

# Lautheit und Ausgeprägtheit der Tonhöhe von subkritischen Bandpassrauschsignalen

Jan Hots<sup>1,2</sup>, Maria Horbach<sup>1</sup>, Jesko L. Verhey<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Abteilung für Experimentelle Audiologie, Otto-von-Guericke Universität, D-39120 Magdeburg

<sup>2</sup> Email: jan.hots@med.ovgu.de

## Einleitung

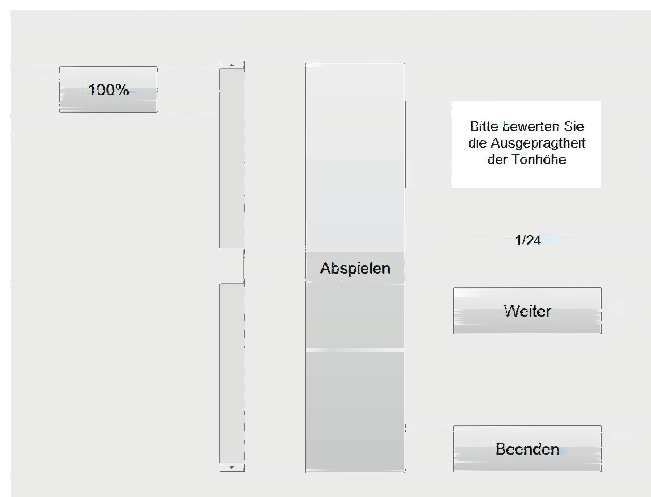
Für Bandpassrauschsignale mit einer Bandbreite, die kleiner als die kritische Bandbreite (subkritisch) ist, zeigen aktuelle Studien einen deutlich höheren Pegel als für einen gleich laut wahrgenommenen Sinuston an der Mittenfrequenz des Rauschens. Diese subkritische Lautheitsunterdrückung ist sowohl bei Normalhörenden als auch bei Versuchspersonen mit einer Innenohrschwerhörigkeit zu finden [1, 2]. Bislang ist nicht geklärt, welcher Mechanismus diesem Effekt zu Grunde liegt, das Auftreten des Effekts bei Innenohrschwerhörigkeit spricht jedoch gegen eine periphere Ursache. Im vorliegenden Beitrag wird untersucht inwieweit sich die subkritische Lautheitsunterdrückung auf die Ausgeprägtheit der Tonhöhe zurückführen lässt. Hierzu wird anhand eines Skalierungsverfahrens der Einfluss von Innenohrschwerhörigkeit auf die Wahrnehmung der Ausgeprägtheit der Tonhöhe von Bandpassrauschsignalen untersucht und die resultierenden experimentellen Daten von Versuchspersonen mit einer Innenohrschwerhörigkeit mit denen von Normalhörenden verglichen.

## Versuchspersonen

Vier Versuchspersonen im Alter zwischen 24 und 59 Jahren mit einer Innenohrschwerhörigkeit haben an der Studie teilgenommen. Alle hatten einen flachen Hörverlust (nicht mehr als 15 dB Unterschied zwischen Minimum und Maximum an den audiometrischen Frequenzen) von 30 bis 60 dB HL im untersuchten Frequenzbereich. Für die Messung wurde das Ohr der Versuchsperson verwendet, das diesen Kriterien besser entsprach. Keine der Versuchspersonen hatte eine retrocochleäre Störung oder einen Tinnitus im untersuchten Ohr.

## Signale

Es wurden Rauschsignale mit Bandbreiten von 5 bis 1620 Hz genutzt. Die geometrische Mittenfrequenz aller Rauschsignale war 1500 Hz. Zur Generierung der Signale wurde zunächst ein weißes Rauschen in den Frequenzbereich transformiert. Dort wurden alle Fourierkomponenten auf Null gesetzt, die außerhalb des gewünschten Bandpassbereichs lagen. Eine nachfolgende inverse Fouriertransformation erzeugte dann das gewünschte Zeitsignal. Die Signaldauer betrug 500 ms inklusive 50 ms  $\cos^2$ -Flanken am Anfang und Ende des Signals. Der Pegel des Signals ( $L_{ref}$ ) wurde nach Gleichung (1) für jede Versuchsperson individuell angepasst:



**Abbildung 1:** Oberfläche zur Bewertung der Tonhaltigkeit des Signals. Das Signal konnte beliebig oft durch Betätigen der Taste „Abspielen“ angehört werden. Mit dem Schieberegler wurde die Bewertung abgegeben. Ein Sinuston bei 1500 Hz konnte zur Orientierung mit der Taste „100%“ abgespielt werden.

$$L_{ref} = thr_{SH} + \left( \frac{ucl_{SH} - thr_{SH}}{ucl_{NH} - thr_{NH}} \right) \cdot 30 \text{ dB SPL} \quad (1)$$

$thr_{SH}$  gibt die individuelle Ruheshwelle der schwerhörenden Versuchspersonen bei 1500 Hz an. Für die Unbehaglichkeitsschwelle für Normal- ( $ucl_{NH}$ ) und Schwerhörende ( $ucl_{SH}$ ) wurde ein Wert von 100 dB HL angenommen, für die Ruheshwelle Normalhörender ein Wert von 0 dB HL. Ziel dieses Angleichs war es, die Messung bei einer Lautheit durchzuführen, die vergleichbar zu einem 30 dB SPL Referenzpegel für Normalhörende ist. Bei diesem Pegel wurden für diese Versuchspersonengruppe die größten Lautheitseffekte gefunden [1]. Bei einer Versuchsperson wurde der Pegel auf Ihren Wunsch um 6 dB erhöht, da sie den berechneten Pegel als sehr leise empfand. Der mittlere Referenzpegel aller Versuchspersonen der vorliegenden Studie betrug 62 dB.

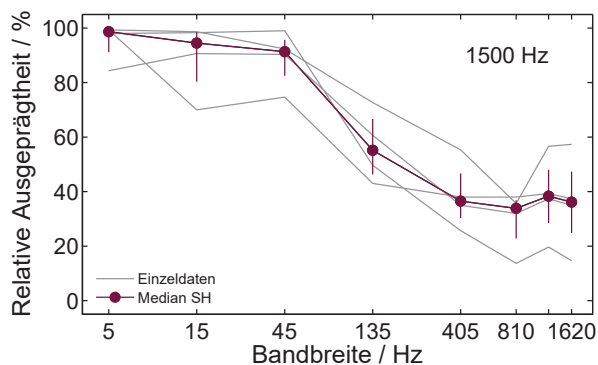
## Messmethode

Die Ausgeprägtheit der Tonhöhe der Rauschsignale wurde von den Versuchspersonen mit Hilfe einer in Matlab implementierten Messoberfläche bestimmt. Dazu wurde der Versuchsperson zunächst in einer Einführungsoberfläche durch drei Beispielsignale mit unterschiedlicher Ausprägung der Tonhöhe diese Empfindungsgröße näher gebracht. Im eigentlichen Experiment wurde in einer abso-

luten Skalierung mit Hilfe eines Schiebereglers die Ausgeprägtheit der Tonhöhe eingestellt. Das zu bewertende Signal konnte beliebig häufig abgespielt werden. Am oberen Ende des Regelbereichs befand sich eine mit 100% gekennzeichnete Taste, mit der die Versuchsperson einen 1500-Hz Sinuston zur Orientierung abspielen konnte. Die Bewertungsoberfläche ist in Abb. 1 gezeigt. Jedes der Signale wurde nacheinander in zufälliger Reihenfolge insgesamt dreimal bewertet. Alle Stimuli wurden mit einer Abtastrate von 44.1 kHz in Matlab erzeugt und über eine Soundkarte (RME Fireface 400) und einen Kopfhörer (Sennheiser HD 650) wiedergegeben.

## Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse der vier Versuchspersonen mit grauen Linien sowie den Median (Kreise) und die Interquartilsbereiche dieser Versuchspersonen in dunkelrot. Die Ausgeprägtheit der Tonhöhe ist als Funktion der Bandbreite dargestellt. Wie erwartet ist die Ausgeprägtheit der Tonhöhe für sehr schmale Bandbreiten nahe 100%, d.h. der eines Sinustones sehr ähnlich. Sie nimmt mit zunehmender Bandbreite ab. Die Abnahme ist abhängig von den Versuchspersonen. Während für eine Versuchsperson Signale mit Bandbreiten von 810 Hz oder größer als kaum ausgeprägt erscheinen ( $\leq 20\%$ ), ist für eine Versuchsperson auch das breiteste Signal nur 40% weniger ausgeprägt in der Tonhöhe als ein Sinuston. Im Mittel ist die Ausgeprägtheit der Tonhöhe bis zu einer Bandbreite von 45 Hz nahe der eines Sinustones ( $\geq 95\%$ ) und nimmt dann mit zunehmender Bandbreite bis etwa 405 Hz ab. Ab dieser Bandbreite beträgt die relative Ausgeprägtheit der Tonhöhe etwa 40% von der eines Sinustones an dieser Mittenfrequenz.



**Abbildung 2:** Ausgeprägtheit der Tonhöhe als Funktion der Bandbreite. Dargestellt sind Median (Kreise) und Interquartile in dunkelrot sowie die Daten der einzelnen Versuchspersonen in grau.

Der Verlauf ist qualitativ ähnlich zu dem der von Fastl und Zwicker [3] gezeigten Daten für Normalhörende für die Mittenfrequenzen von 1 und 2 kHz. Die Ausgeprägtheit der Tonhöhe dieser Daten beträgt allerdings für sehr schmale Bandbreiten schon etwa 90% und nicht nahe 100% wie es die Daten der Schwerhörenden in dieser Studie zeigen. Besonders auffällig ist, dass die Schwerhörenden im Median eine deutlich höhere Ausgeprägtheit der Tonhöhe bei großen Bandbreiten haben als die Literaturdaten der Normalhörenden. Diese beträgt unter 10% [3], wohingegen sie für die Versuchspersonen mit einer Innenohrschwerhörigkeit in dieser Studie noch bei 40% liegt. Ein Teil des Unterschiedes könnte auf ein unterschiedliches Verfahren zur Erzeugung des bandpassgefilterten Rauschens oder auf die verschiedenen Messmethoden zurückgeführt werden. So zeigen eigene Referenzdaten für Normalhörende bei der kleinsten Bandbreite ebenfalls Werte nahe 100%, jedoch liegt bei der größten Bandbreite die Ausgeprägtheit der Tonhöhe für diese Versuchspersonengruppe unter 20% (nicht gezeigt).

Die Signale für den vorliegenden Beitrag wurden wie in den Lautheitsstudien von Hots et al. [1, 2] erzeugt. Eine mögliche Erklärung für den Effekt der subkritischen Lautheitsunterdrückung [1] ist, dass die Lautheit von der Ausgeprägtheit der Tonhöhe abhängt, d.h. tonale Signale lauter als rauschhafte Signale sind. Auf der DAGA 2014 [2] konnte subkritische Lautheitsunterdrückung auch bei schwerhörenden Versuchspersonen nachgewiesen werden, jedoch war der Effekt bei etwa gleicher Lautheit weniger ausgeprägt als bei den Normalhörenden. Der Pegel für die schwerhörenden Versuchspersonen wurde wie in der vorliegenden Studie gewählt. Die hier gefundene geringere Abhängigkeit der Ausgeprägtheit der Tonhöhe von der Bandbreite ist in Einklang mit der Hypothese, dass die Ausgeprägtheit der Tonhöhe einen Einfluss auf die Lautheit hat.

Die Signale für den vorliegenden Beitrag wurden wie in den Lautheitsstudien von Hots et al. [1, 2] erzeugt. Eine mögliche Erklärung für den Effekt der subkritischen Lautheitsunterdrückung [1] ist, dass die Lautheit von der Ausgeprägtheit der Tonhöhe abhängt, d.h. tonale Signale lauter als rauschhafte Signale sind. Auf der DAGA 2014 [2] konnte subkritische Lautheitsunterdrückung auch bei schwerhörenden Versuchspersonen nachgewiesen werden, jedoch war der Effekt bei etwa gleicher Lautheit weniger ausgeprägt als bei den Normalhörenden. Der Pegel für die schwerhörenden Versuchspersonen wurde wie in der vorliegenden Studie gewählt. Die hier gefundene geringere Abhängigkeit der Ausgeprägtheit der Tonhöhe von der Bandbreite ist in Einklang mit der Hypothese, dass die Ausgeprägtheit der Tonhöhe einen Einfluss auf die Lautheit hat.

## Zusammenfassung

Es wurde die Ausgeprägtheit der Tonhöhe für Bandpassrauschsignale bei Versuchspersonen mit einer Innenohrschwerhörigkeit gemessen. Die Abhängigkeit der Ausgeprägtheit der Tonhöhe von der Bandbreite der Rauschsignale ist vom Verlauf zu der in der Literatur gezeigten Abhängigkeit bei Normalhörenden ähnlich, jedoch ist die Dynamik geringer als bei den Normalhörenden. Dieses ist in Einklang mit der in einer früheren Studie gefundenen geringeren subkritischen Lautheitsunterdrückung bei Schwerhörenden als bei Normalhörenden und deutet so auf einen Zusammenhang von Lautheit und Ausgeprägtheit der Tonhöhe hin.

## Literatur

- [1] Hots, J., Rannies, J., Verhey, J.L.: Loudness of subcritical sounds as a function of bandwidth, center frequency, and level. *J. Acoust. Soc. Am.* 135(3) (2014), 1313–1320
- [2] Hots, J., Verhey, J.L.: Lautheit von Signalen mit einer subkritischen Bandbreite bei Innenohrschwerhörigkeit. DAGA 2014, Oldenburg, Germany, ISBN: 978-3-939296-06-5, 429–430, Dega e.V., Berlin.
- [3] Fastl, H., Zwicker, E.: *Psychoacoustics – Facts and Models*, 3<sup>rd</sup> edition (2007), Springer Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-68888-4.