

AUTOREN



**Christian Schumann,
M. Sc.**

ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen (VKA) an der RWTH Aachen University.



Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger

ist Leiter des Lehrstuhls für Verbrennungskraftmaschinen (VKA) an der RWTH Aachen University.



Dr.-Ing. Michael Fischer

ist Leiter des Kompetenzzentrums Geräusch im Bereich Powertrain im Bereich Powertrain Solutions der Robert Bosch GmbH in Schwieberdingen.



Dr.-Ing. Marco Günther

ist Oberingenieur am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen (VKA) an der RWTH Aachen University.

Zuordnung und Bewertung von Motorgeräuschkomponenten

Die wahrgenommene Geräuschqualität von Verbrennungsmotoren wird maßgeblich durch das Auftreten und die Ausprägung einzelner Störgeräuschkomponenten beeinflusst. Am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen der RWTH Aachen University wurde im Rahmen eines FVV-Forschungsvorhabens eine Methodik entwickelt, die es erlaubt, aus einem Motorgesamtgeräusch einzeln anhörbare Motorkomponentengeräusche zu extrahieren und die Geräuschbelastigung durch diese Komponenten automatisiert zu quantifizieren. Darüber hinaus bietet die Methodik die Möglichkeit, aus den getrennten Geräuschkomponenten zur Zielwertdefinition ein neugewichtetes Motorgesamtgeräusch zu synthetisieren.



© RWTH Aachen University

1	MOTIVATION
2	HERANGEHENSWEISE
3	TONALE MERKMALE
4	IMPULSHALTIGE MERKMALE
5	EXTRAKTION UND KLASSIFIKATION TONAL AUFFÄLLIGER GERÄUSCHEFFEKTE
6	EXTRAKTION UND KLASSIFIKATION IMPULSHALTIG AUFFÄLLIGER GERÄUSCHEFFEKTE
7	ERSTELLUNG DER KLASSIFIKATOREN
8	ZUSAMMENFASSUNG

1 MOTIVATION

Beim Kauf eines Pkw wird die Wahl des Kunden neben objektiven Kriterien zunehmend durch den Qualitätseindruck des Fahrzeugs beeinflusst. Dabei nimmt die wahrgenommene Geräuschqualität des Antriebsstrangs eine Schlüsselrolle ein. Negativ beeinflusst wird diese maßgeblich durch das Auftreten und die Ausprägung einzelner Störgeräusche, die es im Rahmen der Fahrzeugentwicklung zu optimieren gilt. Dabei sind die Identifikation störender Geräuschanteile im Motorgesamtgeräusch und die Zuordnung dieser zu verursachenden Bauteilen oder Prozessen Voraussetzungen für eine effektive Akustikoptimierung.

Im Rahmen eines FVV-Forschungsvorhabens wurde eine Methode zur softwaregestützten Analyse und Bewertung der Geräuschqualität von Motorgeräuschkomponenten entwickelt. Mittels dieser ist es möglich, automatisch Geräuschursachen an Verbrennungsmotoren zu identifizieren und Verbesserungspotenziale zu bewerten. Herkömmliche Bewertungsverfahren stoßen aufgrund der Querbeeinflussung von Motorgeräuschkomponenten an ihre Grenzen [1]. So können subjektiv Bewertungen von impulshaltigen Geräuschen, wie zum Beispiel von einem Injektor, durch tonale Geräuschanteile beispielsweise eines Abgasturboladers negativ beeinflusst werden. Deshalb baut dieses Forschungsvorhaben auf Methodiken zur Extraktion tonaler sowie impulshaltiger Störgeräusche auf, die in den Forschungsvorhaben Objektivierung subjektiver Beurteilungen II (OSB II) und Motorgeräuschkomponenten (MGK) entwickelt wurden [1, 2].

Entscheidende Neuerung ist, dass die Störgeräusche anschließend wieder gruppiert werden, sodass einzelne Motorgeräuschkomponenten, wie zum Beispiel die einer Hochdruckpumpe oder eines Abgasturboladers, hörbar sind und die Lästigkeit bewertet wird. Die Methodiken zur Lästigkeitsbewertung konnten aus OSB II und MGK übernommen werden. Eine weitere Neuerung ist die automatische Zuordnung der gruppierten Geräusche zu den emittierenden Motor­komponenten beziehungsweise -prozessen. Darauf aufbauend erlaubt die objektive Beurteilung der Lästigkeit einzelner Motor­komponenten und -prozesse die effektive Evaluation von akustischen Optimierungsmaßnahmen. Zusätzlich ist es möglich, ein neues Zielgeräusch mittels neugewichteter Überlagerung der Motorgeräuschkomponenten zu definieren und so subjektiv den tatsächlichen Grad der benötigten Akustikoptimierung zu quantifizieren.

2 HERANGEHENSWEISE

Beginnend mit einer Zerlegung der monauralen Schalldruckmessung mit anschließender Gruppierung in Motorgeräuschkomponenten, werden ausgewählte Merkmale berechnet und durch einen Klas-

TABELLE 1 Untersuchte Motorkomponenten (© RWTH Aachen University)

Impulshaltig	Tonal	
Verbrennung	Hochdruckpumpe (HDP)	Turbolader
Injektor	Ventile	Lichtmaschine
Wastegate	Getriebe	Ölpumpe
Kolbensschlag	–	Steuertrieb
–	–	Getriebe

sifikator von Motorkomponente beziehungsweise -prozess zugeordnet. Dafür müssen zuerst eine Geräuschdatenbank mit ausgewählten Motorgeräuschkomponenten erstellt und charakteristische Merkmale definiert werden. Anschließend wird ein geeigneter Klassifikator ausgewählt und trainiert.

Zu Beginn des Forschungsvorhabens wurden zu untersuchende Motorkomponenten ausgesucht, TABELLE 1. Die Motorkomponenten werden auf Basis der auffälligen Geräusche in die Geräuschgruppen impulshaltig und tonal aufgeteilt. Die im Umfang dieser Forschungsarbeit erstellte Datenbank beruht auf Komponentenmessungen sowie auf Prüfstandsmessungen.

3 TONALE MERKMALE

Zur Klassifikation tonaler Geräusche, deren Mittenfrequenz proportional zur Motordrehzahl ist, wurde im Umfang dieser Arbeit eine Erhebung von Übersetzungsverhältnissen für die Lichtmaschine und Ölpumpe durchgeführt. Die Auswertung der Erhebung ergibt, dass das Übersetzungsverhältnis der Ölpumpe typischerweise nahe eins und das der Lichtmaschine typischerweise zwischen zwei und drei liegt. Die Abgrenzung des Wertebereichs zeigt, dass sich das Übersetzungsverhältnis als Charakteristikum zur Trennung der ersten Harmonischen eignet. Zusätzliche Untersuchungen haben gezeigt, dass das Bestimmtheitsmaß der linearen Regression des Schalldruckpegels über der logarithmischen Drehzahl genutzt werden kann, um auch die zweite Harmonische des Ölpumpengeräusches von der ersten Harmonischen des Lichtmaschinengeräusches zu trennen. In Abgrenzung zum Steuertrieb sind die tonal auffälligen Motorordnungen der Lichtmaschinengeräusche und des Ölpumpengeräusches typischerweise nicht ganzzahlig. Konstruktiv bedingt ist die Anregungsordnung des Antriebsritzels eines Steuertriebs immer ganzzahlig und typischerweise in einem Wertebereich zwischen 19. und 24. Motorordnung. Somit kann die berechnete Motorordnung als Charakteristikum mit aufgenommen werden. Im Umfang dieser Arbeit wird unter tonalen Geräuschen mit motordrehzahlunabhängiger Mittenfrequenz ausschließlich der Abgasturbolader betrachtet.

4 IMPULSHALTIGE MERKMALE

Bekanntermaßen ist die Ausprägung des Frequenzspektrums charakteristisch für eine Motorkomponente. Folglich wurde eine Methode entwickelt, um die charakteristischen Bereiche im gemittelten Amplitudenspektrum zu detektieren. BILD 1 zeigt die Anwendung der Methode am Amplitudenspektrum eines Injektor- und eines Ventilgeräusches. Das Amplitudenspektrum wird durch einen globalen Frequenzschwerpunkt sowie lokale Frequenzschwerpunkte mit zugehöriger Breite charakterisiert. Der globale Frequenzschwer-

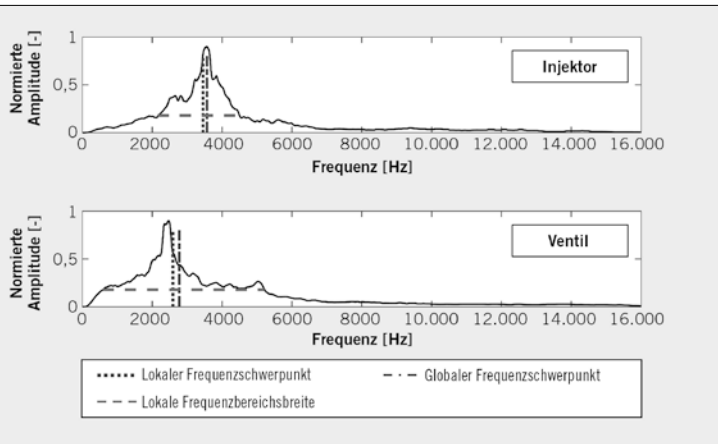


BILD 1 Detektion von charakteristischen Frequenzbereichen im Amplitudenspektrum (© RWTH Aachen University)

5 EXTRAKTION UND KLASSIFIKATION TONAL AUFFÄLLIGER GERÄUSCHEFFEKTE

Die in [1] entwickelte Methodik zur Detektion tonaler Geräuschteile beruht auf der Reduktion des Kurzzeitspektrums auf ein Binärbild. Dabei werden tonale Geräusche detektiert, indem die Energie des zu untersuchenden Frequenzbereichs auf die Energie der entsprechenden Terz bezogen wird. Das entstehende Tonalitätsspektrum wird durch die Anwendung eines Schwellwerts zu einem Binärbild, der Tonalitätsmaske, umgewandelt. Zur Extraktion der tonalen Geräusche werden anschließend Bildverarbeitungsalgorithmen verwendet. Die Bildverarbeitung erlaubt es, die tonalen Komponenten als geschlossene Linienstrukturen im Bild zu erkennen. Nach erfolgter Störsignalentfernung werden die tonalen Geräuschkomponenten abhängig von der Proportionalität der Mittenfrequenz zur Kurbelwellendrehzahl in motordrehzahlabhängig beziehungsweise -unabhängig aufgeteilt, **BILD 3**.

6 EXTRAKTION UND KLASSIFIKATION IMPULSHALTIG AUFFÄLLIGER GERÄUSCHEFFEKTE

Zur Detektion impulshaltiger Motorgeräuschkomponenten wird die Nichtnegative Matrixfaktorisierung (NNMF) gekoppelt mit dem k-Means-Algorithmus verwendet. Die NNMF, angewendet auf das Betragsspektrum des Kurzzeitspektrums, ermittelt wiederkehrende Frequenzmuster und generiert daraus Teilgeräusche. Diese werden anschließend mit dem k-Means-Algorithmus anhand der zeitlichen Korrelation der Einhüllenden zu Motorgeräuschkomponenten gruppiert. Der als Maximierungsproblem modellierte Algorithmus berechnet automatisch in Abhängigkeit des Silhouettenkoeffizienten die Anzahl der Motorgeräuschkomponenten. **BILD 4** zeigt die Anwendung der Methodik. In dem Kurzzeitspektrum sind eine Hochdruckpumpe und ein Injektor erkennbar. Wichtige Ergänzung ist, dass der Algorithmus selbstständig die Trennungsgüte überprüft und im Fall einer unzureichenden Trennung die Nichtnegative Matrixfaktor Dekonvolution (NNMFD) nachschaltet. Dies kann prinzipbedingt vorkommen, wenn die im Luftschallsignal enthaltenen Motorkomponenten eine hohe Ähnlichkeit des Frequenzspektrums aufweisen. Mittels der NNMFD werden dann direkt impulsartige Motorgeräuschkomponenten aus dem Gesamtgeräusch getrennt, **BILD 5**.

7 ERSTELLUNG DER KLASSIFIKATOREN

Eine bedeutsame wissenschaftliche Neuerung neben der automatisierten Extraktion von Motorgeräuschkomponenten ist die automatisierte Zuordnung zu den entsprechenden Motorkomponenten. Aufgrund der geringen Anzahl an Trainingsdaten für tonale Störgeräusche wurde ein linearer Entscheidungsbaum als Klassifikator entworfen. Entsprechend den herausgearbeiteten Merkmalen werden zur Klassifizierung der kurbelwellendrehzahlabhängigen tonalen Geräuschphänomene die berechnete Motorordnung und das abgeschätzte Übersetzungsverhältnis zur direkten Klassifizierung verwendet. Da die Berechnung des Übersetzungsverhältnisses keine eindeutige Zuordnung zulässt, werden zusätzlich die Häufigkeitsverteilung des Übersetzungsverhältnisses sowie das Bestimmtheitsmaß der Pegelregression als Bewertungsmaß der Güte zur Klassifikation genutzt. Dementsprechend wird das Ergebnis der Zuweisung mit einer Wahrscheinlichkeit versehen. Der Entscheidungsbaum für die Geräuschphänomene des Abgasturboladers gliedert entsprechend die Frequenzbereiche [3]. Zur Klassifikation impulsaltiger

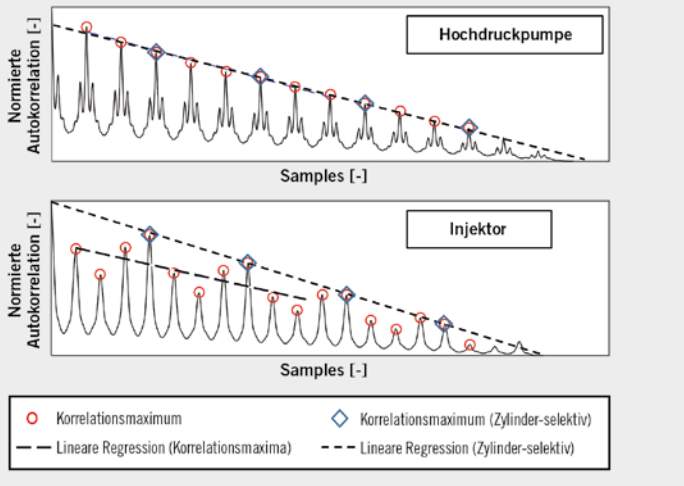


BILD 2 Autokorrelationsfunktion der Einhüllenden eines Luftschallsignals (© RWTH Aachen University)

punkt bewertet die Energieverteilung. Die lokalen Frequenzschwerpunkte beschreiben herausstechende Einzelbereiche. Auf diese Weise kann mittels der entwickelten Methodik die breitbandige Frequenzausprägung des Ventiltickerns oder die schmalbandige Frequenzanregung des Injektors durch die lokale Frequenzbereichsbreite quantifiziert werden.

Im Umfang dieser Arbeit wurde zusätzlich gezeigt, dass mittels der Autokorrelationsfunktion der Einhüllenden des Schalldrucks die Ortsabhängigkeit der Schallentstehung einer Geräuschkomponente stabil erfasst werden kann. **BILD 2** zeigt die Autokorrelationsfunktion für das Geräusch einer Hochdruckpumpe im Vergleich zum Injektorgeräusch eines Vierzylindermotors. Deutlich zu erkennen ist, dass die Korrelationsmaxima für die Autokorrelationsfunktion der Hochdruckpumpe linear mit der Zeit abfallen. Hingegen zeigt die Autokorrelationsfunktion für den Injektor die orts- sowie komponentenabhängige Schallabstrahlung. Bewertet wird dies durch die Quadratsumme aller Fehler bei der Linearisierung aller Korrelationsmaxima. Weitere Merkmale, die zur Klassifikation herangezogen werden, wurden durch eine Optimierung der Klassifikationsgüte ermittelt.

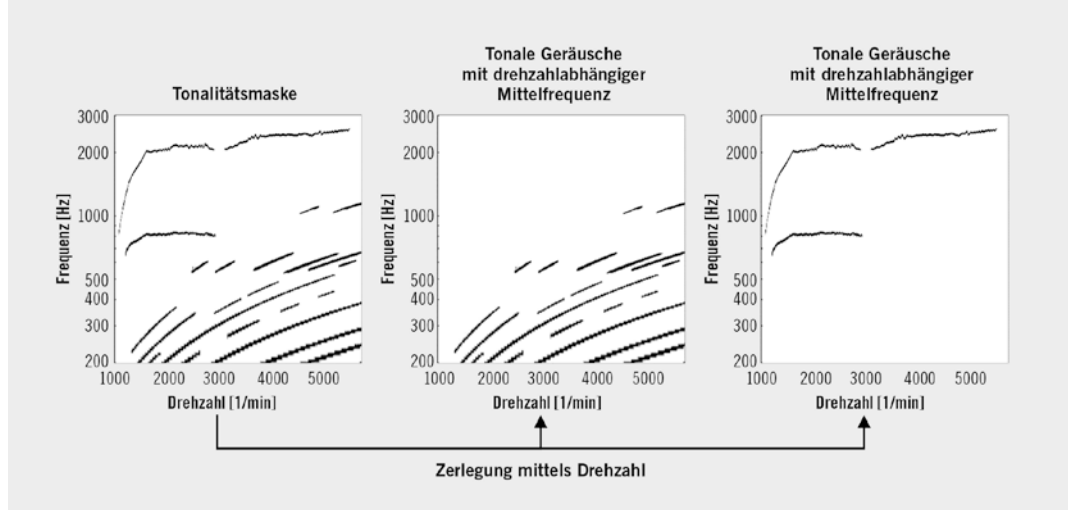


BILD 3 Aufteilung tonaler Störgeräusche (© RWTH Aachen University)

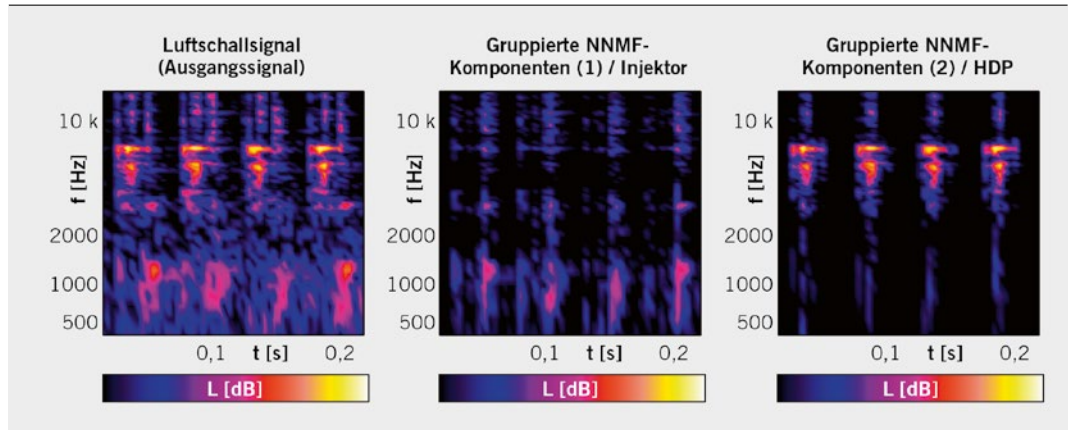


BILD 4 Geräuschextraktion impulsaltiger Störgeräusche (© RWTH Aachen University)

Motorgeräuschkomponenten wurde ein Naive-Bayes-Klassifikator trainiert. Die erreichte Klassifikationsgüte beträgt 81 %. Der Vorteil des Klassifikators ist, dass dieser Wahrscheinlichkeiten für die Zuweisung angibt und im Zweifel der Anwender die Ergebnisse weiter auswerten kann [4]. Für individuelle Anwendungen ermöglicht der entwickelte Methodenträger zudem eine Erweiterung der Datenbank sowie das Trainieren des Naive-Bayes-Klassifikators.

8 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des FVV-Projekts Motorgeräuschkomponenten II wurde eine Methodik entwickelt, die es ermöglicht, ein Motorgesamtgeräusch automatisiert in einzeln anhörbare Motorgeräuschkomponenten zu zerlegen und automatisiert den emittierenden Motorkomponenten (zum Beispiel Injektor oder Abgasturbolader) beziehungsweise -prozessen (Verbrennung) zuzuordnen. Kombiniert mit der automatisierten Berechnung der Lästigkeit können akustische Opti-

mierungsmaßnahmen effektiv evaluiert werden. Zudem kann durch die Synthese eines neu gewichteten Zielgeräuschs der Grad der benötigten Akustikoptimierung quantifiziert werden.

LITERATURHINWEISE

- [1] Selle, A.: Motorgeräuschkomponenten. FVV, Frankfurt, 2014
- [2] Atzler, M.: Objektivierung subjektiver Beurteilungen II. FVV, Frankfurt, 2011
- [3] Aymanns, R.: Turbo Charger Noise. Frankfurt: FVV, 2008.
- [4] Runkler, T. A.: Data Mining. München: Springer Vieweg, 2015

DANKE

Dieser Bericht ist das wissenschaftliche Ergebnis einer Forschungsaufgabe, die von der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V. (FVV) unter der Nummer 1207 gestellt und am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen der RWTH Aachen University unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger bearbeitet wurde. Die Arbeit wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e. V. (AiF-Nr. 18834 N/1) finanziell gefördert. Die FVV dankt Prof. Pischinger und dem wissenschaftlichen Bearbeiter, Christian Schumann, M. Sc., für die Durchführung des Vorhabens sowie dem BMWi und der AiF für die finanzielle Förderung. Das Vorhaben wurde von einem Arbeitskreis der FVV unter der Leitung von Dr. Michael Fischer, Robert Bosch GmbH, begleitet. Diesem Arbeitskreis gebührt der Dank der FVV für die große Unterstützung.

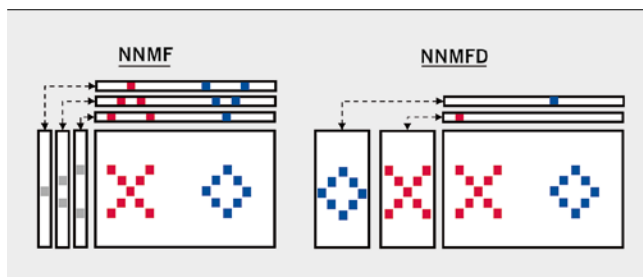


BILD 5 NNMF und NNMF-D (© RWTH Aachen University)



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge: www.mtz-worldwide.com