

Psychoakustische Bewertung von Motorgeräuschen unter Nutzung auralisierter numerischer Simulationsergebnisse

Fabian Duvigneau¹, Steffen Liefold², Marius Höchstetter³, Jesko L. Verhey⁴, Ulrich Gabbert⁵

¹ *Institut für Mechanik, Otto-von-Guericke Universität, 39106 Magdeburg, E-Mail: fabian.duvigneau@ovgu.de*

² *Institut für Mechanik, Otto-von-Guericke Universität, 39106 Magdeburg, E-Mail: steffen.liefold@ovgu.de*

³ *BMW AG, 80937 München, E-Mail: Marius.Hoehstetter@bmw.de*

⁴ *Abteilung für experimentelle Audiologie, Otto-von-Guericke Universität, Magdeburg, E-Mail: jesko.verhey@med.ovgu.de*

⁵ *Institut für Mechanik, Otto-von-Guericke Universität, 39106 Magdeburg, E-Mail: ulrich.gabbert@ovgu.de*

Einleitung

Ziel dieses Beitrags ist die Entwicklung eines Vorhersagemodells der empfundenen Geräuschqualität von Motorgeräuschen. Dieses Vorhersagemodell wird mittels Korrelationsanalysen der in Hörversuchen ermittelten Geräuschqualität von Motorgeräuschen und klassischen psychoakustischen Größen ermittelt. Die Besonderheit des hier verfolgten Ansatzes ist, dass für die Hörversuche und die Signalanalyse keine experimentell ermittelten Geräusche bzw. Zeitsignale verwendet werden, sondern auralisierte Simulationsergebnisse zum Einsatz kommen. Diese Vorgehensweise ist schon in einer sehr frühen Phase des Entwicklungsprozesses möglich. Sie hat den immensen Vorteil, dass keinerlei Hardware in Form von Prototypen vorhanden sein muss, um Modifikationen am Motor hinsichtlich akustischer Auswirkungen auf den Menschen bewerten zu können. Somit eignet sich das vorgestellte Konzept für eine rein virtuelle akustische Optimierung, die in der Lage ist, die resultierende akustische Wirkung des Motorgeräusches auf den Menschen in die Optimierung zu integrieren. In diesem Beitrag wird der Entwicklungsprozess des Vorhersagemodells am Beispiel verschiedener Motorkapselungen demonstriert.

Modellbildung

In Abbildung 1 ist der gesamte Virtual Engineering Prozess dargestellt, der zur Entwicklung eines psychoakustischen Modells auf Basis auralisierter numerischer Simulationsergebnisse notwendig ist. Mit diesem Modell kann anschließend die vom Menschen empfundene Geräuschqualität von Motorgeräuschen vorhergesagt werden. Am Anfang der Simulationskette steht eine elastische Mehrkörpersystem-Simulation (MKS-Simulation), welche die Anregung für die Schwingungsanalyse des Motors liefert. Im Anschluss wird die Schallabstrahlung in die Umgebungsluft berechnet. Die Schwingungsanalyse und die Akustiksimulation werden mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) durchgeführt. Eine Signalverarbeitung bildet den Abschluss, um die numerisch generierten Zeitsignale zu gewinnen. Diese Zeitsignale werden für Probandenversuche hörbar gemacht und hinsichtlich ihrer auditiven Geräuschqualität näher untersucht. Die davon abgeleiteten psychoakustischen Parameter definieren schließlich die gewünschte Zielfunktion [1].

Numerische Simulation

Es wird nach [2] ein ganzheitlicher Virtual Engineering Ansatz verwendet, um die notwendigen Zeitsignale des Motorgeräusches zu gewinnen. Zunächst werden die dynamischen Anregungen der Grundlager und der Zylinderwände des Verbrennungsmotors ermittelt. Dazu kommt eine elastische Mehrkörpersimulation zum Einsatz, in der der hydrodynamische Schmierfilm und der Festkörperkontakt zwischen Kolben und Zylinder berücksichtigt wird [3]. Im MKS-Modell werden ausschließlich die Kontaktpartner Kolben und Zylinder als elastische Körper integriert. Somit ist es möglich, lokale Deformationen abzubilden, welche aus dem EHD-Kontakt resultieren. Die so generierten Kräfte werden als Anregungen für die nachfolgende Schwingungsanalyse des Motors verwendet. Diese wird aufgrund des geringeren Rechenaufwands im Frequenzbereich durchgeführt. Die maximale zulässige Elementkantenlänge der FE-Modelle für die Schwingungsanalyse und die Akustiksimulation ist dabei neben den üblichen Qualitätskriterien durch die Wellenlängen der maximal zu berechnenden Frequenzen limitiert.

Das Ziel der FE-Schwingungsanalyse des gekapselten Verbrennungsmotors ist es, die Oberflächenschnellen der Struktur zu gewinnen. Diese dienen in der anschließenden FE-Akustiksimulation als Anregung des umgebenden Fluidvolumens (siehe Abb. 1). Das Umgebungsluftvolumen ist wie in [5] als Kugel mit zur Peripherie größer werdenden Elementen modelliert (siehe Abb. 1). Die Rückwirkungen des sehr viel leichteren Umgebungsmediums auf die schwingende Struktur können vernachlässigt werden. Die Sommerfeldsche Abstrahlbedingung kann mit absorbierenden Randbedingungen [6], infiniten Elementen [7] oder der Perfectly Matched Layer Methode (PML) [8] erfüllt werden. Die Rechenzeit ist bei der Nutzung impedanzbasierter absorbierender Randbedingungen geringer, weil keine zusätzlichen Elemente oder Freiheitsgrade benötigt werden. Deshalb wird diese Art der Randbedingung hier bevorzugt.

Auralisierung

Als Ergebnis der FE-Akustiksimulation liegen die komplexen Schalldruckverläufe an allen Knoten des Fluidvolumens im Frequenzbereich vor. Durch Superposition harmonischer Funktionen kann aus den Simulationser-

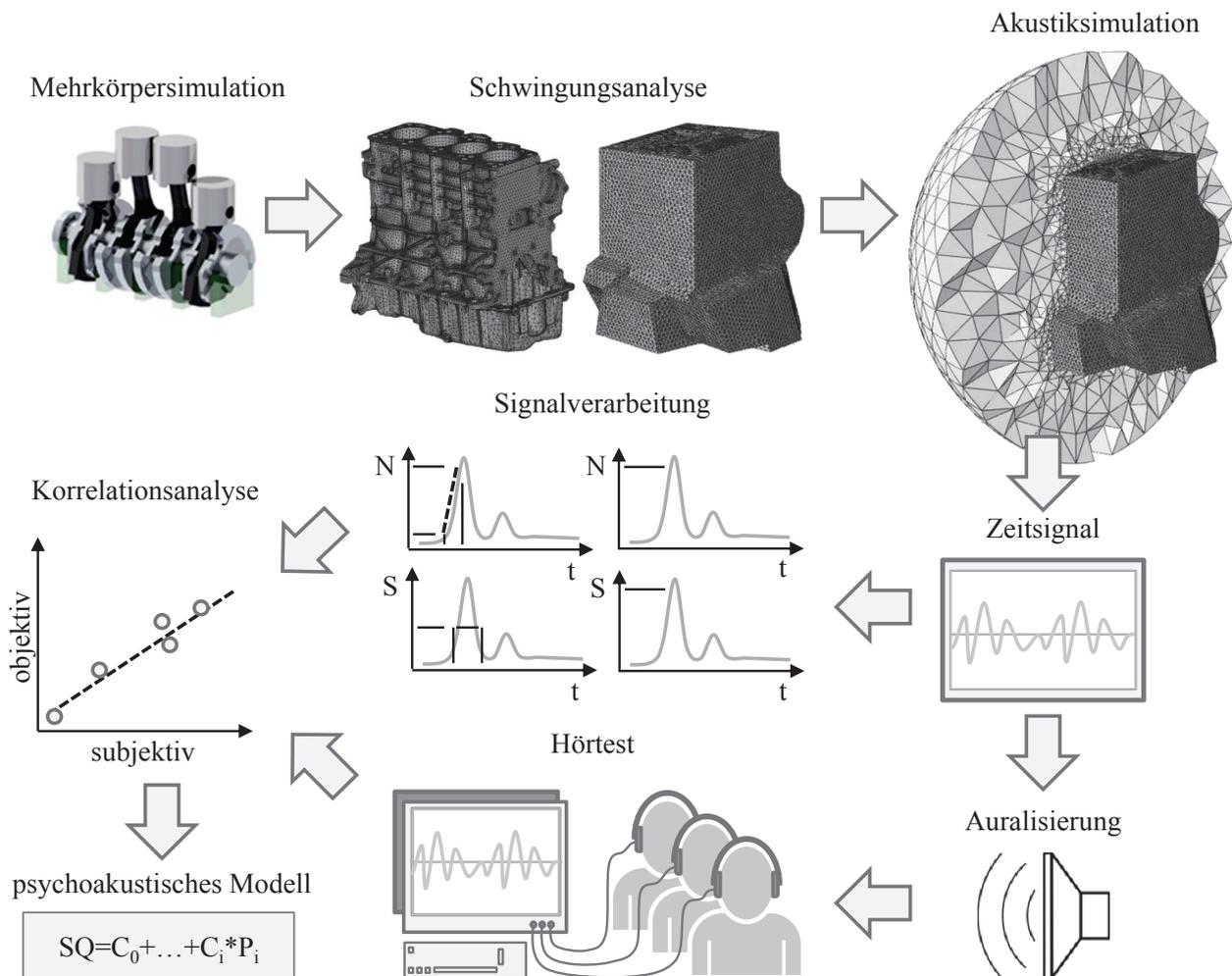


Abbildung 1: Aufbau des psychoakustischen Modells auf Basis auralisierter numerischer Simulationsergebnisse

gebissen das Zeitsignal gewonnen werden. Dazu wird pro berechneter Frequenz eine harmonische Funktion mit genau dieser Frequenz definiert und der Amplitude und der Phasenverschiebung versehen, die aus dem Real- und dem Imaginärteil des zugehörigen komplexen Schalldrucks berechnet werden können. Auf diesem Wege werden die Zeitsignale generiert, die nachfolgend einerseits als Hörproben im Hörversuch dienen und andererseits mit Hilfe der Signalverarbeitung hinsichtlich ihrer psychoakustischen Parameter analysiert werden.

Hörversuch

Die Hörversuche mit den generierten synthetischen Motorgeräuschen wurden in einem für Probandenversuche optimierten Akustiklabor durchgeführt, so dass zusätzlich zu akustischen Störeinflüssen auch anderweitige Ablenkungen, beispielsweise durch visuelle Reize, vermieden werden. Zur Wiedergabe der Motorgeräusche wurden STAX SR-202 Kopfhörer verwendet. Vor Versuchsbeginn wurden alle Probanden durch die gleiche schriftliche Einführung auf ihre Aufgabe vorbereitet. Im Anschluss wurden Beispielgeräusche präsentiert und alle bestehenden Fragen der Teilnehmer durch den Versuchsleiter beantwortet, bevor das eigentliche Experiment be-

gonnen wurde. Alle Hörversuche wurden nach dem Algorithmus von Ross [9] als Paarvergleiche durchgeführt. Insgesamt haben 15 Frauen zwischen 23 und 40 Jahren und 26 Männer zwischen 19 und 52 Jahren mit Normalhörigkeit nach Tonaudiogramm an den Hörversuchen teilgenommen. Dabei handelte es sich bei 14 Personen um Experten, die beruflich auf dem Gebiet der Akustik tätig sind und bei den restlichen 27 Personen um Laien, die weder beruflich noch privat explizit mit der Bewertung von akustischen Reizen zu tun haben.

Signalverarbeitung

Die aus der vorangegangenen Simulation gewonnenen synthetischen Motorgeräusche liegen als periodische Zeitsignale vor. Diese Signale werden zunächst entsprechend der geltenden DIN-Normen hinsichtlich ihrer psychoakustischen Grundgrößen (Lautheit, Schärfe, Tonhaltigkeit, Rauigkeit) analysiert. Außerdem werden Ableitungen dieser psychoakustischen Grundgrößen berechnet. Im nachfolgenden Schritt werden aus allen ermittelten objektiven Größen die Parameter herausgesucht, die am besten geeignet sind, um ein Vorhersagemodell der vom Menschen empfundenen Qualität von Motorgeräuschen aufzustellen.

Korrelationsanalyse

Die Korrelationsanalyse bildet den Abschluss des Entwicklungsprozesses des psychoakustischen Modells zur Vorhersage der Geräuschqualität von Motorgeräuschen. Die experimentellen Ergebnisse zur Geräuschqualität ergeben sich aus den durchgeführten Hörversuchen. Weiterhin ergeben sich aus der Signalverarbeitung des synthetischen Motorgeräusches alle psychoakustischen Grundgrößen und auch deren Ableitungen als objektive Parameter. Durch Sensitivitäts- und Korrelationsanalysen werden die objektiven Parameter bzw. deren Kombinationen bestimmt, die zur bestmöglichen Korrelation zwischen den Versuchsergebnissen und den Ergebnissen des psychoakustischen Modells führen. Für das psychoakustische Modell lassen sich sowohl eine beliebige Anzahl objektiver Parameter als auch beliebige mathematische Funktionen (nichtlineare Terme, Terme höherer Ordnung, gemischte Terme) nutzen. Allerdings hat sich im vorliegenden Beispiel gezeigt, dass bereits eine lineare Funktion mit drei ausgewählten objektiven Parametern ausreichend ist, um die Ergebnisse aus dem Hörversuch sehr gut zu reproduzieren. Die drei bestimmten Parameter sind in diesem Fall: (a) der maximale zeitliche Gradient der Lautheit, (b) die Dauer der Schärfe und (c) der Maximalwert der Schärfe. Auch in einer früheren Studie [10] wies eine lineare Funktion mit drei berücksichtigten objektiven Parametern eine sehr gute Korrelation zwischen Versuchsergebnissen und psychoakustischem Modell auf.

Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden exemplarisch einige Ergebnisse präsentiert, um die Anwendbarkeit des vorgestellten Virtual Engineering Ansatzes nachzuweisen.

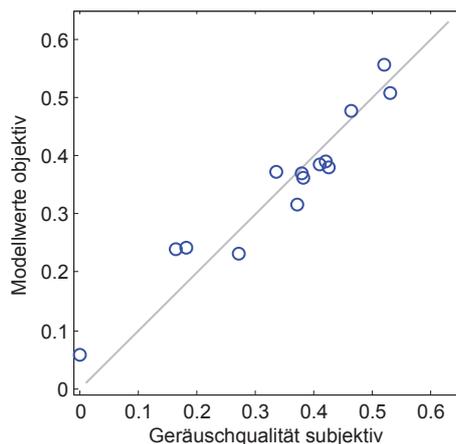


Abbildung 2: Korrelation der ermittelten Geräuschqualität des Modells und des Versuchs für 14 unabhängige Motorgeräusche

Damit das entwickelte objektive Vorhersagemodell für Bewertungen im virtuellen Entwicklungsprozess anwendbar ist, ist es notwendig, dass das Modell in der Lage ist, die empfundene Geräuschqualität von Motorgeräuschen vorherzusagen, die nicht Grundlage der Modellbildung

waren [1]. Zur Überprüfung dieser Fähigkeit wurde für 14 weitere synthetische Motorgeräusche der Vergleich zwischen einem zweiten Hörversuch und den Berechnungsergebnissen des psychoakustischen Modells durchgeführt. Das Resultat ist in Abbildung 2 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass das entwickelte psychoakustische Modell auch für die unabhängigen Motorgeräusche die empfundene Geräuschqualität sehr gut approximiert. Zudem liefert auch die quantitative Bestimmung der Korrelation den sehr guten Wert von 0,96.

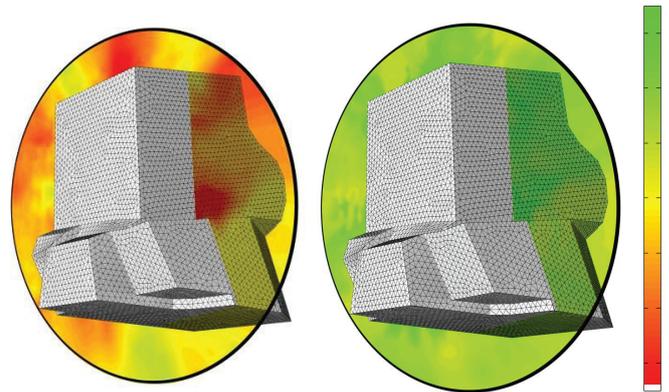


Abbildung 3: Vergleich der Geräuschqualität zwei verschiedener Motorkapselungen eines Verbrennungsmotors

Mit Hilfe des entwickelten psychoakustischen Modells kann natürlich auch die räumliche Verteilung der empfundenen Geräuschqualität berechnet werden. In Abbildung 3 ist die Verteilung der berechneten Geräuschqualität für zwei verschiedene Vollkapselungen des gleichen Verbrennungsmotors in einer mittleren Schnittebene durch das kugelförmige Volumen der Umgebungsluft dargestellt. Beide Motorkapselungen sind zweischichtige Materialsysteme aus nichtmetallischen Schaum- und Faserwerkstoffen, die temperaturbeständig und leicht sind sowie eine sehr hohe Dämpfung aufweisen. Die beiden Vollkapselungen des Motors unterscheiden sich ausschließlich in den verwendeten Materialien und nicht in der Geometrie der Kapselung. Trotzdem führen sie zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen hinsichtlich der empfundenen Geräuschqualität (siehe Abb. 3). Die Ergebnisse in Abbildung 3 wurden bereits mit Hilfe des zweiten Hörversuchs verifiziert, da aus den beiden Konfigurationen generierte Zeitsignale als Hörproben für den zweiten Hörversuch verwendet worden sind. Demzufolge kann der vorgestellte Ansatz einerseits verwendet werden, um aus verschiedenen Designkonfigurationen diejenige auszuwählen, die die bessere akustische Wirkung aufweist und andererseits eine Designkonfiguration gezielt bezüglich einer bestimmten Abstrahlrichtung o.ä. zu verbessern.

In der Abbildung 4 wird die Lautheit nach DIN 45631/A1 der empfundenen Geräuschqualität gegenübergestellt, deren Verteilung mit Hilfe des erstellten psychoakustischen Modells berechnet wurde. Dieser Vergleich unterstreicht, dass es für eine akustische Bewertung nicht ausreichend ist, lediglich die Lautheit bzw. einzelne psy-

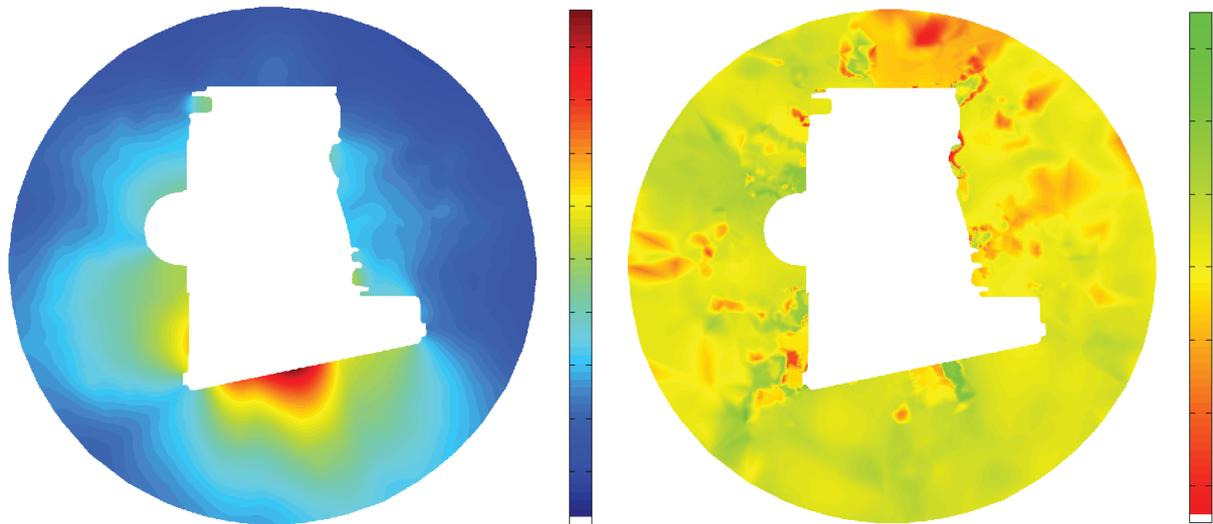


Abbildung 4: Die Verteilung der Lautheit (links) und der Geräuschqualität (rechts) eines Verbrennungsmotors

choakustische Grundgrößen auszuwerten. Die Abbildung 4 zeigt ganz klar, dass die Berücksichtigung komplexerer psychoakustischer Modelle zu völlig anderen Ergebnissen führt. Außerdem stimmen die Ergebnisse der komplexeren Modelle sehr gut mit der von den Probanden empfundenen akustischen Wirkung überein (siehe Abb. 2). Demzufolge sollte immer auf komplexere psychoakustische Modelle, die mehrere objektive Parameter und deren Wechselwirkungen berücksichtigen, zurückgegriffen werden.

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde die Entwicklung eines Vorhersagemodells der empfundenen Geräuschqualität von Motorgeräuschen auf Basis auralisierter Simulationsergebnisse präsentiert (siehe [1]). Die entwickelten objektiven Vorhersagemodelle zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen aus Hörversuchen. Mit Hilfe eines weiteren Hörversuchs mit anderen Motorgeräuschen wurde außerdem gezeigt, dass die aufgestellten psychoakustischen Modelle auch in der Lage sind, die empfundene Geräuschqualität von Motorgeräuschen sehr gut vorherzusagen, die nicht Bestandteil des Entwicklungsprozesses des Vorhersagemodells waren. Somit ist der hier vorgestellte Virtual Engineering Ansatz sehr gut für computergestützte akustische Optimierungen geeignet. Dazu sind keine real vorhandenen Prototypen oder Motoren erforderlich. Hörversuche mit Hilfe auralisierter Simulationsergebnisse sind ebenfalls nicht mehr notwendig, wenn das Modell einmal geeignet generiert wurde. Außerdem ist es natürlich möglich, entsprechende Vorhersagemodelle genau an die entsprechende Zielgruppe bzw. Zieldefinition anzupassen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die gewährte finanzielle Förderung im Rahmen des Verbundprojektes „Competence in MObility – Automotive“, welches mit Geldern des Europäischen Strukturfonds gefördert wird.

Literatur

- [1] Liefold, S.; Duvigneau, F.; Höchstetter, M.: Geräuschqualität von Motorkapselungen. ATZ 06/2015.
- [2] Liefold, S.; Duvigneau, F.; Gabbert, U.: Advanced methods for auralization of virtual models in engineering processes. 17. IFF-Wissenschaftstage, ISSN 2196-7598, 2014, 187-195.
- [3] Duvigneau, F.; Nitzschke, S.; Strackeljan, J.; Gabbert, U.: Ganzheitlicher Virtual Engineering Ansatz zur Schwingungs- und Akustiksimulation eines Verbrennungsmotors. 11th International Conference: Vibrations in rotating machines, 2015.
- [4] Daniel, C.; Woschke, E.; Strackeljan, J.: Modellierung von Gleitlagern in rotordynamischen Modellen. 8th SIRM, 2009, Paper-ID 33.
- [5] Duvigneau, F.; Gabbert, U.: Numerical study of a thermo-acoustically encapsulation. 11th World Congress on Computational Mechanics, 2014.
- [6] Givoli, D.: Computational Absorbing Boundaries. In Computational Acoustics of Noise Propagation in Fluids, Marburg, S., Nolte, B., (Eds.), Springer-Verlag Berlin, 2008.
- [7] Burnett D.S.: A 3-D acoustic infinite element based on a prolate spheroidal multipole expansion. Journal of the ASA, 96 (5), 1994, 2798-2816.
- [8] Meiler, M.; Landes, H.; Kaltenbacher, M.: PML für vibroakustische Probleme im Frequenz- und Zeitbereich. Fortschritte der Akustik, 2010, 447-448.
- [9] Ross, R. T.: Scaling: A Sourcebook for Behavioral Statistics. Aldine Publishing Company, 1974.
- [10] Höchstetter, M.; Gabbert, U.; Verhey, J.L.; Rolle, M.: Physikalische und psychoakustische Vorhersage von singular impulshaften Geräusche. 8. Symposium: Motor- und Aggregateakustik, 2014.