

Psychoakustische Bewertung einer thermoakustischen Motorkapsel

Jesko L. Verhey^{1,a}, Tommy Luft², Jan Hots¹, Hermann Rottengruber²

¹ Abteilung für Experimentelle Audiologie, Otto-von-Guericke-Universität, D-39120 Magdeburg

² Lehrstuhl Energiewandlungssysteme für mobile Anwendungen, Otto-von-Guericke-Universität, D-39106 Magdeburg

^a Email: jesko.verhey@med.ovgu.de

Einleitung

In der Europäischen Union soll bis 2020 der CO₂ Ausstoß um mindestens 20% gegenüber 1990 reduziert werden [1]. Da zwölf Prozent des derzeitigen gesamten CO₂ Ausstoßes vom Personenkraftwagenverkehr kommt, ist eine Maßnahme zum Erreichen dieses Ziels eine Reduktion des durchschnittlichen CO₂ Ausstoßes der Neuwagenflotte auf 95 g CO₂/km. Nicht zuletzt dieser Beschluss hat den Druck auf die Automobilindustrie erhöht besonders effiziente Motoren zu entwickeln, was neben alternativen Antriebskonzepten beim konventionellen Verbrennungsmotor häufig durch Downsizing und Effizienzsteigerung (z.B. durch thermische Kapselung) der Motoren erreicht werden soll. Gerade das Downsizing zieht jedoch nicht selten auch neue akustische Herausforderungen nach sich, denen u.a. durch entsprechende akustische Kapselung entgegengewirkt werden kann.

Um den Wirkungsgrad zu erhöhen und der Lärmemission bei einem Dieselmotor signifikant entgegenzuwirken sollte an der Otto-von-Guericke-Universität eine motornahe thermoakustische Vollkapselung in mehreren Prototypstufen entwickelt und auf einem dynamischen Akustik-Motorprüfstand erprobt werden. Zu Beginn wurden Messungen für eine thermische und akustische Istzustandsanalyse am ungekapselten Motor durchgeführt. Daraus ableitend ließen sich wärmeisolierende und schallabsorbierende Materialien auswählen und damit ein erster Kapselprototyp P1 aufbauen. Das verwendete Kapselmaterial bestand aus einem Polyurethan-Schaumstoff vor einer schallharten Außenwand mit einer Temperaturbeständigkeit bis 160 °C. Für die Kapselung der Abgasanlage wurden aufgrund der höheren Temperaturen Mineralwolle und perforierte Aluminiumbleche zur thermischen Abgrenzung verwendet. Letztere fungierten zusätzlich als Helmholtz-Resonator. In einem weiteren Schritt wurden akustische Leckagen beseitigt und spezielle Maßnahmen zur Pegelreduktion von tiefen Frequenzen ergriffen. Dadurch entstanden zwei zusätzliche Prototypen P2+ (mit Schwerfolie) und P2- (ohne Schwerfolie), durch die der A-bewertete Schalldruckpegel breitbandig weiter abgesenkt werden konnte. Für alle Prototypen wurden mit einer stirnseitigen Mikrofonanordnung Motorhochläufe aufgenommen. Ausschnitte aus diesen Geräuschen wurden in hörakustischen Experimenten auf ihre Lautheit und ihre Präferenz hin untersucht.

Versuchspersonen

15 normalhörende Versuchspersonen im Alter zwischen 21 und 44 Jahren haben an der Studie teilgenommen. Die

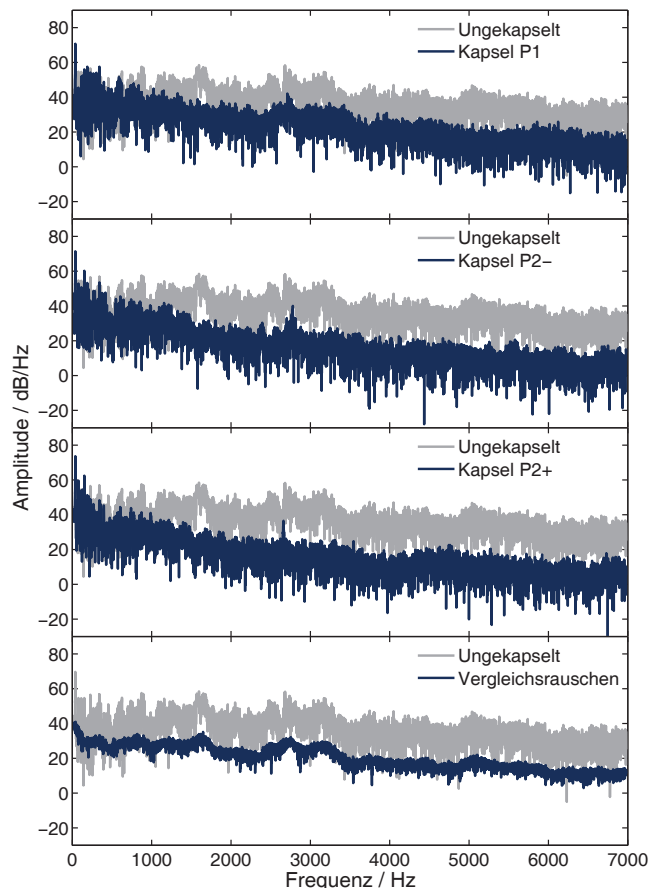


Abbildung 1: Spektren der Motogeräusche bei 2250 U/min nach (blau) und vor (grau) der Kapselung: P1 (oben), P2- (mitte oben), P2+ (mitte unten). Das untere Teilbild zeigt das Vergleichsrauschen.

Versuchspersonen wurden für ihre Teilnahme bezahlt, sofern sie nicht den beteiligten Arbeitsgruppen angehörten.

Methode

Aus den Aufnahmen der Motorhochläufe bei einer mittleren Last von 50 Nm wurden für alle drei Kapselungen sowie für das ungekapselte Signal Segmente einer Dauer von 1 s bei einer Drehzahl von 2250 U/min sowie 3500 U/min herausgeschnitten. Ein Vergleichsrauschen wurde für jede der beiden Drehzahlen getrennt aus den Testsignalen erzeugt. Hierzu wurden die Spektren der Ausschnitte gemittelt, über eine Breite von 90 Hz spektral geglättet und die Phase der Spektralkomponenten randomisiert. Abbildung 1 zeigt die Signalspektren ex-

emplarisch für die Drehzahl von 2250 U/min. In einem adaptiven 2-Intervall 2-AFC-Verfahren wurde die Lautheit des Vergleichsrauschens an die der Testsignale angeglichen. Aufgabe der Versuchspersonen war es in jedem Vergleich anzugeben, welches der Signale in den beiden Intervallen als lauter empfunden wurde. Die Intervalle wurden durch eine Pause von 500 ms voneinander getrennt und während der Wiedergabe optisch hervorgehoben. Der Pegel der Testsignale wurde in den Messungen um 20 dB gegenüber dem Originalpegel reduziert, um eine Gefährdung der Versuchspersonen durch hohe Pegel auszuschließen. Startpegel des Vergleichsrauschens von -10 dB, 0 dB und +10 dB bezüglich des Pegels der Testsignale wurden verwendet. Ein identisches Verfahren wurde zum Ausgleich der Präferenz benutzt. Die Aufgabe der Versuchspersonen bestand in diesem Fall darin in jedem Vergleich anzugeben welches der Signale in den beiden Intervallen bevorzugt wurde. Vergleichbare Verfahren wurden in [2] verwendet. Die Messungen aller Testsignale und Startpegel wurden für die Drehzahlen getrennt verschachtelt gemessen. Der Ausgleich der Lautheit wurde für alle Versuchspersonen vor dem Ausgleich der Präferenz durchgeführt.

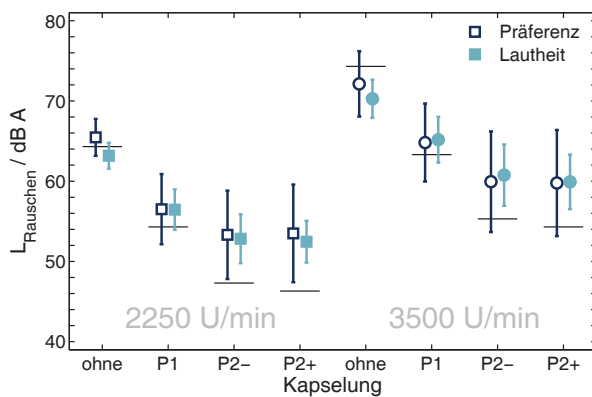


Abbildung 2: Pegel des Vergleichsrauschens bei gleicher Lautheit (hellblau, geschlossene Symbole) und bei gleicher Präferenz (dunkelblau, offene Symbole) in dBA. Es sind Mittelwerte +/- eine Standardabweichung über die teilnehmenden Versuchspersonen dargestellt. Die horizontalen Balken geben den Pegel der Motorgeräusche in dBA an.

Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 2 zeigt den Pegel in dBA des Vergleichsgeräusches, das als gleich laut (hellblau) bzw. als gleich präferiert (dunkelblau) wie das Motorgeräusch wahrgenommen wurde. Gezeigt ist der Mittelwert der Ergebnisse der 15 Versuchspersonen. Der Fehlerbalken gibt die interindividuelle Standardabweichung an. Die Pegel der Motorgeräusche in dBA sind durch kurze horizontale Linien gekennzeichnet. Diese sind für die Motorgeräusche mit der höheren Drehzahl (vier Geräusche rechts) erwartungsgemäß höher als für die vergleichbaren Geräusche mit der niedrigeren Drehzahl (vier Geräusche links). Dem Ziel entsprechend reduziert die thermoakustische Kapselung für beide betrachtete Drehzahlen den Pegel des Motorgeräusches. Die Kapselung P1 führt zu

einer Pegelreduktion von etwa 10 dB. Die effektivste Kapselung P2+ bewirkt eine Pegelreduktion von 18 dB gegenüber dem ungekapselten Motorgeräusch. Der Lautheitsvergleich zeigt qualitativ ebenfalls eine deutliche Dämmwirkung der Kapselung P1 und eine weitere Reduktion der Lautheit durch die Kapselung P2+. Jedoch fällt die Reduktion der Lautheit deutlich geringer aus als es die Pegel in dBA erwarten ließen. So ist die maximale Lautheitsreduktion äquivalent zu einer Reduktion des Pegels des Vergleichsrauschens um lediglich 10 dB. Dieses deutet darauf hin, dass die Lautheit noch vom Pegel in dBA unberücksichtigten Faktoren abhängt. Eine zusätzliche Messung zeigte, dass gerade bei den Kapselungen P2- und P2+ für die Drehzahl von 2250 U/min deutlich hörbare tonale Komponenten auftraten, die das Lautheitsurteil der Versuchspersonen beeinflussen könnten. Ihre Frequenz hing von der Kapselung ab (2279 Hz für P2- und 2261 Hz für P2+, siehe Abb. 1). Da hörbare tonale Komponenten insbesondere zu einer Erhöhung der Lästigkeit des Signals führen ist nicht auszuschließen, dass die Versuchspersonen bei den Lautheitsurteilen auch die Lästigkeit mit berücksichtigt haben. Hierauf deuten auch die Präferenzdaten hin. Die Pegel bei gleicher Präferenz unterscheiden sich kaum von denen der Lautheitsmessung (Differenz < 2 dB). Dieses Ergebnis unterscheidet sich von früheren Messungen zu Präferenz und Lautheit, bei denen die Präferenzurteile i.A. extremer waren als die Lautheitsergebnisse [2, 3]. Dieses könnte an einer größeren Ähnlichkeit von Vergleichsschall und Motorgeräuschen liegen als dieses bei den vorherigen Messungen der Fall war. Alternativ könnte aber auch die Signaldauer für ein valides Präferenzurteil zu kurz gewesen sein. Vorherige Studien haben für die Präferenzmessungen mehr als doppelt so lange Signale genutzt. Konsistent mit den vorherigen Studien sind die individuellen Unterschiede bei den Präferenzurteilen deutlich größer als für die Lautheitsurteile, in dieser Studie im Mittel etwa doppelt so groß. Die Studie zeigt somit, dass der A-bewertete Schalldruckpegel zwar einen Hinweis auf empfundene Lautheit liefert, jedoch andere für die Gesamtbewertung des Schalls wichtige Aspekte außer Acht lässt.

Literatur

- [1] EU Verordnung zur Reduktion des CO₂ Ausstoßes URL: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/eu_verordnung_co2_emissionen_pkw.pdf
- [2] Verhey, J.L., Hots, J., Luft, T., Ringwelski, S., Gabbert, U.: A psychoacoustical evaluation of active and passive methods for noise reduction in automotive engineering. AIA-DAGA 2013, Merano, Italy (Dega e.V., Berlin, Germany), ISBN: 978-3-939296-05-8, 1772–1775
- [3] Töpken, S., Verhey, J.L., Weber, R.: Preference and loudness of multi-tone sounds. AIA-DAGA 2013, Merano, Italy (Dega e.V., Berlin, Germany), ISBN: 978-3-939296-05-8, 1269–1272