

Verarbeitung von tieffrequentem Schall durch Gehörmodelle

Detlef Krahe

Bergische Universität Wuppertal, 42119 Wuppertal, Deutschland, Email: krahe@uni-wuppertal.de

Einleitung

Dass das Hören im tiefen Frequenzbereich von Besonderheiten geprägt ist, wird schon durch die Frequenzgruppenbreiten offenkundig: bis 500 Hz sind sie durch einen konstanten Wert gekennzeichnet, ab 500 Hz durch einen Wert, relativ zur Frequenzgruppenmitte. Auch die Frequenzbegrenzung physiologischer Prozesse ist bekannt. Trotz oder vielleicht auch aufgrund dieser Besonderheiten ist in der Literatur das Hören im tieffrequenten Bereich (unterhalb 100Hz) relativ wenig behandelt, und dann eher aus der Sicht der Psychoakustik. So kommt es, dass Effekte zwar bekannt sind, aber (noch) nicht in eine einheitliche Deutung der Vorgängen beim Hören einzuordnen sind. Ein solcher Effekt ist bei der Wahrnehmung von tieffrequenten Geräuschen, die steilflankig frequenzbegrenzt sind, zu beobachten, und es stellt sich die Frage, ob dieser Effekt anhand eines funktional basierten Gehörmodells erklärbar ist.

Lästigkeit in Abhängigkeit von Flankensteilheit

Den Effekt hatte der Autor bei der Benutzung eines ANC-Kopfhörers wahrgenommen, bei dem der erzeugte Schall einem gegebenen Schall so überlagert wird, dass dieser in einem bestimmten Frequenzbereich durch destruktive Interferenz deutlich gedämpft wird: bei dem verwendeten Typ im Bereich 40 Hz bis 1 kHz. Die Hoffnung, mit diesem Kopfhörer das nervige Geräusch einer Klimaanlage ausblenden zu können, erwies sich als trügerisch, denn der „Restschall“ war deutlich belästigender, obwohl er objektiv eine geringere Leistung aufwies. Mit einem jetzt fehlenden Verdeckungseffekt war die Wahrnehmung nicht zu erklären, denn der Kopfhörer wirkte klar oberhalb des energetischen Schwerpunktes im Spektrum des Klimaanlagengeräusches. Bei der eher flach abfallenden Flanke der Mithörschwellen zu hohen Frequenzen hin hätte sich die Wirkung der Verdeckung demgegenüber aber eher verstärken müssen.

Eine gewisse Bestätigung der zuvor beschriebenen Wahrnehmung ist in [1] zu finden. Demnach wird ein mit 5,7 dB/Okt. abfallendes Tiefpasssignal bezüglich der Lästigkeit als akzeptabel eingestuft, während ein mit 7,9 dB/Okt. steiler abfallendes TP-Signal als unakzeptabel beurteilt wird.

Funktionsbasierte Gehörmodelle

Da mit den üblichen, phänomenologisch basierten Ansätzen die beobachtete Wahrnehmung nicht zu erklären ist, stellt sich die Frage, ob auf Basis eines funktional basierten Gehörmodells das beschriebene Phänomen eher zu erklären ist. Dabei lag es nicht im Bestreben des Autors, selbst ein solches Modell zu entwickeln, sondern bestehende daraufhin zu analysieren. Ein solches Modell wurde an der Universität Oldenburg entwickelt und ist unter [2] über das Internet als

Programm-Modul herunterzuladen. Es schließt die Funktion der Haarzellen und die Repräsentation der Aktivitäten in den Nervenfasern ein und wurde effektiv zur Modellierung von Maskierungseffekten genutzt [3].

Dieses Modell half zwar, denkbare Zusammenhänge zu erkennen, führte aber an dieser Stelle nicht weiter. Die Gründe sind wohl darin zu suchen, dass das Modell mit einer anderen Intention als hier entwickelt wurde. Dies betrifft die Kreuzkorrelation der Signale in den abgehenden Nervenfasern, modelliert als Bandpasskanäle. Eine solche Korrelation ist z.B. Bestandteil in dem Gehörmodell nach [4]. Auch in [5] wird festgehalten, dass eine gewisse Abhängigkeit der Bandpass-Signale untereinander zu berücksichtigen sei, wobei dort die Detektion bzw. Maskierung von Amplitudenmodulationen untersucht wird. Auf Basis welcher Signalrepräsentation die Abhängigkeit, sprich die Korrelation zu erfassen ist, kann durch die Anwendung und die Modellierungstiefe bestimmt sein.

Korrelation der Nervenaktivitäten

Die Korrelation, die ja Gemeinsamkeiten der verglichenen Signale aufdeckt, deckt damit auch einen Synchronismus der Signale auf. Es kann vermutet werden, dass dieser Synchronismus bei sehr tieffrequenten Schallen in besonderer Weise vorhanden ist, da bei solcher Art von Anregung die physiologischen Prozesse im Gehör kohärent folgen können.

Eine Art von Korrelationsanalyse wird in den Knoten des gehörbezogenen Nervensystems stattfinden, also ebenfalls dort, wo die Nervenbahnen von beiden Ohren zusammenlaufen. Auch hier kann bei sehr tiefen Frequenzen die Korrelation in besonderer Weise ausgeprägt sein, da aus physikalischen Gründen i.d.R. beide Ohren mit nahezu identischen Schalldruckverläufen angeregt werden.

Die nachfolgenden Betrachtungen beruhen auf der Annahme, dass stark korrelierte bzw. streng synchronisierte Nervenaktivitäten eine höhere Belastung und damit auch eine stärkere Lästigkeit bedeuten. Parallelen dazu gibt es auch beim Sehen: großflächiges Flackern wird als sehr unangenehm empfunden. Aus diesem Grund werden z.B. bei Fernsehgeräten mit immer größeren Bildschirmen spezielle Maßnahmen ergriffen, um diesen Effekt zu mindern.

In welcher Weise kann jetzt die Korrelation der Signale in den Nervenfasern mit der Flankensteilheit des anregenden Geräusches zusammenhängen? Die Tuningkurven (z.B. in [6]) der einzelnen Nervenfasern nehmen - ausgehend von der Bestfrequenz - zu tiefen Frequenzen hin in ihrer Empfindlichkeit weniger ab als zu hohen Frequenzen hin, was die bekannte Asymmetrie der Mithörschwellen hervorruft. Weist das Spektrum des anregenden Geräusches eine deutlich höhere Flankensteilheit auf als die Mithörschwelle

oberhalb der Kernerregung, so ist die Erregung der Haarzellen in diesem Frequenzbereich (Flankenerregung) von einer deutlich stärkeren Gemeinsamkeit geprägt als im umgekehrten Fall, bei dem auch nicht mehr von einer Flankenerregung gesprochen wird.

Korrelationsanalyse mit Filterbanksignalen

Mit einer Filterbank, die der Gammaton-Filterbank angelehnt ist, soll das Verhalten modelliert und verdeutlicht werden. Dazu wurde ein Tiefpass-Signal mit einer Grenzfrequenz von etwa 50 Hz einmal mit einer sehr steil und einmal mit einer moderat abfallenden Flanke begrenzt und mittels der Filterbank spektral analysiert. Die Ergebnisse sind nachfolgend in Form von Spektrogrammen (Abb.1) dargestellt. Die Ordinaten umfassen den Frequenzbereich bis etwa 600Hz. Deutlich ist zu erkennen, dass die zeitlichen Verläufe in den einzelnen Bandpasskanälen etwa oberhalb 80Hz im Fall des steilflankigen Geräusches stark und im anderen Fall nicht erkennbar korreliert sind.

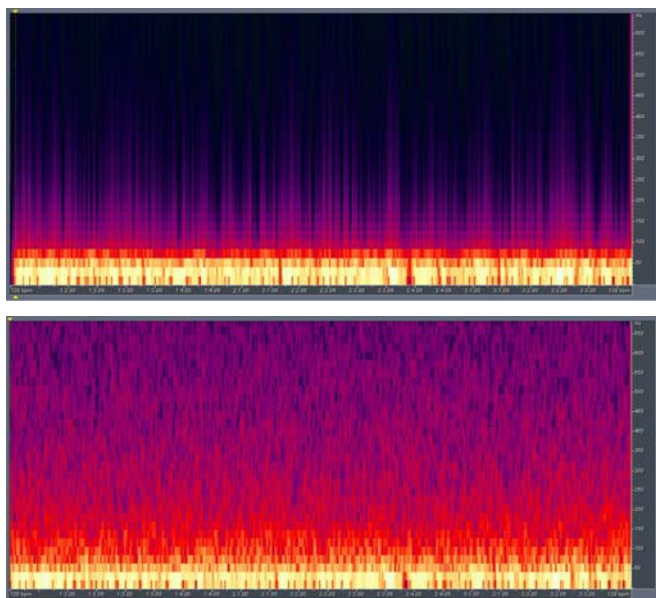


Abbildung 1: Spektrogramme von Tiefpass-Signalen mit steiler (oben) und flacher (unten) Flanke auf Basis einer Filterbank mit gehörbezogener Frequenzselektivität

Noch verdeutlicht wird dies durch die normierte Korrelationsmatrix der Bandpass-Signale (Abb.2). Im ersten Fall (steilflankig) zeigt die Matrix ab dem Kanal 5 eine maximale bzw. eine nahezu maximale Korrelation, während im zweiten nur die Autokorrelationswerte auf der Hauptdiagonalen (definitionsgemäß) den Maximalwert 1 erreichen.

Fazit und Ausblick

Natürlich muss der vorgestellte Ansatz noch durch weitere Untersuchungen untermauert und präzisiert werden. Aber allgemein decken sich die durch ihn gewonnen Erkenntnisse durchaus mit alltäglichen Erfahrungen. Vielleicht noch mehr von Interesse ist, welche Konsequenzen ggf. bei solch einer Reaktion auf tieffrequente Geräusche zu ziehen sind, denn bisweilen führen ja gerade Lärminderungsmaßnahmen dazu, dass das Spektrum des Lärms dadurch im Schwerpunkt zu tiefen Frequenzen verschoben und u.U. steilflankiger wird.

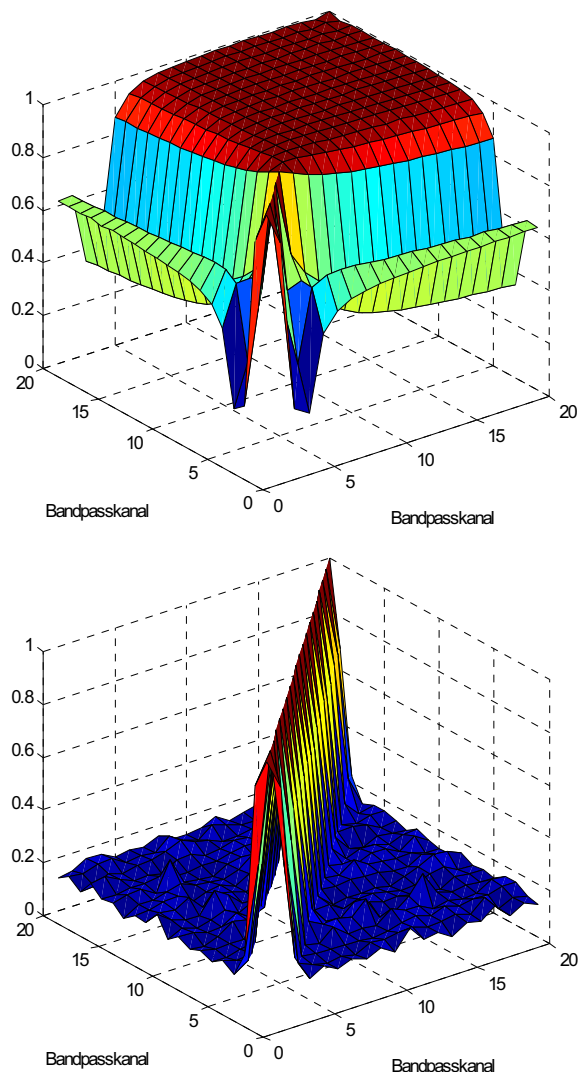


Abbildung 2: Korrelationsmatrix der Bandpass-Signale der ersten zwanzig Kanäle der Filterbank (Abstand ca. 20 Hz) bei einem Tiefpass-Signal mit steiler (oben) und flacher (unten) Flanke

Auch wenn der vorgestellte Modellansatz zu allgemein gültigen Aussagen führen sollte, so ist dennoch für die Praxis zu überlegen, inwieweit mit Analysen auf Basis standardisierter Messgrößen vergleichbare Ergebnisse erlangt werden könnten. In dem Fall könnte das Modell bei der Entwicklung solcher standardbasierter Verfahren als Referenz nützlich sein.

- [1] Levental, G.: A Review of Published Research on Low Frequency Noise and its Effects, Department of Environment, Food and Rural Affairs, London, 2003
- [2] <http://www.physik.uni-oldenburg.de/docs/medi>
- [3] Dau, T.; Kollmeier, B.; Kohlrausch, A.: Modeling auditory processing of amplitude modulation I., JASA 102, 2906-2919
- [4] Deng, L.; Geisler, C.D.: A composite auditory model for processing speech sounds, JASA 82 (6) 1987 2001-2012
- [5] Ewert, S.; Verhey, J.; Kollmeier, B.: Modeling across-channel processing of amplitude modulation, JASA 107 (5), 2899
- [6] Buser, P.; Imbert, M.: Audition, MIT-Press 1992