Zum Einfluss von Innenohrschwerhörigkeit auf die Lautheitssummation

M. Fruhmann, J. Chalupper*, H. Fastl
AG Technische Akustik, MMK, TU München, Fruhmann@mmk.ei.tum.de
**Siemens Audiologische Technik, Erlangen*

Einleitung

Die spektrale Lautheitssummation bewirkt eine Zunahme der Lautstärke mit steigender Bandbreite bei konstant bleibendem Schallpegel. Die vorliegenden Untersuchungen behandeln die Lautheitssummation bei Normal- und Schwerhörenden. Die in Hörversuchen gewonnenen Daten werden mit Modellberechnungen durch das Dynamic Loudness Modell (DLM) nach Chalupper [1] verglichen.

Versuchsdurchführung

Die Versuche, an denen 8 normal- und 7 schwerhörende Probanden teilnahmen, wurden mit Hilfe eines adaptiven 2-AFC-Verfahrens durchgeführt. Dabei waren sowohl die Reihenfolge der Schallpaare als auch die Reihenfolge innerhalb eines Schallpaares aus Referenz- und Testschall zufällig. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, den jeweils lauter wahrgenommenen Schall anzugeben. Je nach Urteil des Probanden wurde der Testschallpegel schrittweise erhöht oder abgesenkt, wobei bei einem Wendepunkt die Schrittweite halbiert wurde. Nach Erreichen der minimalen Schrittweite von 2 dB diente der Median über die Verstärkungsfaktoren bei den folgenden vier Wendepunkten als Versuchsergebnis.

Bei den verwendeten Testschallen handelte es sich um gaussmodulierte Bandpassrauschen mit Bandbreiten von 400 bis 6400 Hz um eine geometrische Mittenfrequenz von 2 kHz. Der Schallpegel des 400 Hz breiten Referenzschalls entsprach bei Normal- und Schwerhörenden jeweils einer Kategorialen Lautheit von 15 oder 30 KU, bei Normalhörenden also einem Pegel von 45 bzw. 70 dB. Der dieser Lautheit entsprechende Pegel wurde für die Darbietung bei Schwerhörenden aus dem Würzburger Hörfeld ermittelt. Die Anfangslautheit des Testschalls wurde bei Versuchsbeginn auf eine Differenz von +/- 5 oder 0 KU zum Referenzschall eingestellt.

Um die Abhängigkeit der Lautheitssummation von der Schalldauer zu erfassen, wurden zwei getrennte Versuche mit Schalldauern von 10 msec und 1 sec von den Teilnehmern je vier mal durchgeführt. Die Schalle mit einer Dauer von 10 msec wurden dabei aus den Schallen mit 1 sec Dauer ausgeschnitten und hatten somit eine geringere Lautheit als diese. Bei kurzen Schallen ist im Folgenden also die Lautheit KL* des jeweiligen langen Schalls angegeben.

Versuchsergebnisse

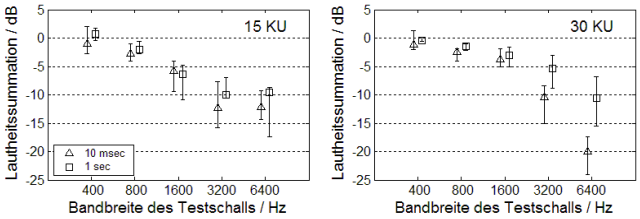

Abb. 1: Beobachtete Lautheitssummation bei Normalhörenden.

Abb. 1 zeigt die Versuchsergebnisse bei Normalhörenden. Dargestellt sind jeweils Median und Interquartilbereiche der Versuchsergebnisse. Die Lautheitssummation vergrössert sich bei Verkürzung der Schalldauer für beide Lautheiten. Zudem ist, insbesondere für kurze Schalle (Dreiecke), eine sehr deutliche Abhängigkeit vom dargebotenen Schallpegel zu erkennen. Die maximale Lautheitssummation steigt bei einer Erhöhung der Lautheit von 15 auf 30 KU von ca. 13 dB auf etwa 20 dB an. Für eine Schalldauer von 1 sec fallen die Unterschiede wesentlich geringer aus, der maximal beobachtete Wert liegt hier bei ca. 10 dB.

Verglichen mit Daten von Verhey ([2], Abb. 7) zeigen sich bei geringem Pegel (45 dB bzw. 15 KU) Unterschiede zu den hier ermittelten Versuchsergebnissen für Bandbreiten von 3200 und 6400 Hz. Während hier keine weitere Lautheitssummation auftritt finden sich bei Verhey Werte von ca. 7 dB. Dieser Unterschied ist möglicherweise auf die beteiligten Versuchspersonen zurückzuführen, ein möglicher Einfluss des verwendeten Ankerschalls kann aber ebenfalls nicht ausgeschlossen werden.

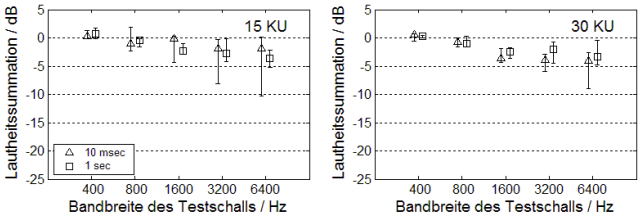

Abb. 2: Beobachtete Lautheitssummation bei Schwerhörenden.

Die Ergebnisse für Schwerhörende sind in Abb. 2 in gleicher Form dargestellt wie in Abb. 1. Generell ist bei Schwerhörenden nur eine sehr geringe Lautheitssummation festzustellen. Die maximale Lautheitssummation entspricht nur ca. 5 dB Dämpfung, wobei hier Schalldauer und Lautheit eine sehr geringe Rolle spielen.

Modellberechnungen

Zur Modellierung der Daten wurde das „Dynamische Lautheitsmodell“ von Chalupper [1] verwendet, eine Software-Implementierung und Erweiterung des Lautheitsmessgeräts nach Zwicker [3, 4].

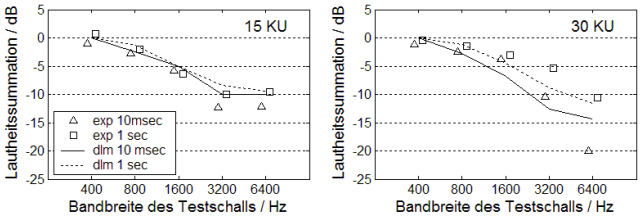

Abb. 3: Berechnete Lautheitssummation für Normalhörende.

Abb. 3 zeigt die Resultate der Berechnungen mit dem DLM und die Mediane der Versuchsergebnisse für Normalhörende. Das Modell ist in der Lage, die Vergrößerung der Lautheitssummation bei einer Erhöhung des Schallpegels von 45 auf 70 dB nachzuvollziehen.

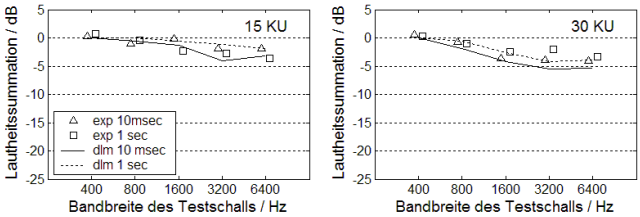

Abb. 4: Berechnete Lautheitssummation für Schwerhörende.

Die Vergrößerung der Lautheitssummation fällt jedoch geringer aus, als bei den beobachteten Versuchsergebnissen. Auch das grundsätzliche Verhalten einer steigenden Lautheitssummation bei

Verkürzung der Schalldauer spiegelt sich in den Berechnungen wider, jedoch in geringerem Maß, als in den Versuchsergebnissen.

Abb. 4 zeigt den Median der Berechnungen für die 7 schwerhörenden Probanden. Das Modell kann die stark verminderte Lautheitssummation nachvollziehen wobei die Modellberechnungen fast ausschließlich im Interqartilbereich der Versuchsergebnisse liegen.

Modifikation des Modells

Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass bei breitbandigen, kurzen Schallen ein Mechanismus bei der Lautheitssummation zum Tragen kommt, den das DLM nur unzureichend nachbilden kann. In der Literatur werden verschiedene Theorien der zeitlich-spektralen Verarbeitung von Schallen diskutiert, von denen hier zwei zur Optimierung des DLM behandelt werden sollen.

Im Zusammenhang der spektralen Lautheitssummation schlägt Verhey [2] eine Anpassung der Kompressionseigenschaften des verwendeten Modells vor. Verringert man in der Pegel-Lautheitsfunktion nach Zwicker [4] die Ruhehörschwelle, so erhöht dies die kompressiven Eigenschaften des Gehörs. Die so erhöhte Kompressivität führt zu einer Verstärkung der Lautheitssummation. Das Gegenteil ist bei Schwerhörigkeit, also bei einer Anhebung der Ruhehörschwelle der Fall. Die Erniedrigung der Ruhehörschwelle darf nur für kurze Schalle in Erscheinung treten.

Eine mögliche Umsetzung besteht darin, einen Tiefpass in das Modell zu integrieren, der einen Faktor zur dauerabhängigen Absenkung der Ruhehörschwelle realisiert. Entsprechend den von Zwicker [5] gefundenen Zeitkonstanten des Gehörs wurde die Zeitkonstante dieses Tiefpasses auf 75msec eingestellt.

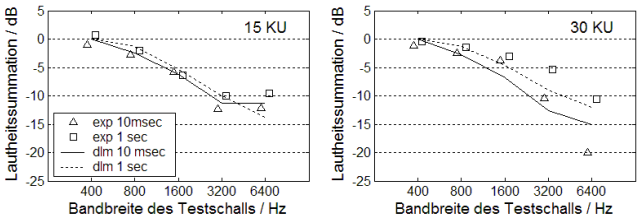

Abb. 5: Berechnete Lautheitssummation für Normalhörende bei Veränderung der Kompressionseigenschaften des Modells.

In Abb. 5 sind die Ergebnisse dargestellt, wie man sie bei Berechnung mit zusätzlichem Tiefpass erhält. Kurze Signale führen nun zu einer leicht erhöhten Lautheitssummation, die Werte erreichen jedoch bei einem Pegel von 70 dB nicht die im Experiment erzielten Ergebnisse. Eine Variation der verwendeten Zeitkonstante in Grenzen von +/- 10 msec brachte keine wesentliche Veränderung mit sich. Eine weitere Vergrösserung der Kompressivität durch stärkere Absenkung der Ruhehörschwelle führte zu einer Verschlechterung des zeitlichenIntegrationsverhaltens des Modells.

Van den Brink [6] und Van Schijndel [7] beschreiben auf Grund von Detektionsexperimenten ein signaladaptives zeitlich-spektrales Integrationsfenster, das bei kurzen breitbandigen Schallen eine effektivere Integration über der Frequenz bewirkt. Übertragen auf die Lautheitswahrnehmung lässt sich ein Fenster annehmen, das die Lautheitssummation bei kurzen breitbandigen Schallen erhöht.

Geht man davon aus, dass dieses Fenster ein konstantes „Zeit-Frequenz-Volumen“ einschliesst, so muss bei Erreichen der maximalen Bandbreite und kürzer werdender Fensterlänge eine stärkere Gewichtung erfolgen. Als erste Implementierung wurde deshalb auf Grundlage der Versuchsergebisse ein Faktor bestimmt, der die Modellberechnungen bei 3200 und 6400 Hz optimiert. In Abb. 6 sind die sich so ergebenden Modellberechnungen dargestellt. Die ermittelten Versuchsergebnisse können nun sehr gut nachvollzogen werden, wurde die Gewichtung ja mit ihrer Hilfe angepasst.

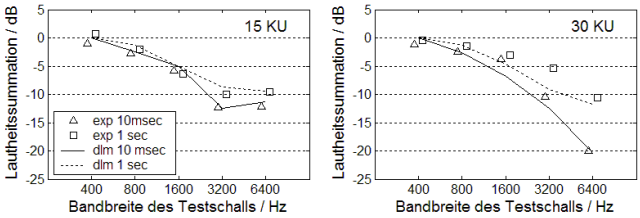

Abb. 6: Modellberechnung mit Gewichtungsfaktor zur Simulation des signaladaptiven Zeit-Frequenz-Fensters.

Vergleich mit Daten aus der Literatur

Zur Evaluierung der ermittelten Gewichtung werden im Folgenden Vergleiche mit Daten von Verhey [4] vorgestellt. Diesen Daten liegt eine ähnliche Versuchsmethode zu Grunde, die Referenzbandbreite betrug jedoch 3200 statt der hier verwendeten 400 Hz.

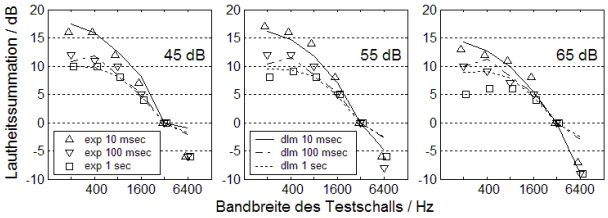

Abb. 7: Daten der Versuche von Verhey und Modellberechnungen mit angepasstem Lautheitsmodell.

Die von Verhey gewonnenen Daten werden durch die Modellberechnungen prinzipiell nachvollzogen. Durch die Modelloptimierung wird vor Allem das Verhalten bei 65 dB für kurze Schalle verbessert. Die Unterschiede der in Abb. 1 vorgestellten Versuchsergebnisse für leise Schalle sorgen dafür, dass das modifizierte Modell bei Bandbreiten von 3200 und 6400 Hz nur bei einem Pegel von 65 dB mit den Versuchsergebnissen übereinstimmt.

Diskussion und Ausblick

Da die Implementierung eines zusätzlichen Tiefpasses zu keinen befriedigenden Ergebnissen führt, ist es vorzuziehen, den Ansatz des schalladaptiven Fensters zur Optimierung des spektralen Summationsverhaltens weiter zu verfolgen. Dazu sind jedoch weitere Daten nötig um eine optimale Anpassung zu erreichen.

Bei Implementierung in ein Lautheitsmodell muss eine Detektion von Dauer und Bandbreite erfolgen, die daraufhin das verwendete Fenster und dessen Gewichtung bestimmt.

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen der Forschergruppe „Hörobjekte" von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert.

Literatur

[1] Chalupper, J., Perzeptive Folgen von Innenohrschwerhörigkeit: Modellierung, Simulation und Rehabilitation, Shaker Verlag, 2002
[2] Verhey, J., Kollmeier, B., Spectral loudness summation as a function of duration, J. Acoust. Soc. Am., 111(3), 1349-1358, 2002
[3] Zwicker, E., Ein Verfahren zur Berechnung der Lautstärke, Acustica, Vol. 10, 304-308, 1960
[4] Zwicker, E., Fastl, H., Psychoacoustics: Facts and Models, 2nd edition, Springer Verlag, 1999
[5] Zwicker, E., „Die Zeitkonstanten (Grenzdauern) des Gehörs“, Zeitschrift für Hörgeräte-Akustik, Vol. 13(3), 82-102, 1974
[6] Van den Brink, W., Houtgast, T., Spectro-temporal integration in signal detection, J. Acoust. Soc. Am., 88(4), 1703-1711, 1990
[7] Van Schijndel, N., Houtgast, T., Festen, J., Intensity discrimination of Gaussian-windowed tones: Indications for the shape of the auditory frequency-time window, J. Acoust. Soc. Am., 105(6), 3425-3435, 1999