

Experimentelle Erfassung von Tonzuschlägen

Jan Hots^{1,2}, Jesko L. Verhey¹

¹ Abteilung für Experimentelle Audiologie, Otto-von-Guericke Universität, D-39120 Magdeburg

² E-Mail: jan.hots@med.ovgu.de

Einleitung

In unserem Alltag sind wir oft von technischen Umweltgeräuschen umgeben und häufig weisen diese tonale Komponenten auf. Tonale Komponenten in Geräuschen haben einen Einfluss auf deren Wahrnehmung und führen im Allgemeinen zu einer Verringerung der Akzeptanz bei Personen, die diesen Schallen ausgesetzt sind. Aus diesem Grund müssen tonale Komponenten bei der Beurteilung von Geräuschmissionen berücksichtigt werden. Ein Überblick der Wahrnehmung dieser tonalen Komponenten (Tonhaltigkeit) sowie anverwandter hörakustischer Größen findet sich im Übersichtsartikel von Hansen und Koautoren [1]. Die Veränderung der Wahrnehmung bei Anwesenheit tonaler Komponenten wird auch in verschiedenen Normen betrachtet [2, 3, 4, 5]. Den Normen ist gemein, dass sie den Pegel des tonalen Anteils in Relation zu dem des rauschhaften Hintergrunds setzen. Während einzelne Normen vorschreiben, dass tonale Komponenten bei Überschreitung eines gewissen Schwellenwertes notiert werden müssen [2, 3], werden in anderen Tonzuschläge zum gemessenen Pegel addiert, um die mit den tonalen Komponenten einhergehende höhere Lästigkeit zu berücksichtigen [4, 5]. Für tonhaltige Geräusche bedeutet das, dass sie bei einem um den Tonzuschlag geringeren Pegel die gleiche Auswirkung bei der Beurteilung von Geräuschmissionen haben wie ein nicht tonhaltiges Geräusch.

Im Folgenden werden die Tonzuschläge der Norm zur Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen (DIN 45681 [5]) genauer betrachtet. Um den Tonzuschlag zu ermitteln, den ein tonhaltiges Geräusch nach dieser der Norm erhält, muss die Differenz des Pegels der tonalen Komponente und deren Mithörschwelle bestimmt werden. Diese wird im Folgenden als ΔL bezeichnet. Ein $\Delta L \leq 0$ dB bedeutet, dass die tonale Komponente unterhalb der Mithörschwelle liegt und somit wird auch kein Tonzuschlag vergeben. Mit steigendem ΔL steigt der Tonzuschlag, bis er für $\Delta L > 12$ dB einen maximalen Wert von 6 dB einnimmt. Eine Übersicht des Zusammenhangs von ΔL und dem Tonzuschlag ist in Tabelle 1 gegeben. In der vorliegenden Studie sollen für Töne in einem Rauschhintergrund Tonzuschläge in einem Hörexperiment gemessen und mit den Werten aus der Norm verglichen werden. Hierzu werden zunächst die Mithörschwellen der tonalen Komponenten im Rauschhintergrund bestimmt. Mit Hilfe dieser Mithörschwellen werden anschließend Pegeldifferenzen bei gleicher Präferenz zwischen Rauschsignalen mit und ohne tonale Komponente gemessen. Verschiedene Studien zeigen, dass Pegeldifferenzen bei gleicher Präferenz abhängig vom Klangcharakter der Geräusche

Tabelle 1: Zusammenhang von Differenz zwischen Tonpegel und Mithörschwelle (ΔL) und Tonzuschlag nach DIN 45681 [5].

ΔL / dB	Tonzuschlag / dB
$\Delta L \leq 0$	0
$0 < \Delta L \leq 2$	1
$2 < \Delta L \leq 4$	2
$4 < \Delta L \leq 6$	3
$6 < \Delta L \leq 9$	4
$9 < \Delta L \leq 12$	5
$12 < \Delta L$	6

eine starke Ähnlichkeit zu Pegeldifferenzen bei gleicher Lautheit aufweisen oder auch deutlich von ihnen abweichen können (vgl. [6, 7, 8]). Um die Abhängigkeit der Präferenz von der Lautheit der in dieser Studie verwendeten Signale zu überprüfen werden für die tonalen Komponenten einer Frequenz zusätzlich Pegeldifferenzen bei gleicher Lautheit ermittelt und mit den Ergebnissen der Präferenzmessung verglichen.

Versuchspersonen

Zehn normalhörende Versuchspersonen (Ruhehörschwellen ≤ 15 dB HL an den Standardaudiometriefrequenzen zwischen 125 Hz und 8 kHz) im Alter zwischen 20 und 35 Jahren haben an der Studie teilgenommen. Sieben der zehn Versuchspersonen hatten bereits Erfahrungen mit psychoakustischen Experimenten. Die Versuchspersonen wurden für ihre Teilnahme bezahlt, sofern sie keine Angestellten der Abteilung waren.

Methode

Die im Folgenden beschriebenen Experimente wurden in einer doppelwandigen Hörkabine durchgeführt. Alle Stimuli wurden mit einer Abtastrate von 44.1 kHz in Matlab erzeugt und über eine Soundkarte (RME Fireface 400) und einen Kopfhörer (Sennheiser HDA 200) wiedergegeben. Der Kopfhörer wurde nach DIN EN ISO 389-8 [9] freifeldentzerrt. Für die Rauschsignale wurde in allen Experimenten gleichmäßig anregendes Rauschen (uniform exciting noise, UEN) verwendet. Alle Signale wurden mit \cos^2 -Flanken einer Dauer von 50 ms weich ein- und ausgeschaltet.

Bestimmung der Mithörschwelle

Für Sinustöne der Frequenzen 350 Hz, 700 Hz und 1400 Hz wurde in einem adaptiven 3-Intervall Ver-

gleichsverfahren (3-alternative forced choice, 3-AFC) die Mithörschwelle im Rauschen mit einem festen Referenzpegel von 60 dB SPL bestimmt. Der Startpegel des Tones lag bei 63 dB SPL. Die Aufgabe der Versuchsperson bestand darin anzugeben, in welchem der Intervalle sich der Ton befindet. Nach jeder Antwort wurde den Versuchspersonen mitgeteilt, ob ihre Antwort richtig oder falsch war. Der Pegel des Tones wurde gesenkt, wenn die Versuchsperson zweimal richtig geantwortet hat, sonst angehoben (1-up 2-down). Die Schrittweite der Pegeländerungen betrug anfänglich 6 dB. Sie wurde am ersten oberen Umkehrpunkt auf 3 dB und am zweiten oberen Umkehrpunkt auf 1 dB reduziert. Mit dieser Schrittweite wurden sechs weitere Umkehrpunkte bestimmt. Der Mittelwert dieser sechs letzten Umkehrungen wurde als Abschätzung für die Mithörschwelle verwendet. Die Dauer der Signalintervalle betrug 500 ms. Während der Signalintervalle wurden Rauschen allein sowie Rauschen mit Ton wiedergegeben. Die Signalintervalle waren durch eine Pause von 500 ms voneinander getrennt und wurden während der Wiedergabe optisch hervorgehoben. Die Messung wurde für jede Tonfrequenz dreimal wiederholt. Der Mittelwert der Abschätzungen für die Mithörschwelle dieser drei Wiederholungen wurde als Mithörschwelle für die folgenden Messungen verwendet. Alle Messungen wurden getrennt voneinander durchgeführt und in ihrer Reihenfolge randomisiert.

Pegeldifferenz bei gleicher Präferenz

In einem adaptiven 2-Intervall 2-AFC-Verfahren wurde die Pegeldifferenz bei gleicher Präferenz zwischen Rauschen mit Ton (Referenzstimulus) und Rauschen ohne Ton (Teststimulus) eingestellt. Der Rauschpegel des Referenzstimulus lag bei 60 dB SPL. Für Töne mit Frequenzen von 350 Hz, 700 Hz und 1400 Hz mit Differenzen des Tonpegels zur individuellen Mithörschwelle der Probanden von $\Delta L = 5$ dB, 10 dB und 15 dB wurden je drei Wiederholungen der Messung mit unterschiedlichen Startpegeln des Teststimulus von -10 dB, 0 dB und +10 dB bezüglich des Referenzrauschpegels durchgeführt. Der Rauschpegel des Teststimulus wurde entsprechend der Antwort der Versuchsperson adaptiv verändert (1-up 1-down). Die Schrittweite lag anfänglich bei 8 dB und wurde bei jedem oberen Umkehrpunkt halbiert bis eine minimale Schrittweite von 2 dB erreicht war. Mit dieser Schrittweite wurden vier weitere Umkehrpunkte bestimmt. Der Mittelwert dieser vier letzten Umkehrungen wurde als Maß für die Pegeldifferenz bei gleicher Präferenz verwendet. Die Dauer der Signalintervalle betrug 2 s. Die Intervalle waren durch eine Pause von 500 ms voneinander getrennt und wurden während der Wiedergabe optisch hervorgehoben. Die Messungen der verschiedenen ΔL und Startpegel wurden für jede Tonfrequenz verschachtelt. Die Messungen der verschiedenen Tonfrequenzen wurden getrennt voneinander durchgeführt und in ihrer Reihenfolge randomisiert. Die Aufgabe der Versuchsperson bestand in dieser Messung darin anzugeben, welches der beiden Signale bevorzugt wird.

Pegeldifferenz bei gleicher Lautheit

Für den Ton der Frequenz von 700 Hz wurde zusätzlich die Pegeldifferenz bei gleicher Lautheit bestimmt. Für die Messung wurde das gleiche 2-Intervall 2-AFC-Verfahren verwendet wie für die Präferenz. Es wurden die gleichen Differenzen des Tonpegels zur individuellen Mithörschwelle der Probanden (ΔL) benutzt. Im Gegensatz zur Bestimmung der Pegeldifferenz bei gleicher Präferenz bestand die Aufgabe der Versuchsperson hier darin anzugeben, welches der beiden Signale als lauter empfunden wird.

Ergebnisse und Diskussion

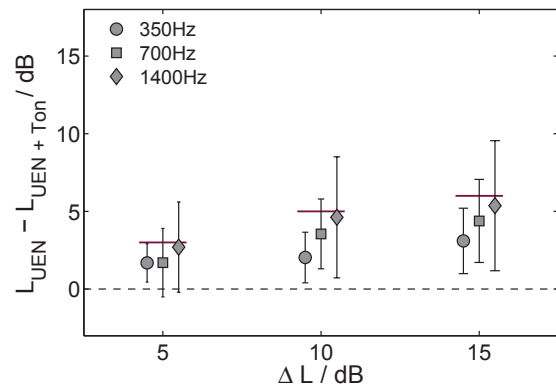


Abbildung 1: Mittlere Pegeldifferenz der zehn Versuchspersonen zwischen Rauschsignal und Rauschsignal mit Sinuston bei gleicher Präferenz als Funktion der Differenz zwischen Tonpegel und Mithörschwelle (ΔL) für Tonfrequenzen von 350 Hz (Kreise), 700 Hz (Quadrate) und 1400 Hz (Rauten). Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung über die Versuchspersonen. Die waagerechten roten Linien kennzeichnen die Tonzuschläge der DIN 45681 [5] für die entsprechenden ΔL .

Abbildung 1 zeigt die mittlere Pegeldifferenz zwischen Rauschen alleine und Rauschen mit Ton bei gleicher Präferenz der zehn Versuchspersonen als Funktion der Differenz zwischen Tonpegel und Mithörschwelle des Tones (ΔL) für Tonfrequenzen von 350 Hz (Kreise), 700 Hz (Quadrate) und 1400 Hz (Rauten). Fehlerbalken geben die interindividuelle Standardabweichung an. Die durch die DIN 45681 [5] für die verschiedenen ΔL vergebenen Tonzuschläge werden durch die waagerechten roten Linien angezeigt. Für alle Tonfrequenzen ist zu erkennen, dass mit steigendem ΔL auch die eingestellte Pegeldifferenz bei gleicher Präferenz zunimmt. Dieses Verhalten stimmt mit dem der Tonzuschläge qualitativ überein. Für die Tonfrequenz von 1400 Hz entsprechen die eingestellten Pegeldifferenzen auch quantitativ den Tonzuschlägen. Für die kleineren Tonfrequenzen nehmen die eingestellten Pegeldifferenzen ab. Eine solche Frequenzabhängigkeit ist ebenfalls in den Daten des diesjährigen DAGA Beitrags von Töpken und Koautoren [8] zu sehen. Dieses lässt eine Frequenzabhängigkeit bei der Vergabe von Tonzuschlägen vermuten, wohingegen die DIN 45681 einen frequenzunabhängigen Tonzuschlag vergibt.

Abbildung 2 zeigt die mittleren Pegeldifferenzen bei glei-

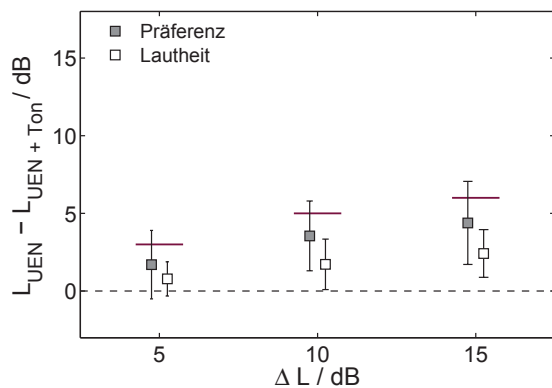


Abbildung 2: Mittlere Pegeldifferenz der zehn Versuchspersonen zwischen Rauschsignal und Rauschsignal mit Sinuston der Frequenz 700 Hz bei gleicher Präferenz (graue Quadrate) und bei gleicher Lautheit (offene Quadrate) als Funktion der Differenz zwischen Tonpegel und Mithörschwelle (ΔL). Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung über die Versuchspersonen. Die waagerechten roten Linien kennzeichnen die Tonzuschläge der DIN 45681 [5] für die entsprechenden ΔL .

cher Präferenz aus Abbildung 1 für die Tonfrequenz von 700 Hz (graue Quadrate) zusammen mit den mittleren Pegeldifferenzen bei gleicher Lautheit (offene Quadrate). Fehlerbalken geben die interindividuelle Standardabweichung an. Durch die waagerechten roten Linien werden wieder die Tonzuschläge der Norm visualisiert. Es ist zu erkennen, dass es wie bei den Pegeldifferenzen gleicher Präferenz auch für die Lautheit eine Zunahme dieser Differenz mit steigendem ΔL gibt. Das bedeutet, dass das Hinzufügen des Tones zum Rauschen die Gesamtlautheit erhöht hat. Die gemessenen Pegeldifferenzen gleicher Lautheit sind jedoch deutlich kleiner als die Pegeldifferenzen gleicher Präferenz. Das bedeutet, dass die Lautheitserhöhung nicht ausreichend ist um die Abnahme der Präferenz zu erklären. Daraus lässt sich schließen, dass für die verwendeten Signale neben der Gesamtlautheit eine weitere perzeptive Größe einen Einfluß auf die Präferenz hat.

Die DIN 45681 bezeichnet diese zusätzliche Größe als Tonhaltigkeit und berücksichtigt die veränderte Lästigkeit durch Vergabe von Tonzuschlägen auf Basis der Pegel oberhalb der Mithörschwelle. Verhey und Heise [10] schlagen vor, dass die Tonhaltigkeit durch eine Messung der Lautheit der tonalen Komponente direkt bestimmt werden könnte. Demnach handelt es sich also nicht um die Änderung der Gesamtlautheit, sondern um die Teillautheit der tonalen Komponente. Falls sich der Zusammenhang zwischen Teillautheit der tonalen Komponente und der Tonhaltigkeit bestätigt, könnte eine zukünftige Norm die Tonhaltigkeit auf Basis der Lautheit statt auf Basis des Pegels oberhalb der Mithörschwelle bestimmen. Der Zusammenhang von Tonhaltigkeit und Teillautheit könnte auch den kompressiven Charakter der durch die DIN 45681 vergebenen Tonzuschläge teilweise erklären. Um dies genauer zu beleuchten sind weitere Messungen notwendig.

Der in dieser Studie gewählte Ansatz erlaubt eine Quantifizierung des Tonzuschlages unabhängig von der genauen perceptiven Charakterisierung der Tonhaltigkeit. Es ist bei einer solchen Messung darauf zu achten, dass das nicht tonhaltige Testsignal eine hohe spektrale Ähnlichkeit zu dem rauschhaften Hintergrund des betrachteten Referenzsignals hat, da ansonsten andere Empfindungsgrößen, wie z.B. die Schärfe, einen Einfluß auf die Pegeldifferenz bei gleicher Präferenz haben. So haben z.B. Töpken und Koautoren [8] gezeigt, dass sich die Pegeldifferenz bei gleicher Präferenz für ein rosa Rauschen deutlich von der für ein weißes Rauschen als Referenzstimulus unterscheidet.

Literatur

- [1] Hansen, H., Verhey, J.L., Weber, R.: The magnitude of tonal content. A review. *Acta Acustica united with Acustica* 97 (2011), 355–363
- [2] ANSI S1.13: Measurement of Sound Pressure Levels in Air. 2005
- [3] IEC 61400-11: Wind turbine generator systems – Part 11: Acoustic noise measurement techniques Reference. 2006
- [4] ISO 1996-2: Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 2: Determination of environmental noise levels. 2007
- [5] DIN 45681: Akustik – Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschmissionen. 2005
- [6] Verhey, J.L., Luft, T., Hots, J., Rottengruber, H.: Psychoakustische Bewertung einer thermoakustischen Motorkapsel. DAGA 2014, Oldenburg, Germany. ISBN: 978-3-939296-06-5, pp. 44-45, Dega e.V., Berlin.
- [7] Töpken, S., Verhey, J.L., Weber, R.: Preference and loudness of multi-tone sounds. AIA-DAGA 2013, Merano, Italy. ISBN: 978-3-939296-05-8, pp. 1269-1272, Dega e.V., Berlin.
- [8] Töpken, S., van de Par, S., Weber, R.: Suitable reference sounds for loudness and preference matching experiments. DAGA 2015, Nürnberg, Germany, Dega e.V., Berlin.
- [9] DIN EN ISO 389-8: Akustik – Standard-Bezugspegel für die Kalibrierung audiometrischer Geräte – Teil 8: Äquivalente Bezugs-Schwellenschalldruckpegel für reine Töne und circumaurale Kopfhörer. 2004
- [10] Verhey, J.L., Heise, S.J.: Suprathreshold perception of tonal components in noise under conditions of masking release. *Acta Acustica united with Acustica* 98 (2012), 451-460