

# Einfluss der Zeitstruktur des Hintergrundes auf die Tonhaltigkeit und Lautheit des tonalen Vordergrundes

Jesko L. Verhey<sup>1</sup>, Stephan J. Heise

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

<sup>1</sup> Email: jesko.verhey@uni-oldenburg.de

## Einleitung

Viele technische Geräusche weisen tonale Komponenten auf, die in der Regel in einen rauschhaften Hintergrund eingebettet sind. Die Tonhaltigkeit beschreibt die Empfindung dieser tonalen Komponenten. Allgemein wird zur Abschätzung der Tonhaltigkeit das Signal-Rauschverhältnis der tonalen Komponenten im Spektralbereich im kritischen Band an der Frequenz der tonalen Komponente untersucht, wobei für die Abschätzung der Stärke der tonalen Komponente (in dB) die Mithörschwelle mit berücksichtigt wird (siehe DIN 45681 [1]). Durch eine Betrachtung im Spektralbereich werden zeitliche Aspekte wie z.B. Pegelschwankungen des rauschhaften Hintergrundes vernachlässigt. Psychoakustische Messungen zeigen jedoch, dass die Hörbarkeit von Tönen in einem rauschhaften Hintergrund sehr unterschiedlich sein kann, je nach dem, ob das verdeckende Rauschen über Frequenzen hinweg zeitlich kohärente Pegelschwankungen aufweist (also komoduliert ist) oder stationär ist. Die bei gleichem Störspektrum deutlich niedrigere Mithörschwelle in Anwesenheit des komodulierten Rauschens wird als Comodulation Masking Release bezeichnet [4]. Der vorliegende Beitrag untersucht, inwieweit diese unterschiedliche Mithörschwelle sich auch in der Tonhaltigkeit und Teillautheit eines überschwelligen Tones im Störgeräusch widerspiegelt.

## Methode

Zur Bestimmung der Abhängigkeit der Tonhaltigkeit bzw. Teillautheit des Tones von der zeitlichen Struktur des Rauschens wurde mit Hilfe eines adaptiven 1-Schritt (1up-1down) 2-Intervall-Zwangwahlverfahren derjenige Pegel eines Sinustones bestimmt, bei dem der 987Hz Ton im unmodulierten Rauschen die gleiche Tonhaltigkeit bzw. die gleiche (Teil-)Lautheit hervorrief wie im komodulierten Rauschen. Der Tondauer war 600ms (inklusive 50ms Rampen). Das Rauschen war ein 700ms langes (inklusive 50ms Rampen) bandbegrenzt weißes Rauschen (250–4000Hz) mit einem Pegel von 65dB SPL. Das komodulierte Rauschen wurde durch Multiplikation mit einer quasiperiodischen Rechteckmodulation mit einer mittleren Modulationsfrequenz von 40Hz erzeugt, wobei das Rauschen im Mittel bei 50 Prozent pro Periode einschaltet wurde. Die Quasiperiodizität wurde dadurch erreicht, dass pro Periode der Einschalt- und Ausschaltzeitpunkt unabhängig und zufällig um bis zu 20 Prozent variiert wurde [2]. Der Pegel gleicher Tonhaltigkeit oder Lautheit wurde für die Pegel 3, 6, 9, 12 und 18 dB über der individuellen Mithörschwelle des

Tones bestimmt. Um mögliche Bias-Effekte zu vermeiden wurden insgesamt 10 adaptive Messungen gleichzeitig verwürfelt (engl. interleaved) durchgeführt (siehe z.B. [3]). Von diesen 10 Messungen war für 6 Messungen der Pegel des Tons im unmodulierten Rauschen fest, während der im komodulierten Rauschen variiert wurde. In den anderen 6 Messungen war die Rolle von fester Referenz und Testintervall mit variablem Tonpegel vertauscht. Die Messung wurde jeweils dreimal wiederholt. Zuvor wurde für jede Versuchsperson die individuelle Mithörschwelle des Tones für die beiden Rauschtypen als Mittel über drei Wiederholungen einer adaptiven Messung mit einem 3-Intervall-Zwangwahlverfahren ermittelt. Neun normalhörende Versuchspersonen nahmen an dem Versuch teil. Die Stimuli wurde über Kopfhörer in einer doppelwandigen Hörkabine dargeboten.

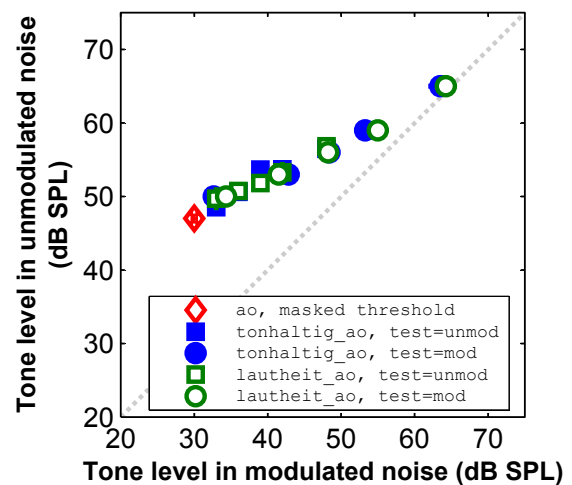


Abbildung 1: Daten einer Versuchsperson: Aufgetragen ist der Pegel gleich empfundener Tonhaltigkeit (geschlossene Kreise und Quadrate) bzw. Lautheit (offene Kreise und Quadrate) des Tones im unmodulierten Rauschen über den Pegel des Tones im moduliertem Rauschen. Zusätzlich ist die Mithörschwelle eingezeichnet (Raute).

## Ergebnisse

Abbildung 1 zeigt exemplarisch für eine Versuchsperson den Pegel gleicher Tonhaltigkeit (geschlossene Kreise und Quadrate) bzw. Lautheit (offene Kreise und Quadrate) für den Ton im unmodulierten Rauschen als Funktion des Tonpegels im modulierten Rauschen. Kreise zeigen die Daten für den Fall, in dem der Ton im modulierten Rauschen in der Tonhaltigkeit bzw. Lautheit an den im unmodulierten Rauschen angeglichen wurden, Qua-

drate zeigen die Daten für den umgekehrten Fall. Die Mithörschwelle ist mit einer Raute gekennzeichnet. Diese ist im modulierten Rauschen deutlich niedriger als im unmodulierten Rauschen, was sich in der Graphik durch die Lage deutlich oberhalb der Winkelhalbierenden (gepunktete Linie) widerspiegelt. Für kleine Signal-Rauschverhältnisse entspricht der Pegel gleich empfundener Tonhaltigkeit ungefähr dem gleichen Pegel oberhalb der Mithörschwelle. Für große Pegel nähern sich die Pegel gleich empfundener Tonhaltigkeit der Winkelhalbierenden an, d.h. die gleiche Tonhaltigkeit wird bei gleichem physikalischem Pegel des Sinustones erhalten. Ein ähnlicher Verlauf zeigt sich für die Pegel gleich empfundener Lautheit des Tones. Die Ergebnisse der anderen acht Versuchspersonen entsprechen im wesentlichen den der hier gezeigten Versuchsperson, d.h. die Daten für Lautheit und Tonhaltigkeit stimmen weitestgehend überein (für die Pegel gleicher Lautheit aller Versuchspersonen siehe Abb. 2). Individuelle Unterschiede sind bei der Mithörschwelle im modulierten Rauschen festzustellen (siehe kleine Rauten in Abb. 2).

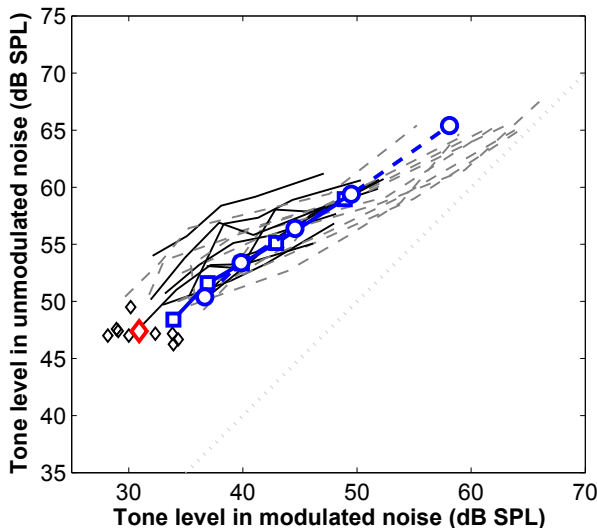


Abbildung 2: Modellvorhersagen: Mithörschwelle (große Raute) sowie Pegel gleicher Lautheit (Kreise und Quadrate). Zusätzlich sind die gemessenen Pegel gleicher Lautheit (Linien ohne Symbole) der neun Versuchspersonen dargestellt. Die Mithörschwellen der Versuchspersonen sind durch kleine Rauten gekennzeichnet.

## Modellierung

Die gute Übereinstimmung zwischen den Pegel gleich empfundener Teillautheit des Tones und gleich empfundener Tonhaltigkeit legt einen engen Zusammenhang zwischen diesen beiden Empfindungsgrößen nahe. Somit könnte eine modellhafte Beschreibung der Teillautheit der tonalen Komponenten eventuell auch zur Vorhersage der Tonhaltigkeit genutzt werden. Abbildung 2 zeigt die Simulationen der Pegel gleich empfundener Teillautheit mit einem etablierten Modell zur Vorhersage der dynamischen Lautheit (DLM). Es wurden die gleichen Symbole wie in Abb. 1 verwendet. Zusätzlich sind

die Messdaten der Versuchspersonen mit Linien dargestellt (gestrichelt grau bzw. durchgezogen schwarz für Referenz mit unmodulierten Rauschen bzw. moduliertem Rauschen). Für die Simulation wurden die gleichen Verfahren gewählt wie bei der Messung, wobei das Modell als künstlicher Beobachter wirkt. Die Teillautheit wurde berechnet als die Differenz der Lautheit vom Gemisch aus Ton und Rauschen und dem Rauschen ohne Ton. Die simulierte Mithörschwelle ist mit einer großen Raute gekennzeichnet, während die gemessenen Schwellen durch kleine dünne Rauten dargestellt sind. Man erkennt eine insgesamt gute Übereinstimmung der Modellvorhersagen sowohl zur Mithörschwelle als auch zur Teillautheit mit den gemessenen Daten. Diese gute Übereinstimmung konnte jedoch nur erreicht werden, in dem der Mithörschwellenunterschied zwischen den beiden Rauschen bei den Modellsimulationen durch Absenkung der Pegels des modulierten Rauschens um 22 dB berücksichtigt wurde. Eine Simulation mit gleichem Pegel für die beiden Rauschtypen führt zu Modellvorhersagen, die auf der Winkelhalbierenden liegen.

## Zusammenfassung

Die Tonhaltigkeit hängt von der zeitlichen Struktur des Hintergrundes ab. Insbesondere nahe der Mithörschwelle kann der gleiche physikalische Pegel des Tones deutlich unterschiedliche Tonhaltigkeitseindrücke hervorrufen. Dieses liegt an der gegenüber dem stationären Rauschen deutlich reduzierten Mithörschwelle im modulierten Rauschen. Bei hohen Pegeln über der Mithörschwelle bestimmt der physikalische Pegel des Tones die Tonhaltigkeit. Eine ähnliche Abhängigkeit findet sich bei der Teillautheit des Tones. Der Effekt kann mit einem Lautheitsmodell vorhergesagt werden, aber nur wenn der Mithörschwellenunterschied berücksichtigt wird.

## Literatur

- [1] DIN 45681 Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschmissionen Deutsches Institut fuer Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin (2005).
- [2] Verhey, J.L., Ernst, S.M.A: Comodulation masking release for regular and irregular modulators. *Hearing Research* 253 (2004), 97-106
- [3] Buus, S., Florentine, M., Poulsen, T.: Temporal integration of loudness, loudness discrimination, and the form of the loudness function. *Journal of the Acoustical Society of America* 101 (1997), 669-680
- [4] Verhey, J.L., Pressnitzer, D., Winter, I.M.: The psychophysics and physiology of comodulation masking release. *Experimental Brain Research* 153 (2003), 405-417
- [5] Chalupper, J., Fastl, H.: Dynamic Loudness Modell (DLM) for Normal and Hearing-Impaired Listeners, *Acta Acustica united with Acustica* 88 (2002), 378-386