

Modellierung der Dynamik der spektralen Lautheitssummation

Jan Rennies^{1,2}, Jesko L. Verhey¹, Hugo Fastl²

¹Institut für Physik, Universität Oldenburg, Deutschland, Email: {jan.rennies, jesko.verhey}@uni-oldenburg.de

²AG Technische Akustik, MMK, TU München, Deutschland

Einführung

Der als spektrale Lautheitssummation bekannte Effekt beschreibt die Tatsache, dass breitbandige Signale im Allgemeinen eine größere Lautheit hervorrufen als schmalbandige Signale, die bei gleichem Pegel dargeboten werden. Neuere Studien (z.B. [1], [2]) zeigen zudem, dass dieser Effekt dauerabhängig ist. So ist die Pegeldifferenz zwischen gleich lauten schmalbandigen und breitbandigen Rauschen für 10 ms lange Signale bis zu 9 dB größer als für 1000 ms lange Signale. Des Weiteren wurde für Folgen von 10 ms langen Pulsen gezeigt, dass die spektrale Lautheitssummation bis zu einer Wiederholrate von 50 Hz der für 10 ms lange Einzelpulse entspricht und erst bei höheren Raten in die für lange Signale übergeht. Bisher veröffentlichte Lautheitsmodelle können diese zeitabhängigen Effekte der spektralen Lautheitssummation nicht nachbilden. In der vorliegenden Studie werden drei verschiedene Ansätze die zeitabhängige spektrale Lautheitssummation zu modellieren in ein Modell zur dynamische Lautheitswahrnehmung (Dynamic Loudness Model, DLM) nach Chalupper und Fastl [3] implementiert und kritisch getestet.

Einfluss einer adaptiven Kompression

Ein wichtiger Parameter bei der Transformation von Erregung in Lautheit ist die Kompression, welche in einem Exponenten $k < 1$ Ausdruck findet (siehe [3]). Eine erhöhte Kompression, d.h. eine Verringerung des Exponenten, erhöht den Effekt der spektralen Lautheitssummation. Eine Möglichkeit dies bei der Modellierung zu nutzen besteht darin, durch einen Tiefpass einen dynamischen Übergang zwischen hoher (für kurze Signale) und niedriger Kompression (für lange Signale) einzuführen. In Anlehnung an Fruhmann *et al.* [2] wurde für diesen Übergang eine Zeitkonstante von 85 ms gewählt. Im Gegensatz zu [2], wo die Kompression durch Absenken der Ruhehörschwelle nur für niedrige und mittlere Pegel verändert wurde, wird im vorliegenden Beitrag die Kompression für den gesamten Pegelbereich variiert. Abb. 1 zeigt Simulationsergebnisse dieser Studie zusammen mit experimentellen Daten aus [1]. Letztere zeigen, dass die Pegeldifferenz zwischen schmal- und breitbandigen Stimuli generell unterschätzt wird und dass auch eine Erhöhung der Kompression über den gesamten Pegelbereich nur zu kleinen Unterschieden zwischen den beiden Dauern führt.

Einfluss einer adaptiven spektralen Stufe

Die Verwendung von schmalen auditorischen Filtern führt dazu, dass die Signalenergie auf mehr Kanäle ver-

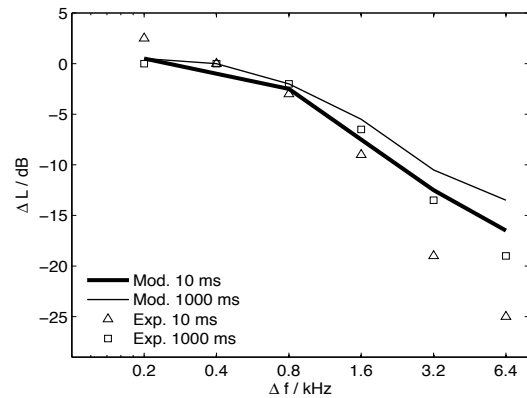


Abbildung 1: Simulierte spektrale Lautheitssummation unter Verwendung adaptiver Kompression (Linien). Symbole zeigen Daten von Verhey und Uhlemann [1].

teilt wird, wodurch sich wiederum auf Grund der Kompression die spektrale Lautheitssummation erhöht. Verhey und Uhlemann [4] stellten ein Modell vor, welches einen dynamischen Übergang zwischen zwei spektralen Filterungsstufen realisierte, die jeweils für kurze bzw. lange Signale optimiert worden waren. Damit konnten sowohl Daten für Einzelpulse als auch Daten für Pulsfolgen simuliert werden. Dieser Ansatz wurde im DLM implementiert und mit dem Ergebnis getestet, dass der gewünschte Effekt nur dann auftritt, wenn die Transformation von Erregungen E zu spezifischen Lautheiten N' zu der Form

$$N' \propto E^k$$

vereinfacht wird, wie sie auch von Verhey und Uhlemann [4] verwendet wurde. Wird zudem der kompressive Exponent k (für lange und kurze Signale gleichermaßen) leicht verringert, können die experimentellen Daten auch quantitativ nachvollzogen werden. Um den beobachteten Übergang der spektralen Lautheitssummation für Pulsfolgen zu simulieren muss wie in [4] eine Zeitkonstante von 25 ms verwendet werden (Abb. 2).

Einfluss eines zeitlich-spektralen Fensters

Van den Brink und Houtgast [5] fanden im Rahmen von Detektionsexperimenten heraus, dass a) eine effektive Integration über die Zeit nur bis zu einer bestimmten Bandbreite und b) eine effektive spektrale Integration nur bis zu einer bestimmten Dauer erfolgen kann. Auf die Lautheit übertragen besteht eine mögliche Realisierung dieses Ansatzes darin, die Summation über die Frequenz bei kurzen, breitbandigen Signalen zu verstärken. Mit dieser durch einen Faktor realisierten Verstärkung konnten Fruhmann *et al.* [2] die erhöhte spektrale Lautheitssum-

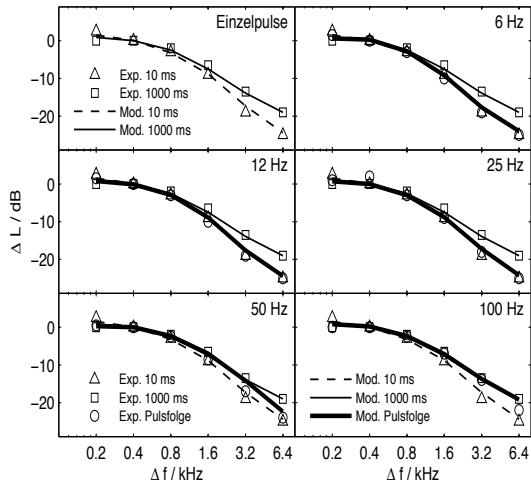


Abbildung 2: Simulierte spektrale Lautheitssummutation unter Verwendung adaptiver Filter (Linien). Symbole zeigen Daten von Verhey und Uhlemann [1].

mation für kurze Einzelpulse modellieren. In der vorliegenden Studie wurde ein Faktor im Rahmen des DLM implementiert, der proportional zur Bandbreite des Stimulus ist, bei anhaltender Anregung abfällt und sich bei ausbleibender Erregung regeneriert. Abb. 3 zeigt, dass damit die Daten für Einzelpulse und Pulsfolgen gut nachvollzogen werden können. Um die Abkehr von der spektralen Lautheitssummutation für kurze Signale bei einer Wiederholrate von etwa 50 Hz zu erreichen, wurde eine Regeneration der Verstärkung mit einer Zeitkonstanten von 15 ms angenommen.

Diskussion

Die Verwendung einer sich dynamisch anpassenden Kompression um die zeitabhängige spektrale Lautheitssummutation zu modellieren führt lediglich zu kleinen Effekten. Zudem bewirkt eine Erhöhung der Kompression für kurze Signale eine flachere Pegel-Lautheitsfunktion, was im Widerspruch zu gemessenen Daten steht [6], die auf die gleiche Steigung für lange und kurze Signale hinweisen. Der von Verhey und Uhlemann [4] vorgestellte Ansatz einer adaptiven spektralen Filterung kann im DLM nur dann umgesetzt werden, wenn die Lautheitsummutation stark vereinfacht wird. Die ursprünglich im DLM verwendete Lautheitstransformation umfasst eine realistische Ruhehörschwelle, wodurch die Kompression bei kleinen Pegeln sehr gering ist. Die spektrale Verbreiterung bei sehr kurzen Dauern führt zu einem hohen Anteil von Komponenten mit niedrigem Pegel, die durch die geringe Kompression nur wenig zur spektralen Lautheitssummutation beitragen können. Während die zwei oben genannten Möglichkeiten zu unrealistischen Pegel-Lautheitsfunktionen führen (unterschiedliche Steigungen für lange und kurze Signale bzw. Verlust der Ruhehörschwelle), ist dies bei der Verwendung eines zeitlich-spektralen Aufmerksamkeitsfensters nicht der Fall. Durch die hier verwendete Implementierung in

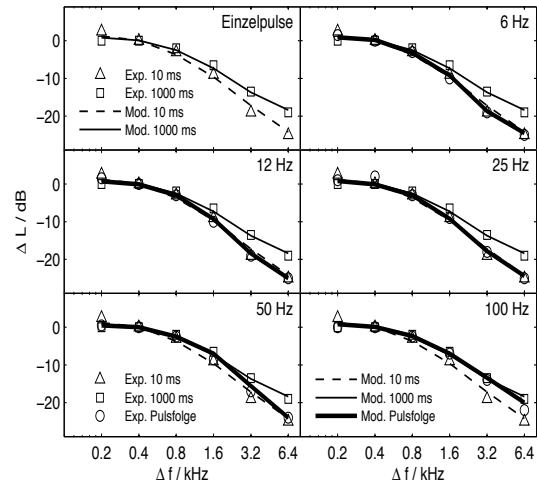


Abbildung 3: Simulierte spektrale Lautheitssummutation unter Verwendung eines zeitlich-spektralen Fensters (Linien). Symbole zeigen Daten von Verhey und Uhlemann [1].

Form eines Faktors können zeitliche Aspekte der spektralen Lautheitssummutation nachvollzogen werden, wenn gleich ein solcher Faktor nur eine effektive erste Näherung eines solchen Effektes darstellt.

Die Studie zeigt, dass die Verwendung eines zeitlich-spektralen Fensters zur Simulation der erhöhten spektralen Lautheitssummutation gegenüber anderen in der Literatur vorgeschlagenen Ansätzen vorzuziehen ist. Die dynamischen Eigenschaften des Modells müssen dabei mit einer Zeitkonstanten beschrieben werden, die deutlich kürzer ist als diejenige zur Realisierung der zeitlichen Integration.

Literatur

- [1] Verhey, J. L., Uhlemann, M.: Spectral loudness summation for sequences of short noise bursts. *J. Acoust. Soc. Am.* 123 (2008), 925–934
- [2] Fruhmann, M., Chalupper, J., Fastl, H.: Zum Einfluss von Innenohrschwerhörigkeit auf die Lautheitssummutation. *Fortschritte der Akustik, DAGA'03, Dt. Gesell. für Akustik e. V.* (2003), Aachen, 253–254
- [3] Chalupper, J., Fastl, H.: Dynamic loudness model for normal and hearing-impaired listeners. *Acta Acustica united with Acustica* 88 (2002), 378–386
- [4] Verhey, J. L., Uhlemann, M.: Spektrale Lautheitssummutation von pulsierenden Geräuschen. *Fortschritte der Akustik, DAGA'07, Dt. Gesell. für Akustik e. V.* (2007), Stuttgart, 847–848
- [5] van den Brink, W.A.C., Houtgast, T.: Spectrotemporal integration in signal detection. *J. Acoust. Soc. Am.* 88 (1990), 1703–1711
- [6] Epstein, M., Florentine, M.: A test of the Equal-Loudness-Ratio hypothesis using cross-modality matching functions. *J. Acoust. Soc. Am.* 118 (2005), 907–913