

Simulation von Mithörschwellen Normal- und Schwerhöriger mit einem dynamischen Lautheitsmodell

Josef Chalupper

AG Technische Akustik, Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, Technische Universität München

Einführung

Typischerweise ergeben sich bei Innenohrschwerhörigen sowohl hinsichtlich der zeitlichen als auch der spektralen Verdeckung flachere Mithörschwellenmuster als bei Normalhörenden. Im dynamischen Lautheitsmodell DLM [Cha02b] werden spektrale und zeitliche Maskierungseffekte nach der Lautheitstransformation berücksichtigt. Für Normal- und Schwerhörige geschieht dies auf gleiche Weise. Die Frage ist nun, ob durch die Berücksichtigung der Maskierung nach der Lautheitstransformation bereits die reduzierte zeitliche und spektrale Auflösung Innenohrschwerhöriger ausreichend nachvollzogen werden kann. Um Mithörschwellenmessungen simulieren zu können, wurde das Lautheitsmodell mit einem Entscheidungsmechanismus kombiniert. Sowohl der hier verwendete Entscheidungsmechanismus als auch der konzeptionelle Ansatz (Kombination eines Modells des peripheren Gehörs mit einem Entscheidungsmechanismus) bauen auf dem Verfahren nach Dau et al. [Dau96a] auf.

Struktur und Realisierung des Verfahrens

Das Blockschaltbild des hier verwendeten Verfahrens zur Simulation von Mithörschwellenmessungen (Abbildung 1) unterscheidet sich vor allem hinsichtlich des verwendeten psychoakustischen Modells vom Verfahren nach Dau et al.. Weitere wesentliche Unterschiede sind die Dimensionierung des "internen Rauschens" und die Verwendung der sogenannten "gedrosselten Kanallautheiten".

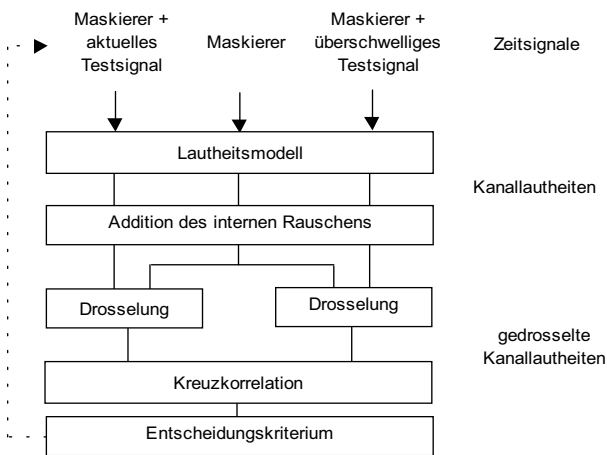


Abbildung 1: Blockschaltbild des Verfahrens zur Simulation von Mithörschwellenmessungen.

Bei der Simulation werden zunächst die gedrosselten Kanallautheits-Tonheits-Zeitmuster der drei Schalle eines 3AFC-Trials berechnet und diese jeweils mit dem gedrosselten Kanallautheits-Tonheits-Zeitmuster eines deutlich überschwelligen Testsignals ("Vergleichsmuster") korreliert. Das Entscheidungskriterium für die Auswahl des vermeintlich richtigen Intervalls ist die höchste Korrelation mit dem Vergleichsmuster.

Im ersten Schritt des Verfahrens werden mit dem dynamischen Lautheitsmodell die Kanallautheiten [Cha02a] von Maskierer plus aktuellem Testsignal, Maskierer plus überschwelligem Testsignal und Maskierer alleine berechnet. Danach wird auf die resultierenden Kanallautheits-Tonheits-Zeitmuster in jeder Frequenzgruppe ein gaußsches Rauschen addiert, um die Intensitätsauflösung des menschlichen Gehörs zu modellieren („internes Rauschen“). Die Standardabweichung σ dieses Rauschens wird so eingestellt, daß sich sowohl für Normal- als auch Schwerhörige für Pegel zwischen 20 dB und 100 dB Intensitätsunterschiedsschwellen von 1 dB ergeben. Um dies zu erreichen muß σ in Abhängigkeit von der Steigung der Lautheitstransformation gemäß folgender empirisch gefundener Formel eingestellt werden:

$$\sigma(L_{Ex}, z) = \sqrt{0,46 \cdot \frac{\partial N'(L_E, z)}{\partial L_E} \Big|_{L_E=L_{Ex}}}$$

Da die Steilheit von $N'(L_E)$ mit dem expansivem Anteil des Hörverlusts [Cha02b] zunimmt, ist die Standardabweichung bei Innenohrschwerhörigen in der Regel größer als bei Normalhörenden. Dadurch wird erreicht, daß trotz Rekrutment die Intensitätsauflösung für Normal- und Schwerhörige gleich ist. Die Erregungspegel L_{Ex} werden aus den Kanallautheiten mit Hilfe der inversen Lautheitstransformation [Cha02a] berechnet. Für zeitvariante Schalle wird für jeden Zeitschritt eine neue Standardabweichung berechnet. Statt der von Dau et al. verwendeten Differenzbildung zwischen "Maskierer plus Testsignal" und "Maskierer" wird hier im nächsten Schritt die gedrosselte Lautheit aus den entsprechenden Mustern berechnet. In den Blöcken "Drosselung" ist ein Berechnungsverfahren enthalten, mit dem die gedrosselte Lautheit bestimmt werden kann [Zwi87]. Das gedrosselte Kanallautheits-Tonheits-Zeitmuster des "Maskierers plus überschwelliges Testsignal" wird bei einer Simulation nur einmal am Anfang berechnet. Bei der Simulation von Mithörschwellenmessungen kann der Gedanke eines kontinuierlichen Frequenzgruppenfilters aufgriffen werden, da die Testtonfrequenzen a priori bekannt sind. Deshalb werden die Mittenfrequenzen der Frequenzgruppenfilterbank signaladaptiv so eingestellt, daß die Testsignalfrequenz der Mittenfrequenz eines Filters entspricht. Die übrigen Filter werden zu tieferen und höheren Frequenzen in Abständen von jeweils 1 Bark aneinandergereiht. Bei zeitlichen Maskierungsexperimenten wird nur diejenige Frequenzgruppe ausgewertet, deren Mittenfrequenz der Testtonfrequenz entspricht. Das in Abbildung 1 erläuterte Verfahren sollte in der Lage sein, zeitliche und spektrale Mithörschwellenmessungen sowohl für Schwer- als auch Normalhörende nachzuvollziehen. Aufgrund der Dimensionierung des internen Rauschens gilt dies darüberhinaus auch für Intensitätsunterschiedsschwellenmessungen.

Simulationsergebnisse

Pegelabhängigkeit der Nachhörschwellen bei Normalhörenden

Um die im DLM implementierte Pegelabhängigkeit der Nachverdeckung [Cha02a] zu überprüfen, wurden mit demselben 3AFC-Verfahren, wie es bei der Simulation von Mithörschwellen verwendet wird, Nachhörschwellen eines gaußschen Rauschens (Bandbreite: 20-5000 Hz, Dauer: 200 ms) für Maskiererpegel von 40 dB, 60 dB und 80 dB gemessen. Die Testsignale waren gaußmodulierte Sinustöne mit einer Frequenz von 1 kHz und einer Dauer von 10 ms. Sie wurden mit Verzögerungen t_V von -10 ms, 0 ms, 10 ms, 20 ms, 40 ms und 100 ms dargestellt.

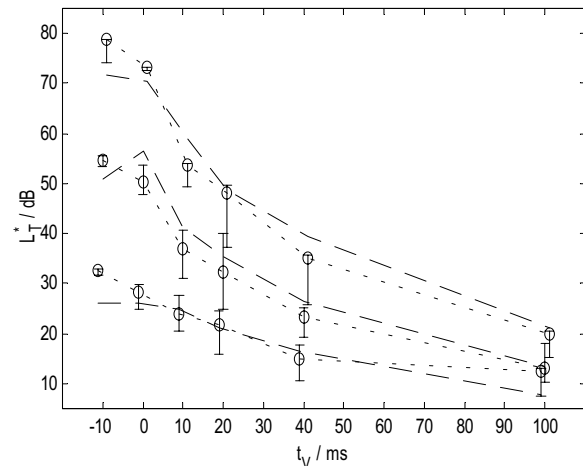


Abbildung 2: Gemessene und simulierte Pegelabhängigkeit der Nachverdeckung von Breitbandrauschen ($L_M = 40, 60, 80 \text{ dB}$).

Die Mediane und Quartile der Daten von drei normalhörenden Versuchspersonen (punktiert, Kreise) sind zusammen mit den Simulationsergebnissen (gestrichelt) in Abbildung 22 dargestellt. Die Meßergebnisse zeigen deutlich den schnelleren Abfall der Nachverdeckung bei höheren Pegeln, wie es auch in vergleichbaren Messungen von Zwicker [Zwi84] und Dau et al. [Dau96b] beobachtet wurde. Diese Pegelabhängigkeit wird von der Simulation sehr gut nachvollzogen und die simulierten Werte stimmen im Bereich der Nachverdeckung sehr gut mit den gemessenen überein. Im Bereich der Simultanverdeckung jedoch liegen die simulierten Schwellen etwas unterhalb der gemessenen.

Pegelhub des MHS-Zeitmusters von AM-GLR bei Normal- und Schwerhörigen

Um das Verfahren hinsichtlich seiner Validität bezüglich des Zusammenspiels von Vor- und Nachverdeckung sowohl für Schwer- als auch Normalhörende zu testen, wurde der Pegelhub ΔL des Mithörschwellen-Zeitmusters von amplitudenmodulierten Gleichmäßig Lauten Rauschen (GLR) gemessen und simuliert. Gleichmäßig Lautes Rauschen ist definiert als Rauschen mit konstanter Spezifischer Lautheit über der Tonheit. Die Spezifische Lautheit des hier verwendeten GLR betrug 0,7 sone/Bark. Dieses für jede Versuchsperson individuelle synthetisierte Rauschen wurde mit verschiedenen Modulationstiefen d (4 dB, 10 dB, 40 dB) und Modulationsfrequenzen f_{mod} (0,5 Hz, 2 Hz, 4 Hz, 8 Hz, 32 Hz) amplitudenmoduliert. Der Maximalpegel der amplitudenmodulierten Schalle wurde nachträglich so korrigiert, daß er immer gleich dem Pegel des stationären Rauschens ($d = 0$ dB, $f_{\text{mod}} = 0$ Hz) war.

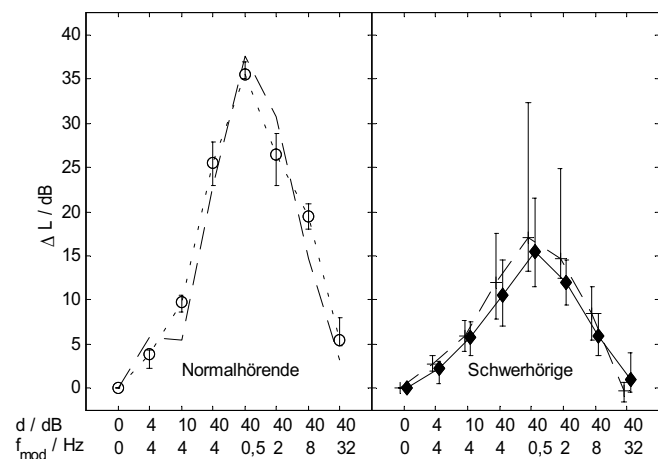


Abbildung 3: Gemessener und simulierter (gestrichelt) Pegelhub ΔL des Mithörschwellen-Zeitmusters von amplitudenmodulierten Breitbandrauschen (GLR) bei 4 kHz.

Der Pegelhub des Mithörschwellen-Zeitmusters entspricht der Differenz der Mithörschwellen im Maximum und Minimum der Hüllkurve des modulierten Schalls. Dadurch heben sich die Unterschiede in den absoluten Schwellen zwischen der bei diesem Hörversuch verwendeten Abfragemethode und dem in der Simulation verwendeten 3AFC-Verfahren auf. Die Schwellen wurden aus dem Mittelwert von zwei Messungen ermittelt. Als Testsignale wurden 10 ms lange Sinustöne mit einer Frequenz von 4 kHz verwendet. An diesem Versuch nahmen 12 Normalhörende (Median Alter 26 Jahre) und 11 Innenohrschwerhörige (Median Alter 68 Jahre) teil. Der mittlere Hörverlust der Schwerhörigen betrug bei 500 Hz 16 dB HL und bei 4 kHz 61 dB HL. Der gemessene Pegelhub ist sowohl bei Schwer- (rechts, Rauten) als auch Normalhörenden (links, Kreise) am größten für die Amplitudenmodulation mit der größten Tiefe (40 dB) und niedrigsten Frequenz (0,5 Hz). Bei Schwerhörigen werden jedoch deutlich geringere Pegelhübe gemessen als für Normalhörende. Die Simulationsergebnisse (gestrichelt, bei Schwerhörigen mit Quartilen) stimmen sowohl für Schwer- als auch Normalhörende recht gut mit den Meßergebnissen überein.

Simultanhörschwellen von Terzrauschen bei Normal- und Schwerhörigen

Abbildung 4 zeigt die Meß- und Simulationsergebnisse für einen Hörversuch zur Simultanverdeckung von Terzrauschen mit einer Kategorieallautstärke KL von 35 KU und einer Mittenfrequenz f_m von 2 kHz [Cha02a]. An diesem Versuch nahmen 3 Normalhörende und 8 Innenohrschwerhörige (Median Alter 68 Jahre) teil. Der mittlere Hörverlust der Schwerhörigen betrug bei 500 Hz 35 dB HL und bei 4 kHz 65 dB HL.

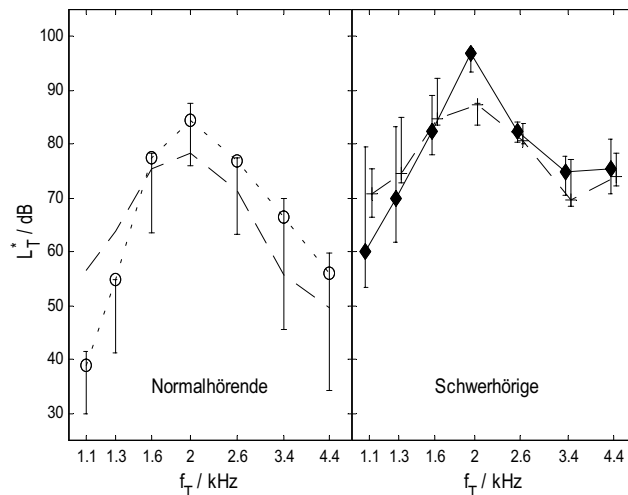


Abbildung 4: Gemessene und simulierte (gestrichelt) Simultanhörschwellen von Terzrauschen ($f_m = 2$ kHz, $KL = 35$ KU).

Die simulierten Schwellen an der unteren Flanke liegen für Normalhörende teilweise deutlich über den gemessenen Werten, während die Werte im Bereich der oberen Flanke zwar unterhalb der Mediane, aber noch innerhalb der Quartile liegen. Bei den Schwerhörigen ergibt sich ein ähnliches Bild, allerdings liegen die simulierten Werte der unteren Flanke innerhalb der Wahrscheinlichen Schwankungen. Das wesentliche Ergebnis dieser Simulation ist, daß die Schwellen im Bereich der oberen Flanke trotz ihrer sehr unterschiedlichen Verläufe für Normal- und Schwerhörige sehr gut nachvollzogen werden können.

Zusammenfassung

Wird das dynamische Lautheitsmodell DLM mit einem Entscheidungsmechanismus unter Berücksichtigung der Intensitätsunterschiedsschwellen kombiniert, so kann mit dem resultierenden System eine Vielzahl von Mithörschwellenmessungen an Normal- und Schwerhörigen nachvollzogen werden. Insbesondere konnte gezeigt werden, daß die flacheren Mithörschwellen von Innenohrschwerhörigen mit DLM vorhergesagt werden können.

Vielen Dank an U. Weber und O. Creighton für die Durchführung von Hörversuchen und Simulationsrechnungen. Diese Arbeit wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Rahmen der Forschergruppe "Hörobjekte" gefördert.

Literatur

- [Cha02a] Chalupper, J., "Perzeptive Folgen von Innenohrschwerhörigkeit: Modellierung, Simulation und Rehabilitation", Dissertation, TU München, 2002.
- [Cha02b] Chalupper, J. and Fastl, H.: Dynamic loudness model (DLM) for normal and hearing impaired listeners. *Acustica - Acta Acustica*, 2002 (submitted).
- [Dau96a] Dau, T., Püschel, D., Kohlrausch, A., "A quantitative model of the "effective" signal processing in the auditory system. I. Model structure", *JASA* 99, 3615-3622, 1996.
- [Dau96b] Dau, T., Püschel, D., Kohlrausch, A., "A quantitative model of the "effective" signal processing in the auditory system. II. Simulations and measurements", *JASA* 99, 3623-3631, 1996.
- [Zwi84] Zwicker, E., "Dependence of post-masking on masker duration and its relation to temporal effects in loudness", *JASA*, 75, 219-223, 1984.
- [Zwi87] Zwicker, E., "Berechnung partiell maskierter Lautheiten auf der Grundlage von ISO 532 B", in: Fortschritte der Akustik, DAGA '87, DPG-GmbH, Bad Honnef, 181-184, 1987.