

Zur Berechnung psychoakustischer Größen mehrerer Schallquellen

Martin Klemenz, Janina Fels

Institut für Technische Akustik, RWTH Aachen, D-52056 Aachen

1 Einführung

Die Lästigkeit eines Geräuschs lässt sich zwar nicht hinreichend, aber zumindest näherungsweise durch psychoakustische Größen beschreiben. Neben der Lautheit nach Zwicker [1] werden in diesem Beitrag die Schärfe nach von Bismarck [2], die Rauigkeit nach Daniel und Weber [3] und die Tonhaltigkeit nach Pedersen und Soendergaard [4] untersucht. Die hierdurch beschriebene Dimension eines Geräuschs wird auch oft als "Unangenehmheit" bezeichnet. Kognitive Effekte sind hierin nicht enthalten.

Eine wichtige Frage ist hierbei, wie sich diese Größen bei einer Ansammlung mehrerer Signale verhalten, insbesondere wenn nicht alle Komponenten des Summensignals bekannt sind. So ist zu klären, ob für die Addition zweier Signale mit gleicher Lautheit, aber z.B. unterschiedlicher Schärfe ein Erwartungswert für die Gesamtschärfe formuliert werden kann. Des Weiteren soll geklärt werden, wie stark hierbei der Einfluss der räumlichen Anordnung der Schallquellen ist.

2 Addition diotischer Signale

Wenn z.B. bekannt ist, dass Signal Y_1 viel leiser als Signal Y_2 ist, wird Y_1 im Summensignal keine nennenswerte Lautheitsänderung herbeiführen, weil die Lautheiten N_1 und N_2 durch Addition verknüpft werden. Hierfür existieren bekannte Gesetzmäßigkeiten; so ergibt sich z.B. für gleichförmig anregendes Rauschen aus der Zwickerschen Näherung [1]:

$$N(Y_1 + Y_2) \approx (N_1^{(1/0,23)} + N_2^{(1/0,23)})^{0,23} \quad (1)$$

Bei anderen psychoakustischen Größen kann zunächst vermutet werden, dass sich ein Mittelwert zwischen den beiden Signalen einstellt. Bei zwei unkorrelierten Signalen Y_1 und Y_2 mit gleicher Lautheit und $Y_{12} = Y_1 + Y_2$ wären dann zu erwarten:

- Gesamtschärfe $S(Y_{12}) = \sqrt{S_1 S_2}$ (2)

- Gesamtrauigkeit $R(Y_{12}) = \sqrt{R_1 R_2}$ (3)

- Gesamttonhaltigkeit $T(Y_{12}) = 0,5 (T_1 + T_2)$ (4)

Die geometrischen Mittel sind deswegen anzusetzen, weil Schärfe und Rauigkeit Verhältnisskalen sind [1], während es sich bei Tonhaltigkeit (d.h. $T \hat{=} \Delta TA$) um eine logarithmierte Verhältnisskala in [dB] handelt. Um Einzel- und Summensignale mit gleicher Lautheit zu untersuchen, wird $Y_{12} = (1/\sqrt{2})(Y_1 + Y_2)$ verwendet.

Anhand einer großen Zahl von Geräuschpaaren soll nun überprüft werden, ob die Annahmen (2)-(4) zutreffen. Hierzu werden stationäre und diotische Signale mit gleicher Lautheit ($N = 15$ sone_{GF}) und mit einer Kohärenz von maximal 0,15 verwendet, und zwar

- reale Signale aus Geräuschkatalogen (u.a. [5]), und
- synthetische Signale, die durch Variation signaltheoretischer Parameter gewonnen wurden [6] und reale Geräusche annähernd nachbilden.

Die Anzahl der Geräuschpaare beträgt jeweils 100; bei Rauigkeit sind nur synthetische Geräusche in ausreichender Zahl vorhanden. Die Signale werden auf eine Länge von 0,5 s zugeschnitten, und es sind psychoakustische Größen jeweils für die Einzelsignale und das Summensignal zu berechnen. Bild 1 zeigt die Abweichungen von den vermuteten Mittelwerten, d.h. zwischen den linken und rechten Seiten von (2)-(4).

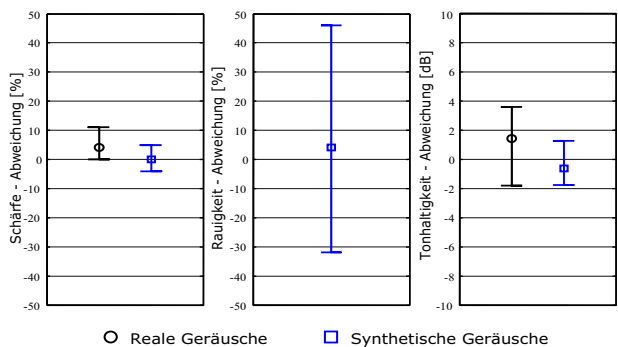


Bild 1 Psychoakustische Größen für addierte Signale bezogen auf vermutete Mittelwerte, berechnet mit realen bzw. synthetischen Schallsignalen

- Die tatsächlichen psychoakustischen Größen weichen von den vermuteten Mittelwerten bezüglich der Mediane nur geringfügig ab, so dass sich die Annahmen (2)-(4) zunächst bestätigen. Die Interquartilsbereiche sind allerdings nur bei der Schärfe gering, bei Tonhaltigkeit und insbesondere bei Rauigkeit sind sie relativ groß.
- Die Ursachen hierfür liegen u.A. darin, dass bei Rauigkeit und Tonhaltigkeit Änderungen in der spektralen Feinstruktur (z.B. Änderung der Wellenform, Verdeckung) große Änderungen im Gesamtwert hervorrufen können, während es sich bei Schärfe um eine integrierende Größe handelt, bei der schmalbandige Effekte irrelevant sind.
- Einfluss der Kohärenz: Da die Signalpaare annähernd unkorreliert sind, hat die Phasenlage auf psychoakustische Größen hier keinen Einfluss. In der Realität finden sich solche Szenen z.B. an Arbeitsplätzen mit mehreren Maschinen. Dagegen spielt die Phasenlage immer dann eine wichtige Rolle, wenn mehrere Signalkomponenten mit gleicher Grundfrequenz addiert werden, wie es z.B. beim Kfz-Innengeräusch der Fall ist. Entsprechende Untersuchungen sollen hierzu demnächst durchgeführt werden.

3 Addition dichotischer Signale

Sobald zwischen rechtem und linkem Ohrsignal Unterschiede auftreten, spricht man von "dichotischen" Signalen. Für diesen Fall weisen frühere Studien bereits darauf hin, dass im Falle der Lautheit eine Mittelung zwischen rechtem und linkem Ohrsignal erfolgt [7]:

$$N_{\text{mittl}} \approx (N_{\text{links}} + N_{\text{rechts}})/2 \quad (5)$$

Auch für die Rauigkeit trifft dies zu [8], und für die übrigen Größen kann eine Mittelung gemäß (5) ebenfalls vermutet werden.

Es soll nun der Einfluss der räumlichen "stream segregation" diskutiert werden [9]. Die o.g. Annahmen sind sicherlich für ein Schallfeld zulässig, welches einen einzigen "stream" bildet, also z.B. eine Schallquelle, welche sich anhand der dichotischen Ohrsignale orten lässt [10]. Dagegen werden mehrere unkorrelierte, räumlich verteilte Quellen als mehrere "streams" wahrgenommen. Hier ist es denkbar, dass die Gesamtlästigkeit stärker anhand der Einzelsignale beurteilt wird als in (5), z.B. anhand des Rauigkeitsmaximums.

Die hierfür durchgeführten Hörversuche werden im folgenden kurz beschrieben; ausführliche Erläuterungen enthält [11]. Die Grundidee bestand darin, eine Szene "A" aus zwei verschiedenen, $\pm 45^\circ$ in der Horizontalebene angeordneten Quellen zu schaffen, bei denen jeweils eine psychoakustische Größe unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Zum Vergleich wird eine Szene "B" erzeugt, bei der an der $\pm 0^\circ$ -Position zwei weitere Signale addiert werden, die in ihrem Lautstärkeverhältnis einstellbar sind und die in ihren psychoakustischen Größen mit den zwei Signalen von "A" übereinstimmen. Bei einem Verhältnis von 50% zu 50% wäre die Lästigkeit von "B" genau so groß wie die gemäß (5) gemittelte Lästigkeit von "A".

Um kognitive Effekte auszuschließen, wurden ausschließlich synthetische Signale aus [6] verwendet. Die Versuche wurden mit Kopfhörern durchgeführt, wobei die Signale für verschiedene Winkel mit den zugehörigen HRTFs gefaltet wurden, welche aus Kunstkopfmessungen gewonnen wurden [12]. Es sei erwähnt, dass die Korrekturfunktion a_0 [1] aus den psychoakustischen Berechnungsmodellen entfernt wurde, da diese bereits in den Signalen winkelrichtig enthalten ist. Untersucht wurden wiederum Schärfe, Rauigkeit und Tonhaltigkeit. Bezüglich der Lautheit finden sich entsprechende Ergebnisse z.B. in [13].

Vor diesem Schritt wurde festgestellt, dass das räumliche Verschieben einer einzigen Schallquelle psychoakustische Größen nur geringfügig beeinflusst, wenn man für jede Winkelposition die gemäß (5) gemittelte Größe betrachtet. Nur bei der Schärfe wurde beim Verschieben von 0° nach $\pm 45^\circ$ eine leichte Abnahme um ca. 8% beobachtet [11].

Bei den eigentlichen Hörversuchen war das Lautstärkeverhältnis der beiden Signale aus Szene "B" so einzustellen, dass beide Szenen als "gleich lästig" empfunden werden. Enthalten beide Szenen jeweils zwei Quellen bei $\pm 0^\circ$, ist ein Lautstärkeverhältnis von 50%

zu 50% zu erwarten, was sich in einem Vorversuch bestätigt hat. Als Ergebnis der dichotischen Hörversuche ist festzuhalten, dass bei den $\pm 45^\circ$ auseinandergezogenen Quellen Lautstärkeverhältnisse eingestellt wurden, die bei keiner psychoakustischen Größe von dem o.g. 50%-Verhältnis signifikant abwichen [11].

Folglich kann auch bei mehreren, räumlich getrennten "streams" von einer Mittelung der untersuchten psychoakustischen Größen gemäß (5) ausgegangen werden.

4 Zusammenfassung

Es wurde untersucht, wie sich Schärfe, Rauigkeit und Tonhaltigkeit bei einer Ansammlung von mehreren Schallquellen verhalten. Für zwei gleich laute Quellen bilden sich näherungsweise die Mittelwerte (2)-(4), wobei die Streuung insbesondere für Rauigkeit jedoch recht hoch ist. Bei diesen Mittelwerten macht es keinen signifikanten Unterschied, ob sich die Quellen an einem Ort befinden oder räumlich verteilt sind.

5 Literatur

- [1] E. Zwicker, H. Fastl, Psychoacoustics - Facts and Models. Springer-Verlag, 1999
- [2] G. von Bismarck, Sharpness as an Attribute of the Timbre of Steady Sounds. *Acustica* 30, S. 159, 1974
- [3] P. Daniel, R. Weber, Psychoacoustical Roughness: Implementation of an Optimized Model. *Acustica/acta acustica* 83, S. 113, 1997
- [4] T.H. Pedersen, M. Soendergaard, Objective Method for Assessing the Audibility of Tones in Noise. *Proc. Inter-Noise*, S. 3252, Nice, 2000
- [5] K. Johannsen, H. Prante, Environmental Sounds for Psychoacoustic Testing. *Acustica/acta acustica* 87 (2), S. 290, 2001
- [6] M. Klemenz, Psychoakustische Optimierung einer Maschinenkomponente. *Proc. DAGA 2001 (CD)*, Hamburg, 2001
- [7] N. Chouard, Loudness and Unpleasantness Perception in Dichotic Conditions. *Dissertation*, Oldenburg, 1997
- [8] T. Zwicker, Diotische und dichotische Wahrnehmung von Schallfluktuationen. *Acustica* 55, S. 181, 1984
- [9] A.S. Bregman, Auditory Scene Analysis. MIT Press, Cambridge (Mass)/London, 1990
- [10] J. Blauert, Spatial Hearing - Rev. ed. MIT Press, Cambridge (Mass)/London, 1997
- [11] J. Fels, Sound Quality von räumlich verteilten Schallquellen. Diplomarbeit, Institut für Technische Akustik, RWTH Aachen, 2002
- [12] T. Lentz, Realisierung und Evaluierung eines interaktiven 3D-Audiowiedergabesystems. Diplomarbeit, ITA, RWTH Aachen, 2001
- [13] M. Bunse, Die Bedeutung des binauralen Hörens für die Empfindung von Lautheit und Rauigkeit. *Dissertation, Fortschritte-Berichte VDI, Reihe 10/602*, Aachen, 1999