

Auswertelgorithmen zur Niedrigpegel-Reflexaudiometrie

Matthias Müller-Wehlau, Manfred Mauermann und Birger Kollmeier
 Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, AG Medizinische Physik

Einleitung

Das Verfahren zur Niedrigpegel-Reflexaudiometrie (NPRA) wurde 1996 von Neumann et al. vorgestellt [1]. Bei dieser Methode wird das Differenzsignal zwischen zwei aufeinanderfolgenden akustischen Stimulationen im abgeschlossenen Gehörgang aufgezeichnet. Wird der Stapediusreflex bei ausreichendem Stimuluspegel ausgelöst, so weicht die akustische Antwort auf den zweiten Stimulus von derjenigen auf den ersten Stimulus ab, was zu einem deutlichen Anstieg des Differenzsignals führt. Da sich die akustische Antwort auf die beiden Stimulussignale bei der Reflexauslösung u. U. nur in der Phase voneinander unterscheiden, stellt diese Methode ein sehr sensitives Verfahren zur Detektion der Reflexauslösung dar. Darüber hinaus bietet das Verfahren die Möglichkeit, über mehrere aufeinanderfolgende Messungen zu mitteln, wodurch die Methode zusätzlich robuster gegenüber äußere Einflüsse ist.

Da das Verfahren in die Reihe der Oldenburger Messprogramme implementiert wurde und in näherer Zukunft in der klinischen Diagnostik erprobt werden soll, war es notwendig, ein objektives Schwellenkriterium zu entwickeln, das eine reproduzierbare und robuste Bestimmung der Reflexschwelle (ART) als Ergebnis einer Messung ermöglicht.

Methode

Die Messungen erfolgten rechnergesteuert in einer gegen Störgeräusche abgeschirmten Messkabine. Das Messprogramm bot neben der implementierten online Auswertung auch die Möglichkeit, die Messdaten für eine spätere detailliertere offline Auswertung abzuspeichern. Für die Experimente wurde eine Otodynamics ILO BT-Type OAE Sonde verwendet, die normalerweise zur Messung otoakustischer Emissionen dient. Da diese Sonde nicht für die Darbietung hoher Pegel ausgelegt ist, wurde der Stimuluspegel für die Messungen auf 95 dB SPL begrenzt. Dadurch wurden Verzerrungen vermieden, die u.U. Einfluss auf die zu messende Reflexschwelle haben können. Um eine Vergleichbarkeit der NPRA mit der etablierten Methode zu gewährleisten, wurde in einem 3AFC Verfahren mit einer 1 up 2 down Prozedur eine HL-Korrektur für die Sonde bestimmt. Bei allen Versuchspersonen wurde durch eine tympanometrische Untersuchung vor jeder Messung eine normale Funktion des Mittelohres sichergestellt.

Zunächst wurden für fünf weibliche und vier männliche normalhörende Versuchspersonen ipsilaterale Wachstumsfunktionen bei Frequenzen von 500, 1000, 2000 und 4000 Hz bestimmt. D.h. bei diesen Frequenzen wurden für Stimuluspegel von 65 bis 95 dB SPL in zwei dB Schritten die Residuensignale ermittelt. Diese Datenbasis diente zur Erprobung unterschiedlicher Auswerteverfahren. Die weiterführende Evaluation der Auswertelgorithmen in Bezug auf die Reproduzierbarkeit der durch die Auswerteverfahren ermittelten Reflexschwellen wurde anschließend für zwei weibliche und eine männliche Versuchsperson durchgeführt.

Ergebnisse

Die verschiedenen Auswertelgorithmen basieren auf der Berechnung der Phase und/oder des Pegels der spektralen Anregungskomponente im Residuum. In Abbildung 1 ist der Verlauf von Pegel (a) und Phase (b) für acht aufeinanderfolgende Epochen bei verschiedenen Stimuluspegeln dargestellt. Die Grafik (c) in Abbildung 1 zeigt einen Ausschnitt des Residuums, wie er sich durch Mittelung über alle Epochen eines Stimuluspegels ergibt. Es fällt auf, dass unabhängig vom Stimuluspegel auch bei deutlich ausgelöstem Reflex der Residuenpegel stark schwankt. Diese Schwankungen erschweren die Realisation einer pegelabhängigen Artefaktunterdrückung für die Auswertung, da nicht zwischen einem hohen Signalanteil oder einem artefaktbedingt hohen Pegel unterschieden werden kann. Für die Auswertung wurden drei unterschiedliche Auswertelgorithmen angewendet:

S/N-Kriterium:

Neumann et al. haben vorgeschlagen, die Reflexschwelle anhand des Signal-Rauschabstandes des Residuums zu bestimmen, wobei zwei Bedingungen zur für die Festlegung der Reflexschwelle erfüllt sein müssen:

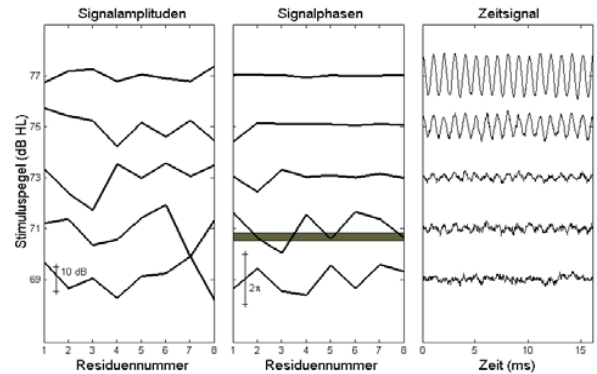


Abbildung 1: Darstellung der Phasen- und Pegelwerte aufeinanderfolgender Epochen bei unterschiedlichen Stimuluspegeln. Die Stabilisierung der Phase bei Überschreiten eines Stimuluspegels von 71 dB HL ist deutlich zu erkennen. Der grau unterlegte Bereich kennzeichnet die vorgegebene Phasenbreite für das PARA-Kriterium.

1. Das Spektrum des Residuums muß einen Peak bei der Anregungsfrequenz zeigen, der mindestens 20 dB über dem Rauschen liegt, das über ein um die Anregungsfrequenz zentriertes oktavbreites Band berechnet wird.
2. Der Pegel des Residuums muß größer als -40 dB relativ zum Anregungspegel sein.

Eine bewährte Darstellung des Versuchsergebnisses sind die in Abbildung 2 dargestellten Wachstumsfunktionen. Bei dieser Auftragung des Residuenpegels über den Stimuluspegel zeigt sich deutlich ein starker Anstieg, wodurch der ober- und unterschwellige Bereich in

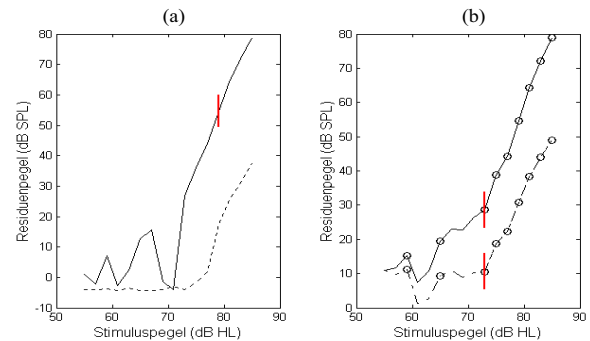


Abbildung 2: Vergleich der Auswertungen mit dem S/N-Kriterium (a) und dem PARA-Algorithmus (b) mit den jeweilig detektierten Reflexschwellen (vertikale Linie) für Versuchsperson mm (1000 Hz Stimulus). Der auf einem oktavbreiten Bereich berechnete Rauschgrund bei der S/N-Auswertung steigt deutlich an und ist für die Auswertung nicht geeignet. Bei der PARA-Auswertung sind die validen Messpunkte hervorgehoben. Die strichgepunktete Kurve in Abb. (b) stellt die um den konstanten Anstieg des Stimuluspegels korrigierte Wachstumsfunktion dar.

dieser Darstellungsform deutlich zu unterscheiden sind.

Die durch das S/N-Kriterium bestimmte Reflexschwelle ist exemplarisch in Abbildung 2(a) dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass der Rauschgrund bei hohen Stimuluspegeln zusammen mit dem Residuenpegel ansteigt, wodurch die ermittelten Reflexschwellen deutlich höher liegen als dies anhand der Wachstumsfunktionen zu erwarten wäre. Die Ursache dafür liegt in einer spektralen Aufweitung der Anregungsfrequenz im Residuum. Diese resultiert aus dem sich ändernden Residuenpegel und kann durch eine Fensterung des Residuums reduziert, aber nicht beseitigt werden. Obwohl es möglich ist, einen optimaleren Rauschschätzer zu ermitteln, ist es aber generell fragwürdig, ob eine S/N-Bedingung ein probates Schwellenkriterium darstellt, da die NPRA Methode die Möglichkeit bietet, über mehrere

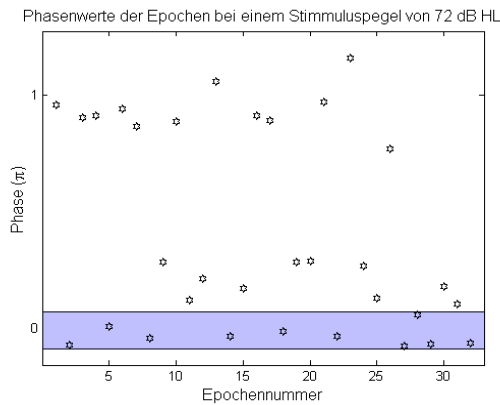


Abbildung 3: Aufspaltung der Phasenwerte von 32 aufeinanderfolgenden Epochen aufgrund zufälliger physiologischer Vorgänge bei der Stimulusdarbietung. Der unterlegte Bereich stellt die vorgegebene Phasenbreite für das PARA-Kriterium dar. Dieser als Phasencluster bezeichnete Auswertartefakt führt zu deutlichen Signalanteilen bei den Residuen auch bei nicht ausgelöstem Stapediusreflex

aufeinanderfolgende Messungen zu mitteln, wodurch u.U. der S/N und damit die detektierte Reflexschwelle von der Anzahl der durchgeführten Messungen abhängt. Außerdem sind die Residuenamplituden für verschiedene Versuchspersonen individuell stark unterschiedlich, wodurch die Festlegung eines allgemeingültigen Kriteriums erschwert wird.

Phase and Amplitude Range Analysis (PARA):

Betrachtet man die Phasenwerte aufeinanderfolgender Epochen, so läßt sich bei vielen Messungen eine schnelle und deutliche Stabilisierung der Phasenwerte bei Überschreiten eines bestimmten Stimuluspegels beobachten. Bei dem in Abbildung 1 dargestellten Fall stabilisieren sich die Phasen der Signalkomponente in den Residuen zwischen 71 und 73 dB HL deutlich. Dies wird für die Phase and Amplitude Range Analysis (PARA) ausgenutzt, indem ein fester Phasenbereich vorgegeben wird (grau unterlegter Bereich in Abbildung 1 (b)),

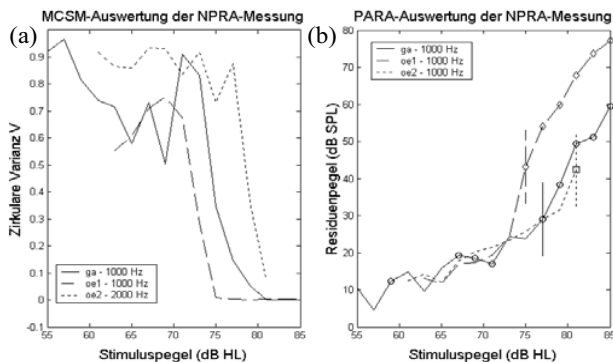


Abbildung 4: Vergleich der Auswertung mit dem MCSM- (a) und dem PARA-Verfahren (b) für verschiedene Versuchspersonen und Stimulusfrequenzen. Die zirkulare Varianz fällt bei Überschreiten eines bestimmten Stimuluspegels deutlich ab und kennzeichnet so den ober-schweligen Bereich.

der dann geeignet verschoben wird, bis die maximal mögliche Anzahl der gemessenen Epochen von diesem Bereich umfaßt wird. Analog wird auch mit der Residuenamplitude verfahren, allerdings muss das Kriterium dort wegen der starken Schwankung der Amplitude auch bei deutlich ausgelöstem Reflex das Kriterium entsprechend großzügig gewählt werden (> 10 dB). Das Amplitudenkriterium fungiert damit lediglich als grobe Artefaktunterdrückung. Ein Messpunkt bei einem Stimuluspegel gilt dann als valide, wenn mindestens die Hälfte aller bei diesem Pegel gemessenen Epochen beide Kriterien erfüllen, also sich durch einen Phasen- und einen Amplitudenbereich beschreiben lassen. Der valide Messpunkt bei dem niedrigsten Stimuluspegel wird damit als Reflexschwelle definiert, sofern auch die Messpunkte bei höheren Stimuluspegeln valide sind. Die Kurven (b) in Abbildung 2 zeigen exemplarisch die Auswertung mit diesem Kriterium. Zum unmittelbaren Vergleich ist in den Grafiken (a) in Abbildung 2 die Wachstumsfunktionen und die detektierte

Reflexschwelle dargestellt, wie sie sich nach dem S/N-Kriterium ergeben würde. Bei der PARA-Auswertung sind die validen Messpunkte hervorgehoben und die sich ergebene Reflexschwelle durch eine kurze vertikale Linie markiert. Die strichgepunktete Kurve in Abb. 2(b) zeigt die Wachstumsfunktion, die um den konstanten Anstieg des Stimuluspegels korrigiert wurde. In dieser Darstellungsform sind ober- und unter-schwelliger Bereich oftmals deutlicher zu trennen. Die mit dem PARA-Kriterium ermittelten Schwellen stimmen mit denen überein, die man anhand der Wachstumsfunktionen vermuten würde. Das Verfahren ist gegenüber dem S/N-Kriterium deutlich leistungsfähiger und robuster. Darüber hinaus stellt das PARA-Verfahren eine wirkungsvolle Artefaktunterdrückung dar, da zufällige Messartefakte nicht zu einer Schwellendetektion führen können.

Modified Coherence Synchrony Measure (MCSM)

Obwohl das PARA-Verfahren dem S/N-Algorithmus deutlich überlegen ist, kann man relativ häufig valide Messpunkte bei niedrigen Stimuluspegeln oder hohe Residuenpegel ohne valide Messpunkte (Abbildung 2 (b)) beobachten. Diese resultieren aus einem als Phasencluster bezeichneten Auswertartefakt. In Abbildung 3 sind analog zu Abbildung 1 (b) die Phasenwerte aufeinanderfolgender Epochen aufgetragen. Man erkennt deutlich eine Clusterung in zwei um π separierte Phasenwerte. Die Ursache dafür liegt in zufälligen Änderungen der Mittelohrimpedanz während der Darbietung der beiden Stimuluspulse, die dazu führen, dass sich die Antworten auf diese beiden Pulse primär unterscheiden. Die Änderungen der Impedanz resultieren wahrscheinlich aus physiologischen Vorgängen, die nicht mit der Stimulusdarbietung korreliert sind. Als Folge des Cluster-Effektes kann man gerade bei geringen Mittelungszahlen deutlich Signalanteile im Residuum beobachten, die vereinzelt zu validen Messpunkten führen können. Das Verfahren der Modified Coherence Synchrony Measure (MCSM) basiert auf dem Rayleigh Test für zirkulare Uniformität [3] und berechnet aus den Phasenwerten der Epochen mit

$$\bar{R} = \sqrt{\bar{C}^2 + \bar{S}^2} \quad \text{mit} \quad \bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos \theta_i \quad \text{und} \quad \bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin \theta_i$$

die zirkulare Varianz $V = 1 - R$ [2]. Die Varianz nimmt bei Gleichverteilung der Phasen Werte von 1 an und wird bei identischen Phasenwerten 0. In Abbildung 4 ist ein Vergleich der Auswertung mit dem PARA- (Grafik (b)) und dem MCSM-Verfahren (Grafik (a)) dargestellt. Bei dem MCSM-Verfahren ist der Bereich der Reflexauslösung durch den Abfall der zirkularen Varianz V deutlich zu erkennen. Eine Reflexschwelle läßt sich durch Unterschreiten eines noch zu bestimmenden Schwellwertes für die zirkulare Varianz ermitteln. Im vorliegenden Beispiel erkennt man bei der PARA-Auswertung für die Versuchsperson ga eine Folge von drei validen Messpunkten zwischen 67 und 71 dB HL. Diese resultiert aus dem Cluster-Effekt und kann u.U. vom Algorithmus fälschlich als Reflexauslösung interpretiert werden. Bei der MCSM-Auswertung zeigt sich im gleichen Bereich eine starke Schwankung der Varianz, die aber deutlich von dem ober-schweligen Bereich ab 77 dB HL unterschieden werden kann. Das MCSM-Verfahren ist damit robuster gegenüber diese Art des Messartefaktes, da die zufällige Aufspaltung der Phasenwerte um π gerade zu einer hohen Varianz führt.

Zusammenfassung und Schlußfolgerung

Es wurden drei unterschiedliche Ansätze eines Auswertalgorithmus vorgestellt. Aufgrund der durch das Messverfahren bedingten und individuell unterschiedlich stark ausgeprägten Schwankungen des Residuenpegels ist der naheliegende Ansatz eines S/N-Kriteriums für das vorliegende Messverfahren nicht geeignet. Das PARA-Verfahren basiert in erster Linie auf einer Untersuchung der Residuenphase und ermöglicht eine objektive Detektion der Reflexschwelle, die sich in anschließenden Experimenten als reproduzierbar und robust gegenüber Störungen erwiesen hat. Das MCSM-Verfahren weist dieselben Vorteile auf, ist aber im Vergleich zum PARA-Algorithmus nochmals robuster gegenüber dem im Messverfahren bedingten Cluster-Effekt.

Danksagung

Diese Arbeit wurde gefördert von der DFG KO 942-11.

Literatur

- [1] Neumann, J., Uppenkamp, S. und Kollmeier, B., „Detection of the acoustic reflex below 80 dB HL“, *Audiology and Neurootology*, (1996).
- [2] Mardia, K.V. „Statistics of directional Data“, Academic Press, (1972)
- [3] Valdes, J.L et al. „Comparison of statistical indicators for the automatic detection of 80 Hz auditory steady state responses“, *Ear & Hearing*, 18(5), (1997)