Audiometrische Standardverfahren, Otoakustische Emissionen, Auditorisch evozierte Potentiale und Qualitätssicherung

Thomas Janssen / München

Psychoakustische (subjektive) Hörtests

Stimmgabeltests (Rinne/Weber)
Hörweitenprüfung
Reintonschwelle in Luft- und Knochenleitung (LL, KL) → Tonschwellenaudiometrie
Überschwellige Tests → Fowler, SISI, Carhart, Langenbeck
Lautheit → Kategoriale Lautheit (Hörfeldskalierung)
Freiburger Sprachverständlichkeitstest → Hörverlust für Zahlen in dB, Einsilberverständlichkeit in %
Sprachtest im Störgeräusch → z.B. Oldenburger Satztest

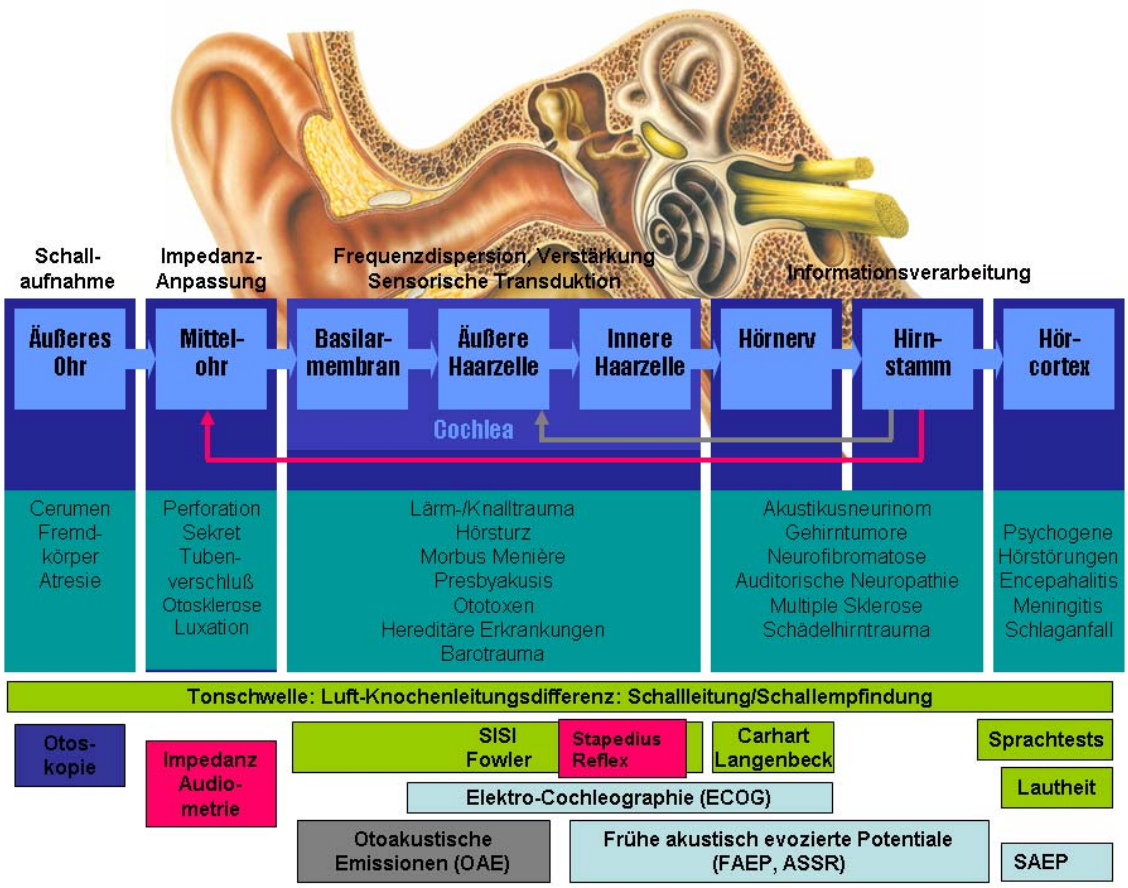
Physiologische (objektive) Hörtests

Trommelfell-Impedanz^{-1} in Abhängigkeit vom statischen Druck → Tympanometrie
Trommelfell-Impedanz^{-1}*Änderung* bei ipsi/contralateraler Stimulation → Stapediusreflex
Otoakustische Emissionen → TEOAE, DPOAE
Auditorisch evozierte Potentiale → FAEP, ASSR

Pädaudiologische Hörtests

Reflexaudiometrie (Auropalpebralreflex, Moro-Reflex)
*Verhaltensaudiometrie (*Zuwendungsreaktionen der Augen oder des Kopfes)
Ablenkaudiometrie (Konditionierung durch Belohnung, Visuell Re-Enforcement)
Spielaudiometrie (Aktive Mitarbeit)
Sprachtests (Mainzer Kindersprachtest, Göttinger Kindersprachverständnistest, Heidelberger Konsonant-Vokal-Konsonant Test, Oldenburger Zweisilber-Kinderreimtest (OLKI), Würzburger Kindersprachtest, AAST)

Zum besseren Verständnis der Testsverfahren soll im Folgenden kurz auf die Funktion und die Funktionsstörungen des Hörorgans eingegangen werden. Das Hörorgan kann man sich als eine Kette hinter einander geschalteter Schall verarbeitender Systeme vorstellen. Das äußere Ohr dient der Schallaufnahme und Schallverstärkung (Trichter, Gehörgangs-resonanz), das Mittelohr der Anpassung der unterschiedlichen Impedanzen der Luft und der Innenohrlymphe (Druckerhöhung durch unterschiedliche Flächen des Trommelfells und Steigbügelfußplatte, Kraftverstärkung durch Hebelwirkung der Gehörknöchelchen), die Cochlea zur mechanischen Verstärkung des Schalls (Äußere Haarzellen als cochleäre Verstärker) sowie der Umsetzung des mechanischen Reizes (Stereozilienauslenkung der Inneren Haarzellen) in elektrische Impulse (Aktionspotentiale auf den Hörnervenfasern der Inneren Haarzellen). Die weitere Verarbeitung erfolgt auf den verschiedenen Stufen der neuralen Hörbahn (Cochleariskern, oberer Olivenkomplex, Lemniscus lateralis, Colliculus inferior, Subcortex, Cortex).



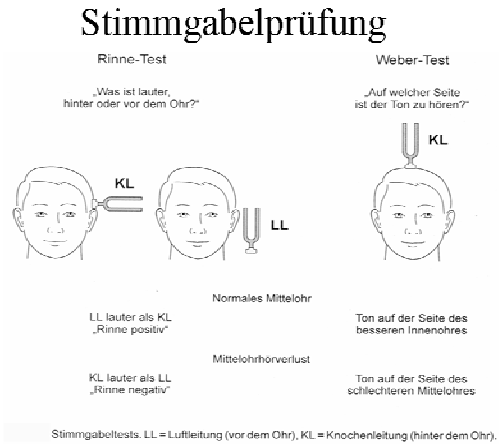
Die genannten Verfahren dienen dazu, Ort und Grad einer Schwerhörigkeit zu bestimmen. Die Tonschwellenaudiometrie in Luft- und Knochenleitung kann nur zwischen Schalleitungsschwerhörigkeit (äußeres Ohr, Mittelohr) und Schall-empfindungsschwerhörigkeit (cochleär, neural) unterscheiden. Die überschwelligen subjektiven Tests haben das Ziel, die Art der Schallempfindungsschwerhörigkeit zu bestimmen. Deren Aussagekraft ist aber beschränkt. Die OAE, die die cochleäre Funktion, und die AEP, die die neurale Aktivität erfassen können, müssen in Hinblick auf eine genauere Topodiagnostik zum Einsatz kommen. Wenn auch über die Tonschwellenaudiometrie eine Mitteohrschwerhörigkeit erkannt werden kann, so muss die Tympanometrie bemüht werden, um die Art der Mittelohrschwerhörigkeit (Otosklerose, Paukenerguß, Tubenfunktionsstörung, Kettenluxation) zu bestimmen.

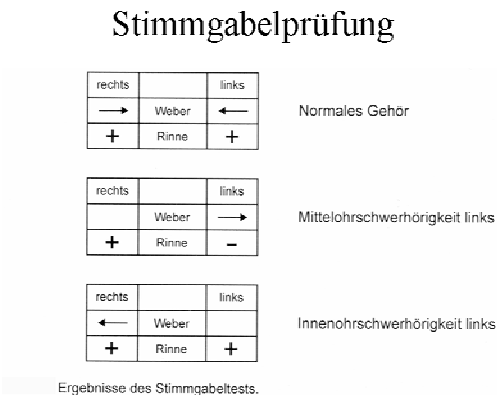
Im Besonderen für die Hörgeräteanpassung ist die Bestimmung des Recruitments (Lautheitsausgleich) wichtig. Dies gelingt mit Hilfe der Hörfeldskalierung bei Erwachsenen und älteren Kindern. Bei kleinen Kindern können nur die Stapediusreflexschwelle und die DPOAE-Wachstumsfunktionen Anwendung finden.

Die Tonschwellenaudiometrie ist die am häufigsten durchgeführte Untersuchungsmethode, da sie die Funktionsstörung frequenzspezifisch und quantitativ erfassen kann. Prinzipiell sollen alle möglichen Verfahren zur Diagnostik eingesetzt werden. Je mehr Tests, umso besser die Diagnostik. Je genauer die Kenngrößen der gestörten Hörfunktion bestimmt werden können, umso besser gelingt die Anpassung einer Hörhilfe. Bei kleinen Kindern ist der Einsatz subjektiver Tests problematisch. Hier müssen die objektiven Tests verstärkt zum Einsatz kommen.

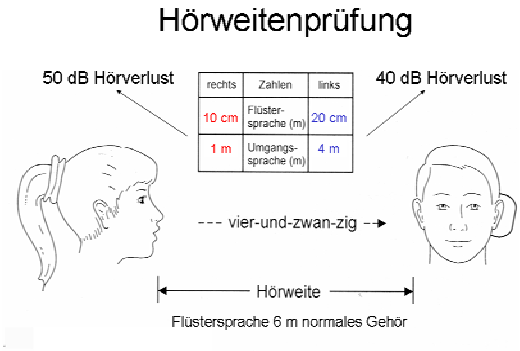
Psychoakustische (subjektive) Hörtests

Stimmgabeltests (Rinne/Weber)
Rinnetest: Stimmgabel (440Hz) wird angeschlagen und vor das Ohr gehalten (LL), dann auf das Mastoid gesetzt (KL). Frage: Wo ist der Ton lauter? Vor dem Ohr oder hinter dem Ohr?
Antwort: vor dem Ohr → Keine Schallleitungsschwerhörigkeit
Antwort: hinter dem Ohr → Schallleitungsschwerhörigkeit
Webertest: Stimmgabel auf Vertex gesetzt. Frage: Wo wird der Ton gehört?
Antwort: Mitte → Normale Hörfunktion oder seitengleiche Hörminderung
Antwort: Links oder rechts → Innenohrschwerhörigkeit rechts oder links oder Mittelohrschwerhörigkeit links oder rechts



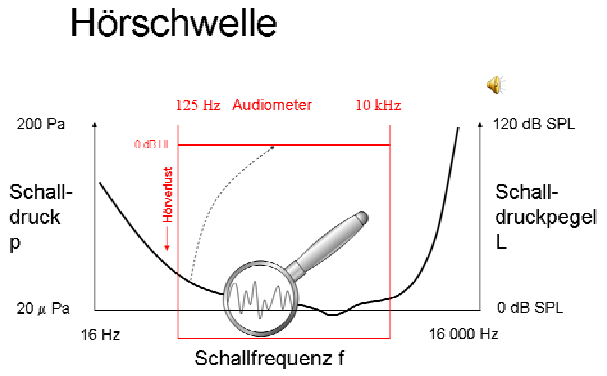


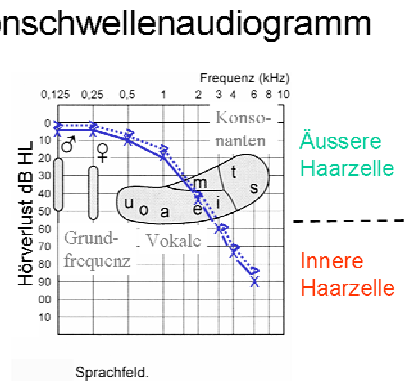
Hörweitenprüfung
Nachsprechen zweistelliger Zahlen in Flüstersprache oder Umgangssprache in unterschiedlichem Abstand zwischen Patient und Untersucher. Abstand, bei dem gehört und richtig nachgesprochen wird, gibt groben Hinweis auf Grad der Hörstörung.

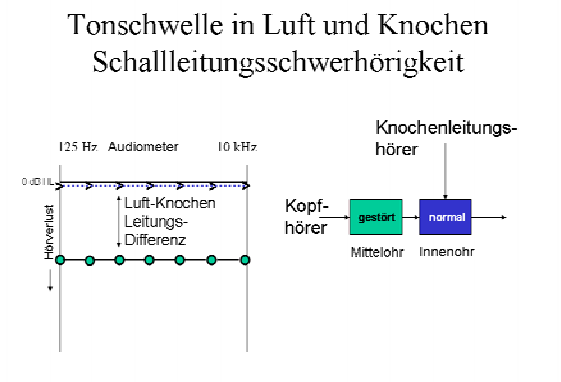


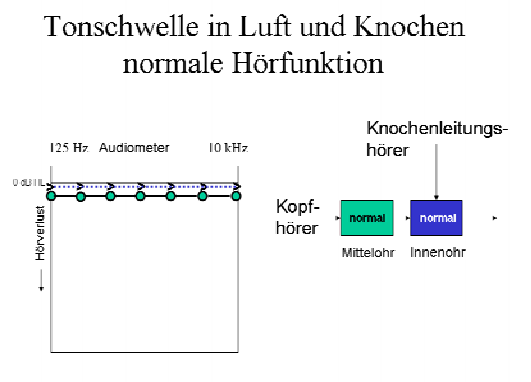
Reintonschwelle
in Luft- und Knochenleitung (LL, KL) → Tonschwellenaudiometrie.
Prüfschall über Kopfhörer (LL) (Einschluss des Mittelohres) oder Knochenleitungshörer (KL) (Ausschluss des Mittelohres). Frequenzbereich 125 bis 10 kHz in Oktavschritten, Pegelbereich -10 dB HL bis 110 dB (abhängig von Frequenz und Schallzufuhr (LL, KL). Messvorschrift: Beginn mit LL des besseren Ohres (aus Vortests Stimmgabel, Sprachabstandsprüfung), dann LL am Gegenohr, dann KL. Ermittelung des Schwellenpegels durch Aufsteigende Methode oder Eingabelungsmethode. Symbole: LL rechts „o“ verbunden durch (rote) Linien, LL links „x“ verbunden durch (blaue) Linien, KL rechts „>“ verbunden durch gestrichelte (rote) Linien, KL links „<“ verbunden durch gestrichelte (blaue) Linien.

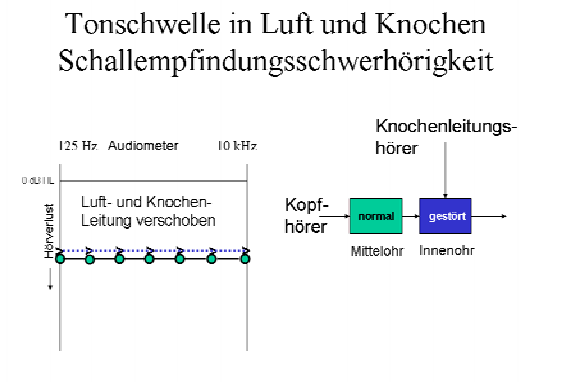
Sowohl bei LL als auch bei KL wird die Hörschwelle Normalhörender bei jeder Frequenz als Bezugswert (0 dB) herangezogen. Im Tonschwellenaudiogramm wird der Hörverlust in dB HL gegenüber diesem Bezugswert eingetragen.











Überschwellige Tests

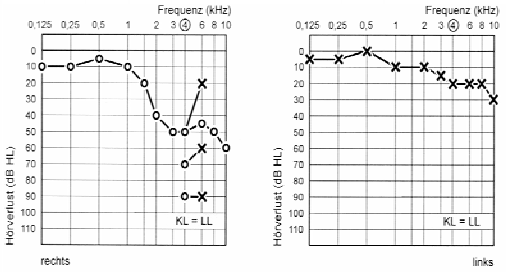
Fowler (Lautheitsausgleichstest). Vergleich des Lautheitseindrucks beider Ohren. Bedingung: Seitendifferenz mehr als 30 dB. Bei Lautheitsausgleich → Recruitment

SISI (short increment sensitivity index): Wieviele von 20 dargebotenen 1-dB Pegelsprüngen eines Dauertons (20 dB über Hörschwelle) werden erkannt; > 60% → Recruitment

Carhart (Schwellenschwundtest): Wenn bei einem Dauerton die Schwelle um mehr als 30 dB abwandert → neurale Schädigung

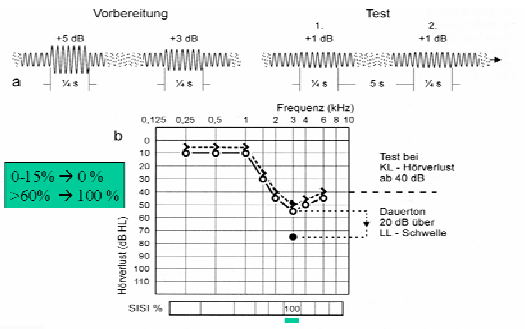
Geräuschaudiometrie nach Langenbeck (Mithörschwelle): Erhöhung der Mithörschwelle → neurale Schädigung.

Fowler-Test



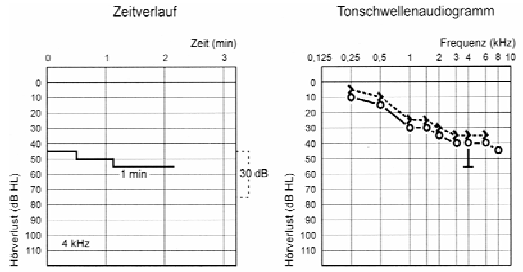
Fowlertest bei Hochtonhörverlust rechts. Lautheitsvergleich bei 4 kHz. Hörverlust rechts 50 dB, links 20 dB. Die Werte der linken Seite sind rechts auf der benachbarten Linie (eigentlich 6 kHz) eingetragen, aber durch das x für den Pegel links (4 kHz) gekennzeichnet. Bei 90 dB ist die Differenz von 30 dB ausgeglichen. *Lautheitsausgleich rechts*: Innenohrschädigung.

Sisi-Test



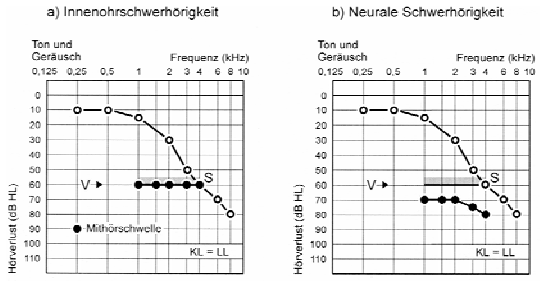
a, b **a** Der SISI-Test bei 3 kHz wird durch die Darbietung einiger Pegelsprünge von 5 dB und 3 dB vorbereitet. Im Test wird ermittelt, wieviele der 20 angebotenen 1 dB-Sprünge wahrgenommen werden. **b** Eintragung in das Tonschwellenaudiogramm.

Schwellenschwundtest (Carhart)



Schwellenschwund bei Innenohrschaden im Zeitverlauf und im Tonschwellenaudiogramm. Im Tonschwellenaudiogramm wird ein begrenzter Schwellenschwund mit einem Querstrich beendet.

Geräuschaudiometrie



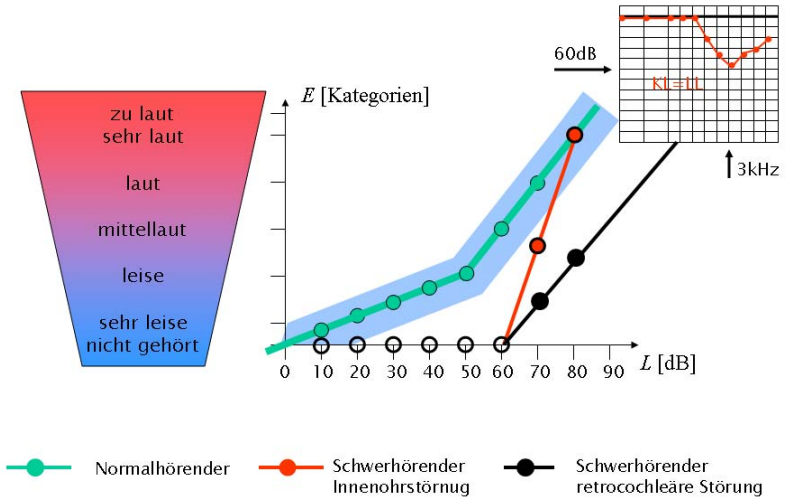
a,b Geräuschaudiogramm bei Innenohr- und neuraler Schwerhörigkeit. V: eingestellter Pegel des Vertäubungsgeräusches, S: Schnittpunkt von Rauschpegel und Hörschwelle.

Lautheit

Kategoriale Lautheit (Hörfeldskalierung)

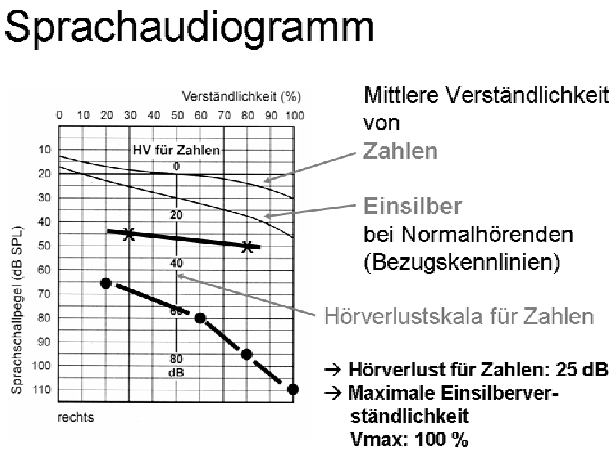
Bewertung der empfundenen Lautheit auf einer vorgegebenen Kategorialskala (z.B. nicht gehört, leise, mittellaut, laut, sehr laut, zu laut). Bei Innenohrschwerhörigkeit mit Recruitment gibt der Patient bei hohen Reizpegeln ein normales Lautheitsempfinden an. Bei kleinen Reizpegeln wird entsprechend dem Hörverlust nicht gehört → Versteilung der Lautheitsfunktion. Bei der Schallleitungschwerhörigkeit und der neuralen Schwerhörigkeit erfolgt eine Verschiebung der Lautheitsfunktion entlang der X-Achse. Hier gibt es auch bei hohen Reizpegeln keinen Lautheitsausgleich.

Lautheitsskalierung

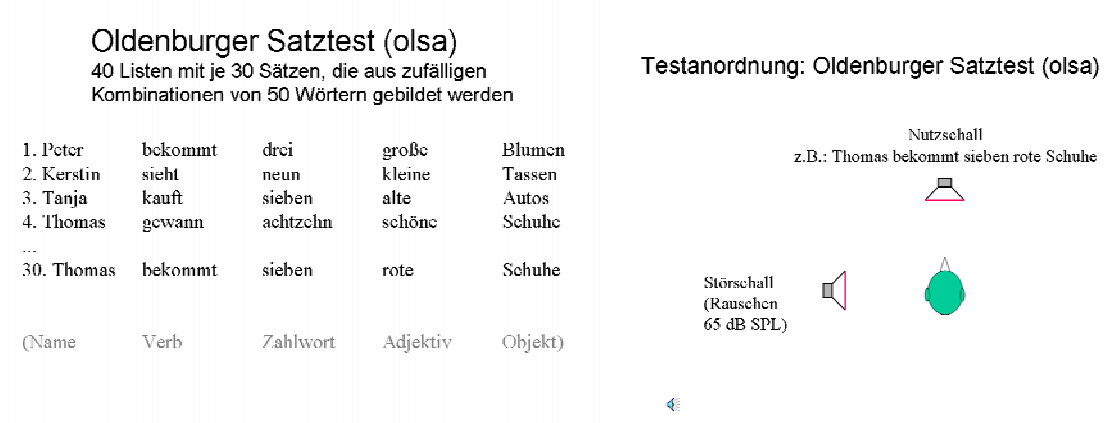


Sprachtests

Freiburger Sprachtest: Zahlentest (10 Gruppen zu je 10 zweistelligen Zahlen) + Einsilbertest (20 Gruppen zu je 20 Einsilbern)
Ergebnis:
1. Hörverlust für Zahlen in dB = Sprachpegel, bei dem der Patient 50% der Zahlen versteht. Startpegel 20 dB über Hörschwelle bei 500 Hz, nächster Pegel 5 + Startpegel.
2. Sprachverstehen der Einsilber in % bei Sprachpegel 65, 80, 95, 110 dB SPL.



Oldenburger Satztest: Ermittlung der Sprachverständlichkeitsschwelle für Sätze im Störgeräusch = Ermittlung des Signal-Rausch-Verhältnisses, bei dem 50% der Sätze einer Testliste (40 Listen mit je 30 Sätzen) verstanden werden.



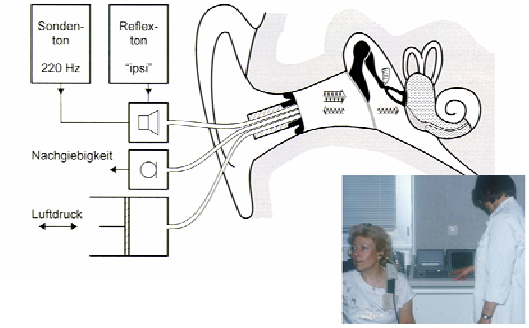
Physiologische (objektive) Hörtests

Tympanometrie

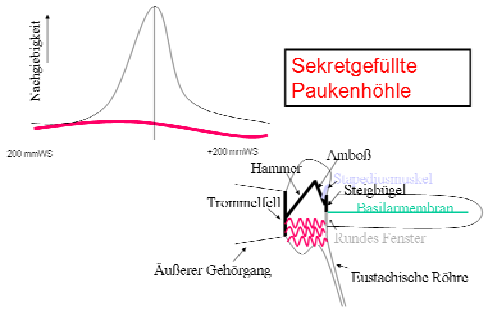
Das Tympanometer misst die Nachgiebigkeit (Compliance = Impedanz $^{-1}$) des Trommelfells in Abhängigkeit des im Gehörgang mittels einer Pumpe eingeleiteten Über - und Unterdrucks (Tympanogramm). Beim Überdruck (bis +200 daPa) wird das Trommelfell in die Paukenhöhle hineingedrückt, beim Unterdruck (bis- 400 daPa) wird das Trommelfell in den Gehörgang hineingezogen. Mit zunehmendem Über- bzw. Unterdruck nimmt die Beweglichkeit des Trommelfells immer mehr ab. Bei normaler Mittelohrfunktion erhält man eine Glockenkurve mit maximaler Compliance um den Atmosphärendruck, und minimaler Compliance bei den Extremwerten +200 und -400 daPa (Glockenkurve mit großer Compliance). Bei der Otosklerose ist wegen der eingeschränkten Beweglichkeit des Steigbügels die Beweglichkeit des Trommelfells eingeschränkt (Glockenkurve mit kleiner

Compliance). Beim Paukenerguss ist wegen der mitschwingenden Sekretflüssigkeit die Beweglichkeit stark eingeschränkt (Flache Kurve, keine Gipfelbildung). Bei der Tubenfunktionsstörung ist der Gipfel der Glockenkurve in den negativen Druckbereich entsprechend dem in der Paukenhöhle herrschenden Unterdruck verschoben. Der Unterdruck entsteht durch den Sauerstoffverbrauch des (entzündlichen) Gewebes bei verschlossener Tube als Folge vergrößerter Rachenmandeln (Adenoide).

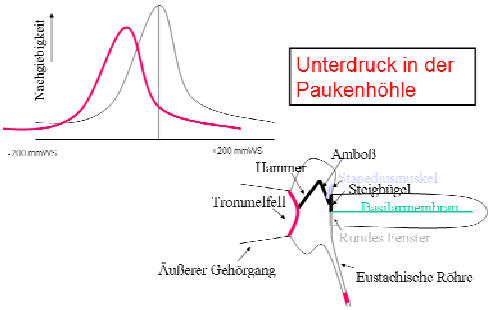
Tympanometrie



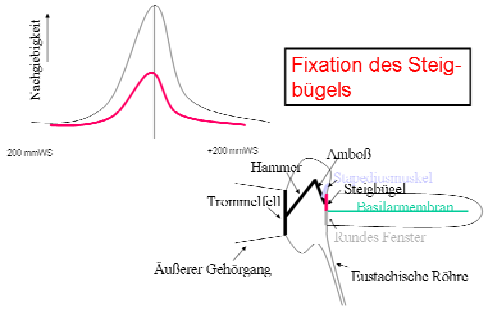
Mittelohr-Erguss



Tubenfunktionsstörung



Otosklerose



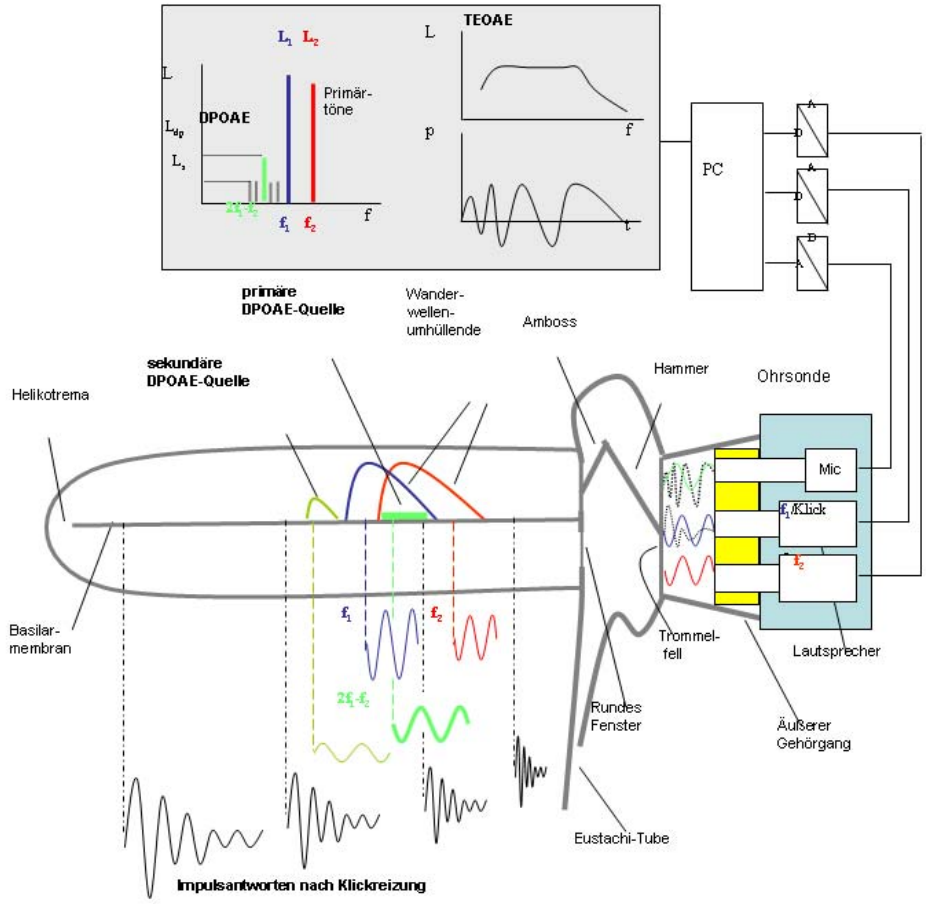
Stapediusreflex

Sowohl mit ipsi- als auch mit contralateral applizierten Tönen (1, 2, 4 kHz) oder Rauschen (Breitband, Schmalband) lässt sich der Stapediusreflex auslösen. Bei Kontraktion des Stapediusmuskels ist die Nachgiebigkeit der Gehörknöchelchenkette eingeschränkt (Schutzfunktion). Das Tympanometer registriert die veränderte Nachgiebigkeit während der Reflexauslösung. Die Reflexschwelle eines Normalhörenden liegt bei etwa 80 dB HL. Dies ist auch der Fall bei Patienten mit Funktionsstörungen der äußeren Haarzellen bei normaler Funktion der inneren Haarzellen (Recruitment). Bei der Mittelohrschwerhörigkeit und der neuralen Schwerhörigkeit ist die Reflexschwelle etwa dem Hörverlust entsprechend verschoben (oder nicht messbar).

Otoakustische Emissionen

Otoakustische Emissionen (OAE) sind Schallaussendungen des Innenohres. OAE können spontan vorhanden sein oder mit akustischen Reizen erzwungen werden. Die verblüffende Tatsache, dass Schall aus dem Innenohr emittiert wird, setzt die Existenz einer *Energiequelle in der Kochlea* voraus. Seit dem Nachweis der *Motilität der äußeren Haarzellen* wird angenommen, dass die äußeren Haarzellen als *mechanische Verstärker* fungieren, die die Sensitivität und Trennschärfe des Hörorgans erhöhen. OAE sind Epiphänomene des normalen Hörvorgangs. Sie sind Ausdruck des nicht-linearen Verstärkungsprozesses in der Kochlea. OAE schließen eine bisher bestehende Lücke, da sie die direkte Prüfung der Innenohrfunktion erlauben.

Wegen ihrer einfachen Handhabbarkeit und der Tatsache, dass OAE (i.G. zu den AEP) bereits mit der Geburt voll entwickelt sind, sind sie die Methode der Wahl beim Neugeborenen Hörscreening. In der pädaudiologischen Diagnostik sind sie eine wertvolle Hilfe zur frequenzspezifischen und quantitativen Bestimmung kochleärer Funktionsstörungen. Da sie die kompressive Verstärkung der Kochlea direkt widerspiegeln, können sie auch eine Methode zur Bestimmung des Rekruitments sein. Mit Hilfe der OAE können kleinste Funktionsstörungen erfasst werden. Sie sind daher eine höchst sensitive Methode zur Erkennung beginnender Hörstörungen und Bestimmung ihres Verlaufs bei Lärmexposition oder Einnahme von ototoxischen Medikamenten.



Man unterscheidet:

spontane OAE (SOAE), die in der Form tonaler Schallsignale ohne Einwirkung eines akustischen Reizes fortwährend emittiert werden,

***evozierte OAE*,** die durch Einwirkung eines äußeren Schallereignisses entstehen. Die evozierten otoakustischen Emissionen werden je nach Art der Schallreizung unterteilt in

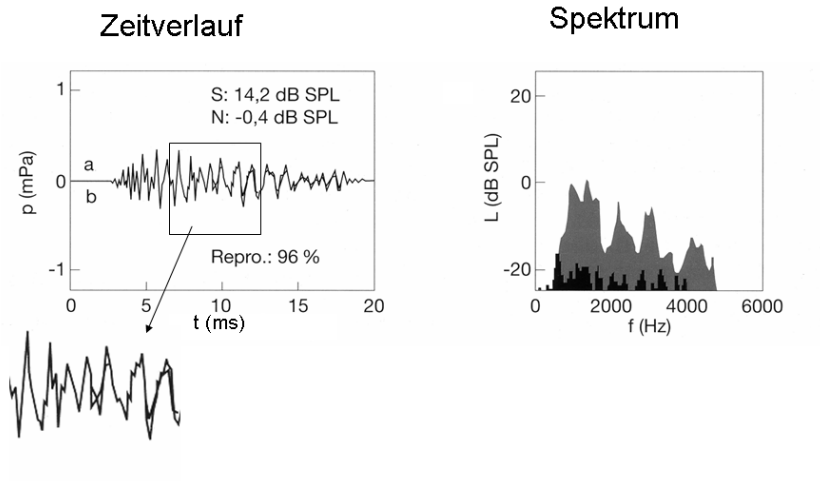
transitorisch evozierte OAE (**TEOAE**),

simultan evozierte OAE (**SEOAE**),

Distorsionsprodukt-OAE (**DPOAE** oder **DP**).

Durch einen Schallreiz werden die nach ihrem Standort in der Cochlea auf unterschiedliche Frequenzen abgestimmten äußeren Haarzellen zu Schwingungen angeregt. Bei *transienter* Anregung mit Klicks oder Tonimpulsen werden die äußeren Haarzellen *angestoßen*. Ihr Schwingungsverhalten entspricht einer Stoßantwort. Frequenz und Dauer der Stoßantwort sind abhängig von der Eigenfrequenz der äußeren Haarzelle und damit vom Standort der Haarzelle in der Kochlea. Bei *stationärer* Anregung des Ohres mit Tönen werden die im schmalen Bereich der Basilarmembranausbauchung liegenden Haarzellen in *periodische* Schwingungen versetzt, deren Frequenz der des anregenden Tones entspricht. Auf welche Weise die äußeren Haarzellen auch in Kontraktionen versetzt werden - sei es wie bei den *spontanen OAE* durch eine *interne Energiequelle* oder wie bei den *evozierten* OAE durch *Stimulation mittels Schallenergie* von außen - jede Kontraktion der mikromechanischen Strukturen des Corti-Organs setzt Schwingungsenergie in der Cochlea frei, die als retrograde Schallaussendung mit einem empfindlichen Mikrophon im äußeren Gehörgang gemessen werden kann.

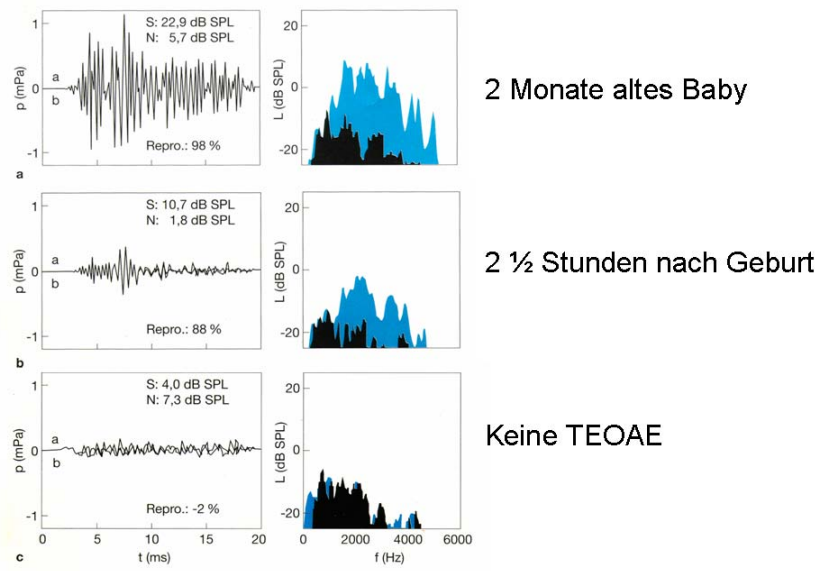
TEOAE



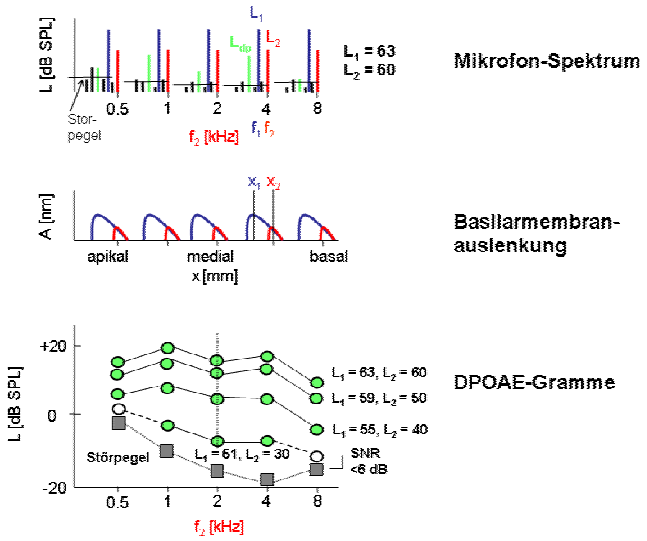
TEOAE werden mit kurzen Schallimpulsen (Klick, Tonimpuls) ausgelöst und weisen ein breitbandiges Spektrum auf. Sie sind die Summe der Emissionen aus einem weiten Bereich der Cochlea. Bei Anregung des Ohres mit einem transienten Schallreiz (Klick) breitet sich eine Welle auf der Basilarmembran aus, die von basal nach apikal läuft. Auf ihrem Weg zur Schneckenspitze stößt sie die äußeren Haarzellen hintereinander an. Die je nach ihrem Standort in der Kochlea auf unterschiedliche Frequenzen abgestimmten äußeren Haarzellen erzeugen dabei infolge der Filtereigenschaften der Basilarmembran und des Cortischen Organs Stoßantworten, deren Schwingungen – abhängig von ihrem Standort in der Kochlea - unterschiedliche Frequenz und Dauer haben. TEOAE sind die Summe der Stoßantworten der äußeren Haarzellen. Die aus dem basalen Bereich der Kochlea stammenden TEOAE-Komponenten haben hohe, die aus dem apikalwärts gelegenen Kochleaabschnitten stammenden TEOAE-Komponenten tiefere Frequenzen. Die basalen TEOAE-Komponenten treten früh, die medialen und apikalen TEOAE-Komponenten treten entsprechend der Laufzeit in der Cochlea später auf (Latenz). Der Vorteil der TEOAE ist der, dass mit *einem*

Reiz nahezu alle Haarzellen in der Cochlea angestoßen werden und ihre Fähigkeit zur Kontraktion in einem Messvorgang erfasst werden kann. Sind die äußeren Haarzellen schwingungsfähig, so emittieren sie Stoßantworten mit einer ihrem Standort entsprechenden Frequenz. Sind äußere Haarzellen in bestimmten Cochleaabschnitten in ihrer Funktion gestört, so senden diese keinen Schall aus, und es fehlt in der Summe der emittierten Stoßantworten die entsprechenden Stoßantworten mit der jeweiligen Frequenz und Latenz.

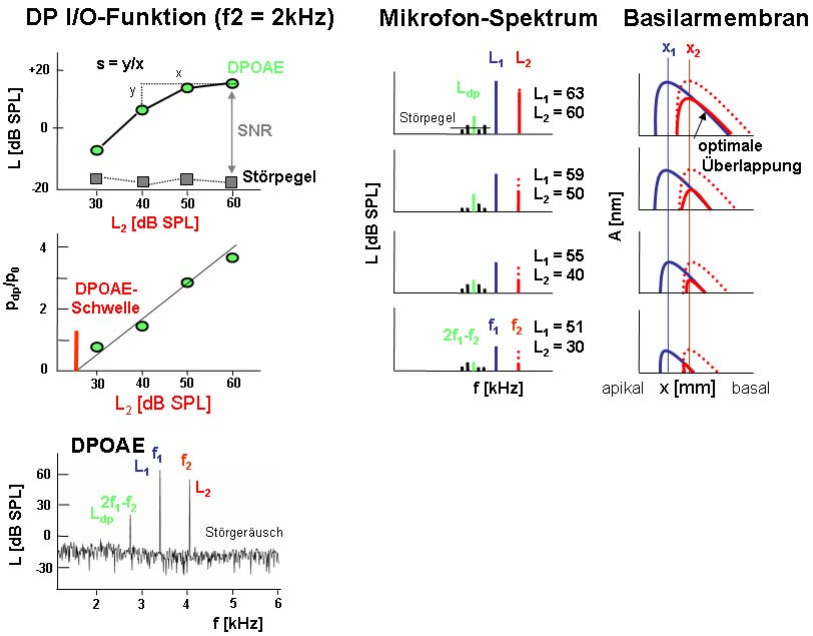
TEOAE sind bei Neugeborenen die Hörscreening-Methode der Wahl, weil sie schnell und einfach messbar sind und durch den Einsatz statistischer Tests eine automatische Befunderhebung möglich ist: 1. Verdacht auf Schwerhörigkeit, weitere Untersuchungen notwendig (fail), 2. kein Verdacht auf das Vorliegen einer Schwerhörigkeit (pass). Bei Fruchtwasserresten in der Paukenhöhle in den ersten Lebensstunden und –tagen sind TEOAE nicht nachweisbar. Es wird daher ein mehrstufiges Hörscreening angewendet: Weiderholungsmessung der TEOAE ab dem 3. Lebenstag, zusätzliche Messung der FAEP. Es ist zu beachten, dass retrocochleäre Hörstörungen und eine auditorische Neuropathie (Störungen der Synapsenfunktion der Inneren Haarzellen) unerkannt bleiben, wenn nur TEOAE gemessen werden.

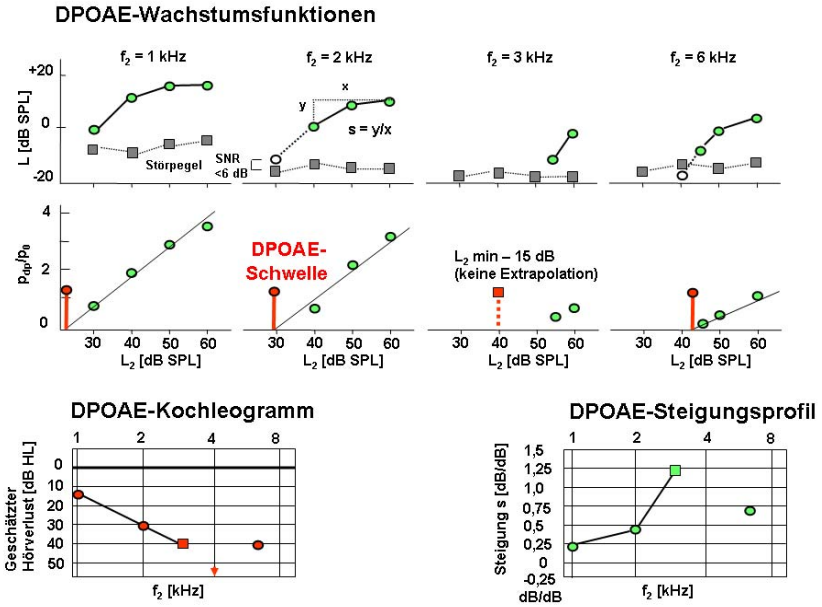


Während TEOAE eher eine qualitative Messgröße zur Bestimmung von kochleären Funktionsstörungen sind, sind die DPOAE in der Lage, quantitative Informationen über den Sensitivitäts-, Kompressions- und Trennschärfeverlust des kochleären Verstärkers zu geben. DPOAE werden mit 2 Tönen (Primärtöne) benachbarter Frequenz ausgelöst und entstehen als direkte Folge der Nichtlinearität des kochleären Verstärkungsmechanismus. Sie geben die Emissionen aus der schmalen Überlappungszone der Wanderwellen der Primärtöne wieder. Die DPOAE haben eine Frequenz, die sich aus der Kombination der Primärtonfrequenzen f_1 und f_2 zusammensetzt. Beim Menschen haben die Distorsionsproduktemissionen mit der Frequenz $2f_1$-f_2 die größte Schalldruckamplitude. Bei Verschiebung des Überlappungsbereichs entlang der Cochlea können Verzerrungen an unterschiedlichen Cochleaorten gemessen werden. Das Ergebnis ist dann ein *DPOAE-Gramm.* Mit einem DPOAE-Gramm kann man grob nachschauen, in welchem Bereich der Cochlea eine Funktionsstörung vorliegt. Hierbei ist aber zu beachten, dass die DPOAE schwellennah ausgelöst werden müssen. Viele Leute wundern sich, warum DPOAE-Gramm und Tonschwellenaudiogramm nicht übereinstimmen. Sie haben dann einfach überschwellige Reizpegel und nicht schwellennahe Reizpegel zur Auslösung der DPOAE verwendet.



Wenn man die Frequenzen der Primärtöne konstant hält und ihre Pegel ändert, erhält man eine *DPOAE I/O-Funktion*. Bei der Einstellung der Primärtonpegel ist die kompressive Nicht-Linearität der Cochlea am Ort f2 zu beachten. Die Primärtöne müssen daher in ihrem Pegel unterschiedlich eingestellt werden, z.B. nach der „Pegelschere“ (L1 = 0,4 L2 -39). Wenn man so verfährt, dann spiegelt die DPOAE I/O-Funktion die nicht-lineare Verstärkung der äußeren Haarzellen wide. Mit *extrapolierten DPOAE I/O-Funktionen* kann eine relativ genaue Schätzung des Hörverlustes in der Form eines *DPOAE-Kochleogramms* vorgenommen werden. Mit den DPOAE-Kochleogrammen lässt sich bei Neugeborenen und Kindern eine frequenzspezifische und quantitative Aussage über den Hörverlust treffen. Mit Hilfe des Steigungsprofils kann der Kompressionsverlust der cochleären Verstärkung bestimmt werden. So lassen sich aus den DPOAE I/O-Funktionen Anpassparameter für Hörgeräte ableiten. Dies allerdings nur bis zu Hörverlusten von 50 dB HL. Bei Hörverlusten größer als 50 dB HL müssen die frequenzspezifischen auditorischen steady-state Antworten (ASSR) weiterhelfen.





Die DPOAE kann man unterdrücken, wenn man einen Suppressorton appliziert, den man in Frequenz und Pegel so variiert, dass sich die DPOAE-Amplitude um einen bestimmten Wert ändert. Man erhält dann eine *DPOAE Iso-Suppressionstuningkurve*. Aus den DPOAE Iso-Suppressionstuningkurven können Informationen über die mechanische Abstimmung der Cochlea gewonnen werden. Die DPOAE Iso-Suppressionstuningkurven sind deckungsgleich mit den neuralen Tuningkurven. Das bedeutet die Trennschärfe des Hörorgans findet in der Cochlea statt. Neugeborene haben gleiche DPOAE Iso-Suppressionstuningkurven wie Erwachsene. Die Cochlea ist damit schon von Geburt an reif.

Mit Hilfe der DPOAE lässt sich auch die Reflexstärke des efferenten Hörsystems bestimmen. Entweder mit der *DPOAE-Adaptation* oder der *contralateralen DPOAE-Suppression*. Die DPOAE-Adaptation spiegelt das Einschwingverhalten der äußeren Haarzellen wider. Beim Einschalten der Primärtöne kommt es zunächst zu einem raschen Anstieg des DPOAE Pegels innerhalb von etwa 200 ms. Danach nimmt die Amplitude um etwa 1 dB ab und bleibt konstant. Das bedeutet, dass das efferente Hörsystem die Schwingung der äußeren Haarzellen dämpft. Auch die akustische Stimulation des Gegenohres führt zu einer Dämpfung der Haarzellschwingung. Das Ergebnis ist dann eine *contralaterale DPOAE-Suppression.* Die contralaterale DPOAE-Suppression kann Werte von über 10 dB annehmen, wenn bestimmte Primärtonpegelkombinationen verwendet werden. Damit ist die contralaterale DPOAE-Suppression eine geeignete Messgröße zur Untersuchung der Funktion des efferenten Hörsystems. Das efferente Hörsystem gibt noch viele Rätsel auf. Man weiß nicht, ob es der Verbesserung der Signalerkennung im Störgeräusch oder zum Schutz bei zu lauter Schalleinwirkung dient. Die DPOAE könnten ein Prädiktor der Vulnerabilität der Cochlea sein, wenn man davon ausgeht, dass Ohren mit einer großen Reflexstärke besser vor Lärm geschützt sind als Ohren mit kleiner Reflexstärke.

Auditorisch evozierte Potentiale → FAEP, ASSR

Auditorisch evozierte Potentiale repräsentieren die an der Kopfhaut über Klebeelektroden gemessene reizsynchrone elektrische Aktivität auf verschiedenen Stufen der Hörbahn. Die an der Kopfhaut abgegriffene Spannung liegt je nach Entstehungsort zwischen 100 Nanovolt und 1 Mikrovolt. Zur Extraktion der reizsynchronen Antwort aus dem EEG ist eine Mittelung einzelner Antworten notwendig (n=2000). Der Signal/Störabstand nimmt mit der Wurzel aus der Anzahl n der Mittelungen zu. Bei kleinen Potentialamplituden muss die Anzahl der Mittelungen erhöht werden (n=4000). Man unterteilt die Potentialkomponenten nach ihrem zeitlichen Auftreten nach Reizbeginn (Latenz) in frühe akustisch evozierte Potentiale (FAEP), in Potentiale mittlerer und später Latenz (MLR, SAEP).

Die FAEP bilden drei prominente, mit römischen Ziffern (I, III, V) gekennzeichnete Wellen aus. Mit abnehmendem Reizpegel nimmt die Latenz der Potentialwellen zu (Welle V bei 80 dBnHL = 5,5ms, bei 10 dB nHL = 8ms bei einem Normalhörenden). Bei einer Mittelohrschwerhörigkeit liegt die Potentialschwelle in etwa dem Hörverlust entsprechend höher (gilt streng genommen nur für den pantonalen Hörverlust). Die Latenz ist verschoben

entsprechend dem Hörverlust; d.h. bei einer Mittelohrschwerhörigkeit von 40 dB beispielsweise wird bei einem Reizpegel von 60 dB eine Antwort erzielt, die der Antwort eines Normalhörenden bei einem Reizpegel von 20 dBnHL entspricht. Bei einer pancochleären Schwerhörigkeit ist die Potentialschwelle entsprechend dem Hörverlust verschoben, die Latenz ist jedoch normal. Bei einer basocochleären Schwerhörigkeit ist die Latenz entsprechend der Laufzeit der Wanderwelle über den gestörten Sinneszellabschnitt verlängert. Die Verschiebung der Potentialschwelle entspricht dabei nicht unbedingt dem Hörverlust. Bei einem Hochtonabfall mit begrenztem Hörverlust ist die Latenz bei kleinen Reizpegeln verschoben, bei hohen Reizpegeln normalisiert sich die Latenz.

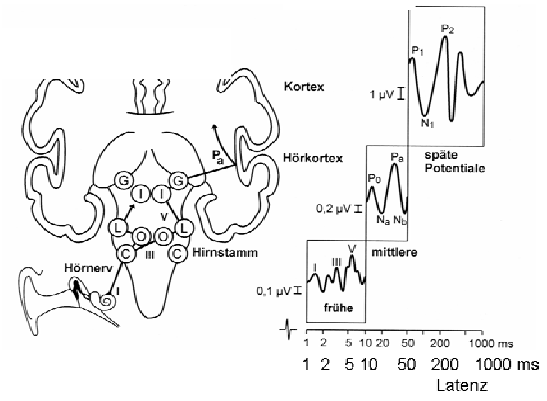
Die Amplitude der FAEP gibt keine direkte Information über den Hörverlust. Allerdings fällt beim Recruitment eine sprunghafte Änderung der Potentialamplitude mit steigendem Reizpegel auf. Bei einer retrocochleären Hörstörung ist die Inter-Peak-Latenz (Zeit zwischen Welle I und V) entsprechend der verlangsamten neuralen Transmission auf den direkt (Neurofibromatose) oder indirekt (Druck durch Raumforderung) geschädigten Hörnervenfasern. Die Inter-Peak-Latenz beträgt im Mittel bei Normalhörenden 3,8 ms (Frauen) bzw. 4,2 ms (Männer). Bei einer verlängerten Inter-Peak-Latenz von 0,2 ms besteht Verdacht auf eine retrocochleäre Störung.

Die FAEP werden üblicherweise mit Klick-Reizen ausgelöst. Wegen der hohen Anfangsgeschwindigkeit (260 km/h) der durch den Klick in der Cochlea ausgelösten Welle ist die Synchronisation der Entladungen (Aktionspotentiale auf den 30 000 Hörnervenfasern) im basalen Bereich der Cochlea am größten. Die basalen Sinneszellen und Hörnervenfasern tragen somit am meisten zur Bildung der FAEP bei. Wegen der transienten Anregung können keine frequenzspezifischen Antworten erzeugt werden. Durch Maskierung gegrenzter Cocheabereiche mittels Hochpass-Rauschen (derived response technique) oder Notched-Noise ist eine indirekte frequenzspezifische Aussage über den Hörverlust möglich. Wegen der geringen Anzahl der zur Potentialbildung beitragenden Hörnervenfasern ist die Potentialamplitude sehr klein und so die Aussagekraft der Antworten eingeschränkt. Die mit Tonimpulsen ausgelösten FAEP können nur dann eine frequenzspezifische Aussage über den Hörverlust treffen, wenn sie mit kleinen Reizpegeln ausgelöst werden. Bei hohen Reizpegeln, die ja bei Patienten mit größeren Hörverlusten zur Anwendung kommen müssen, ist wegen der basalen Miterregung (auch bei tieffrequenten Tonimpulsen werden basale Sinneszellen aktiviert, obwohl die Wanderwelle nach der Frequenz-Orts-Transformation im apikalen Bereich der Cochlea ihre maximale Auslenkung hat) keine frequenzspezifische Erfassung des Hörverlustes möglich. Dies gilt auch für den Chirp.

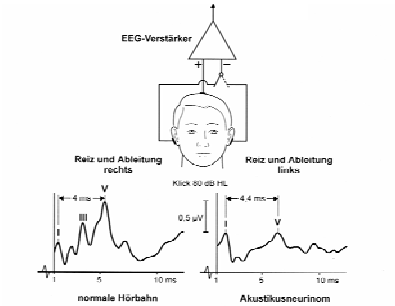
In der klinischen Diagnostik werden die FAEP zur groben Erfassung des Hörverlustes bei Kindern und zur Erkennung von Akustikusneurinomen und Hirnstammtumoren herangezogen. Bei einem hohen Vigilanzniveau (Wachheit) und bei abgeschlossener Hörbahnreifung können die frequenzspezifischeren MLR und SAEP eingesetzt werden. Da diese Forderungen bei kleinen Kindern nicht erfüllt sind, spielen die MLR und SAEP in der Pädaudiologie nur eine untergeordnete Rolle.

Ereigniskorrelierte Potentiale (event-related-potentials, ERP) dienen zur Erfassung von zentralen Störungen; die Mismatch Negativity (MMN), die die unbewusste Detektion seltener Ereignisse (Devianten) innerhalb einer Serie von Standardreizen erkennt, und die Welle P300 bzw. P400 (late positive complex), die bei einer Reaktion auf einen unerwarteten Reiz bzw. bei semantischer Verarbeitung von Sprache nachweisbar sind. Diese Verfahren können nur bei ältern Kindern z.B. zur Objektivierung von auditiven Verarbeitungs- und Wahrnehmungsstörungen und Sprachentwicklungsstörungen eingesetzt werden.

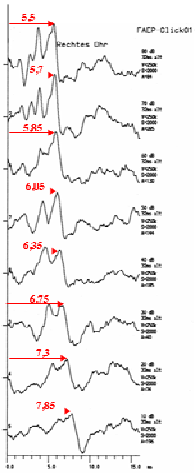
Akustisch evozierte Potentiale

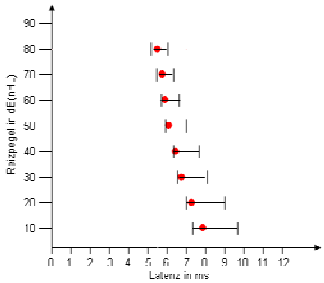


Hirnstammaudiometrie



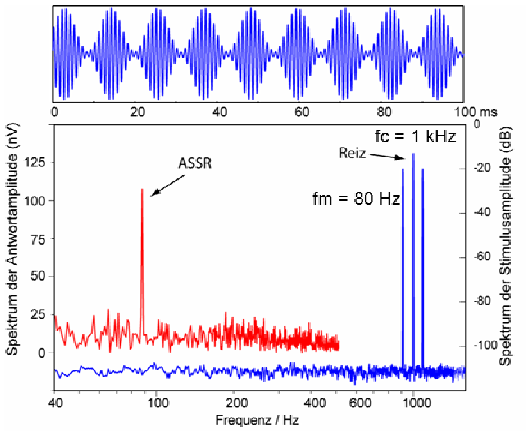
Pegel-Latenz-Diagramm





Die auditorischen Steady State Antworten (ASSR) bieten die Möglichkeit zur frequenzspezifischen Erfassung des Hörverlusts. Allerdings sind zu ihrer Ableitung lange Messzeiten erforderlich.

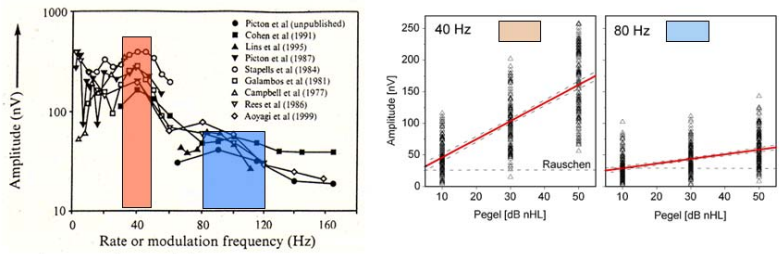
ASSR



Die ASSR werden mit amplitudenmodulierten Dauertönen ausgelöst. Typische Modulationsfrequenzen (fm) sind 40 Hz, 80 Hz und 120 Hz. Je niedriger die Modulationsfrequenz, umso höher der Entstehungsort der Potentiale auf der aufsteigenden Hörbahn und umso größer die Potentialamplitude (und damit bessere Messbedingungen). Wegen der Vigilanzabhängigkeit können bei sedierten Kindern nur die 80Hz oder 120Hz ASSR mit der kleineren Amplitude eingesetzt werden. In den letzten Jahren sind eine Reihe von Veröffentlichungen über die Methode der ASSR erschienen (Überblick s. Picton et. al). Es gibt allerdings vergleichsweise wenige Veröffentlichungen über ihren klinischen Einsatz.

Der Vorteil gegenüber den FAEP ist der, dass die Sinneszellen in der Cochlea entsprechend der Trägerfrequenz (fc= 125 Hz – 8 kHz) in gezielten Arealen erregt werden können, die synchronisierte Aktivität jedoch im Hirnstamm (Modulationsfrequenz 80 Hz) oder Subcortex (Modulationsfrequenz 40 Hz) stattfindet.

40 Hz ASSR vs. 80 Hz ASSR

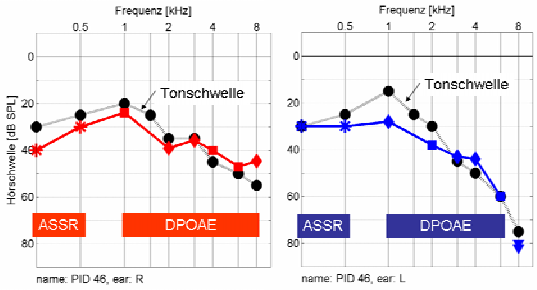


nach Picton et al., Int J Audiol, 2003

Ausblick: DPOAE lassen sich nur bei Hörverlusten bis 50 dB HL messen. Unterhalb 1 kHz sind wegen des hohen Störgeräuschs DPOAE nur schwer messbar. Bei hohen Frequenzen > 6 kHz tritt das Problem der stehenden Wellen auf. Das bedeutet, dass der an der Sondenspitze gemessene Schalldruck nicht dem Schalldruck am Trommelfell entspricht. Um eine Schätzung des Hörverlusts im gesamten Frequenz- und Dynamikbereich des Hörens vornehmen zu können, müssen DPOAE und ASSR gemessen werden: DPOAE wo möglich, ASSR wo nötig. DPOAE und ASSR lassen sich auch simultan messen, z.B. können während der langen ASSR-Messzeiten DPOAE ohne zusätzlichen Zeitaufwand registriert werden.

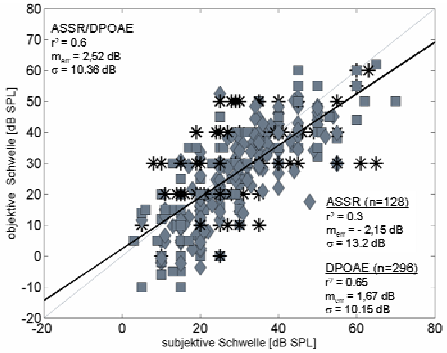
DPOAE/ASSR-Audiogramme

Erwachsener 58 Jahre



Messdauer beide Ohren: 24 Minuten

Vergleich subjektiv/objektiv



Pädaudiologische Hörtests

In der pädaudiologischen Diagnostik werden psychoakustische Prüfverfahren und physiologische Messverfahren zur Lokalisation und quantitativen Erfassung einer Schwerhörigkeit angewendet. Die audiometrischen Tests liefern Kenngrößen der gestörten Hörfunktion. Physiologische Tests (Tympanometrie, OAE und AEP) sind essentielle Bestandteile der audiometrischen Testbatterie, da sie nicht auf die aktive Mitarbeit des Kindes angewiesen sind, setzen aber ein ruhiges, in der Regel spontan schlafendes oder sediertes Kind voraus. Sie bieten darüber hinaus die Möglichkeit, den Hörschaden zu lokalisieren.
Die unverzichtbare Basis für eine erfolgreiche Hörgeräte-Versorgung ist die Ermittlung einer seitengetrennten und frequenzspezifischen Hörschwelle. Um die Befunde untereinander abzusichern, bedarf es der Zusammenschau der Ergebnisse verschiedener audiometrischer Verfahren, sowohl der psychometrischen, als auch der physiologischen Verfahren.

Zur Diagnose frühkindlicher Hörstörungen stehen altersabhängig verschiedene subjektive Hörprüfverfahren zur Verfügung. Im Rahmen subjektiver Hörprüfungen werden vom Untersucher die stark altersabhängigen Reflex- und Reaktionsschwellen ermittelt, die als Antwort auf akustische Reize nachweisbar sind. Die Schwellenwerte zur Auslösung von Reflexen oder Verhaltensänderungen nach akustischer Reizung unterliegen jedoch einem altersbedingten Reifungsprozess; die korrekte Bewertung dieser Antworten gelingt nur einem erfahrenen Untersucher. Als subjektive Hörprüfverfahren kommen im ersten und zweiten Lebensjahr die Reflex- und Verhaltensaudiometrie zum Einsatz, ab ca. dem dritten Lebensjahr die Spielaudiometrie.

Die subjektiven Hörprüfmethoden beim Säugling und Kleinkind lassen sich in folgende Kategorien einteilen:

Reflexaudiometrie
Bei der Reflexaudiometrie werden die in den ersten Lebensmonaten noch nachweisbaren unbedingten Reflexe des Kindes, wie z. B. das Zucken der Augenlider (Auropalpebralreflex), das reflexartige Anziehen der Arme und Beine (Moro-Reflex, Schreck-Reflex), Änderungen der Atmung, der Mimik und Gestik als Antwort auf akustische Reize (Töne, Rauschen, Kinderlieder etc.) beurteilt. Die Reaktionen des Kindes auf Bewegungen und visuelle Reize können jedoch dabei oft als Hörreaktionen fehl gedeutet werden.

Verhaltensaudiometrie
Mit zunehmendem Alter lassen die unbedingten Reflexe der Kinder nach, so dass ab dem 3.-4. Lebensmonat eine Verhaltensaudiometrie eingesetzt wird. Dabei werden Verhaltensänderungen des Kindes, wie z.B. Zuwendungsreaktionen der Augen oder des Kopfes zur Schallquelle, Änderungen der Mimik, Gestik oder der Atmung sowie Aktivitätsänderungen als Antwort auf akustische Reize im Freifeld sowie über Knochenleitungshörer geprüft.

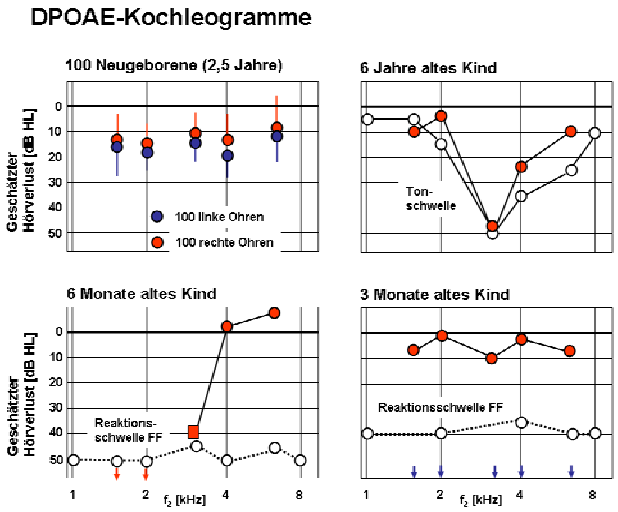
Ablenkaudiometrie
Ab dem 6.-7. Lebensmonat lässt sich die sog. Ablenkaudiometrie durchführen. Dieses Verfahren beruht darauf, dass auf einem Bildschirm kindgerechte Bilder gleichzeitig mit der Präsentation eines lauten, überschwelligen akustischen Signals gezeigt werden. In der Konditionierungsphase lernt das Kind, dass visueller und auditiver Reiz immer gleichzeitig erscheinen. In der anschließenden Untersuchungsphase lässt man die visuelle Darbietung etwas verzögert gegen die auditive Stimulation auftreten. Das Kind wird für die richtige Reaktion auf einen auditiven Stimulus mit einem neuen Bild belohnt. Der Reizpegel wird dabei bis zur Reaktionsschwelle erniedrigt (d.h., man tastet sich langsam an die „Hörschwelle“ heran).

Spielaudiometrie
Die Spielaudiometrie kann ca. ab dem 3. Lebensjahr eingesetzt werden. Im Gegensatz zur Verhaltensaudiometrie arbeitet das Kind aktiv mit. Auch hier bedarf es einer Konditionierungsphase. Das Kind führt nach Gabe eines akustischen Reizes eine Spielhandlung aus (z.B. es steckt ein Holzklötzchen in ein Steckbrett).

Sprachtests
Sprachtests untersuchen das Diskriminationsverhalten für komplexe Signale mit semantischer Information. Im deutschsprachigen Raum werden bei Vorschul- und Schulkinder in der Regel der Mainzer Kindersprachtest und der Göttinger Kindersprachverständnistest I und II verwendet. Dazu gibt es den Heidelberger Konsonant-Vokal-Konsonnat Test, den Oldenburger Zweisilber-Kinderreimtest (OLKI) und den Würzburger Kindersprachtest. Neu ist der adaptive auditive Sprachtest (AAST), wo sechs Zweisilber (Flugzeug, Eisbär, Schneemann, Lenkrad,

Handschuh, Fußball) verwendet werden. Das Kind muss – wenn es das Wort verstanden hat - das entsprechende Bild auf dem Touchscreen eines PDAs auswählen. Das Testergebnis ist eine Zahl in dB, die aussagt, bei welcher Intensität (dB) die Hälfte der Worte verstanden wird.

DPOAE-Kochleogramme
Bei der Verhaltens- oder Spielaudiometrie wird eine hohe Diskrepanz zwischen der Reaktionsschwelle und der tatsächlichen Hörschwelle beobachtet. Je nach Alter kann die Differenz zwischen 60 dB (4 Monate altes Kind) und 25 dB (2 Jahre altes Kind) betragen. Das DPOAE-Kochleogramm erlaubt eine genauere Schätzung des Hörverlustes und bietet sich daher als ergänzende oder alternative Methode an. Weitere Vorteile sind seitenselektive Erfassung des Hörverlustes und schnellere Messzeiten. In Hinblick auf die Sprachentwicklung sind bei Kindern Hörgeräte schon bei cochleären Hörverlusten ab 25 dBHL indiziert. Das bedeutet, dass DPOAE-Kochleogramme auch bei der Hörgeräteanpassung wertvolle Dienste leisten könne.



Qualitätssicherung

<u>Subjektive Tests</u>

Hörprüfraum: schallarm, maximal zulässiger Pegel des Störschalls in ISO 389-1
Audiometer: geeicht, messtechnische Überprüfung des Audiometres inclusive Hörer mindestens 2 x jährlich.
Durch Einhaltung der Standards (Tonschwelle: IEC 60645-1, ISO 389-1-2-3-4, ISO 8253-1; Sprachtests: IEC 60645-2, ISO 8253-3) ist gewährleistet, dass die an unterschiedlichen Orten erhobenen Daten vergleichbar sind.

Fehlerquellen:
Raum:

Störschall zu groß
Geräte:
Falsche Kalibrierung, schlechter Funktionszustand müssen vermieden werden.
Untersucher:
1. Falsches Anbringen der elektroakustischen Wandler. Verwechselung der Seite kann bei einer anstehenden OP katastrophal sein! falsche Ankoppelung an den Gehörgang kann die Hörschwellenbestimmung erheblich verschlechtern!
2. Schlechte Instruktion des Patienten und schnelles Untersuchungstempo können ebenfalls zu falschen Ergebnissen führen.
3. Nicht-Beachten der Fühlschwelle bei der Knochenleitung und Nicht-Beachten der Vertäubungsregeln zur Vermeidung des Überhörens.

Patient: Patient kann simulieren oder aggravieren.

Tinnitus: Durch Verdeckung des Prüftons durch den Tinnitus kann es zu widersprüchlichen Ergebnissen zwischen den physiologischen und psychoakustischen Tests kommen.

Objektive Tests

OAE: Die bei der Registrierung der OAE verwendeten Ohrsonden sind sehr stoßempfindlich. Die wöchentliche Messung der Übertragungsfunktion in einem künstlichen Ohrsimulator (B&K 5147) ist zu empfehlen. Die Röhrchen der Ohrsonden können durch Cerumen verstopft werden. Es sollten daher Sonden zur Anwendung kommen, die zerlegbar und damit leicht zu reinigen sind. Über das Sondenkabel können Störsignale entstehen. Um dies zu vermeiden sollte die Sonde am Kabel über eine Vorrichtung über den Kopf des Patienten schwebend angebracht werden.
Um schwellenahe Messungen der OAE zu gewährleisten oder Messungen an Patienten mit größeren Hörverlusten durchführen zu können, müssen Mikrophone verwendet werden, die ein geringes Eigenrauschen haben. Nach 200 Mittelungen sollte das Störgeräusch bei den DPOAE im mittleren Frequenzbereich besser als -30 dB SPL sein.
Eine Überprüfung des Sondensitzes während der Messung sollte automatisch durch Messung der Schalldruckübertragungsfunktion erfolgen. Es sollten einheitliche Kriterien zur Sicherstellung der Validität der Antwort verwendet werden (z.B. Korrelation der beiden TEOAE-Aufnahmepuffer > 65%, Signal-Störabstand von > 6 dB bei den DPOAE).

AEP: s. Empfehlungen der ADANO zur Durchführung der ERA mit transienten Potentialen

Literatur:

Mrowinski und Mitarbeiter: Audiometrie, Thieme Verlag (Kleines Lehrbuch über audiometrische Standardverfahren der subjektiven Audiometrie. Objektive Audiometrie und Pädaudiologie wird nur kurz dargestellt.

Lehnhardt und Laszig (Hrsg): Praxis der Audiometrie (Großes Lehrbuch der subjektiven und objektiven Verfahren der Audiometrie). Thieme Verlag. Eine neue Ausgabe erfolgt in 2009.

Hoth und Lenarz: Elektrische Reaktions-Audiometrie, Springer
Hoth und Lenarz: Otoakustische Emissionen, Thieme

Zu den OAE:
Janssen und Müller: Otoacoustic emissions as a diagnostic tool in a clinical context. In: Active processes and otoacoustic emissions. Springer Handbook of Auditory Research 30. Springer New York

Zu den ASSR:
Pethe J, Mühler R, von Specht H (2001). Zur Abhängigkeit der AMFR von der Vigilanz. HNO 49:188-193
Pethe J (2003) Amplitude modulation following responses (AMFR) – ein neuer Weg zur objektiven Bestimmung der Hörschwelle. HörBericht 72, Geers Hörakustik
Picton TW, Skinner CR, Champagne SC, Kellett AJC, Maistre A (1987) Potentials evoked by the sinusoidal modulation of the amplitude or frequency of a tone. J Acoust Soc Am 82: 165-178
Picton TW, Dimitrijevic A, John MS, von Roon P (2001) The use of phase in the detection of auditory steady-state responses. Clinical Neurophysiology 112: 1698-1711