Messtechnische Bestimmung der Durchgangsdämpfung von Schalldämpfern im Laborprüfstand bei hohen Temperaturen

Christian Schulze[1], Stefan Richardt[1], Mirko Ruhnau[1], Jörn Hübelt[2]

[1] *Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH, 01307 Dresden, christian.schulze@akustikforschung.de*
[2] *HS Mittweida, LS für Technische Mechanik und Akustik, 09648 Mittweida, joern.huebelt@hs-mittweida.de*

Einleitung

Die messtechnische Bestimmung der schalltechnischen Wirksamkeit von Schalldämpfern erfordert in der Regel Prüfstände mit großer räumlicher Ausdehnung, die oft an akustische Spezialräume angekoppelt sind. Für die messtechnische Untersuchung von Schalldämpfern im Labor wurde daher ein neuer Schalldämpfer-Prüfstand entwickelt. Dieser besitzt neben einem deutlich verringerten Platzaufwand zwei weitere entscheidende Vorteile. Zum einen ermöglicht die Ankopplung einer Heizquelle die direkte messtechnische Bestimmung der Durchgangsdämpfung von Schalldämpfern bei hohen Temperaturen. Zum anderen erlaubt es das speziell eingesetzte Messverfahren, neben der spektralen Durchgangsdämpfung, die komplexe Übertragungsmatrix des Schalldämpfers zu bestimmen. Durch Import dieser Übertragungsmatrix in eine Berechnungssoftware kann daraus die schalltechnische Wirkung des messtechnisch untersuchten Schalldämpfers in Kombination mit einer beliebigen Peripherie ermittelt werden.

Entwicklung

Ausgangspunkt für die Entwicklung des neuen Schalldämpfer-Prüfstands stellte ein Transmissionsmessrohr dar (s. Abbildung 1). Ein solches Messsystem ermöglicht die messtechnische Bestimmung der charakteristischen Absorberparameter – die komplexe Wellenzahl und die komplexe charakteristische Impedanz eines porösen Materials – in Abhängigkeit von der Frequenz.

Abbildung 1: Transmissionsmessrohre verschiedenen Durchmessers zur messtechnischen Bestimmung der charakteristischen Absorberparameter von porösen Materialien.

Die poröse Materialprobe wird dabei mathematisch als komplexer Vierpol $\underline{T}$ modelliert (s. Abbildung 2), der gemäß

$$\begin{pmatrix} \underline{p}_1 \\ \underline{v}_1 \end{pmatrix} = \underline{T} \begin{pmatrix} \underline{p}_2 \\ \underline{v}_2 \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} [\text{Pa}] \\ [\text{ms}^{-1}] \end{matrix} \qquad (1)$$

den Zusammenhang zwischen den komplexen Größen Schalldruck und Schallschnelle vor und hinter der Materialprobe beschreibt.

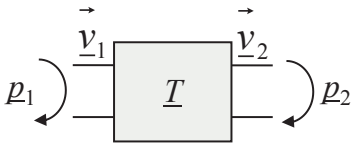

Abbildung 2: Betrachtung der porösen Materialprobe als komplexen Vierpol; mathematische Beschreibung des Zusammenhangs der komplexen Größen Schalldruck und Schallschnelle vor und hinter der Materialprobe.

Durch Anwendung des Übertragungsmatrix-Verfahrens können die einfallenden und reflektierten ebenen Wellenanteile im Transmissionsrohr vor und hinter der Materialprobe voneinander getrennt werden (s. Abbildung 3).

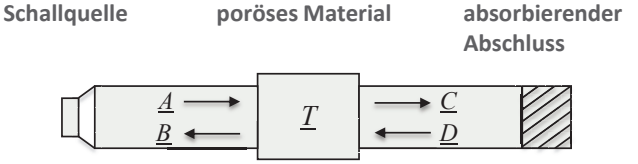

Abbildung 3: Prinzipdarstellung zur Trennung der einfallenden und reflektierten ebenen Wellenanteile vor und hinter der Materialprobe durch Anwendung des Übertragungsmatrix-Verfahrens nach Song und Bolton.

Auch Kanal- oder Schalldämpferelemente lassen sich gemäß der linearen Netzwerktheorie als komplexer Vierpol beschreiben. Beispielhaft kann ein schallhartes Kanalelement der Länge l anhand der komplexen Übertragungsmatrix

$$\underline{T} = \begin{pmatrix} \cos k_c l & jZ \sin k_c l \\ j\dfrac{1}{Z} \sin k_c l & \cos k_c l \end{pmatrix} \cdot e^{-jMk_c l} \qquad (2)$$

mit

$$k_c = \frac{k}{1 - M^2} \quad [\text{m}^{-1}] \qquad (3)$$

modelliert werden. M und k entsprechen dabei der Machzahl und der Wellenzahl. Z beschreibt die komplexe Impedanz des Vierpols.

Ein wesentlicher Vorteil dieser Beschreibungsart ist die mögliche Kombination verschiedener Vierpole. Somit ergibt sich beispielhaft die schalltechnische Wirkung eines kompletten Abgassystems

$$\underline{T} = \prod_i \underline{T}_i \qquad [-] \qquad (4)$$

durch einfache Multiplikation der einzelnen komplexen Übertragungsmatrizen $\underline{T}_i$ der verschiedenen aneinandergereihten Kanal- und Schalldämpferelemente. Dadurch werden auch die Stehwellen zwischen den einzelnen Elementen berücksichtigt, die insbesondere im tieffrequenten Bereich einen wesentlichen Einfluss auf die Schalldämpfung des Gesamtsystems besitzen können.

Abbildung 4 zeigt beispielhaft die messtechnische Bestimmung der Durchgangsdämpfung sowie der komplexen Übertragungsmatrix eines Rohrschalldämpfers bei Raumtemperatur und ohne Fluidströmung.

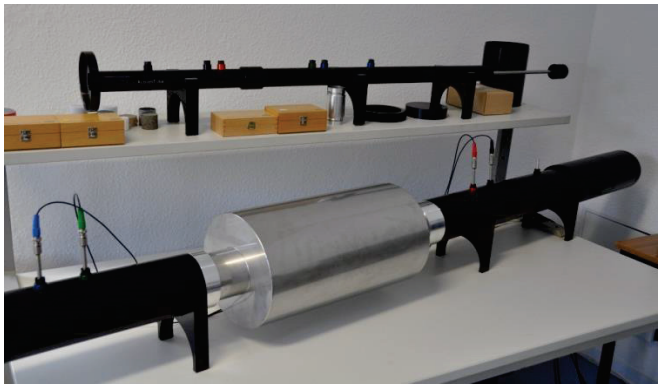

Abbildung 4: messtechnische Bestimmung der Durchgangsdämpfung sowie der komplexen Übertragungsmatrix eines Rohrschalldämpfers bei Raumtemperatur und ohne Fluidströmung im Transmissionsmessrohr

Prüfstand

Da die schalltechnische Wirksamkeit von Abgasschalldämpfern neben der Fluidströmung insbesondere von der Fluidtemperatur abhängt, wurde der grundlegende Aufbau des Messsystems modifiziert (s. Abbildung 5).

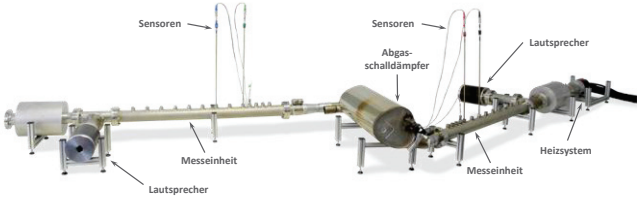

Abbildung 5: neu entwickelter Schalldämpfer-Prüfstand zur messtechnischen Bestimmung der Durchgangsdämpfung sowie der komplexen Übertragungsmatrix von Schalldämpfern bei hohen Temperaturen und mit Fluidströmung; auch für Einsatz im Labor geeignet

Auf der rechten Seite des Messsystems ist ein Heizsystem mit Gebläse angekoppelt, das, in Abhängigkeit von der Leistung der Heizquelle, die Erhitzung des Fluids auf eine Temperatur bis ca. 600 °C sowie die Durchströmung des Messsystems ermöglicht. Die Ankopplung der Prüfschallquelle an das Messsystem erfolgt senkrecht zur axialen Richtung des Rohrsystems. Für die akustische Messung bei hohen Temperaturen kommen spezielle Mikrofonsonden zum Einsatz.

Infolge der Durchströmung des Messsystems wird zur Bestimmung der Durchgangsdämpfung und der komplexen Übertragungsmatrix der untersuchten Schalldämpfer auf zwei spezielle Messverfahren zurückgegriffen – die sogenannte Two-Source-Methode und die Two-Load-Methode (vgl. Abbildung 6).

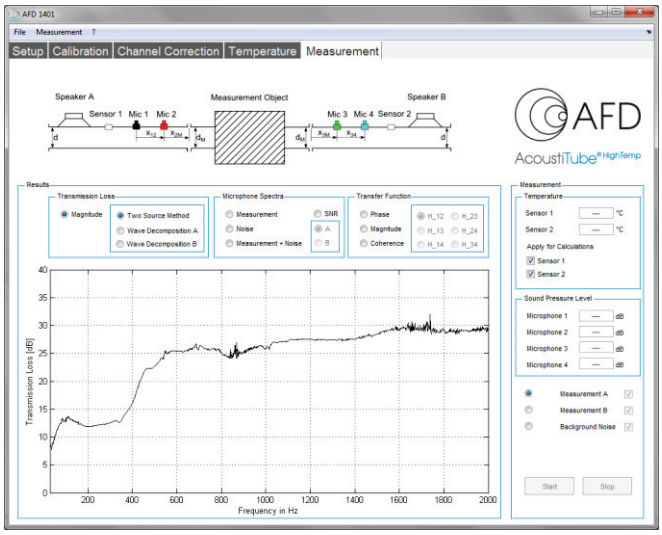

Abbildung 6: Bestimmung der Durchgangsdämpfung und der komplexen Übertragungsmatrix von Schalldämpfern durch Einsatz der Two-Source-Methode und der Two-Load-Methode

Bei beiden Messverfahren sind jeweils zwei Teilmessungen durchzuführen. Im Fall der Two-Source-Methode wird das Messsystem zum einen von links nach rechts, zum anderen von rechts nach links durchschallt, bei jeweils gleichem akustischem Abschluss (Abbildung 7).

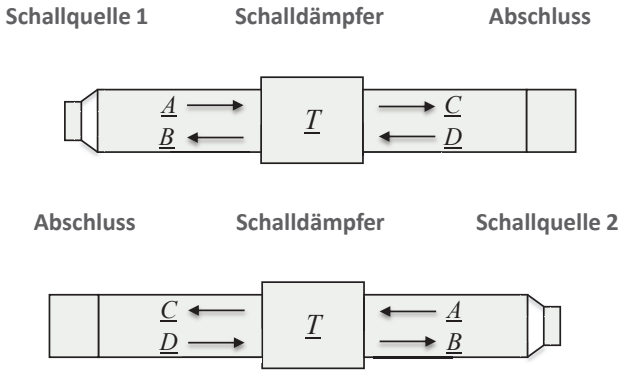

Abbildung 7: Prinzipdarstellung zur Trennung der einfallenden und reflektierten ebenen Wellenanteile vor und hinter dem Schalldämpfer durch Anwendung der Two-Source-Methode.

Im Fall der Two-Load-Methode wird die Trennung der einfallenden und reflektierten ebenen Wellenanteile vor und hinter dem Schalldämpfer dadurch gewährleistet, dass die Messungen bei gleicher Durchschallungsrichtung, jedoch bei zwei verschiedenen akustischen Abschlüssen erfolgen (Abbildung 8). Im Labor sind die Messergebnisse von Two-Source-Methode und Two-Load-Methode als gleichwertig anzusehen.

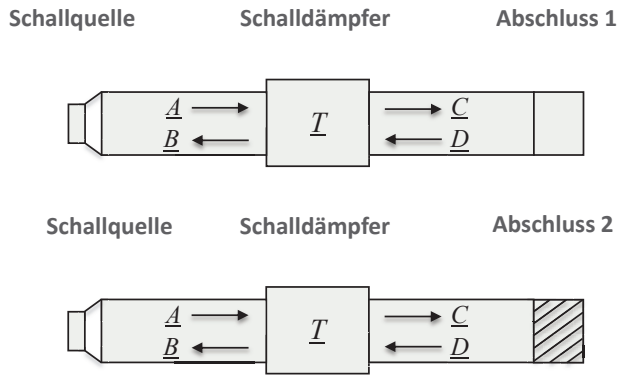

Abbildung 8: Prinzipdarstellung zur Trennung der einfallenden und reflektierten ebenen Wellenanteile vor und hinter dem Schalldämpfer durch Anwendung der Two-Load-Methode.

Wie einleitend beschrieben, erlaubt der Import der messtechnisch bestimmten Übertragungsmatrix des untersuchten Schalldämpfers in eine Schalldämpfer-Software die Berechnung der akustischen Wirksamkeit des Schalldämpfers im Zusammenspiel mit einer gewählten Peripherie auf Basis von Gleichung (4) (s. Abbildung 9).

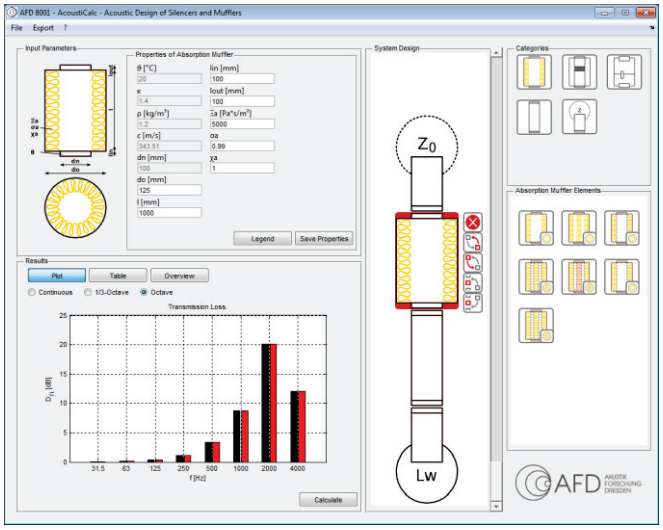

Abbildung 9: Schalldämpfer-Software zur Berechnung der akustischen Wirksamkeit von Gesamtsystemen auf Basis der komplexen Übertragungsmatrix von Einzelbauteilen; z. B. Integration des gemessenen Schalldämpfers in komplettes Abgassystem

Validierung

Im Folgenden soll die Leistungsfähigkeit des neuen Schalldämpfer-Prüfstands an zwei exemplarischen Schalldämpfern demonstriert werden.

Im ersten Beispiel wurde ein Absorptionsschalldämpfer für einen Schiffsdiesel im Schalldämpfer-Prüfstand bei Raumtemperatur vermessen (s. Abbildung 10) und parallel durch eine FEM-basierte Software akustisch modelliert.

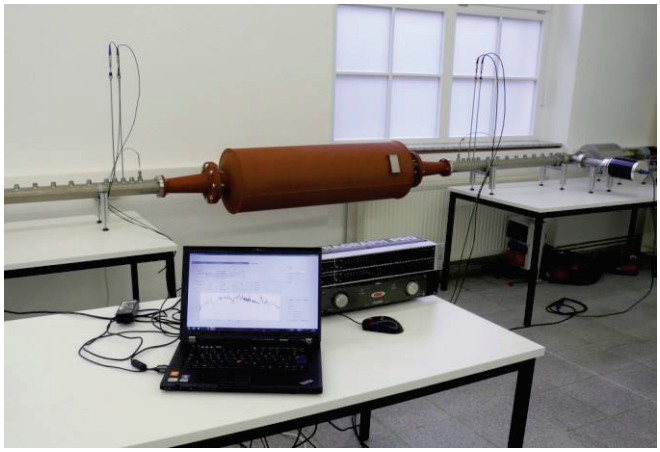

Abbildung 10: akustische Bewertung eines Absorptionsschalldämpfers im Schalldämpfer-Prüfstand

Abbildung 11 zeigt die Ergebnisse beider Untersuchungen einander gegenübergestellt. Es ist erkennbar, dass die Verläufe der Durchgangsdämpfung des Schalldämpfers im Nutzfrequenzbereich des Schalldämpfer-Prüfstands von ca. 30 Hz bis 3 kHz sehr gut übereinstimmen. Des Weiteren bescheinigen die Ergebnisse dem Schalldämpfer-Prüfstand eine spektrale Grenzschalldämpfung von mehr als 70 dB.

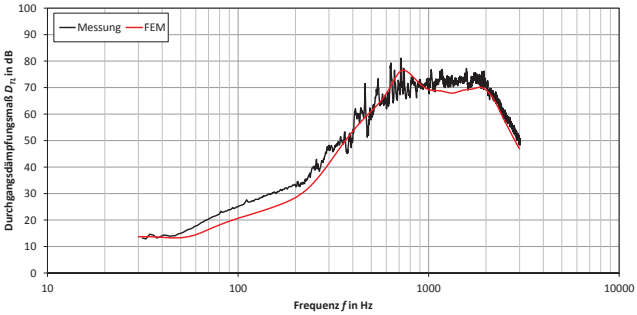

Abbildung 11: kontinuierliche spektrale Durchgangsdämpfung des untersuchten Absorptionsschalldämpfers bestimmt durch Messung im Schalldämpfer-Prüfstand (schwarz) und durch numerische Berechnung (rot)

Im zweiten Beispiel wurde ein Resonanzschalldämpfer (s. Abbildung 12) im Schalldämpfer-Prüfstand bei verschiedenen Fluidtemperaturen vermessen und parallel durch eine Schalldämpfer-Software analytisch akustisch modelliert. Der Rohrschalldämpfer entspricht einem Lambda-Viertel-Schalldämpfer, der auf eine Grundfrequenz bei Raumtemperatur von ca. 180 Hz ausgelegt wurde.

In Abbildung 13 sind die Ergebnisse der messtechnischen Untersuchungen für die verschiedenen Fluidtemperaturen einander gegenübergestellt. Es ist erkennbar, dass die spektrale kontinuierliche Durchgangsdämpfung des Resonanzschalldämpfers erwartungsgemäß an Stellen ungeradzahliger Vielfache einer viertel Luftschallwellenlänge schmalbandige Maxima aufweist.

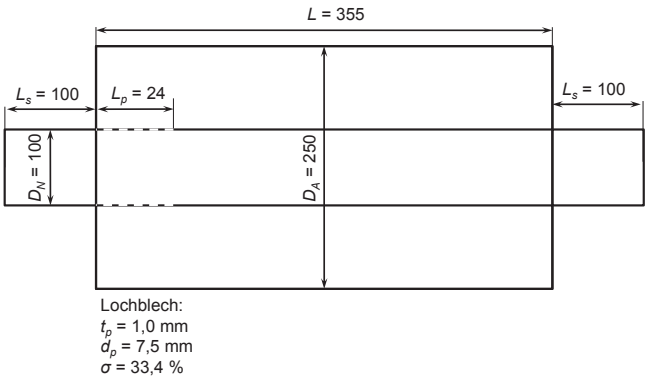

Abbildung 12: Prinzipskizze des untersuchten Resonanzschalldämpfers

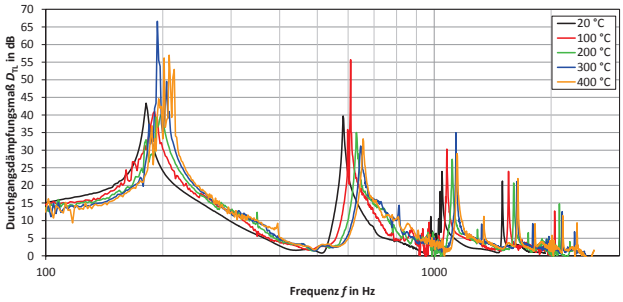

Abbildung 13: Durchgangsdämpfung des untersuchten Resonanzschalldämpfers bestimmt durch Messung im Schalldämpfer-Prüfstand für verschiedene Fluidtemperaturen

Mit zunehmender Fluidtemperatur nehmen die einzelnen Resonanzfrequenzen aufgrund der höheren Schallgeschwindigkeit höhere Werte an. Gleichzeitig treten ebenso Amplitudenunterschiede der Resonanzmaxima der Durchgangsdämpfung auf.

Abbildung 14 zeigt exemplarisch die Ergebnisse von Messung und analytischer Simulation für eine Fluidtemperatur von 20 °C. Auch wenn die Verläufe der spektralen Durchgangsdämpfung bereits eine sehr gute Übereinstimmung aufweisen, ermöglicht der direkte Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen die Anpassung und Optimierung bestehender analytischer Modelle zur Vorhersage der schalltechnischen Wirksamkeit gefertigter firmenspezifischer Schalldämpferelemente. Diese können zum Beispiel in Form einer Datenbank realisiert werden, um problemabhängig sehr genaue Vorhersagen zur schalltechnischen Wirksamkeit firmenspezifischer Schalldämpferprodukte treffen zu können. Im vorliegenden Fall ist beispielsweise erkennbar, dass die Amplitude von Resonanzmaxima ab der vierten Ordnung im kontinuierlichen Spektrum der Durchgangsdämpfung höher vorhergesagt wird als in der praktischen Messung nachgewiesen wurde. Gleichzeitig ist die gemessene schalltechnische Wirkung des Resonanzschalldämpfers im Bereich von Grundfrequenz und zweiter Ordnung deutlich höher als durch das analytische Modell berechnet wurde.

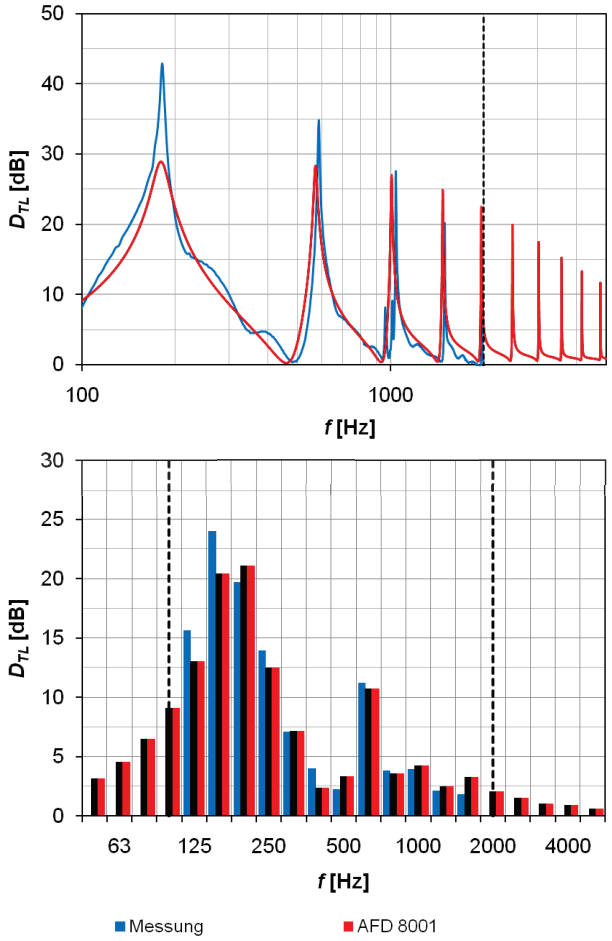

Abbildung 14: spektrale Durchgangsdämpfung des untersuchten Resonanzschalldämpfers bestimmt durch Messung im Schalldämpfer-Prüfstand (blau) und durch analytische Berechnung (rot); oben: kontinuierliches Spektrum; unten: Terzbandspektrum bei weißem Quellspektrum.

Zusammenfassung

Der neu entwickelte Schalldämpfer-Prüfstand zur messtechnischen Untersuchung von Schalldämpfern im Labor besitzt neben einem deutlich verringerten Platzaufwand zwei weitere entscheidende Vorteile. Zum einen ermöglicht die Ankopplung einer Heizquelle die direkte messtechnische Bestimmung der Durchgangsdämpfung bei annähernd realen Betriebsbedingungen, insbesondere hohen Temperaturen. Zum anderen erlaubt es das speziell eingesetzte Messverfahren, neben der spektralen Durchgangsdämpfung, die komplexe Übertragungsmatrix des Schalldämpfers zu bestimmen. Durch Import dieser Messergebnisse in eine Schalldämpfer-Software kann daraus die schalltechnische Wirkung eines kompletten Kanal- und Schalldämpfersystems bei Integration des vermessenen Schalldämpfers vorhergesagt werden.

Literatur

[1] G. f. Akustikforschung Dresden mbH Homepage, URL: http://www.akustikforschung.de/produkte/schalldampfer-prufstand-afd-1400-acoustitube-hightemp/