

Explorative Bestimmung von optimal angenehmen spektralen Einhüllenden am Beispiel von Flugzeuggeräuschen

Christopher Bensch¹, Stephan Töpken¹ und Steven van de Par¹

¹ *CvO Universität Oldenburg, AG Akustik, Cluster of Excellence 'Hearing4all', Email: stephan.toepken@uni-oldenburg.de*

Einleitung

Die spektrale Einhüllende von breitbandigen Fahrzeuginnengeräuschen ist häufig abhängig von der Position innerhalb eines Fahrzeugs und den getroffenen akustischen Maßnahmen zur Geräuschreduktion. Die akustischen Maßnahmen tragen in den meisten Fällen maßgeblich zum Gewicht und damit auch zum Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeuges bei, was insbesondere für Flugzeuge eine große technische Herausforderung darstellt. In einer Studie von Penning *et al.* wurde gezeigt, dass der akustische Komfort in der Flugzeugkabine hauptsächlich vom A-bewerteten Schalldruckpegel abhängt [1]. Für Kabinengeräusche mit einem gleichen A-Pegel hat aber auch die Sitzposition und die damit zusammenhängende spektrale Zusammensetzung eines Geräusches einen Einfluss auf die bewertete Angenehmheit und die Akzeptanz der Geräusche.

Die psychoakustische Schärfe ist eine Empfindungsgröße, die den Einfluss der globalen spektralen Einhüllenden auf den Klangcharakter von breitbandigen Geräuschen charakterisiert und auch häufig in Beziehung zur Geräuschbewertung steht [2]. Für Innengeräusche in einem Hochgeschwindigkeitszug mit gleichem A-bewerteten Pegel wurden Geräusche mit einem reduzierten hochfrequenten Anteil und geringerer Schärfe bei gleichem A-Pegel als angenehmer bewertet [3]. Ähnliche Zusammenhänge zeigen sich auch bei der Bewertung von Klimaanlagegeräuschen in Kraftfahrzeugen [4] sowie der Bewertung von Multiton-Signalen im Flugzeugkontext [5].

Im Hinblick auf eine zielgerichtete akustische Optimierung stellt sich die Frage, wie bei gleichem A-bewerteten Pegel die Energie für ein Flugzeugkabinengeräusch generell spektral verteilt sein müsste, um optimal angenehm bewertet zu werden und inwiefern eine Reduktion der Schärfe zielführend ist.

Methode

In dieser Studie wird ein Flugzeugkabinengeräusch durch ein rosa Rauschen, welches über ein Filter H im Frequenzbereich modifiziert kann, nachgebildet. Das Filter (Eq. 1) setzt sich im Frequenzbereich aus vier Cosinus-Komponenten zusammen, deren Amplitudenkoeffizienten A_i von den Versuchsteilnehmern in einem Einstellverfahren manipuliert werden. Eine Pilotstudie hatte gezeigt, dass im Mittel nur die ersten vier Filterkomponenten zur Modifizierung der spektralen Einhüllenden genutzt werden, so dass $i = [1, 2, 3, 4]$ gewählt wurde. Durch eine Frequenzachsentransformation wird der ur-

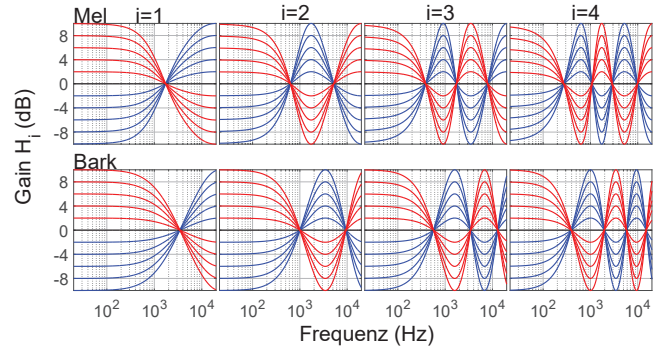


Abbildung 1: Darstellung der Filterkomponenten H_i über der Frequenz f für die Mel-Skala (oben) und die Bark-Skala (unten). Die Amplitudenfaktoren A_i sind jeweils von +10 dB bis -10 dB in 2 dB Schritten variiert worden. Positive Werte der Amplitudenfaktoren A_i sind in rot dargestellt, negative in blau. Die Summe aller vier Filterkomponenten ergibt das Filter H .

sprünglich lineare Frequenzvektor f an die Bark- bzw. Mel-Frequenzachse angepasst, was der Wahrnehmung durch das menschliche Gehör näher kommt. Das Aussehen der ersten vier Cosinus-Funktionen mit den jeweiligen Frequenzskalierungen wird in Abb. 1 gezeigt, wobei die obere Reihe die Mel-Skalierung und die untere die Bark-Frequenzskalierung zeigt. Die Form des resultierenden Filters ergibt sich aus der Summe aller vier Filterkomponenten H_i , die jeweils aus einer Cosinus-Envelope und einem Amplitudenfaktor A_i bestehen.

$$\begin{aligned}
 H(f) &= \sum_{i=1}^4 H_i \\
 &= \sum_{i=1}^4 A_i \cdot \cos\left(2\pi \cdot i \cdot \frac{f}{FS}\right) \quad (1)
 \end{aligned}$$

Durchführung

In dem Hörversuch haben die Teilnehmenden die Aufgabe, dass dargebotene Geräusch über vier Slider auf einer Testoberfläche (Abb. 2) solange zu verändern, bis sich ein optimal angenehmes Kabinengeräusch einstellt. Hierfür ist der Versuchsteilnehmer aufgefordert, sich vorzustellen, dass er sich für mehrere Stunden in einem Flugzeug aufhält und dem Geräusch über diese Zeit ausgesetzt ist. Durch die vier Slider werden die vier Amplitudenkoeffizienten A_i verändert. Mit jedem Slider kann jeweils ein Amplitudenkoeffizient in einem Bereich von ± 20 dB in 1 dB Schritten verändert werden. Die Sliderstellungen befinden sich am Anfang eines Einstellungsdurchgangs

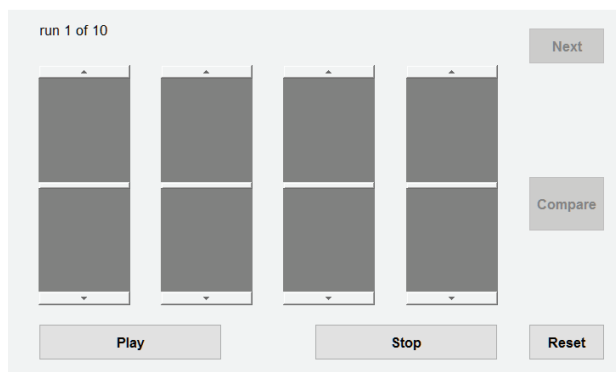


Abbildung 2: Grafische Bedienoberfläche für das Einstellverfahren. Über die Slider wurden die vier Amplitudenkoeffizienten A_i eingestellt. Deren Zuordnung zu den Slidern war für jeden Durchgang neu verwürfelt.

immer in der mittleren Ausgangsstellung. Die Zuordnung der Amplitudenkoeffizienten zu den Slidern wurde immer neu verwürfelt und auch deren Startwerte wurden für jeden Einstellungsdurchgang zufällig im Bereich von ± 5 dB gewählt. Die Abfolge der Frequenzskalierung (Mel- oder Bark-Skala) ist ebenfalls zufällig erfolgt. Somit wurde bei jedem erneuten Einstellungsdurchgang ein zufälliges Startsignal generiert. Die Maßnahmen wurden getroffen, um den Teilnehmenden möglichst wenig Informationen über die Signalerzeugung und -manipulation zu geben. Zusätzlich wurde eine Nutzung von dominanten Lautheitsunterschieden, welche aus einer Änderung der Filter resultieren können, als alleiniges Kriterium zur Einstellung der Filter durch ein Level-Roving erschwert. Die Probanden wurden somit zumindest in Teilen gezwungen neben der Lautheit insbesondere den Klangcharakter in ihr Entscheidungskriterium einzubeziehen.

Vor dem Hörversuch sind die Versuchsteilnehmer schriftlich instruiert worden. Im Rahmen einer Orientierungsphase haben sich die Teilnehmer danach mit der Bedienoberfläche und dem Einstellverfahren vertraut machen können. Im Hörversuch wurden von jedem Teilnehmenden pro Frequenzskalierung jeweils fünf Signale eingestellt. Im Anschluss an den Hörversuch erfolgte eine schriftliche Probandenbefragung, in der unter anderem die folgenden Fragen gestellt wurden:

1. Wie leicht/schwer war die Durchführung des Hörversuches?
2. Konntest du die Geräusche in ihrer Angenehmheit beeinflussen?
3. Konntest du die Geräusche als optimal einstellen?

Eine Sitzung bestehend aus Einleitung/Instruktion, Orientierungsphase, Hörexperiment und Befragung dauerte insgesamt zwischen 45 und 55 Minuten.

Stimuli

Als Eingangssignal wurde ein rosa Rauschen mit einer Samplingrate von 48 kHz verwendet, welches im Bereich von 20 Hz bis 20 kHz mit einem Bandpass gefiltert war. Der Wiedergabepegel wurde nach jeder Veränderung der

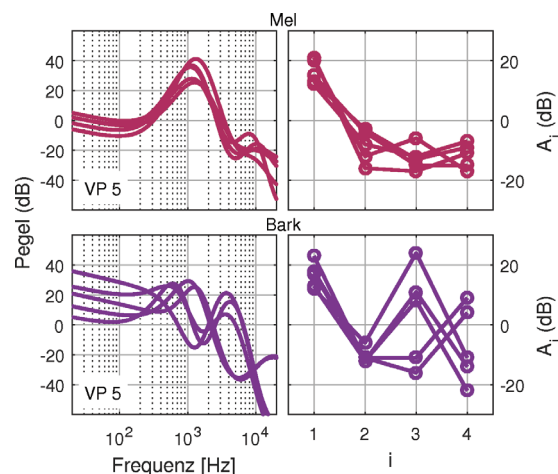


Abbildung 3: Ergebnisse von VP5, Darstellung der spektralen Einhüllenden als relativer Pegel über der Frequenz sowie die gewählten Amplitudenkoeffizienten für die Mel (oben) und Bark (unten) Frequenzskalierung.

Slider bzw. des Filters auf 70 dB(A) normiert und dann zusätzlich mit einem Level-Roving von ± 3 dB versehen. Das Rauschen wurde kontinuierlich dargeboten und nur bei einer Filteränderung kurz unterbrochen.

Setup

Das Hörexperiment wurde in einer Hörkabine durchgeführt. Die Wiedergabe der Geräusche erfolgte dichotisch über offene Kopfhörer des Types Sennheiser HD 650.

Teilnehmer

An der Studie haben 15 Studenten (7m/8w) der CvO Universität Oldenburg teilgenommen. Das Alter der Teilnehmenden lag zwischen 19 und 30 Jahren. Der Altersdurchschnitt betrug 24 Jahre.

Ergebnisse

Hörversuch

Im folgenden werden jeweils die spektralen Einhüllenden der resultierenden Signale (Rosa Rauschen gefiltert entsprechend der Einstellungen des Teilnehmenden) gezeigt und anhand zweier beispielhafter Probanden vorgestellt.

Für VP5 (Abb. 3) liegen die Einhüllenden bei der Mel-Frequenzskalierung sehr nahe beieinander. Der Kurvenverlauf weist zusätzlich eine relativ breite Überhöhung um 1 kHz auf. Darunter und darüber nimmt in der Pegel von den tiefen zu den hohen Frequenzen generell ab. In den eingestellten Amplitudenkoeffizienten ist ebenfalls ein einheitlicher Trend über alle 5 Durchgänge zu erkennen. Die eingestellten spektralen Einhüllenden für eine Bark-Frequenzskalierung unterscheiden sich zur Mel-Frequenzskalierung. Auch hier nimmt der Pegel von den tiefen zu den hohen Frequenzen generell ab und es gibt eine Überhöhung im Bereich mittlerer Frequenzen. Zwei Einhüllende haben den Peak bei etwa 1 kHz, drei Kurvenverläufe zeigen einen zusätzlichen zweiten Peak bei 4 kHz. Die ersten beiden Amplitudenfaktoren wurden ähnlich wie für die Mel-Frequenzskalierung eingestellt. Der drit-

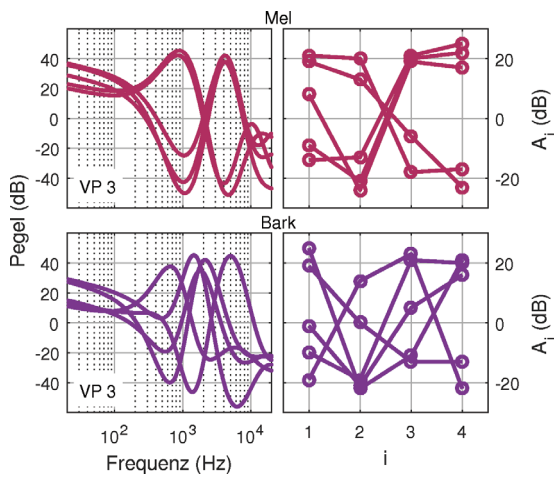


Abbildung 4: Ergebnisse von VP3 dargestellt wie in Abb. 3

te und der vierte Amplitudenfaktor ist bei der Bark-Skalierung jedoch deutlich anders gewählt worden. Qualitativ ähnliche Ergebnisse finden sich bei VP9 (Abb. 6).

Im Vergleich dazu werden die eingestellten spektralen Einhüllenden von VP3 betrachtet (Abb. 4). Hinsichtlich der Mel-Frequenzskalierung hat VP3 in der Tendenz zwei unterschiedliche spektrale Einhüllende als angenehm eingestellt. Die Kurven unterscheiden sich in der Lage der Überhöhung, die entweder bei 1 kHz oder bei 4 kHz liegen. Für die dazugehörigen Amplitudenkoeffizienten sind zwei unterschiedliche Einstellungen gewählt worden, welche jeweils sehr gut reproduziert wurden. Qualitativ ähnliche Ergebnisse, in denen mehrere der fünf Einhüllenden pro Frequenzachse sehr dicht beieinander liegen, finden sich auch bei VP6, VP7, VP10 und VP13 (Abb. 6). Bei den eingestellten Kurven für die Bark-Frequenzskalierung ist kein Muster direkt in den Einhüllenden oder den eingestellten Koeffizienten zu erkennen. Jede Kurve hat eine leicht andere Form, und die Überhöhung liegt in einem Bereich von 800 Hz bis 5 kHz verteilt.

Die Betrachtung der eingestellten Signale der restlichen sieben Versuchsteilnehmer in Abb. 6 im Anhang zeigt, dass die als angenehm eingestellten spektralen Einhüllenden sich sowohl intra- als auch inter-individuell mitunter deutlich in ihrer Form voneinander unterscheiden.

Befragung

Die Probandenbefragung ergab, dass 60% der Teilnehmer den Hörversuch als *leicht* empfunden haben. Für 33% der Teilnehmenden war das Experiment *mittelschwer* oder *aufwendig* und nur für 7% *schwer*. Weiterhin gaben alle Teilnehmenden (100%) an, dass sie die Geräusche durch Einstellung der Slider in ihrer Angenehmheit beeinflussen konnten. Auf die dritte Frage antworteten 66% der Versuchsteilnehmer, dass sie das Geräusch optimal (33%, ja) bzw. teilweise optimal (33%) einstellen konnten. Lediglich 33% der Teilnehmer konnten die Geräusche nicht als optimal einstellen. Aufgrund der Tatsache, dass die Slider nicht beschriftet waren, die Zuordnung der Am-

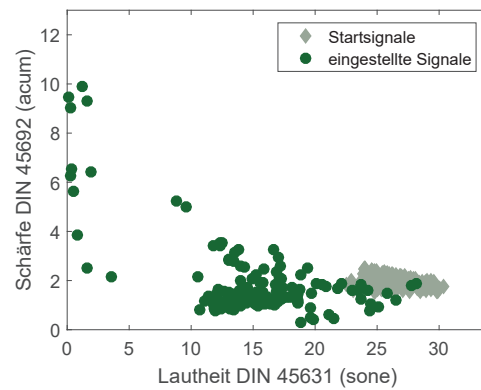


Abbildung 5: Berechnete Lautheit und Schärfe der Startsignale (graue Rauten) und der eingestellten Geräusche (grüne Kreise).

plitudenkoeffizienten zu den Slidern immer neu randomisiert wurde und auch die Startwerte der Koeffizienten zufällig variiert wurden, was Einblicke in die Signalmanipulation für die Teilnehmenden deutlich erschwerte, ist diese Rückmeldung zum Messverfahren positiv zu bewerten und spricht für die grundsätzliche Machbarkeit dieser Methode.

Lautheit und Schärfe der Geräusche

Abbildung 5 zeigt die Werte der berechnete Lautheit nach DIN 45631 und der Schärfe nach DIN 45692 für die Startsignale und die als optimal eingestellten Signale. Ein rosa Rauschen mit 70 dBA hätte eine Lautheit von 27 Sone und eine Schärfe von etwa 2 acum. Die Startsignale liegen aufgrund der zufälligen Startwerte der Amplitudenkoeffizienten A_i in der Lautheit zwischen 22 und 31 Sone sowie um 2 acum etwas gestreut.

Diese Werte ändern sich deutlich durch die von den Teilnehmenden gewählten Amplitudenkoeffizienten, um ein optimal angenehmes Kabinengeräusch zu erreichen. Die Lautheit wird im Vergleich zu den Startwerten im Mittel auf etwa 14 sone halbiert. Die Schärfe wird hauptsächlich reduziert wobei die Werte der meisten Geräusche in einer Größenordnung von etwa 1 acum liegen. Es gibt einzelne Ausreißer, die sehr geringe Lautheits- und sehr hohe Schärfewerte aufweisen. Diese Fälle lassen sich durch sehr extreme Einstellungen einzelner Teilnehmender erklären (z.B. von VP9 in Abb. 6), durch die sehr viel Energie zu sehr hohen Frequenzen verschoben wurde, was die Lautheit extrem reduziert.

Zusammenfassung

In Hörexperimenten wurden mit einem Einstellverfahren ein rosa Rauschen über eine Filter auf ein optimal angenehmes Flugzeugkabinengeräusch von 15 Teilnehmenden eingestellt. In einem Einstellverfahren konnten die Amplitudenfaktoren von vier Cosinus-förmigen Filtern von den Teilnehmenden eingestellt werden bis das Geräusch jeweils optimal angenehm war.

In den Ergebnissen zeigt sich eine sehr große interindividuelle Streuung der eingestellten spektralen

Einhüllenden, wie sie in ähnlicher Form auch aus der Literatur bekannt ist [6]. Nichtsdestotrotz haben einige Versuchsteilnehmer sehr ähnliche spektrale Einhüllende einstellen können, obwohl sämtliche Startwerte der Versuchsparameter randomisiert waren. Die Ergebnisse sprechen dafür, dass die Teilnehmenden eine sehr genaue interne Vorstellung von einem optimal angenehmen Geräusch besitzen und diese auch reproduzierbar einstellen konnten. Andere Teilnehmende haben sehr unterschiedliche spektrale Einhüllende eingestellt. Nach den Antworten aus der Teilnehmerbefragung können hierfür verschiedene Gründe ursächlich sein. Eine Erklärung wäre, dass entsprechende Personen sehr unterschiedliche spektrale Einhüllende ähnlich gut hinsichtlich der Angenehmheit bewertet haben. Eine andere Erklärungsmöglichkeit wäre, dass es in einigen Durchgängen aufgrund der Limitationen des Einstellverfahrens nicht möglich war, ein optimal angenehmes Geräusch einzustellen.

Eine Betrachtung der berechnete Lautheit und Schärfe zeigt, dass die Teilnehmenden durch ihre Einstellungen die Geräusche bei einem festen Pegel von 70 ± 3 dBA im Mittel in der Lautheit halbiert und auch die Schärfe im Vergleich zu den Startsignalen reduziert haben. Die meisten eingestellten Signale weisen eine Schärfe von etwa 1 acum auf und nur in wenigen Fällen wurden geringere Werte eingestellt, was ein Hinweis auf eine lokales Optimum der Schärfe in diesem Bereich sein kann. Für eine weitere Untersuchung, welche der eingestellten spektralen Einhüllenden am angenehmsten empfunden wird, könnte ein Paarvergleich der hier erzeugten Signale erfolgen.

Literatur

- [1] Pennig S., Quehl J. und Rolny, V. (2012). Effects of aircraft cabin noise on passenger comfort. *Ergonomics*, 55(10):1252-1265
- [2] v. Bismarck, G. (1974) Sharpness as an attribute of the timbre of steady state sounds. *Acustica* 30:159-172, 1974.
- [3] Hong, J. Y., Cha, Y. und Jeon, J. Y. (2015). Noise in the passenger cars of high-speed trains. *J. Acoust. Soc. Am.*, 138(6):3513-3521.
- [4] Hohls, S., Biermeier, T., Blaschke, R., Becker, S. (2014). Psychoacoustic analysis of HVAC noise with equal loudness. Proc. INTER-NOISE 2014, Melbourne, Australia, pp. 1-7, Australian Acoustical Society.
- [5] Töpken, S., Scheel, H., Weber, R., van de Par, S. (2016). Influence of the spectral envelope on the loudness and the preference of multi-tone sounds. Proc. INTER-NOISE 2016, Hamburg, Germany, 3437-3445, DEGA e.V., Berlin
- [6] Saft, M., Hansen, M. und Rennies, J. (2014). Klangpräferenzen von Normalhörenden bei Musikwiedergabe, in Fortschritte der Akustik - DAGA 2014, Oldenburg, Germany, Mar. 2014

Anhang

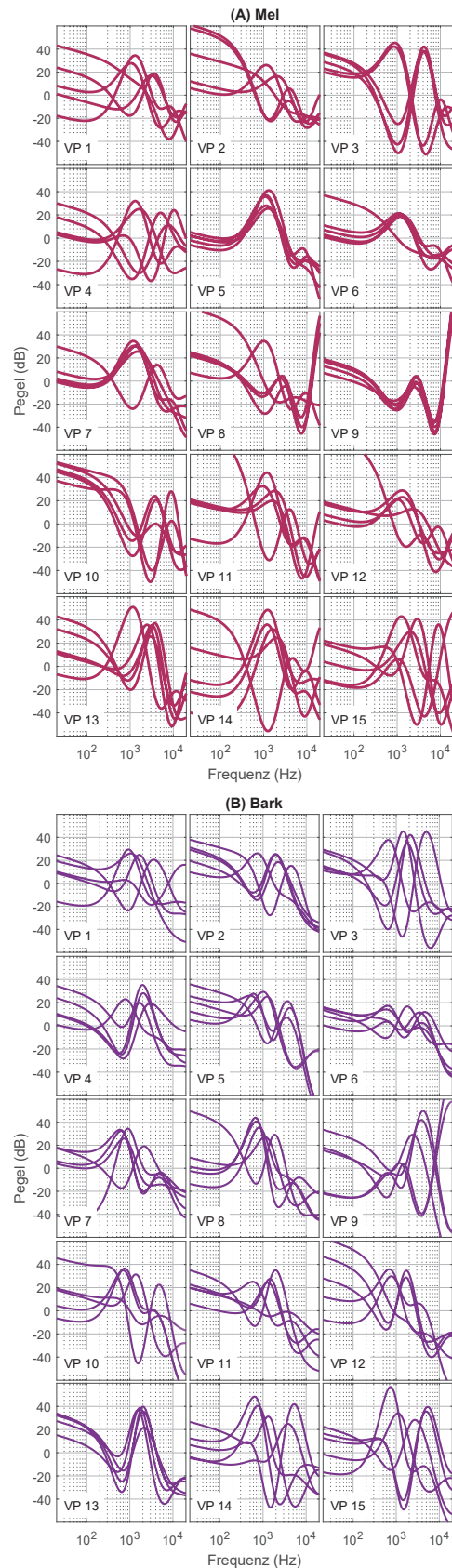


Abbildung 6: Individuell angenehm eingestellte spektrale Einhüllenden aller 15 Teilnehmenden für die Mel-Frequenzskalierung (A, oben) und die Bark-Skalierung (B, unten).