Zur akustischen Bewertung des Schmetterns von Abgasanlagen

J. Krüger, F. Castor
Eberspächer GmbH & Co KG, 73730 Esslingen, Eberspächerstr. 24

Einleitung

Bei der Bewertung des Mündungsgeräuschs von Abgasanlagen geht es neben der Einhaltung bzw. Unterschreitung der von den Automobilherstellern vorgegebenen maximalen Schalldruckpegel zunehmend auch um die subjektiv angenehme Gestaltung des Geräusches. Bevor jedoch mit Hilfe des Sound Design gezielt auf einen bestimmten Klangeindruck (sportlich, kraftvoll, luxuriös) hingearbeitet werden kann, müssen alle eventuell vorhandenen störenden Geräuschkomponenten eliminiert werden [1]. Eine solche als unangenehm metallischer Klang empfundene Komponente tritt bei manchen Abgasanlagen in Form des "Schmetterns" (engl. rasp) insbesondere kurz nach dem Start des Motors und bei kalter Abgasanlage auf [2]. Die Ursache des Schmetterns liegt nach heutigem Kenntnisstand in der Ausbildung von Schockwellen insbesondere im Vorrohrbereich. Da das Schmettern nicht direkt meßtechnisch erfaßbar ist, weil z.B. der lineare und A-bewertete Schalldruckpegel nicht signifikant erhöht werden, findet bisher lediglich eine subjektive Bewertung durch Experten statt. Eine genaue meßtechnische Bewertung mit physikalischen bzw. psychoakustischen Deskriptoren hat demgegenüber jedoch deutliche Vorteile, da der Entwicklungsprozeß durch Vermeidung von Kommunikationsverlusten und eine objektivere Lösungsbewertung effizienter verlaufen kann. Es wurde daher untersucht, ob es mit Hilfe von Hörversuchen und dem Vergleich des subjektiven Höreindrucks mit gemessenen psychoakustischen Größen möglich ist, eine objektive Beschreibung für eine "Schmetterlästigkeit" (engl. rasp annoyance) zu finden.

Meßobjekt und Datenerfassung

Grundlage der Analyse waren Schalldruckpegel, die in einer Entfernung von 0.5 m unter 45 ° von der Mündung von insgesamt 17 verschiedenen Abgasanlagen in einem Freifeldraum aufgenommen wurden. Alle Abgasanlagen wurden am selben Triebwerk, einem 6-Zylinder-Benzin-Motor mit 3.0 Liter Hubraum, montiert und jeweils in kaltem und warmen Zustand während eines Hochlaufs unter Vollast gemessen. Da einige der Abgasanlagen nicht für diesen Motor entwickelt wurden, verursachen sie z.T. erhebliches Schmettern und dienen hier als "schlechtes" Beispiel. Das vorhandene Meßsystem erlaubt direkt am Prüfstand nicht nur die Auswertung des frequenzbewerteten Summenschalldruckpegels sondern auch der bekannten psychoakustischen Größen wie Lautheit N, Rauigkeit R, Schwankungsstärke F und Schärfe S [3].

Psychoakustische Bewertung

Die gemessenen Zeitverläufe des Schalldruckes wurden anschließend im Soundstudio der Firma Eberspächer einem Hörvergleich unterzogen (Bild 1). Insgesamt wurden für diesen Versuch 22 Personen aus dem Bereich Entwicklung Abgasanlagen ausgewählt (3 weiblich, 19 männlich), wovon sich 14 Personen noch nie mit der akustischen Bewertung von Abgasanlagen beschäftigt hatten, d.h. (14 nicht geschulte Hörer, 8 geschulte Hörer). Die Bewertung erfolgte nach einem in der Automobilindustrie üblichen Schlüssel von 1 (inakzeptabel schlecht) bis 10 (ausgezeichnet). Alle Klangbeispiele hatten eine Länge von etwa 20 s und wurde hintereinander mit einer Pause von ca. 2 s über Kopfhörer dargeboten.

Statistische Auswertung

Bild 2 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen von allen erhobenen Daten. Klar ersichtlich ist, warum dieses Geräuschphänomen häufig auch als Kaltschmettern bezeichnet wird: Im kalten Zustand schmettern fast alle Anlagen stärker als im warmgefahrenen. Zum Teil erreichen jedoch kalt stark schmetternde Anlagen im warmen Zustand durchaus akzeptable Bewertungen (z.B. 2, 13). In einem weiteren Schritt wurden nun Meßdaten von wenig und stark schmetternden Abgasanlagen empirisch auf signifikante Unterschiede im Schalldruckpegel sowie in den psychoakustischen Größen hin untersucht. Um mit den Beurteilungen vergleichbare Einzahlwerte zu erhalten, wurde jeweils die entsprechende Größe bei 3500 U/min und der Maximalwert betrachtet. Dabei zeigte es sich, daß Lautheit, Rauigkeit und der unbewertete Schalldruckpegel nicht und der mit einem Bandpaß von 4 bis 10 kHz gefilterte Schalldruckpegel sowie die Schärfe und Schwankungsstärke gut mit der subjektiven Beurteilung der Versuchspersonen korrelieren (Bild 3-5). Zur Einschätzung der Korrelation wurde eine lineare und eine exponentielle Regressionsanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse sind mit dem Bestimmtheitsmaß r^2 ebenfalls in den Diagrammen angegeben. Um die Korrelation weiter zu erhöhen, wurden abschließend alle 3 signifikanten Größen in Anlehnung an [3] in einer Schmetterlästigkeit (SL) wie folgt zusammengefaßt:

$$SL = g_1 L_{P(A)} \left(1 + \sqrt{g_2 [S]^2 + [g_3 (F)]^2}\right)$$

Die Optimierung der Gewichtsfaktoren g_1 bis g_3 ergab das in Bild 6 dargestellte Diagramm mit den Bestimmtheitsmaßen r^2_{lin}=0.90 und r^2_{exp}=0.93. Infolge der recht hohen Korrelation ist es nun möglich, die Stärke des Schmetterns schon am Prüfstand mit ausreichender Zuverlässigkeit zu bestimmen und somit die akustische Qualität einer Abgasanlage einfach und objektiv einzuschätzen. Weitere grundlegende Arbeiten werden sich mit Hilfe dieses Verfahrens der genauen Ursachenermittlung und daraus folgend der Ableitung von Konstruktionshinweisen zur Vermeidung des Schmetterns widmen.

Literatur

[1] Genuit, E.; Blutner, F.; et al: Störgeräusch. Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. Vorhaben-Nr. 720, Heft 715, Frankfurt/M. (2001).

[2] Nirei, Y.; Konomi, T.; Nohira, H.: Study on abnormal exhaust noise caused by shock wave and its improvement. Toyota Technical Review Vol. 41 No. 1 (1991).

[3] Zwicker, E.; Fastl, H.: Psychoacoustics: Facts and Models. Springer-Verlag Berlin, 2nd Ed. (1999).

Bild 1: Hörvergleich im Soundstudio von Eberspächer

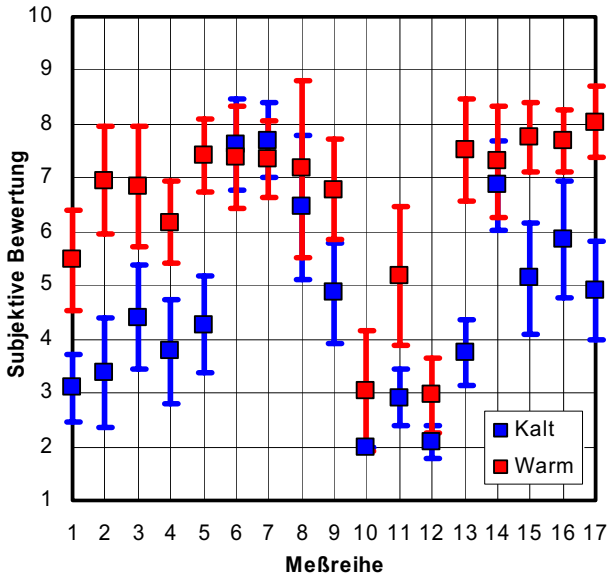

Bild 2: Mittelwerte und Standardabweichungen der subjektiven Beurteilung von 17 Abgasklängen durch 22 Versuchspersonen

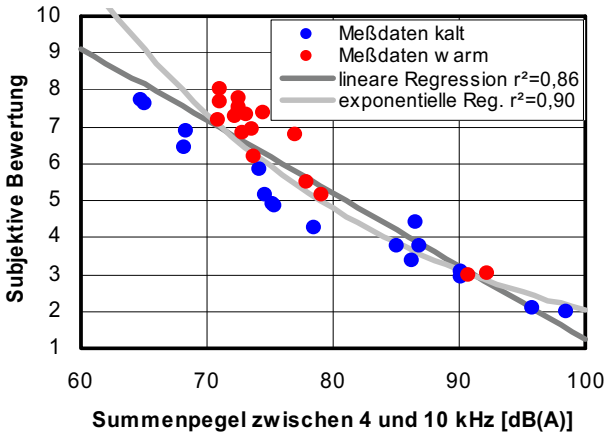

Bild 3: Korrelation zwischen dem gefilterten Summenpegel bei 3500 U/min und der subjektiven Beurteilung sowie zwei Regressionen

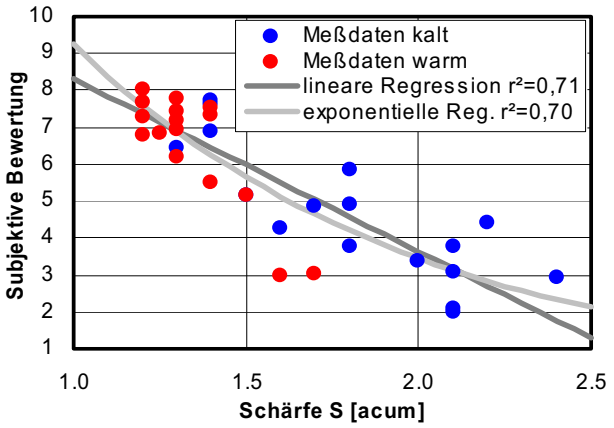

Bild 4: Korrelation zwischen der Schärfe bei 3500 U/min und der subjektiven Beurteilung sowie zwei Regressionen

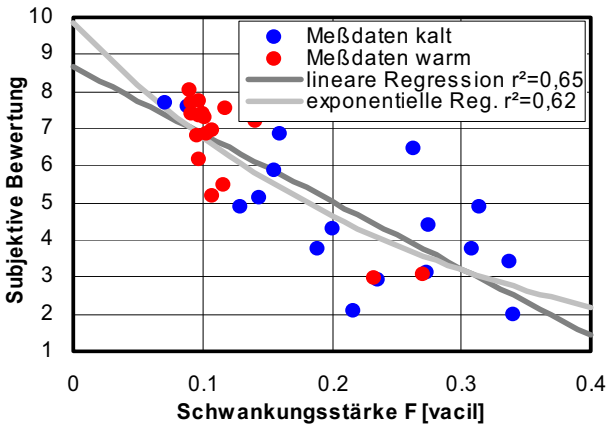

Bild 5: Korrelation zwischen der maximalen Schwankungsstärke über allen Drehzahlen und der subjektiven Beurteilung sowie zwei Regressionen

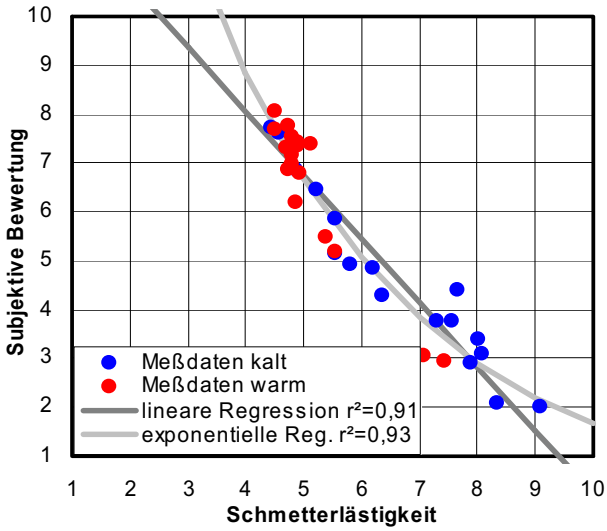

Bild 6: Korrelation zwischen der Schmetterlästigkeit und der subjektiven Beurteilung sowie zwei Regressionen