

Messung der Schallcharakteristik einer Mikrogasturbine

Thomas Geyer¹, Ennes Sarradj¹, Christoph Rex², Sebastian Kießling², Alexander Neefe²

¹ Lehrstuhl Technische Akustik, BTU Cottbus-Senftenberg, 03046 Cottbus, Deutschland, Email: thomas.geyer@tu-cottbus.de

² Euro-K GmbH, Burger Chaussee 25, 03044 Cottbus, Email: service@euro-k.de

Einleitung

Vor dem Hintergrund der steigenden Nachfrage nach besonders energieeffizienten und leichten Kraftfahrzeugen ist die Verwendung von Mikrogasturbinen in einem seriellen Hybridantrieb ein sehr attraktives Konzept. Bei einem solchen Antrieb wird durch eine kontinuierlich laufende Mikrogasturbine ein Generator betrieben, der die Fahrenergie bereitstellt oder den Fahrakkumulator lädt. Im Gegensatz zu den üblicherweise zu diesem Zweck verwendeten Dieselmotoren bei einem dieselektrischen Antrieb bietet die Verwendung einer solchen Turbine eine Reihe von Vorteilen. Dazu zählen ein hohes Leistungsgewicht, eine niedrige Schadstoffemission, eine hohe Betriebszuverlässigkeit und damit verbunden geringe Wartungskosten, die Möglichkeit, verschiedene Brennstoffe zu verwenden sowie eine vergleichsweise geringe Schallentstehung. Ein weiterer, aus akustischer Sicht sehr interessanter Aspekt ist das typische Schalleistungsspektrum einer Mikrogasturbine, welches sich deutlich von dem eines Dieselmotors unterscheidet und entsprechend angepasste Lärminderungsmaßnahmen ermöglicht.

In diesem Paper werden die Ergebnisse akustischer Messungen an einer 70 kW-Mikrogasturbine vorgestellt, die für den Einsatz in Bussen mit seriellen Hybridantrieb vorgesehen ist. Die ermittelte Schalleistung wird der eines vergleichbaren Dieselmotors gegenübergestellt. Anschließend werden mögliche Ansätze zur Schallminderung vorgestellt.

Funktionsweise einer Mikrogasturbine

Die untersuchte Mikrogasturbine ist eine sogenannte Einwellenmaschine, bei der Generator, Verdichter und Turbine auf der gleichen Welle befestigt sind. Die grundsätzliche Funktionsweise einer solchen Mikrogasturbine lässt sich wie folgt zusammenfassen (siehe Bild 1): Der Verdichter (V) saugt (kalte) Luft durch die Lufteinlassöffnung ein und verdichtet sie. Die heiße, verdichtete Luft wird in der Brennkammer (B) mit Kraftstoff vermischt und verbrannt. Die bei der Verbrennung entstehenden Abgase treiben nun eine Turbine (T) an. Diese Turbine wiederum treibt, da sie auf der gleichen Welle sitzt, den Verdichter und den Generator (G) an, welcher die elektrische Leistung erzeugt. Eine Besonderheit von Mikrogasturbinen ist der Wärmetauscher, ein sogenannter Rekuperator (R). Dieser nutzt einen Teil der aus der Turbine austretenden heißen Luft um die verdichtete Luft vor Eintritt in die Brennkammer noch weiter vorzuheizen, wodurch der Wirkungsgrad deutlich erhöht werden kann.

Aus dieser Funktionsweise ergibt sich ein hinsichtlich der

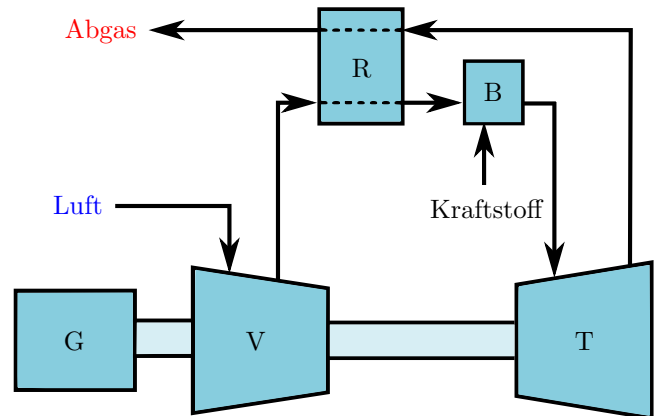


Bild 1: Schematische Darstellung der Funktionsweise einer Mikrogasturbine (G: Generator, V: Verdichter, T: Turbine, B: Brennkammer, R: Rekuperator)

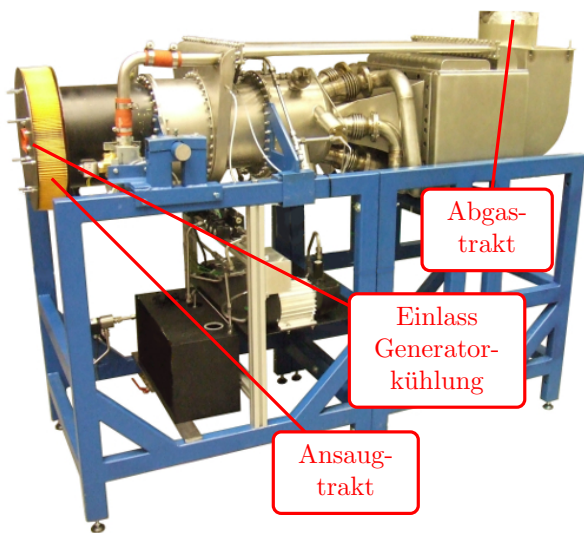
NVH-Charakteristik wesentlicher Vorteil der Mikrogasturbine gegenüber einem herkömmlichen Verbrennungsmotor: Das einzige bewegliche Teil ist die rotierende Welle, die sich immer in der gleichen Richtung dreht und dadurch weniger Schall und Vibrationen erzeugt als die Kolbenbewegungen im Verbrennungsmotor. Im geplanten Verbund eines seriellen Hybridantriebs würde darüber hinaus die Drehzahl konstant gehalten, so dass es keine zusätzliche Schallerzeugung durch häufige Drehzahlvariationen gibt.

Daraus lässt sich vermuten, dass das resultierende charakteristische Schalleistungsspektrum einer Mikrogasturbine deutlich anders ist als das eines Verbrennungsmotors. Da die Drehzahl der Welle zudem in der Regel sehr hoch ist, kann erwartet werden, dass der entstehende Schall deutliche hochfrequente Anteile enthält.

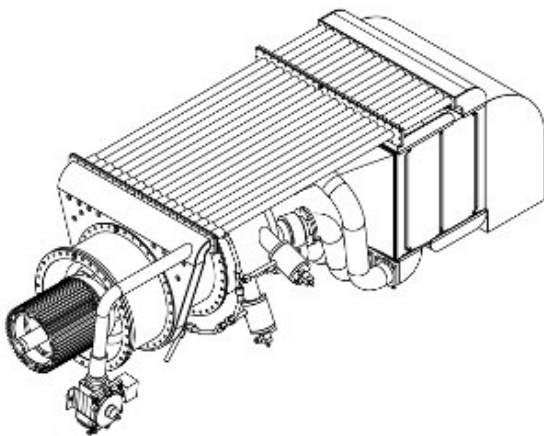
Messung

Mikrogasturbine

Der in den Messungen verwendete Prototyp einer für den Einsatz in Hybridbussen vorgesehenen Mikrogasturbine liefert eine elektrische Nennleistung von 70 kW bei einer Drehzahl von etwa 96.000 min^{-1} . Der elektrische Wirkungsgrad beträgt 29 %, der Gesamtwirkungsgrad 85 %. Die Abmessungen der Mikrogasturbine sind so gewählt, dass sie quer im Motorraum eines Busses Platz findet. Bild 2 zeigt eine Fotografie und eine Entwurfszeichnung der untersuchten Turbine. Um die Abhängigkeit der Schallentstehung der Mikrogasturbine von der Drehzahl untersuchen zu können, wurden Messungen bei fünf ver-



(a) Foto des fertigen Prototypen



(b) Modell (Abgastrakt zeigt hier nach unten)

Bild 2: 70 kW-Mikrogasturbine**Tabelle 1:** Verschiedene Lastzustände

Bezeichnung	Elektrische Leistung	Drehzahl min ⁻¹
	kW	
Leerlauf	0	51.000
1/4 Last	17,5	73.400
1/2 Last	35	82.540
3/4 Last	52,5	90.000
Volllast	70	96.028

schiedenen Lastzuständen durchgeführt. Diese sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Schallquellen einer Mikrogasturbine

Aus dem Aufbau und der Funktionsweise einer Mikrogasturbine lassen sich bereits die vermutlichen Hauptschallquellen ableiten. Dazu gehören der Verdichter und die Turbine, wobei dort vor allem durch die Rotor-Stator-Interaktion tonaler Schall entsteht. Eine weitere potentiell starke Schallquelle ist die Interaktion einer mehr oder weniger turbulenten Zuströmung mit den Rotoren im Verdichter und in der Turbine. Eine weitere mögliche Schallquelle ist der Generator (aufgrund der sehr ho-

Tabelle 2: Übersicht Messreihen

Nummer	Beschreibung
1	Originalzustand (keine Schalldämpfer)
2	Ausblasschalldämpfer
3	Ausblas- und Ansaugschalldämpfer
4	Ausblas- und Ansaugschalldämpfer, Generatorabluftschalldämpfer
5	Ansaugschalldämpfer

hen Drehzahl der Welle), der zudem gegebenenfalls auch gekühlt werden muss. Wenn diese Kühlung mit Luft erfolgt, ist unter Umständen ein zusätzlicher Ventilator nötig, der ebenfalls Schall erzeugt.

Die meisten dieser Schallquellen strahlen direkt über die Lufteinlassöffnung des Verdichters (Ansaugtrakt) oder über die Auslassöffnung der Turbine (Abgastrakt) Luftschall ab. Ebenfalls möglich ist die Ausbreitung von Körperschall und die darauf folgende Abstrahlung von Luftschall über das Turbinengehäuse.

Um die Beiträge der einzelnen Schallquellen zur Gesamtschalleistung der Mikrogasturbine zu identifizieren, wurden mehrere Messungen durchgeführt, bei denen mit Hilfe von Absorptionsschalldämpfern mit sehr hohem Einfügungsdämpfungsmaß sukzessive einzelne Schallquellen "ausgeschaltet" wurden. Eine Übersicht der durchgeführten Messreihen kann Tabelle 2 entnommen werden. Somit kann der gesuchte Beitrag einer einzelnen Schallquelle stets als Differenz zweier Schalleistungsspektren berechnet werden. Beispielweise ergibt sich der durch den Abgastrakt verursachte Beitrag zur Gesamtschalleistung für jeden Lastzustand als Differenz zwischen Messreihe 2 und Messreihe 1. Zusätzliche Informationen zur Schallquellenanalyse finden sich in [3].

Messumgebung

Die Bestimmung der Schalleistung erfolgte nach DIN EN ISO 3741 [1] mit einem Handschallpegelmesser (Klasse 1) in einer Maschinenhalle mit den Abmessungen 8,10 m × 16,60 m × 9,35 m. Dazu wurden für jeden Lastzustand an 12 in der Halle verteilten Mikrofonpositionen Messungen mit einer Dauer von 30 s durchgeführt. Im Vorfeld der Messungen wurde die Nachhallzeit des Raumes mit Hilfe des Verfahrens mit abgeschaltetem Rauschen nach DIN EN ISO 354 [2] ermittelt.

Ergebnisse

Schalleistung der Mikrogasturbine

Die gemessene Gesamtschalleistung der Mikrogasturbine bei den fünf Lastzuständen aus Tabelle 1 ist in Bild 3 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass der breitbandige Anteil der Schalleistung nur wenig von der Drehzahl abhängt. Bei tiefen Frequenzen (im Bereich von 200 Hz bis 800 Hz) gibt es kleinere, zum Teil etwas breitbandigere lokale Pegelmaxima. Abhängig von der Drehzahl ist außerdem bei sehr hohen Frequenzen ein sehr starkes, schmalbandiges Pegelmaximum sichtbar (6,3 kHz bis 8 kHz). Die Frequenz dieses tonalen Schalls hängt direkt proportional

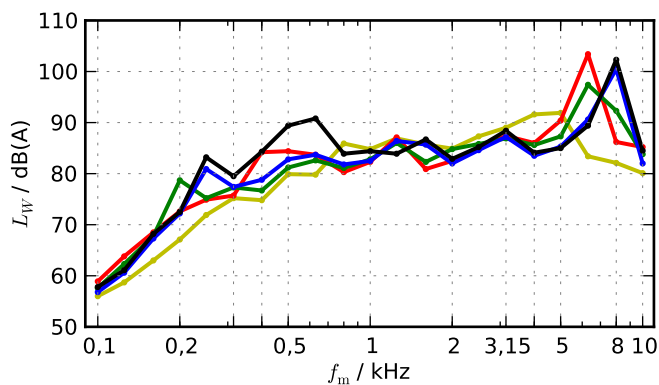


Bild 3: Gemessene Schalleistung der Mikrogasturbine bei verschiedenen Lastzuständen (— Leerlauf, 51.000 min⁻¹, — 17,5 kW, 73.000 min⁻¹, — 35 kW, 82.540 min⁻¹, — 52,5 kW, 90.000 min⁻¹, — 70 kW, 96.028 min⁻¹)

von der Drehzahl ab.

Vergleich der gemessenen Schalleistung der Mikrogasturbine mit der eines Dieselmotors

Um die vermuteten akustischen Vorteile der Verwendung einer Mikrogasturbine in einem seriellen Hybridantrieb gegenüber dem traditionell eingesetzten Verbrennungsmotor aufzuzeigen, soll das Schalleistungsspektrum der Mikrogasturbine aus Bild 2(a) dem typischen Spektrum eines Dieselmotors vergleichbarer Leistung gegenübergestellt werden.

Da sich in der Literatur nur sehr wenige Messdaten geeigneter Motoren finden lassen, wird in einem ersten Schritt ein **berechnetes Schalleistungsspektrum** zum Vergleich herangezogen. Dazu wurde der Trend für Serienmotoren aus Bild 16-2 in [5] extrapoliert und damit der akustische Wirkungsgrad für einen Dieselmotor aus dem Baujahr 2010 zu etwa $2 \cdot 10^{-7}$ geschätzt. Mit der vereinfachten Darstellung des typischen Spektrums eines Dieselmotors aus [4] lässt sich damit die Schalleistung eines Dieselmotors vergleichbarer Leistung ermitteln.

Bild 4 zeigt den Vergleich der gemessenen Schalleistung der Mikrogasturbine bei Vollast (70 kW, 96.000 min⁻¹) mit der für einen Dieselmotor mit gleicher Leistung nach [4, 5] vorhergesagten Schalleistung. Neben der Gesamtschalleistung des Dieselmotors (ohne Schalldämpfer) ist auch der Anteil dargestellt, der nur vom Gehäuse abgestrahlt wird (mit Schalldämpfern). Es ist ersichtlich, dass die Gesamtschalleistung des Motors ohne Schalldämpfer bei tiefen Frequenzen deutlich über der der Mikrogasturbine liegt. Die Schalleistung der Turbine ist in diesem Frequenzbereich vergleichbar mit der eines Dieselmotors mit Schalldämpfern (Abstrahlung des Gehäuses). Bei hohen Frequenzen, vor allem im Bereich des schmalbandigen Pegelmaximums bei 8 kHz, erzeugt jedoch die Mikrogasturbine einen deutlich höheren Pegel.

In einem zweiten Schritt erfolgt der Vergleich der Schalleistung der Mikrogasturbine mit der **gemessenen Schalleistung eines 4-Zylinder-Pkw-Dieselmotors** [6]. Die Messungen fanden in einem voll reflexionsarmen Motorprüfstand mit einer unteren Grenzfrequenz von 125 Hz statt. In diesem Prüfstand wird das Ab-

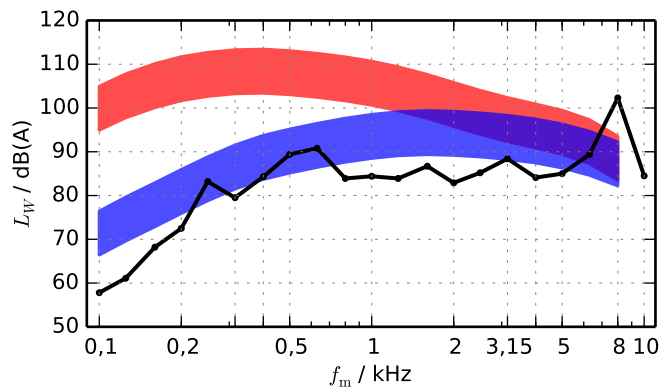


Bild 4: Vergleich der gemessenen Schalleistung der Mikrogasturbine mit der berechneten Schalleistung eines Dieselmotors [4, 5] (— Mikrogasturbine, 70 kW, — Dieselmotor, gesamt, — Dieselmotor, Gehäuse)

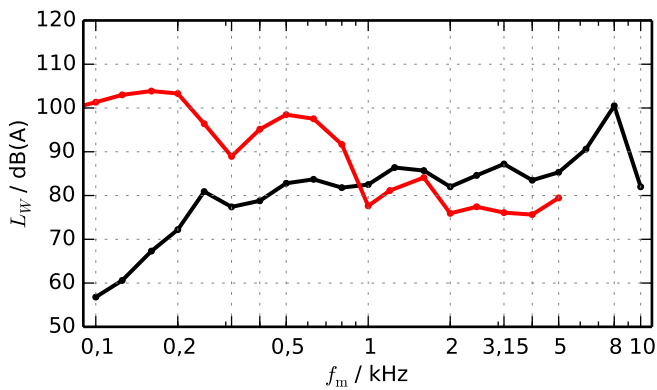
gas direkt in einem wassergekühlten Schlauch zu einem Schalldämpfer außerhalb des Messraumes geführt, so dass die Messungen kein Abgas-Mündungsgeräusch enthalten. Die Schalleistung wurde dabei vereinfacht unter der Annahme einer gleichmäßigen kugelförmigen Abstrahlung aus Schalldruckpegelmessungen mit einem Einzelmikrofon an der Stirnseite des Motors in 1 m Abstand berechnet.

Bild 5 zeigt den Vergleich der Schalleistung der Turbine mit der gemessenen Schalleistung des Dieselmotors. Dabei wird in Bild 5(a) die Schalleistung der Turbine bei 52,5 kW und 90.000 min⁻¹ mit einer Messung des Dieselmotors bei Teillast (50 kW, 2400 min⁻¹) verglichen, in Bild 5(b) erfolgt der Vergleich bei Vollast der Mikrogasturbine (70 kW, 96.028 min⁻¹) mit einer Messung des Dieselmotors ebenfalls bei 70 kW (2400 min⁻¹).

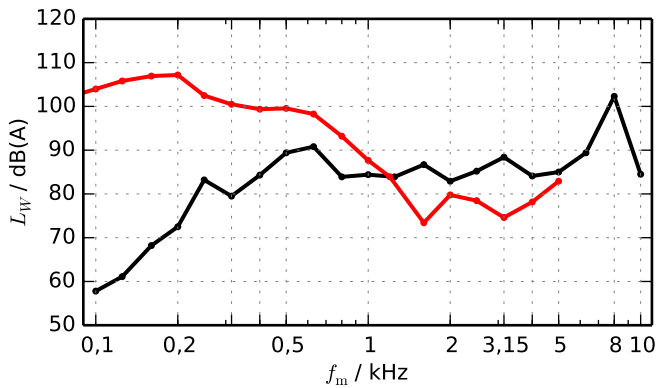
Der Vergleich führt generell zu ähnlichen Ergebnissen wie der in Bild 4 gezeigte: Bei tiefen Frequenzen bis etwa 1 kHz liegt die Schalleistung des Dieselmotors deutlich über der der Mikrogasturbine. Bei mittleren und hohen Frequenzen ist die Mikrogasturbine lauter. Jedoch enthält die Schalleistung des Dieselmotors in Bild 5 keine Anteile des Abgasgeräusches. Wird in Betracht gezogen, dass das Abgasgeräusch nach [7] ohne die Verwendung von Schalldämpfern den höchsten Beitrag zum Gesamtgeräusch eines Motors liefert, mit möglichen Schalleistungspegeln im Bereich von 130 bis 140 dB, dann erscheint die Verwendung einer Mikrogasturbine anstelle eines Dieselmotors in einem seriellen Hybridantrieb aus akustischer Sicht noch deutlich vorteilhafter.

Bestimmung der Beiträge der Einzelschallquellen

Bild 6 zeigt die durch die Messungen mit Schalldämpfern (siehe Tabelle 2) ermittelten Beiträge der Einzelschallquellen zur Gesamtschalleistung der Mikrogasturbine. Aus Platzgründen werden an dieser Stelle nur Ergebnisse der Messungen bei Vollast gezeigt, eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse für die weiteren Lastfälle befindet sich in [3]. Es ist ersichtlich, dass der sehr hohe tonale Schallanteil im Bereich von 8 kHz im Wesentlichen von der Generator Kühlung stammt, während der Abgastrakt



(a) (Elektrische) Leistung $P = 50$ kW



(b) (Elektrische) Leistung $P = 70$ kW

Bild 5: Vergleich der gemessenen Schalleistung der Mikrogasturbine mit der gemessenen Schalleistung eines Dieselmotors ohne Abgas-Mündungsgeräusche [6] (— Mikrogasturbine, — Dieselmotor)

im niedrigen Frequenzbereich von etwa 250 Hz bis 630 Hz dominiert. Im mittleren Frequenzbereich im Bereich von 2,5 kHz bis 4 kHz liefert der Ansaugtrakt einen deutlichen Anteil. Der Beitrag des Gehäuses enthält ebenfalls Anteile der anderen Schallquellen, ist aber aufgrund der Schalldämmung des Gehäuses insgesamt nicht dominant.

Mögliche Lärminderungsmaßnahmen

Da die Generatorkühlung die Hauptschallquelle darstellt, sollten Lärminderungsmaßnahmen zuerst dort ansetzen. Das könnte aufgrund der hohen Frequenzen bei Verhinderung des Durchstrahleffekts bereits durch die Verwendung eines Absorptionsschalldämpfers geringer Länge und Auskleidungstiefe sehr platzsparend erfolgen. Ebenfalls möglich wäre das Ersetzen der Luftkühlung durch eine Wasserkühlung, wodurch diese Schallquelle komplett wegfiel. Der Schall von Ansaug- und Abgastrakt ließe sich ebenfalls vergleichsweise einfach durch Absorptionsschalldämpfer mindern, während die Abstrahlung über das Turbinengehäuses durch eine Einhüllung (Dämmwolle mit dünner Blechabdeckung) gemindert werden könnte, welche aus Gründen der thermischen Isolierung sowieso vorgesehen werden müsste.

Zusammenfassung

Die Verwendung einer Mikrogasturbine in einem seriellen Hybridantrieb ist aus verschiedenen Gründen ei-

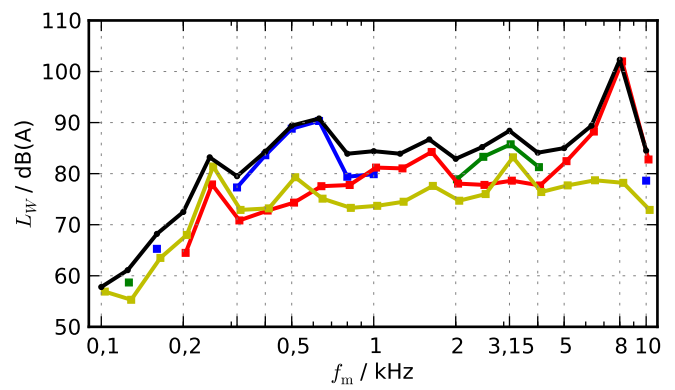


Bild 6: Beitrag der Einzelkomponenten zur Schalleistung der Mikrogasturbine bei Vollast, 70 kW (— Abgastrakt, — Ansaugtrakt, — Generatorkühlung, — Gehäuse, — gesamt)

ne vorteilhafte Alternative gegenüber einem konventionell verwendeten Verbrennungsmotor. Neben dem hohen Leistungsgewicht, der niedrigen Schadstoffemission sowie der hohen Betriebszuverlässigkeit zählt dazu vor allem die spezielle Schallcharakteristik. Um diese zu untersuchen wurde die Schalleistung einer 70 kW-Mikrogasturbine gemessen. Im Vergleich mit vorhergesagten sowie gemessenen Schalleistungsspektren eines Dieselmotors ist die Schalleistung der Turbine im Bereich tiefer Frequenzen deutlich geringer, während sie bei mittleren und hohen Frequenzen größer ist. Eine entsprechende Lärminderung wäre durch die Verwendung von Absorptionsschalldämpfern vergleichsweise einfach und effektiv durchführbar.

Literatur

- [1] DIN EN ISO 3741 - Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen: Hallraumverfahren der Genauigkeitsklasse 1 (2001)
- [2] DIN EN ISO 354 - Messung der Schallabsorption in Hallräumen (2003)
- [3] Sarradj, E., Geyer, T., Jobusch, C., Kießling, S., Neeffe, A., Noise Characteristics of a Micro Gas Turbine for Use in a Serial Hybrid Concept. SAE Technical Paper 2014-01-2066, doi:10.4271/2014-01-2066 (2014)
- [4] Sound Research Laboratories, Noise Control in Industry, 3. Auflage, Webb, J. D. (Ed.), Sound Research Laboratories Ltd, Sudbury (2004)
- [5] Spessert, B., Geräuschemission von Dieselmotoren, in Mollenhauer, K. und Tschöke, H., Handbuch Dieselmotoren, 3. Auflage, Springer, Berlin (2007)
- [6] Messdaten, zur Verfügung gestellt vom Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS)
- [7] Martin, P., Franz, B., Ulrich, B., Karl, F., Fahrzeugakustik: Der Fahrzeugantrieb, ISBN 978-3-211-76740-5. Springer-Verlag Wien (2010)