

Abschlussbericht Nr.: 1/A442/24

Flexible Wandstrukturen für akustische Liner (FLIER)

**Teilvorhaben: „Untersuchung von neuartigen geometrieangepassten
Schallabsorbern aus neuartigen Kunststoffen für Luftfahrtapplikationen“**

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Niels Modler

Projektnummer /
Förderkennzeichen: 20E1915C

Seiten: 35
Abbildungen: 32
Tabellen: 1

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

Datum: 09/2024

Bearbeitungszeitraum: 01.06.2020 - 31.03.2024

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung	3
1.1	Aufgabenstellung	3
1.2	Voraussetzungen des Verbundvorhabens	3
1.3	Planung und Ablauf des Verbundvorhabens	4
1.4	Technischer/wissenschaftlicher Stand zu Beginn des Vorhabens	6
1.5	Zusammenarbeit mit Dritten.....	8
2	Ergebnisse des Teilprojektes	9
2.1	Charakterisierung und Modellierung von Materialien und Linerkonzepten (HAP1) ...	9
2.2	Fertigungstechnologie Linersegment (HAP1).....	12
2.2.1	Erstellung Fertigungskonzepte (AP2.1)	12
2.2.2	Durchführung von Fertigungsstudien und Fertigung der Liner-.....	15
2.3	HAP3 Charakterisierung Linersegmente	23
2.4	Integrationstechnologie und Bewertung.....	23
3	Verwertung der Forschungsergebnisse.....	34
4	Forschungsergebnisse Dritter	34
5	Veröffentlichungen	35
5.1	Arbeiten mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung.....	35
	Literaturverzeichnis.....	35

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Aufbauend auf den Ergebnissen, dem Wissen und der erfolgreichen Vernetzung der Partner des Projekts „LAKS“ soll in dem hier beschriebenen Vorhaben „FLIER“ eine konsequente Weiterentwicklung der Linertechnologie mit flexiblen Wandstrukturen erfolgen. Basierend auf dem Nachweis der Funktion der Technologie (TRL3) müssen nun diverse Aspekte der Anwendung detaillierter untersucht werden. So werden etwa anhand der Definition geeigneter Materialien und der modellbasierten Schwingungsanalyse, der Aufbau neuartige Liner mit flexiblen Strukturen entwickelt. Dabei gilt es insbesondere potentiell geeignete Fertigungsstrategien sowie strukturmechanisch-akustische Vorgaben zu berücksichtigen. Ziel ist es, durch die flankierende Durchführung von Fertigungsstudien, die optimale Linerstruktur aus akustischer, strukturmechanischer und fertigungstechnischer Sicht zu ermitteln. Dabei sollen gegenüber dem Vorgängervorhaben neben dem Helmholtz-Resonator-Liner-Prinzip (HR-Liner) ebenfalls das Prinzip des Plattenresonator-Liners (PR-Liner) untersucht werden. Im Anschluss an die Entwicklung und Fertigung der Vorzugsvariante, wird auf Grundlage einer experimentellen Versuchsreihe, der Nachweis und die Quantifizierung der Krümmbarkeit der Linersegmente erfolgen. Die gewonnenen Erkenntnisse werden von einer ebenen Demonstratorstruktur auf eine gekrümmte übertragen und hinsichtlich der geometrischen Auswirkungen charakterisiert. Das finale Ziel ist die Fähigkeit, gekrümmte Linerstrukturen fertigen zu können, deren Funktionsnachweis im Labormaßstab (z.B. in einem „Barrel Rig“) erbracht werden kann (TRL4).

1.2 Voraussetzungen des Verbundvorhabens

Die Notwendigkeit, passive Schalldämpfer für Flugzeugtriebwerke zu verbessern, ergibt sich direkt aus der Forderung, die Lärmbelastung an und um Flughäfen herum zu verringern – trotz stetig wachsender Flugbewegungen und Passagierzahlen. In der EU setzen Programme wie „Flightpath 2050“, „Fit-for-55“ und „Fly the Green Deal“ entscheidende Impulse, um Effizienzsteigerungen, die Reduktion von CO₂-Emissionen und anderen Schadstoffen sowie die Lärminderung zukünftiger Flugzeuge zu fördern. Neben dem Bedarf an radikalen Veränderungen, wie der Umstellung auf nachhaltige Kraftstoffe, grünen Wasserstoff und die (teilweise) Elektrifizierung von Fluggeräten, sind insbesondere weitere Effizienzsteigerungen bei bestehenden Antrieben wie der Fluggasturbine notwendig.

Für eine weitere Reduzierung der Schallemission von zukünftigen Flugzeugen ist die Senkung des Triebwerklärms von herausragender Bedeutung. Zu dieser Thematik wurden durch vorangegangene Forschungsvorhaben bereits beachtliche Erfolge erzielt, etwa durch lärmarmes Design (z.B. Cut-off-Auslegung für bestimmte Schaufeltöne), die Erhöhung des Nebenstromverhältnisses sowie durch den großflächigen Einsatz von akustisch wirksamen Linern.

Zukünftige Triebwerksentwicklungen zielen hauptsächlich aus Effizienzgründen auf eine weitere Erhöhung des Nebenstromverhältnisses bei gleichzeitiger Verkürzung der Triebwerksgondeln ab. Diese Verkürzung wird zu einer Reduktion der, zur Installation von Linern, zur Verfügung stehenden Fläche führen. Daraus leitet sich die Forderung nach dem Einsatz hocheffizienter – und vor allem über einen großen Frequenzbereich wirksamer – schalldämpfender Liner ab, die durch konventionelle Ausführungsvarianten derzeit nicht erreicht werden kann. Im Hinblick auf die Beeinträchtigung von Anwohnern durch den kontinuierlich zunehmenden Luftverkehr ist die Entwicklung und Erprobung innovativer Technologien zur Lärmreduktion und zur weiteren Absenkung des Triebwerks- und damit des Gesamtfluglärms von hoher Bedeutung.

Die Grundidee des Helmholtz-Resonator-Liners mit flexiblen Wandelementen (HR-Flex bzw. FXW) wurde im Laufe der Bearbeitung des Projektes LAKS von den Projektbeteiligten als Patent angemeldet (Erteilung Juni 2021, DE102017205515A1).

1.3 Planung und Ablauf des Verbundvorhabens

Das Projekt FLIER wurde im Rahmen der Förderlinie ökoeffizientes Fliegen und disruptive Technologien des LuFo-Programms VI-1 durch die Technische Universität Dresden (TUD), Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik in Zusammenarbeit mit drei weiteren Partnern beantragt und bearbeitet. Die beteiligten Partner waren

- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Antriebstechnik, Abteilung Triebwerksakustik (Leitung des Verbundprojektes)
- Technische Universität Cottbus-Senftenberg; Lehrstuhl für Flug-Triebwerksdesign (BTU-FTD)

Innerhalb der Technischen Universität Berlin waren die Fachgebiete:

- FG Technische Akustik (TUB-TA)
- FG Turbomaschinen- und Thermoakustik (TUB-TTH)

Im Verlauf des Projekts erfolgte ein Wechsel des Antragstellers TUB-TTH durch Rufannahme an die BTU Cottbus-Senftenberg. Die entsprechenden Arbeiten wurden nahtlos fortgesetzt und sowohl durch DLR als auch durch TUB-TA weiter betreut und unterstützt.

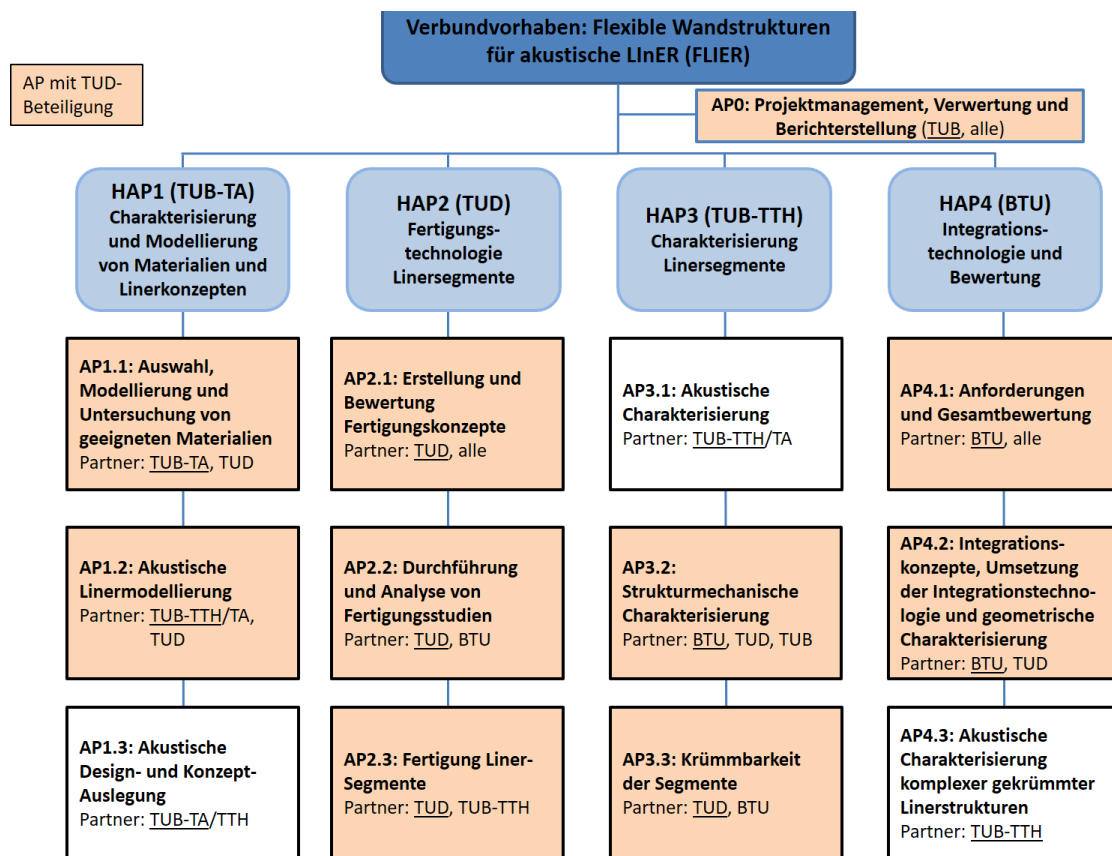


Abbildung 1: Grafische Darstellung der Projektstruktur

Abbildung 1 zeigt die Projektstruktur des Verbundprojekts. Darin ist durch die Verwendung der Abkürzungen der Verbundprojektpartner jeweils deren Beteiligung an den einzelnen Hauptarbeits- und Unterarbeitspaketen ersichtlich. Die Hauptverantwortlichkeit für die einzelnen Arbeitspakete ist durch das Unterstreichen der Abkürzung der verantwortlichen Partner gekennzeichnet. Die Schwerpunkte der Arbeiten der TUD lagen in den Arbeitspaketen AP2.1, AP2.2, AP2.3 und AP3.3.

Die ursprüngliche Projektlaufzeit war für den Zeitraum vom 1.6.2020-30.09.2023 geplant. Durch den Einstellungsprozess bei den beteiligten Fachgebieten und umfangreichen Pandemiebedingten Einschränkungen wurden nach Abstimmung mit dem Projektträger die Meilensteine und der Projektfortschritt auf einen "virtuellen Starttermin" 01.11.2020 bezogen. Im Laufe der Projekt-Bearbeitung ergaben sich weitere kleinere Verzögerungen, sodass die vollständige Erreichung der gesteckten Projektziele innerhalb der ursprünglichen Projektlaufzeit (30.09.2023) als nicht realistisch eingeschätzt wurde. (Linerbarrel), bei den detaillierteren Messungen durchgeführt werden konnten, als ursprünglich im Projektplan vorgesehen waren.

Das Verbundprojekt wurde daher um 6 Monate bis zum 31.03.2024 kostenneutral verlängert. Die Verlängerung ermöglichte u.a. die fertigungstechnische Umsetzung und experimentelle akustische Analyse der gekrümmten Linerstrukturen.

1.4 Technischer/wissenschaftlicher Stand zu Beginn des Vorhabens

Mit zunehmendem Verkehrsaufkommen im Bereich der Luftfahrt besteht, insbesondere in Städten mit hochfrequentierten Flughäfen, die Forderung nach einer deutlichen Reduktion der abgestrahlten Schallleistung. So werden im Mobilitätssektor Helmholtz-Resonatoren (HR) als Schalldämpfer, etwa in Form von Sandwichkonstruktionen, sogenannte HR-Liner, eingesetzt [1,2]. Diese Schalldämpfer bestehen aus einer Grundsicht, einer perforierten Deckschicht und einer dazwischenliegenden Hohlraumstruktur, für die beispielsweise in Luftfahrtanwendungen phenolharzgetränkte Aramid- oder Aluminiumwabenkerne zum Einsatz kommen (Abbildung 2a) [3]. Aufgrund ihres physikalischen Wirkprinzips beschränkt sich die Dämpfungswirkung derartiger Resonatoren jedoch nur auf einen schmalen Frequenzbereich. Daher können sie nicht zur effizienten Dämpfung – in praxi häufig auftretender – breitbandiger Geräusche eingesetzt werden.

Ein erfolversprechender Ansatz zur Verbreiterung und Erhöhung der Absorptionscharakteristik solcher HR-Liner ist die Verwendung von Wabenkernen mit partiell nachgiebigen Zellwänden, die infolge luftschallbedingter Druckänderungen zu gedämpften Schwingungen angeregt werden und so dem Schallfeld zusätzlich Energie entziehen (Abbildung 2b) [4-6]. Aufgrund ihrer niedrigen Dichte und geringen Wandstärke sowie ihrer hohen Materialdämpfung eignen sich insbesondere biegeeweiche thermoplastische Kunststofffolien für diese nachgiebigen Zellwandbereiche. Um gleichzeitig die erforderliche Tragfähigkeit des Sandwichaufbaus in Dickenrichtung sicherzustellen, bietet sich eine funktionsintegrierende hybride Bauweise an, die neben den nachgiebigen Zellwänden aus akustisch wirksamen Thermoplastfolien auch druck- und schubsteife Zellwände aus matrixgleichen Faserverbunden beinhaltet.

Die folgenden Wirkprinzipien, Bauweisen und Technologien, die in diesem Zusammenhang stehen, zeigen daher den wissenschaftlich verwertbaren Stand der Forschung auf.

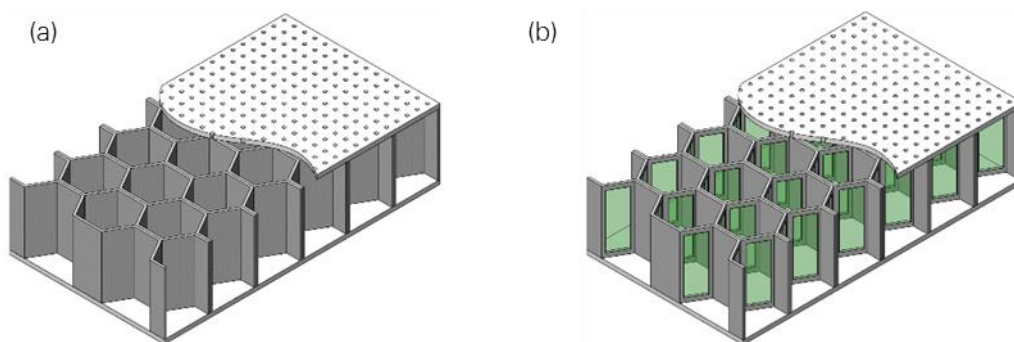


Abbildung 2: Schematischer Aufbau verschiedener HR-Liner: (a) konventioneller Liner, (b) neuartiger Liner mit nachgiebigen Zellwandbereichen (grün).

Projektbezogene Voruntersuchungen

Im Rahmen des BMWi-Forschungsprojektes „Lärmabsorbierende Kunststoffstrukturen“ („LAKS“, LuFo V-2, FKZ: 20E1502) wurden verschiedene Konzepte zur Realisierung elementarer HR-Liner-Probekörper nach dem Steckprinzip erarbeitet, Vorzugsvarianten ausgelegt, konstruktiv umgesetzt und mit den Projektpartnern akustisch charakterisiert. Dabei konnte die Annahme einer verbesserten Schallabsorptionscharakteristik durch das neuartige Konzept von HR-Linern mit teilweise nachgiebigen Wandbereichen experimentell bestätigt werden [7]. Zu den Hauptkriterien bei der strukturmechanischen Auslegung der Kernstruktur zählten zum einen die akustisch motivierte Anpassung des dynamischen Verhaltens der nachgiebigen Zellwandbereiche und zum anderen die Sicherstellung einer ausreichenden Tragfähigkeit bei Druckbelastung in Dickenrichtung. Die manuelle Fertigung der Kernstrukturen erfolgte in drei Schritten:

- 1) Zuschnitt der ebenen Wandsegmente aus Aluminiumblech,
- 2) klebtechnische Applikation von Folien aus thermoplastischem Polyurethan und Steckmontage und
- 3) Verklebung der Wandsegmente.

Insbesondere hochelastische dünne Folientypen neigten bei der klebtechnischen Applikation zur Faltenbildung, die durch Anpassung des Klebprozesses, unter anderem durch Aufbringung einer Folienvorspannung, beseitigt werden konnte. Die gefertigten Kernstruktur-Probekörper wurden in Druckversuchen nach ASTM C [8] untersucht (Abbildung 3) und zeigten dabei ein vergleichbares Deformationsverhalten ähnlich dem von Nomex-Waben [9] bzw. metallischen Honeycombs [10]. Infolge der orthogonal unterschiedlichen Schubsteifigkeit trat bei der untersuchten geometrischen Ausprägung der Kernstruktur seitliches Ausknicken der Wandbereiche auf.

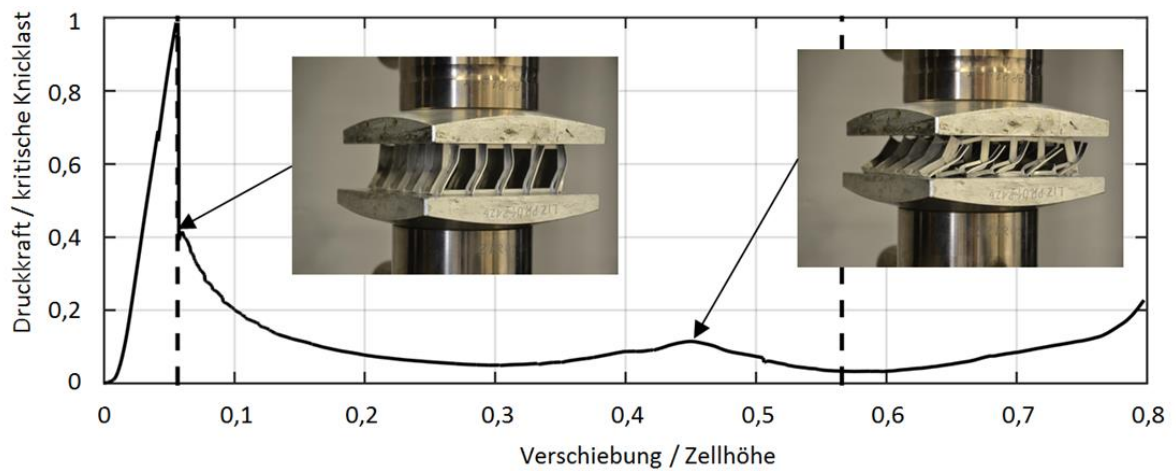


Abbildung 3: *Normierter Verlauf der Druckkraft einer in Dickenrichtung belasteten Kernstruktur der entwickelten neuartigen HR-Liner*

1.5 Zusammenarbeit mit Dritten

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wurden in enger Zusammenarbeit und Abstimmung mit den Verbundprojektpartnern DLR, TUB und BTU-FTD

Aufgrund des breit gefächerten Know-hows der Verbundprojektpartner wurde das Expertenwissen des ILKS auf dem Gebiet der Werkstoffcharakterisierung, Anwendung und Entwicklung von Verarbeitungsprozessen für Kunststoffe um die Bereiche Polymerchemie, Experimentelle sowie theoretische Akustik, Triebwerksakustik und Triebwerksdesign sinnvoll ergänzt.

Durch die Akustikabteilung der Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG erfolgte eine Begleitung und Beratung (siehe Unterstützungsschreiben).

2 Ergebnisse des Teilprojektes

Dieser Bericht enthält eine zusammenfassende Darstellung der im Verbundvorhaben durchgeführten Fertigungsuntersuchungen, experimentellen Messungen, Ergebnisse und Schlussfolgerungen. Darüber hinaus sind in den im Projekt erarbeiteten Veröffentlichungen [P1, 35-] spezifische Teilaspekte detailliert ausgeführt.

2.1 Charakterisierung und Modellierung von Materialien und Linerkonzepten (HAP1)

Im Hauptarbeitspaket 1 war die TUD nur beratend und unterstützend tätig. Dabei waren die Arbeiten vornehmlich auf die Recherche und Auswahl eines geeigneten Folienmaterials fokussiert. Im Zuge dessen wurde gemeinsam mit den Kollegen der TUB eine neuartige Materialauswahlmethode für akustische vibrationsbeanspruchte Anwendungen entwickelt. Die Materialauswahlmethode besteht aus den folgenden Punkten:

1. **Material Screening:** Im ersten Schritt werden die Anforderungen der Anwendung definiert, wie z. B. Schallabsorption und Vibrationskontrolle, und relevante Materialparameter wie Elastizitätsmodul, Dichte und Verlustfaktor identifiziert. Materialien, die diese Grundkriterien nicht erfüllen, werden frühzeitig ausgeschlossen.
2. **Vorläufige Parameterstudie:** Es folgt eine erste Untersuchung, um den Einfluss einzelner Materialparameter auf das Ziel, wie z. B. den Transmissionverlust (engl. Transmissionloss, TL), zu bewerten. Parameter mit signifikantem Einfluss werden für weitere Analysen ausgewählt.
3. **Funktionale Abhängigkeiten:** Um den Parameterraum zu verkleinern, werden funktionale Abhängigkeiten zwischen den relevanten Materialparametern identifiziert. Dies hilft, die Auswahl auf reale Materialien zu fokussieren.
4. **Parameterstudie:** Basierend auf den funktionalen Abhängigkeiten wird der Einfluss von Parameterpaaren auf die Zielvariable untersucht. Durch die Wahl geeigneter Schrittweiten wird der Einfluss auf die Zielgröße analysiert.
5. **Materialauswahl:** Schließlich wird eine Materialkombination ausgewählt, die die gewünschten Eigenschaften hinsichtlich des TL bei niedrigen Frequenzen liefert.

In Bezug auf das vorliegende Projekt wurde die Materialgruppe der Thermoplaste und thermoplastischen Elastomere ausgewählt. Im Vergleich zu Metallen weisen diese Materialien eine höhere innere Dämpfung auf, was zu einer insgesamt besseren Dämpfung des Schalldämpfers führen kann. Außerdem sind sie gut zu verarbeiten, können mit verschiedenen Füge-techniken verbunden werden und sind in den gewünschten geringen Materialstärken

erhältlich. Im Rahmen der vorläufigen Parameterstudie wurde der Einfluss des E-Modul (E), Dichte (ρ) und des mechanischen Verlustfaktor (η) auf den TL des PR-Liners analysiert (siehe Abbildung 4). Hier wird der direkt proportionale Einfluss der Dichte auf TL offensichtlich (siehe Abbildung 4c). Der mech. Verlustfaktor verbreitert und reduziert die Spitzen (lokale Maxima) des TL im Spektrum, wobei der Effekt je nach Peak unterschiedlich stark ist. Aufgrund des größeren Wertebereichs innerhalb der Thermoplaste und seines vielfältigen Einflusses auf den Transmissionsverlust erfordert der mech. Verlustfaktor eine weiterführende Analyse. Der Einfluss des Elastizitätsmoduls ist ebenfalls unklar, doch scheinen höhere Werte vorteilhaft für die Niederfrequenzdämpfung zu sein.

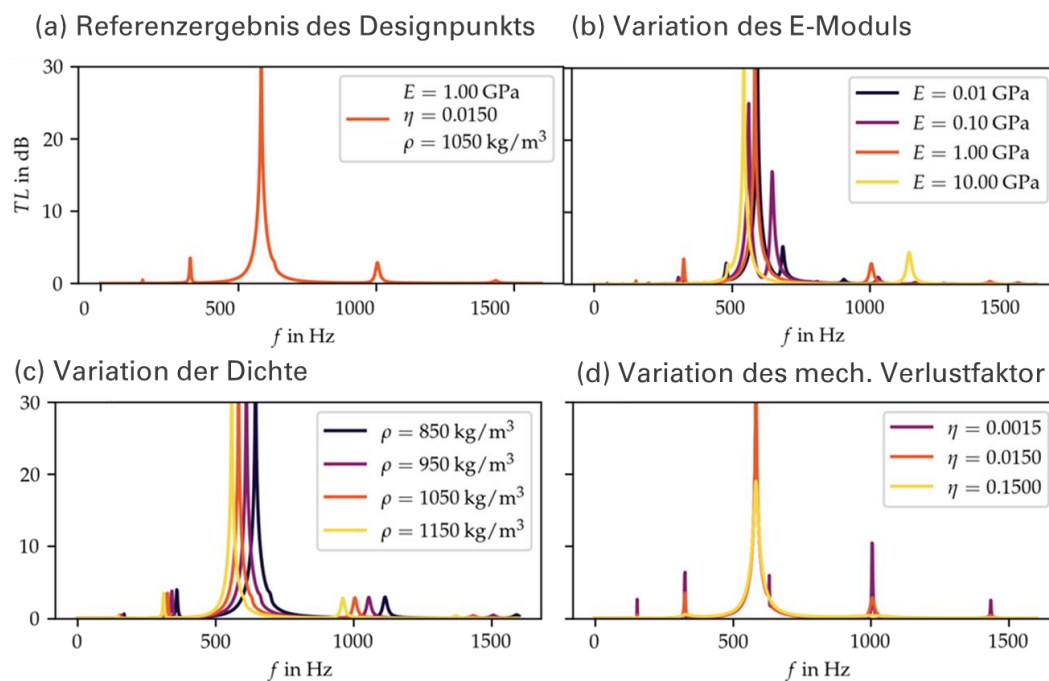


Abbildung 4 Ergebnisse der vorläufigen Parameterstudie, (a) Referenzergebnis des Auslegungspunktes, (b) Variation des Elastizitätsmoduls (E), (c) Variation der Dichte (ρ), (d) Variation des Verlustfaktors (η) [P1].

Im nächsten Schritt wird daher unter Verwendung der Ashby-Methode nach einem funktionalen Zusammenhang zwischen mech. Dämpfungskoeffizient und E-Modul gesucht, um diesen für die Verringerung des Parameterraums und die Einflussanalyse zu nutzen. Der identifizierte lineare Zusammenhang in der doppelt logarithmierten Darstellung der beiden Parameter ist in Abbildung 5 dargestellt.

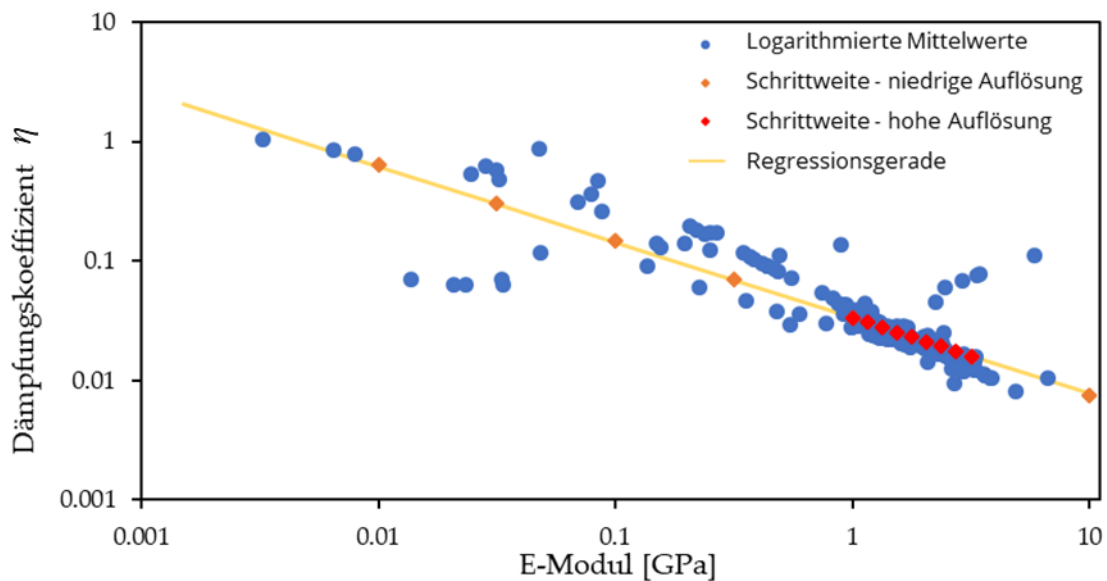


Abbildung 5 *Mechanischer Verlustfaktor über dem Elastizitätsmodul der Materialgruppe der Thermoplaste und thermoplastischer Elastomere. Die Regressionsgerade stellt die funktionale Abhängigkeit zwischen den beiden Materialparametern dar [P1].*

Aufbauend auf dem funktionellen Zusammenhang kann nun unter Verwendung der Modellbeschreibung des PR-Liners eine umfassende Spektralanalyse durchgeführt werden, die den Einfluss der relevanten Parameter auf die Zielgröße über den gesamten Parameterbereich der Materialgruppe zeigt (siehe Abbildung 6). Die Ergebnisse werden als Farbkarte (engl. Heat Map) dargestellt, wobei die gelben Flächen die Spitzen der Transmissionsverluste markieren. Ein Schnitt durch die Karte zeigt die Transmissionsverluste über das Frequenzspektrum eines bestimmten Wertepaares von Elastizitätsmodul und Verlustfaktor (siehe Abbildung 6). Je nach Parameterkombination treten ein oder zwei Spitzen im TL auf, was mit vorherigen Beobachtungen übereinstimmt. Mit Blick auf in die Heat Map würde sich demnach ein Material mit möglichst niedrigem E-Modul und gleichzeitig hohem Verlustfaktor anbieten.

Das gleiche Methodik wurde auf das Prinzip des HR-Liners angewandt. Aus Kosten und Effizienzgründen wurde auf Grundlage der kommerziell erhältlichen Materialien wurde mit TPU ein Material mit einem geringen E-Modul und vergleichsweise höherem mech. Verlustfaktor für beide akustischen Prinzipien gewählt. Eine ausführlichere Beschreibung der Materialauswahlmethode ist in [P1] veröffentlicht.

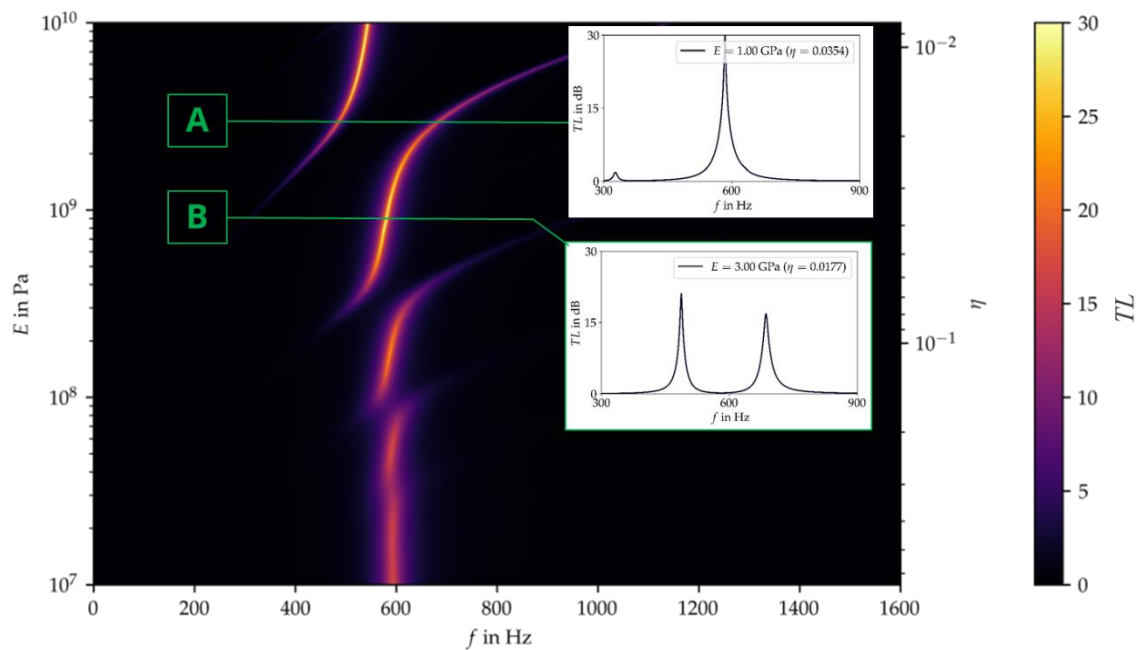


Abbildung 6 Ergebnisse der Parameterstudie mit einer feinen Parameterauflösung [P1].

Nach Auswahl des Folienmaterials wurde Granulat der Firma BASF vom Typ Ellastolan® TPU 1170A beschafft und über die Folienextrusionsprozess zu kontinuierlichem Folienmaterial mit einer Materialstärke von 0,3 mm hergestellt. Anschließend erfolgte die Dynamisch mechanische Analyse (DMA) des Materials. Das bestimmte viskoelastische Materialverhalten (Speicher und Verlustmodul) wurde anschließend u.a. für die Modellierung der akustischen Performance der HR- und PR-Liner verwendet [P3].

2.2 Fertigungstechnologie Linersegment (HAP1)

2.2.1 Erstellung Fertigungskonzepte (AP2.1)

Im Rahmen der Auswahl geeigneter Fertigungstechnologien im HAP2 (AP 2.1) wurde vornehmlich der kritische Prozessschritt der Herstellung der Fügeverbindung zwischen den flexiblen Wänden (thermoplastisches Folienmaterial) und starren Wänden (Organoblech) fokussiert. In diesem Zusammenhang wurde zunächst ausgehend vom Wirkprinzip (Stoff-, Form-, Kraftschluss) die stoffschlüssigen Verfahren gewählt. In Bezug auf die Lösbarkeit wurden mit Schweißen und Kleben die unlösbaren sowie mit Haftkleben die bedingt lösbaren Verfahren in Betracht gezogen. Dies geschah vor dem Hintergrund, das durch die in AP1.1 getroffene Wahl des Folienmaterials von TPU und faserverstärktem PA6 gleiche Schmelzbereiche ausgenutzt und im Schweißprozess automatisierbar, ökonomisch und ohne die Verwendung zusätzlicher Materialien gefügt werden können. Die Auswahl eines geeigneten Schweißverfahrens erfolgte

ausgehend von der Einteilung der Arten des Wämeeintrags in den Kunststoff nach da die Verfahren Wärmeleitung (Kontaktschweißen) und Wärmestrahlung in einem flankierenden DFG-Projekt analysiert wurden. Daher wurden die reibungsbasierten Verfahren näher betrachtet. Schlussendlich wurden die Prozesstechnologien die auf molekularer Reibung basierten aufgrund zu hoher Investitionskosten nicht und das mechanischen Reibungsverfahren der Ultraschallschweißung sehr kurze Taktzeiten (<2 s), geringe Investitionskosten beim Fügen kleiner Bauteile, der guten Automatisierbarkeit und der geringe benötigte Energiebedarf ausgewählt.

Im Rahmen des HAP2 (AP2.1) sowie des HAP4 (AP4.2) wurden Konzepte für die Fertigung und Integration der Liner in Triebwerksumgebungen erstellt. Dabei wurden sowohl das Konzept der Helmholtz Resonator Liner mit flexiblen Wänden (FHR) als auch eine Lösung für das akustische Konzept des Plattenresonator (PR) Liner entwickelt. In Abbildung 7 ist in diesem Zusammenhang der erste Schritt der Fertigung der gekrümmten und rechteckigen Spanten sowie der Spanten mit Ausschnitten im Wasserstrahlschneideverfahren dargestellt. Somit wird gegenüber der ursprünglich angedachten nachträglichen Aufprägung der Krümmungen, die Konturierung der Struktur bereits zu Beginn des Fertigungsprozesses vorgesehen. Somit können die durch Umformung auftretenden Belastungen und Einflüsse auf die Komponenten (z.B. die nachgiebige Folie) verhindert werden.

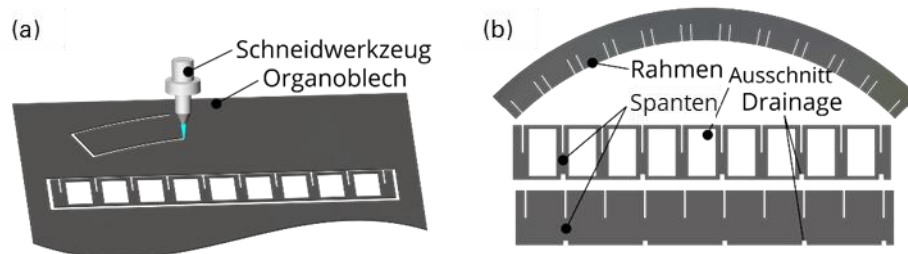


Abbildung 7 (a) Verfahren zum Schneiden der Komponenten der Resonatorkammern aus Plattenmaterial (Wasserstrahl- oder Laserschneiden), (b) gekrümmter Rahmen mit Nuten, rechteckige Spanten mit und ohne Aussparungen für die flexible Folie [P2].

Nach zugrundeliegenden Untersuchungen des Vorgängervorhabens LAKS ist der Spannungszustand der Folie eine zentrale Randbedingung, da er sich auf das Dämpfungsverhalten des Liners auswirkt [11]. In diesem Zusammenhang ist es das Ziel, die Folie reproduzierbar so vorzuspannen, dass ein anschließender Fügeprozess mit der Trägerstruktur ohne Faltenbildung, aber mit einem definierten Spannungszustand der Folie möglich ist. Dazu wird die Folie an den Rändern eingespannt und durch Gewichte kraftgesteuert ausgelenkt. Anschließend wird ein Fixierrahmen verwendet, um den Vorspannungszustand der Folie zu erhalten (Abbildung 8a). Wie in Abbildung 8b dargestellt, wird der Befestigungsrahmen

auf einem unteren Träger positioniert und montiert, der die mit Ausschnitten versehenen Spanten trägt. Dann wird eine mit Fenstern versehene Matrize in den Rahmen eingesetzt, um die Auswirkungen des Schweißvorgangs auf den konservierten Spannungszustand der Folie zu minimieren. Im nächsten Schritt schweißt eine rechteckige Sonotrode die Folie mit einer Stegbreite von 2 mm um die Aussparung herum auf die Spanten (Abbildung 8c).

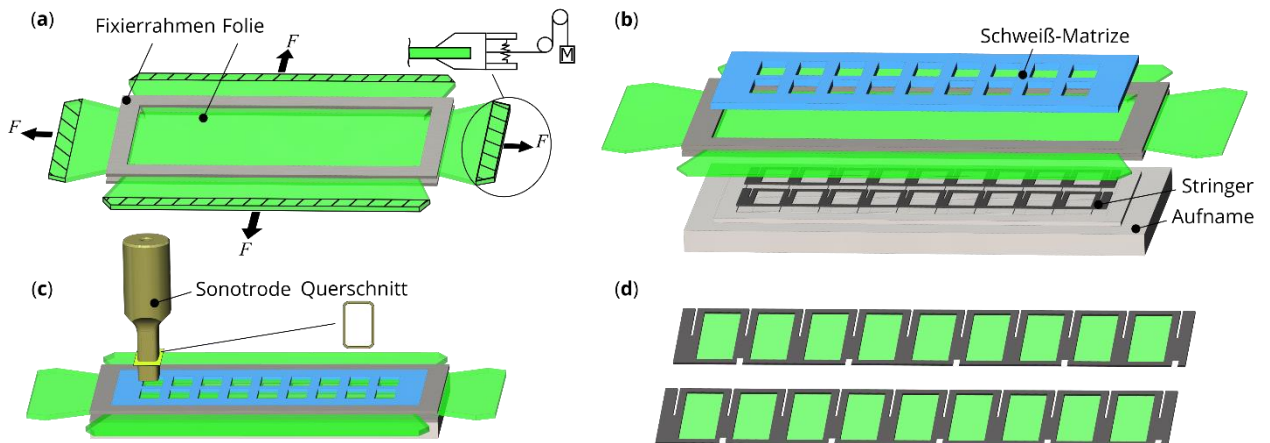


Abbildung 8 (a) Verfahren zum Vorspannen der Folie mittels eines kraftgesteuerten Aufbaus mit Klemmen und Gewichten und der anschließenden Konservierung des resultierenden Spannungszustandes durch Anbringen eines Fixierahmens, (b) notwendige Komponenten für das Ultraschallschweißen, (c) rechteckige Sonotrode mit ihrem Querschnitt sowie der endgültige Aufbau für das Ultraschallschweißen der Folie und des Spants, (d) Spant mit applizierten Folien [P2].

Darüber hinaus sollte im Rahmen des Projektes die Machbarkeit geprüft werden, inwiefern die Additive Fertigung und Verbindung der Folie sowie der rigiden Bereiche möglich ist. In diesem Zusammenhang sollte sowohl die Verstärkungsstruktur als auch die Folie gedruckt werden und innerhalb des Druckprozesses miteinander gefügt werden. Die schematische Darstellung des Druckvorgangs der Folie auf die Spanten (Verstärkungsstruktur ist in Abbildung dargestellt).

2 Ergebnisse des Teilprojektes

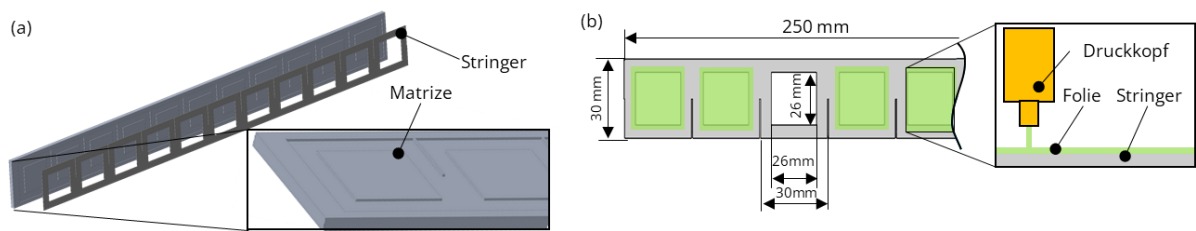


Abbildung 9 (a) Schematische Darstellung der Verstärkungsstruktur (grau) des HR-Liner mit flexibler Wand (grün) und der Matrize für den Folienaufdruck, (b) geometrische Abmaße des Spants und schematische Darstellung des Aufdrucks der Folie (grün).

Darüber hinaus wurden eine klebtechnische Applikation und Umsetzung einer bedingt lösbaren Verbindung zwischen Folie und Spant. Motivation ist hier für die geplanten und zukünftigen Untersuchungen eine Möglichkeit zu schaffen, um Folien des PR- und HR-Liner mit unterschiedlichen Vorspannungen in akustischen Analysen experimentell zu analysieren. Da die Fertigung der Resonatorkörper beider Konzepte kosten- und zeitintensiv ist, soll die lösbare Klebeverbindung eine Wiederverwendung der Resonatorgrundstruktur und die Analyse unterschiedlicher Folienvorspannung ermöglichen.

2.2.2 Durchführung von Fertigungsstudien und Fertigung der Liner-

Zu Beginn der prozesstechnischen Voruntersuchungen stand die Eignungsprüfung additiver Fertigungsmethoden für die Fertigung hybrider thermoplastischer Strukturen. In diesem Zusammenhang wurde zunächst die rigide Unterstützungsstruktur in Form von kurzfaserverstärktem PLA auf den Folienwerkstoff gedruckt (siehe Abbildung 10).



Abbildung 10: Gedruckter starrer, gefensterter Wandbereich (orange) aus kurzfaserverstärktem PLA auf TPU-Folienmaterial (durchsichtig).

2 Ergebnisse des Teilprojektes

Trotz der qualitativ hochwertigen Fügeverbindung wurde dieses Fertigungskonzept nicht weiterverfolgt, da die mechanischen Eigenschaften des verdruckten kurzfaserverstärkten Polylactid (PLA) den Anforderungen nicht gerecht wird und kein Material mit höheren Steifigkeiten verdruckt werden kann. Im nächsten Schritt wurde daher die Möglichkeit untersucht den Prozess zu invertieren und anstelle der Spanten, die Folien im 3D-Druck herzustellen. Der Grund für die Untersuchung dieser hybridisierten additiven Fertigungsmethode liegt in der Möglichkeit begründet, die Fertigung der Folie und den Fügeprozess in einem Prozessschritt abzubilden. Somit wird der flexible Wandbereich nicht in einem externen Prozess (z.B.: Folienextrusion) hergestellt und anschließend mit dem Organoblech gefügt, sondern die Folie wird innerhalb des Druckprozess hergestellt und auf den Spant fixiert. Der Prozess und die geometrischen Abmaße der rigiden und flexiblen Wandbereiche sind Abbildung 11a dargestellt. Ein Teil der gefertigten Folienprüfkörper, die anschließend durch den Projektpartner der TUB akustischen Analysen unterzogen wurden, sind in Abbildung 11b dargestellt.

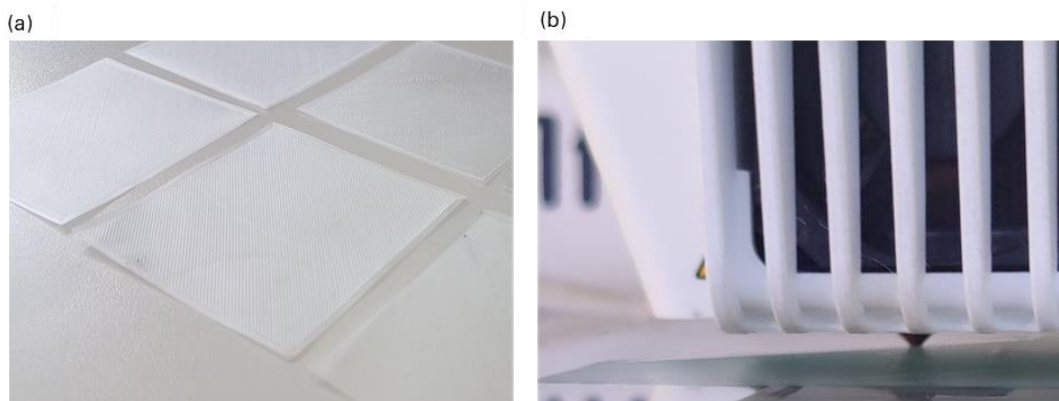


Abbildung 11 links: Gedruckte Foliendemonstrator, rechts: Druckvorgang.

Die grundsätzliche Umsetzbarkeit ist somit erbracht jedoch besteht im Falle des Foliendrucks einerseits ein hoher Einfluss auf die mechanischen und somit akustischen Eigenschaften der Folie. Andererseits sind die mechanischen Eigenschaften der Spanten mit kurzfaserverstärkten PLA nicht ausreichend. Daher wurde das additive Fertigungsverfahren für die Fertigung der LINER-Segmente im Projekt nicht weiter berücksichtigt.

Fertigungsstudie USS-Schweißen

Wie unter 2.2.1 erwähnt Ultraschallschweiß (USS)-Verfahren in Bezug auf die Anwendung analysiert, welches ein großes Automatisierungspotential mit Blick auf den Fügevorgang bietet. Bedingt durch Corona und Lieferschwierigkeiten konnten die Untersuchungen des USS erst am Ende der kostenneutralen Verlängerung qualitativ durchgeführt werden. Aufgrund der

2 Ergebnisse des Teilprojektes

Stoffgleichheit und ähnlichen Schmelzbereichen der Folie (TPU – Ellastolan® 1170 A) und des Organoblechs (PA6 - CF) kann eine stoffschlüssige Verbindung ohne zusätzliche Vorbehandlung der Werkstoffe erfolgen. Der Vorrichtung und die rechteckige Sonotrode, die an die Geometrie der anvisierten ebenen Liner-Samples des HR-Liners angepasst ist, sind in Abbildung 12 dargestellt.

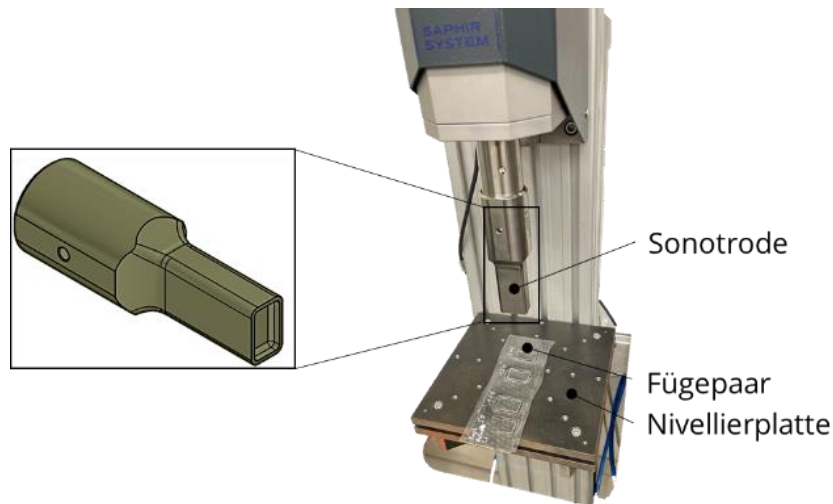


Abbildung 12 *Ultraschallschweißvorrichtung mit eigens angefertigter Nivellierplatte und Sonotrode mit Fenstergeometrie.*

Um Hinweise auf den Einfluss der relevanten Einflussparameter auf die Qualität der Fügeverbindung zu erlangen wurde eine Parameterstudie durch Variation der Nachhaltezeit der Haltekraft und der nachträglichen Verweildauer der Sonotrode im Ruhezustand nach dem Schweißprozess (Kühlzeit). Die Fügeerzeugnisse sind in Abbildung 13 dargestellt. Der Einfluss der Haltezeit ist deutlich zu erkennen. Mit zunehmender Haltezeit von 0,5 auf 3 Sekunden verbessert sich die Schweißnaht stetig. Kürzere Haltezeiten führen zu unsauberer Rändern, während längere Zeiten eine klarere und stabilere Verbindung ermöglichen, was auf eine höhere Nahtqualität hinweist. Die Erhöhung der Haltekraft von 50 N auf 200 N beeinflusst die Nahtstruktur ebenfalls deutlich. Während die Schweißnaht bei 50 N schwach und inkonsistent ist, wird sie bei 100 N und darüber gleichmäßiger. Bei 200 N kann es jedoch zu Überkompression und möglichen Defekten kommen, sodass die optimale Haltekraft zwischen 100 N und 150 N zu liegen scheint. Der Einfluss der Kühlzeit ist weniger ausgeprägt und schwerer visuell zu erfassen. Kürzere Kühlzeiten (1–3 Sekunden) könnten zu weniger definierten und gleichmäßigen Nähten führen, während längere Kühlzeiten (5–7 Sekunden) tendenziell eine stabilere Nahtstruktur begünstigen. Die Unterschiede sind jedoch gering und erfordern möglicherweise eine detaillierte Analyse.

2 Ergebnisse des Teilprojektes

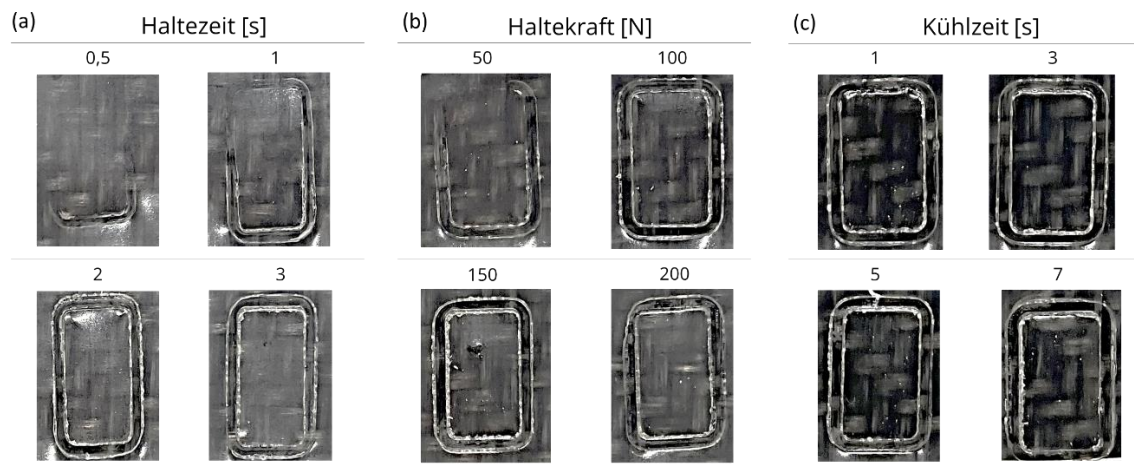


Abbildung 13 Parametervariation im Ultraschallschweißprozess unter Variation (a) Haltzeit, (b) Haltekraft, (c) Kühlzeit.

Aufgrund der erwähnten Verzögerungen sollen in zukünftigen Parameterstudien und Fügeerzeugnisse anschließend durch Stirnabzugsversuchen charakterisiert werden. Darüber hinaus ist geplant den Einfluss der USS-Prozess auf die Folienvorspannung zu untersuchen.

Prozesstechnische Analyse und Fertigung der ebenen PR-Liner Samples

Bevor mit der Fertigungsanalyse begonnen werden konnte, wurde zunächst das Design des ebenen PR-Liner Samples festgelegt. Die Bauweise wurde dabei neben den akustischen Randbedingungen, wie beispielsweise die Anzahl und Abmaße der einzelnen Kavitäten, von den Anschlussmaßen an den akustischen Prüfstand sowie einer gewünschten einfachen Assemblierung der Einzelteile bestimmt. Das finale Design mit entsprechenden Abmaßen ist in Abbildung 14 dargestellt.

2 Ergebnisse des Teilprojektes

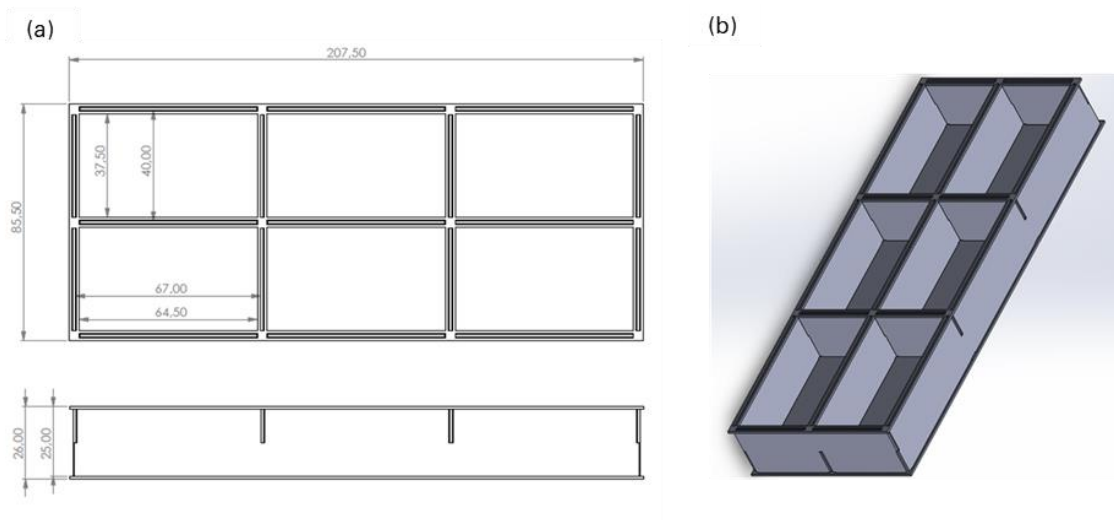


Abbildung 14 (a) Darstellung der Drauf- und Seitenansicht des ebenen PR-Liners mit Abmaßen (in mm), (b) räumliche Ansicht des Resonatorkörpers.

Im ersten Schritt des Fertigungsprozesses wurden das im vorangegangenen Berichtszeitraum identifizierte Material (PA6-GF) verwendet und zunächst im Wasserstrahlzuschnitt verarbeitet. Aufgrund der unzureichenden Schnittqualität wurden die Teile im Anschluss zunächst durch die Fräsung mit einer Portalfräsmaschine hergestellt, wodurch eine deutliche Steigerung der Qualität hinsichtlich verringerter Spanbildung an der Schnittkante sowie einer erhöhten Maßhaltigkeit erzielt wurde. Die Qualitätsunterschiede der beiden Verfahren sind in Abbildung 15 veranschaulicht.

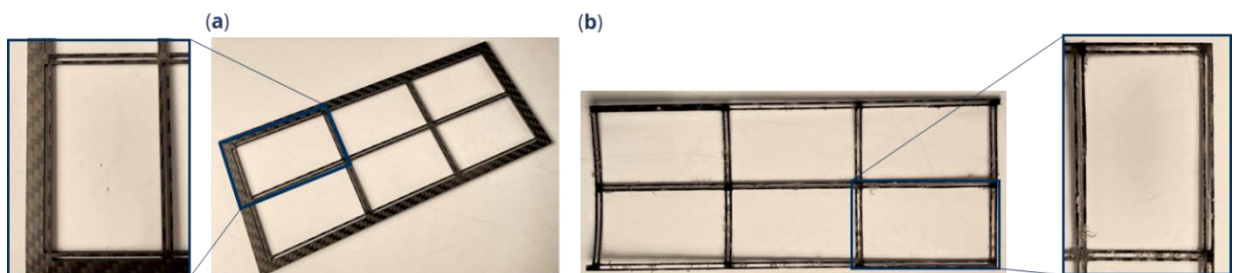


Abbildung 15 (a) Folienhalter im Fräsprozess hergestellt, (b) Folienhalter durch Wasserstrahlzuschnitt mit geringer Schnittqualität.

Trotz der verbesserten Qualität, wurde das Fräsverfahren aufgrund zu hoher Fräszeiten und Verschleiß der Fräser nicht für die weitere Fertigung ausgewählt. In der Folge wurde versucht, durch die Anpassung der Schnittparameter im Wasserstrahlzuschnitt bessere Ergebnisse zu erzielen. Die finale Prozesseinstellung, die zu den gewünschten Ergebnissen führte, lieferte eine

2 Ergebnisse des Teilprojektes

Schnittgeschwindigkeit von 0,3 m/min, den Wasserstrahl Druck von 1000 bar sowie die Beimischung von Sand 50 g/min.

Um einen Druckausgleich zwischen den Resonatorkammern und dem Duct des akustischen Prüfstands zu gewährleisten, wurden Bohrungen in die Seitenwände der Kammern eingebracht, die wiederum mit einem Draht teilweise gefüllt wurden, um den akustischen Austausch zwischen den Kammern zu reduzieren. Anschließend erfolgte die klebtechnische Verbindung der einzelnen Spanten und dem Folienhalten mit dem Zweikomponenten-Klebstoff DP490 (siehe Abbildung 16 a). Für die Applikation der Folie wurde ein zweiseitig haftender polyurethan-basierter Klebefilm der Firma 3M[®] verwendet (siehe Abbildung 16 c). Dies soll die Austauschbarkeit des Folienwerkstoffes sowie die Analyse unterschiedlicher Folienvorspannungen ermöglichen.

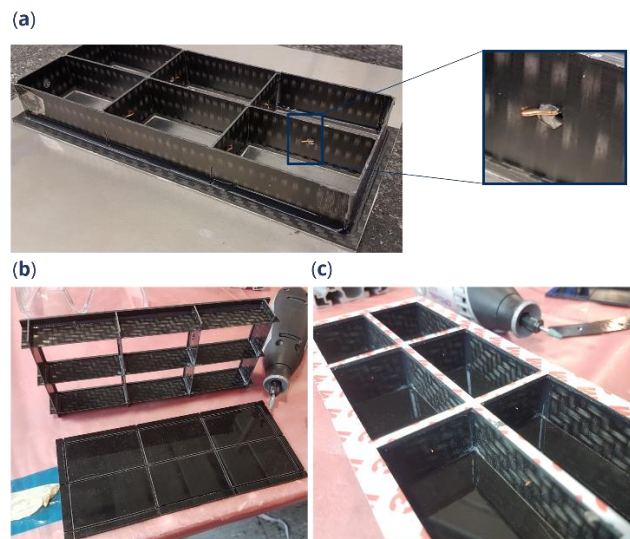


Abbildung 16 (a) Unterstützungsstruktur mit teilverdecktem Verbindungsloch (Detail), (b) Unterstützungsstruktur und Grundplatte mit Nuten, (c) aufgebrachter beidseitiger Klebefilm für Applikation des Folienmaterials.

Wie bereits in der vorangegangenen Beschreibung der Fertigungskonzepte erwähnt, ist das steuer- und reproduzierbare Vorspannen der Folie notwendig. Daher wurde im Rahmen der Fertigungsstudien der Liner Samples eine Vorspannvorrichtung konzipiert und umgesetzt, die eine einfach reproduzierbare kraftgesteuerte Auslenkung des Folienmaterials ermöglicht (siehe Abbildung 17). Die Folie wird hier zunächst durch Fixierklammern an den Folienrändern fixiert und über Zugseile mit befestigten Massen kraftgesteuert in der Ebene vorgespannt. Dabei wird Folienmaterial direkt über einer PTFE-Platte (Druckplatte) gespannt um die Reibung während des Vorganges zu minimieren. Anschließend wird der Resonatorkörper (PR-Liner) mit Folienhalter bzw. Spant (HR-Liner) aufgelegt und durch leichten Andruck mit der Folie verklebt.

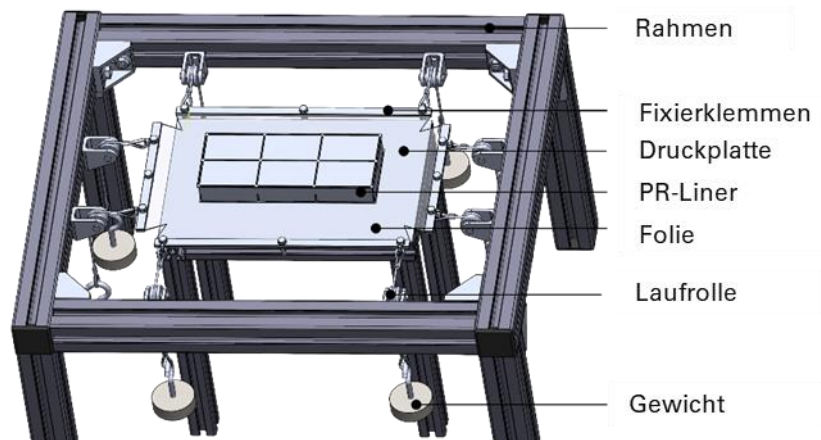


Abbildung 17 Vorrichtung zur Vorspannung des Folienwerkstoffes unter Aufführung der Einzelkomponenten.

Im finalen Schritt wurde die Folie auf den PR-Liner mit der gewünschten Vorspannkraft appliziert (siehe Abbildung 18).



Abbildung 18 Ebenes Sample des PR-Liner.

Fertigung der ebenen HR-Liner Samples

Analog zu der Fertigung des PR-Liner Samples, wurden die rechteckigen und gefensterten Spanten zunächst im Wasserstrahlzuschnitt auf das Endkonturmaß gebracht. Zur Vereinfachung des Montagevorganges, wurden zudem Nuten in die perforierten Deckfläche gefräst, die zusätzlich die gewünschte Positionierung der Deckfläche zu den Kavitäten erlaubt.

2 Ergebnisse des Teilprojektes

Anschließend wurden die gefensterten Spanten mit dem Klebefilm versehen und auf der vorgespannten Folie aufgebracht (siehe Abbildung 19). Im nächsten Schritt wurden die Spanten mit Klebstoff (DP490 3M®) versehen und ineinander versteckt. Im finalen Prozessschritt wurden die Grund- und Deckschicht ebenfalls mit Klebstoff versehen und die Kern- mit den Deckschichten verbunden.

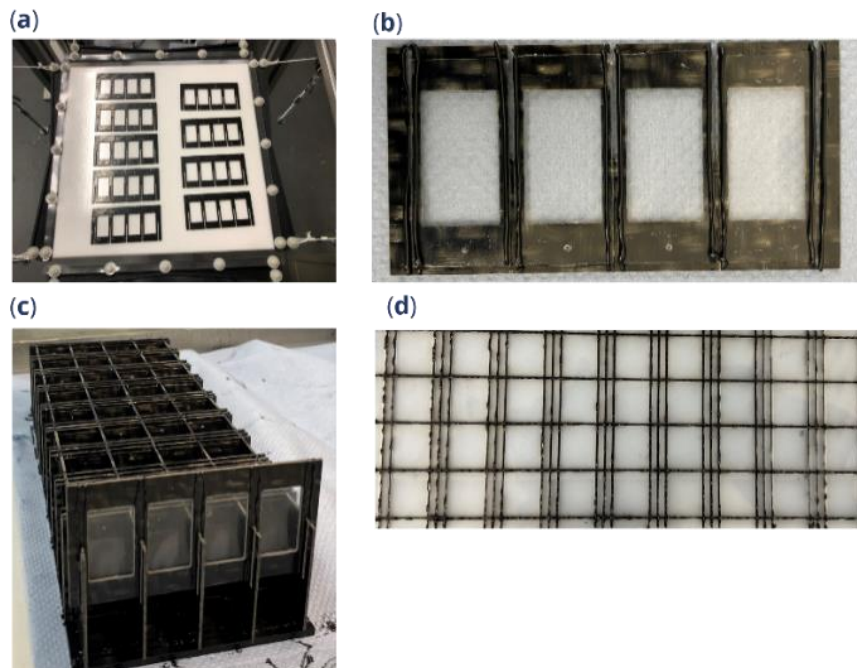


Abbildung 19 (a) Aufbringen der gefensterten Spante auf vorgespannte Folie, (b) Klebstoffauftrag auf Spant mit applizierter nachgiebiger Folie, (c) Steckvorgang der Spanten, (d) mit Klebstoff versehene perforierte Deckschicht.

Die unterschiedlichen Liner Samples HR-Liner 6 und HR-Liner 2 die sich hinsichtlich der Aufteilung der passiven Kavitäten unterscheiden, sind in Abbildung 20 dargestellt.



Abbildung 20 Ebene Samples der Konfiguration HR-Liner 6 (vertikal) und HR-Liner 2 (horizontal).

2.3 HAP3 Charakterisierung Linersegmente

Im Hauptarbeitspaket 3 war im Arbeitspaket 3.3 Krümmbarkeit der Segmente ursprünglich die Analyse der Adaptierbarkeit der gefertigten Linersegmente an gekrümmte Grundstrukturen durch Biegeversuche und anschließender Vermessung der deformierten Probekörper geplant. Jedoch wurde im Laufe der Bearbeitungszeitraum offensichtlich eine Berücksichtigung der Krümmung im Designprozess gegenüber der nachträglichen Umformung Vorteile bietet. Somit wird gegenüber der ursprünglich angedachten nachträglichen Aufprägung der Krümmungen, die Konturierung der Struktur bereits zu Beginn des Fertigungsprozesses vorgesehen. Dabei können die durch Umformung auftretenden Belastungen und Einflüsse auf die Komponenten (z.B. die nachgiebige Folie) verhindert werden. Die geleisteten Arbeiten in Bezug auf die Entwicklung und Fertigung der gekrümmten Struktur sind in Beschreibung der AP 4.2 zusammengefasst.

2.4 Integrationstechnologie und Bewertung

Aufbauend auf den Vorarbeiten aus dem vergangenen Berichtszeitraum, wurden im Rahmen des HAP3 (AP3.3) sowie des HAP4 (AP4.2) die vorhandenen Ressourcen auf die Umsetzung einer gekrümmten Demonstratorstruktur des Helmholtz Resonator Liner-Barrel mit flexiblen Wänden (FHR-Barrel) sowie einem Referenz-Barrel ohne Folien verwendet. Dabei wurden abweichend vom ursprünglich geplanten Vorgehen, eine ebene Struktur zu fertigen und anschließend umzuformen, die Umsetzung der Krümmung im Fertigungsprozess angestrebt. Somit war es für den Entwurf der Barrels notwendig die ebene Struktur des HR-Liners auf die gekrümmte Form zu überführen (siehe Abbildung 21).

2 Ergebnisse des Teilprojektes

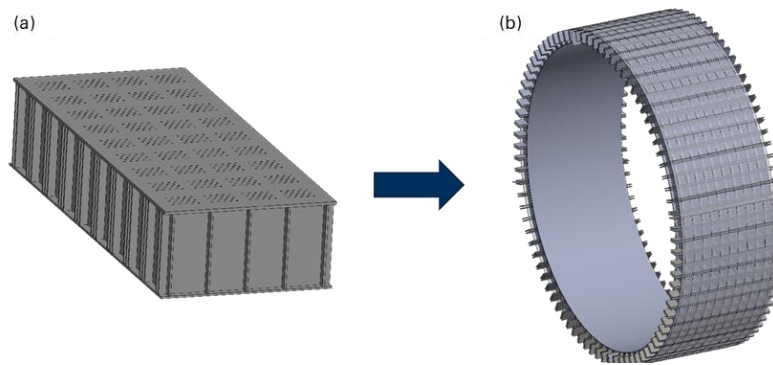


Abbildung 21 Überführung der (a) ebenen Liner Sample-Struktur in die (b) einfach gekrümmte Struktur des Barrel-Rigs.

Der Entwurfsprozess konzentrierte sich auf die Hauptbestandteile der perforierten Face Sheets, die äußeren Deckbleche und die Kernstruktur des Barrels. Ein wesentlicher Teil der Auslegung der Face Sheets und äußeren Deckbleche bestand in der Dimensionierung der Nutbreite. Da die Face Sheets und äußeren Deckbleche zunächst eben gefertigt und anschließend auf den inneren bzw. äußeren Radius der Kernstruktur aufgebracht und umgeformt werden sollten, galt es die Nuten so auszulegen, dass die Spanten auch nach einer Umformung der Bleche noch in die Nuten eintauchen konnten. Für die Berechnung der Nutbreite der beiden Bleche (Abbildung 22a,b) wurde zudem angenommen, dass sich lediglich die Bereiche der Nuten aufgrund einer verringerten Steifigkeit infolge eines geringeren Querschnitts verformen. In Abbildung 22c ist in Rot die zusätzliche Fläche beziehungsweise das Volumen der Einzelzelle dargestellt, das entsteht, weil die Spanten nicht Teilkreisausschnitte, sondern rechteckig sind. Diese und weitere Details mussten bei der Auslegung der Zellen berücksichtigt werden, um den akustischen Anforderungen, wie beispielsweise dem Volumen der Einzelzelle des HR-Liners, zu entsprechen.

2 Ergebnisse des Teilprojektes

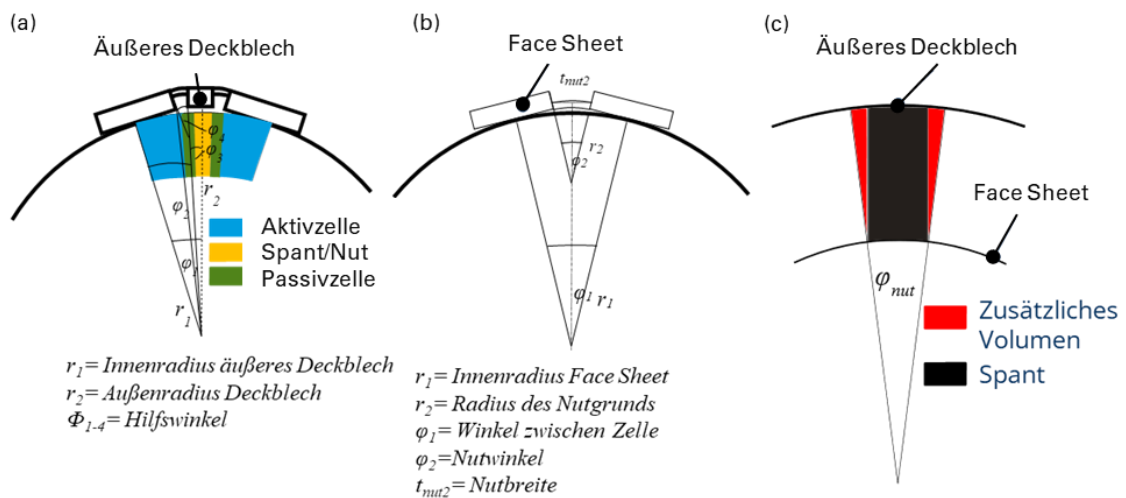


Abbildung 22 (a) Bestimmung der Geometrie des äußeren Deckblechs, (b) der Face Sheet Geometrie, (c) Detail bei der Bestimmung des Zellvolumens.

Für die Umsetzung der Kernstruktur, wurde analog zur Fertigung der ebenen Liner Samples wie in Abbildung 21 dargestellt, das Steckprinzip verwendet. Dabei wurden sowohl gekrümmte als auch ebene Einzelspanten gefertigt. Für das FHR-Barrel wurden zusätzlich gefensterter Spanten zur Applikation der Folien hergestellt. Eine detaillierte Beschreibung des Fertigungsprozesses erfolgte bereits in vorherigen Zwischenberichten und wird daher hier nicht weiter ausgeführt. Dasselbe gilt für den Prozess der Vorspannung der Folie und deren anschließende Applikation auf die gefensterter Spanten. In Abbildung 23a sind die Spanten und in Abbildung 23b das angestrebte Design der Kernstruktur eines 90°-Segments des FHR-Barrels dargestellt, das aus

den gekrümmten und ebenen Spanten besteht. Alle Spanten wurden, analog zu den ebenen Samples, im Wasserstrahlschnitt aus glasfaserverstärktem Polyamid 6 (PA6-GF) gefertigt.

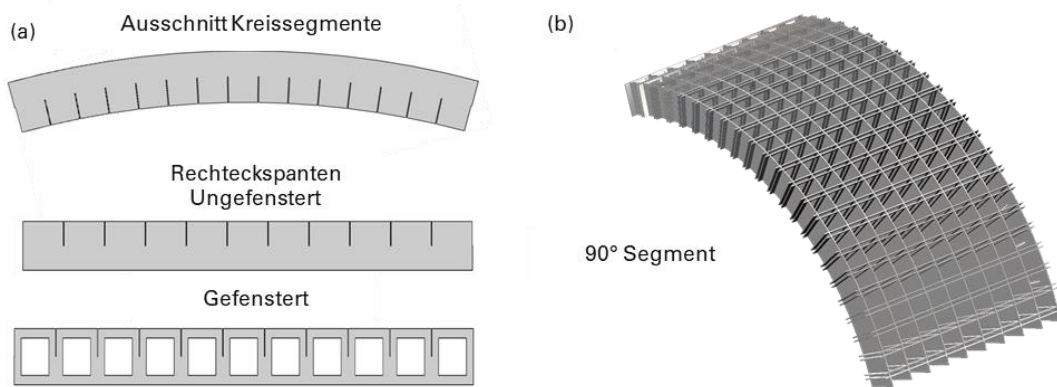


Abbildung 23 (a) Geometrie der benötigten Spanten zur Herstellung der gekrümmten zellularen Kernstruktur der Barrel-Rigs, (b) Entwurf eines 90° Segmentes der Kernstruktur des FHR-Barrel-Rigs.

Die Unterteilung der Kernstruktur des Barrels in 90° Segmente erfolgte um mögliche Fertigungs- und Prozesstoleranzen auszugleichen. Daher weisen die Teilsegmente tatsächlich jeweils nur 89,6° auf, sodass in Summe 1,6° für den Toleranzausgleich auf das gesamte Barrel besteht. In Abbildung 24 ist das Face Sheet mit 25 Perforationen pro Zelle dargestellt. Aufgrund der sehr geringen Materialstärke und geringen Steifigkeit des verarbeiteten PA6 gestalteten sich die Fräsarbeiten zunächst schwierig und bedurften einer Voruntersuchung um geeignete Prozessparameter für Vorschub und Spindeldrehzahl zu bestimmen. Aufgrund der hohen Gesamtanzahl der Perforationen/Bohrungen (21.000 Stk.) war es zudem ein sehr zeitaufwendiger Prozess. Die äußeren Deckbleche wurden gegenüber dem Face Sheet in vier

und zur Umsetzung der Kernstruktur benötigt werden. Der schematische Ablauf der Assemblierung eines 90°-Segments ist in Abbildung 27 dargestellt.

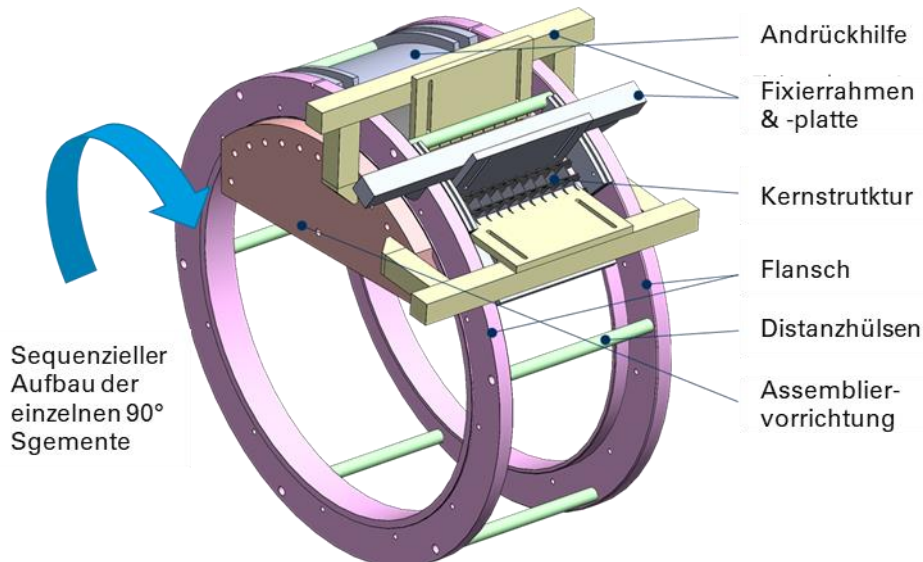


Abbildung 27 Schematische Darstellung des Assemblierungsvorganges der Barrel-Rigs.

Hier wird in einem ersten Schritt das Deckblech auf der Montagevorrichtung positioniert und zwischen den beiden Flanschen vorfixiert. Anschließend werden die Nuten des Face Sheets mit dem Klebstoff DP490 von 3M® gefüllt. Danach werden die gekrümmten und ebenen Spanten mithilfe von Fixierrahmen positioniert und manuell verklebt. Im nächsten Schritt werden die Nuten des äußeren Deckblechs ebenfalls mit Klebstoff gefüllt und auf die Kernstruktur aufgesetzt. Zum Abschluss werden Andrückhilfen mit Hilfe der Fixierrahmen angebracht und der Klebstoff ausgehärtet. Die einzelnen Schritte sind in Abbildung 28 dargestellt.

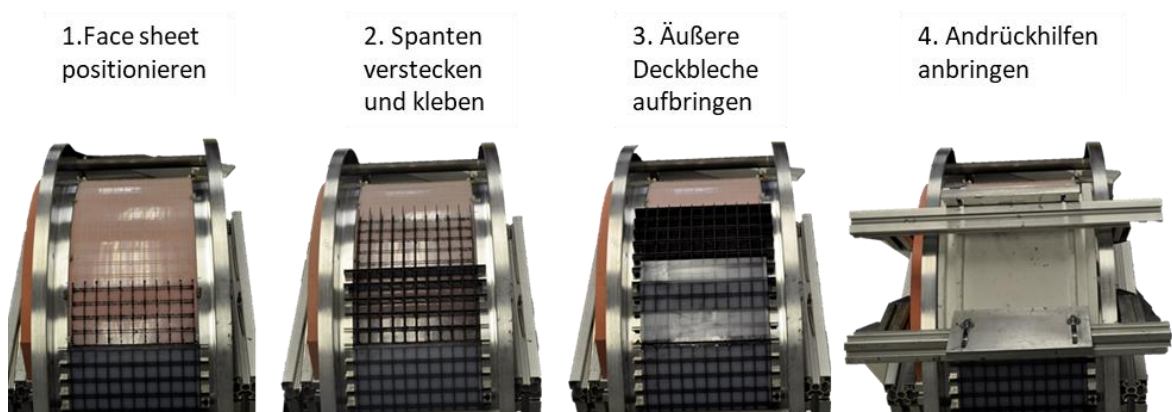


Abbildung 28 Fertigungsschritte zur Assemblierung eines 90° Segmentes des Barrel Rigs.

2 Ergebnisse des Teilprojektes

Die fertigen Barrel-Rigs konnten auf diese Weise erfolgreich gefertigt werden und sind in Abbildung 29 dargestellt. Somit wurden die Ziele des Antrags, die ursprünglich auf Teilsegmente ausgerichtet waren, übertroffen. Es konnten vollumfängliche Barrel-Rigs hergestellt werden, die einen Test und Referenzvergleich unter realitätsnahen Bedingungen ermöglichen.

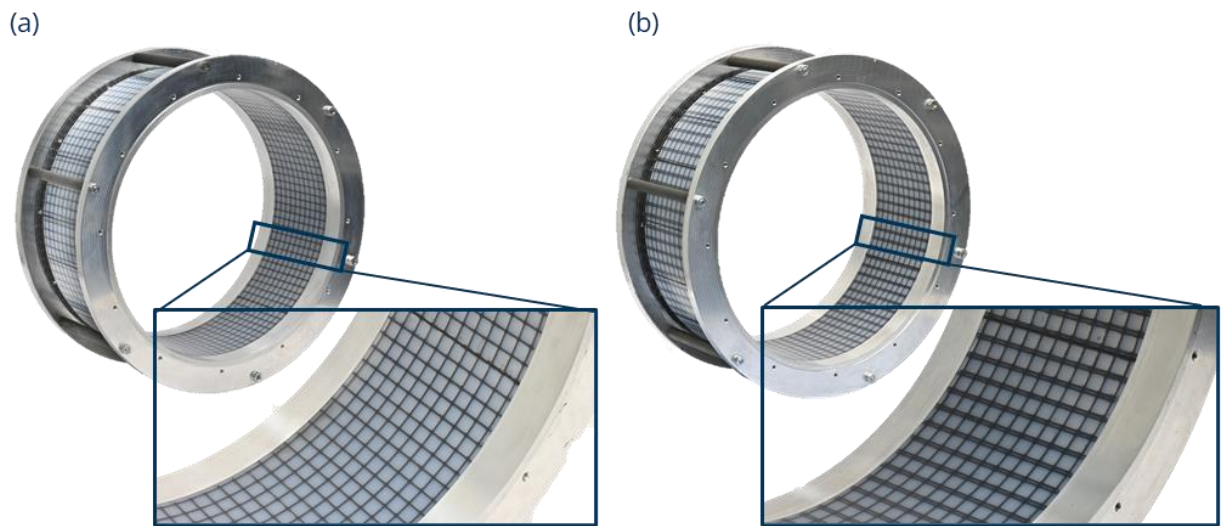


Abbildung 29 (a) Referenz Barrel-Rig, (b) FHR Barrel Rig.

Design und Herstellung Konzept des gekrümmten PR-Liners

In Bezug auf die Überführung des PR-Liners in eine gekrümmte Bauweise wurde ebenfalls eine Konzeptentwicklung durchgeführt. Von den drei entwickelten Konzepten wird bei zweien die gekrümmte Bauweise des Barrel-Rigs bereits im Fertigungsprozess der Einzelkomponenten realisiert. Wohingegen beim Konzept 3 die zellulare Struktur mit nachgiebiger Deckschicht zunächst in ebener Bauweise gefertigt und anschließend gekrümmt wird. Die Konzepte werden im Folgenden kurz erläutert. Im Konzept 1 wird analog zum HR-Liner ein Steckprinzip zur Herstellung der zellularen Kernstruktur verwendet. Die Fertigung des Folienträgers erfolgt in der Ebene und enthält Ausschnitte für Folien und Abstandshalter. Die Abstandshalter ermöglichen dabei die Montage des Schutzbleches und bieten die nötige Distanz zwischen Schutzblech und Folie um eine Auslenkung der Folie zu ermöglichen. Das Fügen der Folienträger und des Schutzbleches soll hierbei klebtechnisch realisiert werden (siehe Abbildung 30).

Gegenüber dem ersten Konzept, wird im Konzept 2 für die Umsetzung der Resonatorzellen Aluminium als Grundmaterial verwendet. Dabei soll die Fertigung der Resonatorzellen durch Fräsen umgesetzt werden (siehe Abbildung 30). Das Aufbringen der Folien erfolgt durch die Verspannung infolge einer kraftschlüssigen Verbindung zwischen Schutzblech und Zellkern.

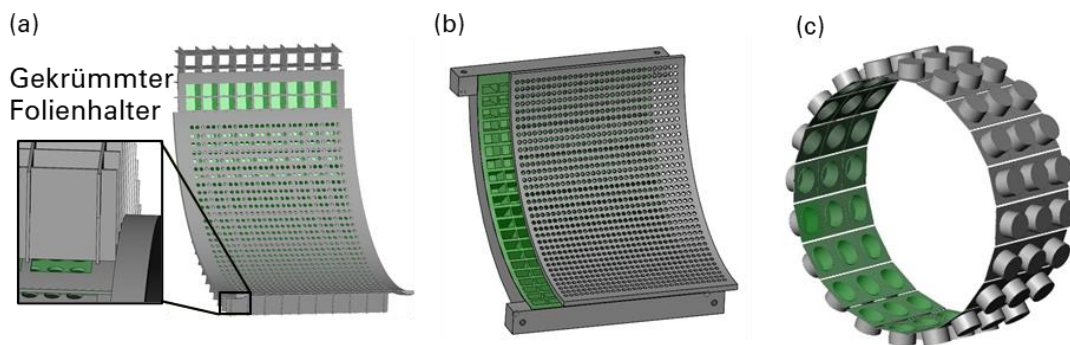


Abbildung 30: (a) Konzept 1 – Kreisausschnitt Version 1, (b) Konzept 2 – Kreisausschnitt Version 2, (c) Konzept 3 – Tiefziehen

In Konzept 3 werden die in Abbildung 30 grau dargestellten Resonatorzellen durch ein Thermoform- bzw. Folientiefziehprozess hergestellt. Das Aufbringen der Folien erfolgt anschließend durch klebtechnische Applikation in der Ebene. Im nächsten Schritt erfolgt die Krümmung der Struktur.

Für die Evaluierung der aufgestellten Konzepte wurden entsprechende Kriterien definiert, die in Tabelle 1 dargestellt sind. In der anschließenden Nutzwertanalyse erreichte das Konzept 3 die höchste Bewertung und wurde somit für weiterführende Betrachtungen ausgewählt

Tabelle 1: Bewertungskriterien zur Einschätzung der Konzepte

<ul style="list-style-type: none">• Fertigungsaufwand<ul style="list-style-type: none">• Anzahl der Kontaktstellen/Fügestellen• Notwendige Hilfsmittel/genutzte Anlagen• Anzahl der Fertigungsschritte• Montageaufwand• Übertragbarkeit auf Serienproduktion• Technologisches Risiko<ul style="list-style-type: none">• Sind noch Fertigungsschritte/Prozesse zu erproben?/Wie lange müssen diese Prozesse noch entwickelt werden?• Chance eines Fehlschlages (Z.B. Toleranzketten,...)• Erfüllung der mechanischen Anforderungen<ul style="list-style-type: none">• Klebstellen• Folienhaftung• Drucklast in der Decklage während Wartungsarbeiten	<ul style="list-style-type: none">• Integrierbarkeit in Mosy/Triebwerk<ul style="list-style-type: none">• Störungen mit Umgebung• Möglichkeit zum Einbau in Prüfstand/Triebwerk• Flexibilität für Projekt (andere Materialien)• Qualität<ul style="list-style-type: none">• Maßhaltigkeit des Ergebnisses/auf tretende Toleranzen• Schädigung der akustisch aktiven Folien• Vorspannung/Gleichmäßigkeit akustischen Folie• Kosten<ul style="list-style-type: none">• Materialkosten• Kosten Werkzeuge/Hilfsmittel
---	--

Die anschließend durchgeführte Design- und Fertigungsstudie ist in Abbildung 31 dargestellt. Da die Resonatorhöhlen des PR-Liners im Vergleich zum FHR-Liner keine flexiblen Seitenwände besitzen, ist ihr Herstellungsprozess weniger komplex, was eine Reduzierung der Herstellungsschritte ermöglicht und ein höheres Automatisierungspotenzial aufweist. Hier bietet sich das kostengünstige Tiefziehverfahren für die Herstellung der Resonatorhöhlen an (siehe Abbildung 31a). Dieses Verfahren ermöglicht beliebige Formen der Resonatorhöhlen und der Montageflächen, z. B. eine gekrümmte Geometrie des Resonatorbodens, die dem angestrebten Bauraum und der entsprechenden Kontur der oberen Deckschicht der Struktur entspricht. Aufgrund der gekrümmten Form ist der Fügeprozess der gekrümmten Folienschicht mit der Hohlraumstruktur jedoch komplexer. Da die im vorherigen Berichtszeitraum ausgewählten TPU-Folien eine geringe Steifigkeit aufweisen, ist ein Formwerkzeug erforderlich, das die Kontur des gekrümmten Liners vorgibt (siehe Abbildung 31b). Um einen homogenen Spannungszustand zu erreichen, kann der Einsatz von Schmiermitteln während des Auslenkungsprozesses der Folie dazu beitragen, die entstehenden Reibungseffekte auf ein Minimum zu reduzieren. Die Höhlen werden dann mit der Folie verklebt, geschnitten und schließlich auf der Halterstruktur (Höhle support) befestigt (siehe Abbildung 31c). Es ist zu beachten, dass die Folie in dem Bereich, in dem sie nicht mit der Höhle verbunden ist, keine gekrümmte Form annimmt. Der Querschnitt der Auskleidungsstruktur ist daher nicht kreisförmig, sondern aufgrund der elastischen Eigenschaften der Folie ein Vieleck. Die Auswirkungen auf die aerodynamischen und strömungsmechanischen Bedingungen müssen daher berücksichtigt werden. Um die Entwässerungskanäle, das Schutzblech und die Hohlraumhalterungen zu integrieren, wird für die Herstellung des Hohlraumträgers das Spritzgussverfahren gewählt. Ein Designkonzept des tonnenförmigen PR-Liners mit seinen

Hauptkomponenten ist in Abbildung 31 (d) dargestellt. Das Schutzblech wird an den ineinandergreifenden Halterungen des Hohlraumträgers angebracht, wobei die integrierten Perforationen gleichmäßig verteilt sein müssen, um homogene Strömungsbedingungen für jeden Resonator zu gewährleisten. Außerdem sollte die Perforation klein genug sein, um zu verhindern, dass Gegenstände hindurchdringen und die Filmschicht beschädigen, und groß genug, um Verstopfungen zu vermeiden.

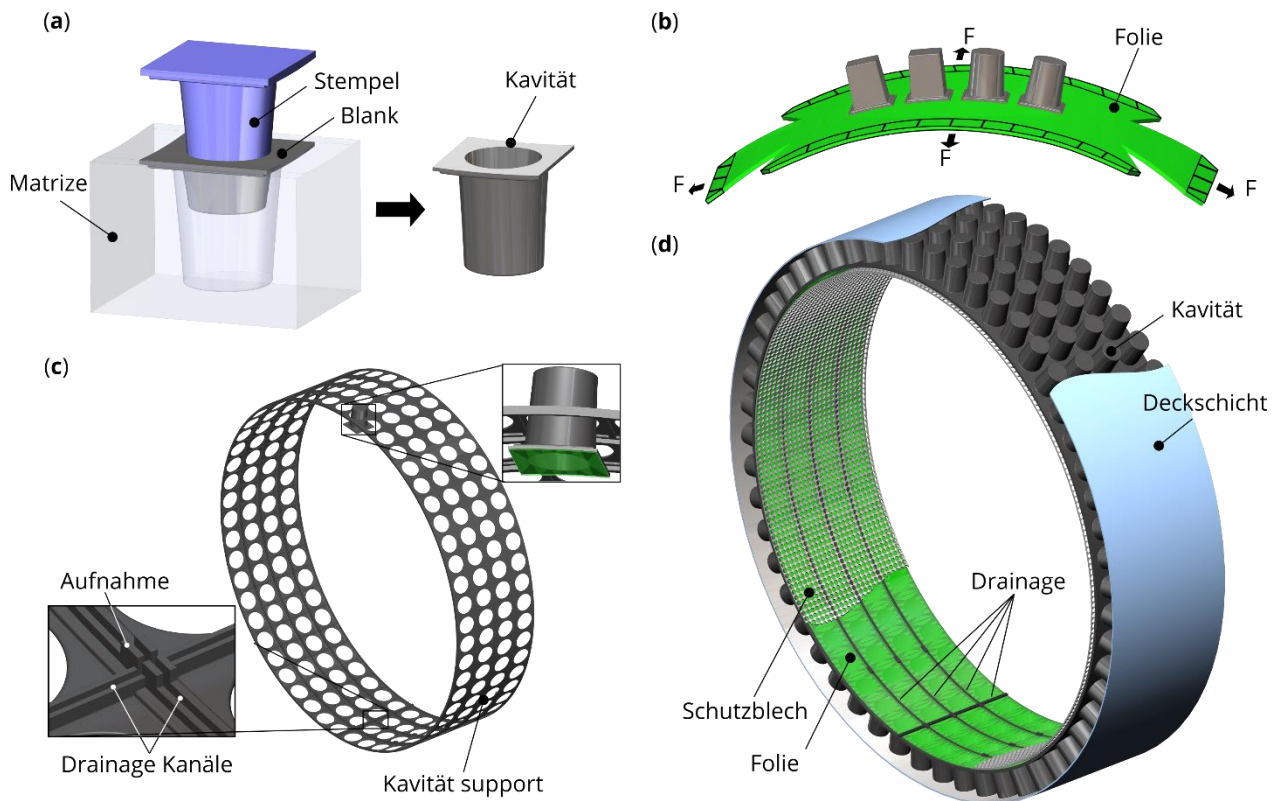


Abbildung 31 (a) Schematischer Thermoformprozess der Resonatorkavität (b) Fügeprozess der gekrümmten und vorgespannten Folie und des Hohlraums, (c) Hohlraumträger mit Funktionselementen wie dem Drainagekanal und Halterungen zur Befestigung des Schutzblechs, (d) Designkonzept des kreisförmigen PR-Liners [P2].

3 Verwertung der Forschungsergebnisse

Am Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) der TU Dresden können die entwickelte Materialauswahlmethode für akustisch und vibrationsbeanspruchte Anwendungen sowie die Modellierung des viskoelastischen Materialverhaltens von Thermoplasten für die wissenschaftliche Analyse und die Entwicklung neuartiger akustisch wirksamer Leichtbaustrukturen genutzt werden. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen darüber hinaus bei der Beantragung neuer grundlagenorientierter Forschungsprojekte einfließen und die erfolgreiche Akquisition anwendungsorientierter FuE-Projekte unterstützen, um somit zur weiteren Steigerung des Drittmittelaufkommens beizutragen. Die erzielten wissenschaftlichen Ergebnisse fließen des Weiteren fließen direkt in wissenschaftliche Diskurse sowie in die Hochschulausbildung, insbesondere in das Lehrangebot der Studienrichtung „Leichtbau“ im Studiengang „Maschinenbau“ der Technischen Universität Dresden ein. Teilaspekte können und sollen in die folgenden Vorlesungsreihen einbezogen werden:

- Faserverbundwerkstoffe,
- Simulationstechniken für den Leichtbau,
- Gestaltung und Auslegung von Leichtbaustrukturen und
- Kunststofftechnologien.

4 Forschungsergebnisse Dritter

Von dritter Seite sind keine verwertbaren Ergebnisse bekannt geworden, die eine Relevanz zu den im Rahmen des Verbundteilprojektes bearbeiteten Thematiken aufweisen. Die Teilnahme der Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG an einigen Projekttreffen zeigt das große Interesse an den im Verbundvorhaben erarbeiteten wissenschaftlichen Erkenntnissen seitens wirtschaftlicher Vertreter auf diesem Gebiet.

5 Veröffentlichungen

5.1 Arbeiten mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung

- [P1] Moritz Neubauer, Felix Schwaericke, Vincent Radmann u. a. "Material Selection Process for Acoustic and Vibration Applications Using the Example of a Plate Resonator". en. In: *Materials* 15.8 (Apr. 2022), S. 2935. ISSN: 1996-1944. DOI: 10.3390/ma15082935
- [P2] Moritz Neubauer, Julia Genßler, Vincent Radmann u. a. "Experimental and Numerical Investigation of Novel Acoustic Liners and Their Design for Aero-Engine Applications". In: *Aerospace* 10.1 (2022), S. 1–24. ISSN: 2226-4310. DOI: 10.3390/aerospace10010005.
- [P3] Moritz Neubauer, Michael Pohl, Michael Kucher u. a. "DMA of TPU Films and the Modelling of Their Viscoelastic Properties for Noise Reduction in Jet Engines". In: *Polymers* 14.23 (2022), S. 5285. DOI: 10.3390/polym14235285.

Literaturverzeichnis

- [1] Lahiri, C.; Bake, F.: A review of bias flow liners for acoustic damping as turbine combustors. *Journal of Sound and Vibration* 400 (2017), pp. 564–605.
- [2] Zhao, D.; Li, X.Y.: A review of acoustic dampers applied to combustion chambers in aerospace industry. *Progress in Aerospace Sciences* 74 (2015), pp. 114–130.
- [3] Bitzer, T.: *Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing*, 1. Aufl. Glasgow: Chapman & Hall, 1997.
- [4] Knobloch, K.; Enghardt, L.; Sarradj, E.; Höschler, K.; Dannemann, M.; Kahle, O.: Helmholtz-Resonator-Liner mit Beschreibung des beobachteten Effekts der Zusatzdämpfung durch flexible Wandelemente, Deutsches Patent, DE 10 2017 205 515.4, angemeldet 31.03.2017.
- [5] Dannemann, M., Kucher, M., Kunze, E., Modler, N., Knobloch, K., Enghardt, L., Sarradj, E.; Höschler, K.: Experimental Study of Advanced Helmholtz Resonator Liners with increased Acoustic Performance by Utilising Material Damping Effects. *Applied Sciences*, Vol. 8, No. 10, 2018, DOI: 10.3390/app8101923 ISSN 2076-3417
- [6] Höschler, K.; Sarradj, E.; Modler, N.; Enghardt, L.: Novel jet engine acoustic liner with improved broadband noise absorption. 31st Congress of International Council of the Aeronautical Sciences ICAS 2018, Belo Horizonte, Brazil, September 2018.
- [7] Höschler, K.; Sarradj, E.; Modler, N.; Enghardt, L.: Novel jet engine acoustic liner with improved broadband noise absorption. 31st Congress of International Council of the Aeronautical Sciences ICAS 2018, Belo Horizonte, Brazil, September 2018.
- [8] ASTM C 365/C 365M – 05: Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores. West Conshohocken, United States: ASTM International, 2005.
- [9] Seemann, R.; Krause, D.: Numerical modelling of Nomex honeycomb sandwich cores at meso-scale level. *Composite Structures* 159 (2017), pp. 702–718.
- [10] Bentouhami, A.; Keskes, B.: Experimental analysis and modelling of the buckling of a loaded honeycomb sandwich composite. *Materials and technology* 49 (2015), no. 2, pp. 235–242
- [11] M. Dannemann, M. Kucher, E. Kunze u. a. "Experimental Study of Advanced Helmholtz Resonator Liners with Increased Acoustic Performance by Utilising Material Damping Effects". In: *Applied Sciences* 8.10 (2018).