

Abschlussbericht

Verbundprojekt zur Entwicklung von Verbrennungstechnologien im CEC für die klimaschonende Energieerzeugung

Projekt 2I: Grundlagen, Optimierung der Dämpfungseigenschaften keramischer Brennkammer-Auskleidungen

Förderkennzeichen: 03ET7011S

Zuwendungsempfänger: Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation, ZARM,
Universität Bremen, 28359 Bremen



Berichtszeitraum: 01.01.2014 – 31.12.2016

Autoren: Hans- Christoph Ries, Daniel Malangré (ZARM)

Veröffentlichung: Juni 2017

Inhalt

I. Kurze Darstellung	3
1. Einleitung und Projektziele.....	3
2. Voraussetzung zur Durchführung.....	5
3. Planung und Ablauf des Projektes.....	6
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Projekts	6
4.1 Wissenschaftlich-technischer Stand.....	6
4.2. Eingesetzte Literatur	7
<i>Entwicklung von porösen Keramiken:</i>	7
<i>Schallabsorptionssimulation</i>	8
5. Zusammenarbeit mit weiteren Stellen.....	9
II. Eingehende Darstellung	10
1. Simulationen zum optimalen Einsatz von Absorberstrukturen	10
Simulation geschichteter Absorber	10
Simulation Lochplattenabsorber	12
Implementierung von Hochdruck und Hochtemperatur	14
Parameterstudie zur Identifikation idealer Absorberanordnungen	15
Abschätzung der Flächenabsorption	17
Ertüchtigung eines Impedanzrohrmessstandes zur Bestimmung von Schallabsorption unter Hochdruck- und Hochtemperaturbedingungen	18
2. Form- und Probenbau	20
2.1 für Impedanzrohr und Impedanzmessungen	21
2.2 für Werkstoffcharakterisierung.....	21
2.3 für Prototypen	22
2.5. Weiterführende Versuche	23
4. Referenzen	27
5. Erfolgte und eingereichte Veröffentlichungen.....	30

I. Kurze Darstellung

1. Einleitung und Projektziele

Das Gesamtziel des Vorhabens besteht in der Entwicklung von Hitzeschutzkeramiken für den Einsatz in Gasturbinen-Brennkammern, die über die primären Forderungen nach Isolation, Thermal-Schockbeständigkeit, chemischer Erosionsbeständigkeit und Zeitstandfestigkeit hinaus schallabsorbierende Eigenschaften haben sollen. Dabei sollen diese Eigenschaften auf einen definierten, aber relativ breiten Frequenzbereich und die herrschenden Druck- und Temperaturbedingungen einer stationären Gasturbine ausgelegt werden. Den Hintergrund bildet der neuartige Ansatz, verbrennungsinduzierte Instabilitäten, wie sie in stationären Gasturbinen bei magerem Vormischbetrieb und hoher Leistung auftreten, dadurch zu bekämpfen, dass Schallenergie in der Hitzeschutz-Auskleidung der Brennkammer dissipiert wird und der resonante Prozess hierdurch gedämpft wird. Im Ergebnis wird eine Erweiterung des stabilen Betriebsbereiches der Gasturbinen hin zu höheren Leistungen angestrebt. Die im Projekt durchzuführenden Arbeiten bauen auf den grundlegenden Ergebnissen eines Projektes des Antragstellers auf, welches durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Graduiertenkollegs PoreNet seit 2006 an der Universität Bremen vor dem gleichen Hintergrund gefördert wird und dessen Förderung zum Ende 2012 ausgelaufen ist. Dort wurden feuerfeste keramische Porenabsorber entwickelt mittels derer nachgewiesen wurde, dass sie auf die Absorption von Schallenergie in einem definierten Frequenzband ausgelegt werden können. Parallel hierzu wurde eine numerische Simulationsmethode entwickelt, mittels derer die Struktur und die Dimensionen von Porenabsorbern auf die Einsatzparameter Druck, Temperatur, zu absorbierenden Frequenzbereich und Absorptionsgrad ausgelegt werden können.

Phase 1 dieses Gesamtprojektes begann Januar 2013 und endete im Dezember 2014. Sie lieferte weiteren theoretischen Hintergrund und eine positive Machbarkeitseinschätzung, die letztendlich zur Beantragung der zweiten, hier dokumentierten, Projektphase führte.

Im Rahmen dieser zweiten Projektphase soll die numerische Simulationen weiterentwickelt werden um neue Absorber-Kombinationen abbilden zu können. Der

aus der Simulation ermittelte Aufbau, der unter realistischen Gasturbinen-Bedingungen optimale Schallabsorptionseigenschaften aufweist soll auf ein keramisches Hitzeschutzschild (CHS) übertragen werden. Das Komponentenziel wurde im September 2015 einvernehmlich zwischen den Projektpartnern von Ringbrennkammern auf Resonatoren in Rohrbrennkammern geändert. Der technische Grund dieser Änderung sind die anzustrebenden Zielfrequenzen der Dämpfung, die für Cans im hochfrequenten Bereich liegen und damit erheblich näher an den keramisch zu dämpfenden Frequenzen liegen, als die 100 Hz der Ringbrennkammer. Zusätzlicher Nutzen ergibt sich aus einer möglichen Kühlluft einsparung.

Zum Erreichen dieser Ziele waren folgende Maßnahmen vorgesehen:

Simulationen zum optimalen Einsatz von Absorberstrukturen

Ziel dieser Maßnahme war es, die bestehenden Simulationen zur Bestimmung von zur Schalldämpfung unter Brennkammerbedingungen optimal geeigneten akustischen Parametern zu nutzen. Dabei mussten herstellungsbedingte sowie anwendungsbezogene Einschränkungen auf die zulässigen Parametergrößen berücksichtigt werden. Weiterhin sollte eine Möglichkeit gefunden werden, die Wirkung der schallabsorbierenden Keramiken in Abhängigkeit zur von ihnen bedeckten Fläche zu bestimmen oder wenigsten im Vergleich zu bestehenden Lösungen abschätzen zu können.

Form und Probenbau

Es wurden verschiedene Herstellungsverfahren untersucht, um die vorgegebenen akustischen Eigenschaften zu erreichen. Die hergestellten Proben wurden dann in einem iterativen Prozess auf verschiedene materialspezifische Parameter untersucht, von denen die mechanische Stabilität und der Widerstand gegen Thermoschocks die wichtigsten sind.

Mit dem Fortschreiten der Einsatzplanung begannen in enger Kooperation mit den Projektpartnern die Entwicklung einer zum Einsatz im CEC geeigneten Bauteilform und die stetige Vergrößerung der Probengeometrie und -Anzahl.

2. Voraussetzung zur Durchführung

Die vorgesehenen Aufgaben knüpften weiterhin teilweise an im Rahmen des Graduiertenkolleg 1375 „Nicht-metallische poröse Strukturen für physikalisch chemische Funktionen – Porenet“ entwickelte Herstellungs- und Simulationsmethoden, sowie an die Erkenntnisse aus Phase 1 des Projektes an.

Bei den Herstellungsmethoden handelte es sich um die Produktion poröser Porenabsorber, zum einen durch die Verwendung eines ausbrennbaren oder aufschmelzbaren Platzhalters in einem gefriergetrocknet hergestellten keramischem Skelett auf Aluminium-Mullit-Basis ¹. Und zum anderen durch Aufschäumen einer keramischen Masse zu gefrierstabilisierten oder selbstkonsolidierten porösen Strukturen.

Die Simulationsmethoden umfassen eine Adaption der Theorie des homogenen Mediums, die mittels eines Transfermatrix-Ansatzes zur Berechnung von Hochtemperatur- und Hochdruck- mithin also Brennkammer-Szenarien verwendet wurde ².

Die Herausforderungen in diesem Projekt lagen einerseits in der sehr tiefen Frequenz, in der die Instabilitäten erwartet wurden und denen auf Grund der geringen zur Verfügung stehenden Absorbiertiefe nur geringe Absorptionsgrade entgegengesetzt werden konnten und andererseits in den materialschädigenden Bedingungen, die die Anwendung innerhalb der Brennkammer einer stationären Gasturbine mit sich bringen und denen das entwickelte Material zumindest einen Wartungszyklus zuverlässig widerstehen muss.

Nach Änderung des Komponentenziels und den damit verschobenen Einsatzbedingungen kam als weitere, neue, Herausforderung die Modellierung der Absorptionwirkung in Abhängigkeit zur verfügbaren Absorberoberfläche hinzu.

3. Planung und Ablauf des Projektes

Das Projekt wurde auf die Dauer von drei Jahren geplant und durchgeführt. Als Verbundprojekt zeichnete es sich durch einen regen Austausch mit den Projektpartnern der SIEMENS AG, der FAU Erlangen und der RWTH Aachen aus.

Im Rahmen einer Neuevaluation der Einsatzmöglichkeit wurde der Einsatzbereich von der Ringbrennkammer zur Rohrbrennkammer geändert. Dies erfolgte in enger Abstimmung mit allen Projektbeteiligten und basierte hauptsächlich auf den als höher eingeschätzten Erfolgsaussichten bei diesen Anlagentypen. Es ergaben sich dadurch einige Veränderungen in den geplanten Arbeitspaketen, insbesondere eine Neubestimmung der Zielfrequenz, eine Neuberechnung der hierfür benötigten Absorbentypen und schließlich eine Abschätzung der Flächenwirkung der geplanten Absorber.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Projekts

4.1 Wissenschaftlich-technischer Stand

Die Messapparatur zur Bestimmung des Schallabsorptionsgrads auf Grundlage der ISO-Norm 10534-2 „Akustik - Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren - Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktion“³ war bereits vorhanden ebenso die Möglichkeit, die selbe Messstrecke auch zum Bestimmen der Strömungsresistenz nach ISO 9053:1991:“ Materialien für akustische Anwendungen; Bestimmung des Strömungswiderstandes“⁴ zu verwenden.

Ein keramisches Labor mit Grundausstattung bestand seit Beginn des Projekts. Rühr- und Mischgefäße wurden je nach Zustand erneuert. Keramische Pulver und Anmischflüssigkeit mussten im Projekt angeschafft werden.

Die für die keramische Materialentwicklung gewählte Herstellungsmethode bestand zu Beginn des Projekts noch nicht und wurde während der 2. Phase geändert. Das Platzhalterverfahren in Kombination mit „freeze casting“ stellte sich als nicht zielführend heraus. Die Porenabsorber wurden ab Mitte 2015 im Schäumungsverfahren hergestellt (siehe Zwischenbericht 3).

4.2. Eingesetzte Literatur

Entwicklung von porösen Keramiken:

Die grundlegende Literatur zur Herstellung von porösen Keramiken im Platzhalterverfahren und der Gefriergelieguss sind ausführlich im Abschlussbericht der Phase 1 beschrieben, im Folgenden wird nur noch auf die herangezogene Literatur zur Herstellung von Schaumkeramiken eingegangen.

Bei den am ZARM entwickelten Schaumkeramiken handelt es sich um einen hochfeststoffbeladenen, solbasierten Schlicker, in den mittels eines sich schnell drehenden Turbinenrührers Luftblasen eingerührt werden. Das Verfahren wird als Direktschäumung oder „direct foaming“ bezeichnet. Zur Herabsetzung der Oberflächenspannung wird eine Fettalkoholsulfat-Zubereitung benutzt, durch die eine gute Aufschäumung gewährleistet wird. Durch den Einsatz von Kieselsäure Nanopartikeln und unterschiedlichen Korngrößenfraktionen der Partikel im Schlicker werden die eingerührten Luftblasen stabilisiert. Dank des hohen Feststoffgehalts und der Gelierung des Sols bleibt der Schaum nach der Aufschäumung stabil und gewinnt während der Konsolidierung und Trocknung an Festigkeit. Das Herstellungsverfahren für geschäumte, keramische Porenabsorber wurde während des Projekts in Phase II am ZARM entwickelt. Neuartig ist hierbei die „Selbstkonsolidierung“ als Verfestigungsmechanismus. Ähnliche Herstellungsmethoden sind unter anderem von Gonzenbach⁵, Colombo⁶, Barg^{7 8} und Fujii⁹ und Fuks¹⁰ beschrieben und untersucht worden.

Einen guten Überblick über Schäume im Allgemeinen geben folgende zwei Bücher:

- Schramm, L. L.¹¹. *Emulsions, Foams, and Suspensions: Fundamentals and Applications*, Wiley.
- Weaire, D. L. and S. Hutzler¹². *The Physics of Foams*, Clarendon Press.

Folgende Bücher sind weitere, viel genutzte Standardwerke:

- H.Salmang, H. Scholze, *Keramik*, Springer Berlin Heidelberg, 2006¹³

- M. Scheffler, P. Colombo, *Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications*, 2006 ¹⁴
- L.J. Gibson, M. F. Ashby, *Cellular Solids: Structure and Properties*, Cambridge University Press, 1999 ¹⁵

Poröse Keramiken und Schaumkeramiken im speziellen werden sehr interdisziplinär behandelt und sind eine Schnittstelle von Materialwissenschaften, Physik, Chemie, Biologie, Mathematik, Medizintechnik und Lebensmittelindustrie.

Schallabsorptionssimulation

Kern der in der Schallabsorptionssimulation verwendeten Quellen bildeten die, dem zu Projektbeginn bereits verwendeten Modell zugrunde liegenden, Veröffentlichungen. Das Modell verwendet die sogenannte Theorie des homogenen Mediums (im Folgenden THM), die Mechel ^{16,17} auf Basis der Erkenntnisse von Zwicker und Kosten ¹⁸ entwickelte und die auf der Annahme eines weitgehend isotropen Absorbermaterials basiert. Die THM wurde vor Beginn des Projektes im ZARM zur Charakterisierung der Schallabsorptionseigenschaften poröser Absorber in verschiedenen Veröffentlichungen ^{1,19} und einer Dissertation ²⁰ verwendet und zu einer Hochtemperatur- und Hochdrucksimulation erweitert.

Der Vorteil der THM gegenüber anderen phänomenologischen Schallabsorptionsmodellen liegt in der geringen Anzahl notwendiger Materialparameter und ihrer leichten Verfügbarkeit. Andere untersuchte Modelle, wie das von Johnson-Allard-Champoux ²¹ oder Biot ²², die ebenfalls isotrope Materialien voraussetzen, erfordern sehr viel mehr Parameter, von denen einzelne nur schwer zu bestimmen sind oder aus anderen Simulationen gefittet werden müssen.

Ein Spezialfall innerhalb der phänomenologischen Modelle stellt die Betrachtung des Materials als doppelt porös dar. Ausgehend von der Beobachtung, dass das Einbringen von zylindrischen (Sack-)Löchern in eine poröse Fasermatte deren Absorption deutlich veränderte, entwickelte Sgard ein komplexes Modell, in dem das Material als Kombination der Hülle/Form und des porösen Materials beschrieben wird ²³. Dieses erste Modell wurde unter anderem von Venegas weiter vertieft ²⁴.

Im Unterschied zu den phänomenologischen Modellen betrachtet das von Lu entwickelte und von Hakamada erweiterte Strukturmodell²⁵ den Schallabsorber nicht mehr als Medium mit isotropen Eigenschaften, sondern als Folge von Zellen und Fenstern, die durch Kombination der Einzelimpedanzen eine Gesamtimpedanz des Systems ergeben. Dieses Modell erlaubt interessante Rückschlüsse auf den Einfluss von geometrischen Parametervariationen, die in anderen Modellen unberücksichtigt bleiben.

Die Untersuchung von Lochplatten erforderte weitere Literaturstudien. Dabei wurden Modelle von Munjal²⁶, Mechel¹⁶, Möser²⁷, Atalla²⁸, Beranek – Ingard^{29,30}, Allard – Ingard³¹ und Maa³² betrachtet. Besonders hilfreich bei der Auswahl war die vergleichende Zusammenfassung von Atalla und Sgard²⁸, auch wenn wir uns letztendlich nicht für das dort vorgestellte neue Modell entschieden haben.

5. Zusammenarbeit mit weiteren Stellen

Zusammenarbeit mit anderen Stellen erfolgte nicht.

II. Eingehende Darstellung

1. Simulationen zum optimalen Einsatz von Absorberstrukturen

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Simulationen zu schallabsorbierenden Materialien entwickelt, angepasst und getestet. Grundlage waren zunächst die bereits bekannten Simulationsansätze aus Projektphase 1, namentlich vor allen die Theorie des homogenen Mediums (THM). Diese wurden später um einen Oberflächen berücksichtigenden Ansatz erweitert.

Simulation geschichteter Absorber

Es gibt mehrere Gründe, einen geschichteten Aufbau der Absorber in Erwägung zu ziehen. Einerseits kann es notwendig sein, eine gut absorbierende, aber mechanisch wenig widerstandsfähige Absorberschicht durch eine stabilere Schicht zu schützen, deren schlechtere Absorptionseigenschaften möglichst geringen Einfluss haben sollen. Andererseits könnte sich herausstellen, dass für die untersuchten Bedingungen ein gradiertes, also ein sich in seinen akustischen Eigenschaften mit der Eindringtiefe ändernder Absorber bessere Ergebnisse erzielt. Schließlich muss auch die Möglichkeit erörtert werden, schützende Elemente vor der Absorberschicht, die nicht dem bisher untersuchten Absorber entsprechen (bspw. Lochplatten, Schlitzgitter) in die Simulation einbringen zu können.

Zur Simulation geschichteter Absorber wurden verschiedene Ansätze untersucht. Als bester Ansatz stellte sich die sogenannte „Acoustic Transmission Analysis“ (ATA)³³ heraus. Sie gleicht in ihrem modularem Aufbau und der Verknüpfung der einzelnen Absorberschichten weitestgehend dem Transfermatrixansatz, mit dem in der Temperatur- und Druckanpassung der THM die einzelnen Schichten zusammengerechnet werden und lässt sich daher sehr komfortabel auf das bestehende Modell aufsetzen. Die Implementierung von Lochplatten ist ebenfalls möglich und lässt sich ohne Probleme mit den beliebigen Schichtaufbauten kombinieren.

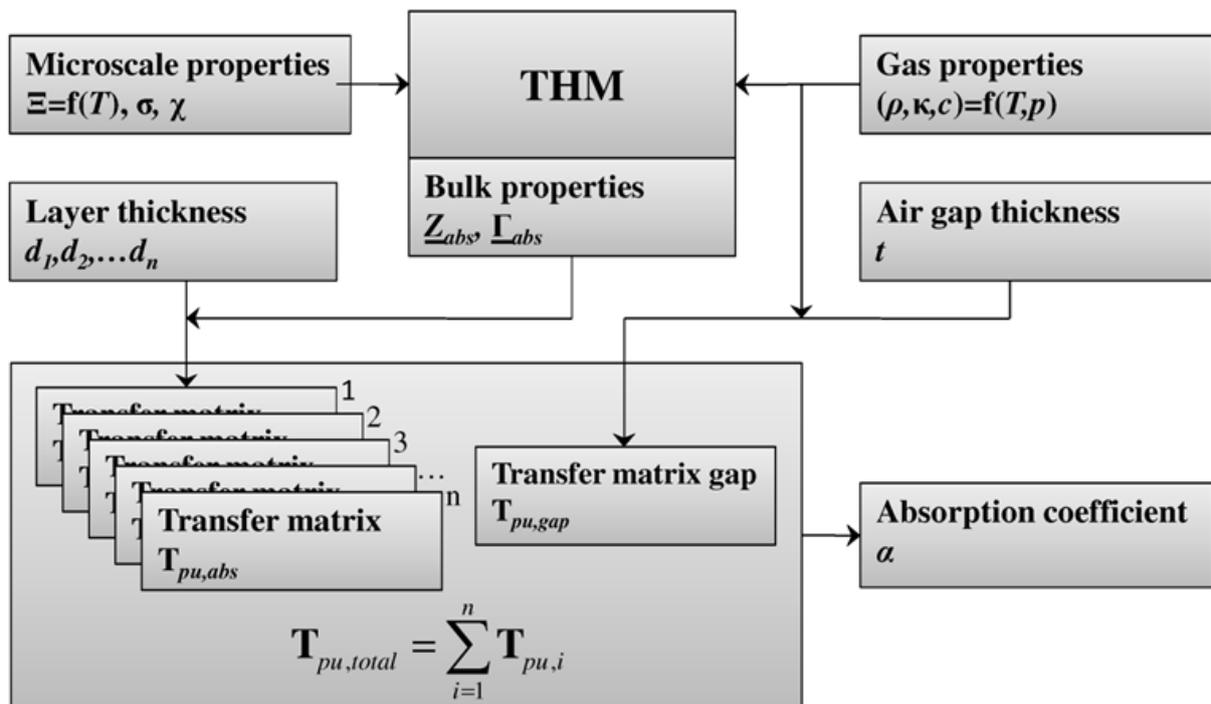


Abbildung 1: Ursprünglicher Ansatz der Hochtemperatur und Hochdrucksimulation². Der Aufbau der zusammengesetzten Transfermatrix links kann auch zur Beschreibung von unterschiedlichen Schichten verwendet werden.

Abbildung 1 zeigt das ursprüngliche Schema zur Berechnung der Schallabsorption eines Absorbers unter variierender Temperatur durch virtuelles Zerlegen in Einzelschichten unterschiedlicher Eigenschaften. Diese Einzelschichten dürfen aber auch real einzelne Schichten sein und auch in anderen Parametern als nur Temperatur und Dicke variieren. Die diversen sich daraus ergebenden Kombinationsmöglichkeiten können allerdings nicht mehr einfach in einem Diagramm dargestellt werden.

Im Rahmen einer Bachelor-Arbeit wurden Experimente mit Absorberschichten unterschiedlicher Absorptionseigenschaften durchgeführt und Vergleiche mit den Simulationsergebnissen gezogen. In Abbildung 2 wird beispielhaft ein Ergebnis der Untersuchung gezeigt. Die Bezeichnung s7s8 beschreibt hier einen Schichtverbund aus den Einzelschichten s7 und s8, wobei die erstgenannte Schicht zur Schalleinfallseite zeigt. Beide Schichten haben identische Dicken (15 mm), unterscheiden sich jedoch in ihrer Strömungsresistenz erheblich. Daher lässt sich auch ein unterschiedliches Verhalten der Absorptionskurven feststellen, je nachdem welche der Schichten zur Schalleinfallseite gerichtet ist. Wird zunächst die offenere Seite dem Schall entgegen gerichtet (s7s8), fällt die Absorptionskurve höher aus als umgekehrt. Dies lässt sich relativ anschaulich erklären, da eine offenere Schicht

weniger Schall an der Oberfläche reflektiert und somit überhaupt erst eine Absorption ermöglicht. Kommt die dichtere Schicht jedoch zuerst, so wird mehr Schall reflektiert und kann nicht mehr absorbiert werden. Für eine optimale Schallabsorption bietet sich ein graduell zunehmend dichter werdender Absorber also an.

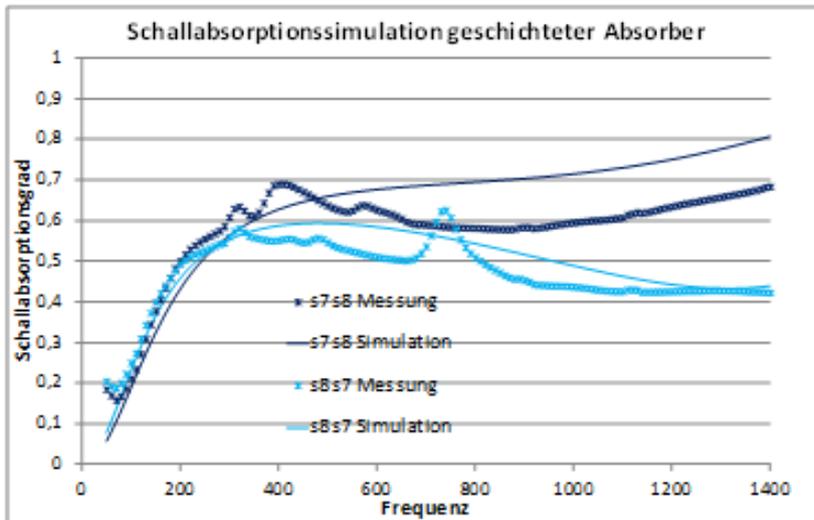


Abbildung 2: Schallabsorption geschichteter Absorber. Absorber s7 und s8 haben Strömungsresistenz $\Xi_{s7}=25 \text{ kPas/m}^2$ sowie $\Xi_{s8}=108 \text{ kPas/m}^2$. Dicke jeweils 15 mm.

Davon abgesehen trifft die Simulation die gemessenen Kurven relativ gut. Insbesondere gelingt es ihr auch, die unterschiedliche Frontseite gut wiederzugeben.

Simulation Lochplattenabsorber

Für die Untersuchung der Lochplattenabsorber wurden mehrere Serien von Lochplatten unterschiedlicher Charakteristik hergestellt, akustisch vermessen und mit den Modellwerten verglichen. Es wurde schließlich das Modell von Beranek-Ingard²⁹ ausgewählt. Für kleine Öffnungen, wie sie bei derartigen Anwendungen üblicherweise verwendet werden, erweist sich das Modell als sehr zuverlässig. Werden die Öffnungen jedoch größer, was im Sinne der Einbeziehung des dahinterliegenden Materials als sinnvoll erachtet wird, nimmt die Genauigkeit des Modells ab. Es kam dabei insbesondere zu einer deutlichen Unterschätzung der erreichten Schallabsorptionsleistung, sowie gelegentlich auch zu Unterschieden im Frequenzgang.

Abbildung 3 zeigt die Unterschiede in der Modellgenauigkeit. Während für dünne Platten mit kleinen Löchern (linkes Diagramm, Lochplatte hat Dicke 1 mm, Porosität 0,025 und Lochradius 0,5 mm) das Modell gut übereinstimmt, weicht die modellierte

Absorption bei durchgängigeren Lochplatten (Radius 3 mm, Dicke 10 mm, Porosität 0,02) in der Höhe deutlich von den Messungen ab.

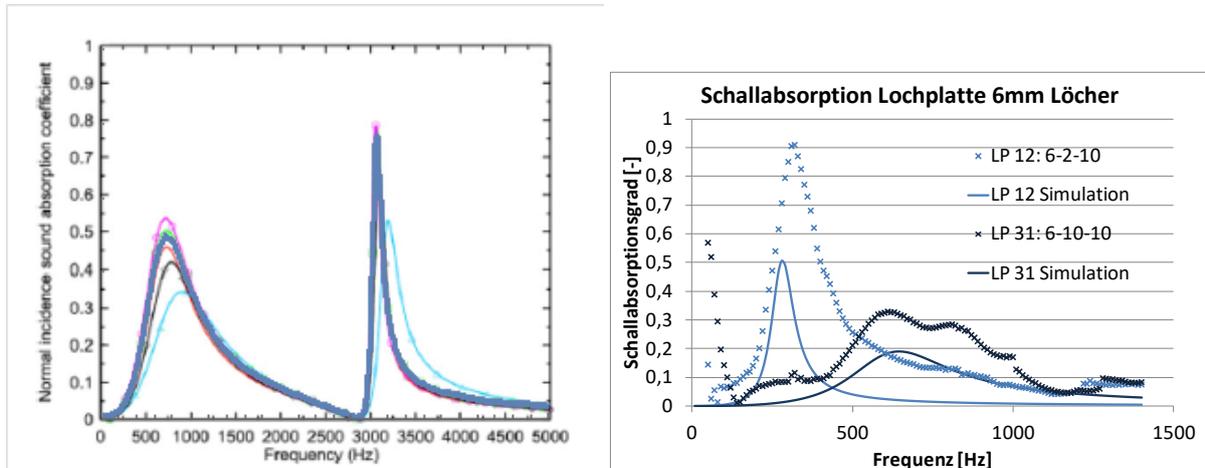


Abbildung 3: Links: Vergleich der verwendeten Lochplattensimulation mit Literaturwerten²⁸ für kleine Löcher ($r=0,5$ mm). Messwerte in pink, gewähltes Modell in blaugrau. Weitere Linien beschreiben andere Modellansätze. Rechts: Schallabsorption für größere Löcher ($r=3$ mm), Vergleich Messwerte und Modell.

Im Fall von aus Lochplatten und porösen Absorbern zusammengesetzten Kombinationen stimmen die Messungen mit den Ergebnissen jedoch wieder relativ gut überein. Dies zeigt Abbildung 4 exemplarisch an einem porösen Absorber und drei unterschiedlichen Lochplatten.

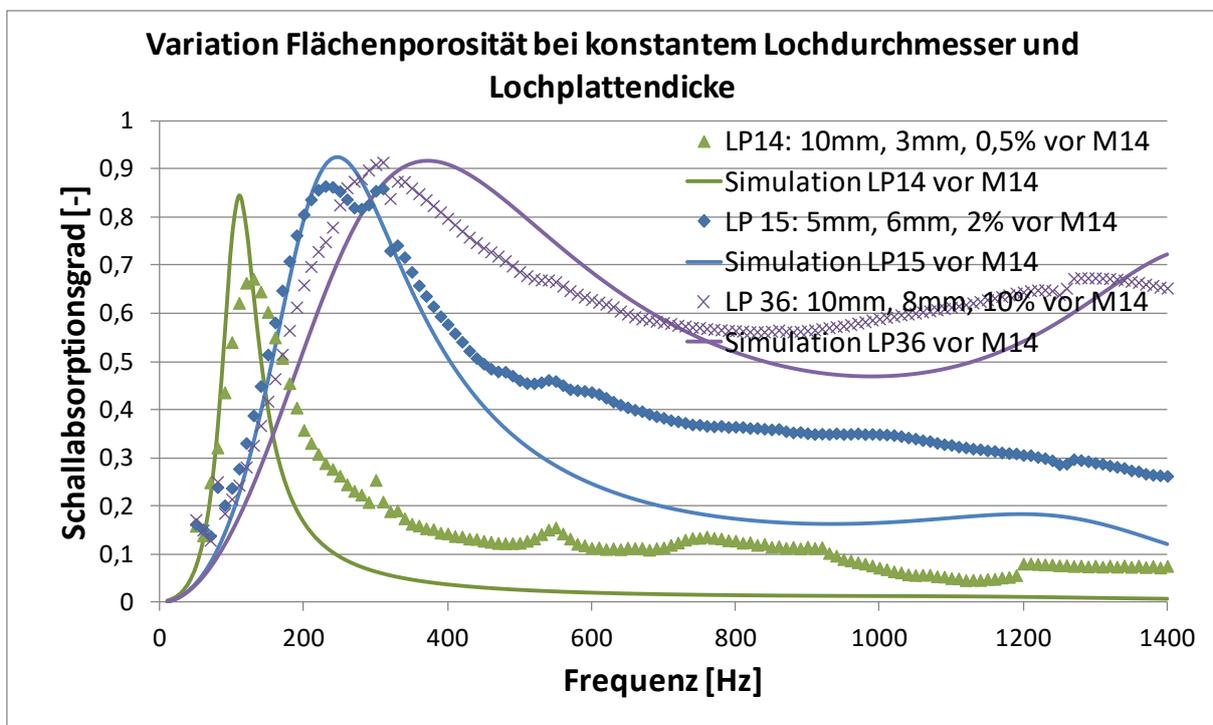


Abbildung 4: Vergleich der Simulation verschiedener Lochplatten vor einem porösen Absorber mit den Messwerten. Auffällig ist, dass die Lochplatte mit größerer Flächenporosität (10%) über den gesamten Verlauf besser getroffen wird.

Implementierung von Hochdruck und Hochtemperatur

Im Rahmen des Projektes ergaben sich Zweifel an der bisherigen Interpretation der Temperaturverteilung über die Tiefe der betrachteten Absorber. Aufgrund der bekannten Wärmeleitung keramischer Materialien und in gasförmigen Medien wie sie im Anwendungsfall zu erwarten sind, ist der Verlauf anders als in ¹⁹ angenommen wurde.

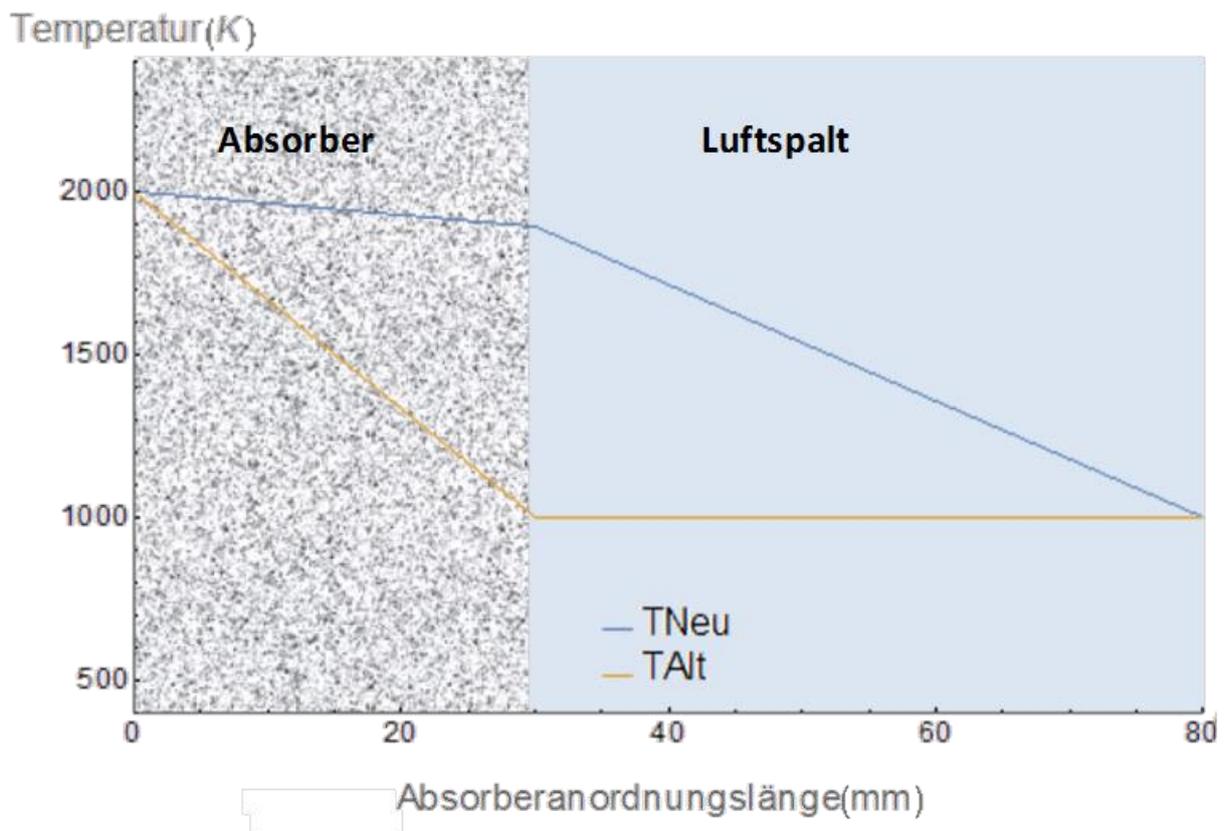


Abbildung 5: Angenommener Temperaturverlauf .

Abbildung 5 zeigt den veränderten Temperaturverlauf im Fall eines Wandabstandes hinter dem Absorber. Da es keine exakten Daten zur Wärmeleitung des verwendeten Materials, Strömungen im Bereich hinter dem Absorber und Wärmeübergang zwischen Absorber und umgebenden Medien gibt, sind die verwendeten Werte qualitativ. Sobald alle notwendigen Größen vorliegen, ist eine weitere Anpassung innerhalb des Modells geplant.

Weiterhin mussten die neu eingebrachten Modellteile, beispielsweise zur Bestimmung der Lochplattenabsorption, auf die Hochdruck- und

Hochtemperaturbedingungen des Anwendungsziels angepasst werden. Dies erfolgte analog zu den bereits bestehenden Modellen auf Basis der Stoffwerte und aus diesen abgeleiteten Größen wie Dichte, Schallgeschwindigkeit und dynamischer Viskosität.

Parameterstudie zur Identifikation idealer Absorberanordnungen

Mit Hilfe der entwickelten Simulation wurden Parameterstudien durchgeführt, um unter den vorhandenen, einschränkenden Bedingungen (hauptsächlich die räumliche Begrenzung, später aber auch der Wunsch nach monolithischen Absorbern), die optimalen Absorberparameter zu bestimmen. Zielparameter waren zunächst nur die Porosität, die Strömungsresistenz und Existenz sowie Tiefe eines etwaigen Wandabstandes. Strömungsresistenz und Porosität hängen je nach Material üblicherweise eng zusammen und können dann nicht als unabhängig einstellbar betrachtet werden.

Unter der Einschränkung eines sehr dünnen Absorbers und dem vorgegeben Zielfrequenzbereich unter 300 Hz konnten selbst bei größtmöglicher Freiheit für die Parameter nur sehr geringe Absorptionswerte erreicht werden. Frequenzen unter 150 Hz wurden weniger als 10% absorbiert.

Im Rahmen einer Neuorientierung des Einsatzgebietes wurde der Zielfrequenzbereich auf hohe Frequenzen verschoben (1000 Hz-6000 Hz) und eine Einbaumöglichkeit gefunden, die deutlich größere Tiefen ermöglicht. Unter diesen neuen Zielbedingungen wurden erneute Parameterstudien durchgeführt die zu deutlich besseren Ergebnissen führten.

Abbildung 6 zeigt ein Ergebnis der Parameterstudie. Hier wurde der Wandabstand mit 10 mm zugelassen und über zwei Absorberdicken (70 mm, 85 mm) durch Variation des Absorberparameters Strömungsresistenz die über alle Frequenzen gemittelt beste Schallabsorption bestimmt. Die gezeigten Absorber ähneln sich im Verlauf sehr, allein eine gewisse Frequenzverschiebung aufgrund der unterschiedlichen Gesamtlänge führt zu einer Frequenzverschiebung. Maxima und Minima bewegen sich jedoch nach dem initialen Anstieg bei 1000 Hz oberhalb eines

Schallabsorptionsgrads von 0,7. Im Mittel kann sogar von einer Schallabsorption größer als 0,8 ausgegangen werden.

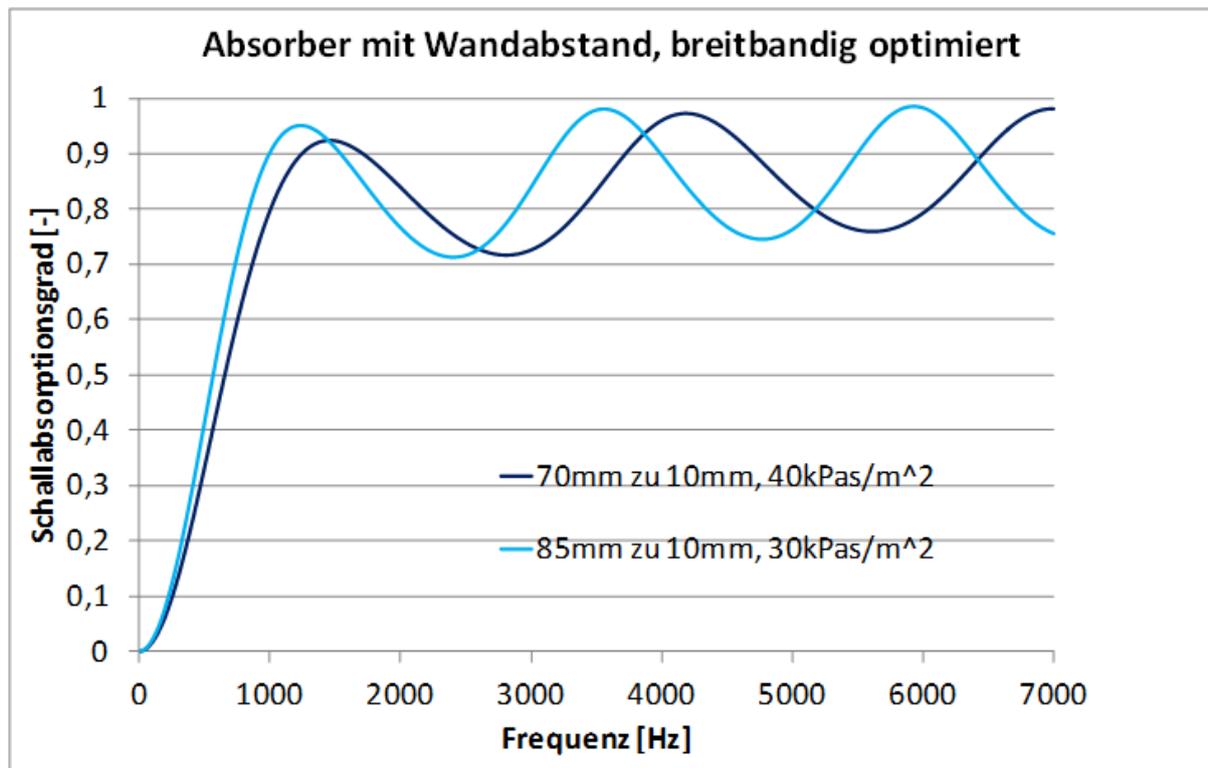


Abbildung 6: Schallabsorptionskurven der auf alle Zielfrequenzen optimierten Absorber mit Luftspalt. Das Verhältnis von Porosität zu Strömungsresistenz wurde entsprechend der selbstkonsolidierten Herstellungsmethode angenommen.

Weiterhin ist eine Verschiebung der Maxima zu besonders störenden Frequenzen durch entsprechende Anpassung der Absorberlänge leicht zu realisieren. Auf Basis dieser und weiterer Simulationen wurden zunächst drei vielversprechende Absorbertypen definiert (Typ I, Typ II und Typ III, Werte unter 2.3 für Prototypen in Tabelle 2: Sollwerte der Eigenschaften der unterschiedlichen Absorbertypen). Diese waren auf verschiedene konkret als kritisch angegebene Frequenzen abgestimmt.

Abschätzung der Flächenabsorption

Da die Simulation nur den ebenen Schalleinfall auf einen senkrechten Absorber simuliert, in der Anwendung jedoch ein ringförmig angeordnetes Array aus Absorbern einen zylinderförmigen Hohlraum bedämpft, war eine vergleichende Abschätzung der Absorptionswirkung im Vergleich zu den derzeit verwendeten Helmholtzresonatoren notwendig geworden. Hierzu wurde ein Verfahren herangezogen, das beim Projektpartner zur Qualifizierung und optimalen Verteilung der verwendeten Helmholtzresonatoren eingesetzt wird. Dabei wird die virtuelle Situation, dass der zylinderförmige Hohlraum von einem Absorber am hinteren Ende abgeschlossen wäre, als Basis für die Flächenwirkung des entsprechenden Absorbers verwendet. Für den genannten Fall hätte ein entsprechender Absorber tatsächlich die in der Simulation bestimmten (oder einem Impedanzrohr gemessenen) Absorptionseigenschaften. Nun wird angenommen, dass diese Fläche auf der Seitenwand den gleichen Einfluss hätte und entsprechende Veränderungen der Flächengröße diesen Einfluss linear verändern. Verschiedene Absorbertypen werden dann auf Basis ihres Flächenanteils in die Gesamtwirkung der Absorptionsanordnung aufgenommen. Zum Vergleich mit den bisher verwendeten Helmholtzresonatoren musste die Konduktanz der simulierten Absorber bestimmt werden, da die Zielvorgabe des Projektpartners eine Verbesserung der Konduktanz über die Frequenz war. Dies konnte durch geeignete Auswahl der drei vorgenannten Absorbertypen gewährleistet werden.

Von der ausgewählten Absorberanordnung lässt sich auch die erwartete Schallabsorption entsprechend dem vorgestellten Verfahren bestimmen. Es stehen insgesamt acht Positionen für gleichflächige Absorber zur Verfügung. In Abbildung 7 werden drei verschiedene Anordnungen gezeigt.

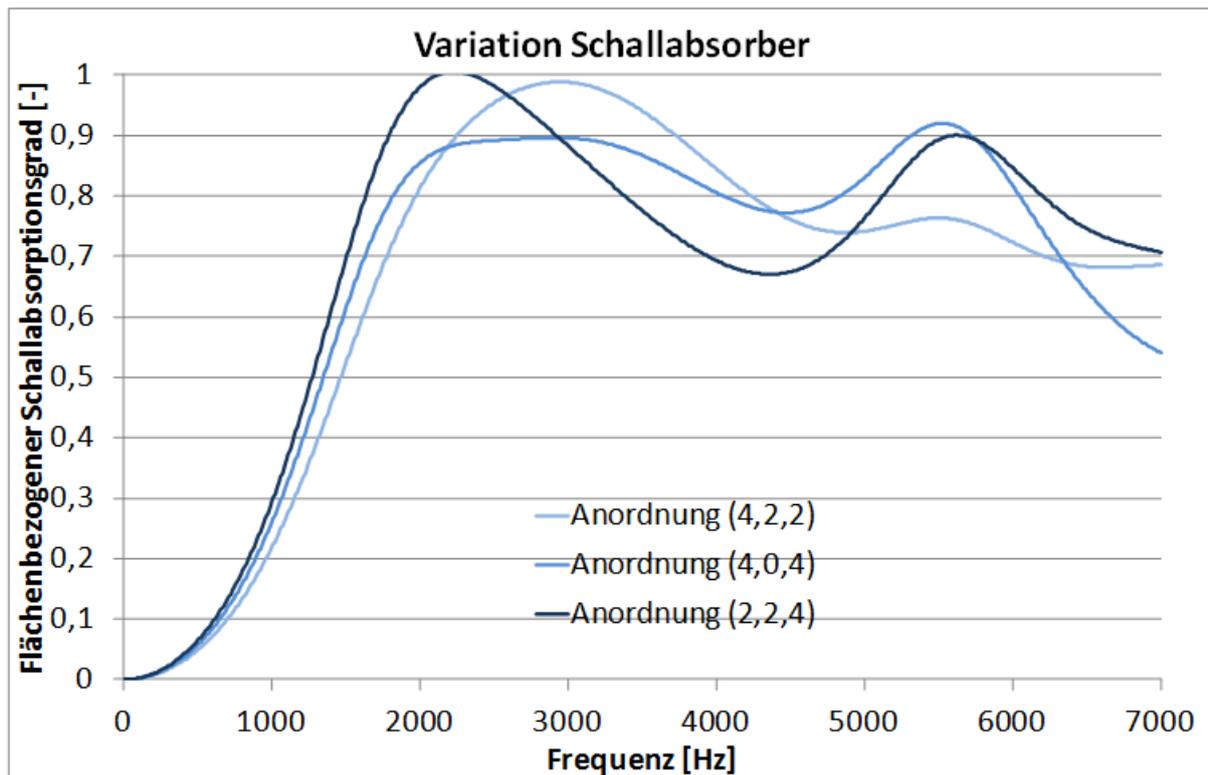


Abbildung 7: Darstellung der flächenbezogenen Schallabsorption für verschiedene Anordnungen der Schallabsorbertypen auf die acht zur Verfügung stehenden Positionen.

Dabei steht jede Ziffer für die Anzahl der verwendeten Absorbertypen. Die erste Position beschreibt Absorber des Typs I, die zweite Absorber Typ II und die dritte Absorber Typ III. Die hellblaue Linie zeigt also den ermittelten Verlauf für vier Absorber des Typs I, und je zwei Absorber der Typen II und III. Interessant ist die Anordnung (2,2,4), die durch die spezielle Art des Berechnungsverfahrens tatsächlich das Maximum der Schallabsorption von 1 überschreitet. Dies liegt insbesondere daran, dass die für die acht Absorber zur Verfügung stehende Fläche insgesamt größer ist, als der zur Normierung herangezogene Querschnitt des Hohlzylinders.

Ertüchtigung eines Impedanzrohrmesstandes zur Bestimmung von Schallabsorption unter Hochdruck- und Hochtemperaturbedingungen

Im Rahmen des Projektes wurde die Notwendigkeit validierender Messwerte zur Qualifizierung der verwendeten Simulationen als zunehmend wichtiger wahrgenommen. Entsprechend wurde begonnen, einen bestehenden Messaufbau zur Bestimmung von Schallabsorption unter erhöhtem Druck und erhöhter Temperatur zu ertüchtigen.

Der Messstand wurde im Rahmen einer Masterarbeit ausgelegt und konstruiert, die erst nach Ablauf des Berichtszeitraums mit dem Aufbau abgeschlossen sein wird. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Zielparameter für Druck und Temperatur als Ergebnis einer Abwägung zwischen den erwarteten Kosten, Sicherheit (insbesondere die Druckbehälterverordnung betreffend) und möglichst großer Nähe zum Anwendungsfall bestimmt. Sie ergeben sich zu einer maximalen Temperatur von 550°C und einem maximalen Druck von 6 bar und damit jeweils etwa einem Drittel der im Einsatz erwarteten Umgebungsbedingungen. Dies ist ein großer Schritt für die Validierung der Simulationsergebnisse, da bisher nur sehr wenige Literaturmesswerte zu Schallabsorption unter erhöhter Temperatur existieren und keine zu Schallabsorption unter Überdruck.

2. Form- und Probenbau

Der Schlicker auf Silikasilbasis setzt sich aus unterschiedlichen Al_2O_3 Korngrößenfraktion und einer Mullitfraktion zusammen. Durch einen sehr hohen Feststoffgehalt und den gezielten Einsatz tabularen Aluminiumoxids konnte die Viskosität des Schlickers, bei gleichbleibendem Feststoffgehalt, herabgesetzt werden, was die Aufschäumung erleichtert und gleichzeitig die Stabilität des Schaums erhöht, da eine höhere Packungsdichte innerhalb der Flüssigkeitslamellen im Schaum erzielt wird.

Beim Sintern reagiert das aus dem Sol ausgefallene SiO_2 mit dem Al_2O_3 wodurch die Schaumkeramik nur noch aus Mullit und Aluminiumoxid, was durch quantitative Röntgenanalyse (XRD + Rietveld) belegt wurde.

Zur Aufschäumung des Schlickers werden, je nach gewünschtem Schaumvolumen 1-2 m% eines Schäumungsmittel zugefügt und der Schlicker bei hoher Drehzahl mit einem Rührer mechanisch aufgeschäumt. In Abhängigkeit der gewünschten Porosität der gesinterten Schaumkeramik wird der Schlicker auf unterschiedliche Volumen aufgeschäumt. Die anfängliche Schaumdichte steht in direktem Zusammenhang mit Porosität und Strömungsresistenz der gesinterten Schaumkeramik.

In einer ersten Probenreihe wurden der aufgeschäumte keramische Schlicker neben Selbstkonsolidierung auch durch „freeze casting“ verfestigt, hier zeigte sich, dass die Festigkeit geringer ausfällt, als bei selbstkonsolidierten keramischen Schäumen. Des Weiteren wirken die elongierten Eisporen bei „freeze casting“ Proben als Sollbruchstellen entlang derer die Proben bei thermischer oder mechanischer Belastung bevorzugt brechen. Das Verfahren des „freeze casting“ wurde somit ganz verworfen. Siehe auch Zwischenbericht 4.

Auf Grund der guten Thermoschockergebnisse an $100 \times 100 \times 25 \text{ mm}^3$ Proben wurde mit der Herstellung von Prototypenrohlingen begonnen, die überdimensioniert hergestellt werden und nachfolgend außer Haus in die gewünschte Form gefräst werden (CNC Fräse bei WZR Ceramics Solution, Rheinbach). Die Endgeometrie der Absorber wurde in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner SAG entwickelt. Der Guss der Absorbertypenrohlinge erfolgt in nichtsaugende Formen.

2.1 für Impedanzrohr und Impedanzmessungen

Die beiden in Phase 1 hergestellten runden Formen zur Messung der Strömungsresistenz und Schallabsorption werden weiterhin zur Probenherstellung verwendet. Verschleißteile wie Spannhebel können nach Bedarf ausgetauscht und erneuert werden.

Um den Zusammenhang von Schaumdichte und Porosität der gesinterten Keramik zu untersuchen wurden Proben mit einer Porosität von 70 bis 86 % hergestellt (siehe Zwischenbericht 4)

Zudem wurde immer eine runde Probe aus derselben Schaummasse wie für Proben zur mechanischen Charakterisierung hergestellt um sicherzustellen, dass die Proben für die mechanischen Untersuchungen auch die richtige Strömungsresistenz besitzen.

2.2 für Werkstoffcharakterisierung

Für die Werkstoffcharakterisierung wurden folgende Parameter bestimmt: E-Modul, Biege- und Heißfestigkeit, Druckfestigkeit und Druckerweichen, sowie thermische Leitfähigkeit und thermischer Ausdehnungskoeffizient. Des Weiteren wurde vom Projektpartner Siemens AG die Thermoschockverträglichkeit im Hot HCF Teststand untersucht. Da für die jeweiligen Untersuchungen unterschiedliche Probenformen benötigt werden, wurde ein großer Gusskasten von 220 x 230 x 80 mm³ gebaut, der sich durch verschieben der Seitenteile verkleinern lässt, so dass alle verschiedene Probenformate darin gegossen werden konnten. Die unterschiedlichen Probenformate sind in Tabelle 1 gezeigt. Bei der Herstellung der besonders dicken bzw. langen Proben für Druckerweichen und zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit der Heißdrahtmethode lag die Herausforderung in der rissfreien Trocknung der Proben. Hierfür wurden die Proben extrem langsam getrocknet. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse flossen in die Trocknung der ebenfalls sehr großen Prototypenrohlinge ein.

Nach der Bestimmung der Materialeigenschaften der unterschiedlichen Material-Typen wurde die Halterung der Prototypen ausgelegt und vom Projektpartner SAG gebaut.

Tabelle 1: Probenformate für die Werkstoffcharakterisierung

Probenformat für	Höhe [mm]	Breite [mm]	Länge [mm]
Hot HCF	25	100	100
Biegefestigkeit	25	25	150
Heißbiegefestigkeit	25	25	150
E-Modul	25	25	150
Druckfestigkeit	25	25	40
Druckerweichen	65	90	70
Wärmeleitfähigkeit	65	100	210
Dilatometrie	6	6	50

2.3 für Prototypen

Auf Grund der zu dämpfenden Frequenzen und nach Vorgaben der Simulation werden drei unterschiedliche Arten von Prototypen (Typ I, Typ II und Typ III) hergestellt, deren Geometrie sich nur in der Höhe unterscheidet. Für die Herstellung von Prototypenrohlingen wurden 6 neue Formen aus Kunststoff konstruiert und gebaut, zwei für jeden Typ. Bis zum Ende der Berichtszeitraumes wurden 15 Prototypenrohlinge (9 x Typ III, 3 x Typ II und 3 x Typ I) hergestellt, an denen keinen Herstellungsfehler zu finden waren. Die weitere Nachbearbeitung soll am WZR Ceramics Solutions erfolgen. Die Zieleigenschaften der Absorbertypen sind in Tabelle 2 gelistet.

Tabelle 2: Sollwerte der Eigenschaften der unterschiedlichen Absorbertypen

	Absorber Typ I	Absorber Typ II	Absorber Typ III
Sollströmungsresistenz (Sollwert) [kPas/m²]	50	75	100
Porosität (Sollwert) [%]	83	81.7	80
Rohdichte [g/cm³]	0.56	0.61	0.70

2.5. Weiterführende Versuche

Beschichtung der Schaumkeramik

Die Oberfläche der hochporösen Schaumkeramiken besteht aus einzelnen Stegen der angeschnittenen Porenstruktur, wie in Bild 1 am linken Bildrand zu sehen. Um mögliche Ausbrüche oder Oberflächenschäden zu vermeiden wurden Versuche zur Beschichtung der porösen Struktur mit einer dichteren Schicht unternommen. Zur Beschichtung wurde ein Schlicker derselben Zusammensetzung wie die Matrix verwendet, um Schrumpfungs- und Schwindungsdiskrepanzen zu minimieren. Die Beschichtung erfolgte manuell. Durch Nacharbeitung kann eine ungefähre Schichtdicke eingestellt werden. Wie in Bild 1 am oberen Bildrand gezeigt ist verfüllt die Beschichtung die äußeren Poren, verbindet sich allerdings nur teilweise mit der porösen Matrix. Dennoch ist eine Härteerhöhung der Oberfläche durch die Beschichtung zu erwarten, wobei beispielsweise die Druckfestigkeit des porösen Körpers nicht beeinflusst wird. Ob und wie die geplanten Prototypen beschichtet werden, ist zum derzeitigen Zeitpunkt nicht abschließend geklärt.

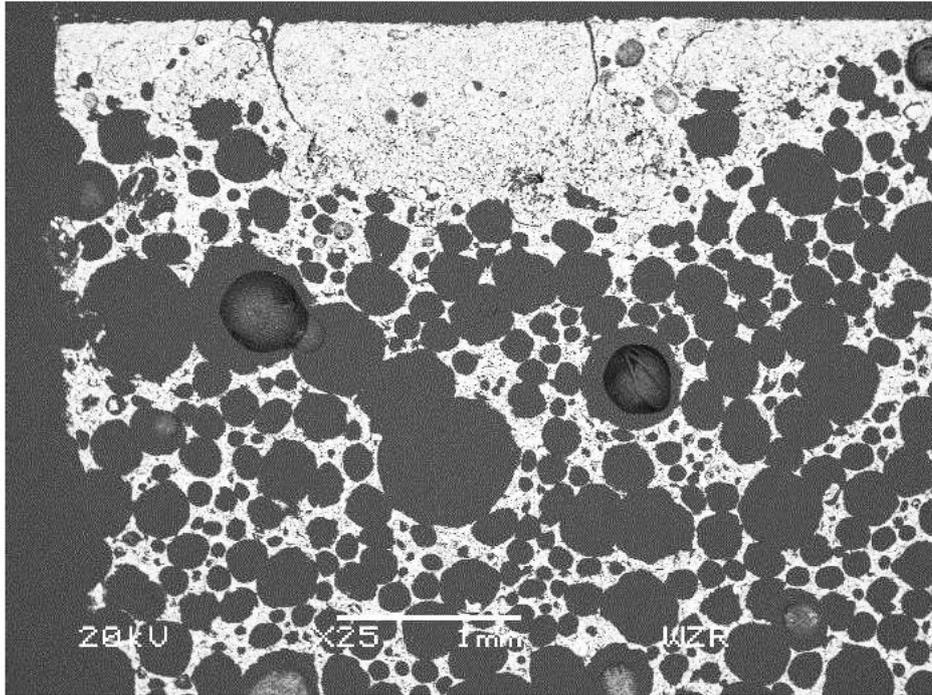


Bild 1: REM Aufnahme einer infiltrierten Schaumkeramik, die dunklen Bereiche stellen die Poren dar, die hellen Bereiche zeigen keramisches Material. Auf der linken Seite ist die nicht sbeschichtete Außenfläche zu sehen, am oberen Bildrand eine Beschichtete Fläche.

Qualitätssicherung

Um fehlerhafte Probe auszusortieren wurden alle hergestellten Proben mit einer LED Flächenleuchte durchleuchtet und ein Schadenskatalog aufgestellt. Anhand der Durchlichtaufnahmen können herstellungsbedingte Schäden wie Gussfehler und Inhomogenitäten detektiert werden (siehe Abbildung 8). Im Gegensatz zu Rissen die senkrecht zur Oberfläche stehen können Risse die parallel zur Probenoberfläche verlaufen mittels Durchleuchtung nicht sichtbar gemacht werden. Ein geeignetes Verfahren dazu wird noch gesucht.

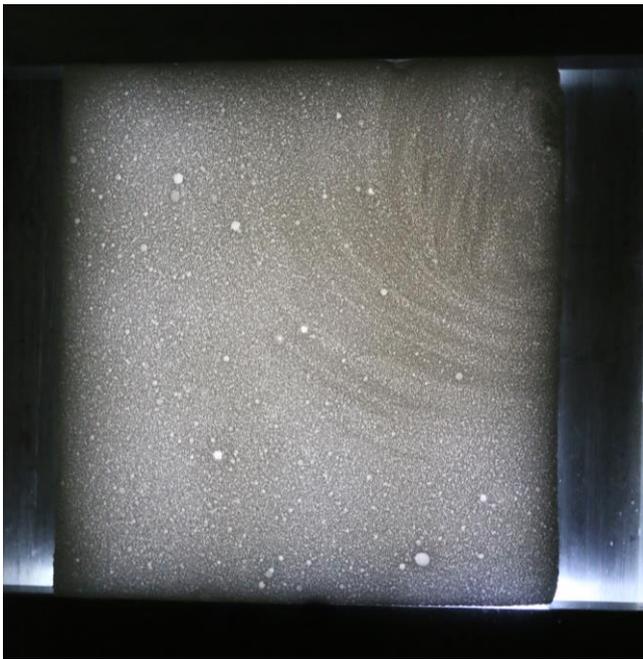


Abbildung 8: Durchlichtaufnahme einer Probe mit Gussfehlern im oberen rechten Bereich. Die durch einen fehlerhaften Guss entstandenen Inhomogenitäten können beim Ther

Vorversuche zu Schaumkeramiken

Folgende Vorversuche zu keramischen Schäumen wurden durchgeführt, um eine geeignete Herstellungsmethode zu finden und den Schaum zu optimieren:

- Verfestigungsmethode (Konsolidierung):
 - „Acid induced Consolidation“ (AIC)
 - „Protein Coagulation Casting“ (PCC)
 - „Freeze Casting“ (FC)
 - „Self Consolidation“ (SC)
- Bestimmung des Feststoffgehalts um einen stabilen Schaum zu erzeugen
- Erprobung unterschiedlichen Formmaterials und Entfomungshilfsmittel
- Versuche zum Zusammenhang von Schaumvolumen bzw. Dichte, Porosität und Strömungsresistenz

4. Referenzen

- 1 F. Giese, Eigenbrod, Ch., Koch, D., "A Novel Production Method for Porous Sound-Absorbing Ceramic Material for High-Temperature Applications," *Int. J. Appl. Ceram. Technol.* 8 (3), 646-652 (2010).
- 2 Frank Giese, Hans-Christoph Ries, and Christian Eigenbrod, presented at the Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air, Glasgow, UK, 2010 (unpublished).
- 3 DIN, "Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - Part 2: Transfer-function method (ISO 10534-2:1998)", in *German version EN ISO 10534-2* (Deutsches Institut für Normung e.V., 2001).
- 4 DIN, "Acoustics; materials for acoustical applications; determination of airflow resistance (ISO 9053:1991)", in *German version EN 29053* (Deutsches Institut für Normung e.V., 1993).
- 5 Urs T. Gonzenbach, André R. Studart, David Steinlin, Elena Tervoort, and Ludwig J. Gauckler, "Processing of Particle-Stabilized Wet Foams Into Porous Ceramics," *Journal of the American Ceramic Society* 90 (11), 3407-3414 (2007);
Urs T. Gonzenbach, André R. Studart, Elena Tervoort, and Ludwig J. Gauckler, "Ultrastable Particle-Stabilized Foams," *Angewandte Chemie International Edition* 45 (21), 3526-3530 (2006).
- 6 Paolo Colombo and JohnR Hellmann, "Ceramic foams from preceramic polymers," *Mat Res Innovat* 6 (5-6), 260-272 (2002).
- 7 Suelen Barg, Christian Soltmann, Miria Andrade, Dietmar Koch, and Georg Grathwohl, "Cellular Ceramics by Direct Foaming of Emulsified Ceramic Powder Suspensions," *Journal of the American Ceramic Society* 91 (9), 2823-2829 (2008).
- 8 Suelen Barg, Elisângela Guzi de Moraes, Dietmar Koch, and Georg Grathwohl, "New cellular ceramics from high alkane phase emulsified suspensions (HAPES)," *Journal of the European Ceramic Society* 29 (12), 2439-2446 (2009).

- 9 Takamitsu Fujiu, Gary L. Messing, and Wayne Huebner, "Processing and Properties of Cellular Silica Synthesized by Foaming Sol-Gels," *Journal of the American Ceramic Society* 73 (1), 85-90 (1990).
- 10 David Fuks, Gennady E. Shter, Meirav Mann–Lahav, and Gideon S. Grader, "Crack-Free Drying of Ceramic Foams by the Use of Viscous Cosolvents," *Journal of the American Ceramic Society* 93 (11), 3632-3636 (2010).
- 11 L.L. Schramm, *Emulsions, Foams, and Suspensions: Fundamentals and Applications*. (Wiley, 2006).
- 12 D.L. Weaire and S. Hutzler, *The Physics of Foams*. (Clarendon Press, 2001).
- 13 H. Salmang and H. Scholze, *KERAMIK*. (Springer Berlin Heidelberg, 2006), 7 ed.
- 14 M. Scheffler and P. Colombo, *Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications*. (Wiley, 2006).
- 15 L.J. Gibson and M.F. Ashby, *Cellular Solids: Structure and Properties*. (Cambridge University Press, 1999).
- 16 F. P. Mechel, *Schallabsorber, Band II - Innere Schallfelder, Strukturen*. (S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1995).
- 17 F. P. Mechel, *Schallabsorber, Band III - Anwendungen* (S. Hirzel Verlag Stuttgart, 1998).
- 18 C. Zwicker, J. V. D. Eijk, and C. W. Kosten, "Absorption of sound by porous materials III," *Physica* 8 (10), 469-476 (1941).
- 19 F. Giese, Ries, H.C., Eigenbrod, Ch., "On the Performance of Porous Sound Absorbent Material in High Temperature Applications," *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power (JEGTP)* 132 (8) (2010).
- 20 Frank Giese, Universität Bremen, 2011.
- 21 Yvan Champoux and Jean-F Allard, "Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media," *J Appl Phys* 70 (4), 1975-1979 (1991); J. F. Allard, *Propagation of sound in porous media, modeling sound absorbing materials*.

(Elsevier Applied Science, New York, 1993); David Linton Johnson, Joel Koplik, and Roger Dashen, "Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media," *Journal of Fluid Mechanics* 176, 379-402 (1987).

22 M. A. Biot, "Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid .1. Low-Frequency Range," *Journal of the Acoustical Society of America* 28 (2), 168-178 (1956); J. F. Allard and A. Aknine, "Biot Theory and Acoustical Properties of High Porosity Fibrous Materials and Plastic Foams," *Acustica* 56 (3), 221-227 (1984); J. F. Allard, C. Depollier, P. Rebillard, W. Lauriks, and A. Cops, "Inhomogeneous Biot Waves in Layered Media," *J Appl Phys* 66 (6), 2278-2284 (1989).

23 F. C. Sgard, X. Olny, N. Atalla, and F. Castel, "On the use of perforations to improve the sound absorption of porous materials," *Applied Acoustics* 66 (6), 625-651 (2005).

24 Rodolfo Venegas and Olga Umnova, presented at the Proceedings of Comsol Conference, 2010 (unpublished); Rodolfo Venegas and Olga Umnova, "Acoustical properties of double porosity granular materials," *The Journal of the Acoustical Society of America* 130 (5), 2765-2776 (2011).

25 T. J. Lu, F. Chen, and D. P. He, "Sound absorption of cellular metals with semiopen cells," *Journal of the Acoustical Society of America* 108 (4), 1697-1709 (2000); Masataka Hakamada, Tetsunome Kuromura, Youqing Chen, Hiromu Kusuda, and Mamoru Mabuchi, "High sound absorption of porous aluminum fabricated by spacer method," *Appl Phys Lett* 88 (25), 254106 (2006).

26 M. L. Munjal, *Acoustic of Ducts and Mufflers*. (Wiley-Interscience, New York, 1987).

27 M. Möser, *Technische Akustik*. (Springer, 2009).

28 Nouredine Atalla and Franck Sgard, "Modeling of perforated plates and screens using rigid frame porous models," *Journal of Sound and Vibration* 303 (1–2), 195-208 (2007).

29 Leo L Beranek and István L Vér, *Noise and vibration control engineering*. (John Wiley & Sons New York, 1992).

- 30 M. L. Munjal, Anthony G. Galitsis, and István L. Vér, "Passive Silencers", in *Noise and Vibration Control Engineering* (John Wiley & Sons, Inc., 2007), pp. 279-343.
- 31 J. F. Allard and N. Atalla, *Propagation of Sound in Porous Media - Modeling Sound Absorbing Materials*. (John Wiley and Sons Ltd., 2009), 2nd ed.
- 32 Dah-You Maa, "Microperforated-panel wideband absorbers," (1987).
- 33 F-C Lee and W-H Chen, "Acoustic transmission analysis of multi-layer absorbers," *Journal of Sound and Vibration* 248 (4), 621-634 (2001).

5. Erfolgte und eingereichte Veröffentlichungen

Ende des Berichts.