

Effizientes Verfahren zur Bestimmung der Feinstruktur der Hörschwelle

Heise S. J.¹, Verhey J. L.¹, Mauermann M.²

¹Internationales Graduiertenkolleg „Neurosensorik“ ²Medizinische Physik, Universität Oldenburg

Einleitung.

Misst man die Hörschwelle mit hoher Frequenzauflösung, zeigen sich oft Regionen mit einer periodischen Mikrostruktur, in denen die Hörschwelle innerhalb einer 1/10 Oktave um bis zu 15 dB schwanken kann (vgl. Abb. 3). Diese Feinstruktur der Hörschwelle ist schon seit langem bekannt (Elliott, 1958) und weist einige interessante Zusammenhänge auf:

Die Feinstruktur der Hörschwelle wird typischerweise in Ohren beobachtet, die durch das Audiogramm als „normalhörend“ klassifiziert wurden,—jedoch nicht in allen. Da die Feinstruktur ihren Ursprung wahrscheinlich in den aktiven cochleären Prozessen hat (Talmadge et al., 1998), liegt die Vermutung nahe, dass sich Modifikationen dieser aktiven Prozesse (wie z. B. eine einsetzende Schädigung) auch auf die Feinstruktur auswirken. Diese Hypothese wird durch mehrere Studien gestützt: So beobachteten beispielsweise Furst et al. eine Reduktion und gleichzeitige Verschiebung der Feinstruktur als Folge einer intensiven Lärmbelastung (Furst et al., 1992). Horst et al. fanden eine negative Korrelation zwischen Hörverlust und Ausprägung von Feinstruktur in Patienten mit Morbus Meniere (Horst et al., 2003). Ferner wurde gezeigt, dass ototoxische Arzneien wie Aspirin (Long und Tubis, 1988) und Chinin (McFadden und Pasanen, 1994) zu einer verringerten Feinstruktur führen. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass sich eine einsetzende Schädigung der aktiven Prozesse, die im Audiogramm oft noch nicht zu erkennen ist, in einer reduzierten bzw. fehlenden Feinstruktur widerspiegelt. Damit könnte die Feinstruktur zur Früherkennung subtiler Hörschäden dienen.

Des Weiteren hat die Feinstruktur der Hörschwelle Auswirkungen auf andere schwelennahe Wahrnehmungsleistungen wie beispielsweise Lautheit (Mauermann et al., 2004) und Modulationswahrnehmung (Heise et al., 2006).

Um diese Zusammenhänge weiter zu untersuchen, ist ein Messverfahren wünschenswert, das sowohl das Auftreten als auch die Ausprägung von Feinstruktur in der Hörschwelle effizient und zuverlässig detektiert. Die Hauptschwierigkeit vieler gängiger Hörschwellenmessverfahren liegt darin, bei der für die Feinstrukturerfassung erforderlichen hohen Frequenzauflösung eine niedrige Messzeit zu erreichen: Die in Abb. 1 angegebenen Messzeiten für ein hochaufgelöstes Audiogramm und für ein adaptives Alternative-Forced-Choice-Verfahren (AFC) machen deutlich, dass diese Verfahren für einen klinischen Einsatz nicht geeignet sind. Im Folgenden wird nun ein Messverfahren vorgestellt, das insbesondere im Hinblick auf eine kurze Messzeit optimiert wurde.

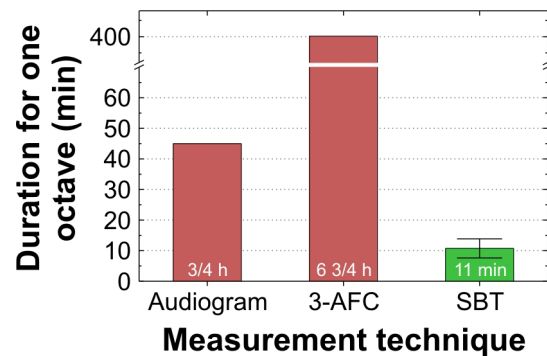


Abbildung 1: Dauer für die Hörschwellenmessung über eine Oktave für drei verschiedene Messverfahren. Bei Audiogramm und 3-AFC-Verfahren handelt es sich um Extrapolationen auf 50 Frequenzpunkte. Beim hier vorgestellten schrittweisen Békésy-Tracking (SBT)-Verfahren wurde an 100 Frequenzpunkten gemessen; angegeben ist hierfür der Mittelwert und die Standardabweichung (Fehlerbalken) über 44 Messungen. Die angegebenen Zeiten beinhalten drei (AFC) bzw. 2–3 (Audiogramm, SBT) Messwiederholungen.

Messverfahren.

Das vorgestellte Messverfahren basiert auf einem schrittweisen Békésy-Tracking (SBT), ähnlich dem von Horst et al. verwendeten Verfahren (Horst et al., 2003): Es wird ein gepulster Sinuston dargeboten (Pulslänge = 250 ms inklusive 25 ms Hann-Flanken), dessen Pegel sich mit 3 dB/s (bzw. 0,75 dB/Puls) ändert. Wird der Ton gehört, drückt der Proband einen Knopf und der Ton wird leiser; wird der Ton nicht mehr gehört, lässt der Proband den Knopf los und der Ton wird lauter. Bei jedem Umkehrpunkt wird mit einer Schrittweite von (höchstens) einer 1/100 Oktave (das entspricht z. B. ca. 15 Hz bei 2 kHz) auf die nächste Frequenz gewechselt. Die hohe Abtastung ermöglicht eine anschließende Bestimmung des Verlaufs der Hörschwelle durch eine Glättung der Umkehrpunkte.

Häufig sind die so gewonnenen Ergebnisse aus zwei Messwiederholungen in vielen Bereichen hinreichend konsistent, so dass nur in einigen wenigen Frequenzabschnitten eine dritte Messwiederholung notwendig ist. Ein Beispiel hierfür ist im oberen Teil von Abb. 2 dargestellt.

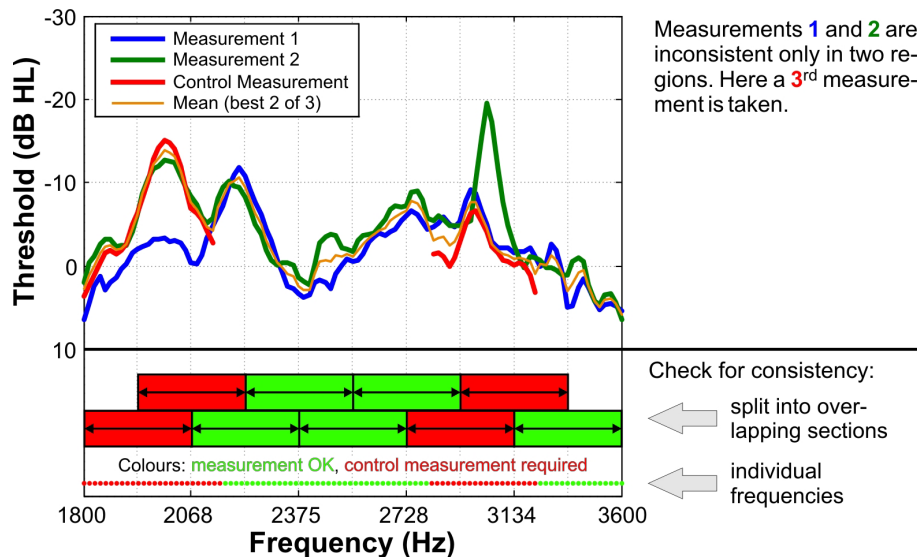


Abbildung 2: Beispiel für die bedingte Messwiederholung. Die Messungen 1 und 2 (oberer Teil) werden in den neun als Balken eingezeichneten Frequenzabschnitten unabhängig auf Konsistenz überprüft (unterer Teil). Das Ergebnis dieser Prüfung ist durch die jeweilige Farbe der Balken angegeben (grün: bestanden, rot: nicht bestanden). Daraufhin wird an den Frequenzen, die im unteren Teil als rote Punkte dargestellt sind, erneut die Hörschwelle gemessen (rote Kurven im oberen Teil) und anschließend gemittelt (orange Kurve).

Unser Messverfahren nutzt dies aus, um Messzeit gegenüber einer vollständigen dritten Messwiederholung einzusparen, indem es nach zwei Messungen prüft, in welchen Frequenzabschnitten eine Nachmessung erforderlich ist, und nur dort ein drittes Mal nachmisst. Hierzu wird das gemessene Frequenzintervall in mehrere überlappende Unterabschnitte aufgeteilt, in denen die Konsistenz jeweils unabhängig analysiert wird. Als Maß für die Konsistenz der ersten zwei Messungen wird die Korrelation verwendet. Überschreitet diese einen gewissen Schwellenwert, ist keine Nachmessung nötig. Andernfalls wird noch anhand der maximalen Fluktuation in dem jeweiligen Abschnitt getestet, ob Feinstruktur vorhanden sein könnte, bevor nachgemessen wird. Anschließend werden in jedem Abschnitt diejenigen zwei Messungen in die Mittelung übernommen, die am besten übereinstimmen. Durch diese Strategie der bedingten Messwiederho-

lung, die ja auch beim klinischen Tonaudiogramm ähnlich angewandt wird, wird die Qualität der Messung zeit-effizient erhöht.

Darüber hinaus wurde ein Maß für Feinstruktur entwickelt, das es erlaubt, Frequenzbereiche mit Feinstruktur automatisch zu detektieren. Hierzu wurde durch Tiefpassfilterung der gemessenen Hörschwelle ein Trend berechnet, der von der Schwelle abgezogen wurde. Von dieser mittelwertbefreiten Hörschwelle wurde durch Vollwellengleichrichtung und Tiefpassfilterung das Feinstrukturmaß extrahiert (Kurve im oberen Teil von Abb. 3). Bereiche, in denen dieses Maß einen gewissen Schwellenwert überschreitet, werden zur leichteren Identifizierung von Feinstruktur beim Anzeigen der Hörschwelle farbig hinterlegt. Ein Beispiel hierfür ist im unteren Teil von Abb. 3 gezeigt.

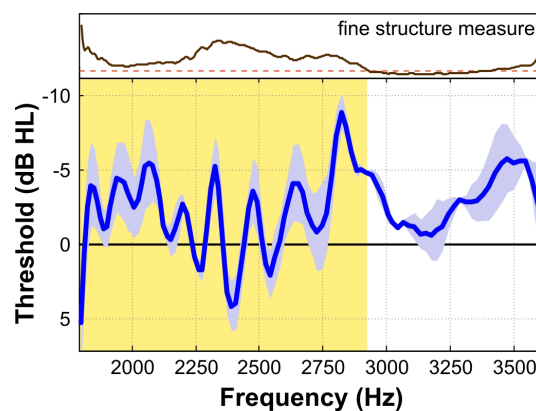


Abbildung 3: Feinstruktur-Indikator. Unterer Teil: Mit dem SBT-Verfahren gemessene Hörschwelle. Oberer Teil: Maß für die Feinstruktur in dieser Hörschwelle. Frequenzbereiche, in denen dieses Maß oberhalb des rot-gestrichelten Schwellenwertes liegt, werden im unteren Teil als „Feinstruktur-Bereiche“ farbig hinterlegt.

Ergebnisse.

Wie bereits in Abb. 1 angegeben, beträgt die mittlere Messdauer des SBT-Verfahrens für die Hörschwellenmessung über eine Oktave $10,7 \pm 3,1$ min (Mittelwert über 44 Messungen).

Um die Genauigkeit des SBT-Messverfahrens abschätzen zu können, wurden einige vorläufige Vergleichsmessungen mit einem 3-AFC-Verfahren durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, dass der Verlauf der Hörschwelle und die Ausprägung von Feinstruktur sehr gut vom SBT-Verfahren wiedergegeben werden. Unterschiede existieren meist im absoluten Wert der Schwelle und variieren je nach Proband. Dies ist jedoch zu erwarten, da beim SBT-Verfahren das individuelle Antwortverhalten der Versuchsperson einen deutlichen Einfluss haben kann, was bei einer AFC-Messung weitestgehend ausgeschlossen werden kann.

Zusammenfassung.

Mit dem SBT-Verfahren können das Auftreten von Feinstruktur in der Hörschwelle sowie deren Ausprägung zuverlässig erfasst werden. Die Messdauer beträgt gut 10 Minuten pro Oktave. Dies wird unter anderem dadurch erreicht, dass eine dritte Nachmessung nur dort vorgenommen wird, wo sie erforderlich ist. Außerdem wurde ein Maß für die Ausprägung von Feinstruktur entwickelt, das eine automatische Detektion von Feinstrukturbereichen erlaubt.

Damit ist ein Werkzeug vorhanden, das weitere Untersuchungen der Feinstruktur der Hörschwelle—wie z. B. die mögliche Verwendung von Feinstruktur zur Früherkennung von Hörschäden—erleichtert.

Literatur.

- Elliott E (1958) A ripple effect in the audiogram. *Nature* 81, 1076
- Furst M, Reshef I, Attias, J (1992) Manifestations of intense noise stimulation on spontaneous otoacoustic emission and threshold microstructure: experiment and model. *J Acoust Soc Am* 91, 1003–1014
- Heise SJ, Mauermann M, Verhey JL (2006) Modulationswahrnehmung nahe der Hörschwelle. In: 9. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Audiologie, Zeitschrift für Audiologie, Suppl. 9, CD-ROM
- Horst JW, Wit HP, Albers FWJ (2003) Quantification of Audiogram Fine-Structure as a Function of Hearing Threshold. *Hear Res* 176, 105–112
- Long GR, Tubis A (1988) Investigations into the nature of the association between threshold microstructure and otoacoustic emissions. *Hear Res* 36, 125–138
- Mauermann M, Long GR, Kollmeier B (2004) Fine Structure of hearing threshold and loudness perception. *J Acoust Soc Am* 116, 1066–1080
- McFadden D, Pasanen EG (1994) Otoacoustic emissions and quinine sulfate. *J Acoust Soc Am* 95, 3460–3474
- Talmadge CL, Tubis A, Long GR, Piskorski P (1998) Modeling otoacoustic emission and hearing threshold fine structures. *J Acoust Soc Am* 104, 1517–1543