
Psychoakustische Untersuchungen an Fahrzeuginnengeräuschen

UWE HANDMANN¹, MARKUS BODDEN

Lehrstuhl für allgemeine Elektrotechnik und Akustik
(Prof. Dr.-Ing. Dr. techn. h.c. Jens Blauert), Ruhr-Universität Bochum

1 Einleitung

Es ist eine alltägliche Erfahrung, daß wir Urteile über gut oder schlecht, bzw. qualitativ hochwertig oder minderwertig eines Gegenstandes mit der Wahrnehmung des ermittelten Geräuschschalls in Verbindung bringen. Der Geräuschlaut ist deshalb ein wichtiges Entscheidungskriterium bei der Auswahl eines Produktes, welches wahrnehmbaren Schall erzeugt. Die Fragestellung hinsichtlich der Geräuschqualität und des Geräuschdesigns stellt daher hohe Anforderungen an den Akustik-Ingenieur. Zum heutigen Zeitpunkt ist es jedoch nicht möglich, mit einer instrumentellen Meßtechnik Aussagen über die Eignung eines Geräuschschalls für ein Produkt zu machen. Es ist nicht möglich, kognitive Faktoren über eine instrumentelle Meßtechnik zu messen. Es reicht es nicht aus, eine Geräuschgüte mit Bewertungsschemata wie dem A-bewerteten Schalldruckpegel oder Lautheitsmodellen zu definieren. Diese lassen allein keine eindeutigen Aussagen über die Wahrnehmung von Geräuschen zu. Der vorliegende Beitrag ist als Ansatz für das Soundengineering von Fahrzeuginnengeräuschen zu sehen. Es wird anhand von Hörversuchen mit Fahrzeuginnengeräuschen ein objektiver Beschreibungskatalog ermittelt, der eine Aussage über die jeweilige Hörempfindung zuläßt.

2 Perzeption von Geräuschschall

Das von Kraftfahrzeugen erzeugte Geräusch wird einerseits an die Umgebung abgestrahlt und von Anwohnern, Straßenpassanten und anderen Verkehrsteilnehmern wahrgenommen. Andererseits ist das Geräusch auch im Innenraum des Kraftfahrzeuges hörbar. Dort erfüllt das Geräusch für den Fahrzeuginsassen unter anderem eine Kontrollfunktion und trägt entscheidend zur Zufriedenheit bei (Bobbert (1988)).

Durch Verminderung des Schalldruckpegels im Fahrzeuginnenraum an einzelnen Teilgeräuschquellen verändern sich die Anteile der Quellen am Gesamtgeräusch. Dies hat zur Folge, daß häufig vor einer Geräuschminderung verdeckte Schalldruckanteile nach einer solchen gehört werden und störend wirken. Diese störenden Schallanteile, wie etwa Rasseln im Getriebe, gilt es einzuordnen und gegebenenfalls zu eliminieren. Es ist jedoch nicht nur die Reduzierung des Schalldruckpegels einzelner Teilgeräuschquellen zur Optimierung des Fahrzeuginnengeräusches wichtig. Vielmehr wird ein gutes Fahrzeuginnengeräusch dann erreicht, wenn die Gesamtheit der Quellen Einfluß auf die Verbesserung der Hörempfindung hat. Es muß daher die Reduzierung des Schalldruckpegels ebenso berücksichtigt werden, wie die Akzeptanzschwelle von Schallerzeugern und die Ästhetik des Fahrzeuginnengeräusches. Dieses Problem wird mit dem Soundengineering angegangen.

Aufgrund der physiologischen Eigenschaften des menschlichen Gehörs und der neuronalen Verarbeitung sowie psychologischer Empfindungsgrößen kann die Analyse eines dargebotenen Geräusches nicht nur anhand physikalischer Eigenschaften erfolgen. Die Perzeption von Geräuschschall muß bei der Beurteilung von Geräuschen ebenso berücksichtigt werden, so daß sich psychophysikalische Faktoren ableiten lassen.

Das Soundengineering stützt sich also nicht nur auf das traditionelle Verfahren der Minderung des Geräuschleistungspegels. Ebenso ist die Optimierung der Pegel-, Frequenz- und Zeitverteilung anhand psychophysikalischer objektiver Faktoren wichtig, um ein ästhetisches Geräusch zu generieren. Diese Optimierung muß jedoch zusätzlich durch psychoakustische Experimente begleitet werden, um über eine perzeptive Rückkopplung das optimale Geräusch zu approximieren. Nur so ist es möglich, relevant werdende psychophysikalische Faktoren rechtzeitig zu erkennen. Dieses iterative Verfahren

¹ jetzt Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen IIS-Erlangen

ergibt als Ergebnis einen Pool von objektiven Faktoren, der eine Gruppe von Geräuschklingen beschreibt. Die extrahierten Faktoren können dann über eine "Default-Gewichtung" für Anwendungskategorien (Bsp.: Kategorie Sportwagen) zur Optimierung eines speziellen Geräuschklingens angesetzt werden.

Aufgrund der Komplexität der angeführten Zusammenhänge ist es sinnvoll, ein Modell zur Verarbeitung von Geräuschklingen zu entwerfen, das einzelne Funktionsgruppen im menschlichen Gehör zusammenfaßt. *Blauert* (1994) entwickelte hierfür ein binaurales Modell. Der Funktionsblock, der die Perception von Geräuschen im Gehirn beschreibt, ist noch Gegenstand intensiver Forschung. Hierfür müssen zuerst Faktoren gefunden werden, die objektiv Wahrnehmungsgrößen beschreiben. Die vorliegende Arbeit soll zur Klärung dieser Größen am Beispiel von Fahrzeuginnengeräuschen beitragen.

Häufig wird die Beurteilung durch Menschen als subjektiv beschrieben und damit das Ergebnis der Empfindungsgrößen bewertet. Bei einer geeigneten Versuchsdurchführung können jedoch Versuchspersonen unabhängige Faktoren gemessen werden. Diese auditiv-basierten Verfahren sind objektiv, wenn man Objektivität wie folgt definiert: Haben Beurteilungsergebnisse unterschiedlicher Versuchspersonen die gleiche statistische Verteilung, so sind die Ergebnisse von der individuellen Versuchsperson unabhängig (*Blauert; Bodden* (1994)).

3 Geräuschgüte

Es kann an der Genauigkeit einer Geräuschgüte gezweifelt werden, wenn nur einzelne Komponenten des Geräuschklingens, wie die Rauigkeit, bei Kriterien zur Beurteilung von Geräuschen berücksichtigt werden. Vielmehr muß das Gesamtmodell des Hörens (*Blauert* (1974, 1985, 1994), *Bodden* (1992)) in ein Beurteilungsschema einfließen, wenn ein Qualitätsmaß von Geräuschklingen entwickelt werden soll. Legt man bei der Analyse einer Hörempfindung nur Wert auf einen Aspekt eines Geräusches, wie z.B. die Hörschwelle, kann dieser Faktor mit einer Meßapparatur extrahiert werden. Da die Empfindungsgrößen jedoch von einer Mehrzahl von Reizgrößen beeinflußt werden, ist es klar, daß unterschiedliche Kombinationen von Reizgrößen differierende Empfindungsgrößen hervorrufen. Ist daher nicht nur die Extraktion einer Komponente eines Geräusches gewünscht, sondern die Gesamtheit der Wahrnehmung und Hörempfindung eines Geräusches von Interesse, muß mit einem anderen Ansatz die Analyse durchgeführt werden. Zentraler Bestandteil ist hierbei die Analyse und Klassifizierung von verbalen Urteilen, wie beispielsweise die des semantischen Differentials.

In der vorgestellten Untersuchung werden Fahrzeuginnengeräusche mit Hilfe einer binauralen Meßtechnik auf dem Beifahrersitz aufgenommen und den Probanden über Kopfhörer vorgespielt. Es wird nach dem Verfahren der Konstanzmethode gearbeitet.

Fahrsituationen:

1. Leerlauf ausgekuppelt
2. ausgekuppelt (Leerlauf - 4000 U/min)
3. Creeping (800 U/min - 900 U/min)

Im Versuchsdurchlauf muß ein Proband drei Testgeräusche von vier verschiedenen Fahrzeugtypen über ein semantisches Differential 69 Adjektivpaaren zuordnen. Empfindet er ein Adjektivpaar als geeignet, die Fahrzeuginnengeräusche zu beschreiben, muß er für dieses ein Intervallurteil (-2...2) fällen. Die so gewonnenen Daten werden für die statistische Analyse aufbereitet und mit Hilfe einer Clusteranalyse und einer Faktorenanalyse ausgewertet (*Hartung* (1991), *Überla* (1971)). Die Faktorenanalyse wird angesetzt, um aus der vorliegenden Datenmatrix relevante orthogonale Faktoren zur Beschreibung der Korrelationsmatrix zu extrahieren und die Clusteranalyse wird verwendet, um die extrahierten Faktoren mit Klassen hoher Faktorenladung zu beschreiben.

Zur Aufbereitung der Daten werden zwei Methoden miteinander verglichen. Im ersten Ansatz wird ein zweistufiges Analyseverfahren durchgeführt. Hier werden im ersten Schritt die Mittelwerte der Urteile pro Geräusch gebildet und im zweiten Schritt wird die reduzierte Datenmatrix ausgewertet. Der Ansatz der zweistufigen Methode wird in der Literatur bevorzugt verwendet. Mit der Mittelwertbildung glättet man jedoch signifikante Ausprägungen einzelner Stichproben, die zur Bestimmung der Faktoren wichtig sind. Deshalb wird im zweiten Ansatz eine geschachtelte Datenmatrix aufgestellt, worin alle Antworten aufgenommen werden. Es werden die Antworten über die Adjektivpaare abgetragen.

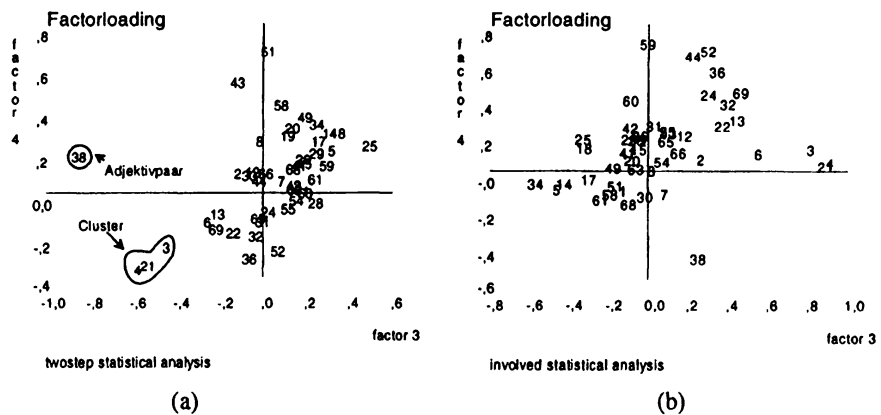


Bild 1: Faktorenladung des Faktors 3 im zweistufigen (a) und im geschachtelten (b) Verfahren

Die geschachtelte Datenmatrix wird an ihren Leerstellen mit den Mittelwerten der Urteile pro Geräusch besetzt und dann direkt der Clusteranalyse und der Faktorenanalyse zugeführt. Dieser psychoakustisch etwas unsaubere Ansatz ist zweckmäßig, da die Analyse aufgrund der hohen Leerstellenzahl sonst fehlschlägt. Die Betrachtungsweise der Daten erfolgt horizontal. Deshalb kann dieser Kompromiß eingegangen werden. Vorteilhaft ist die Analyse mit der geschachtelten Datenmatrix, weil Ausprägungen einzelner Stichproben bei der Analyse berücksichtigt werden.

Bild 1 zeigt einen Vergleich der beiden Analyseverfahren. Während beim zweistufigen Verfahren die Faktorenladung des Clusters (3,4,21) den Betrag "0,6" hat, fällt beim geschachtelten Ansatz die hohe Faktorenladung des Clusters (3,4,21) mit Betrag "1" auf.

4 Beschreibungskatalog

Aus der Analyse der Daten kann ein Katalog zur Beschreibung von Fahrzeuginnengeräuschen formuliert werden. Aus diesem Katalog kann eine Geräuschglüte abgeleitet werden. Die dargebotenen Geräusche lassen sich anhand der Behaglichkeit, der Klarheit, der Leistung, der Rauheit und der Minderwertigkeit beschreiben. Die Sportlichkeit, die Weite und die Vertrautheit haben einen weniger signifikanten Einfluß.

Ein Vergleich mit den Einzelergebnissen der Probanden zeigt, daß beispielsweise der Faktor Leistung (schwach/kräftig) bei Beschleunigungsgeräuschen durchgehend, also für jedes Fahrzeug, einen Wert viel größer als "1" aufweist. Dies bedeutet, daß Beschleunigungsgeräusche einen kräftigeren Eindruck bei den Testpersonen hinterlassen, als Fahrzeuginnengeräusche bei konstanter Drehzahl.

Ein anderes Beispiel, anhand des Faktors Behaglichkeit (unangenehm/angenehm) zeigt, daß das Leerlaufgeräusch von Fahrzeug 1, welches den geringsten Schallpegel im Test aufweist, deutlich besser beurteilt wird als Fahrzeug 4 im Betriebszustand Creeping, wo eine Resonanz beim

Armaturenbrett aufritt. Außerdem bekommt Fahrzeug 1 in diesem Betriebszustand die beste Bewertung, was in erster Näherung auf die geringe Schalleistungsdichte zurückzuführen ist.

Bedeutung	repräsentatives Adjektivpaar (Nummer)	Faktor
Behaglichkeit	unangenehm/angenehm (26)	1
Klarheit	dunkel/hell (7)	2
Leistung	schwach/kräftig (4)	3
Rauheit	grob/fein (15)	4
Minderwertigkeit	alt/neu (52)	5
Sportlichkeit	gemächlich/hastig (61)	6
Vertrautheit	unvertraut/vertraut (43)	7
Weite	einengend/geräumig (42)	8

Tabelle 1: Orthogonale Faktoren zur Beurteilung von Fahrzeuginnengeräuschen

5 Zusammenfassung und Ausblick

Eine gezielte Veränderung von Geräuschen, so wie sie im Soundengineering angewandt werden soll, erfordert zunächst einmal die Bestimmung der für die Beurteilung entscheidenden Einflußgrößen und Parameter. Aus diesem Grunde werden Ergebnisse grundlegender psychoakustischer Untersuchungen vorgestellt. Am Beispiel von Fahrzeuginnengeräuschen unterschiedlicher Fahrsituationen wird das Problem der Klassifizierung von Geräuschschallen und Geräuschlauten eingeführt. Ein mit Hilfe des Semantischen Differentials entwickeltes Qualitätsprofil von Fahrzeuginnengeräuschen wird beschrieben und die dazugehörige statistische Auswertung verdeutlicht. Extrahierte, für das Soundengineering wichtige Wahrnehmungsgrößen werden eingeordnet.

Aus den extrahierten Wahrnehmungsgrößen läßt sich ein Pool psychophysikalischer objektiver Faktoren entwickeln. Eine "Default-Gewichtung" des Pools für Anwendungskategorien gibt Vorgaben für das Sounddesign von Fahrzeuginnengeräuschen. Eine instrumentelle Meßtechnik ist ableitbar.

6 Literatur

Blauert 1974: Räumliches Hören, Stuttgart, S. Hirzel-Verlag. **Blauert 1985:** Räumliches Hören - Nachschrift, Stuttgart, S. Hirzel-Verlag. **Blauert 1994:** An introduction to Binaural Technology, in Binaural and Spatial Hearing (R. Gilkey & T. Anderson, eds.), Hilldale (USA), Lawrence Erlbaum. **Blauert; Bodden 1994:** Gütebeurteilung von Geräuschen - Warum ein Problem? in Vo 1994: Soundengineering: kundenbezogene Akustikentwicklung in der Fahrzeugtechnik, Renningen-Malmsheim, expert-Verlag. **Bobbert 1988:** Innengeräusche von Kraftfahrzeugen, Fortschritte der Akustik DAGA, Bad Honnef DPG-Verlags-Gesellschaft. **Bodden 1992:** Binaurale Signalverarbeitung: Modellierung der Richtungserkennung und des Cocktail-Party-Effektes, Düsseldorf, VDI-Verlag GmbH. **Handmann 1995:** Untersuchungen über die Erstellbarkeit einer instrumentellen Meßtechnik zur Vorhersage psychoakustischer Analysen, Diplomarbeit an der Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für allg. Elektrotechnik und Akustik. **Hartung 1991:** Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik, München, Oldenburg Verlag GmbH. **Moore 1977:** Introduction to the Psychology of Hearing, London, Basingstoke, The Macmillan Press LTD. **Überla 1971:** Faktorenanalyse, Berlin, Springer-Verlag.