

Subjektive Beurteilung der Geräusche von Kühlerlüftern

Nils Springer¹, Carsten Spinder²

¹ sounddesign Ronnebaum & Springer, 26135 Oldenburg, Deutschland, Email: springer@sounddesign.net

² Distelkamp-Strömungstechnik, 26135 Oldenburg, Deutschland, Email: carsten.spinder@distelkamp-stroemungstechnik.de

Einleitung

Die Geräusche von Kühlerlüftern im Automobilbereich haben bis vor einigen Jahren keine bedeutende Rolle gespielt, da sie zu den Aggregaten gehören, die nicht ununterbrochen in Betrieb sind. Dies ändert sich im gleichen Maße wie auch die Anforderungen an die Klimatisierung der Fahrzeuge steigt, denn erhöhte Luftleistung und enge Bauräume haben einen signifikanten Einfluss auf die Geräusentwicklung.

Das Geräusch von Kühlerlüftern lässt sich grob in zwei Komponenten einteilen: Das breitbandige Rauschen und den schmalbandigen Drehklang mit seinen Harmonischen. Der Drehklang ist oft die dominierende und dadurch störende Komponente des Geräusches. Seine Grundfrequenz entspricht dem Produkt von Drehzahl und Blattanzahl.

Um Einfluss auf den Drehklang des Lüfters zu nehmen, ist die ungleichmäßige Anordnung der Lüfterblätter ein adäquates und häufig eingesetztes Mittel [1]. Dadurch wird die eindeutige Periodizität der Anregung überlagert und die akustische Energie wird, spektral gesehen, auf Seitenbänder umverteilt. Je nach Ausprägung und Abstand der Seitenbänder (bzw. Modulationsfrequenz) kann so ein rauer Geräuschindruck entstehen.

Da eine ausgeprägte Rauigkeit ebenfalls sehr lästig wirken kann, stellt sich die Frage, ob der Zuwachs an lästiger Rauigkeit die Verringerung der Lästigkeit durch die reduzierte Tonhaltigkeit aufwiegen kann. Deshalb wurden die Geräusche von acht unterschiedlich geteilten Lüftern subjektiv nach den Eigenschaften tonhaltig, rau und lästig beurteilt.

Experiment

Um den Einfluss der Verteilung der Lüfterschaukeln auf die Geräuschwirkung zu untersuchen, werden ausgehend von einem Lüfter mit symmetrisch verteilten Schaukeln sieben Geräuschvariationen mit unterschiedlichen unsymmetrischen Verteilungen (sog. Teilungen) erstellt.

Diese Geräuschvariationen werden mit einer Software erstellt, die die Auswirkungen der Schaukelteilung auf die Drehklänge der symmetrischen Verteilung und die daraus resultierenden Seitenbänder berechnet. So ist gewährleistet, dass sich die einzelnen Geräuschvariationen nur durch die unterschiedliche Teilung unterscheiden und nicht durch andere, ebenfalls die Geräuschwirkung beeinflussende Eigenschaften.

Die acht Geräusche werden nach der Methode des vollständigen Paarvergleichs getrennt nach den Eigenschaften ton-

haltig, rau und lästig beurteilt. Die Geräusche werden über Kopfhörer bei einem Pegel von 75 dB(A) dargeboten. Die Versuche werden mit zehn Versuchspersonen (eine Frau und neun Männer) durchgeführt, die in der Lüfterentwicklung tätig sind.

Zur Auswertung wird zunächst die Konsistenz der Versuchspersonenurteile überprüft, indem der Konsistenzkoeffizient anhand der auftretenden zyklischen Triaden ermittelt wird. Versuchsreihen mit einem Konsistenzkoeffizienten von unter 0,7 werden von der weiteren Auswertung ausgeschlossen. [2]

Im Anschluss werden mithilfe der BTL-Methode Skalenergebnisse für die einzelnen Geräuschvariationen in Bezug auf die drei beurteilten Eigenschaften ermittelt. Diese Art der Auswertung hat gegenüber der Bildung von Rangreihen den Vorteil, dass die Skalenergebnisse verhältnisskaliert sind, d.h. dass ein doppelt so hoher Skalenergebnis einer doppelt so großen Ausprägung des Merkmals entspricht.

V Versuchsergebnisse für tonhaltig und rau

In Abbildung 1 sind die Skalenergebnisse der acht Signale für die Beurteilung nach tonhaltig und nach rau dargestellt. Die Skalenergebnisse sind dabei auf das tonhaltigste bzw. raueste Geräusch normiert. Zur besseren Übersichtlichkeit sind die Geräusche nach ihrer Tonhaltigkeit geordnet.

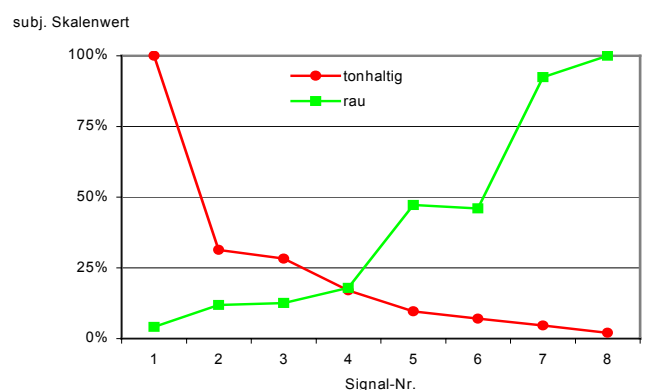


Abbildung 1: Subjektive Skalenergebnisse für die Beurteilung nach tonhaltig (rot) und rau (grün) für acht Lüftergeräusche. Die Skalenergebnisse sind jeweils auf das tonhaltigste bzw. raueste Signal normiert

Es ist deutlich zu erkennen, dass die beiden Kurven für tonhaltig (rote Kurve) und rau (grüne Kurve) gegenläufig und nahezu monoton sind. Das bedeutet, dass eine Verringerung der subjektiven Tonhaltigkeit mit einer Erhöhung der sub-

jektiven Rauigkeit einhergeht und umgekehrt. Allerdings sind die Abstände der Skalenwerte nicht gleich, insbesondere der symmetrische Lüfter ist erheblich tonhaltiger als alle anderen. Bei der Rauigkeit ergeben sich große subjektive Unterschiede zwischen Signal 1 und 2, zwischen Signal 4 und 5 und zwischen Signal 6 und 7.

Versuchsergebnisse für lästig

In Abbildung 2 sind die Skalenwerte der acht Signale für die Beurteilung nach lästig dargestellt.

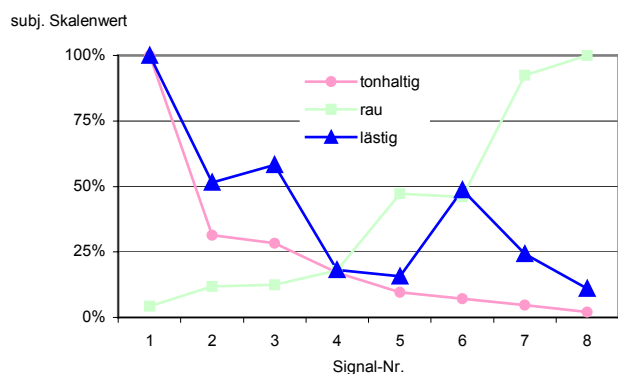


Abbildung 2: Subjektive Skalenwerte für die Beurteilung nach lastig (blau), tonhaltig (hellrot) und rau (hellgrün) für acht Lüftergeräusche. Die Skalenwerte sind jeweils auf das lästigste, tonhaltigste bzw. raueste Signal normiert

Zunächst ist festzustellen, dass die Kurve für die subjektive Lästigkeit (blau) weder monoton fallend noch monoton steigend ist, d.h. weder Tonhaltigkeit noch Rauigkeit sind allein für die Lästigkeit verantwortlich.

Als deutlich am lästigsten wird Signal 1 beurteilt, das auch mit Abstand das tonhaltigste ist. Am wenigsten lästig ist Signal Nr. 8, das subjektiv am rauesten und am wenigsten tonhaltig ist. Generell hat also die Tonhaltigkeit einen größeren Einfluss auf die Lästigkeit als die Rauigkeit.

Die Signale 2, 3 und 6, werden mit Skalenwerten um 50% als relativ lästig beurteilt, während die übrigen vier Signale nur Werte unterhalb von 25% erreichen.

Vergleich mit objektiven Messgrößen

Zunächst wird überprüft, wie gut sich die subjektiven Beurteilungen der Tonhaltigkeit und der Rauigkeit mit etablierten psychoakustischen Parametern vorhersagen lassen. Dazu werden die Tonhaltigkeit [tu] und die Rauigkeit [asper] mit der Software Artemis 7.0 berechnet. Zusätzlich wird die Rauigkeit [ru] mit der Software Exonox 1.1 bestimmt. Die normierten Messwerte sind in Abbildung 3 dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass die objektiven Messgrößen mit den subjektiven Ergebnissen in der groben Tendenz übereinstimmen, wobei allerdings die Monotonie der subjektiven Werte an einigen Stellen verletzt wird. Die Korrelationskoeffizienten betragen 0,78 (tu – tonhaltig), 0,73 (ru – rau) und 0,65 (asper – rau).

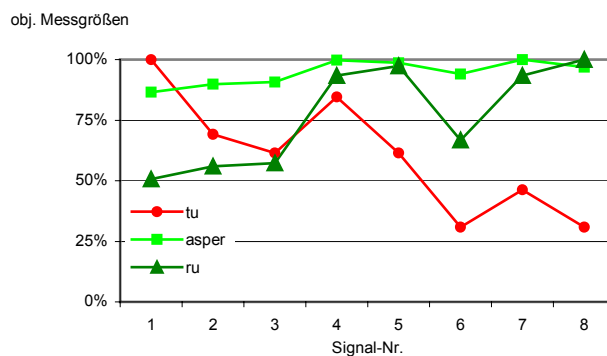


Abbildung 3: Objektive Messwerte für Tonhaltigkeit [tu] (rot) und Rauigkeit [asper] (hellgrün) bzw. [ru] (dunkelgrün). Die Skalenwerte sind jeweils auf den höchsten Messwert normiert

Besonders auffällig ist, dass Signal 6, welches als relativ lästig empfunden wird, vergleichsweise niedrige Rauigkeitswerte erreicht. Eine Modulationsanalyse dieses Signals zeigt, dass die dominierende Modulationsfrequenz hier bei nur etwa 30 Hz liegt, im Gegensatz zu etwa 60 Hz bei den Signalen 5 und 7.

Solche niedrigen Modulationsfrequenzen werden in den beiden Rauigkeitsmodellen nur schwach berücksichtigt, sie fallen in den Bereich einer „langsamen“ Rauigkeit, die als R-Rauigkeit oder Alfa-Rauigkeit bezeichnet wird.

Eine Bestimmung der Alfa-Rauigkeit mit der Software Exonox 1.1 zeigt, dass die Signale 6, 2 und 3 einen besonders hohen Anteil dieser Alfa-Rauigkeit besitzen. Dies sind genau die Signale, bei denen die empfundene Lästigkeit am stärksten von der subjektiven Tonhaltigkeit abweicht (siehe Abbildung 2). Ein hoher Alfa-Rauigkeitsanteil führt also bei vergleichbarer Tonhaltigkeit zu einer deutlichen Erhöhung der wahrgenommenen Lästigkeit, während der Einfluss der „schnellen“ Rauigkeit auf die Lästigkeit vergleichsweise gering ist.

Zusammenfassung

Durch die unsymmetrische Verteilung der Lüfterschaufeln lässt sich die Tonhaltigkeit der Geräusche von Kühlerlüftern verringern. Generell führt diese Verringerung der Tonhaltigkeit zu einer geringeren Lästigkeitswirkung. Bei gleicher subjektiver Tonhaltigkeit können jedoch große Unterschiede in der Lästigkeit auftreten.

Die bei vergleichbarer Tonhaltigkeit besonders lästig wirkenden Signale zeichnen sich dadurch aus, dass sie einen hohen Anteil an Alfa-Rauigkeit, also einer Rauigkeit mit niedrigen Modulationsfrequenzen, enthalten.

Literatur

- [1] Mellin, Sovran: Controlling the Tonal Characteristics of the Aerodynamic Noise Generated by Fan Rotors. Trans. ASME, J. Basic Eng. 92(1), 1970
- [2] J. Bortz, G.A. Lienert, K. Boehnke: Verteilungsfreie Methoden in der Biostatistik, Springer-Verlag 1990