

Schätzung der Nichtlinearität der auditorischen Verarbeitung bei Normal- und Schwerhörnden durch kategoriale Lautheitsskalierung

Tim Jürgens, Thomas Brand, Stephan D. Ewert, Birger Kollmeier

Medizinische Physik, Carl-von-Ossietzky Universität Oldenburg, 26111 Oldenburg,

E-Mail: tim.juergens@uni-oldenburg.de

Einleitung

Sensorineural Schwerhörnde zeigen im Vergleich zu Normalhörenden neben einer erhöhten Hörschwelle für Reintöne zumeist ein stärkeres Anwachsen der empfundenen Lautheit mit ansteigendem Pegel (Recruitment). Sowohl tierphysiologische also auch für Probanden sehr zeitaufwändige psychoakustische Experimente deuten darüber hinaus darauf hin, dass bei einer Innenohrschädigung das normal (dynamik-)kompressive auditorische Systems weniger kompressiv oder vollständig linearisiert ist. In dieser Studie wird untersucht, inwieweit individuell gemessenes Recruitment mit psychoakustischen Maßen der Nichtlinearität des auditorischen Systems zusammenhängt. Dafür werden individuelle Ergebnisse der beiden Methoden „Temporal Masking Curves“ (TMCs) und kategorialer Lautheitsskalierung (KLS) miteinander verglichen. Außerdem wird untersucht, welche Charakteristika der auditorischen Nichtlinearität sich bereits aus KLS-Daten vorhersagen lassen.

Methode

Fünf Normalhörende (Hörverlust ≤ 15 dB HL) und elf leicht bis mittelgradig sensorineural Schwerhörnde (Hörverlust 25 dB HL bis 60 dB HL bei 4 kHz) nahmen an der Studie teil.

TMCs wurden nach einem Verfahren aus [1] gemessen. Ein 10 ms langer Sinus-Target-Ton mit einer Frequenz von 4 kHz folgte nach einer parametrisch veränderbaren zeitlichen Lücke einem 110 ms langem Sinus-Maskierer mit einer Frequenz von 4 kHz (on-frequency) oder 2,2 kHz (off-frequency). Der Pegel des Maskierers wurde adaptiv mittels eines 3-alternative-forced-choice-Verfahrens angepasst, so dass der nachfolgende Target-Ton (fixiert bei 10 dB Sensation Level) gerade eben maskiert wird. Die Messung wurde bei unterschiedlichen zeitlichen Lücken zwischen 0 ms und 70 ms mindestens sechsmal wiederholt durchgeführt. Nach [1] lassen sich durch Auftragung des off-frequency Maskierpegels gegen den on-frequency Maskierpegel bei gleicher zeitlicher Lücke Input/Output-(I/O)-Charakteristiken des individuellen Gehörs bei der Frequenz des Target-Tons ableiten. An die so gewonnenen I/O-Charakteristiken wurde eine aus Geraden zusammengesetzte Kurve angepasst, die aus einem Abschnitt mit Steigung 1 bei niedrigen Pegeln (lineare Charakteristik) und einem Abschnitt mit Steigung < 1 bei mittleren bis hohen Pegeln (kompressive Charakteristik) besteht. Die Parameter, die diesen Fit beschreiben (siehe Abbildung 1 links unten), sind Kompressionsverhältnis c , Gain g und Lage des Knickpunkts zwischen linearem und kompressivem Teil BP .

KLS wurde adaptiv nach [2] gemessen. Terzrauschen mit Mittenfrequenzen von 500 Hz, 1, 2 und 4 kHz und unter-

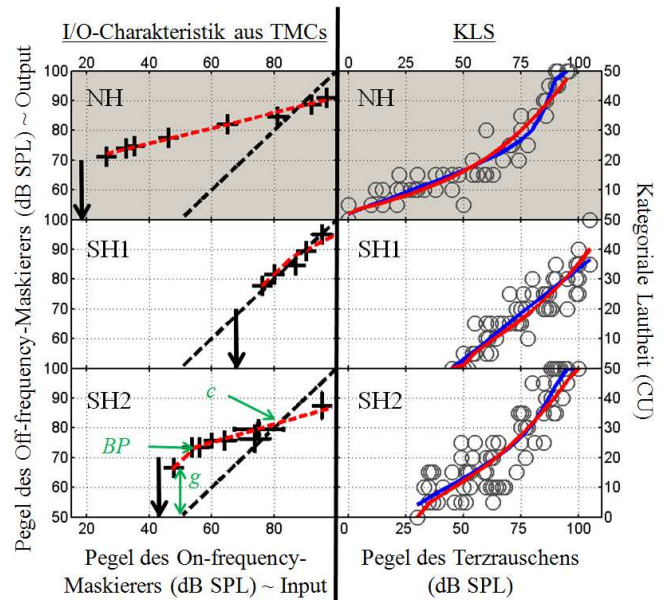


Abbildung 1: Linke Spalte: beispielhafte I/O-Charakteristiken bei 4 kHz abgeleitet aus TMCs für einen Normalhörenden (NH, oben) und zwei Schwerhörnde (SH1 und SH2). Der Abszissenwert des schwarzen Pfeils gibt die absolute Schwelle des Target-Tons an. Ein abschnittsweise gerader Fit (rote gestrichelte Linie) wurde an die Daten angefüttet. Die I/O-Charakteristik von SH2 enthält Definitionen für c , BP und g (siehe Text). Rechte Spalte: KLS-Daten (graue Kreise) für dieselben Probanden. Blaue Linie: gemessene Lautheitsfunktion als Fit an die KLS-Daten, rote Linie: modellierte Lautheitsfunktion.

schiedlichen Pegeln wurden von den Probanden in ihrer Lautheit mit Hilfe von elf Kategorien (z.B. „leise“ oder „sehr laut“) beurteilt. Diesen Kategorien wurden Kategorialeinheiten (CU) von 0 bis 50 CU zugeordnet. Die Messung wurde dreimal an verschiedenen Tagen wiederholt durchgeführt. An die Messdaten (kategoriale Lautheit als Funktion des Pegels, siehe Abbildung 1 rechts) wurde ein abschnittsweise linearer Fit mit zwei Abschnitten angepasst (Lautheitsfunktion). Ein Lautheitsmodell [3] wurde verwendet, um die kategoriale Lautheit derselben Terzrauschen zu berechnen, die die Probanden gehört haben. Modellierte Lautheitsfunktionen wurden an die gemessenen Lautheitsfunktionen angepasst, wobei als freier Parameter der Anteil k des äußeren Haarzellenverlustes HL_{OHC} am Gesamthörverlust HL im Modell individuell variiert wurde:

$$HL_{OHC} = k \cdot HL \quad (1)$$

Ein hoher k -Wert steht dabei für eine steile modellierte Lautheitsfunktion, wohingegen ein niedriger k -Wert eine flache modellierte Lautheitsfunktion bei gleicher Hörschwelle ergibt (vgl. Abbildung 2). Nach Gl. (1) lässt

sich aus dem k -Wert der äußere Haarzellenverlust HL_{OHC} in dB ermitteln.

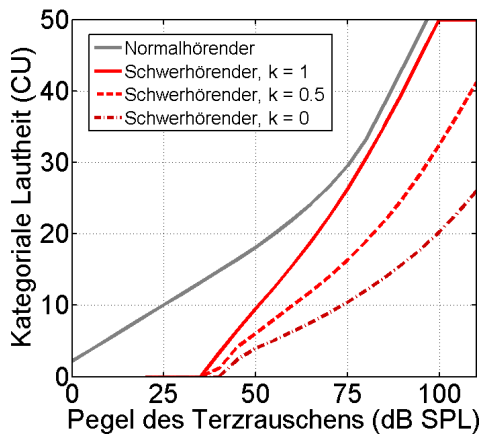


Abbildung 2: Modellierter Lautheitsfunktionen für Terzrauschen aus der kategorialer Lautheitsskalierung für einen Normalhörenden (grau) und einen Schwerhörenden mit 40 dB HL (rot) mit unterschiedlichen Anteilen k des äußeren Haarzellenverlustes am Gesamthörverlust.

Ergebnisse

Abbildung 1 zeigt beispielhaft I/O-Charakteristiken bei 4 kHz (linke Spalte) abgeleitet aus den TMC-Messungen und Lautheitsfunktionen, gemessen mittels KLS (rechte Spalte). Im Folgenden werden nur die Lautheitsfunktionen ausgewertet, die mit Terzrauschen von 4 kHz Mittenfrequenz gewonnen wurden. Es sind Daten von drei Probanden gezeigt, von einem Normalhörenden (NH, oben, grauer Hintergrund) und von zwei Schwerhörenden (SH1 und SH2, Mitte und unten mit weißem Hintergrund). Im Gegensatz zum Normalhörenden zeigen SH1 und SH2 eine steilere Lautheitskurve (Recruitment). SH1 und SH2 zeigen außerdem einen reduzierten Gain und einen höher gelegenen Knickpunkt zwischen linearer und kompressiver Verarbeitung als NH. Allerdings zeigt SH2 ein hohes Kompressionsverhältnis (also eine flache Steigung im kompressiven Bereich), wohingegen SH1 ein niedrigeres Kompressionsverhältnis zeigt, also beinahe eine über den gesamten Input-Pegelbereich lineare Verarbeitung.

Analyse der Daten und Diskussion

Aus TMC-Messung, Hörschwellenmessung und KLS aller Versuchspersonen wurden die oben genannten Parameter der nichtlinearen Verarbeitung abgeleitet und miteinander korreliert. Es zeigt sich, dass der Gain-Verlust (relativ zum Gain des durchschnittlichen Normalhörenden) und HL_{OHC} stark miteinander korrelieren ($r^2 = 0,89$; $p < 0,001$). Auch BP und HL_{OHC} ($r^2 = 0,78$; $p < 0,001$), sowie der Gain-Verlust und HL ($r^2 = 0,87$; $p < 0,001$) korrelieren stark miteinander. Allerdings ergibt sich nur eine schwache Korrelation zwischen dem Kompressionsverhältnis c und der Steigung des unteren Teils der Lautheitsfunktion ($r^2 = 0,31$; $p < 0,05$) und keine Korrelation zwischen c und der Steigung des oberen Teils der Lautheitsfunktion ($r^2 = 0,03$; $p = 0,55$). Diese Korrelationen legen nahe, dass sensorineuraler Hörverlust vor allem einhergeht mit der Verschiebung des

Knickpunktes BP zu höheren Pegeln und einem Verlust des Gains, aber nicht notwendigerweise mit einer Reduktion des Kompressionsverhältnisses c . Eine Vorhersage von Gain g und von BP aus der Lautheitsskalierung ist möglich, wohingegen eine Vorhersage von c nicht möglich ist.

Während die kategoriale Lautheitsskalierung ohne Training auch von wenig geübten Probanden durchgeführt werden konnte, war bei den TMCs mindestens eine halbe Stunde Training für Normalhörende und mindestens eine Stunde Training für Schwerhörende nötig. Die gesamte Messzeit für die kategoriale Lautheitsskalierung (Terzrauschen nur mit 4 kHz Mittenfrequenz) belief sich auf etwa 20 Minuten, während für die TMCs 4 bis 5 Stunden nötig waren.

Schlussfolgerungen

Individuell abgeleitete Parameter zweier Methoden zur Quantifizierung der überschwelligen auditorischen Nichtlinearität, TMC und KLS, wurden miteinander verglichen.

- Sensorineuraler Hörverlust HL korreliert stark in der hier untersuchten Stichprobe von Schwerhörenden mit dem Parameter „äußerer Haarzellenverlust“, der Lage des Knickpunktes zwischen linearer und kompressiver Verarbeitung in der I/O-Charakteristik und dem Gain-Verlust. Es ist nur ein schwacher Zusammenhang zwischen Stärke des Hörverlustes und Recruitment zu erkennen.
- Durch Anpassung der Lautheitsfunktionen eines Lautheitsmodells an gemessene Lautheitsfunktionen können TMC-Gain und TMC-Knickpunkt geschätzt werden. Eine Schätzung des TMC-Kompressionsverhältnisses ist nicht möglich mit KLS.
- KLS ist im Gegensatz zu TMC eine einfach zu handhabende Messmethode zur Schätzung der überschwelligen Nichtlinearität des auditorischen Systems, die schnell auch für ungeübte Patienten durchführbar ist. KLS benötigt nur etwa ein Zehntel der Messzeit, die man für TMC benötigt.

Danksagung

Die Autoren danken dem Hörzentrum Oldenburg GmbH und Angela Josupeit für die Messdurchführung und dem SFB TRR 31 „The active auditory system“ und dem BMBF-Projekt „Modellbasierte Hörgeräte“ für die Finanzierung.

Literatur

- [1] Rosengard, P.S., Oxenham, A.J., and Braida, L.D.: Comparing different estimates of cochlear compression in listeners with normal and impaired hearing. *J. Acoust. Soc. Am.* 117 (2005), 3028-3041.
- [2] Brand, T., Hohmann, V.: An adaptive procedure for categorical loudness scaling. *J. Acoust. Soc. Am.* 112 (2002), 1597-1604.
- [3] Chalupper J., Fastl H.: Dynamic loudness model (DLM) for normal and hearing-impaired listeners. *Acta Acustica united with Acustica* 88 (2002), 378-386.