

Psychoakustische Untersuchungen an simulierten Abgasanlagengeräuschen von Zwei-, Drei- und Vierzylinder-Motoren

Carsten Binder, Christine Huth, Dennis Bönnen

Faurecia Emissions Control Technologies, 86154 Augsburg

Einleitung

Im Trend des Downsizings setzt die Automobilindustrie vermehrt auf kleinvolumige, oft aufgeladene Motoren, um das Fahrzeuggewicht und den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren. Der Marktanteil der Zwei- und Dreizylindermotoren wird damit in den nächsten Jahren deutlich steigen. Durch die unterschiedlichen akustischen Anregungsmuster und die dadurch entstehenden Klangfarbenunterschiede haben sich die Anforderungen an die Abgasanlagenakustik stark verändert.

Mittels der psychometrischen Methode des Semantischen Differentials wurden simulierte Abgasmündungsgeräusche von Zwei-, Drei- und Vierzylinder-Motoren untersucht. Die untersuchten Mündungsgeräusche umfassen zwei Hochläufe mit verschiedenen Abgaskrümmervarianten. In einer weiteren Studie wurden die Ergebnisse mit realen Mündungsgeräuschen verglichen.

Eckdaten der Testreihen

Mittels des Programmpakets Ameli/RunUp wurden Mündungsgeräusche mit den folgenden Konfigurationen synthetisiert:

Tabelle 1: Verwendete Konfigurationen

Motorvariante	Abgaskrümmerskonstruktion	Rohrlängen im Krümmer
2-Zyl.-Motor	symmetrisch	je 250 mm
	unsymmetrisch	200 / 100 mm
3-Zyl.-Motor	symmetrisch	je 250 mm
	unsymmetrisch	250 / 150 / 50 mm
4-Zyl.-Motor	symmetrisch	je 250 mm
	unsymmetrisch	250 / 182 / 116 / 50 mm

Ameli/RunUp basiert auf einer Überlagerung einer definierten Anzahl von Ordnungspegeln und einem Strömungsanteil, der sich an der Strömungsgeschwindigkeit der jeweiligen Abgasanlage orientiert. [1]

Für jede Konfiguration wurde ein Hochlaufsignal von 1500 bis 4000 U/min und 3500 bis 6000 U/min mit der Länge von acht Sekunden erstellt. Die simulierten Abgasanlagen sind bis auf die Längen der Rohre innerhalb des Abgaskrümmers identisch. Bei den Varianten mit unsymmetrischen Abgaskrümmern sind im Gegensatz zu den symmetrischen Abgaskrümmern die Rohre vom Zylinder- bis zum Abgaskrümmerausgang pro Zylinder unterschiedlich lang. Jede der drei Motorvarianten besitzt einen Hubraum von 1,4l.

Durchführung

Die Durchführung der Hörversuche erfolgte im hauseigenen Akustikraum über Lautsprecher. Pro Hörversuch wurden

Gruppen von maximal sechs Personen eingeladen. Insgesamt nahmen 23 Personen an dem Hörversuch teil, davon sechs Akustikexperten. Jeder Stimulus wurde pro Person zweimal bewertet. Als psychometrische Methode wurde das Semantische Differential mit folgenden Adjektivpaaren verwendet:

Tabelle 2: Verwendete Semantische Differentiale

Bezeichnung	Sem. Differential
Lautstärke	quiet - loud
Rauhigkeit	rough - flat
Wohlempfinden	pleasant - unpleasant
Spannung	boring - interesting
Dynamik	lazy - dynamic
Kraft	powerful - powerless
Impulshaltigkeit	steady - impulsive
Qualität	low quality - high quality
Schärfe	sharp - dull
Dämpfung	muffled - metallic

Auswertung

Für die Kontrolle der Beurteilungen wurde die Abweichung der beiden abgegebenen Bewertungen jedes Soundfiles ermittelt. Da bei drei Personen eine zu hohe Abweichung auftrat, gingen nur die Beurteilungen von 20 Teilnehmern in die Auswertung ein.

Zunächst wurde aus den beiden Bewertungen einer Versuchsperson je Stimulus der Median berechnet. Hieraus wurde dann der Gesamtmedian jedes Stimulus über alle Versuchspersonen gebildet.

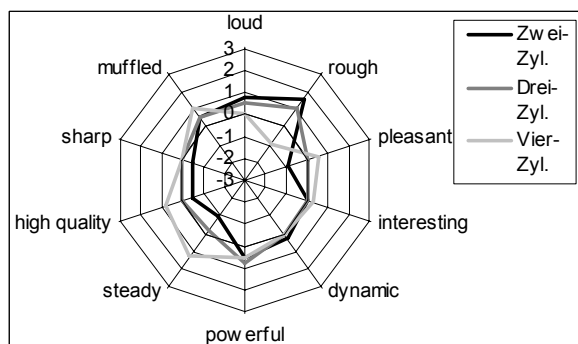


Diagramm 1: Semantische Differentiale der Studie mit symmetrischen Abgaskrümmern in Drehzahlbereich von 1500 bis 4000 U/min

Diagramm 1 zeigt das Ergebnis des Hochlaufes von 1500 bis 4000 U/min für die symmetrischen Varianten der Abgasanlagen. Die Semantischen Differentiale "rough-flat" und "steady-impulsive" weisen die größten Unterschiede zwischen den Zwei-, Drei- und Vierzylinder-Motoren auf. Je weniger Zylinder der Motor besitzt, desto rauer bzw. impulsiver wurde hierbei der Motor bewertet.

Je mehr Zylinder im Motor verbaut sind, desto besser wurden die beiden Größen Qualität und Wohlempfinden bewertet. Bezüglich der Größen Dynamik, Kraft und Spannung sind die Bewertungen jedoch sehr ähnlich.

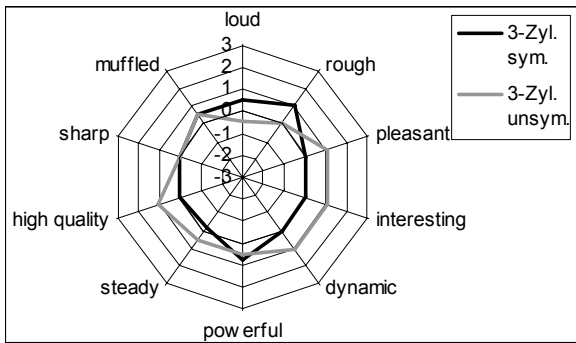


Diagramm 2: Vergleich der Semantischen Differentiale der Studie mit synthetischen Geräuschen des 3-Zylinder Motors im Drehzahlbereich von 1500-4000 U/min

Diagramm 2 zeigt die Ergebnisse der Dreizylinder-Motoren im Drehzahlbereich von 1500 bis 4000 U/min. Zwischen den symmetrischen und unsymmetrischen Abgaskrümern des Dreizylinder-Motors liegen die größten Unterschiede von maximal einer Kategorie in den Größen der Semantischen Differentiale Qualität, Dynamik, Interesse und Wohlempfinden. Bei unsymmetrischen Abgaskrümern verändert sich durch das Auftreten subharmonischer Motorordnungen die Klangfarbe. Dies kann der Grund für die positivere Bewertung dieser Größen sein. Gleichzeitig können diese Beurteilungen an den Größe Lautheit und Rauigkeit liegen: die symmetrischen Abgaskrümmen wurden jeweils lauter bzw. rauer bewertet. Die Unterschiede zwischen den symmetrischen und unsymmetrischen Motorbauarten sind bei Zwei- und Vierzylindermotoren nicht so ausgeprägt wie bei den Dreizylindermotoren

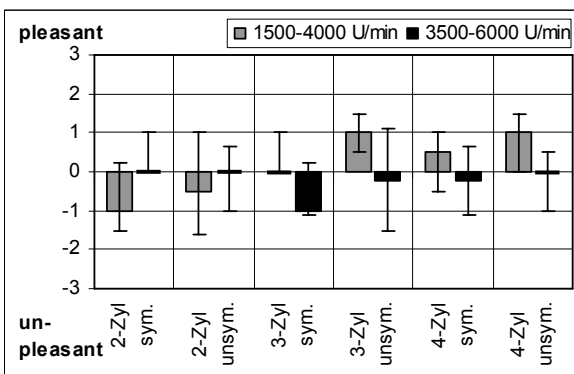


Diagramm 3: Auswertung des Semantischen Differentials "pleasant-unpleasant" der Studie mit synthetischen Geräuschen

In Diagramm 3 sind die Ergebnisse des Semantischen Differentials "pleasant-unpleasant" beider Hochläufe dargestellt. In dem Hochlauf bis 4000 U/min wirkt der Zweizylinder-Motor wesentlich unangenehmer als der Drei- und Vierzylinder-Motor. Dies dreht sich jedoch im hohen Drehzahlbereich um.

Es ist ebenfalls zu erkennen, dass die unsymmetrischen Abgaskrümervarianten stets angenehmer bewertet wurden als die symmetrischen.

Vergleich mit realen Mündungsgeräuschen

In einer Folgestudie wurden Abgasmündungsgeräusche von aktuellen Zwei-, Drei- und Vierzylinder-Fahrzeugen auf einem Rollenprüfstand aufgenommen und ebenfalls in einer Hörstudie bewertet. Die Fahrzeuge unterschieden sich sowohl im Hubraum und der Leistung, als auch bezüglich ihrer Abgasanlagen.

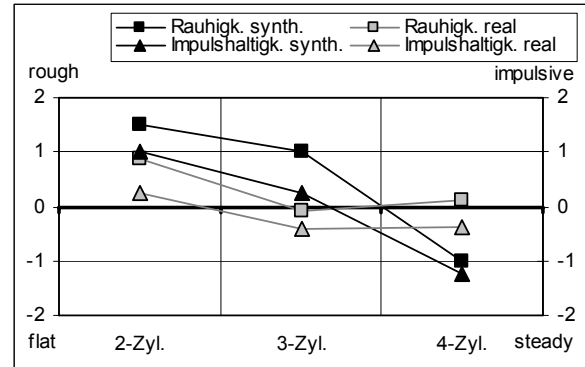


Diagramm 4: Vergleich der Semantischen Differentiale "rough-flat" und "steady-impulsive" im Drehzahlbereich 1500 bis 4000 U/min der synthetischen und realen Fahrzeuggeräusche

In Diagramm 4 sind die Semantischen Differentiale "rough-flat" und "steady-impulsive" beider Hörversuchsreihen mit synthetischem bzw. realem Fahrzeuggeräusch im Hauptfahrbereich von 1500 bis 4000 U/min dargestellt. Hieraus ist sichtbar, dass in beiden Studien ein ähnlicher Verlauf der beiden Semantischen Differentiale besteht: Je weniger Zylinder ein Fahrzeug besitzt, desto rauer bzw. impulsiver wurde dieses bewertet. Von allen Semantischen Differentialen wiesen die Größen Rauigkeit und Impulsivität die beste Übereinstimmung zwischen den beiden Studien auf.

Fazit

Im Hauptfahrbereich ist in den Merkmalen Qualität und Wohlempfinden eine erwartete, klare Reihenfolge (4-,3-, und 2-Zylinder) zu sehen. Interessant ist, dass im hohen Drehzahlbereich über 4000 U/min der Zweizylinder-Motor tendenziell in diesen beiden Größen besser bewertet wurde als die anderen Motoren. In den Größen Kraft, Dynamik und Spannung sind alle Motorvarianten nahezu identisch bewertet worden.

Bei einem Vergleich zwischen den symmetrischen und unsymmetrischen Abgaskrümervarianten wird der unsymmetrische Abgaskrümmen in nahezu allen Motorvarianten angenehmer bewertet.

Vergleicht man die realen Fahrzeugaufnahmen mit den synthetisch erzeugten, weisen insbesondere die Ergebnisse der Semantischen Differentiale der Rauigkeit und Impulshaltigkeit eine gute Übereinstimmung auf.

Literatur

- [1] Zintel, G.: Sound design of exhaust system. 3rd Styrian Noise, Vibration & Harshness Congress. Graz. 2005
- [2] Zwicker, E., Fastl, H.: Psychoacoustics, Facts and Models. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 1999