

Dynamische Lautheitsmodellierung

Jan Hots^{1,3}, Jan RENNIES², Jesko L. Verhey¹

¹ AG Neuroakustik, Institut für Physik, Carl von Ossietzky Universität, D-26111 Oldenburg

² Fraunhofer IdMT Projektgruppe Hör-, Sprach- und Audiotechnologie, D-26129 Oldenburg

³ Email: jan.hots@uni-oldenburg.de

Einleitung

Viele Umweltgeräusche sind nicht stationär, d.h. sie zeigen sowohl zeitliche Schwankungen des Gesamtpegels als auch spektrale Variationen über die Zeit. Diese Aspekte stellen Lautheitsmodelle vor besondere Herausforderungen. Zum Beispiel zeigen eine Reihe von Studien mit normalhörenden Versuchspersonen, dass die spektrale Lautheitssummutation von der Dauer abhängt und in der Regel für kurze Signale größer ist als für lange Signale ([2], [3]). Dieser Effekt konnte erst kürzlich durch eine Erweiterung von RENNIES und Koautoren [4] des dynamischen Lautheitsmodells (DLM, [1]) erstmals vorhergesagt werden. Das Modell geht hierzu von einer Betonung des Stimulusanfangs für spektral breite Stimuli aus. Im vorliegenden Beitrag wird untersucht, inwieweit dieser Modellansatz auch zur Vorhersage anderer zeitlich-spektraler Aspekte der Lautheitswahrnehmung verwendet werden kann. Zunächst wird die Lautheit frequenzmodulierter Signale untersucht. Hierzu werden eigene Daten mit Modellvorhersagen verglichen. Zudem wird untersucht, ob das Modell auch eine Dauerabhängigkeit der spektralen Lautheitswahrnehmung bei Schwerhörigen mit einer Innenohrschwerhörigkeit vorhersagen kann.

Lautheit frequenzmodulierter Signale

Es wurde die Lautheit eines um 1500 Hz zentrierten frequenzmodulierten Signals für die Modulationsfrequenzen 8, 16, 32, 64, 128, 256 und 512 Hz und einem Frequenzhub von 700 Hz bestimmt. Die experimentellen Parameter lehnten sich an eine Studie von Zwicker [6] an. Die Abhängigkeit der Lautheit von der Frequenzmodulationsfrequenz wurde zunächst mit Hilfe eines Lautheitsausgleichs zwischen dem frequenzmodulierten Sinuston und einem Rauschen mit einer Mittenfrequenz von 1500 Hz und einer Bandbreite von 224 Hz bestimmt. Zusätzlich wurde ein Lautheitsausgleich zwischen diesem Rauschen und einem Sinuston einer Frequenz von 1500 Hz durchgeführt. Der Pegel gleicher Lautheit wurde mittels eines adaptiven 2 Interval 2 AFC-Verfahrens bestimmt. Für beide Lautheitsausgleiche wurden beide Signale jeweils als Test- und als Referenzsignal verwendet. Der Referenzpegel betrug 50 dB. Die Signaldauer war jeweils 500 ms. Der Versuch wurde mit 10 normalhörenden Versuchspersonen durchgeführt. In Abbildung 1 sind die Ergebnisse dargestellt (schwarze Linie). Die Abbildung zeigt die von den Versuchspersonen eingestellte Pegeldifferenz bei gleicher Lautheit zwischen dem Sinuston und dem frequenzmodulierten Sinuston über die Modulationsfre-

quenz aufgetragen. Die Pegeldifferenz, die zum Erhalten gleicher Lautheit für beide Signale notwendig ist, steigt mit der Modulationsfrequenz an. Dieses kann dadurch erklärt werden, dass das Gehör bei kleinen Modulationsfrequenzen dem Ton folgt, d.h. die Lautheit entspricht in etwa der eines Sinustones. Bei großen Modulationsfrequenzen ist wegen der begrenzten zeitlichen Auflösung des Gehörs Lautheit durch spektrale Lautheitssummutation erhöht.

Die Daten wurden mit dem erweiterten DLM simuliert. Die Ergebnisse der Simulation sind ebenfalls in Abbildung 1 dargestellt (blaue Linie). Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung von gemessenen Daten und Modellvorhersagen.

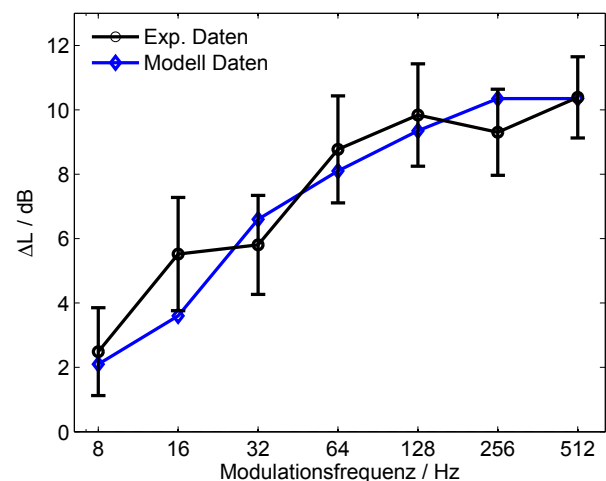


Abbildung 1: Lautheit frequenzmodulierter Signale: Es ist die Pegeldifferenz bei gleich empfundener Lautheit zwischen einem 1500 Hz Sinuston und einem frequenzmodulierten Sinuston einer Mittenfrequenz von 1500 Hz und einem Frequenzhub von 700 Hz über verschiedene Modulationsfrequenzen aufgetragen. Ergebnisse des Experiments sind in schwarz mit Kreisen, die der Modellsimulationen in blau mit Rauten dargestellt.

Spektrale Lautheitssummutation als Funktion der Dauer bei Innenohrschwerhörigkeit

Bei Innenohrschwerhörigen findet man neben einer reduzierten spektralen Lautheitssummutation auch eine im Mittel reduzierte Dauerabhängigkeit der spektralen Lautheitssummutation [5]. Abbildung 2 zeigt experimentelle Daten (aus [5]) zur Dauerabhängigkeit der spektralen Lautheitssummutation für Innenohrschwerhörige (obere Teilbilder) und normalhörende Versuchspersonen (unte-

re Teilbilder). Die Abbildung zeigt den Pegel gleicher Lautheit für Rauschsignale mit Bandbreiten von 200 bis 6400 Hz und einem Referenzrauschen mit einer Bandbreite von 3200 Hz. Die linken Teilbilder zeigen die Daten und die rechten Teilbilder die Modellvorhersagen. Für die Innenohrschwerhörigen wurde der Referenzpegel frequenzspezifisch entsprechend einer Lautheitsskalierung so eingestellt, dass sie der Lautheitsempfindung von Normalhörenden bei einem Pegel von 65 dB entspricht. Der Referenzpegel für die Normalhörenden von 80 dB entsprach dem mittleren Pegel der Messungen bei den Innenohrschwerhörigen.

Um die Daten für Innenohrschwerhörigkeit mit dem erweiterten DLM zu simulieren, wird die Schwerhörigkeit wie im DLM implementiert (vgl. [1]). In diesem Modellansatz wird der gesamte Hörverlust (THL) in einen Anteil der aus dem Verlust von inneren Haarzellen (HL_{ihc}) und einen Anteil der aus dem Verlust von äußeren Haarzellen (HL_{ohc}) aufgeteilt.

$$THL = HL_{ihc} + HL_{ohc} \quad (1)$$

Wie groß der Anteil des Höerverlusts aufgrund von innerem und äußerem Haarzellenverlust ist, wird durch einen Faktor k beschrieben.

$$HL_{ohc} = k \cdot THL \quad (2)$$

Simulationen wurden für die zwei Extremwerte $k = 0$ und $k = 1$ durchgeführt. Für die Simulationen wurde ein flacher Hörverlust von $THL = 40$ dB simuliert. Die Ergebnisse der Simulation mit $k = 1$ sind in der rechten Hälfte der Abbildung 2 dargestellt.

Wie in den experimentellen Daten zeigen die simulierten Pegel gleicher Lautheit für Normalhörende eine deutliche Dauerabhängigkeit der spektralen Lautheitssumation. Bei einer Innenohrschwerhörigkeit nimmt auch im Modell die spektrale Lautheitssumation ab. Es kann auch hier wie in den experimentellen Daten eine etwas höhere spektrale Lautheitssumation bei 10 ms Signalen als bei 1000 ms Signalen. Für $k = 0$ (nicht gezeigt) ist jedoch die spektrale Lautheitssumation für kurze Signale kleiner als für lange Signale. Eine solche Tendenz findet sich bei zwei der neun schwerhörenden Versuchspersonen in der Studie von Verhey und Koautoren [5], jedoch nicht in den in Abbildung 2 gezeigten Mittelwerten.

Fazit

Das erweiterte dynamische Lautheitsmodell von Rennie et al. [4] auf Basis des DLM [1] ist in der Lage, die Lautheit von Signalen mit zeitlich dynamischer Variabilität vorherzusagen. Dieses wurde in diesem Beitrag am Beispiel frequenzmodulierter Signale gezeigt. Das Modell kann auch Aspekte der dynamischen Lautheitswahrnehmung bei Innenohrschwerhörigkeit vorhersagen. So wurde sowohl eine Verringerung der spektralen Lautheitssumation bei Innenohrschwerhörigkeit vorhergesagt als auch eine deutlich verringerte Dauerabhängigkeit

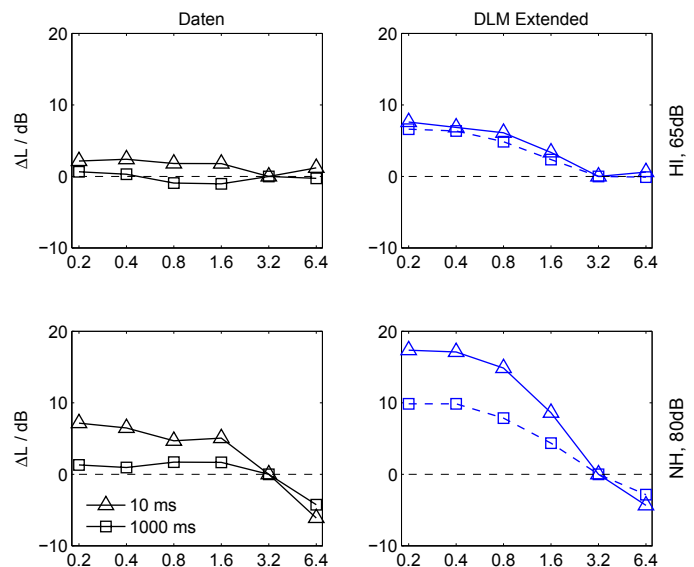


Abbildung 2: Dauerabhängigkeit der spektralen Lautheitssumation bei Probanden mit einer Innenohrschwerhörigkeit (obere Teilbilder) und bei Normalhörenden (untere Teilbilder). Die linken Teilbilder zeigen Daten, die rechten die Simulationen mit dem erweiterten DLM. Dreiecke bzw. Quadrate kennzeichnen Pegel gleicher Lautheit als Funktion der Bandbreite für 10 ms bzw. 1000 ms lange Signale.

der spektralen Lautheitssumation bei diesen Probanden. Generell wird die Stärke der spektralen Lautheitssumation bei Innenohrschwerhörigkeit vom Modell jedoch überschätzt.

Literatur

- [1] Chalupper, J., Fastl, H.: Dynamic Loudness Modell (DLM) for Normal and Hearing-Impaired Listeners, Acta Acustica united with Acustica 88 (2002), 378-386
- [2] Verhey, J., Kollmeier, B.: Spectral loudness summation as a function of duration, J. Acoust. Soc. Am. 111 (2002), 1349-1358
- [3] Verhey, J. und Uhlemann, M.: Spectral loudness summation for sequences of short noise bursts, J. Acoust. Soc. Am. 123 (2008), 925-934
- [4] Rennie, J., Verhey, J.L., Chalupper, J., Fastl, H.: Modeling temporal effects of spectral loudness summation, Acta Acustica united with Acustica, in press, 2009
- [5] Verhey, J.L., Anweiler, A., Hohmann, V.: Spectral loudness summation as a function of duration for hearing-impaired listeners, International Journal of Audiology (2006), 45:287-294
- [6] Zwicker, E.: Loudness and excitation patterns of strongly frequency modulated tones, in Sensation and Measurement, papers in honor of S. S. Stevens, D. Reidel Publishing Comp., Dordrecht, Holland, 325-335 (1974).