialen) an den afferenten Hörnervenfaser

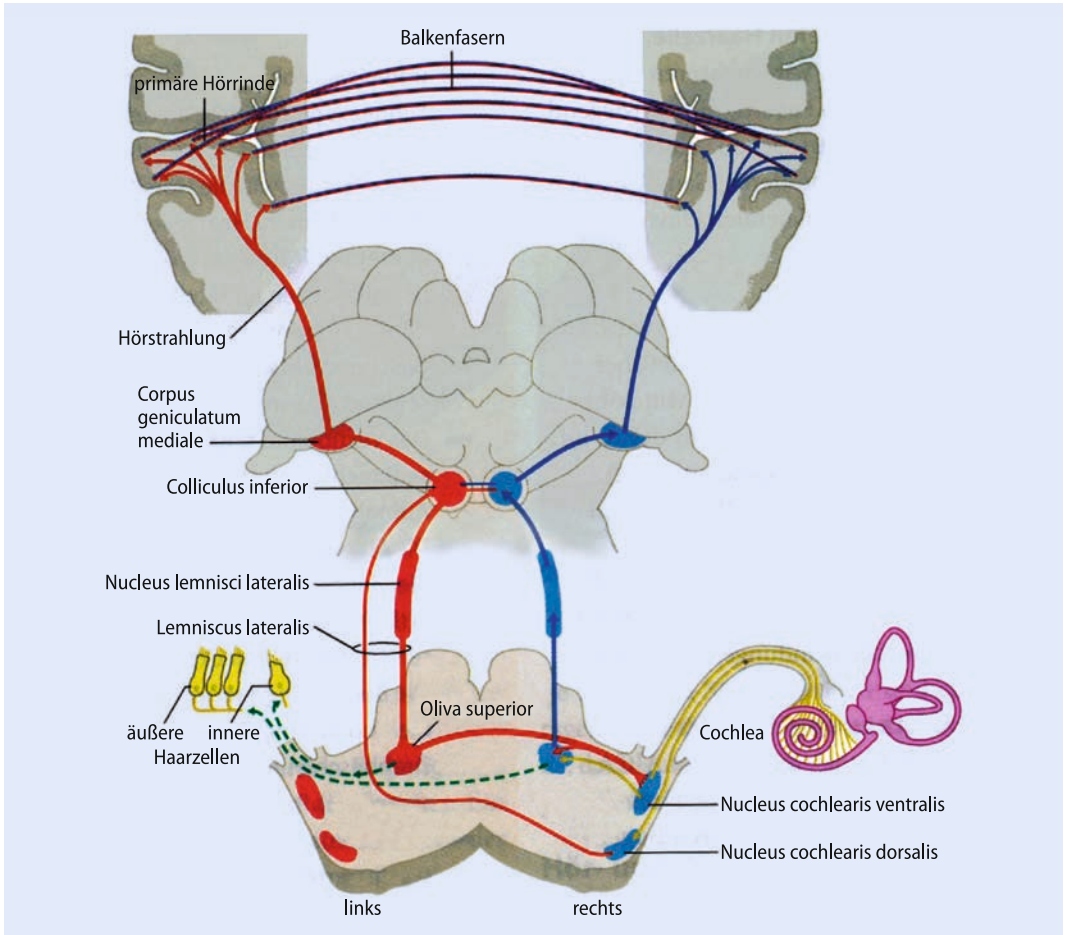
die positiv geladenen Kalium-Ionen in das Zellinnere eindringen und die Zelle depolarisieren. Dies führt zu einer Erregungsausbreitung, der Ausschüttung von Transmittersubstanz und schließlich zur Entstehung und Weiterleitung von Nervenimpulsen (Aktionspotentialen) an den afferenten Hörnervenfaser (Abb. 2.6).

Die beschriebenen Erregungsvorgänge an den Haarzellen und die damit verbundenen Spannungsveränderungen in der Cochlea sowie auch die Erzeugung von Aktionspotentialen können als cochleäre Mikrofonpotenziale (CM), Summationspotenziale (SP) sowie Summenaktionspotenziale des Hörnervs (SAP, engl. CAP) mithilfe der Elektrocochleografie (ECoG) im »Nahfeld« zur objektiven Funktionsdiagnostik des Innenohrs registriert werden (Abschn. 5.1). Präsynaptisch erzeugen schnelle De- und Repolarisationsvorgänge die CM, Gleichspannungsänderungen an den Haarzellen während der akustischen Reizung das SP und die postsynaptisch durch den Beginn eines akustischen

Reizes ausgelöste Nervenimpulse das CAP, dessen negatives Potenzial N1 mit der ersten positive Welle J₁ der im Fernfeld ableitbaren FAEP identisch ist und die beginnende Informationsübertragung an das zentral auditorische System darstellt.

2.1.6 Hörnerv und zentrale Hörbahn

Die Erregungen der Haarzellen werden auf die dendritischen Fasern der Nervenzellen übertragen, deren Zellkörper im inneren Kegel der Cochlea (Modiolus) das Ganglion spirale bilden und deren Axone den Hauptanteil des Hörnervs bilden, der aus etwa 30.000 Fasern besteht. Dabei sind etwa 95% der schnellen, gut myelinisierten afferenten Hörnervenfaser mit den IHC verbunden. Nur wenige Afferenzen ziehen zu den OHC, wo sie zu mehreren Zellen Kontakt aufnehmen. Die OHC sind stark durch efferente Fasern innerviert, die ihren Ursprung im Olivenkomplex des Hirnstam-



■ **Abb. 2.7** Zentrale Hörbahn des Menschen; eingezeichnet sind die ipsi- und kontralateralen afferenten Faserverbindungen einer Seite; gestrichelt: efferente Verbindungen des gekreuzten und ungekreuzten olivocochleären Bündels zu den OHC und ICH (modifiziert nach Lenarz und Boenninghaus 2012)

mes haben und die langsame Beweglichkeit der OHC steuern.

Die Fasern des Hörnerven leiten auf beiden Seiten in kodierter Form die Informationen der akustischen Signale als Serie von Nervenimpulsen zur ersten Umschaltstation im unteren Hirnstamm, dem Cochleariskern (Nucleus cochlearis) (■ Abb. 2.7). Von hier aus erfolgt eine beidohrige parallele und stark divergente Verarbeitung der akustischen Information durch ipsi- und kontralaterale Projektionen über den Colliculus inferior (IC) bis in die kortikalen Regionen. So enthalten die vom IC abgehenden Projektionen im Vergleich zum Hörnerv zehnmal mehr neuronale Fasern.

Die auditorischen Kortizes der rechten und linken Seite, die mit den sekundären und tertiären Assoziationszentren verbunden sind, werden asymmetrisch innerviert und haben unterschiedliche Aufgabenschwerpunkte. Während in der linken Hemisphäre die zeitliche Verarbeitung sprachlicher Informationen im Vordergrund steht, wird rechts die spektrale Komplexität von Sprache und Musik analysiert (Picton 2011). Die tonotope Organisation der spektralen Verarbeitung, die ja bereits auf der Basalmembran repräsentiert ist, findet sich auch auf kortikaler Ebene wieder.

Objektive Audiometrie im Kindesalter

Hoth, S.; Mühler, R.; Neumann, K.; Walger, M.

2014, XIV, 369 S., Softcover

ISBN: 978-3-642-44935-2