

Ermittlung eines Zielklanges für Fahrzeugklimatisierungsgeräusche

Andreas Logdesser¹, Thomas Biermeier², Silke Hohls², Sven Münsterjohann¹ und Stefan Becker¹

¹ Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik,

91058 Erlangen, Deutschland, Email: lg@ipat.uni-erlangen.de

² Audi AG, Deutschland

Einleitung

Die Geräuschkulisse im Innenraum eines Fahrzeugs trägt maßgeblich zum Komfortempfinden des Fahrers bei. Maßnahmen zur Reduktion des Schalleintrags durch Wind und akustische Optimierungen des Antriebsstrangs führen dazu, dass Nebenaggregate, wie das Klimatisierungsgerät einen erhöhten Anteil zum Innenraumgeräusch beitragen. Neben der Forderung nach leiseren Geräuschen ist nach [1] auch der Informationsgehalt der Geräusche entscheidend. Demnach stört ein Geräusch insbesondere dann, wenn die beinhaltete Information für den Hörer keine Relevanz besitzt oder von anderen Aktivitäten ablenkt. Eine Mensch-Maschine-Interaktion, wie die Nutzung der Klimaanlage, erfordert eine akustische Rückmeldung. Ein vollständiges Ausbleiben des Geräusches suggeriert einen Defekt, während ein unangenehmes Geräusch störend wirkt. Um den Komfortansprüchen des Fahrers gerecht zu werden, muss das Klimatisierungsgeräusch deshalb gezielt gestaltet werden.

Ziel dieser Untersuchung ist es, mit Hilfe eines Hörversuches Richtlinien zur Verbesserung der Geräuschqualität eines Fahrzeugklimasystems abzuleiten.

Versuchsaufbau

Das Klimatisierungsgeräusch soll als möglichst angenehm empfunden werden. Die ausschlaggebende Größe dafür ist die Geräuschqualität. Nach [2] ist der auditive Eindruck mit weiteren Empfindungen verknüpft. Um eine Vielzahl von Reizen zu berücksichtigen, wurde ein Hörversuch in einer realistischen Versuchsumgebung durchgeführt. Als Versuchsort wurde daher ein Serienfahrzeug gewählt, das mit möglichst wenigen sichtbaren Modifikationen umgerüstet wurde. Das Klimatisierungsgeräusch galt es trotzdem realistisch wiederzugeben. Während des Versuches wurde das Gebläse nicht eingeschaltet, um zu verhindern, dass eine Überlagerung der Strömungsgeräusche mit den abgespielten Geräuschen stattfindet. Auf eine Geräuschwiedergabe über Kopfhörer wurde verzichtet, da dies eine unnatürliche Situation für den Fahrer darstellt.

Die Wiedergabe im Fahrzeug erfolgte über Lautsprecher, die quellenah platziert wurden. Dazu wurden in die Mannanströmer, wie in Abbildung 1 zu sehen ist, Breitbandlautsprecher eingebaut. Diese geben das Klimatisierungsgeräusch ab 200 Hz wieder. Zum Abspielen von niedrigen Frequenzen wurde ein Subwoofer verwendet, der auf dem Rücksitz hinter dem Fahrer platziert wurde. Neben Luftschall induziert die Strömung Körperschall. Um dies abzubilden, wurde ein Körperschallwandler ver-

wendet, der die Instrumententafel zum Schwingen anregt. Ein Überblick über die Positionen der Lautsprecher im Fahrzeug ist in Abbildung 2 zu sehen.

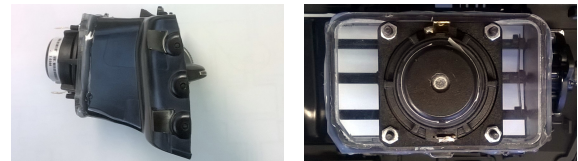


Abbildung 1: Breitbandlautsprecher, Einbaustand im Mannanströmer

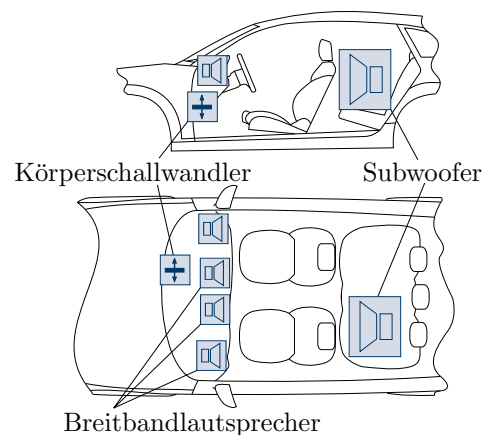


Abbildung 2: Positionen der Lautsprecher im Fahrzeug

Die Eingaben erfolgten mit Hilfe eines Tablets, das auf dem Lenkrad vor der Versuchsperson platziert wurde und zur Instruktion, sowie zur Erfassung der Versuchsdaten diente. Die Versuchsumgebung ist in Abbildung 3 zu sehen.

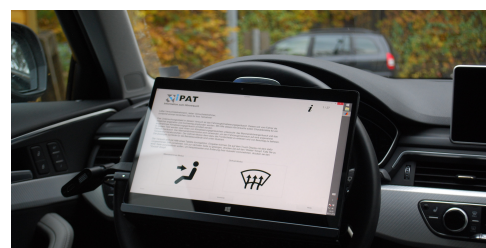


Abbildung 3: Versuchsaufbau im Fahrzeug mit Eingabegerät

Versuchsplan

Der Hörversuch wurde zweigeteilt durchgeführt. Im ersten Teil war die Aufgabe der Versuchsperson mit Hilfe von vorgegebenen, klangformenden Filtern (Equalizer) das vorhandene Klimatisierungsgeräusch zu verändern. Ziel war es, mit den gegebenen Einstellmöglichkeiten, ein möglichst angenehmes Geräusch zu erzeugen.

In Abbildung 4 sind die verwendeten Equalizer (EQ) und das Frequenzspektrum des Klimatisierungsgeräusches zu sehen. Aufgetragen ist der Schalldruckpegel (SPL) des Spektrums bzw. die Verstärkung des Equalizers in dB über die Frequenz in Hz. Die klangliche Veränderung, die ein Equalizer bewirkt, hängt von dessen Typ, der Kernfrequenz f_c , der Filtergüte Q und der Verstärkung ab. Als Typen wurden Peak Equalizer und Shelf Equalizer verwendet. Peak EQs, wie in Abbildung 4a dargestellt, bewirken eine glockenförmige Änderung im Frequenzspektrum des Geräusches um die Kernfrequenz f_c . Die Bandbreite des Peak EQs ist abhängig von der Filtergüte Q . Shelf EQs bewirken eine halbseitige Änderung des Frequenzverlaufes. Es wird zwischen High Shelf und Low Shelf EQs unterschieden. High Shelf EQs, wie in Abbildung 4b und 4d dargestellt, verändern oberhalb der Kernfrequenz f_c das Geräusch. Analog wirken Low Shelf EQs, wie in Abbildung 4c, unterhalb der Kernfrequenz f_c . Die Steigung eines Shelf EQs ist abhängig von der Filtergüte Q . Im Hörversuch wurden Typ, Kernfrequenz f_c und Filtergüte Q festgelegt. Die Verstärkung konnte durch die Versuchsperson geändert werden, wobei sie eine maximale Dämpfung bzw. Verstärkung von 10 dB einstellen konnte.

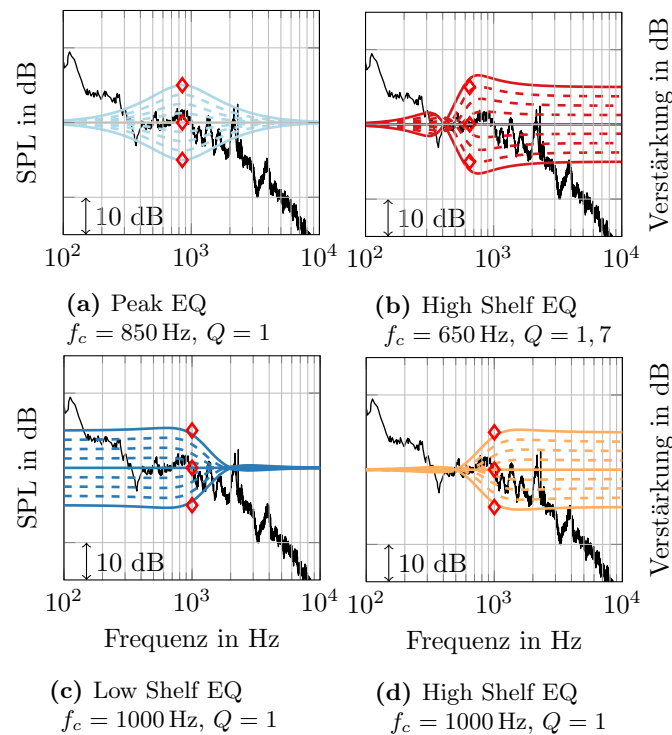


Abbildung 4: Verwendete EQs für das Klimatisierungsgeräusch

Wenn die Versuchsperson mit dem Ergebnis zufrieden war, so wurden die vorgenommenen Einstellungen ge-

speichert. Sollte die Versuchsperson mit den gegebenen Möglichkeiten keine Verbesserung erzielen können, wurde das ebenso erfasst.

Nach [3] werden insbesondere Überhöhungen im Frequenzgang als störend empfunden. Aus diesem Grund wurde eine Funktion implementiert, die den Frequenzverlauf glättet. Die spektrale Veränderung, die mit Hilfe der Glättungsfunktion erzielt werden kann, ist in Abbildung 5 zu sehen.

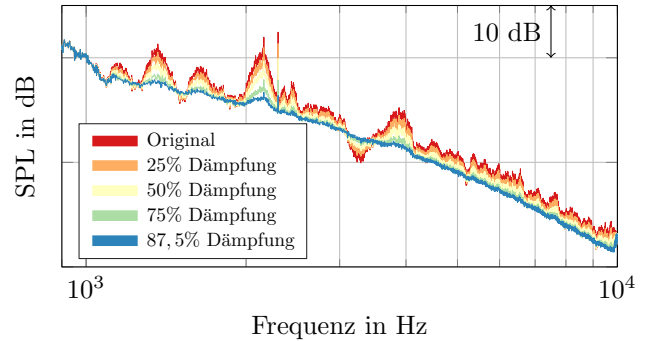


Abbildung 5: Glättung des Frequenzverlaufs

Dem Algorithmus zur Glättung wird das Zeitsignal $x(t)$ übergeben. Über eine schnelle Fouriertransformation (FFT) erfolgt die Berechnung des komplexen Frequenzvektors \underline{X} , in dem Informationen über Amplitude und Phase des Frequenzganges enthalten sind. \underline{X} lässt sich durch folgenden Zusammenhang darstellen

$$\underline{X} = |\underline{X}| \cdot e^{i \cdot \arg(\underline{X})}, \quad (1)$$

wobei $|\underline{X}|$ die Amplitude und $\arg(\underline{X})$ die Phase des Frequenzvektors \underline{X} ist. Nun wird ein Frequenzbereich f_{start} bis f_{end} im Amplitudenspektrum $|\underline{X}|$ gewählt. Über diesen wird nach der Methode der kleinsten Quadrate eine Ausgleichskurve mit einer Exponentialfunktion erstellt. Als Parameter, der die Glättung bestimmt, wird der Glättungsfaktor D_G übergeben. Er legt die prozentuale Annäherung des Amplitudenfrequenzgangs $|\underline{X}|$ an die Ausgleichskurve fest. Um Sprünge im Frequenzverlauf zu vermeiden und eine sukzessive Anpassung der Frequenzen an den Rändern zu gewährleisten, werden diese jeweils mit einem halbseitigen Fenster multipliziert. Im Anschluss wird die geglättete Amplitude $|\underline{Y}|$ und Phase $\arg(\underline{X})$ des Ursprungssignal nach Gleichung (1) zu einem neuen Frequenzvektor \underline{Y} zusammengesetzt. Um aus dem Frequenzvektor \underline{Y} ein Zeitsignal zu erzeugen, wird eine Inverse Fouriertransformation (IFT) durchgeführt, die das Signal $y(t)$ ausgibt. Die Funktionsweise ist schematisch in Abbildung 6 dargestellt.

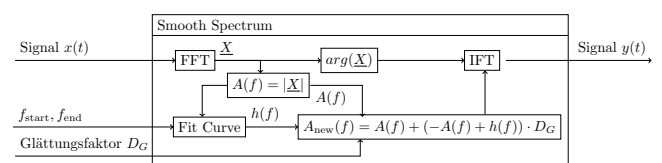


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Algorithmus zur Glättung des Frequenzverlaufs

Die Komplexität der Aufgabe im Hörversuch wurde schrittweise gesteigert, indem zunächst Filter nur einzeln und schließlich in Kombinationen zur Verfügung gestellt wurden. Abbildung 7 zeigt die vier Filterkombinationen der höchsten Komplexitätsstufe mit denen die Versuchspersonen das Originalgeräusch verändern konnten.

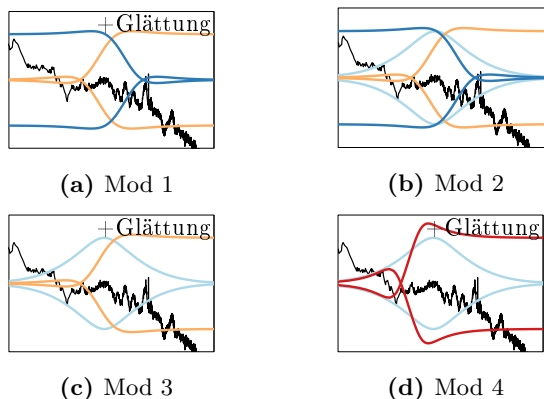


Abbildung 7: Zum Paarvergleich herangezogene Filterkombinationen

Die Lautheit ist im Paarvergleich nach [4] und [5] der dominierende Faktor für die Präferenzentscheidung von Klimatisierungsgeräuschen. Dadurch treten andere Parameter in den Hintergrund, die ebenso zur Qualitätswahrnehmung beitragen. Aus diesem Grund wurde die Lautheit im Rahmen des Hörversuchs konstant gehalten, indem die Geräusche nach jeder Bearbeitung auf die Ausgangslautheit angeglichen wurden.

Im zweiten Teil des Hörversuchs wurde eine Präferenzreihenfolge zwischen den modifizierten Geräuschen der höchsten Komplexitätsstufe (Abbildung 7) und dem Originalgeräusch ermittelt. Dazu wurden die Geräusche in einem Paarvergleich bewertet. Die Versuchsperson sollte das Geräusch auswählen, das sie als angenehmer empfindet. Sie wurde darüber unterrichtet, dass im Paarvergleich eine Auswahl der von ihr modifizierten Geräusche, sowie das Originalgeräusch in zufälliger Reihenfolge abgespielt werden. Dadurch, dass die Abspieldreihenfolge zufällig ist, konnte ein systematischer Fehler vermieden werden.

Tabelle 1 zeigt die Zusammensetzung der Versuchspersonen, die am Hörversuch teilgenommen haben. Aufgetragen ist das Geschlecht über persönliche Eigenschaften, die mit Hilfe eines Fragebogens ermittelt wurden.

Tabelle 1: Zusammensetzung der Probanden

	ges.	Musiker	Autofahrer	Akustiker	ϕ Alter
m	24	10	18	8	26,4
w	6	4	2	0	24,3
ges.	30	14	20	8	26,0

Insgesamt wurden die Hörversuche von 30 Teilnehmern ausgewertet, wobei 20% der Personen weiblich und 80% männlich waren. Etwa 67% der Versuchsteilnehmer

gaben an, dass sie ein Fahrzeug besitzen oder regelmäßig mit einem fahren. Den meisten Versuchspersonen ist somit das Klimatisierungsgeräusch aus eigener Erfahrung bekannt. Acht männliche Versuchspersonen gaben außerdem an, dass sie sich beruflich mit Akustik beschäftigen, oder Akustik als Studienschwerpunkt gewählt haben. Der Anteil an Musikern unter den Probanden betrug etwa 47%.

Auswertung

In einem ersten Schritt wird die Urteilkonsistenz im Paarvergleich geprüft. Diese kann mit Hilfe des Konsistenzkoeffizienten K beschrieben werden, der sich über

$$K = 1 - \frac{d}{d_{\max}}. \quad (2)$$

bestimmen lässt. Der Konsistenzkoeffizienten K hängt von der Anzahl der zirkulären Triaden d ab, die bei dem Paarvergleich erzeugt wurden und der maximalen Anzahl zirkulärer Triaden d_{\max} , die erzeugt werden können. Bei absolut konsistentem Urteilverhalten ist der Konsistenzkoeffizient $K = 1$ und bei absolut inkonsistentem Urteilen $K = 0$. Bei $K = 1$ liegt Transitivität vor und es kann eine eindeutige Präferenzreihenfolge abgeleitet werden. Intransitivität kann aus einer Abhängigkeit des übergeordneten Parameters Geräuschqualität von anderen Parametern resultieren. Gründe können aber auch Urteilsfehler wie Nachlässigkeit, Konzentrationsverlust oder starke Ähnlichkeit der Testgeräusche sein.[6] Im Fall des vorliegenden Versuchs ist die Ähnlichkeit der Geräuschpaare abhängig von den Modifikationen, die vom Probanden vorgenommen wurden. Stellt die Versuchsperson nur eine geringe Modifikation ein, so ähneln sich die Geräusche und die Bewertungsaufgabe erschwert sich dadurch.

Der Mittelwert des Konsistenzkoeffizienten liegt in diesem Hörversuch bei $\bar{K} = 0,8$. Keine der Versuchspersonen hat absolut inkonsistent und 57% der Versuchspersonen haben absolut konsistent geantwortet.

Die Grenze für konsistentes Antwortverhalten kann nach [7] über den Erwartungswert für zirkuläre Triaden $E(d)$ abgeschätzt werden. Der daraus resultierende Konsistenzkoeffizient beträgt $K_d = 0,5$. Da $\bar{K} > K_d$ ist, kann von einem konsistenten Antwortverhalten bei diesem Hörversuch ausgegangen werden.

Mit den Ergebnissen des Paarvergleich lässt sich mit Hilfe der LAW OF COMPARATIVE JUDGEMENT (LCJ) nach [8] eine Präferenzreihenfolge berechnen. In Tabelle 2 ist zu sehen, dass das Originalgeräusch den letzten Rang belegt. Der überwiegende Anteil der Versuchspersonen konnte somit das Geräusch mit den gegebenen Möglichkeiten verbessern. Es muss jedoch beachtet werden, dass die Rangfolge eine Aussage über die Eignung der Filter und der Versuchsmethodik, nicht aber über die Geräusche selbst trifft. Die Geräusche sind von den Einstellungen des jeweiligen Probanden abhängig.

Um eine Vorgabe in Form eines Spektrums zu erhalten, wurden die erzeugten Geräusche, die sich in den jeweiligen Paarvergleichen durchgesetzt haben, gemittelt. In

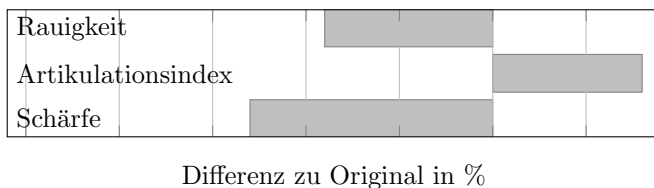
Tabelle 2: Skalenwerte und Präferenzreihenfolge der bewerteten Geräusche

	Original- geräusch	Mod 1	Mod 2	Mod 3	Mod 4
Skalenwert	0	8,68	10	8,46	8,65
Rang	5	2	1	4	3

Paarvergleichen, bei denen keine eindeutige Präferenz festgestellt werden konnte, wurden die Spektren der gleich gut bewerteten Geräusche im Vorfeld gemittelt. Die gemittelte Gesamtheit der Modifikationen resultiert in einer deutlichen tieffrequenten Anhebung und leichten hochfrequenter Absenkung.

In Abbildung 8 ist ein Vergleich ausgewählter psychoakustischer Parameter des Originalgeräusches mit dem gemittelten Geräusch zu sehen. Aufgetragen ist die prozentuale Differenz zum Originalgeräusch.

Es ist zu erkennen, dass die eingestellten Modifikationen in einer Verringerung der Schärfe nach DIN 45632, sowie einer Erhöhung des Artikulationsindex resultieren. Eine ähnliche Korrelation zwischen Präferenz und den Parametern Schärfe und Artikulationsindex konnte bereits in [4] festgestellt werden. Es lässt sich ebenfalls ein Rückgang der Rauigkeit nach DIN 45631/A1 feststellen, wobei diese einen geringen Absolutwert aufweist.

**Abbildung 8:** Psychoakustische Parameter: Unterschied von Originalgeräusch zu resultierendem Geräusch

Zusammenfassung

In dieser Untersuchung wurde ein Hörversuch vorgestellt, mit dem Richtlinien zur Verbesserung der Geräuschqualität von Fahrzeugklimatisierungsgeräuschen abgeleitet wurden. Mit Hilfe von quellenah platzierten Lautsprechern wurde ein realistisches Schallfeld in der Fahrgastzelle ohne sichtbare Änderungen im Innenraum erzeugt. Der Hörversuch wurde zweiteilig durchgeführt. In einem ersten Schritt veränderten die Versuchspersonen das Originalgeräusch mit Hilfe von klanggebenden Filtern und eines Glättungsalgorithmus. Die Lautheit wurde dabei konstant gehalten. Es wurden vier Geräusche generiert, die mit dem Originalgeräusch anschließend in einem Paarvergleich bewertet wurden. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Probanden das Originalgeräusch mit Hilfe der vorhandenen Modifikationsmöglichkeiten verbessern konnten. Aus den präferierten Geräuschen wurde anschließend ein gemittelttes Geräusch erzeugt. Es zeigte sich, dass eine Erhöhung tieffrequenter Geräuschanteile bevorzugt wird. Aufgrund der gleichbleibenden Lautheit hat dies eine Verminderung hoher Frequenzen zur Folge.

Bei gleichbleibender Lautheit bewirkte eine Reduktion der Schärfe und eine Erhöhung des Artikulationsindex eine Verbesserung der Geräuschqualität.

Literatur

- [1] Altinsoy, E.: „Product Sound Design“ als eine kommunikationsakustische Aufgabe. Zeitschrift für Lärmbekämpfung, 2015
- [2] Genuit, K.: Sound-Engineering im Automobilbereich. Springer Verlag, 2010
- [3] Bücklein, R.: Hörbarkeit von Unregelmäßigkeiten in Frequenzgängen bei akustischer Übertragung. Frequenz, Band 16, 1962
- [4] Hohls, S.: Psychoacoustic analysis of HVAC noise with equal loudness, INTER-NOISE, 2014
- [5] Wagner, V.: Subjective and Objective Evaluation of the Air Conditioning Sound, Journal of Ergonomics, 2014
- [6] Bortz, J.: Forschungsmethoden und Evaluation, Springer Verlag, 2006
- [7] Bortz, J.: Verteilungsfreie Methoden in der Biostatistik, Springer Verlag, 2008
- [8] Thurstone, L. L.: A law of comparative judgement, Psychological Review, American Psychological Association, 1927