

Schalldämpfer für aggressive Abgasmedien

Karlheinz Bay¹, Hark Kemmlein-Schiller², Franz Schantz³, Andreas Schmohl¹ und Peter Brandstät¹

¹ Fraunhofer-Institut für Bauphysik, E-Mail: karlheinz.bay@ibp.fraunhofer.de

² Kutzner-Weber GmbH, 82216 Maisach

³ KWO Dichtungstechnik GmbH, 83135 Schechen

Einleitung

In modernen energieeffizienten Heizungsanlagen mit geringer Abgastemperatur kondensiert der beim Verbrennungsvorgang entstandene Wasserdampf im Abgasstrang. In Gegenwart von Gasen wie z. B. SO₂, SO₃ und NO_x bildet sich korrosives Kondensat. Die Absorbermaterialien für Abgasschalldämpfer müssen somit chemische Beständigkeit mit akustischen Eigenschaften verbinden. Auf Basis eines Absorbers aus PTFE (Polytetrafluorethylen) wurde ein Schalldämpferkonzept entwickelt, das über die integralen Eigenschaften Kondensatbeständigkeit, Schallabsorption im Bereich mittlerer und hoher Frequenzen sowie Reinigbarkeit und Wiederverwendbarkeit verfügt.

Ausgehend von der Analyse von Abgaskondensat und der daraus resultierenden Materialauswahl wird der Ansatz für eine nachhaltige Lösung dieses akustischen, ökologischen und letztlich auch ökonomischen Problems dargestellt. Möglichkeiten der Formgebung werden an Materialmodellen diskutiert und Eingangsparameter für ein Absorbermodell abgeleitet. Modellrechnungen werden durch vergleichende Messungen des Absorptionsgrads angepasst. Die resultierende Schalldämpfung wird anhand eines Funktionsmusters gezeigt. Abschließend wird der Ansatz zur Reinigbarkeit und Wiederverwertung dargelegt.

Kondensat-Analyse

Als Basis für die Materialanforderung wurden unterschiedliche Heizungskondensate chemisch analysiert. Dazu wurden Kondensatproben von gas-, öl- und holzbefeuerten Heizungsanlagen untersucht. Die Analyse ergab bei gasbefeuerten Anlagen einen pH-Wert von 2.1, der weitgehend durch Salpeter- und Schwefelsäure zustande kommt. Bei ölbefeuerten Anlagen wurde ein pH-Wert von 3.5 ermittelt, dort finden sich zusätzlich Anteile von salpetriger Säure sowie Ammoniumsalze. Die Proben bei Holzbefuerung weisen erhebliche Schwankungen auf. Es wurden pH-Werte im Bereich zwischen 3.7 und 7.1 ermittelt. Als Hauptkomponenten wurden Kalium- und Calciumsulfat, organische Säuren (Ameisensäure, Essigsäure), Natriumsulfat und -chlorid sowie teilweise erhebliche Mengen an Ruß ermittelt. Aus den Kondensat-Analysen werden folgende Anforderungen an das Absorbermaterial abgeleitet: Das Material muss säurebeständig, oxidationsbeständig und möglichst unpolar sein. Diese Anforderungen werden unter anderem von polyfluorierten Polymeren erfüllt. Nichthaftende Oberflächen sind dabei vorteilhaft, um Anlagerungen von Feststoffen wie z.B. Ruß zu vermeiden.

Materialauswahl

Unter den weltweit produzierten Fluorpolymeren stellt Polytetrafluorethylen (PTFE) mit einem Anteil von 60% die größte Gruppe dar. PTFE findet als Hochleistungswerkstoff Verwendung in der Medizintechnik, Luftfahrt, Bauindustrie, Elektronik, Textilindustrie und Automobilindustrie. Dies liegt an der Besonderheit der Materialeigenschaften: geringer Reibungskoeffizient, keine Wasseraufnahme, chemikalienbeständig, elektrisch isolierend, UV-beständig, nicht brennbar, selbst verlöschend, hohe mechanische Festigkeit und bei Temperaturen von – 200 °C bis 260 °C einsetzbar.

Bedingt können Abfälle durch Downcycling wiederverwertet werden. Ein neuer Ansatz zum Upcycling wird derzeit in einer ersten Pilotanlage getestet, bei dem PTFE-Abfälle wieder zu vollwertigen Monomeren umgewandelt werden [1]. Die meisten Produktionsabfälle und Produkte landen am Ende ihrer Laufzeit in Verbrennungsanlagen oder auf Deponien. Auf Grund ihrer hohen chemischen Stabilität verbleiben sie dort, ohne sich zu zersetzen.

Die Herstellung von PTFE-Produkten erfolgt aus Pulver oder Pasten. Für solide, feste Formteile werden Pulver unter hohem Druck verpresst und gesintert. Daraus resultieren Produkte mit homogener Materialstruktur, die eine Dichte von 2200 kg/m³ aufweisen. Weiche Produkte, z.B. für Dichtungsmaterialien, werden aus Feinpulvern mit Faserstruktur gefertigt. Dabei wird die Faserstruktur über Formdüsen orientiert und verstreckt (ePTFE). Diese Materialien weisen mit 500 kg/m³ eine wesentlich geringere Dichte auf.

Da Pulver oder Pasten aus akustischer Sicht nicht in Frage kommen, muss somit auf sogenannte Halbzeuge oder Abfallprodukte zurückgegriffen werden. Diese besitzen jedoch keine akustisch absorbierende Eigenschaft. Die Ausgangsmaterialien sind daher für den Einsatz als Absorber entsprechend aufzubereiten. Die absorbierende Funktion kann durch eine poröse Struktur z.B. in Form einer Schüttung oder eines Faserverbunds generiert werden. Die Herstellung von Schüttungen kann durch Granulieren oder Schreddern erfolgen. Dazu eignen sich besonders solide, feste Ausgangsmaterialien. Weiche Materialien sind dagegen eher für die Herstellung von Fasern geeignet. Diese können z.B. in Anlehnung an Produktionsverfahren von Naturfasern zu Fasern gesplittet werden.

Fertigung von Absorbern

Für die Untersuchungen wurde exemplarisch sowohl eine Schüttung als auch ein Faserverbund gewählt. Aus solidem

Plattenmaterial mit hoher Dichte wurde eine Span-Schüttung durch Fräsen erstellt. Zur Herstellung der Fasern wurden monodirektional verstreckte Produktionsabfälle gewählt, die bei der Herstellung von Dichtungsbändern anfallen. Durch Bearbeitung der Dichtungsbänder mit einer rotierenden Stahlbürste wurden die Fasern manuell erstellt. In Abbildung 1 sind Fotos der Span-Schüttung und des Faserverbunds abgebildet.



Abbildung 1: Fotos der erstellten Span-Schüttung (links) und des Faserverbunds (rechts).

Modellierung

Im Gegensatz zu kompaktem PTFE liegt bei den Dichtungsmaterialien die Materialdichte im Bereich von 500 kg/m^3 . Hieraus leitet sich eine hohe Porosität ab. Um Aufschluss über akustisch nutzbare offene Poren zu erhalten, wurde sowohl für das Ausgangsmaterial als auch für die daraus gefertigten Fasern Aufnahmen mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) erstellt. Beispielhaft sind in Abbildung 2 Aufnahmen einer expandierten monodirektional verstreckten PTFE-Faser abgebildet.

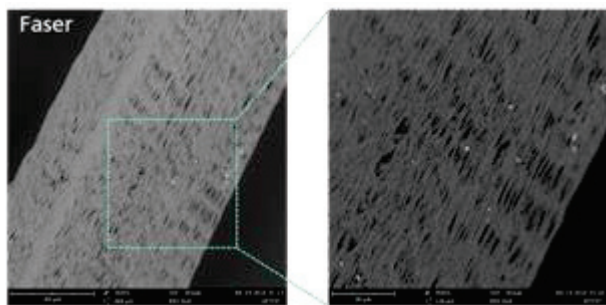


Abbildung 2: REM-Materialkontrastaufnahmen einer expandierten monodirektional verstreckten PTFE-Faser.

Die in den Materialkontrastaufnahmen scheinbar sichtbare Porosität des Gefüges wird bei Topographiekontrast-Aufnahmen nicht bestätigt. Hell/dunkel Unterschiede, die in den abgebildeten Materialkontrast-Aufnahmen auf Poren hindeuten, finden sich so in Topographieaufnahmen nicht wieder. Die Auswertung der REM-Aufnahmen erbrachten keine Hinweise auf großporige und offen zugängliche Hohlräume, die eine zusätzliche akustische Wechselwirkung durch Kopplung an eine innere Materialporosität ermöglichen.

Für die Erstellung eines Materialmodells wird somit nur die Geometrie berücksichtigt. Dazu wurden die Späne und Fasern mikroskopisch untersucht. Wie aus Abbildung 3 ersichtlich besitzen die erstellten Fasern eine glatte Oberfläche. Die gefertigten Späne sind dagegen von sehr

unterschiedlicher Form und Größe. Auf Grund der komplexen Geometrie wurde bei den Spänen von einem Materialmodell abgesehen und nur die Geometrie der Fasern vermessen. Die Fasern sind in Längsrichtung keilförmig und von rechteckigem Querschnitt. Es wurde eine mittlere Faserdicke von 0.3 mm , eine mittlere Faserbreite von 0.8 mm ermittelt und aus der Massivität eine Porosität von 68% abgeleitet.

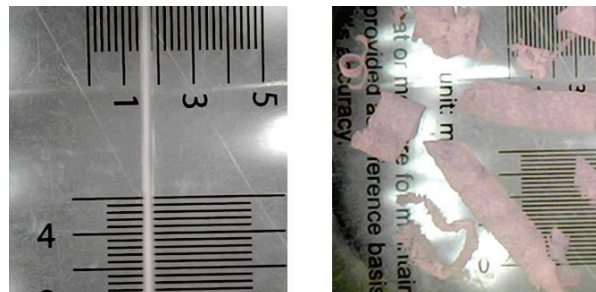


Abbildung 3: Mikroskop Aufnahmen einer Faser (links) und von Spänen (rechts).

Durch Vorgabe von Fasergeometrie und Porosität wurde mit dem Programm GeoDict® [2] ein Materialmodell erstellt. Die modellierte Faserstruktur ist in Abbildung 4 (links) abgebildet.

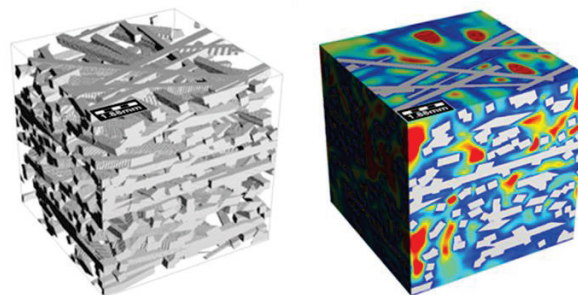


Abbildung 4: Materialmodell (links) und Strömungsmodell (rechts) zur Bestimmung der Absorberparameter (GeoDict).

Durch Simulation des viskosen Strömungs- und Diffusionsfeldes werden daraus Eingangsdaten für ein Absorbermodell abgeleitet. Die durchströmte Struktur ist in Abbildung 4 (rechts) abgebildet. Die Farben kennzeichnen die Strömungsgeschwindigkeit. Über das Strömungsfeld kann z.B. der längenspezifische Strömungswiderstand bestimmt werden, der bei der Simulation mit 2 kPa s/m^2 ermittelt wurde. Messungen ergaben einen längenspezifischen Strömungswiderstand im Bereich von 3 kPa s/m^2 . Darüber hinaus werden Eingangsparameter wie Tortuosität, charakteristische viskose und thermische Länge für das Absorbermodell nach Johnson-Champoux-Allard [3,4] bestimmt. Die berechnete viskose und thermische Länge sind dabei noch mit Messungen des Absorptionsgrads abzustimmen.

Absorptionsgrad

Für den PTFE Faserverbund und die Spanschüttung wurde der Absorptionsgrad bestimmt. Zum Vergleich wurde auch ein poröser Absorber mit einem längenspezifischen Strömungswiderstand von 10 kPa s/m^2 bei gleicher Schichtdicke vermessen. Die gemessenen Absorptionsgrade

sind in Abbildung 5 aufgetragen. Auffallend ist, dass Fasern und Späne trotz unterschiedlicher Struktur annähernd gleiche Absorptionsgrade aufweisen. Im Vergleich zu den PTFE-Absorbern werden mit dem porösen Absorber im Bereich um 500 Hz etwas höhere Absorptionsgrade erzielt.

Durch Vergleich der gemessenen Absorption der PTFE-Fasern mit Modellrechnungen nach Johnson-Champoux-Allard erfolgt die Abstimmung der Modellparameter. Durch Messung des Absorptionsgrads bei unterschiedlichem Wandabstand werden die viskose und die thermische Länge des Materialmodells angepasst.

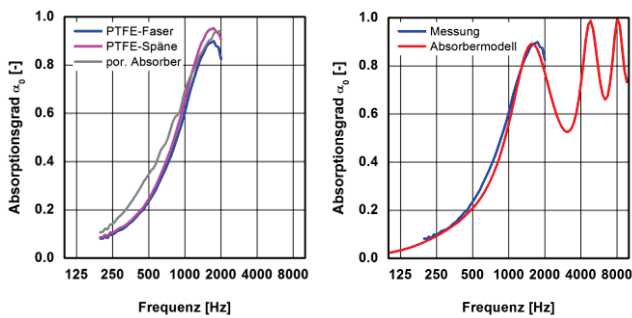


Abbildung 5: Links: Gemessener Absorptionsgrad für den PTFE-Faserverbund, die Span-Schüttung und den porösen Absorber. Rechts: Messwerte und angepasstes Absorbermodell für den Faserverbund.

Für die PTFE-Fasern sind in Abbildung 5 (rechts) der Absorptionsgrad der Messung und der Modellrechnung gegenüber gestellt. Auf Grundlage des Absorbermodells kann nun die Auslegung eines Schalldämpfers erfolgen.

Schalldämpfung

Für die Untersuchungen wurde ein Funktionsmodell eines Rohrschalldämpfers für Heizungsanlagen erstellt. In Anlehnung an den Abgasquerschnitt kleinerer Heizungsanlagen wurden ein Anschlussdurchmesser von 50 mm, eine Schalldämpferlänge von 180 mm und eine Auskleidungsdicke von 30 mm gewählt.

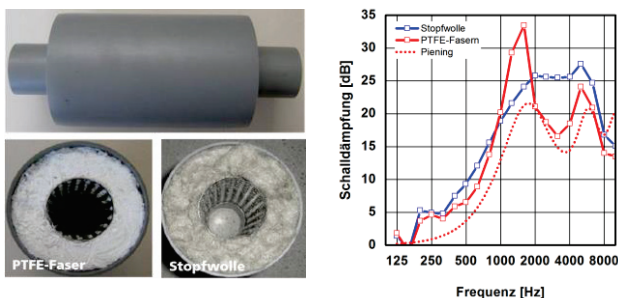


Abbildung 6: Links: Aufbau des Rohrschalldämpfers. Rechts: Gemessene Einfügungsdämpfung des Schalldämpfers mit Stopfwolle und PTFE-Fasern befüllt, zum Vergleich eine Abschätzung nach Piening.

Das Schalldämpfergehäuse wurde aus Kunststoff gefertigt. Abbildung 6 (links) zeigt den Rohrschalldämpfer, beispielhaft ist die Füllung mit PTFE-Fasern abgebildet. In Anlehnung an markttypische Mineralwolle für Schalldämpfer von Heizungsanlagen wird zum Vergleich eine Füllung mit Stopfwolle herangezogen.

Die Einfügungsdämpfung des Schalldämpfers wurde in einem Prüfkanal in Anlehnung an DIN EN 7235 [6] bestimmt. In Abbildung 6 (rechts) ist die ermittelte Einfügungsdämpfung für die Füllung mit PTFE-Fasern und Stopfwolle (Mineralfaser) abgebildet. Im Bereich unter 1000 Hz reicht die erzielte Dämpfung der PTFE-Fasern dicht an die Dämpfung der Stopfwolle heran. Nur im Bereich zwischen 2000 Hz und 4000 Hz weisen die Fasern im Vergleich zur Stopfwolle einen größeren Einbruch auf. Dieser Einbruch wird auf Resonanzen durch den geringen Strömungswiderstand zurückgeführt. Durch Erhöhung des Strömungswiderstandes, z.B. feinerer Fasern bzw. stärkere Verdichtung, könnten die Resonanzeffekte ausgeglichen und somit auch der Einbruch reduziert werden.

Zum Vergleich ist in Abbildung 6 eine Abschätzung der Schalldämpfung nach der erweiterten Pieningschen Formel aufgetragen [5]. Auch wenn diese Abschätzung noch erhebliche Diskrepanzen zur gemessenen Schalldämpfung aufweist, so werden doch tendenziell die Resonanzeffekte abgebildet.

Reinigung

Durch die Vernetzung der langen PTFE-Fasern bleibt die Form des Schalldämpferkerns nach der Entnahme aus dem Schalldämpfergehäuse im Wesentlichen erhalten. Der Absorberkern ist in Abbildung 7 (links) abgebildet.



Abbildung 7: Links: Absorberkern aus PTFE-Fasern nach der Entnahme aus dem Schalldämpfer. Rechts: Gepresste Vergleichsprobe vor und nach einem Waschgang.

Um erste Hinweise über das Verhalten von PTFE-Fasern bei der Reinigung zu erhalten, wurde eine Faserprobe in Anlehnung an den Absorberkern aus gepressten Fasern erstellt (Abbildung 7 rechts, oben). Da PTFE bei Temperaturen bis zu 260 °C eingesetzt werden kann, kein Wasser aufnimmt und chemisch beständig ist, wurde die erstellte Faserprobe in einer handelsüblichen Waschmaschine im Kochwaschgang bei 90 °C unter Zusatz von Reinigungsmittel gewaschen. Nach dem Trocknen wurden die Fasern aufgeschüttelt, wodurch sich ein Faserverbund ähnlich dem Ausgangszustand vor dem Verpressen der Fasern ergab (Abbildung 7 rechts, unten). Dieser erste Ansatz zeigt, dass die Fasern gereinigt und wiederverwendet werden können, entweder durch Spülen des Rohrschalldämpfers über einen Reinigungsanschluss, durch Reinigen von Kulissen mit einem Dampfstrahler oder durch externe Reinigung und erneuter Aufbereitung der Schalldämpferkerne. Weiterführende Untersuchungen an verschmutzten Fasern mithilfe künstlich hergestellter

Kondensate und in Heizungsanlagen eingesetzten Schalldämpferkernen werden derzeit durchgeführt.

Zusammenfassung und Ausblick

Aus PTFE lassen sich chemisch beständige Absorber bzw. Schalldämpfer für den Einsatz in aggressiven Abgasmedien fertigen. Die Absorber können während des Einsatzes im Schalldämpfer oder nach dem Ende der Laufzeit gereinigt werden. Die Verwertung von (Produktions-) Abfällen ist dabei sowohl aus ökonomischer als auch aus ökologischer Sicht vorteilhaft. Schalldämpfer mit Absorbern aus PTFE-Abfallprodukten können dabei als Zwischenverwertung betrachtet werden.

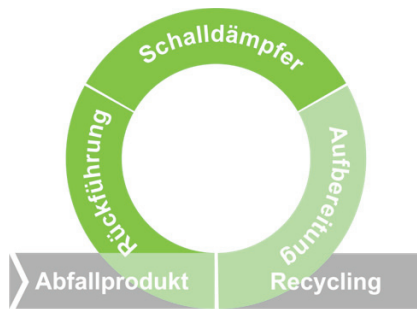


Abbildung 8: Darstellung der Zwischenverwertung von PTFE-Abfallprodukten als Absorber für aggressive Abgasmedien in Schalldämpfern.

Im weiteren Projektverlauf werden die Modellrechnungen vertieft und Untersuchungen von Schalldämpfern an einer Heizungsanlage durchgeführt. Im Hinblick auf die Herstellung von PTFE-Absorbern bedarf es noch weiterer fertigungstechnischer Entwicklung.

Das Projekt „Schalldämpfer für aggressive Abgasmedien“ wird durch die Bayerische Forschungsstiftung gefördert.

Literatur

- [1] Hintzer, K.; Beckers, H.: Neues PTFE-Recyclingverfahren erhält Materialeigenschaften vollständig. GAK Gummi Fasern Kunststoffe Jahrgang 64 (2011), Heft 12, S. 727.
- [2] GeoDict® Software, URL: <http://www.geodict.com>
- [3] Johnson, D. L.; Koplik, J.; Dashen, R.: Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. Journal of Fluid Mechanics 176 (1987), Heft -1, S. 379.
- [4] Champoux, Y.; Allard, J.-F.: Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media. Journal of Applied Physics 70 (1991), Heft 4, S. 1975.
- [5] Brandstaett, P.: Erweiterung der Pieningschen Formel für Schalldämpfer. Bautechnik 73 (1996), Heft 11, S. 796–798.
- [6] DIN EN ISO 7235:2010-01: Labormessungen an Schalldämpfern in Kanälen – Einfügungsdämpfung, Strömungsgeräusch und Gesamtdruckverlust.