

# Lautheit subkritischer Geräusche: Eine Herausforderung für Lautheitsmodelle

Jan Hots<sup>1,4</sup>, Jan Rannies<sup>3</sup>, Jesko L. Verhey<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Institut für Physik, Carl von Ossietzky Universität, D-26111 Oldenburg*

<sup>2</sup> *Abt. Experimentelle Audiologie, Otto-von-Guericke Universität, D-39120 Magdeburg*

<sup>3</sup> *Fraunhofer IDMT / Hör-, Sprach- und Audiotechnologie, D-26129 Oldenburg*

<sup>4</sup> *Email: jan.hots@st.ovgu.de*

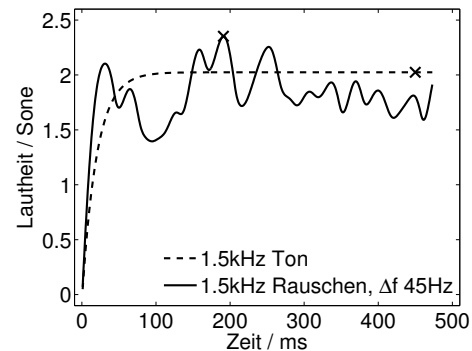
## Einleitung

In der klassischen Vorstellung der Lautheitswahrnehmung unterscheiden sich zwei Fälle für die Abhängigkeit der Lautheit eines Geräusches von dessen Bandbreite. Ist die Bandbreite geringer als eine kritische Bandbreite, also subkritisch, so ist die Lautheit von der Bandbreite unabhängig. Ist die Bandbreite eines Geräusches größer als diese kritische Bandbreite, so steigt die Lautheit mit zunehmender Bandbreite an, was als spektrale Lautheitssummation bezeichnet wird [1]. Diese beiden Fälle können durch stationäre Lautheitsmodelle, die von einer Frequenzgruppenfilterung des Geräusches mit anschließender Kompression und spektraler Integration ausgehen, wiedergegeben werden (vgl. z.B. [2]).

Da viele Umweltgeräusche nicht stationär sind, ist zur Beschreibung ihrer Lautheit ein dynamisches Lautheitsmodell nötig. Ein solches Modell sagt aufgrund seiner Struktur jedoch eine Abhängigkeit der Lautheit subkritischer Geräusche von der Bandbreite vorher. Im Gegensatz zum stationären Lautheitsmodell bleibt im dynamischen Modell die zeitliche Information des Geräusches teilweise erhalten. Zusätzlich zur Frequenzgruppenfilterung, Kompression und spektralen Integration findet eine zeitliche Integration statt, die aus verschiedenen Tiefpassfiltern bestehen kann. Durch einen Detektor wird schließlich das Maximum oder ein Perzentil der berechneten zeitabhängigen Lautheit bestimmt und als Maß für die Lautheit des Geräusches angesehen. Ein Beispiel für ein solches dynamisches Lautheitsmodell ist das erweiterte dynamische Lautheitsmodell (DLM) [3].

In Abbildung 1 ist die mit diesem Modell berechnete zeitabhängige Lautheit eines Sinustons einer Frequenz von 1,5kHz (gestrichelte Linie) und eines Bandpassrauschsignals einer Mittenfrequenz von 1,5kHz und einer Bandbreite von 45Hz (durchgezogene Linie) bei einem Pegel von jeweils 50dB dargestellt. Das durch den Detektor bestimmte Maximum der zeitabhängigen Lautheiten wird durch die Kreuze dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die intrinsischen Amplitudenfluktuationen des Rauschsignals in der berechneten zeitabhängigen Lautheit noch vorhanden sind. Die durch das erweiterte DLM berechnete Lautheit dieses subkritischen Rauschsignals ist dadurch deutlich größer als die des Sinustons.

Im Folgenden soll anhand eines Hörexperiments untersucht werden, ob sich dieser Effekt auch im menschlichen Gehör findet.

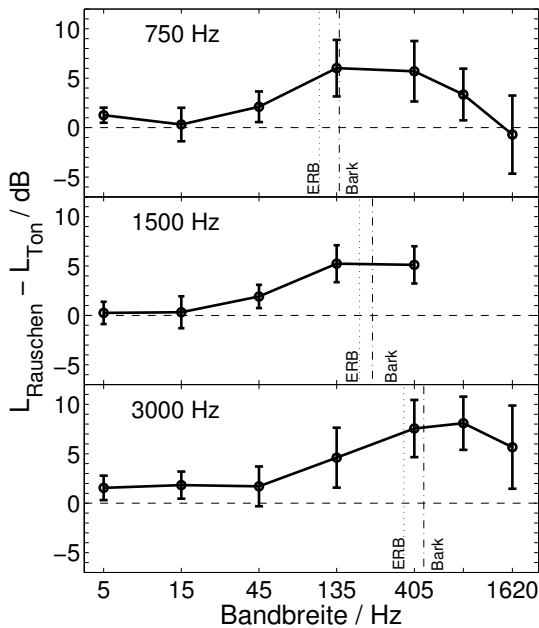


**Abbildung 1:** Durch das erweiterte DLM berechnete zeitabhängige Lautheit eines 1,5kHz Sinustons (gestrichelte Linie) und eines Bandpassrauschens einer Mittenfrequenz von 1,5kHz und einer Bandbreite von 45Hz (durchgezogene Linie) bei einem Pegel von jeweils 50dB. Die Kreuze kennzeichnen das Maximum der jeweiligen Kurve und dienen als Maß der Lautheit.

## Methode

Die Lautheit schmalbandiger Rauschsignale wurde für Mittenfrequenzen von 750Hz, 1500Hz und 3000Hz untersucht. Es wurden Bandbreiten von 5Hz bis 1620Hz gewählt. Für die Mittenfrequenz von 1500Hz wurde ein reduzierter Satz Bandbreiten von 5Hz bis 405Hz verwendet. In einem adaptiven 2-Intervall 2-AFC-Verfahren wurde die Lautheit der Rauschsignale an die eines Sinustons der gleichen Mittenfrequenz und einem Referenzpegel von 50dB angeglichen. Die Aufgabe der Versuchspersonen bestand in jedem Vergleich darin anzugeben, welches der beiden Signale als lauter empfunden wurde. Die Dauer der Signalintervalle betrug 500ms. Diese wurden durch 500ms Stille voneinander getrennt. Während der Wiedergabe wurden die Intervalle optisch hervorgehoben. Für jedes Rauschsignal wurden Startpegel von -10dB, 0dB und +10dB bezüglich des Referenzpegels verwendet. Die Messungen der verschiedenen Bandbreiten und Startpegel wurden für jede Mittenfrequenz verschachtelt. Die Messungen der verschiedenen Mittenfrequenzen wurden getrennt voneinander durchgeführt.

Der Versuch für die Mittenfrequenz von 1500Hz wurde mit 10 normalhörenden Versuchspersonen durchgeführt. Für die Mittenfrequenzen 750Hz und 3000Hz haben 9 der 10 Versuchspersonen am Versuch teilgenommen.



**Abbildung 2:** Pegeldifferenz zwischen Rauschsignalen und Sinustönen bei gleich empfundener Lautheit. Es sind die Mittelwerte über alle Versuchspersonen für Mittenfrequenzen von 750Hz (oben), 1500Hz (mitte) und 3000Hz (unten) für die verschiedenen Bandbreiten dargestellt. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung über die Versuchspersonen an.

## Ergebnisse

Abbildung 2 zeigt die Pegeldifferenzen zwischen den Rauschsignalen und dem entsprechenden Sinuston, die zur gleichen Lautheitsempfindung der beiden Geräusche führen in Abhängigkeit der Bandbreite der Rauschsignale. Es sind die Mittelwerte über alle Versuchspersonen für die Mittenfrequenzen von 750Hz (oben), 1500Hz (mitte) und 3000Hz (unten) dargestellt. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung über die Versuchspersonen an. Durch die senkrechten Linien wird die kritische Bandbreite im Bereich der betrachteten Mittenfrequenz in ERB (gepunktete Linie) und in Bark (Strichpunktlinie) gekennzeichnet.

Für die verschiedenen Mittenfrequenzen zeigt sich ein sehr ähnliches Ergebnis. Für geringe Bandbreiten (5Hz und 15Hz für die Mittenfrequenzen von 750Hz und 1500Hz, sowie 5Hz bis 45Hz für die Mittenfrequenz von 3000Hz) entspricht ein gleicher Pegel etwa einer gleichen Lautheit. Mit zunehmender Bandbreite der Rauschsignale steigt die Pegeldifferenz bis zur kritischen Bandbreite deutlich an. Für die Mittenfrequenzen von 750Hz und 3000Hz ist zu erkennen, dass die Pegeldifferenz oberhalb der kritischen Bandbreite langsam wieder abfällt.

## Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass entgegen der klassischen Vorstellung der Lautheitswahrnehmung, wie sie in stationären Lautheitsmodellen angenommen wird, für subkritische Geräusche eine Abhängigkeit der Lautheit von der Bandbreite vorhanden ist.

Ein dynamisches Lautheitsmodell würde hingegen einen geringeren Pegel für ein schmalbandiges Rauschsignal als für einen Sinuston bei gleicher Lautheit vorhersagen.

Die hier gezeigten experimentellen Daten stehen in Widerspruch zu beiden Modellvorhersagen. Für sehr geringe Bandbreiten der Rauschsignale geht die Pegeldifferenz zum Sinuston bei gleicher Lautheit zwar gegen Null. Für Bandbreiten oberhalb von 15Hz ist für die Empfindung gleicher Lautheit jedoch ein größerer Pegel der Rauschsignale nötig. Die Größe dieses Effekts steigt mit dem rauschhaften Charakter der Rauschsignale. Für ein Rauschsignal einer Mittenfrequenz von 1500Hz und einer Bandbreite von einem Bark wurde ein entsprechender Effekt bereits gefunden, aber nicht diskutiert [4].

Für Bandbreiten oberhalb der kritischen Bandbreite, würde im Rahmen der Modelle durch die spektrale Lautheitssummutation bei gleicher Lautheit ein geringerer Pegel der Rauschsignale erwartet. In den experimentellen Daten zerfällt der gemessene Effekt hingegen nur langsam. Für die Mittenfrequenz von 750Hz geht die Pegeldifferenz bei einer Bandbreite von 1620Hz wieder gegen Null. Für die Mittenfrequenz von 3000Hz ist bei gleicher Lautheit der Pegel des Rauschsignals einer Bandbreite von 1620Hz noch etwa 6dB größer als der des Sinustons.

Die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass die Lautheit schmalbandiger Geräusche durch aktuelle Lautheitsmodelle nicht zufriedenstellend beschrieben werden kann. Als ein möglicher Grund dafür könnte der in Modellen angewandte Detektor angesehen werden. Durch die Verwendung des Maximum der zeitabhängigen Lautheit als Maß für die Lautheit fallen Fluktuationen in der Amplitude eines Schalles, wie sie z.B. in schmalbandigen Rauschsignalen auftreten, sehr stark ins Gewicht.

Die Ergebnisse deuten jedoch auf einen anderen Mechanismus bei der Lautheitsbildung hin. Die vorliegenden Daten können zur Entwicklung eines gehörgerechteren Maßes genutzt werden.

## Literatur

- [1] Zwicker, E., Flottorp, G., Stevens, S.S.: Critical Band Width in Loudness Summation. *J. Acoust. Soc. Am.* 29 (1957), 548–557
- [2] Moore, B.C.J., Glasberg, B.R., Baer, T.: A model for the prediction of thresholds, loudness and partial loudness. *J. Audio Eng. Soc.* 45(4) (1997), 224–239
- [3] Rannies, J, Verhey, J.L., Chalupper, S., Fastl, H.: Modeling temporal effects of spectral loudness summation. *Acta Acustica united with Acustica* 95 (2009), 1112–1122
- [4] Zwicker, E.: Loudness and excitation patterns of strongly frequency modulated tones. *Sensation and Measurement, papers in honor of S. S. Stevens*, edited by B. S. H.R. Moskowitz and J. Stevens (D. Reidel, Dordrecht/Boston) (1974), 325–335