

Psychoakustische Bewertung von superponierten Tonkomplexen

Stephan Töpken, Jesko Verhey, Reinhard Weber

Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Institut für Physik, Akustik/Neuroakustik,
26111 Oldenburg, Deutschland, Email: stephan.toepken@uni-oldenburg.de

Einleitung

Drehklänge, bestehend aus Grundton und höheren Harmonischen, treten als Geräuschen bei unterschiedlichsten Maschinen und Geräten des täglichen Lebens auf. In speziellen Fällen ergeben sich kombinierte Geräusche, bestehend aus zwei Drehklängen sowie Interaktionstönen [1]. Tongemische dieser Art können sehr unterschiedliche Empfindungen auslösen und mitunter sehr hart und unangenehm klingen. Ziel dieser Untersuchung ist es, die Wahrnehmungsdimensionen dieser Geräusche mit einem semantischen Differential zu erschliessen und den Einfluss des Grundtonverhältnisses auf die Angenehmheit zu charakterisieren.

Methode

Zur Geräuschbeurteilung wird ein semantisches Differential mit 9 Adjektivpaaren verwendet. Die Bewertung erfolgt auf 11-stufigen Kategorialskalen, die für sieben Adjektivpaare bipolar und für zwei Adjektivpaare unipolar angelegt sind. Die genutzten Adjektivpaarungen sind: *angenehm - unangenehm*, *glatt - rau*, *rauschhaft - klangerartig*, *stumpf - scharf*, *überhaupt nicht schwankend - extrem schwankend*, *weich - hart*, *konsonant - dissonant*, *überhaupt nicht laut - extrem laut* und *tief - hoch*. Die Adjektivpaare *angenehm - unangenehm* und *weich - hart* werden am Ende der Beurteilungen wiederholt abgefragt.

Stimuli

Die Tongemische setzen sich jeweils zusammen aus zwei harmonischen Tonkomplexen (30 Teiltöne), sowie Interaktionstönen bis zur 20. Ordnung. Die Phasen al-

$$\begin{array}{lll}
 f_{i0} = i \cdot f_{10} & i=1\dots30 & 1. \text{ harm. Tonkomplex} \\
 f_{0j} = j \cdot f_{01} & j=1\dots30 & 2. \text{ harm. Tonkomplex} \\
 f_{ij} = i \cdot f_{10} + j \cdot f_{01} & i=1\dots20 & \text{Interaktionstöne} \\
 & j=1\dots20 &
 \end{array}$$

ler Teiltöne sind gleichmäßig zufallsverteilt aus dem Intervall $[0, 2\pi]$ gewählt und die Intensität der Teiltöne nimmt proportional zu $1/f^2$ ab. Die Interaktionstöne sind gegenüber den harmonischen Tonkomplexen um 10 dB abgesenkt. Die Tongemische werden mit einem halben Hanning-Fenster (20 ms Rampe) ein- und ausgeblendet und haben eine Dauer von jeweils 5 Sekunden. Die Geräusche sind im Computer mit einer Abtastrate von 22050 Hz und einer Auflösung von 16 bit generiert (The Mathworks, Matlab 2006b) und gespeichert. Als Parameter wird das Grundtonverhältnis $f_{10} : f_{01}$ so variiert, dass Verhältnisse kleiner ganzer Zahlen (z.B. 3:4),

wie auch große, ganzzahlige Grundtonverhältnisse (z.B. 100:133), die schon durch minimale Verstimmungen von kleinen, ganzzahligen Grundtonverhältnissen entstehen können, vertreten sind. Für zwei Grundtonverhältnisse wird zusätzlich der untere Grundton in drei Stufen eingestellt ($f_{10} = 75 \text{ Hz}, 100 \text{ Hz}, 150 \text{ Hz}$), so dass sich insgesamt 15 verschiedene Stimuli ergeben. Die Bezeichnungen für die 15 Geräusche setzten sich zusammen aus den gerundeten Grundtonfrequenzen und im Falle ganzzahliger Verhältnisse zusätzlich aus den das Grundtonverhältnis beschreibenden kleinen ganzen Zahlen. Das Geräusch *100_127* entspricht also einem Tongemisch mit Grundtönen $f_{10} = 100 \text{ Hz}$ und $f_{01} = 127 \text{ Hz}$, wohingegen das Geräusch *100_127_11_14* einem Tongemisch mit $f_{10} = 100 \text{ Hz}$ und $f_{01} = 100 \cdot \frac{14}{11} \text{ Hz} \approx 127,27 \text{ Hz}$ entspricht.

Versuchsteilnehmer

An dem Experiment nehmen in 4 Sessions, mit jeweils maximal 4 Teilnehmern gleichzeitig, insgesamt 15 normalhörende Personen (6 f, 9 m) im Alter von 20-62 Jahren (Median=27 Jahre) teil.

Versuchsaufbau

Der Versuchsleiter und bis zu 4 Versuchsteilnehmer sitzen wie in Abb. 1 an einem sechseckigen Tisch in einem Seminarraum. Die Wiedergabe der im Computer gespeicherten Geräusche erfolgt über eine externe Soundkarte (M-Audio, Fast Track Pro) und einen Lautsprecher (Mackie, HR 824), der mittig, in etwa 2m Abstand, vor den Teilnehmern positioniert ist. Alle Geräusche werden mit einem konstanten Pegel von 70 dB(A) dargeboten.

Versuchsdurchführung

Das Experiment startet mit einer schriftlichen Instruktion der Teilnehmer, gefolgt von einer Orientierungsphase, in der alle 15 Geräusche zweimalig randomisiert dargeboten werden. Im Anschluss daran werden die Geräusche mit dem semantischen Differential bewertet. Insgesamt gibt es 11 einzelne Bewertungsblöcke (9 Adjektivpaare plus 2 Wiederholungen) mit jeweils 15 Seiten für die 15 zu bewertenden Geräusche. Die Abfolge der Geräuschdarbietungen und die Richtung der Skalen sind für die Adjektivpaare unterschiedlich, für alle Teilnehmer jedoch einheitlich randomisiert.

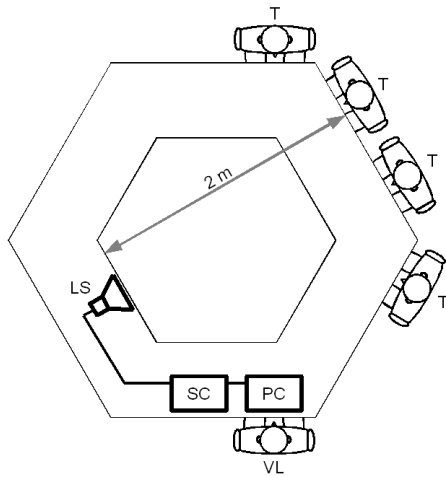


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus (Draufsicht), Teilnehmer **T**, Versuchsleiter **VL**, Computer **PC**, Soundkarte **SC**, Lautsprecher **LS**

Ergebnisse

Beurteilung der Angenehmheit

In Abb. 2 sind die Ergebnisse der Beurteilung hinsichtlich der Angenehmheit gezeigt. Am angenehmsten wird das Geräusch *100_133* beurteilt. Das korrespondierende Geräusch mit einem ganzzahligen Grundtonverhältnis (*100_133_3_4*) wird drei Kategorien unangenehmer bewertet.

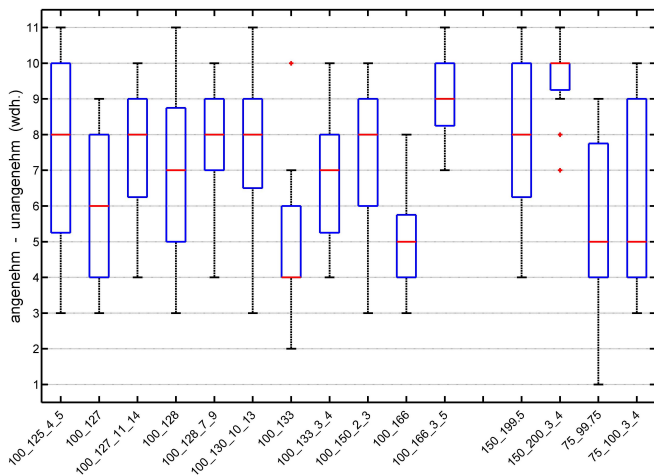


Abbildung 2: Boxplots der Ergebnisse für das Adjektivpaar *angenehm-unangenehm (wdh.)* über allen 15 Geräuschen

Wahrnehmungsraum für die Geräusche

Als Ergebnis einer Faktorenanalyse über die Adjektivpaare ergeben sich nach einer Varimax-Rotation drei Faktoren mit einer Varianzaufklärung von insgesamt 60%, die die **Stärke** (z.B. *weich - hart, überhaupt nicht laut - extrem laut*), die **Angenehmheit und den Klangcharakter** (z.B. *angenehm - unangenehm, konsonant - dissonant*) sowie die **spektrale Verteilung**

(z.B. *hoch - tief, stumpf - scharf*) der Geräusche beschreiben.

Gruppierung der Geräusche

Eine Faktorenanalyse über die Bewertungen der Geräusche liefert nach einer Varimax-Rotation wie in Tab. 1 vier Faktoren mit einer Varianzaufklärung von insgesamt 67%.

Tabelle 1: Varimax-rotierte Komponentenmatrix der Faktorenanalyse über die Bewertungen der 15 Geräusche

Geräusche	Komponente			
	1	2	3	4
100_166_3_5	0,826	0,029	-0,072	-0,155
150_200_3_4	0,806	-0,233	0,166	-0,224
100_133_3_4	0,722	0,083	-0,062	0,204
100_125_4_5	0,717	0,308	-0,112	0,280
100_150_2_3	0,703	-0,265	0,049	0,061
100_128	-0,025	0,770	0,134	0,184
100_128_7_9	0,297	0,754	-0,185	0,010
100_127_11_14	-0,040	0,718	-0,130	0,161
100_130_10_13	-0,090	0,694	-0,193	0,116
100_127	-0,188	0,660	0,197	0,179
100_166	-0,078	0,005	0,841	-0,097
100_133	0,013	-0,058	0,802	0,197
150_199,5	0,442	-0,355	0,514	-0,434
75_100_3_4	0,258	0,185	-0,080	0,832
75_99,75	-0,152	0,372	0,251	0,680
Varianzanteil	22%	21%	13%	11%

Die Zuordnung der Geräusche zu den Faktoren lässt sich in Verbindung setzen mit der Rangfolge der Geräusche hinsichtlich der Angenehmheit. Eher unangenehm bewertet werden die Geräusche der ersten beiden Faktoren - eher angenehm bewertet werden die Geräusche der letzten beiden Faktoren.

Fazit

Eher **unangenehm** sind Geräusche:

- mit **hohem unteren Grundton**, $f_{10} = 150 \text{ Hz}$
- mit **kleinen, ganzzahligen Grundtonverhältnissen**, z.B. 2:3, 3:4, 3:5

Eher **angenehm** sind Geräusche:

- mit **tiefem unteren Grundton**, $f_{10} = 75 \text{ Hz}$
- mit **leichten Verstimmungen** von kleinen, ganzzahligen Grundtonverhältnissen

Literatur

- [1] McCurdy. D.A.: Annoyance caused by advanced Turboprop aircraft flyover noise - Counter-Rotating Propeller Configuration. NASA Technical Paper 3027 (1990)