

# Lautheit zeitlich fluktuierender Geräusche

Giso Grimm, Jesko L. Verhey und Volker Hohmann (Email: giso@medi.physik.uni-oldenburg.de)

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

## I. Einführung

Die meisten Umweltgeräusche sind nicht stationär, sondern unterliegen zeitlichen Pegelfluktuationen. Zur Bewertung beliebiger Schalle müssen daher Lautheitsmodelle entwickelt werden, welche die Lautheit zeitlich fluktuierender Geräusche vorhersagen. Aus der Literatur bekannte dynamische Lautheitsmodelle liefern widersprüchliche Ergebnisse bei der Vorhersage der Lautheit fluktuierender Schalle. Mit dem langfristigen Ziel, vorhandene dynamische Lautheitsmodelle zu verbessern, wurden in dieser Studie psychoakustische Messungen durchgeführt, welche den Einfluß von Amplitudenmodulation und intrinsischen Einhüllendenfluktuation unter Berücksichtigung des spektralen Gehaltes der Signale auf die Lautheit bestimmen. Die Ergebnisse werden mit Modellvorhersagen verglichen.

## II. Lautheitsmodelle

Die Grundlage der in dieser Studie verwendeten Lautheitsmodelle ist das stationäre Lautheitsmodell nach Moore und Glasberg (1996), welchem das Lautheitsmodell nach Zwicker (1960) zugrunde liegt. Es beinhaltet in wesentlichen drei Stufen: Zunächst werden die Erregungsmuster an der Basilarmembran in Abhängigkeit der spezifischen Intensitäten im Innenohr berechnet. Anhand dieser Erregung wird die spezifische Lautheit durch Kompression und Schwellenkriterium gebildet. Zuletzt wird die spektrale Lautheitssummation durchgeführt. Die zeitliche Struktur geht hierbei verloren, nur das Langzeitspektrum geht in das Modell ein. Deswegen wurde von Stone et al. (1997) ein dynamisches Lautheitsmodell vorgestellt, welches auf obigem stationären Modell aufbaut. Hierin wird das Zeitsignal gefenstert und für jedes Fenster das Leistungsspektrum berechnet. Die Modellvorhersagen anhand dieser Kurzzeitspektren entspricht einer instantanen Lautheit. Die zeitliche Integration von Lautheit wird durch eine Tiefpaßfilterung der instantanen Lautheit berücksichtigt. Als Schätzer für die Gesamtlautheit wurde in diesem Beitrag abweichend von Stone et al. nicht das Maximum, sondern der 93% Quantile der instantanen Lautheit gewählt. Aufbauend auf dem dynamischen Modell von Stone et al. (1997) wurde hier ein Modell mit einer weiteren Stufe entwickelt, welche schnelle zeitliche Fluktuationen betont. Dies wird durch Addition des Betragsquadrates der zeitlich abgeleiteten tiefpaßgefilterten Lautheit vor der Berechnung der Quantile erreicht.

## III. Messungen

Alle hier vorgestellten Messungen sind Lautheitsvergleichsmessungen. Der Pegel eines Teststimulus wird in einem adaptiven 2AFC-Verfahren so eingestellt, daß Test- und Referenzstimulus als gleich laut empfunden wurden. Zum Verfahren siehe auch (?).

### III.1 Einfluß aufgeprägter Modulationen auf die Lautheit

Bei dieser Messung wurde ein Lautheitsvergleich zwischen modulierten und unmodulierten Stimuli durchgeführt. Als unmodulierter Referenzstimulus diente ein bandpaßgefiltertes Rauschen mit gaußscher Amplitudenverteilung. Die Bandbreite betrug 3800 Hz, geometrisch um 2 kHz zentriert. Als Teststimulus wurde weißes Rauschen mit einem Sinus (sinusförmige Modulation) bzw. mit tiefpaßgefiltertem Rauschen

(stochastische Modulation) multipliziert und anschließend wie das Referenzsignal bandpaßgefiltert. Durch die multiplikative Modulation  $s(t) = x(t) \cdot m(t)$  ist das Modulationsspektrum gleich dem vollwellengleichgerichteten Modulator-Spektrum und enthält somit höhere Frequenzkomponenten als bei einer herkömmlichen Amplitudenmodulation  $s(t) = (1 + \mu m(t)) \cdot x(t)$ .

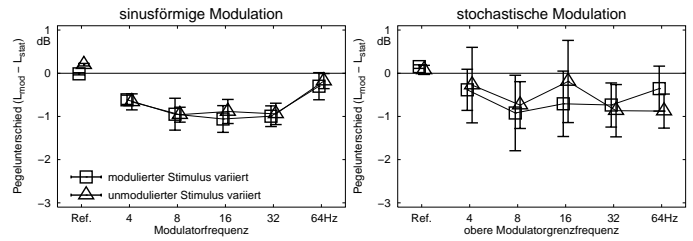


Abbildung 1: Gemessene Pegelunterschiede zwischen modulierten und unmodulierten Stimuli, Mittelwert mit Standardfehler. Zur Beschreibung siehe Text.

In Abbildung 1 sind die Ergebnisse dieser Messungen zu sehen. Im linken Bild ist die Messung mit sinusförmiger Modulation dargestellt, im rechten Bild mit stochastischer. Aufgetragen sind die Pegelunterschiede zwischen moduliertem und unmoduliertem Stimulus über der Modulatorfrequenz (links) bzw. über der oberen Modulatorgrenzfrequenz (rechts). Die Daten wurden über 9 Versuchspersonen gemittelt; die Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler. Eine höhere Lautheit des Stimulus entspricht einer negativen Pegeldifferenz. Die Messung wurde mit Pegelvariation der modulierten Stimuli (geschlossene Symbole) und mit Pegelvariation der unmodulierten Stimuli (offene Symbole) durchgeführt.

Es ist zu sehen, daß die Lautheit durch eine langsame sinusförmige Modulation (Modulatorfrequenz < 32 Hz) erhöht wird; dieser Effekt ist bei einem Signifikanzniveau von 5% signifikant. Eine stochastische Modulation hat einen ähnlichen Einfluß auf die Lautheit, jedoch gibt es größere interindividuelle Unterschiede als bei sinusförmiger Modulation.

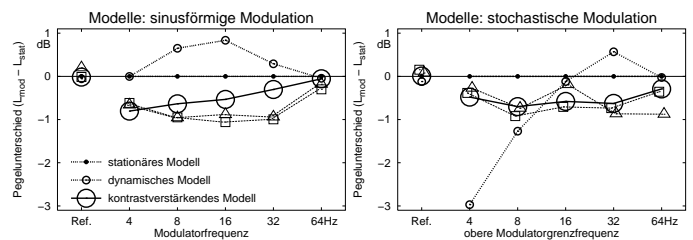


Abbildung 2: Modellvorhersagen der Pegelunterschiede zwischen modulierten und unmodulierten Stimuli bei gleicher Lautheit. Zur Beschreibung siehe Text.

Die Vorhersagen der drei vorgestellten Modelle sind in Abbildung 2 gezeigt. Mit Dreiecken bzw. Quadraten sind die Mittelwerte der Messungen gezeigt, mit Kreisen die Modelldaten.

Das stationäre Modell (kleine geschlossene Kreise) sagt wie erwartet einen 0 dB Unterschied für alle Modulationsfrequenzen vorher. Das an Stone et al. angelehnte dynamische Modell (kleine offene Kreise) sagt hingegen eine entgegen den Messdaten geringere Lautheit sinusförmig modulierter Signale vorher. Bei stochastischer Modulation wird die Lautheit langsam fluktuierender Signale hingegen deutlich ueberschätzt. Eine Erweiterung des Modells durch Einführung einer Kontrast-

verschärfung (siehe Lautheitsmodelle) führt zu einer guten Übereinstimmung zwischen Meßdaten und Modellvorhersagen (große offene Kreise).

### III.2 Einfluß der Signalbandbreite auf die Lautheit modulierter Signale

Bei den oben vorgestellten Messungen war der Parameter das Modulationsspektrum, während die Bandbreite der Signale festgehalten wurde. In einer weiteren Messung wurde umgekehrt die Bandbreite der Signale als Parameter benutzt, während das Modulationsspektrum festgehalten wurde. Diese Messung wurde jeweils für sinusförmige und stochastische Modulationen durchgeführt. Es wurde das Modulationsspektrum gewählt, bei welchem in obiger Messung der größte Effekt gemessen wurde (sinusförmige Modulation 8 Hz, stochastische Modulation 16 Hz Grenzfrequenz). Die Mittelwerte und Standardfehler von 9 Versuchspersonen sind in Abbildung 3 dargestellt. Dort ist der Pegelunterschied zwischen moduliertem und unmoduliertem gleichlauten Stimulus über der Bandbreite der Signale aufgetragen. Sowohl für sinusförmige Modulation (dünne Symbole) als auch für stochastische Modulation (dicke Symbole) ist ein diagonaler Verlauf von links oben nach rechts unten zu sehen. Dieses bedeutet, daß bei breitbandigen Signalen die Lautheit durch Modulation erhöht wird, bei schmalbandigen Signalen die Lautheit jedoch durch die Modulation nicht beeinflusst bzw. erniedrigt wird. Dieses Ergebnis könnte ein Hinweis darauf sein, daß die zeitliche Verarbeitung in der Lautheitswahrnehmung zumindest teilweise vor der spektralen Integration stattfindet. Die Modelle sagen eine von der Bandbreite unabhängige Lautheit vorher.

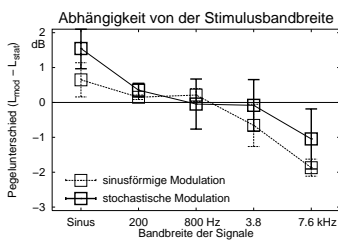


Abbildung 3: Einfluß der Bandbreite auf die Lautheit. Beschreibung siehe Text.

### III.3 Einfluß intrinsischer Fluktuationen und Konzepte der Lautheitsbildung

In einer weiteren Messung wurden nicht die Abhängigkeit von aufgeprägten Modulationen gemessen, sondern der Einfluß intrinsischer Einhüllendenfluktuationen. Dazu wurde gaußsches Rauschen, geglättetes Rauschen und „aufgerauhtes“ Rauschen in ihrer Lautheit miteinander verglichen. Geglättetes Rauschen (low noise noise, LNN) wurde nach einer iterativen Methode von Kohlrausch et al. (1997) gewonnen. „Aufgerauhtes“ Rauschen (high fluctuation noise, HFN) kann durch Umkehrung des Prozesses erzeugt werden. Diese Rauschen haben unterschiedliche Amplitudenstatistiken und somit unterschiedliche Crestfaktoren. Der mittlere Pegelunterschied bei gleicher Lautheit zwischen einem vierfach iteriertem LNN als Referenzstimulus sowie vierfach und zweifach iteriertem LNN, Gaußrauschen und einfach iteriertem HFN als Teststimuli ist in Abbildung 4 über dem Crestfaktor der Signale für 5 Versuchspersonen aufgetragen. Es ist zu sehen, daß die Lautheit mit zunehmendem Crestfaktor zunimmt. Dieses gilt sowohl bei 20 Hz Signalbandbreite wie auch bei 100 Hz Signalbandbreite. Im gleichen Bild sind drei wesentliche Strategien bei der Lautheitsbildung eingezeichnet. Die einfachste Strategie entspricht der Überlegung, daß (bei fester Bandbreite) die Lautheit durch den RMS-Wert bestimmt wird. Dies führt zu einer waagerechten Linie in der obigen Darstellung. Eine andere Strategie ist die Vorstellung, daß die Lautheit durch die maximale Amplitu-

de bestimmt wird. Dies entspricht einer diagonalen Linie der Steigung  $-1$ . Die dritte Strategie entspricht dem Konzept, daß die maximale tiefpaßgefilterte Lautheit das Gesamturteil bestimmt. Bei schmalbandigen Signalen ist dies dem Konzept der maximalen Amplitude ähnlich, da die intrinsischen Fluktuationen langsam sind und ihnen noch gefolgt werden kann. Bei breitbandigen Signalen geht dieses Konzept jedoch in das des RMS-Wertes über, da die schnellen intrinsischen Fluktuationen weggemittelt werden. Dieses dritte Konzept entspricht weitgehend den verwendeten Modellen.

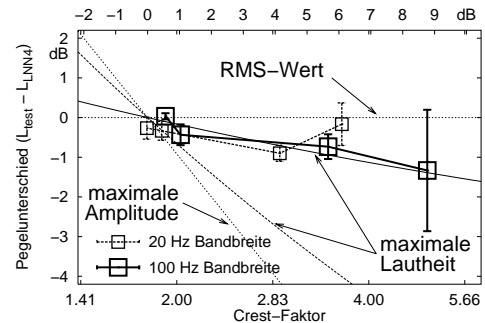


Abbildung 4: Messungen des Einflusses intrinsischer Fluktuationen auf die Lautheit. Dargestellt ist der Pegelunterschied zwischen Test- und Referenzstimulus bei gleicher Lautheit über dem Crestfaktor der Teststimuli. Außerdem sind drei wichtige Konzepte der Lautheitsbildung durch Pfeile markiert.

## IV. Diskussion und Zusammenfassung

Die hier vorgestellten Messungen zeigen, daß die Lautheitswahrnehmung durch zeitliche Fluktuationen der Einhüllenden verändert wird. Bei breitbandigen Signalen wird die Lautheit durch aufgeprägte Modulationen im Bereich von 4 bis 32 Hz signifikant erhöht. Bei schmalen Bandbreiten nimmt dieser Effekt ab bzw. dreht sich um, so daß die Lautheit von Sinustönen durch aufgeprägte Modulation vermindert wird. Diese Bandbreitenabhängigkeit könnte ein Hinweis darauf sein, daß die zeitliche Verarbeitung der Lautheit zumindest teilweise vor einer spektralen Lautheitssummation stattfindet. Auch intrinsische Einhüllendenfluktuationen beeinflussen die Lautheit – ein hoher Crestfaktor führt zu einer erhöhten Lautheitswahrnehmung. Die vorgestellten Modelle sind nur bedingt in der Lage, die gemessenen Effekte zu beschreiben. Keines der Modelle kann die Bandbreitenabhängigkeit beschreiben. Es wird eine weitere Aufgabe sein, diesen Aspekt der Lautheitswahrnehmung in vorhandenen Modellen zu berücksichtigen.

– gefördert von der DFG Ho 1697/2-1 –

## Literatur

- KOHLRAUSCH, A., FASSEL, R., VAN DER HEIJDEN, M., KORTEKAAS, R., VAN DE PAR, S., OXENHAM, A. J. und PÜSCHEL, D. (1997). Detection of Tones in Low-noise Noise: Further Evidence for the Role of Envelope Fluctuations. *Acustica · acta acustica*, **83**:659–669.
- MOORE, B. C. J. und GLASBERG, B. R. (1996). A revision of Zwicker's loudness model. *Acustica*, **5**, 335–345.
- STONE, M. A., MOORE, B. C. J. und GLASBERG, B. R. (1997). A Real-Time DSP-Based Loudness Meter. In *Contributions to Psychological Acoustics – 7th Oldenburg Symposium on Psychological Acoustics* (herausgegeben von Schick, A. und Klatte, M.). University of Oldenburg, Oldenburg. ISBN 3-8142-0572-3.
- VERHEY, J. L. und KOLLMEIER, B. (1998). Influence of methodological factors on estimates of spectral loudness summation. *J. Acoust. Soc. Am.* Submitted to JASA Sept., 1998.
- ZWICKER, E. (1960). Ein Verfahren zur Berechnung der Lautstärke. *Acustica*, **10**:304–308.