

# Psychoakustische Bewertung von Fahrzeugklimatisierungsgeräuschen anhand von Probandentests

Silke Hohls<sup>1</sup>, Thomas Biermeier<sup>2</sup>, Ralf Blaschke<sup>2</sup>, Stefan Becker<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, 91058 Erlangen, Deutschland,

Email: Silke.Hohls@ipat.uni-erlangen.de ; Stefan.Becker@ipat.uni-erlangen.de

<sup>2</sup> Audi AG, 85045 Ingolstadt, Deutschland,

Email: Thomas.Biermeier@audi.de; Ralf.Blaschke@audi.de

## Einleitung

Um den Komfort sowie die Sicherheit im Straßenverkehr zu erhöhen, gilt es, die Lärmbelastung der Fahrzeuginsassen zu reduzieren. Aufgrund der akustischen Dämmung der Hauptgeräuschquellen (z.B. Motor, Umströmung) und dem Einsatz neuer Technologien wie Elektroantriebskonzepten treten die Nebenaggregate als Lärmquellen zunehmend in den Vordergrund. Deutlich zeigt sich dies an dem durch das Klimatisierungssystem erzeugte und in die Fahrgastzelle eingebrachte Schallfeld, welches demaskiert wird und dadurch verstärkt wahrnehmbar ist. Da die Empfindung von Lärm subjektiv ist, ist der Schalldruckpegel als alleinige Bewertungsgröße zur Lärminderung nur begrenzt geeignet. Ziel dieser Studie ist es, geeignete akustische und psychoakustische Parameter zur Bewertung der Wahrnehmung von Klimatisierungsgeräuschen zu identifizieren.

## Durchführung

In dieser Studie wurde ein Hörversuch für die Identifikation relevanter akustischer und psychoakustischer Parameter durchgeführt. Die Grundlage bilden Testschalle, die in vier verschiedenen Fahrzeugen der Oberklasse und zwei verschiedenen Betriebsmodi mit Hilfe der Kunstkopftechnik aufgenommen wurden. Bei den Betriebsmodi handelt es sich zum Einen um einen stationären Betriebsmodus, bei dem die Luftverteilung durch die Mannanströmer bei einem Luftmassenstrom von 4 kg/min erfolgt (Modus I) und zum Anderen um den Defrost Modus, d.h. bei einer Luftverteilung über die Defrost Düsen unterhalb der Windschutzscheibe bei einem Luftmassenstrom von 7 kg/min (Modus II).

Es wurde ein zweiteiliger Hörversuch durchgeführt. Es wurden die Testschalle in einem Präferenzpaarvergleich und mit Hilfe eines Semantischen Differentials bewertet. Hierbei wurden die Schalle der verschiedenen Betriebsmodi in zwei getrennten Versuchsblöcken bewertet. Die Adjektivpaare des Semantischen Differentials basieren auf den Ergebnissen des EU-Projekts „Objective Evaluation of Interior Car Sound“ (OBELICS) [1], in dem ein Semantisches Differential für die Bewertung von Fahrzeuginnenraumgeräuschen entwickelt wurde.

Der Hörversuch wurde in einem Laborversuch mit einem Expertenpanel bestehend aus 39 Personen mit einem Durchschnittsalter von 36 Jahren (Standardabweichung 9,5 Jahre) durchgeführt.

## Ergebnisse

### Paarvergleich

Die ordinalskalierten Paarvergleichsurteile weisen eine hohe Konsistenz der einzelnen und signifikante Übereinstimmung unter der Versuchspersonen auf. Die Ergebnisse werden daher mit Hilfe des Law of Comparative Judgement nach Thurstone [2] in eine intervallskalierte Präferenzskala transformiert und anschließend auf Werte zwischen 0 und 10 normiert. Diese Werte geben keinen Aufschluss über die absolute Lage der jeweiligen Präferenzen, jedoch über die relativen Präferenzunterschiede. In beiden Versuchsblöcken liegt eine relativ gleichmäßige Verteilung der Testschalle über die Skala (0-10) vor. Die Ergebnisse je Betriebsmodus sind in Abbildung 1 dargestellt.

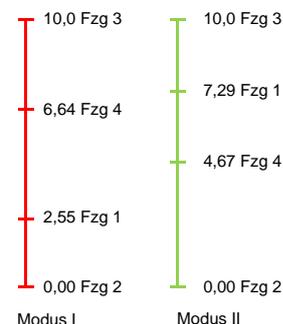


Abbildung 1: Präferenzskala nach dem Law of Comparative Judgement

Für beide Betriebsmodi ist Fahrzeug 3 das meist präferierte und Fahrzeug 2 das am wenigsten präferierte Fahrzeug. Bei den mittleren Präferenzrangplätzen sind die Fahrzeuge 1 und 4 vertauscht.

Um den Zusammenhang von Änderungen in akustischen bzw. psychoakustischen Parametern und der Präferenz zu untersuchen, wurde anschließend eine Korrelationsanalyse durchgeführt. In Tabelle 1 sind die Korrelationskoeffizienten  $r$  und die zugehörigen Irrtumswahrscheinlichkeiten  $\alpha$  zusammengefasst. Es sind jeweils die Werte für die Korrelation der Präferenz mit den Parametern des Signals des rechten sowie des linken Ohres des Kunstkopfs und ferner mit der Differenz zwischen beiden Ohren angegeben.

Unter der Annahme der Signifikanz einer Korrelation mit Irrtumswahrscheinlichkeiten von kleiner 5% werden so-

**Tabelle 1:** Korrelationsanalyse zwischen Präferenzwerten und (psycho-)akustischen Parametern;  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $\alpha$  = Irrtumswahrscheinlichkeit

		linkes Ohr		rechtes Ohr		Differenz	
		Modus		Modus		Modus	
		I	II	I	II	I	II
Lautheit	$r$	<b>-0,96</b>	<b>-1,00</b>	<b>-0,96</b>	<b>-1,00</b>	-0,45	-0,01
	$\alpha$	0,04	0,00	0,04	0,00	0,55	0,99
SPL	$r$	-0,77	<b>-1,00</b>	-0,86	<b>-0,99</b>	-0,7	-0,24
	$\alpha$	0,23	0,01	0,14	0,01	0,31	0,76
Rauigkeit	$r$	-0,94	-0,89	-0,94	-0,92	-0,86	-0,11
	$\alpha$	0,06	0,11	0,06	0,08	0,85	0,12
Tonalität	$r$	0,44	0,07	-0,78	-0,27	-0,63	-0,55
	$\alpha$	0,56	0,93	0,22	0,73	0,37	0,45
Schärfe	$r$	-0,46	<b>-0,99</b>	-0,64	<b>-0,98</b>	<b>-0,97</b>	-0,56
	$\alpha$	0,54	0,01	0,36	0,02	0,04	0,44
Schärfe	$r$	-0,67	<b>-1,00</b>	-0,80	<b>-0,99</b>	-0,94	-0,79
	$\alpha$	0,32	0,00	0,20	0,01	0,06	0,21
Aures	$r$	<b>0,97</b>	<b>1,00</b>	<b>0,95</b>	<b>0,98</b>	0,93	0,23
	$\alpha$	0,04	0,00	0,04	0,02	0,07	0,77

mit die Parameter Lautheit, Schärfe und der Artikulationsindex (AI) als relevante Einflussfaktoren identifiziert. Auffällig ist, dass die Schärfe bei Modus I lediglich eine signifikante Korrelation zu den Differenzen zwischen beiden Ohren aufweist. D.h. die Präferenz sinkt mit zunehmender Verschiedenheit der Schärfe auf beiden Ohren. Die weiteren Parameter zeigen einen direkt linearen Zusammenhang mit den Präferenzwerten.

Diese Analyse zeigt, dass eine objektiv bestimmbare Änderung in den Parametern Lautheit, Schärfe und Artikulationsindex eine Änderung in der Präferenz, die als Gesamtqualitätsurteil interpretierbar ist, zur Folge hat. Weiterhin zeigt die Untersuchung, dass die Lautheit als Bewertungsgröße besser geeignet ist, als der Gesamtschalldruckpegel (SPL).

### Semantisches Differential

Im zweiten Teil des Hörversuchs wurden dieselben Testschalle, erneut in zwei Blöcken entsprechend des jeweiligen Betriebsmodus, auf einem Semantischen Differential bewertet. Der Vorteil gegenüber dem Paarvergleich ist es hier, dass einzelne Geräuschmerkmale separat bewertet werden können.

Es wurde eine Faktorenanalyse je Versuchsblock durchgeführt, um verschiedene Wahrnehmungsdimensionen zu identifizieren. Diese Analyse hat gezeigt, dass für beide Betriebsmodi dieselben Wahrnehmungsdimensionen existieren und die Testschalle zu einer Geräuschklasse zusammengefasst werden können. Die Faktorenanalyse wurde anschließend erneut durchgeführt.

Nach dem Kaiser-Eigenwert-Kriterium wurden drei Faktoren extrahiert. Die Zuordnung der einzelnen Adjektivskalen zu den Faktoren erfolgte anhand der jeweils höchsten Faktorladungen, die abgesehen von der Skala rau/glatt eine eindeutige Zuordnung ergab. Die Faktoren mit den jeweils zugehörigen Skalen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Die Analyse zeigt drei identifizierte Wahrnehmungsdi-

**Tabelle 2:** Zuordnung von Adjektivpaaren zu den extrahierten Faktoren der Faktorenanalyse und Zusammenfassung

Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3
leise - laut	tief - hoch	gleich- - ungleich-
entspannend - anstrengend	dumpf - schrill	mäßig - mäßig
weich - hart	stumpf- scharf	glatt - rau
defensiv - offensiv		breit- - tonhaltig
angenehm - unangenehm		bandig
glatt - rau		
schwach - kraftvoll		
hochwertig - minderwertig		
beruhigend - aufregend		
Kraft, Stärke, Qualität	Klangfarbe, Tonhöhe	Modulationen, Tonhaltigkeit

mensionen, die durch die Faktoren widerspiegelt werden. Faktor 1 enthält diejenigen Adjektivpaare, die die Kraft, Stärke und Qualität der Klimatisierungsgeräusche beschreiben. Faktor 2 wird durch die Adjektivpaare vertreten, die die Klangfarbe und Tonhöhe in den Geräuschen widerspiegeln. Die Faktor 3 zugehörigen Adjektive beschreiben Modulationen und tonhaltige Komponenten innerhalb der Klimatisierungsgeräusche.

Aufbauend auf die Faktorenanalyse wurde eine Regressionsanalyse zwischen den Faktoren und den psychoakustischen Parametern durchgeführt. Der stärkste lineare Zusammenhang ergibt sich aus der Lautheit zu den Faktorwerten des Faktor 1 und stellt damit den dominanten Einflussfaktor dar. Ein weiterer linearer Zusammenhang besteht zwischen Faktor 1 und dem Artikulationsindex. Daneben existieren lineare Trends zwischen der Schärfe und Faktor 2 sowie der Rauigkeit und Tonhaltigkeit mit Faktor 3. Hier ist es jedoch aufgrund der Dominanz der Lautheit nicht möglich, lineare Zusammenhänge abzuleiten.

### Zusammenfassung

In der psychoakustischen Bewertung von Klimatisierungsgeräuschen wurden anhand von Probandentests die für die Bewertung relevanten akustischen und psychoakustischen Parameter identifiziert sowie ferner drei voneinander unabhängige Wahrnehmungsdimensionen ermittelt. Die Wahrnehmung von Qualität bezüglich Fahrzeug-Klimatisierungsgeräuschen ist damit durch die psychoakustischen Parameter Lautheit, Schärfe, Rauigkeit, Tonhaltigkeit und dem Artikulationsindex erklärbar. In weiteren Tests soll die Lautheit als dominanter Einflussparameter eliminiert werden um präzisere Abhängigkeiten der übrigen Parameter zu ermitteln.

### Literatur

- [1] Buss, S., Schulte-Fortkamp, B., Muckel, P.: Combining Methods to Evaluate Sound Quality. *Internoise (Nice, France, 2000)* 38 (2000).
- [2] Thurstone, L. L.: A Law of Comparative Judgement. *Psychological Review* 34 (1927), 273-286