Titel:

Schlussbericht der INVENT GmbH (Teil I und Teil II)

Zuwendungsempfänger:	Förderkennzeichen:
INVENT GmbH	**20T1926A**

Vorhabenbezeichnung:

Mikrobohren von Sandwichwerkstoffen (miBoS)

Teilvorhaben:

Qualitätsmanagement und Bauteilprüfung von Sandwichwerkstoffen mit Mikrobohrungen

Laufzeit des Vorhabens:

01.08.2020 bis 31.08.2024

Berichtszeitraum:

01.08.2020 bis 31.08.2024

Beschreibung:

Der vorliegende Sachbericht beschreibt die wesentlichen Arbeiten und Ergebnisse der INVENT GmbH im Verbundvorhaben miBoS.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Der Bericht umfasst:

48 Seiten

48 Abbildung(en)

3 Tabelle(n)

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Verteiler (alphabetisch):

INVENT GmbH

Technische Informationsbibliothek (TIB)

Projektträger DLR

Änderungslenkung

Version	Datum	Änderung	Seiten	Verfasser
A	01.11.2024	Ursprungsfassung	alle	OPMA, WIHE, HARO, LIHA, VOCH, VODO

Inhaltsverzeichnis

1 Kurzbericht 4
1.1 Aufgabenstellung 4
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 5
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 5
1.4 Stand der Technik und Wissenschaft zu Beginn des Vorhabens 7
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 8
2 Eingehende Darstellung 9
2.1 AP 1.1 Festlegung der Randbedingungen und Bereitstellung Testkörper 9
2.2 AP 3.3 Datenverarbeitung Durchschneidkontrolle und Prozessführung 13
2.3 AP 3.5 Entwicklung einer stat. Prozesskontrolle auf Basis der erfassten Daten 16
2.4 AP 4.1 Ermittlung von Klebstoff- und Laminatdegradation 20
2.5 AP 4.2 Mechanische Analyse 23
2.6 AP 4.3 Bestimmung von Kontaminationen der inneren Wabenstruktur 26
2.7 AP 4.4 Simulation: Einfluss der Bohrqualität auf mechanische Kennwerte 29
2.8 AP 4.5 Erzielbare Percentage of Open Area: Vergleich Fertigungsvarianten 31
2.9 AP 5.4 Piezo-basierte Schwingungsdetektion und Kompensation 34
2.10 AP 5.6 Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems 40
3 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 44
4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 44
5 Nutzen, Verwertbarkeit (fortgeschriebener Verwertungsplan) 44
5.1 Wirtschaftliche & wissenschaftlich, technische Erfolgsaussichten 44
5.2 Wissenschaftliche / wirtschaftliche Anschlussfähigkeit 46
6 Externer Fortschritt auf dem Gebiet 47
7 Veröffentlichungen der Ergebnisse nach Nr. 5 der NKBF 47

1 Kurzbericht

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines laserbasierten Verfahrens zur Einbringung von Mikrobohrungen in CFK-Sandwichstrukturen zur Schalldämpfung. Dies umfasst die Umsetzung neuer Hardwarekomponenten sowie einer Prozessführung, -kontrolle und -steuerung für den Laserbohrprozess. Ziel ist das Einbringen von Bohrungen unterschiedlicher Durchmesser, die flexibel angepasst werden können bei gleichzeitiger Überwachung und Dokumentation der Prozessdaten zur Steigerung der Prozesssicherheit und -qualität.

Die angestrebte Technologie zielt auf ein **effizientes Verfahren zur Realisierung akustisch dämpfender Sandwichelemente**, die im Bereich des Flugzeugtriebwerks zur Lärmreduktion eingesetzt werden können.

Ein weiteres Einsatzfeld stellen Passagierkabinen dar, deren Innenausbau ganz wesentlich auf Sandwichstrukturen beruht. Die Sandwichelemente werden durch einen Laserbohrprozess einseitig mit Mikrobohrungen versehen, d. h. es wird eine perforierte Oberfläche erzeugt. Die Bohrungen in der Oberfläche münden in den Wabenzellen der Sandwichplatte, wodurch ein mit der Umgebungsluft verbundener Raum gebildet wird, in den Schallwellen eindringen können. Hierbei wird durch Reibung Schallenergie in Wärmeenergie umgewandelt, wodurch der schalldämmende Effekt zustande kommt. Da das geplante Verfahren für luftfahrtrelevante Bauteile zur Anwendung kommen soll, wird im Rahmen des Vorhabens ein **Prozessüberwachungssystem** entwickelt, dass die Daten des Herstellprozess erfasst und dokumentiert, wodurch eine Kontrolle der Prozessdaten ermöglicht werden soll. Außerdem werden an den hergestellten Sandwichplatten **Qualitätstests** durchgeführt und die Auswirkung der Prozessparameter auf die Bauteilqualität untersucht. Auf der Basis dieser Untersuchungen soll ein Simulationsmodell erstellt werden, dass die Simulation von beliebigen Sandwichbauteilen ermöglicht, um jeweils die idealen Bearbeitungsparameter abzuleiten.

Ein weiteres Ziel ist die Erarbeitung eines **steifigkeitsoptimierten CFK-Gehäuses** für einen Laserbearbeitungskopf, der Bestandteil der Laserbohranlage werden soll. Dieser Kopf soll für hochdynamische Bewegungsabläufe optimiert werden und im Idealfall sollen durch die Implementierung einer aktiven Schwingungsdämpfung die maximal möglichen Verfahrgeschwindigkeiten noch gesteigert werden.

Im **Teilvorhaben** der INVENT GmbH liegt der Schwerpunkt auf folgenden Punkten

- Fertigungsprozess für perforierte Sandwichbauteile für Anwendungen im Triebwerks- und Kabinenbereich
- schwingungsgedämpfte Leichtbaukomponenten, die im Laserbohrsystem eingesetzt werden und die Effizienz in der Fertigung oder Montage steigern
- Erstellung eines Datenmanagementsystem, dass die anfallenden Bauteil- und Prozessdaten verwaltet und zukünftig den Grundstein für die Anwendbarkeit der Lasertechnologie als ressourcenschonende Fertigungsweise in der allgemeinen Luftfahrtfertigung legen könnten.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Verbundvorhaben wurde initiiert, um neue Technologien zu entwickeln sowie diese auf ein höheres, anwendungsnäheres Niveau zu heben. Die wachsende Nachfrage nach sowohl leisen als auch leistungsfähigen Faserkunststoffverbunden und deren effiziente Herstellung für die Luftfahrtbranche soll mit innovativen Lösungen begegnet werden. Hauptvoraussetzung für die Vorhabendurchführung war die Fusion der einzelnen und vor allem branchenübergreifenden Fachkompetenzen der am Projekt beteiligten Partner in den Bereichen:

- Lasertechnologie (LZH)
- Herstellung und Prüfung von Sandwichplatten (INV)
- Prozessentwicklung (LZH, KMS)
- Prozesskontrolle (LZH, KMS, INV)
- Qualitätsmanagement und Bauteilprüfung unter luftfahrtrelevanten Rdbg. (INV)
- Vorrichtungsbau (KMS)
- Leichtbau mit Faserverbundwerkstoffen (KMS, INV)

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Forschungsvorhaben wurde mit der Forschungeinrichtung Laser Zentrum Hannover e.V. und dem industrillen Partner KMS Technology Center GmbH durchgeführt. Die Koordination des Verbundes erfolgte durch die INVENT GmbH. Die technische Bearbeitung erfolgte auf Basis eines Kooperationsvertrags, eines abgestimmten Arbeitsplans und der Inhalte des Projektantrags. In Telefonkonferenzen und Projekttreffen wurde dieser Rahmen regelmäßig verfeinert und abgestimmt.

Im Folgenden ist der Projektstrukturplan dargestellt. Untergliedert wurde das Projekt in fünf Hauptarbeitspakete (HAP) mit jeweils mehreren Einzelarbeitspaketen (AP). Die Arbeitspakete wurden so aufgeteilt, dass sie zusammenhängende Aufgaben umfassen, die von einem einzelnen oder einem Teil der Konsortialpartner erfüllt werden konnten. Dadurch wurde eine effektive Bearbeitung des Projektes und eine ergebnisorientierte Zusammenarbeit gewährleistet. HAP 1 befasste sich unter der Leitung vom LZH um die optische Auslegung des Systems. Inhalt vom HAP 2 war ebenfalls unter Leitung des LZHs die Prozessentwicklung. Die Prozesskontrolle und das Datenmanagement des Bohrverfahrens wurde im HAP 3 unter der Leitung von KMS erarbeitet. Für das Qualitätsmanagement und die Bauteilprüfung unter der Leitung von INVENT war das HAP4 vorgesehen. Im HAP 5 erfolgte die Realisierung der Prozesshardware und die Demonstration der Technologie unter der Leitung von KMS. Den Hauptarbeitspaketen übergeordnet war das als AP 0 bezeichnete Projektmanagement, welches für das Gesamtprojekt von der INVENT GmbH verantwortet und von allen Projektpartnern unterstützt wird.

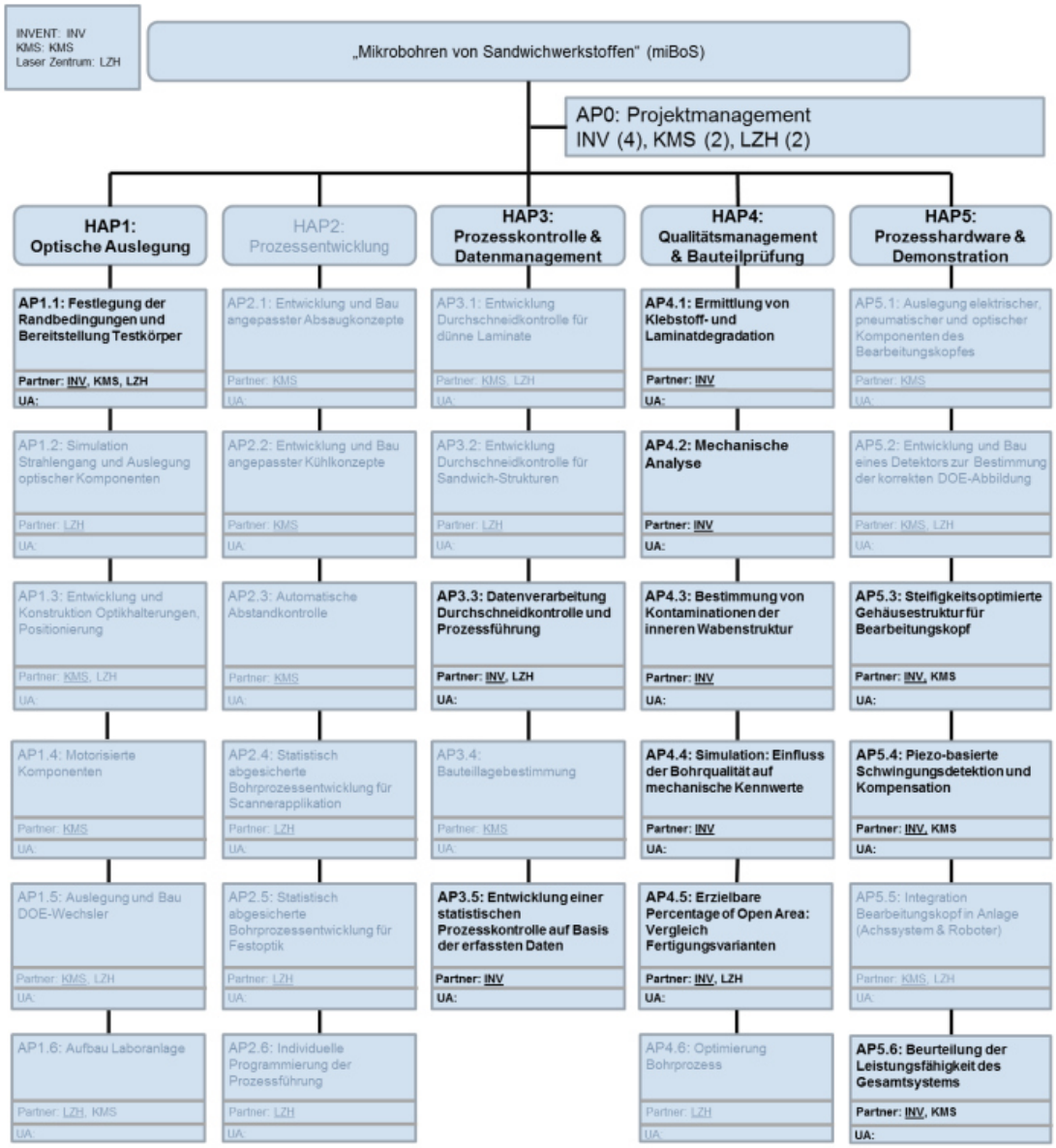


Abbildung 1: Projektstrukturplan für das Teilvorhaben der INVENT GmbH

Die INVENT GmbH engagierte sich in allen für sie geplanten Arbeitspaketen und übernahm im Verbundvorhaben folgende Aufgaben und Funktionen:

- Fertigungsprozess für perforierte Sandwichbauteile für Anwendungen im Triebwerks- und Kabinenbereich
- Entwicklung und Beurteilung eines aktiven Schwingungsdetektions- und Kompensationssystems im Laserbohrsystem für eine Effizienzsteigerung in der Fertigung oder Montage
- Erstellung eines Datenmanagementsystems, dass die anfallenden Bauteil- und Prozessdaten verwaltet und zukünftig den Grundstein für die Anwendbarkeit der Lasertechnologie als ressourcenschonende Fertigungsweise in der allgemeinen Luftfahrtfertigung legen könnte

Vorgangsname		Partner
AP 0	Projektmanagement (Alle)	
HAP 1	**Optische Auslegung**	**LZH**
AP 1.1	Festlegung der Randbedingungen (Lochmuster, Abstand, Lochdurchmesser, ...)	INV, KMS, LZH
AP 1.2	Simulation Strahlengang und Auslegung optischer Komponenten	LZH
AP 1.3	Entwicklung und Konstruktion Optikhalterungen, Positionierung	KMS, LZH
AP 1.4	Motorisierte Komponenten	KMS
AP 1.5	Auslegung und Bau DOE-Wechsler	KMS, LZH
AP 1.6	Aufbau Laboranlage	LZH, KMS
MS 1	Laboranlage fertiggestellt und bereit für Testbetrieb	LZH, KMS
HAP 2	**Prozessentwicklung**	**LZH**
AP 2.1	Entwicklung und Bau angepasster Absaugkonzepte	KMS
AP 2.2	Entwicklung und Bau angepasster Kühlkonzepte	KMS
AP 2.3	Automatische Abstandkontrolle	KMS
AP 2.4	Statistisch abgesicherte Bohrprozessentwicklung für Scannerapplikation	LZH
AP 2.5	Statistisch abgesicherte Bohrprozessentwicklung für Festoptik	LZH
AP 2.6	Individuelle Programmierung der Prozessführung	LZH
MS 2	Bohrprozesse auf Basis einer eigenen Softwaresteuerung verfügbar	LZH
HAP 3	**Prozesskontrolle & Datenmanagement**	**KMS**
AP 3.1	Entwicklung Durchschneidkontrolle für dünne Laminate	KMS, LZH
AP 3.2	Entwicklung Durchschneidkontrolle für Sandwich-Strukturen	LZH
MS 3	Durchschneidkontrollen verfügbar, validiert und in Steuerungsroutine eingebunden	KMS, LZH
AP 3.3	Datenverarbeitung Durchschneidkontrolle und Prozessführung	INV, LZH
AP 3.4	Bauteillagebestimmung	KMS
AP 3.5	Entwicklung einer statistischen Prozesskontrolle auf Basis der erfassten Daten	INV
MS 4	Datenerfassungs- und Prozesskontrollsystem erstellt und in Prozessablauf validiert	INV
HAP 4	**Qualitätsmanagement & Bauteilprüfung**	**INV**
AP 4.1	Ermittlung von Klebstoff- und Laminatdegradation	INV
AP 4.2	Mechanische Analyse	INV
AP 4.3	Bestimmung von Kontaminationen der inneren Wabenstruktur	INV
AP 4.4	Simulation: Einfluss der Bohrqualität auf mechanische Kennwerte	INV
AP 4.5	Erzielbare Percentage of Open Area: Vergleich Fertigungsvarianten	INV, LZH
AP 4.6	Optimierung Bohrprozess	LZH
MS 5	Auf Basis mechanischer Analyse optimierter Bohrprozess für Bearbeitungskopf nutzbar	INV, LZH
HAP 5	**Prozesshardware & Demonstration**	**KMS**
AP 5.1	Auslegung elektrischer, pneumatischer und optischer Komponenten des Bearbeitungskopfes	KMS
AP 5.2	Entwicklung und Bau eines Detektors zur Bestimmung der korrekten DOE-Abbildung	KMS, LZH
AP 5.3	Steifigkeitsoptimierte Gehäusestruktur für Bearbeitungskopf	INV
AP 5.4	Piezo-basierte Schwingungsdetektion und Kompensation	INV
MS 6	Vollständiger Bearbeitungskopf bereit zur Integration in Handhabungssystem	KMS, INV
AP 5.5	Integration Bearbeitungskopf in Anlage (Achssystem & Roboter)	KMS, LZH
AP 5.6	Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems	INV, KMS

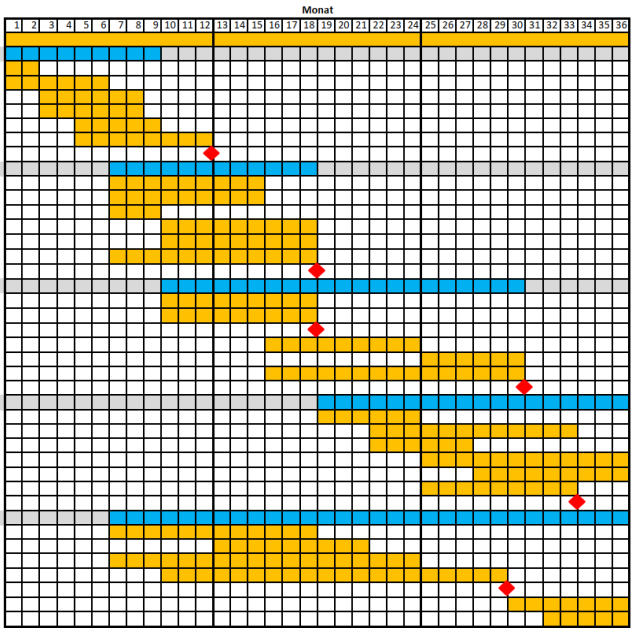


Abbildung 2: Projektplan mit Beteiligung der INVENT GmbH

1.4 Stand der Technik und Wissenschaft zu Beginn des Vorhabens

Die Wirksamkeit poröser Strukturen für die Schalldämmung ist bekannt und Stand der Technik. Typische Einsatzfelder sind beispielsweise poröse Wandelemente beispielsweise in Großraumbüros. Ein Material, das gegenüber der umgebenden Luft offene, luftgefüllte Poren aufweist, die ausreichend eng und tief sind, bewirkt für auftreffende Schallwellen einen Dämpfungseffekt, der durch Reibungsvorgänge verursacht wird, die Schallenergie in Wärme umwandeln. Mikroperforierte Absorber (z. B. Lochdurchmesser 1mm oder kleiner) haben ebenfalls einen schalldämmenden Effekt durch Reibung, allerdings ist hier im Gegensatz zu makroperforierten Materialien der Flächenanteil der Löcher durch deren kleinen Durchmesser gering im Vergleich zur Gesamtoberfläche, beispielsweise 1%. Dadurch bleibt der überwiegende Teil des perforierten Materials strukturmechanisch erhalten. Als Beispiel für die Verringerung des Schalldruckpegels in einem Triebwerk wird bei der Auskleidung von Sekundär- und Turbinenströmungskanal mit einem mikroperforierten Absorber in der Literatur eine Reduktion um ~10dB angegeben.

Zu den konventionellen Verfahren die zur Einbringung von Mikrobohrungen in CFK genutzt werden, zählen das mechanische Bohren und das Stanzen. Beim Stanzen können flächige Bearbeitungen über Walzen realisiert werden, dieses Verfahren eignet sich daher gut für eine Skalierung auf große Flächen. Allerdings werden beim Stanzvorgang hohe Kräfte aufgebracht, was bei der Anwendung auf CFK zu Abplatzungen und Delamination führen kann und insbesondere vor dem Hintergrund von Anwendungen in der Luftfahrt, die hohen Qualitätsanforderungen unterliegen, ein Ausschlusskriterium ist. Zudem ist das Verfahren begrenzt auf die Bearbeitung von Laminaten die erst im Anschluss zum Sandwich Verbund verklebt werden können, was zum teilweisen Verschluss der Bohrungen durch Klebmasse und in der Folge zu einer Verringerung der Percentage of Open Area (POA = Porosität) und einer Verschlechterung der dämpfenden Eigenschaften führt.

Das Einbringen von Mikrobohrungen durch mechanisches Bohren kann am fertigen Sandwich Bauteil erfolgen und wird im großflächigen Maßstab in der Regel über Bohrer-Arrays realisiert, die bis zu ~20 Bohrungen gleichzeitig in kurzen Prozesszeiten (<2s) anfertigen können. Da die Bohrer vor allem bei CFK starkem Verschleiß unterliegen, müssen diese bei typischen Bohrszenarios für Akustikanwendungen in der Regel nach etwa 0,5m² Bohrfläche (entspricht ~3000 Bohrungen) ausgetauscht werden und verursachen neben den Werkzeugkosten, Stand- und Rüstzeiten. Am Beispiel eines Triebwerks kann die gesamte Fläche mit akustischer Auskleidung laut Literatur bis zu 30m² einnehmen, typische Bearbeitungsflächen mit Akustikbohrungen sind mit ca. 12m² bekannt. Darüber hinaus liegt die typische Limitierung des Bohrungsdurchmessers bei industrieller Anwendung derzeit bei Ø1 mm, wohingegen geringere Durchmesser durchaus erwünscht wären, da damit eine höhere innere Reibung in der Bohrungsöffnung und eine höhere Seite 6 von 25 Porosität erzielt werden kann, was in einer besseren und breitbandigeren Schalldämpfung resultiert. Das Lasermikrobohren verschiedenster Werkstoffe ist im Rahmen der allgemeinen Lasermikromaterialbearbeitung in vielen Anwendungen vertreten. Hier kommen auch Bearbeitungsköpfe und Verfahren unter Nutzung diffraktiver optischer Elemente zur Erhöhung der Effizienz zum Einsatz, jedoch in Kombination mit Strahlquellen deren Pulsenergien und mittleren Leistungen nicht ausreichen oder in langen Bearbeitungszeiten münden und daher einem sinnvollen Einsatz bei der Bearbeitung von CFK entgegenstehen. Zudem sind optische Parameter verfügbarer Anlagentechnik wie Fokusdurchmesser und Rayleighlänge oder Prozessführungsoptionen wie Leistungsanpassung und Fokusanpassung nicht auf die Erfordernisse der CFK-Bearbeitung angepasst oder in einem steuerbaren System vereinbar. Aktuelle Lösungen im Bereich der Mikrobearbeitung sind somit weder für die Mikrobohrbearbeitung von CFK noch für die hohen Leistungen und Pulsenergien der Strahlquelle (Ep = 100 mJ, PL,m = 1,5 kW) wie sie im vorliegenden Projekt miBoS genutzt werden soll verfügbar.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Durch die branchenübergreifenden Fachkompetenzen der Projektpartner konnten alle Aufgaben mittels einer projektinternen Verteilung bearbeitet werden. Für INVENT war somit eine Zusammenarbeit mit anderen Stellen nicht notwendig.

2 Eingehende Darstellung

Im Folgenden werden die Arbeiten, Inhalte und Ergebnisse nach Abfolge der APs dargestellt.

2.1 AP 1.1 Festlegung der Randbedingungen und Bereitstellung Testkörper

Innerhalb des Arbeitspakets 1.1 wurden die groben Anforderungen an das Gesamtsystem erfasst und die Randbedingungen definiert. Auf dieser Basis erfolgt die Konzeption der Teilkomponenten und des Gesamtsystems.

Dazu wurde ein Lastenheft für eine geeignete Anwendung zum Einsatz von Mikrobohrungen in Verkehrsflugzeugen erstellt. Es wurde ausgehend von spezifischen Randbedingungen eine Recherche durchgeführt und bereits existierende sowie mögliche zu entwickelnde Anwendungen für Mikrobohrungen mit den Anforderungen der Zielmaterialien verglichen. Durch diese Recherche ist ein Lastenheft entstanden, welches im Detail verschiedene mögliche schallemittierende Komponenten auflistet und hinsichtlich Verwertung bewertet. Diese Auflistung umfasst:

- Interieur-Verkleidungen und -strukturen (beispielsweise Wand- oder Deckenpaneele, Raumteiler oder Gepäckaufbewahrungen)
- Strukturteile (beispielsweise Fahrwerksklappen)
- Air-Conditioning System (beispielsweise Leitungen oder Verkleidungen)
- Triebwerkskomponenten
- Auxiliary Power Unit (APU)

Vorrangige Bewertungskriterien für diese Auswahl sind Schallquelle, Einsatztemperatur sowie mögliche erosive Quellen. Die Auswertung der Bewertungen weist ein besonderes Potential des Air-Conditioning System (ACS) auf. Hierbei kommt es zu einer niedrigen Belastung durch Temperatur- und Erosionseinwirkungen da sich die Komponente im Innenbereich eines Flugzeuges befindet. Lärm wird hauptsächlich durch die im Strömungskreislauf angeordneten, elektrisch angetriebenen Aggregate verursacht. Ein denkbarer Einsatzort der perforierten Sandwichstrukturen stellen insbesondere der Ansaug-, Leitungs- und Austrittsbereich des ACS dar. In Abbildung 3 ist das Leitungssystem des ACS im Kabinenbereich schematisch dargestellt.

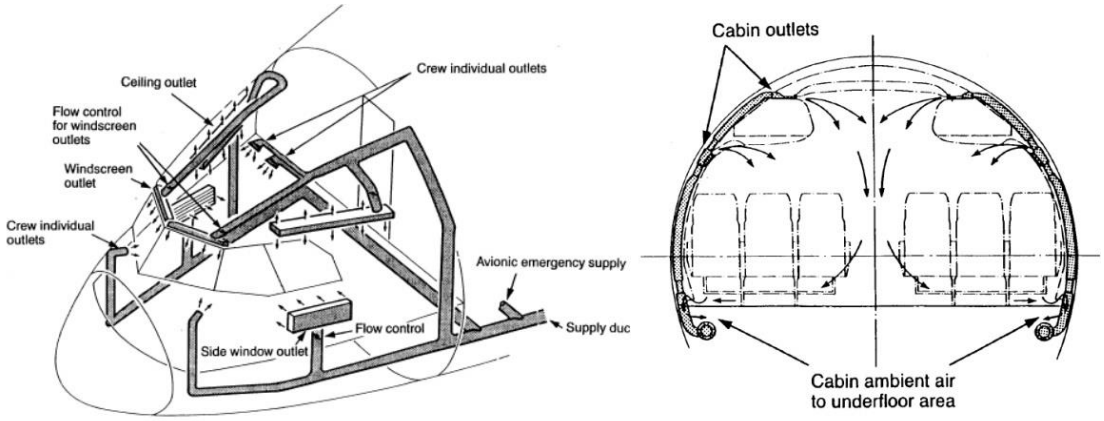


Abbildung 3: Air Conditioning System, Leitungssystem Aggregaten [D. Scholz, Aircraft Cabin Air and and Engine Oil 2017]

Ein zugehöriges Aggregatsystem zur Verdichtung und Temperaturregulierung der zugeführten Außenluft mit zugehörigen Leitungen ist in Abbildung 4 ersichtlich.

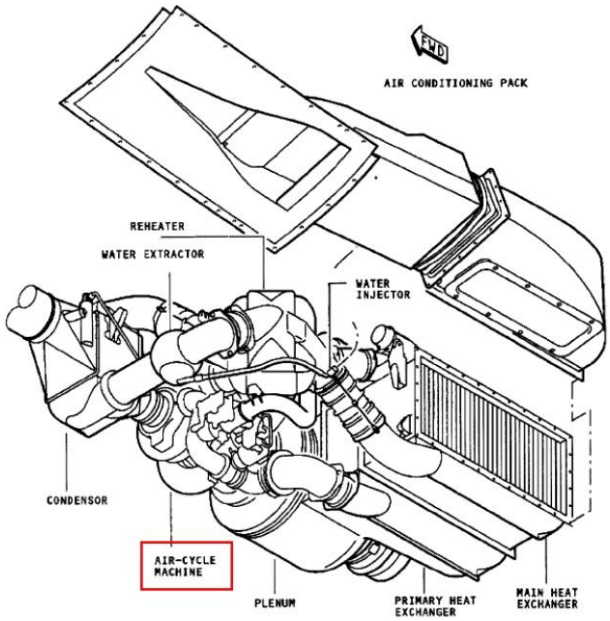


Abbildung 4: Air Conditioning Pack mit Einlauf, Leitungen und Aggregaten [D. Scholz, Aircraft Cabin Air and Engine Oil 2017]

Es wurden verschiedene mögliche Demonstratorgeometrien abgeleitet und dem Projektkonsortium vorgestellt. Das erstellte Lastenheft sowie die möglichen Geometrien wurden innerhalb des Konsortiums diskutiert. Es wurde gemeinsam beschlossen, dass eine Anwendung innerhalb des ACS als zielführende Geometrie innerhalb des Projektes entwickelt werden soll.

Dass dieser Demonstrator entgegen der innerhalb der Projektplanung anvisierten Anwendung „Triebwerkskomponente“ geht, wurde ebenfalls diskutiert. Die Entscheidung für eine ACS- und gegen eine Triebwerkskomponente widerspricht jedoch nicht den Projektzielen.

Es wurden zwei Demonstratoren (ersichtlich in Abbildung 4) definiert, die gleichzeitig die Entwicklungsschiene der Laserbearbeitung darstellen:

1. Initial wird eine flache Platte gefertigt, die den Demonstrator für Verkleidungs-/Trennelemente darstellt
2. Anschließend wird eine leicht gekrümmte Struktur gefertigt, die den Demonstrator für Triebwerksverkleidungen darstellt

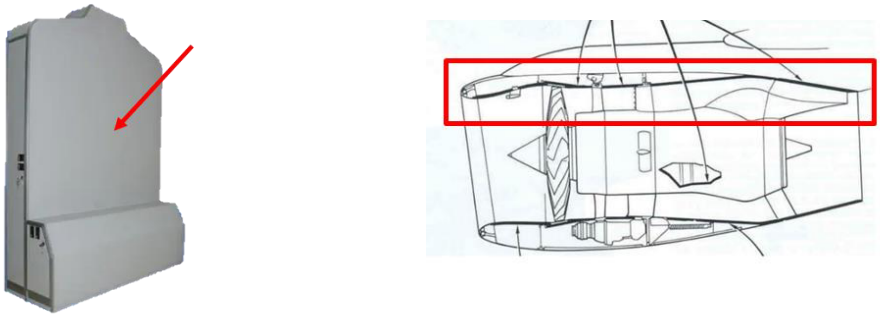


Abbildung 5: Definition der zu entwickelnden Demonstratoren: Flache Platte (links), leicht gekrümmt (rechts)

Es wurden Probekörper für initiale Tests des Projektpartners LZH gefertigt und beigestellt. Ziel des LZH ist es, mit diesen Versuchskörpern die richtigen Parameter für die Laserbearbeitung zu ermitteln. Die Versuchskörper umfassen:

- Einzelne CFK-Platten mit Klebefilm
    - Zur Ermittlung der Laserparameter für das CFK
    - Klebschicht wirkt als Störgröße und muss in der Parameterstudie berücksichtigt werden
- Ausgehärteter Klebefilm ohne Fügemedium
    - Zur Ermittlung der Parameter zur Durchdringung der Klebschicht
    - Ein Fügemedium wäre hier hinderlich, da CFK den Laserstrahl absorbieren und somit die Messung verfälschen würde

Es wurden diverse Aushärtungstests durchgeführt, um eine verwendbare Konfiguration zu erhalten. Herausforderung war der fehlende zweite zu verklebende Fügepartner. Das Fehlen des Fügepartners ergab ein Ausfließen des Klebefilms, welches zu verhindern war. In Abbildung 6 bis Abbildung 9 sind die erfolgreichsten Ergebnisse ersichtlich, welche dem LZH beigestellt und verwendet werden konnten.

Abbildung 6: Versuchskörper CFK/Klebfilm #1

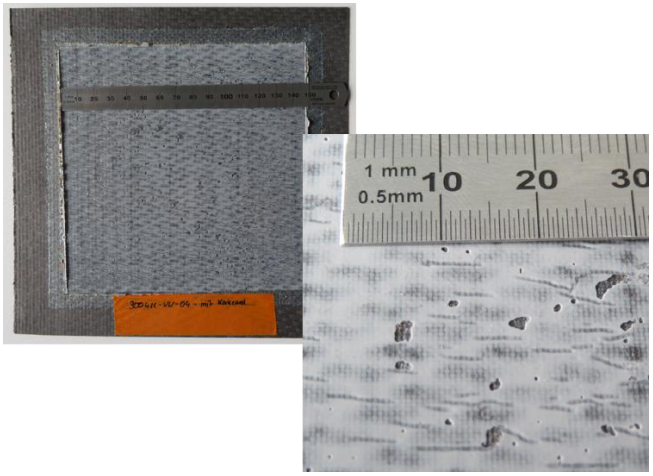


Abbildung 7: Versuchskörper CFK/Klebfilm #2

Abbildung 8: Versuchskörper CFK/Klebfilm #3

Abbildung 9: Versuchskörper reiner Klebfilm

Weitere Probekörper, die eine deutlich höhere Komplexität aufweisen, da es sich um Sandwich-Komponenten handelt, wurden gefertigt und dem LZH zur weiteren Bearbeitung zur Verfügung gestellt. Die Bestellung umfasst CFK-Facesheets, die mit einer Aramid-Papierwabe verklebt sind. Es wurde ein Materialmix gewählt, der für Luftfahrtanwendungen repräsentativ ist und dementsprechend als anwendungsnah gilt. Auch bei diesen Probekörpern ist das Ziel, die richtigen Parameter für die Laserbearbeitung zu ermitteln. In Abbildung 3 sind die gefertigten Komponenten ersichtlich.

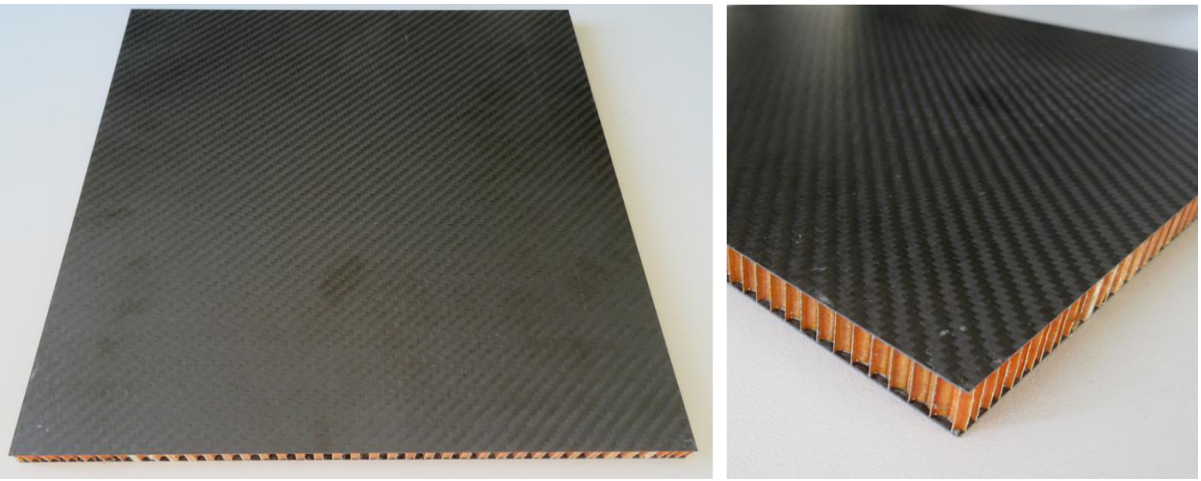


Abbildung 10: Sandwichkomponenten zur Parameterermittlung am LZH

2.2 AP 3.3 Datenverarbeitung Durchschneidkontrolle und Prozessführung

Innerhalb von Arbeitspaket HAP 3 wurden Probekörper zur Durchschneid- sowie Prozesskontrolle in enger Abstimmung mit dem Konsortium definiert. Neben einer ungelochten Referenz sollen folgende Parameter untersucht werden:

- Perforationsverhältnis (Anzahl Löcher bezogen auf Fläche des Facesheets)
- Wabenhöhe
- Perforationswinkel
- Lochdurchmesser

Um diese Parameter sowohl akustisch als auch mechanisch zu prüfen, wurde ein initiales Sandwich gefertigt, ersichtlich in Abbildung 6.

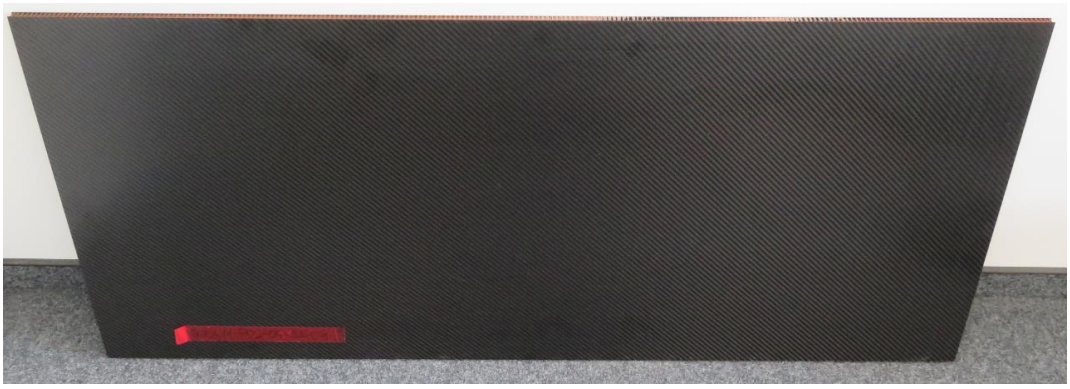


Abbildung 11: Versuchspanel für Tätigkeiten innerhalb HAP 3

Aufbauend auf der Parameterauswahl für die Datenverarbeitung und -erfassung der Durchschneidkontrolle wurden Prüfkörper aus dem gefertigten Sandwich hergestellt und am LZH mit verschiedenen Laserlöchern versehen.

- Wabenkerndicke D:
  - 11 mm
  - 20 mm
- Perforationsverhältnis:
  - 1%
  - 3 mm Lochabstand → resultiert in ~2%
- Lochdurchmesser d:
  - 0,25 mm
  - 0,5 mm
  - 0,75 mm

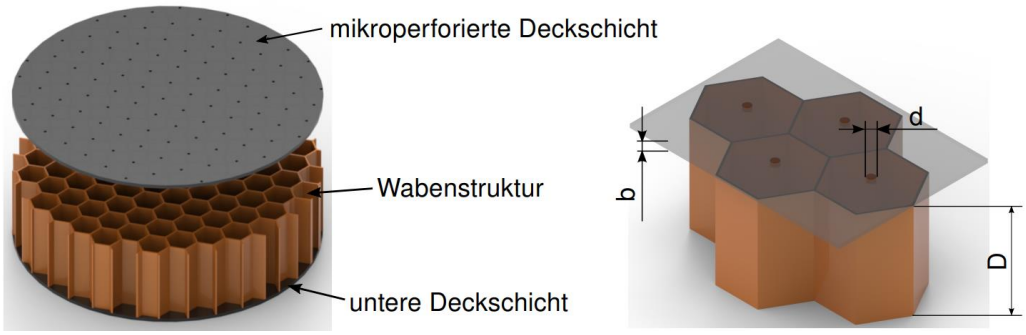


Abbildung 12: Parameterdarstellung am Probekörper

Die Variation der Parameter wurden bei den Probekörpern nach der OFAT-Methode festgelegt und nach einem 3-stelligen Benennungssystem benannt (siehe Abbildung 13).

20 – 1 – 0,5

1. Stelle Wabendicke	2. Stelle Perforation	3. Stelle Lochdurchmesser
20: 20 mm	**0:** keine	**0:** keine
11: 11 mm	**1:** 1%	**0,25:** 0,25 mm
	3: 2% (3 mm Lochabstand)	**0,5:** 0,5 mm
		0,75: 0,75 mm

Abbildung 13: Benennungssystem der Varianten

Diese Probekörper wurden im Anschluss akustisch und mechanisch geprüft (Kapitel 2.4 und Kapitel 2.5).

Eine erste Begutachtung hat ergeben, dass eine reine Rohdatenverarbeitung seitens INVENT nicht sinnvoll und zielführend ist. Die Bohrparameter und deren Abhängigkeit untereinander sind hierbei so umfangreich und vielschichtig, dass keine einfache und effiziente Bewertung möglich ist.

Als Alternative wurde die vereinfachte Durchschneidkontrolle mittels optischer Erfassung und Auswertung der Lichtintensität in Betracht gezogen, welche im Zusammenhang mit der Kontaminationsbestimmung entstanden ist (AP4.3). Dieses Verfahren liefert jedoch nur Ergebnisse, wenn eine rückseitige Zugänglichkeit im Bohrprozess selbst möglich ist. Für geschlossene bzw. geometrisch komplexen Strukturen ist dies nicht anwendbar. Infolgedessen beschränkt sich die Auswertung auf eine einseitige Prüfung. Hierfür wurden die Möglichkeiten der Thermographie oder optischen Kamera basierten Erfassung identifiziert. Auf Grund der dafür erforderlichen Hardware wurden in einem ersten Schritt die Möglichkeiten und die Grenzen der automatischen Bilderfassung und -auswertung präferiert und recherchiert. Es wurde ein Versuchsaufbau mit Durchlichteinheit sowie Kameraaufbau umgesetzt, um verschiedene Beleuchtungsszenarien in Abhängigkeit der Bauteil- und Bohrkonfiguration zu untersuchen (Abbildung 14). Ziel ist die Bereitstellung geeigneter, aussagekräftiger Bilddaten für den anschließenden automatisierten Auswerteprozess (Stichwort: Mustererkennung - Pattern Recognition). Im nächsten Schritt wurde die automatische Erfassung und Auswertung durchgeführt.

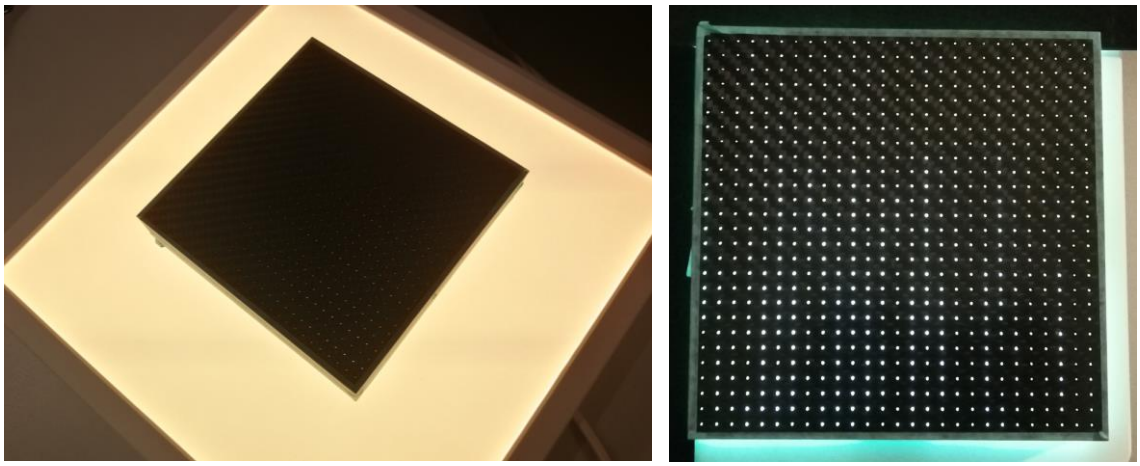


Abbildung 14: Versuchsaufbau Durchlichteinheit (links) zur Identifikation geeigneter Beleuchtungsparameter (Helligkeit, Lichtfarbe) für die automatisierte Bohrlochidentifikation

Für die statistische Prozesskontrolle wurde ein Konzept erarbeitet, welches sich auf eine industriell anwendbare Qualitätskontrolle bzw. Eingangskontrolle von gelaserten Löchern fokussiert. Hierfür wurde eine automatisierte optische Erfassung und digitale Auswertung charakteristischer Größen (Durchmesser, Rundheit, Wärmeeinflusszone, perforierte Fläche, mechanische Kennwerte) geplant und umgesetzt (Kapitel 2.3).

2.3 AP 3.5 Entwicklung einer stat. Prozesskontrolle auf Basis der erfassten Daten

Die Statistische Prozesskontrolle (SPC) ist eine Methode zur Überwachung und Verbesserung von Prozessen in der Produktion anhand statistischer Werkzeuge. Ziel ist es, Prozessvariationen zu erkennen, zu kontrollieren und potenzielle Probleme frühzeitig zu identifizieren, um die Qualität der Produkte oder Dienstleistungen zu sichern.

Für den im Projekt definierten Laserperforationsprozess hat hierzu das LZH in Zusammenarbeit mit KMS die erforderliche Infrastruktur umgesetzt, so dass die Voraussetzungen für eine solche Prozesskontrolle erfolgen kann. Die durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse können hierbei den Partnerberichten entnommen werden.

Als industrieller Anwender und Verarbeiter der bereitgestellten, perforierten Sandwichstrukturen muss INVENT ebenfalls die gleichbleibende Qualität garantieren. Dazu dient die Wareneingangsprüfung, die je nach Wareneingangsklasse (Tabelle 2) unterschiedliche Prüfumfänge definiert. Für die durch das LZH bereitgestellten Strukturen ist mindestens Klasse 2 anzusetzen, was eine optische Sichtprüfung umfasst.

Tabelle 1: Wareneingangsklassen: Definition und Prüfung

Klasse	Definition und Prüfumfang
1	Waren, die keinen oder nur geringen Einfluss auf die Bauteilqualität haben wie beispielsweise Verbrauchsmaterial (Fräser, Bohrer, Handschuhe, Becher, Papiertücher, Stifte); Abgleich Lieferschein
2	Waren oder Dienstleistungen, die direkten Kontakt mit den Bauteilen und deshalb einen Einfluss auf die Bauteilqualität haben (z.B. Folien, Deckbleche, Harze, Lacke, Prüf- und Messmittel); Wie K1 sowie Sicht-, Maß- und Zertifikatsprüfungen,
3	Waren in Form von strukturell beanspruchten Materialien wie Prepreg oder Waben bzw. Waren, die Einfluss auf die Maßhaltigkeit der Bauteile haben wie beispielsweise Werkzeuge und Vorrichtungen sowie alle sonstigen qualitätsrelevanten Materialien; Wie K2 sowie zusätzliche Prüfung spezifischer Größen mittels DT und NDT-Verfahren

Ziel seitens INVENT war es daher eine geeignete Prozesskontrolle im Sinne einer Wareneingangsprüfung aufzubauen, um die Qualität von Produkt und Prozess sicherstellen zu können. In Anlehnung an die SPC sind dabei folgende Voraussetzungen zu erfüllen:

- **Stabiler Prozess:** Der Prozess muss zunächst stabil und reproduzierbar sein, d.h. nur zufällige Schwankungen sollten auftreten.
- **Messbare Daten:** Es müssen kontinuierliche oder diskrete Daten zur Verfügung stehen, die regelmäßig erfasst werden können.
- **Passende Stichprobengröße:** Die Stichprobengröße muss repräsentativ und ausreichend sein, um zuverlässige Aussagen über den Prozess zu treffen.

- **Fähigkeit des Prozesses**: Der Prozess muss in der Lage sein, die spezifizierten Anforderungen zu erfüllen.

Zur Erfüllung dieser Voraussetzungen wurde ein geeigneter Prozess definiert sowie ein zugehöriger Anforderungskatalog erstellt.

Um eine automatisierte Prozesskontrolle zu ermöglichen ist zunächst ein geeignetes Verfahrsystem notwendig. Um für die Prüfkörperdimensionen innerhalb des Projekts geeignet zu sein, wurde ein Experimentalsystem mit einem Arbeitsraum (x/y – Achse) von jeweils 500 mm gewählt. Neben diesen beiden motorisierten Achsen verfügt das System zusätzlich über eine verfahrbare Z-Achse um auch für die Oberflächenbetrachtung leicht gekrümmter Körper einsetzbar zu sein. Die Positioniergenauigkeit des Endeffektors beträgt weniger als 1 mm wobei diese Anforderung für moderne Positioniersysteme keine besondere Anforderung stellt. Durch die Verschiebbarkeit der Z-Achse kann zusätzlich ein gewisser Anpressdruck des Prüfkopfes auf der Probenoberfläche erzeugt werden wobei der limitierende Faktor die spezifizierte Traglast von 2 kg darstellt. Die Bahnplanung erfolgt mit Hilfe von 2D Zeichnungsdateien (*.dxf), sodass eine CAM-Programmierung entfallen kann. Dadurch können systemseitig die genauen Prüfbereiche vorgegeben werden.

Für eine effiziente Prozesskontrolle der gebohrten Oberflächen können grundsätzlich verschiedene Messverfahren (optische oder taktil) eingesetzt werden. Eine effiziente manuelle Inspektion ist jedoch auf Grund der Vielzahl an Löchern auszuschließen, sodass unabhängig vom Kontrollprinzip eine automatisierte Datenerfassung als sehr hilfreich angesehen wurde. Dementsprechend wurde das Experimentalsystem mit drei motorisierten Achsen beschafft. Der mögliche planare XY-Verfahrraum wurde angepasst an die Größen der im Projekt verwendeten Probekörper gewählt. Als ROI (Region of Interest) für einen Inspektionspunkt wurde ein Radius von ca. 2 cm angenommen. Durch das Verfahren des Prozesskopfes kann die Oberfläche unter spezifischen Anforderungen vermessen werden.

Die Montage des Experimentalsystems wurde eigenständig durchgeführt. Abbildung 15 zeigt die Anlage mit zwei Achsenschienen in x-Richtung sowie je einer Achse in y- und z-Richtung. Die Schrittmotoren sind bereits auf den Achsenschienen integriert. Ein vorinstallierter Schaltschrank ist nachträglich anzuschließen, einschließlich der Strom-, Encoder- und Referenzkabel. Durch die Motorencoder wird der Verfahrweg der Achsen dabei digital erfasst, sodass die Messdaten im Anschluss jeweils der Position auf dem gemessenen Bauteil zugeordnet werden können. Ein Aluminiumrahmen sorgt für die Positionierung und Stabilität der x-Achsen. Kabelführungen sichern eine ordentliche Kabelverlegung entlang der Achsen.

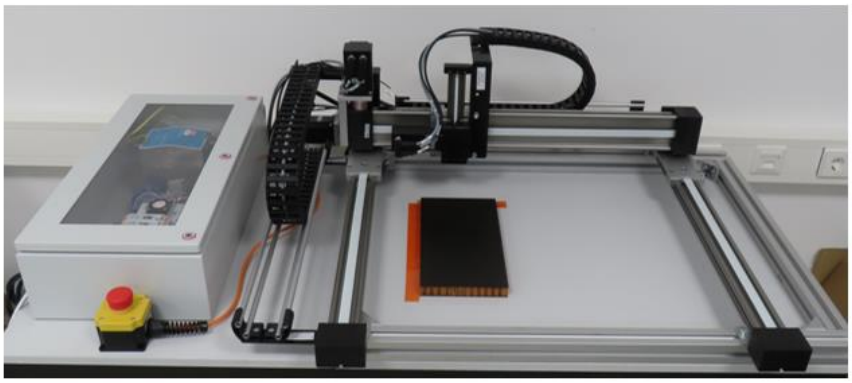


Abbildung 15: Experimentalsystem mit Adapter-Struktur für herkömmliche Kamerasysteme

Nach dem Aufbau des Experimentalsystems und deren Anschluss an den Schaltschrank wird die Verbindung zum Computer über Ethernet hergestellt. Dadurch wird der Zugriff auf die Verfahr-Software ermöglicht. Anschließend kann die Anlage aktiviert und mithilfe von Abstandssensoren, die an den Achsen angebracht sind, referenziert werden. Dies markiert den Nullpunkt des Koordinatensystems der Anlage. In der integrierten Software können verschiedene Achsverfahrwege wie Linear- oder Kreisbewegungen programmiert werden. Die Bahnplanung am Experimentalsystem kann zudem über einen dxf-Import einer CAD-Datei erfolgen. Dies ermöglicht eine definierte Inspektion gekrümmter Strukturen. Die z-Achse besitzt an beiden Enden jeweils zwei Gewindebohrungen zur Befestigung von Adapterstrukturen. Mit Hilfe eines Adapters können beispielsweise Kameras zur globalen Inspektion einer Struktur dienen.

Daraufhin wurde ein Adapterstruktur mittels 3D-Drucks gefertigt. Durch eine geeignete Konstruktion wird eine Kollision mit den Achsen verhindert. Mit der programmierbaren Bewegungssteuerung kann eine Kamera präzise auf die mit Mikrobohrungen versehene Probengeometrie ausgerichtet und spezifische Positionen zur Strukturinspektion angefahren werden. Abbildung 16a bis c demonstriert dieses Vorgehen durch Bildaufnahmen an 12 Positionen, die in einer „Zickzack“-Bewegung nacheinander abgefahren werden. Der Verfahrweg wird dabei vollständig innerhalb der Software abgebildet. Die Programmierung des Experimentalsystem beinhaltet einen Stopp-Befehl, welcher die Achsen an einer Bildaufnahmeposition anhält, sodass ein Bild manuell aufgenommen werden kann. Alternativ erlaubt die Software eine Kamera direkt in die Steuerung zu integrieren und den gesamten Vorgang automatisch auszuführen.

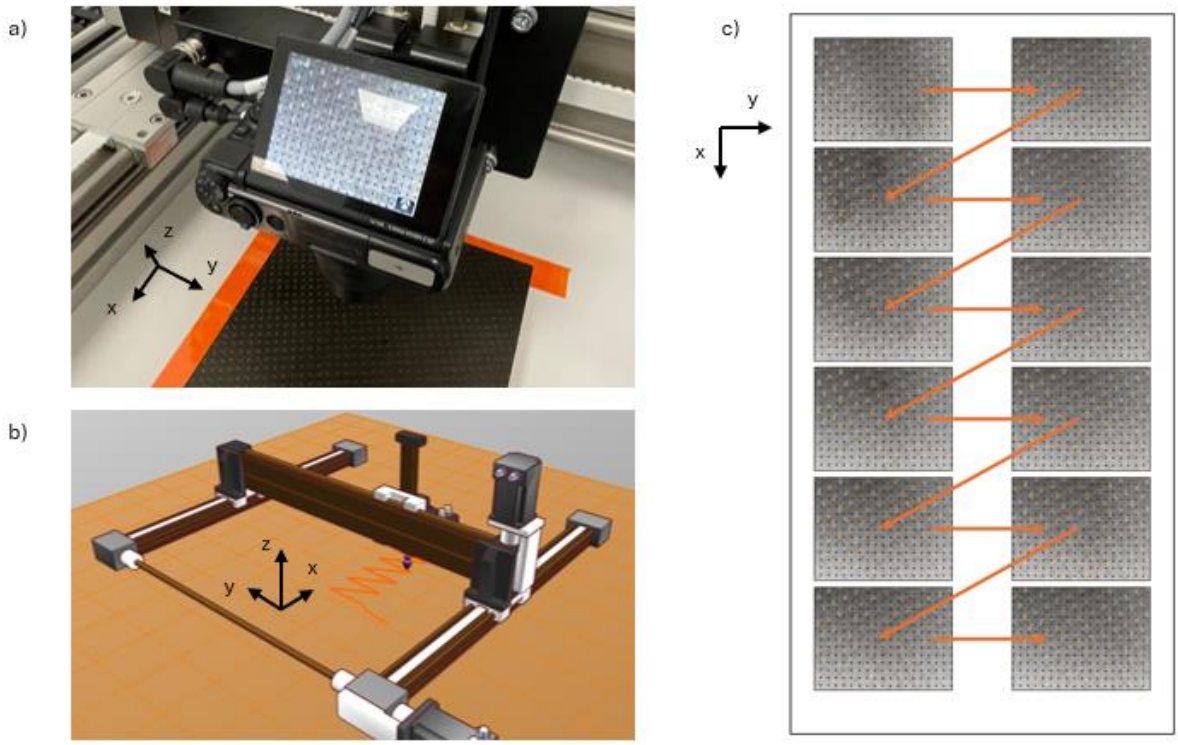


Abbildung 16: a) Kamera-Montage an der z-Achse des Experimentalsystems, b) Verfahrweg-Darstellung in der Software und c) Bildaufnahmen an den jeweiligen Positionen

Spezifische Adapterstrukturen ermöglichen zudem die Montage von hochauflösenden Industriekameras, welche zusätzlich eine detaillierte und genaue Messung verschiedener Parameter der Mikrobohrungen (Größe, Rundheit etc.) ermöglichen. Die Programmierbarkeit der Achsbewegungen erlaubt es, jede einzelne Mikrobohrung systematisch und konstant zu inspizieren, was die Effizienz und Zuverlässigkeit der Qualitätssicherung erhöht. Somit entfällt eine notwendige Mikroskop-Aufnahme.

Durch eine gezielte Programmierung der Achsbewegung unter Berücksichtigung der Bildgrößen lässt sich wie aufgezeigt eine vollständige Inspektion verschiedener Strukturen erreichen. Somit können Mikrobohrungsfehler oder allgemeine Bauteilfehler automatisiert erfasst und dokumentiert werden. Innerhalb des Systemraums besteht keine Einschränkung hinsichtlich der Geometrie der Probe. Die Bewegung der Anlage kann an verschiedene Geometrien und Inspektionsanforderungen angepasst werden, was eine vielseitige und flexible Anwendung der Anlage ermöglicht. Zusätzlich wird durch die Anlage eine hohe Reproduzierbarkeit erreicht. Dies ermöglicht eine kontrollierte Weiterverarbeitung der Aufnahmen, welche ebenfalls den Einsatz von KI-Anwendungen zur Bewertung von Fehlerbildern begünstigt. Hierfür werden weiterführende Betrachtungen notwendig:

- **Auflösung** / **Kontrast:** Optimierung der Auflösung und des Kontrasts der Kamera, um auch kleinste Fehler und Details sichtbar zu machen.
- **Beleuchtung:** Geeignete Beleuchtungskonzepte, um Schattenbildung und Reflexionen zu minimieren.

- **Kamera:** Kalibrierung der Kamerawinkel und -abstände, um Verzerrungen zu vermeiden und eine gleichmäßige Bildqualität zu gewährleisten.

2.4 AP 4.1 Ermittlung von Klebstoff- und Laminatdegradation

In diesem Arbeitspaket werden die Auswirkungen des Laserbohrprozesses auf die Eigenschaften von Laminaten und Verklebungen untersucht. Ziel ist es, die grundsätzlichen Schädigungsmechanismen wie Delaminieren, Ablösen, Verbrennen und Abplatzen mit visuellen und zerstörungsfreien Methoden zu analysieren. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sollen als Grundlage für ein geeignetes Testprogramm dienen, das die Relevanz der Schädigungsprozesse bewertet und sinnvolle Tests zur weiteren Analyse und Simulation entwickelt.

Zu Beginn fand eine optische Begutachtung der vom LZH gelaserten Probekörper statt. Somit konnten die grundsätzlichen Schädigungsmechanismen, wie z. B. die Wärmeeinflusszone (WEZ), mit einer visuellen und zerstörungsfreien Methode analysiert werden. Zur Durchführung wurde eine 10x Lupe verendet. Bei der optischen Messung wurde eine Durchmesserabweichung an der Laminatoberfläche von 0,05 mm identifiziert. Die WEZ breitet sich in Faserrichtung stärker aus, da die thermische Leitfähigkeit stark richtungsabhängig ist (siehe Abbildung 17).

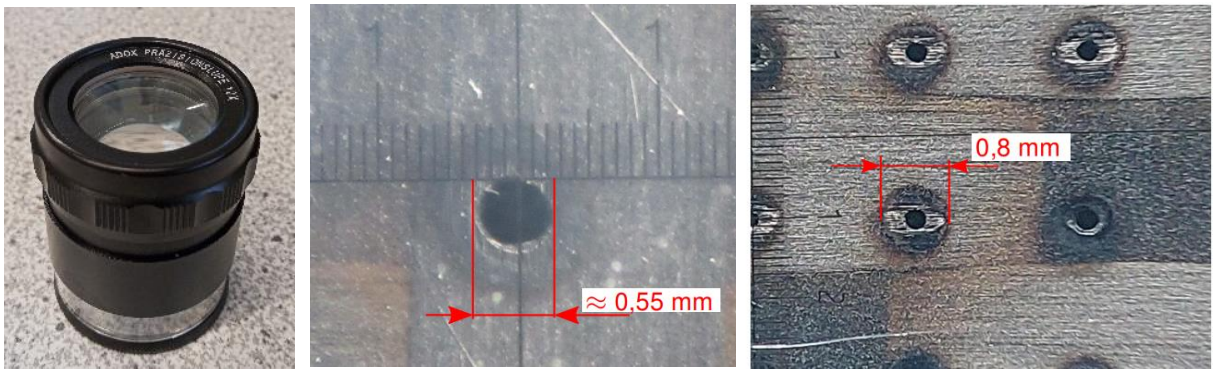


Abbildung 17: Lupe; Durchmesserabweichung bei Soll 0,5 mm**;** Größe der WEZ bei Lochdurchmesser 0,25 mm

Die Wärmeeinflusszone wurde bei den verschiedenen Lochparametern erfasst und in folgender Tabelle zusammengetragen.

Tabelle 2: WEZ nach Bohrparameter

Lochdurchmesser	**Energieeintrag**	**Pulszahl**	**Größe WEZ**	**Verhältnis (Lochdurchmesser / WEZ)**
0,25 mm	35,1 J	105	0,8 mm	0,31
0,5 mm	61,5 J	110	1,1 mm	0,45
0,75 mm	97,7 J	110	1,4 mm	0,53

Um die **akustischen Eigenschaften** der verschiedenen Bohrlochparameter zu überprüfen wurde der Schallabsorptionsgrad nach DIN 10534-2 bestimmt. Dazu wurden die bei INVENT und am LZH hergestellten Prüfkörper (Ø 40 mm) bei einem Unterauftragnehmer luftdicht in einem Rohr verschlossen. Innerhalb des Rohres wird eine stehende Welle erzeugt, die resultierenden Schalldrücke gemessen und eine Kurve mit der Schallabsorptionsgrad über der Frequenz aufgezeichnet. Relevante Kenngrößen sind die Frequenzlage mit der Lage der Mittenfrequenz in Hz, der Schallabsorptionsgrad mit dem Wert der maximalen Absorption und die Bandweite, der Bereich der Dämpfungseigenschaften (siehe Abbildung 18).

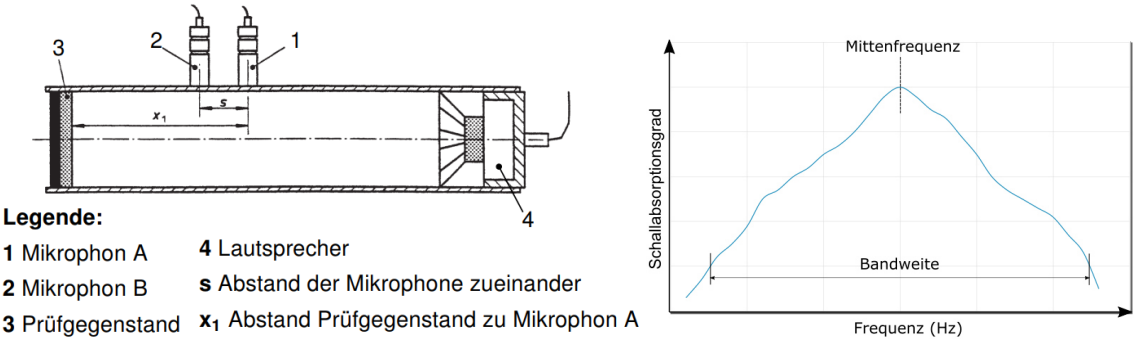


Abbildung 18: Bestimmung des Schallabsorptionsgrades nach DIN 10534-2; Beispielhafte Kurve: Schallabsorptionsgrad über Frequenz

Im Folgenden sind die Kurven mit den verschiedenen Bohrparametern im Vergleich dargestellt (siehe Abbildung 19 bis Abbildung 21).

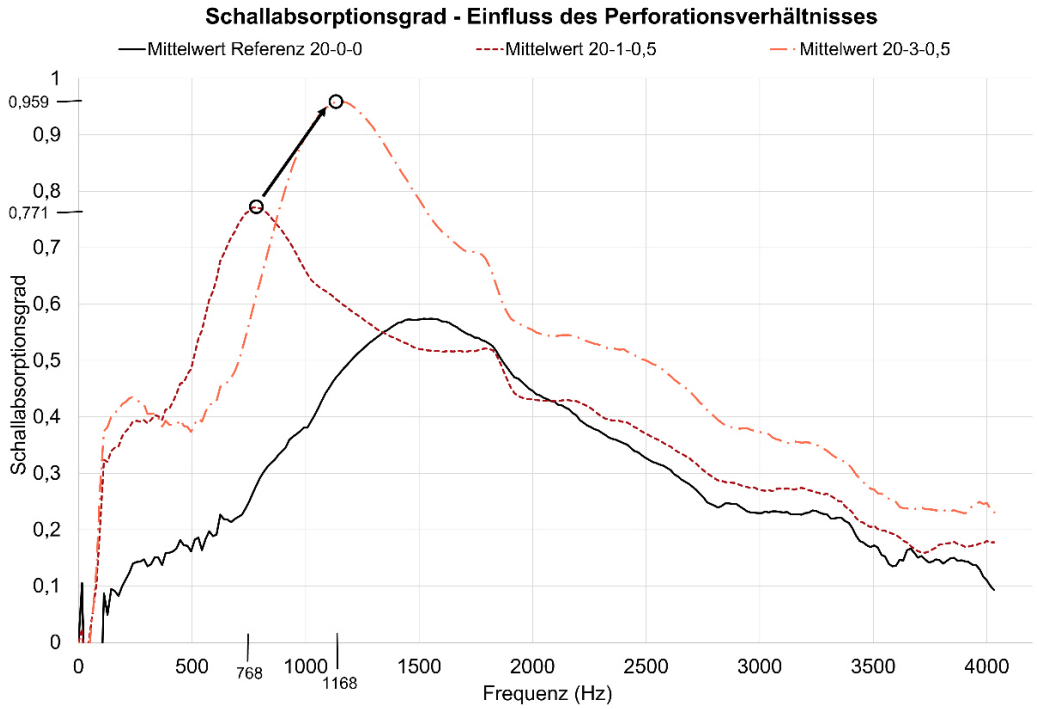


Abbildung 19 Einfluss des Perforationsverhältnisses für Variante 20-1-0,5 und Variante 20-3-0,5

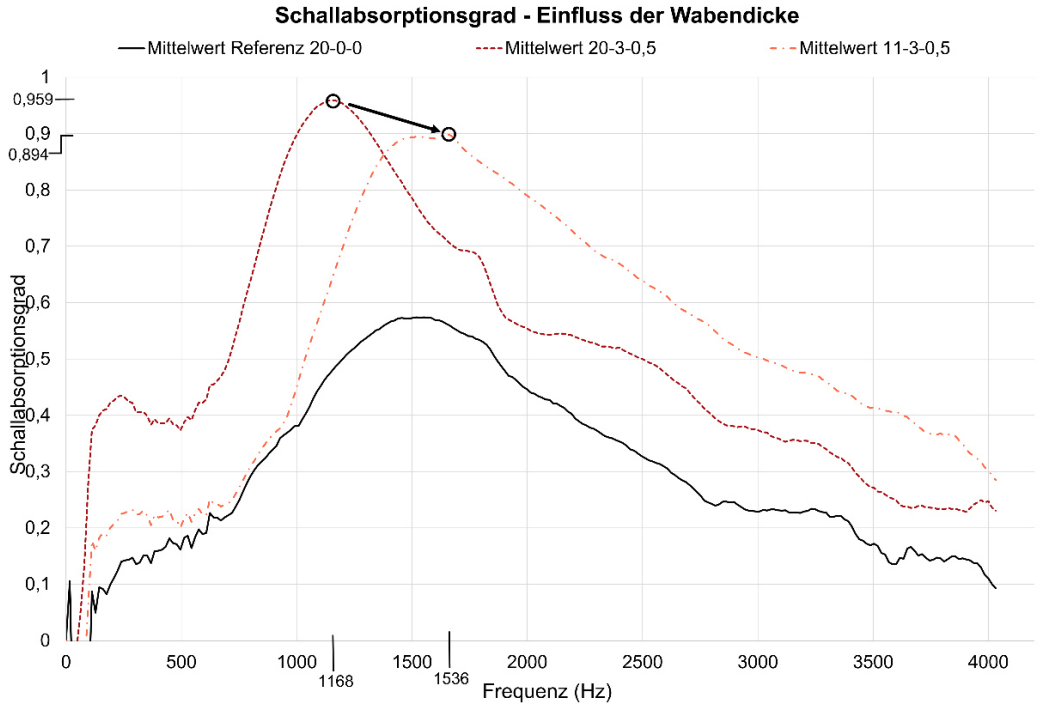


Abbildung 20: Einfluss der Wabendicke für Variante 20-3-0,5 und Variante 11-3-0,5

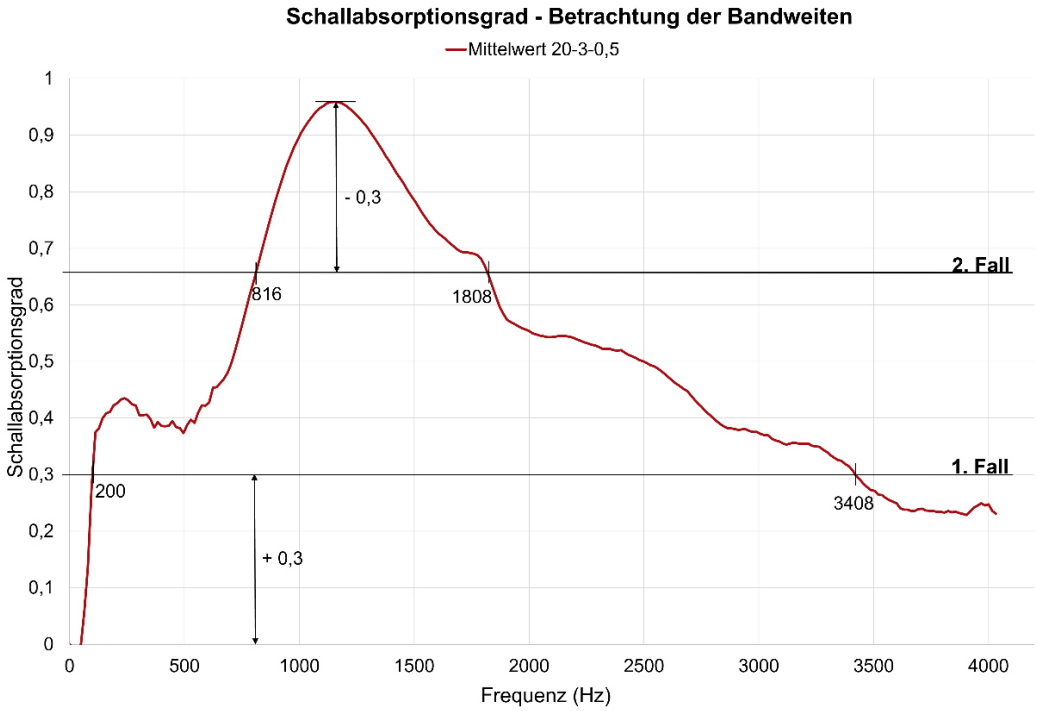


Abbildung 21: Ermittlung der Bandweite am Beispiel der Variante 20-3-0,5

Das akustische Verhalten ist über eine Parametervariation hinsichtlich der max. Schallabsorptionsgrad, der Frequenzlage (Mittenfrequenz) und der Bandweite einstellbar. Bei Vergrößerung des Perforationsverhältnisses steigen gleichermaßen der Schallabsorptionsgrad der Mittenfrequenz, die Frequenzlage der Mittenfrequenz und die Bandweite.

Bei Verkleinerung des Lochdurchmessers sinkt der Schallabsorptionsgrad der Mittenfrequenz, die Frequenzlage der Mittenfrequenz ist nahezu unverändert und die Bandweite nimmt leicht ab. Bei Verkleinerung der Wabendicke sinkt der Schallabsorptionsgrad der Mittenfrequenz, die Frequenzlage der Mittenfrequenz steigt und über die Bandweite ist keine Aussage möglich.

2.5 AP 4.2 Mechanische Analyse

Ziel dieses Arbeitspakets war die mechanische Analyse an gebohrten Platten, um die Auswirkungen der Bohrprozesse auf die Laminateigenschaften zu untersuchen, mechanische Kenndaten zu erfassen und Prozessgrenzen zu ermitteln.

An Sandwichprüfkörpern mit verschiedenen Bohrlochparameter wurden Trommelschälversuche nach DIN 2243-3, um den Schälwiderstand normiert auf Probenbreite zu ermitteln. Weiterhin wurden 3-Punkt-Biegeversuche nach ASTM C393 durchgeführt, um die Schubspannung im Kern und die Zugspannung in der Deckschicht zu ermitteln.

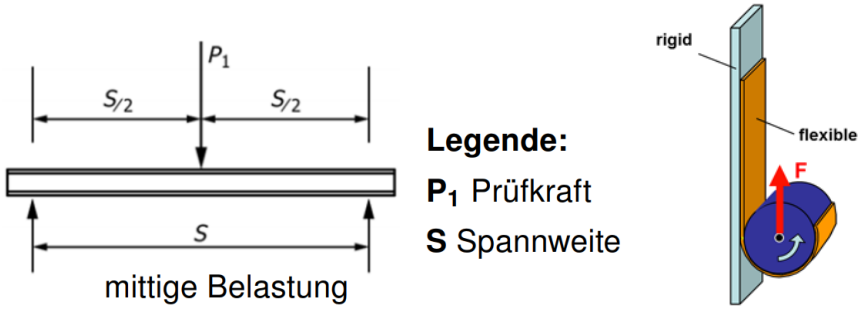


Abbildung 22: 3-Punkt-Biegeversuch nach ASTM C393; Trommelschälversuch nach DIN 2243-3

Mit den vorab festgelegten Parametern der Probekörper (AP 3.3 Datenverarbeitung Durchschneidkontrolle und Prozessführung) wurde bei dem 3-Punkt-Biegeversuch ein Versagen des Kerns an verschiedenen Stellen erzielt und kein Versagen in der Deckschicht (Abbildung 23).

Abbildung 23: Durchführung des 3-Punkt-Biegeversuchs

Die Auswertung der Versuchsergebnisse zeigen, dass die eingebrachte Perforation die Biegeeigenschaften nicht herabsetzt. Die Absolutwerte streuen nur innerhalb der Standardabweichung (siehe Abbildung 24).

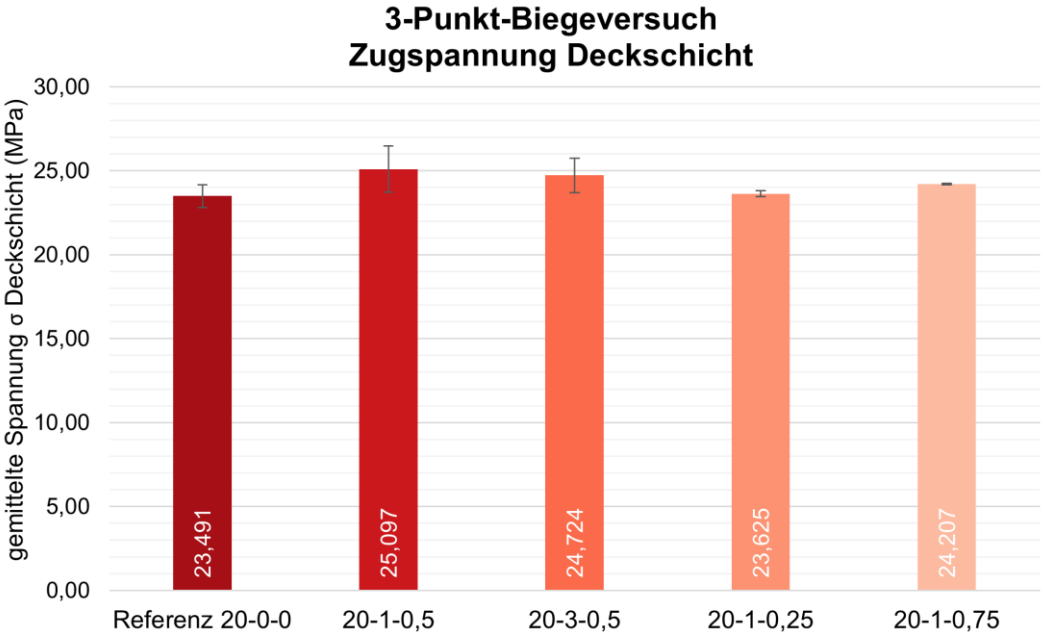


Abbildung 24: Ergebnis des 3-Punkt-Beigeversuchs

Beim Trommelschälversuch ist mit den vorab festgelegten Parametern der Probekörper kein normgerechtes Versagen aufgetreten.

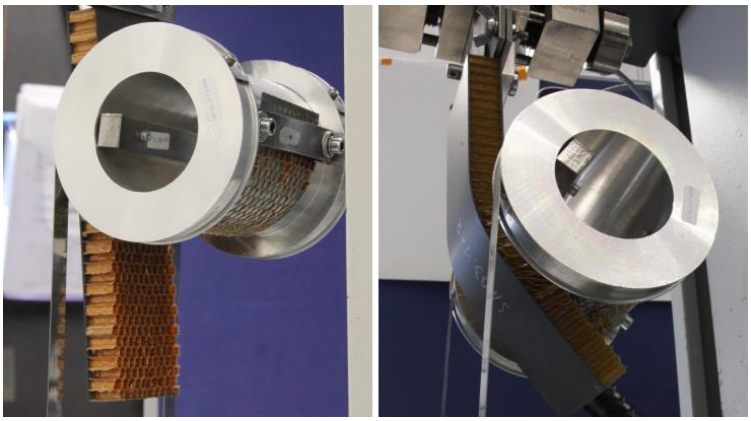


Abbildung 25: Durchführung des Trommelschälversuchs

Die Auswertung der Versuchsergebnisse zeigt, dass die eingebrachte Perforation die Verklebung nicht herabsetzt. Die erforderliche Trennkraft zwischen Deckschicht und Kern bleibt konstant. Auch hier streuen die Absolutwerte nur innerhalb der Standardabweichung.

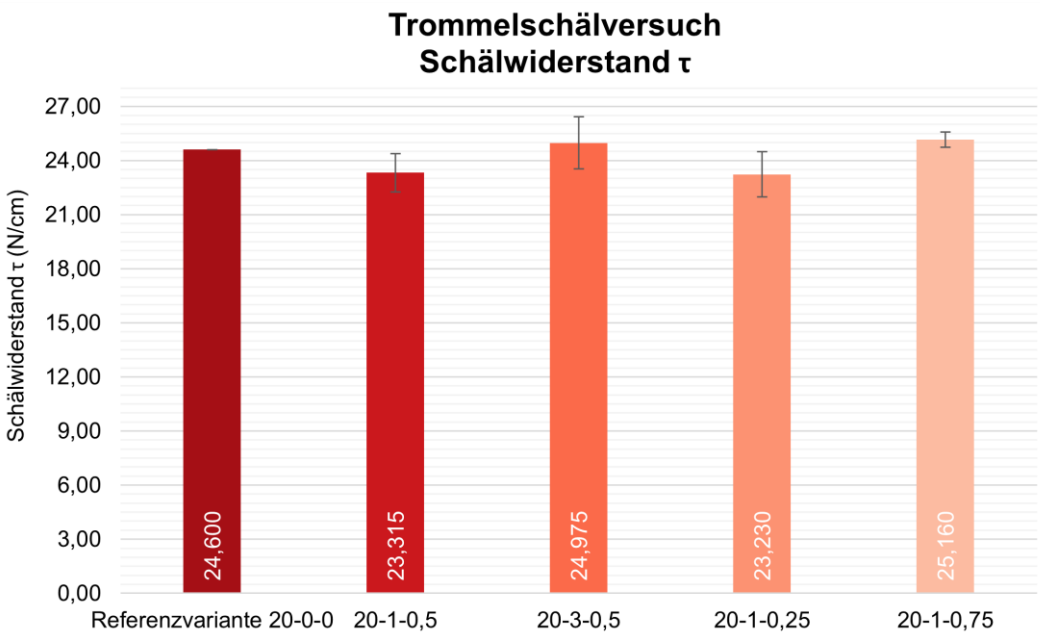
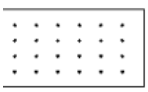
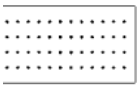
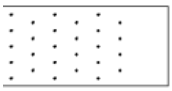
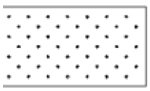


Abbildung 26: Ergebnis des Trommelschälversuchs

Bei den mechanischen Versuchen konnte kein eindeutig quantifizierbarer Unterschied der Absolutwerte ermittelt werden. Alle ermittelten Unterschiede liegen innerhalb der Standardabweichungen. Auf Basis der Untersuchungen ist keine Eigenschaftsänderung durch die Perforation feststellbar.

Aus diesem Grund wurde eine Untersuchung an Einzelkomponenten der Sandwichstruktur durchgeführt. Hierfür war es notwendig einen 3-lagigen Laminataufbau der Zugproben mit einer 1mm Laminatdicke laut Norm festzulegen. In Zugprobenlängsrichtung liegt eine Lage (die mittlere) in 0/90° vor. Erste und dritte Lage verlaufen in 45/135-Richtung zur Zugprobenlängsrichtung. Das Bohrmuster kann der folgenden Tabelle entnommen werden und dient der Einflussbestimmung von Lochdurchmesser, Anordnung und Perforation auf die mechanischen Eigenschaften.

Tabelle 3: Definition der Probenkörpergeometrie inkl. Varianten der Perforation:

Anordnung / Muster	ohne (Referenz)	gleichmäßig	gleichmäßig	Schachbrett	Schachbrett
Grad der Perforation	0	1,00%	2,00%	1,00%	2,00%
Anzahl Löcher (x-Anzahl / y-Anzahl): Zugprobekörper		4 x 35	4 x 70	4 x 17 & 5 x 16	3 x 41 & 4 x 40
Abstand (x-spacing / y-spacing in mm)		5 x 7	5 x 3,52	5 x 6,9	6,25 x 3,08
Lochdurchmesser		0,75	0,75	0,75	0,75
					

Es wurden Probekörper für Zugversuche mit dem Deckschichtmaterial und verschiedenen Bohrlochparameter gefertigt. Es wurden zwei Sätze gefertigt, sodass eingebrachte Löcher mittels Laser mit klassisch, zerspanend eingebrachten Löchern verglichen werden konnten. Weiterhin wurde ein Simulationsmodell aufgebaut, welches mit den Versuchen validiert wurde (AP 4.4 Simulation: Einfluss der Bohrqualität auf mechanische Kennwerte).

Die Ergebnisse der Untersuchung in Abbildung 27 zeigen, dass die Perforation die maximale Zugfestigkeit um 20% bis 35% reduzierte, abhängig von der spezifischen Ausführung. Interessanterweise zeigt eine höhere Perforation (von 1% auf 2%) für das „gleichmäßige Muster“ keine merkliche Reduzierung der Zugfestigkeit. Das Muster selbst, also die Anordnung der Löcher, hat im Gegensatz zum Grad der Perforation den größeren Einfluss auf die Reduktion des Festigkeitswertes. Beim Vergleich der Methoden Lasern und Zerspanung wurde kein erkennbarer Einfluss auf die Materialeigenschaften festgestellt. Das Lasern wies eine minimal größere Standardabweichung auf. Ein Einfluss der konischen Lochform, die durch das Lasern entsteht, spiegelte sich hinsichtlich der Materialkennwerte oder des Versagensbildes nicht wider.

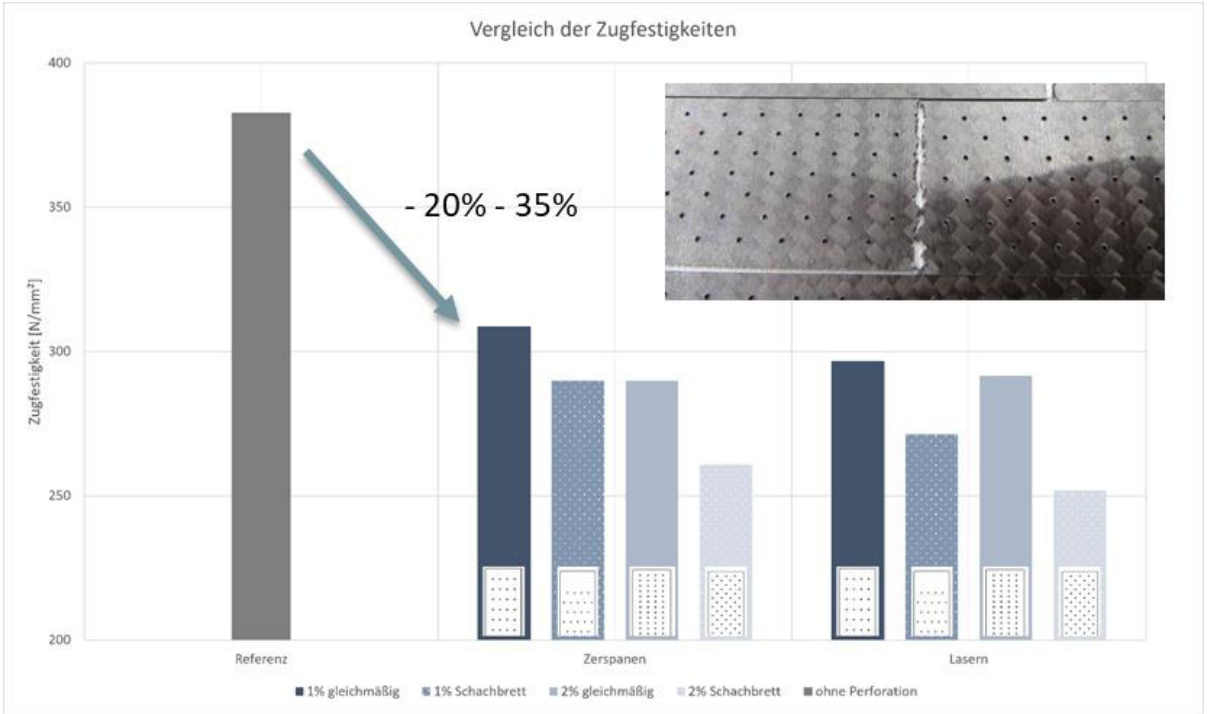


Abbildung 27: Entwicklung der Zugfestigkeit je Perforation und Bohrverfahren

2.6 AP 4.3 Bestimmung von Kontaminationen der inneren Wabenstruktur

Um die Kontaminationen der inneren Wabenstruktur festzustellen, d.h. in welcher Form Verunreinigungen oder Veränderungen im Inneren durch den Bohrprozess auftreten und wie diese sich ggf. auf die Bauteilqualität auswirken, soll die Wabenstruktur nach dem Bohrprozess analysiert werden. Im Sinne eines Sandwich ist die Zugänglichkeit der Wabe durch die äußeren FVK-Decklagen (Facesheets) beschränkt. Der Zugang zur Wabe selbst bzw. das Entnehmen von Probekörpern ist daher nur auf mechanischen Wegen durch Sägen, Fräsen

oder Abreißen der Decklage möglich. Dies kann wiederum nicht beeinflussungs- oder kontaminationsfrei erfolgen. Anstatt einer mechanischen Freilegemethode wurden alternative Verfahren recherchiert und bewertet. Zuvor wurde identifiziert, mit welchen Rückständen sowie welcher Form und Menge zu rechnen ist. Hierbei zeigte sich eine große Streubreite, je nach den spezifischen Parametern des Bearbeitungsprozesses und den Eigenschaften des CFK-Materials. Folgende Clusterung kann vorgenommen werden:

1. Rauch und Dämpfe
2. Kohlenstoffablagerungen
3. Abfallmaterial aus abgeschnittenen oder verdampften Teilen des CFK
4. Thermische Schädigung mit Verformungen, Rissen oder anderen strukturellen Schäden
5. Partikelförmige Rückstände in Form von Staub oder kleinen Partikeln

Die zu wählende Methode sollte daher folgenden Kriterien berücksichtigen:

Kriterium	Typ
Substanz	Faser, Harz, Wabenmaterial, Kondensat, Ruß, Verbrennungsrückstand
Aggregatzustand	gasförmig, fest
Größe	Partikel, Staub, Rauch

Das abgeleitete Vorgehen bestand in einer optischen Auswertung, da vorrangig sichtbare Rückstände relevant sind. Dazu wurde ein Sandwichbauteil mit einseitigem CFK-Facesheet gefertigt. Mit Hilfe einer Glasscheibe wurde die gegenüberliegende Seite der Sandwichstruktur verschlossen. Dies stellt sicher, dass auftretende Kontaminationen in der Wabe verbleiben und diese direkt nach dem Prozess sichtbar sind (Abbildung 28). Ein aufwendiges Öffnen der Wabe entfällt.

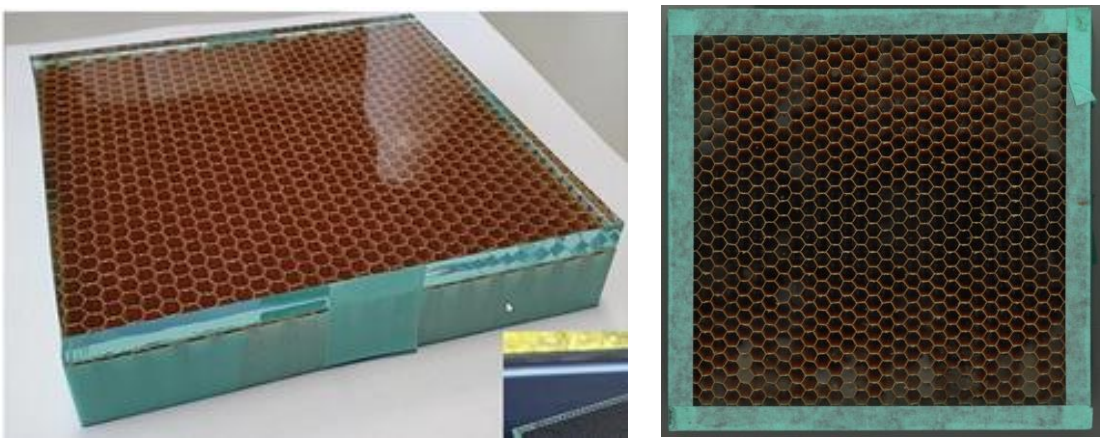


Abbildung 28: Applikation der Glasscheibe auf Wabenkernmaterial (links) und Einblick in eine lasergebohrte Sandwichplatte (rechts)

Weiterhin wurde der Bohrprozess beidseitig videotechnisch erfasst und die Aufnahmen synchronisiert (Abbildung 29). Das Lasern umfasste die bereits in HAP3 definierte Parameterauswahl zur Durchschneidkontrolle unter Berücksichtigung des zu erzielenden Perforationsverhältnis und der Lochdurchmesser. Es wurden 9x9 Bohrungen in einem Scan eingebracht, wobei jede Position einzeln angefahren wurde. Der Laserstrahl wurde mit 120 Wiederholungen aufgebracht.

Abbildung 29: Videotechnische Erfassung zum Laserbohrvorgang (kleines Bild: Plattenoberseite, großes Bild: Unterseite mit Wabe)

Ein hoher Energieeintrag zu Beginn des Bohrprozesses führt zu einem starken Lichtpunkt auf der Oberseite. Mit Fortschreiten des Bohrens wird die Intensität des Lichtpunktes auf der Oberseite geringer und auf der Unterseite größer. Bereits nach 30 Wiederholungen zeigen die Platten Löcher. Nach 120 Wiederholungen kommt es zur Flammenbildung am unteren Rand der Wabe, wenn das CFK-Facesheet bereits vollständig durchgelasert ist. Der vorherrschende Energieeintrag in die Wabe führt dabei zum Verkohlen bzw. Verbrennen – sichtbar an schwarzen Bereichen der Wabe.

Anhand der optischen Auswertung der Lichtintensität auf der Probenrückseite werden die Bohrparameter iterativ angepasst und der Prozess nach 40 Wiederholungen gestoppt.

Die finale Auswertung zeigt, dass die Probenkörper vollständig durchbohrt sind und sich nur noch vereinzelt lokale Schmauchspuren auf der Glasscheibe befinden. Sichtbare bzw. lose Partikel liegen in der Wabenkammer nicht vor.

Folglich kann festgehalten werden, dass bei korrekter Anpassung der Laserparameter an das Bohrbild sowie die verwendeten Materialien einer Verwendung für Anwendungen seitens der Luft- bzw. Raumfahrt möglich erscheint. Als pragmatischer Ansatz für die Durchschnittskontrolle kann die optische Auswertung der Lichtintensität herangezogen werden.

2.7 AP 4.4 Simulation: Einfluss der Bohrqualität auf mechanische Kennwerte

Ziel des Arbeitspaktes war es, den Einfluss der Bohrqualität auf mechanische Kennwerte und die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens im Rahmen einer Simulation zu beurteilen. Dazu wurde der Einfluss von Mikrobohrungen in verschiedenen Ausführungen auf das mechanische Verhalten (Zugversuch) von CFK-Decklagen simulativ abgebildet und mit mechanischen Prüfungen an perforierten Probekörpern verglichen (AP 4.2 Mechanische Analyse). Geprüft wurde, ob und wenn ja, in welcher Höhe der Einfluss verschiedener Lochmuster auf die Zugeigenschaften des Laminats festgestellt werden kann.

Die durchgeführten Arbeiten umfassten die Entwicklung und Parametrisierung eines Finite-Elemente-Modells (FE-Modell) für die verschiedenen Varianten des perforierten Zugprüfkörpers aus HAP3 nach DIN EN ISO 527-4 (Abbildung 30Abbildung 30).

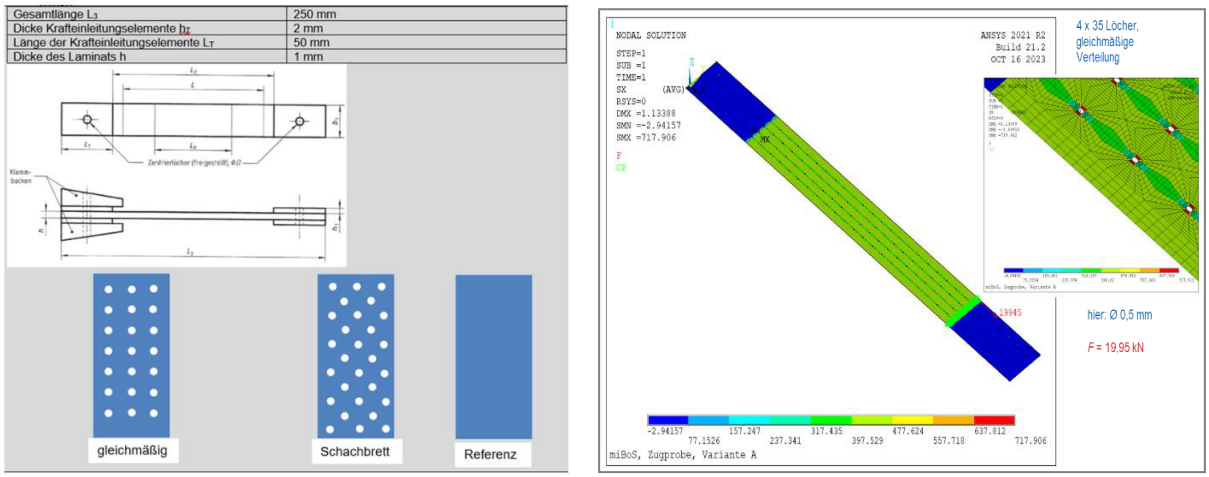


Abbildung 30: Spezifikation der Zugprobenkörper (links) sowie in Ansys umgesetztes FE-Modell mit Bohrbild-Konfiguration: 4 x 35Löcher, gleichmäßige Verteilung (rechts)

Dies beinhaltete eine detaillierte Vorbetrachtung zur optimalen Vernetzungsfeinheit, um die Balance zwischen Berechnungsgenauigkeit und Rechenaufwand zu gewährleisten. Zudem wurde der geeignetste Elementtyp für die Simulation ausgewählt, um die realen physikalischen Eigenschaften möglichst genau abzubilden und verlässliche Ergebnisse zu erzielen. Ein weiterer wichtiger Aspekt der Arbeiten war die Analyse des Einflusses der Kerbwirkung, welche mittels geeigneter Kerbfaktoren umfassend untersucht und dargestellt wurde. Zunächst wurden Steifigkeits- und Festigkeitsparameter des (ungelochten) CFK-Referenzmaterials mit Hilfe von ESAComp zu einem Faservolumengehalt von 50 % abgeschätzt. Die Erstellung spezifischer Materialkarten basierte im Nachgang auf real gefertigten und getesteten Proben, um die Materialeigenschaften realitätsnah in das FE-Modell integrieren zu können.

Eine Variation des Lochdurchmessers lieferte (qualitativ) den Verlauf für die maximale Bruchkraft. Abbildung 31 zeigt den Spannungsverlauf für σ_x in MPa in Abhängigkeit vom Lochrandabstand in mm.

Die ersten FEM-Abschätzungen erfolgten – in Abhängigkeit von den beschriebenen Annahmen – im Vorfeld der Zugversuche und erlaubten so eine Auswertung der Versuchsergebnisse zu den Annahmen.

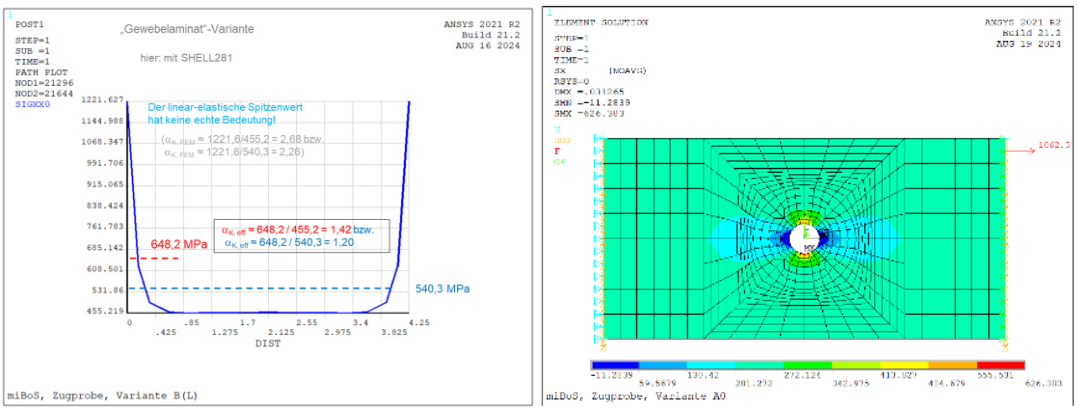


Abbildung 31: Spannungsverlauf für σ_x in MPa in Abhängigkeit vom Lochrandabstand in mm

Schließlich wurden die verschiedenen Varianten des perforierten Zugprüfkörpers mittels FE-Simulation analysiert und die Ergebnisse mit den jeweiligen Prüfserien abgeglichen. Dabei wurden sowohl gelaserte als auch zerspante Proben berücksichtigt, um die Unterschiede in der Fertigungstechnik und deren Auswirkungen auf das Materialverhalten zu evaluieren. Die Simulationsergebnisse wurden mit den experimentellen Daten verglichen, um die Validität und Präzision des FE-Modells zu bestätigen und gegebenenfalls Anpassungen vorzunehmen.

Die Ergebnisse der durchgeführten Simulationen zeigt Abbildung 32 in Form von Abminderungsfaktoren der jeweiligen Perforationen und dem angewendeten Bohrverfahren zur Referenzprobe ohne Löcher.

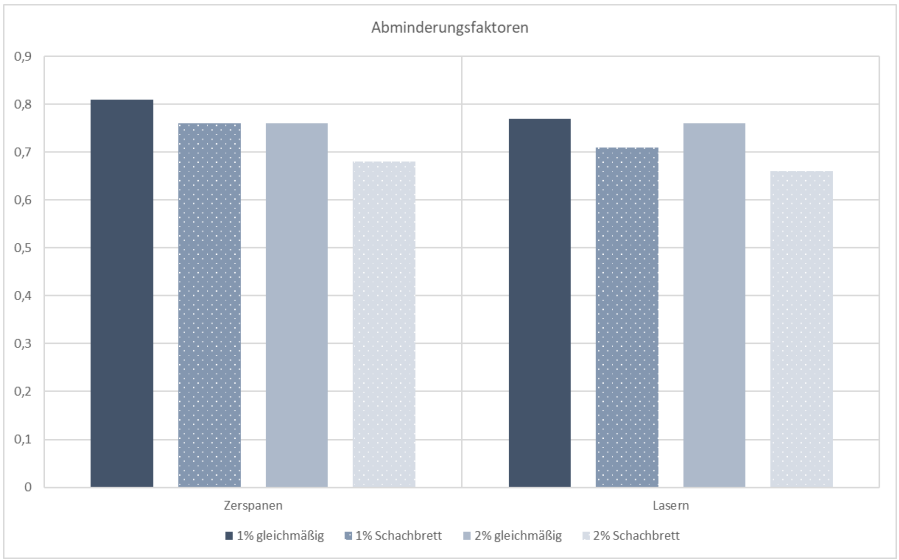


Abbildung 32: Analyseergebnisse der FE-Simulation gelochter Zugproben als normierte Abminderungsfaktoren

Die Kerbwirkung an Bohrlöchern hat im Vergleich zur Perforation selbst eine untergeordnete Relevanz, da die Spannungsspitzen im Randbereich schnell abklingen. Entscheidender ist die Verringerung des Probenquerschnitts durch den Materialabtrag. Nach dem Bohren verbleibt eine bis zu 15% kleinere Querschnittsfläche. Ebenfalls von Bedeutung sind die Position der Bohrungen zum Rand und der Abstand der Bohrungen untereinander. Die Schwankung der Zugfestigkeit resultiert aus den großen Abweichungen der Probendicken der Prüfkörper. Beim Lasern entstehen Löcher, die konisch und wellig sind.

Die Berechnungen zeigen, dass die Entwicklung der Zugfestigkeit über Abminderungsfaktoren abgebildet werden kann, wobei deren Gesamtheit das verwendete Bohrverfahren, die Querschnittsverringerung und die Kerbwirkung berücksichtigen.

2.8 AP 4.5 Erzielbare Percentage of Open Area: Vergleich Fertigungsvarianten

Ziel dieses Arbeitspakets war es, die Leistungsfähigkeit des entwickelten Bohrverfahrens mit anderen Fertigungsvarianten zu vergleichen.

Hierzu wurden in einem ersten Schritt alternative Verfahren recherchiert, um Perforationen einzubringen, wie etwa die Verwendung von Nähfaden in z-Richtung, Tackernadeln, Treibmittel oder das Zerspanen mittels Wasserstrahlschneiden. Beim mehrstufigen Herstellungsprozesses von Sandwichstrukturen wird die Wabe mit dem Facesheet vollflächig verklebt. Vorperforierte Laminate sind dann durch das Zusetzen der Löcher nicht einsetzbar. Die Nachgeschaltete Perforation durch Wasserstrahlschneiden wiederum schädigt den gesamten Sandwichaufbau, da der Wasserstrahl nicht in der Tiefe gesteuert werden kann.

In einem zweiten Schritt fand eine Recherche und Eignungsprüfung von industriell einsetzbaren Verfahren zur Lochdetektion (optisch, akustisch, volumenstrom, mehrseitig) statt. Es kann festgehalten werden, dass je nach Kriterium bzw. Zielgröße ein anderes Verfahren gewählt werden muss. Mit dem Ziel einer automatisierten Auswertung sowie unter Anwendung der zu erfüllenden Anforderungen:

- Anzahl der Bohrungen (Häufigkeit und Verteilung pro Probe)
- Detektion der Kontur (Kreis)
- Bestimmung Durchmesser und Rundheit

bieten optische Verfahren die höchste Aussagekraft hinsichtlich Umfangs und Details (Abbildung 33)

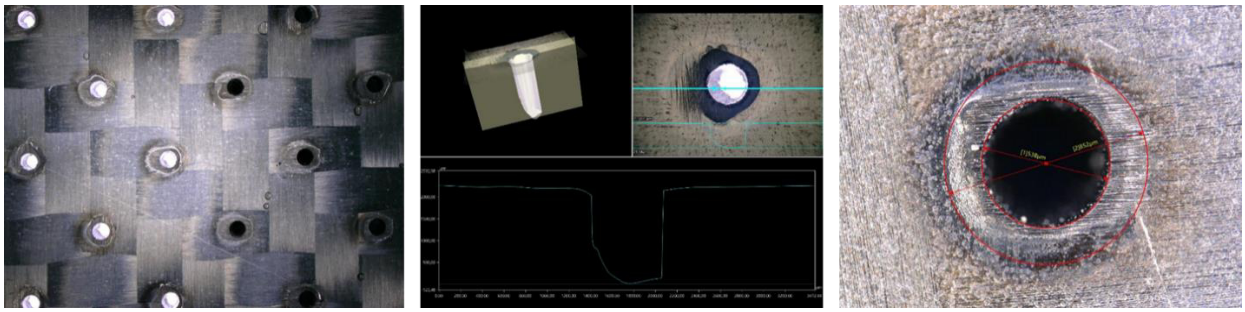


Abbildung 33: Eignungsprüfung optischer Verfahren zur Lochdetektion

Um die Leistungsfähigkeit der Bohrlocherstellung mittels unterschiedlicher Fertigungsvarianten (hier: bohren und lasern) zu bewerten, wurde auf eine automatisierte Bilderkennung auf Basis hochauflösender Mikroskopaufnahmen zurückgegriffen. Die Auswertung der eingebrachten Bohrlöcher erfolgte mit dem VHX-3000 Mikroskop von Keyence. Als Prüfkörper wurden jeweils die unterschiedlich perforierten Zugproben (25 x 250 mm) vor der zerstörenden Prüfung verwendet. Dabei wurde ein Bereich von 25 x 40 mm in der Probenmitte betrachtet. Bei der Analyse wurde der Weitwinkelkopf mit bis zu 20x Vergrößerung gewählt und die verschiedenen Aufnahmen automatisiert zu einem Gesamtbild des Prüfbereichs kombiniert. Durch die hohe Vergrößerung können auch die speziellen Merkmale der Bohrlöcher erfasst werden. Mittels einer entsprechenden Ausleuchtung im Durchlichtverfahren wurde der Kontrast zwischen Probe und Hintergrund eingestellt, was eine automatisierte Analyse der Bohrparameter (z.B. Anzahl, Durchmesser) ermöglichte (siehe Abbildung 34).

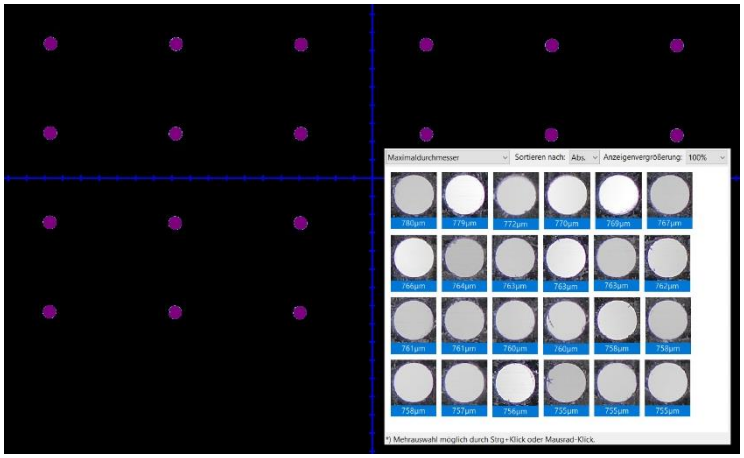


Abbildung 34: Automatisierte Bilderkennung der gestichten Aufnahme (hier: 1%Iso)

Erster Bestandteil der Prüfung bestand in der Ermittlung des erzielbaren Anteils offener Löcher (POA) für die beiden verschiedenen Fertigungsvarianten. Hierbei wurde Fertigungstechnologieunabhängig (sowohl für das Bohren als auch das Lasern) eine Lochquote von 100 % ermittelt was die Sinnhaftigkeit und Leistungsfähigkeit des Laserbohrverfahrens unterstreicht.

Im Weiteren erfolgte die Analyse der Bohrqualität. Dazu wurden die Proben jeweils beidseitig gescannt. Zunächst wurde mit den aufgenommenen Daten die Varianz der Bohrlochdurchmesser ermittelt (siehe Abbildung 35).

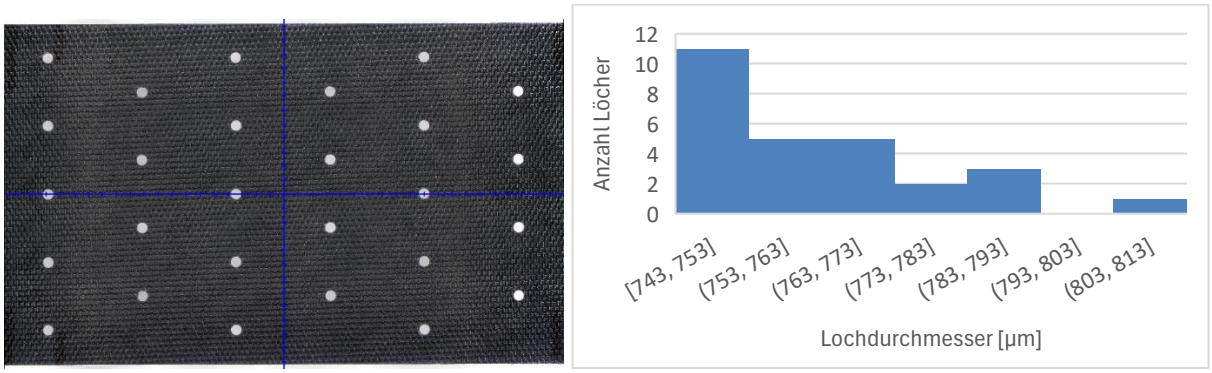


Abbildung 35: Prüfbereich (25 x 40 mm) auf der Oberseite des Prüfkörpers „1% Schachbrett“. a) Gestichte Mikroskopaufnahme für die automatisierte Auswertung. b) Histogramm der ermittelten Durchmesser der insgesamt 27 Bohrlöcher innerhalb des Prüfbereichs. Solldurchmesser 0,75 mm

Bei der Lasertechnologie sind vertikale Bohrlochkanten mit geringen Toleranzen fokusbedingt nur bis zu bestimmten Aspekt-Verhältnissen möglich. Das bedeutet, je tiefer ein Loch gebohrt werden muss, umso größer wird die Öffnung auf der Einbringungsseite was zu einer gewissen „Kegeligkeit“ des Loches führt. Dieser Umstand wird in Abbildung 36 deutlich.

Während für das Bohrverfahren das Loch auf der Einbringungsseite ein Übermaß von maximal ca. 20 µm aufweist ist dieser Abweichung beim Bohrverfahren um bis zu 6 mal größer (siehe Abbildung 37).

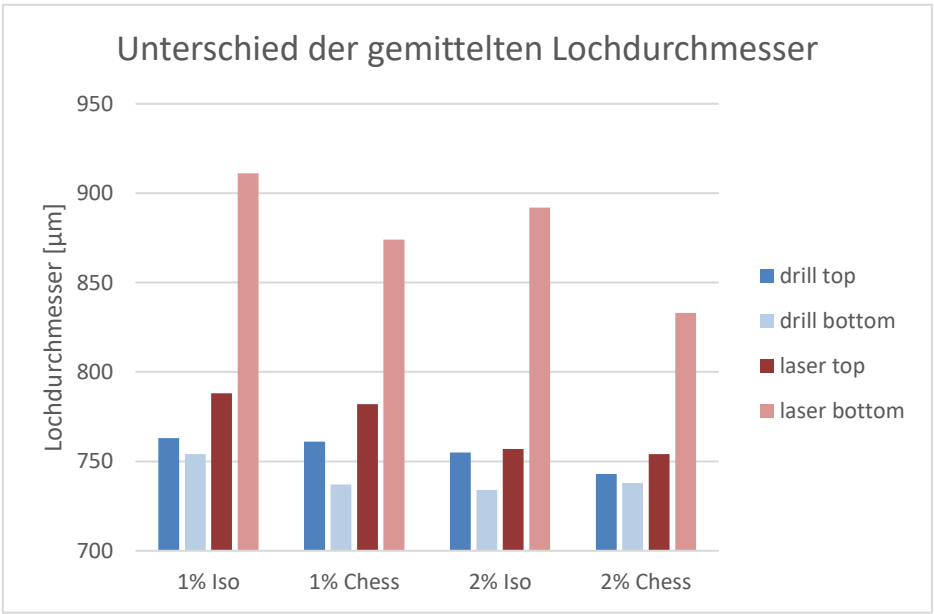


Abbildung 36: Gemittelte Lochdurchmesser für verschiedene Prüfmuster und Fertigungsvarianten jeweils in Bezug auf Einbringungs- und Rückseite des Prüfkörpers

Erfolgt die Kalibrierung der Bohrlochparameter an der Lasermaschine jedoch in Bezug auf die Austrittsseite kann so ein passender Lochdurchmesser zu mindestens einseitig sichergestellt werden. Für die angedachte Funktionalität im Sinne der akustischen Unterdrückung von

Umgebungsgeräuschen ist diese „Verfahrenseinschränkung“ als unproblematisch zu bewerten.

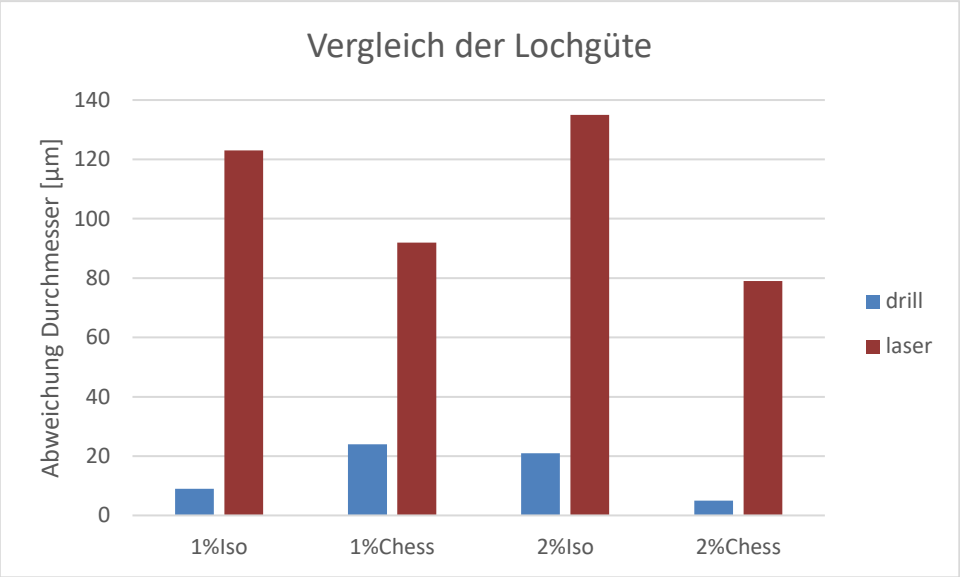


Abbildung 37: Bestimmung der Bohrlochdurchmesserabweichungen bzgl Ober- und Unterseite.

2.9 AP 5.4 Piezo-basierte Schwingungsdetektion und Kompensation

In diesem Arbeitspaket war ein aktives Schwingungsdetektions- und Kompensationssystem für den Bearbeitungskopf auf Basis von Piezo-Aktuatoren zu entwickeln.

Ursprünglich war die Fertigung eines Gehäusekopfes für einen Roboterarm geplant, der somit eine flexible Manipulation des Bearbeitungsstrahls mit vielen Freiheitsgraden darstellen kann. Hier wäre eine hohe Steifigkeit bei kleinem Gewicht gefordert, um eine hochdynamische Bearbeitung zu ermöglichen. Allerdings wurde innerhalb der Projektbearbeitung deutlich, dass die Bearbeitung mittels Roboterarm aufgrund technischer Herausforderungen nicht innerhalb des Projekts darstellbar ist. Das Konsortium hat diverse Möglichkeiten diskutiert und als Umgehung der Herausforderung einen fest montierten Bearbeitungskopf vorgeschlagen. Da das zu bearbeitende Werkstück auf den Roboterarm montiert werden soll, sind weiterhin viele Freiheitsgrade möglich. Dementsprechend entwickelte und fertigte INVENT diese fest verbaute Gehäusestruktur auf Basis der durch den Projektpartner KMS festgelegten Peripherie. In Abbildung 38 sind sowohl Peripherie als auch das CAD-Modell der Gehäusestruktur ersichtlich.

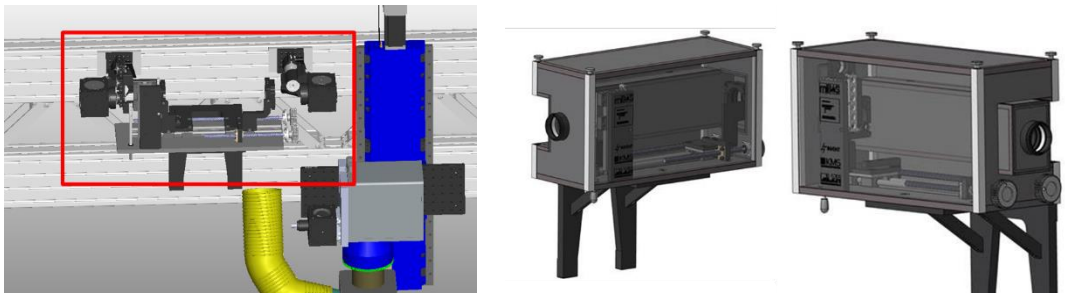


Abbildung 38: Peripherie (links) und CAD-Modell (rechts) der fest montierten Gehäusebox

Anschließend wurde die steifigkeitsoptimierten Gehäusestruktur zur Integration in die Anlage des LZH gefertigt und dem LZH zur Verfügung gestellt (Abbildung 39).

Abbildung 39: Steifigkeitsoptimierte Gehäusestruktur

Bezüglich der piezo-basierten Schwingungsdetektion und Kompensation wurde zunächst zusammen mit dem Konsortium die durchzuführenden Schritte definiert, die aufgrund der Änderung des Arbeitsplanes bezüglich der Gehäusestruktur notwendig geworden sind. Bei einem fest verbauten Gehäuse ist eine Schwingungsdämpfung irrelevant, da keine Vibrationen entstehen. Eine Anwendung von Piezowandlern ist hier somit nicht sinnvoll. Als Alternative ist eine schwingungsgedämpfte Einspannung bei einer der Funktionskomponenten vorgesehen. Dazu wurden, nach Konstruktion und Fertigung einer entsprechenden Einspannung durch KMS, von INVENT Piezowandler auf den Demonstrator appliziert, um das Schwingungsverhalten zu erfassen. Ziel war es auf Grundlage der Messungen Maßnahmen abzuleiten, welche die auftretenden Schwingungen reduzieren, schneller abklingen lassen oder die Auswirkung der Amplitudengröße auf den weiteren Prozessverlauf abschätzen. Alle

Maßnahmen können zu geringen Prozesslaufzeiten führen und damit die Effizienz des Laserverfahrens steigern.

Die von KMS geplante und gefertigte Einspannung für die leicht gekrümmte Demonstratorstruktur (Triebwerksverkleidung) ist in Abbildung 40 zu sehen. Für die Piezo-basierte Schwingungsdetektion und Kompensation wurde die Verbindungsstrebe dieser Einspannung zwischen Gestell und Kuka Roboter mit einem rechteckigen Querschnitt für die Applikation der Piezosensoren angepasst.

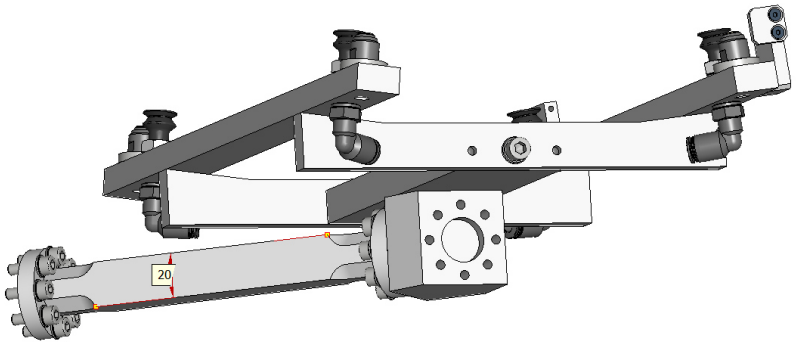


Abbildung 40: Einspannung für die leicht gekrümmte Struktur (KMS)

Die Verbindungsstrebe der Einspannung wurde im Anschluss an die Fertigung zwischen Gestell und Kuka-Roboter mit vier piezoelektrischen Flächenwandlern ausgestattet. Dazu wurde auf jeder Seite der rechteckigen Verbindungsstrebe ein Wandler appliziert. Abbildung 41 zeigt den zugehörigen Versuchsaufbau. Die Einspannung ist als Endeffektor am KUKA-Roboterarm montiert. Die gekrümmte Demonstratorstruktur liegt auf der Einspannung. Der Laser ist ortsfest montiert und bearbeitet das Werkstück von oben. Der KUKA-Roboterarm führt die Bewegungen zur Positionierung des Werkstücks unter dem Laser aus. Die Wandler wurden passiv betrieben, d.h. es fand keine aktive Schwingungsdämpfung statt. Stattdessen geben die Messdaten Auskunft über die Verformung der Verbindungsstrebe und damit des jeweiligen Bewegungszustandes des Roboterarms.

Insgesamt wurden 141 Testdatensätze aufgenommen. Dabei wurde die Bewegung und die Geschwindigkeit des Roboterarms variiert und jeder Datensatz mehrfach aufgenommen, um ggf. eine Mittelung der Daten zu ermöglichen. In einer Vorauswertung der Daten konnten bereits interessante Effekte identifiziert werden. Beispielsweise ist die Sensitivität der Wandler gegenüber Deformationen größer, je höher die auf den Wandler wirkenden Biegelasten ausfallen. Darüber hinaus verläuft das Signal der Wandler auf der Vorder- und der Rückseite der Strebe gegensätzlich, da beispielweise Biegelasten durch horizontale Bewegungen des Roboterarms auf einen Wandler streckend auf den anderen wiederum stauchend wirkt, was zu einem Ausschlag in den positiven beziehungsweise negativen Spannungsbereich resultiert.

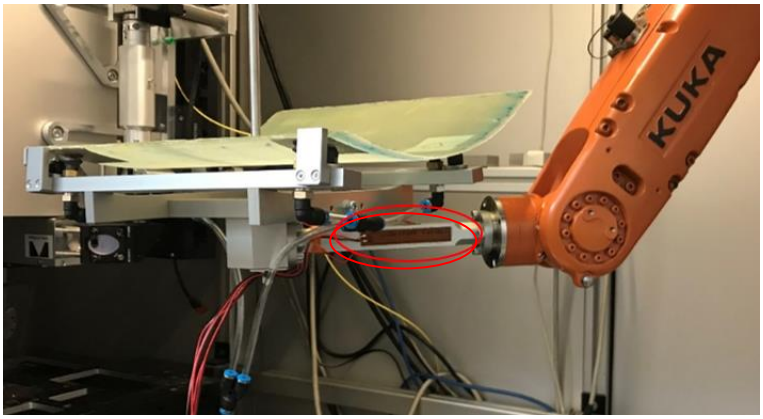


Abbildung 41: Versuchsaufbau zur Schwindungsdetektion. Vier piezoelektrische Wandler auf der Verbindungsstrebe zwischen Kuka-Roboter und Gestell appliziert.

Eine Fast-Fourrier-Transformation (FFT) der Messdaten zeigte, dass das Messsignal sich aus Schwingungen mit Frequenzen von maximal 200 Hz zusammensetzt (siehe Abbildung 42), was eine wichtige Erkenntnis für die Hardware eines zukünftigen, optimierten Messsystem darstellt.

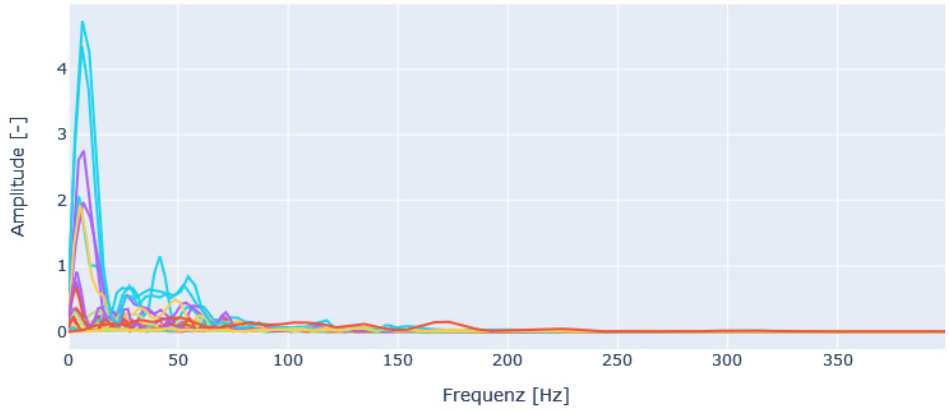


Abbildung 42: FFT der Testdatensätze

In einer zweiten, tiefergehenden Analyse der Messdaten wurden die Daten im Hinblick auf das Abklingen der Schwingungen untersucht. Es wurde einerseits analysiert, ob durch die Messdaten der Zeitpunkt quantifiziert werden kann, zu dem die Schwingung ausreichend abgeklungen ist, sodass der nächste Prozessschritt gestartet werden kann. Andererseits wurde betrachtet, inwiefern sich dieser Zeitpunkt mit den Triggersignalen des Roboters deckt.

Dazu wurden die Messsignal zunächst mittels FFT in den Frequenzraum überführt und der höchste Peak des resultierenden Spektrums identifiziert (siehe Abbildung 43). Anschließend wurde das Signal mit einem Butterworth-Bandpassfilter 10. Ordnung gefiltert. Die untere und obere Frequenzgrenze ergeben sich durch die Peakbreite. Die Peakbreite wird durch die frei wählbare, relative Peakhöhe definiert. Die relative Höhe legt fest, bei welcher Breite des Peaks in Prozent seine Ausprägung gemessen wird. Bei 1,0 wird die Breite des Peaks an seiner

untersten Konturlinie berechnet, während bei 0,5 die halbe Höhe der Protuberanz bewertet wird. Der Wert wurde auf 0,9 festgelegt.

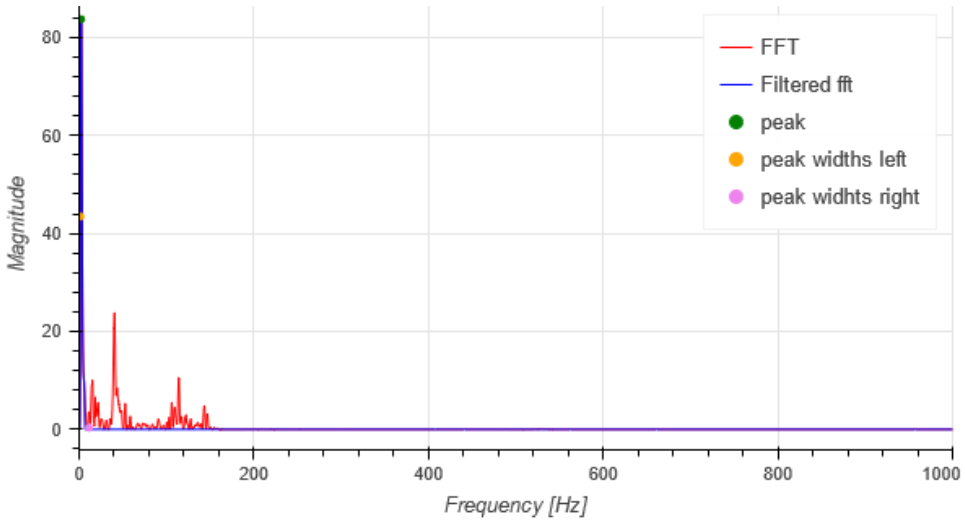


Abbildung 43: FFT eines Zeitsignals

Anschließend wurde der Zeitpunkt bestimmt, zu dem das Signal auf das Grundrauschen der Messung abgeklungen ist (siehe Abbildung 44). Dazu wird das gefilterte Zeitsignal quadriert, um eine Unabhängigkeit vom Vorzeichen zu gewährleisten. Des Weiteren wird ein Schwellwert definiert, unterhalb dessen das Signal als abgeklungen gilt. Dieser Wert wurde auf Grundlage einer Vergleichsmessung, bei der keine Bewegung auf das Messsystem wirkt, ermittelt und auf 0,05 festgelegt. Mit dem quadrierten Schwellwert konnte nun ermittelt werden, ab welchem Zeitpunkt die Amplitude des gefilterte Zeitsignal konstant unter dem Schwellwert liegt.

In einem letzten Schritt wurde der ermittelte Abklingzeitpunkt mit dem Triggersignal des Roboterarms – einem konstanten 5 V Signal, das gesendet wird, solange der Roboter aktiv ist – verglichen. Die Differenz zwischen dem Ende des Triggersignals und der Abklingzeit ergibt die Zeit, die gespart werden kann, wenn der ermittelte Abklingzeitpunkt an Stelle des Triggersignals zur Einleitung des nächsten Prozessschritts verwendet wird.

Für den beispielhaft ausgewerteten Datensatz ergibt sich eine Zeitersparnis von 26 ms. Für einen einzelnen Prozessschritt erscheint diese Differenz marginal. Allerdings kumuliert sich die Zeitersparnis mit einer steigenden Anzahl von Prozessschritten und der Anzahl der bearbeiteten Bauteile, sodass die Effizienz mit der Skalierung des Prozesses auf größere Serien harmoniert.

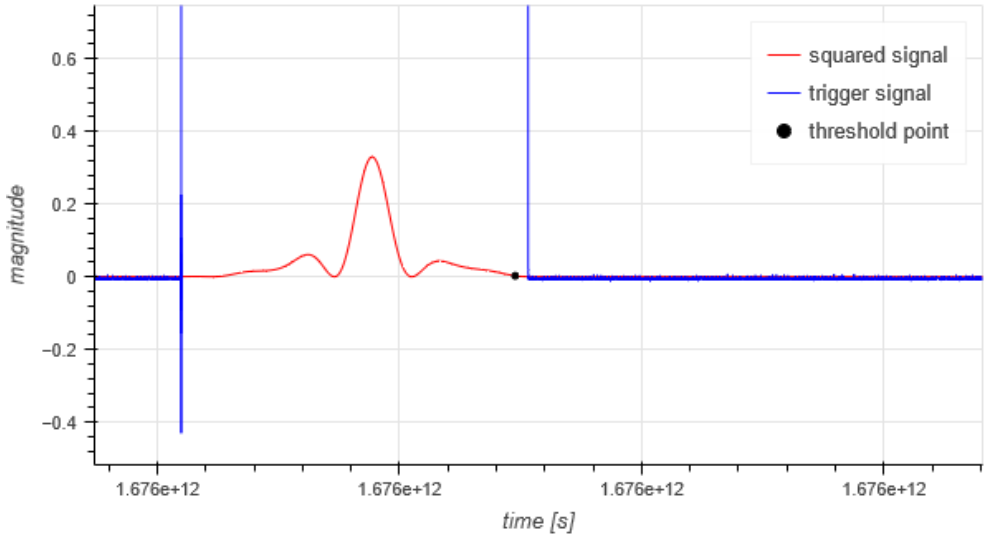


Abbildung 44: Quadriertes Zeitsignal mit eingezeichnetem Zeitpunkt, zu dem der Schwellwert unterschritten wird und Triggersignal des Roboters

Abschließend soll die Versuchsdurchführung und -auswertung kritisch hinterfragt werden. Hierzu muss angemerkt werden, dass nur einige der aufgenommenen Messreihen den Realbewegungen entsprechen, die der Roboterarm im Fertigungsprozess durchführt. Die Durchführung einfacher, physikalischer Bewegungen, wie bspw. rein translatorische Bewegungen, war notwendig, um die Messsignale mit den erhaltenen Messsignalen korrelieren zu können. Dadurch wurde sichergestellt, dass die Sensoren physikalisch interpretierbare Ergebnisse liefern. Im Hinblick auf die Messdatenauswertung muss jedoch angemerkt werden, dass Realbewegungen komplexer ausfallen können, sodass das aufgestellte Auswertungsverfahren möglicherweise nicht ohne Anpassungen übertragbar ist.

Die relative Peakhöhe wurde während der Datenauswertung empirisch festgelegt. Da es bisher kein anderes Verfahren zur Festlegung des Parameters gibt, ist eine gute Datenlage, d.h. eine hohe Anzahl von Messungen erforderlich, um einen verlässlichen Wert zu ermitteln. Grundsätzlich sind innerhalb einer Roboterbewegung die erhaltenen Messsignale sehr ähnlich, was für eine hohe Reproduzierbarkeit spricht.

Während das zuvor beispielhaft ausgewertete Messsignal sich gut durch den vorgestellten Algorithmus auswerten lässt, ist dies nicht für alle der 141 Testdatensätze der Fall. Teilweise sind die ermittelten Werte für die Zeitersparnis negativ, sodass eine Berücksichtigung zu einer Verlängerung der Prozesszeit führen würde. Das ist zum Beispiel beim Datensatz in Abbildung 45 der Fall. Darüber hinaus wertet der Algorithmus lediglich die Frequenz mit dem höchsten Peak aus. Nebenschwingungen mit kleineren Peaks werden bisher nicht berücksichtigt, wie sie zum Beispiel in Abbildung 43 bei circa 100 Hz auftreten. Bei komplexen Realbewegungen ist dagegen zu erwarten, dass diese sich aus mehreren, signifikanten Frequenzen zusammensetzen. Eine Erweiterung der Auswertung auf eine beliebige Anzahl von Frequenzen ist daher erstrebenswert.

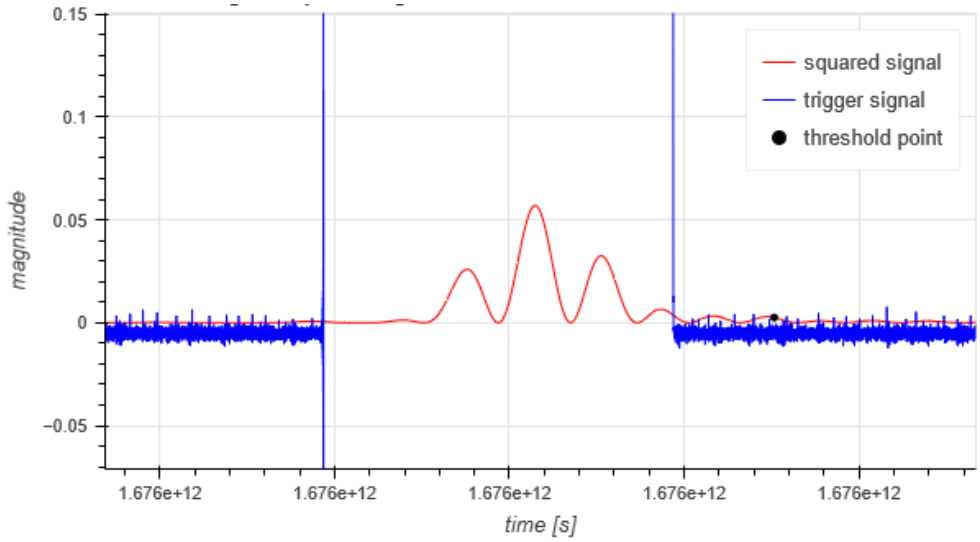


Abbildung 45: Datensatz mit negativer Zeitersparnis von -58 ms

2.10 AP 5.6 Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems

In Vorbereitung auf die abschließende Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems in AP5.6 wurden im Konsortium mögliche Funktionsmuster diskutiert. Diese sollten einerseits die Ergebnisse der Voruntersuchungen seitens Materialwahl- und -aufbau berücksichtigen. Andererseits über die bis dato genutzten ebenen Platten hinausgehen und anwendungsnähere Randbedingungen widerspiegeln. Weiterhin musste sich das Funktionsmuster an dem durch KMS spezifizierten und umgesetzten Gestell zur Bauteilaufnahme (AP5.4) sowie den Platzverhältnissen seitens der Laser-Bearbeitungsmaschine beim LZH orientieren. Basierend auf der in HAP1 definierten Entwicklungsschiene mit steigendem Komplexitätsgrad wurde final ein gekrümmtes Funktionsmuster in Anlehnung an Verkleidungsstrukturen von Flugzeugkabinen seitens INVENT definiert.

Abbildung 46: Definition Funktionsmuster: gekrümmte Innenverkleidung zur Bewertung der Entwicklungsschiene der Laserbearbeitung

Die umgesetzte Struktur hat eine Außenabmessung von ca. 200mm x 300mm bei einem Krümmungsradius von 753mm. Die Bauteilhöhe variiert je nach Kernmaterial zwischen 11mm und 20mm. Die Oberfläche der Decklage wurde sowohl rau (Abreißgewebe) als auch glatt ausgeführt (Deckblech). Insgesamt wurden 4 Funktionsmuster gefertigt und dem LZH zur Bearbeitung bereitgestellt.

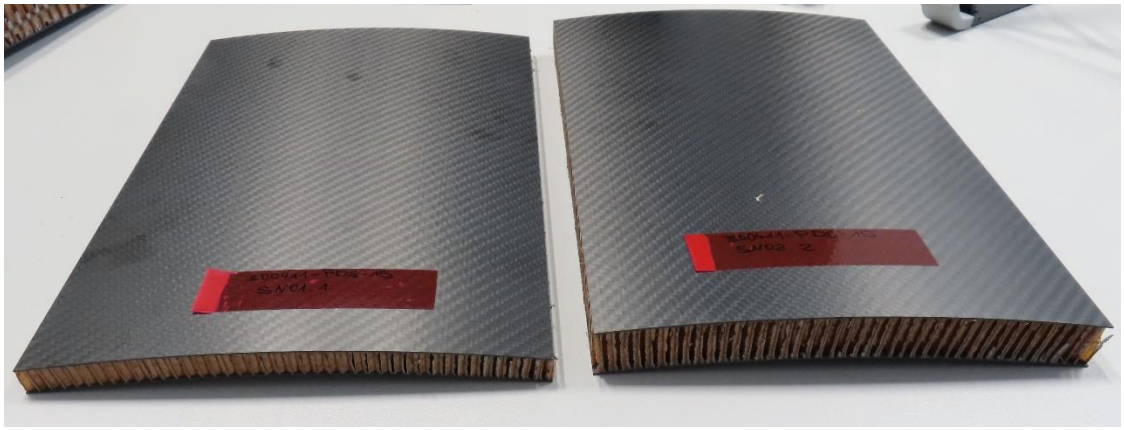


Abbildung 47: Gekrümmte Funktionsmuster mit 11mm und 20mm Wabenkern

Nach Fertigstellung des Gesamtsystems wurden diese Bohrungen unter optimierten Laserparametern eingebracht und alle relevanten Prozessdaten erfasst. Parallel dazu erfolgte die Aufnahme von Prozesszeiten der spanenden Bearbeitung als Referenz zur Kosten-Nutzen-Analyse. Auf Basis der aufgenommen Prozesszeiten, Aufwände und Verbräuche für die angewendeten Technologien sowie der Akustikprüfung an perforierten Probenkörper fand eine technologische und wirtschaftliche Bewertung statt.

Die Aufwandsermittlung (Abbildung 48) zur Fertigung perforierter Sandwichstrukturen für verschiedene Lochkonfigurationen ergab, dass zwischen einmaligen und wiederkehrenden Tätigkeiten zu unterscheiden ist. Zu Ersterem zählt etwa die Anlagenprogrammierung zum Lochmuster und das Mappen auf die jeweilige Bauteilgeometrie. Ebenso sind Tätigkeiten der Maschinenvorbereitung, wie Einrüsten, Beschaffung und Umsetzung von Halbzeugen (Bohrer, Aufspannvorrichtung) zu berücksichtigen. Sowohl für das klassische Bohren als auch den Laserprozess sind die einmaligen Aufwände als identisch anzusehen. Anlagen-beschaffungskosten wurden nicht berücksichtigt, jedoch die Kosten für Verbrauchsmaterial. Durch den Verschleiß beim spanenden Bohren ist mit Zusatzkosten pro Loch von ca. 2 Ct. pro Bohrung zu rechnen. Diese skalieren mit größer werdenden Strukturen sowie geringeren Standzeiten, um einen robusten Prozess und eine gleichbleibende Bauteilqualität sicherzustellen. Folglich nehmen die wiederkehrenden Bohrzeiten durch die notwendigen Umrüstarbeiten zu. Beim Laserprozess hingegen entfallen diese Tätigkeiten.

Für die innerhalb des Vorhabens perforierten Strukturen mit jeweils 700 bzw. 1400 Löchern in einem Arbeitsschritt ergab die Auswertung der reinen Bohrzeiten einen ähnlichen Aufwand von ca. 2-3 s/Loch. Das Laserbohren kommt dabei mit geringeren RC-Kosten aus. Mit Bezug zu den Dimensionen möglicher Anwendungen und mit der Möglichkeit bis zu 25 Löcher

gleichzeitig Bohren zu können (mit DOE ohne Optimierung), ist mit einer deutlichen Verringerung der Bohrzeit von 1/10s pro Loch basierend auf einem Bohrfeld von 100 Löcher und kleinen Durchmessern zu rechnen. Die mechanischen Tests zeigten, dass strukturellen Eigenschaften der perforierten Strukturen erhalten bleiben und für beide Verfahren identisch sind.

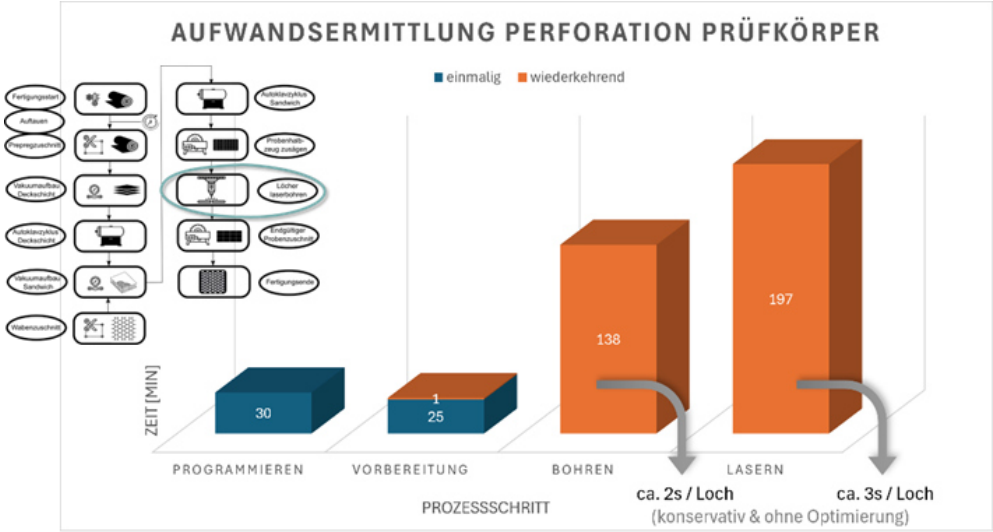


Abbildung 48: Aufwandsermittlung an perforierten Prüfkörpern im Vergleich

Abschließend kann festgehalten werden, dass die mikroperforierten Sandwichstrukturen erfolgreich mittels Laserbohren umgesetzt wurden. Es konnte nachgewiesen werden, dass die perforierten Sandwichstrukturen eine struktur-integrierte und anpassbare schallreduzierende Wirkung haben. Die strukturmechanische Analyse und die zerstörende Prüfung haben keine negativen Auswirkungen auf die mechanischen Kennwerte der Sandwichstrukturen gezeigt, was ihre Integrität, Zuverlässigkeit und Stabilität bestätigt. Darüber hinaus wurden industriell anwendbare Verfahren zur Qualitätssicherung und Bauteilprüfung von Sandwichwerkstoffen mit Mikrobohrungen erfolgreich implementiert, was die praktische Umsetzbarkeit und Anwendbarkeit der Technologie in der industriellen Fertigung unterstreicht. Mit der Umsetzung einer steifigkeitsoptimierten Gehäusestruktur wurde außerdem die Grundlage für die Entwicklung eines Bearbeitungskopfs, der eine spezifische Prozessführung, -kontrolle und -steuerung ermöglicht.

Im Sinne der förderpolitischen Ziele "umweltfreundliche Luftfahrt" werden durch dieses Projekt positive Beiträge hinsichtlich der umgesetzten Strukturen und der entwickelten Prozesse geleistet. Mikroperforierte Sandwichstrukturen reduzieren störendem Lärm, der sich negativ auf Mensch und Umwelt auswirkt. Mit dem Laser lassen sich schnell, präzise und verschleißfrei Löcher in Faserverbundstrukturen einbringen und ermöglichen damit eine effizientere und nachhaltigere Fertigung von eben solchen schallabsorbierenden Strukturen.

Zusammenfassend leisten die Projektergebnisse aufgrund ihres innovativen Charakters einen wichtigen Beitrag zum technisch-wissenschaftlichen Fortschritt und tragen maßgeblich zur Erreichung der umweltpolitischen Ziele im Luftfahrtsektor bei.

3 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Den größten Umfang haben die Personalkosten eingenommen. Material und Fremdleistungen haben in diesem Vorhaben einen sehr geringen Anteil ausgemacht.

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Aufgrund des neuartigen Ansatzes, die Entwicklung eines laserbasierten Verfahrens zur Einbringung von Mikrobohrungen ≤1mm in CFK-Sandwichstrukturen zum Zweck der Schalldämpfung zu realisieren, bedurfte es eines erheblichen finanziellen Aufwandes für die vorwettbewerbliche Entwicklung. Das Vorhaben war mit hohem technischem und unternehmerischem Risiko versehen, da die Realisierung des angestrebten Verfahrens von der Lösung vieler technischer Einzelfragestellungen abhing und nur innerhalb der gemeinsamen Arbeiten des Konsortiums zu bewältigen war. Hierzu zählen beispielhaft:

- Auswirkungen des Bohrverfahrens auf die Materialeigenschaften
- Realisierung eines hochsteifen bzw. aktiv kompensierten Bearbeitungskopfs
- hochdynamische Verfahrprozesse
- effiziente und zulassungsfähige Bohrtechnologien und -prozesse

Die allein auf Eigenmittel gestützte In-House Entwicklung war dadurch für ein Unternehmen mit der Größe der INVENT GmbH nicht möglich, so dass das Entwicklungsvorhaben einer zusätzlichen Förderung bedurfte. Durch das Projekt wurde ein Technologievorsprung erarbeitet. Zusätzlich wurde damit eine anwendungsbezogene, industrielle Grundlage geschaffen. Die erreichten Projektergebnisse leisten aufgrund ihres innovativen Charakters einen Beitrag zum technisch-wissenschaftlichen Fortschritt. Zu deren Erreichung wurde das veranschlagte Kostenbudget vollständig ausgeschöpft.

5 Nutzen, Verwertbarkeit (fortgeschriebener Verwertungsplan)

5.1 Wirtschaftliche & wissenschaftlich, technische Erfolgsaussichten

Mit der Förderung des Projektvorhabens miBoS durch den Projektträger DLR konnte das Konsortium die Idee zur Umsetzung eines laserbasierten Verfahrens zur Einbringung von Mikrobohrungen ≤1mm in CFK-Sandwichstrukturen zum Zweck der Schalldämpfung umsetzen. Dies beinhaltet die Entwicklung neuartiger Hardwarekomponenten und einer speziell darauf ausgelegten Prozessführung, -kontrolle und -steuerung für den Bohrprozess. Darauf aufbauend konnten verschiedene mikroperforierte FVK-Teststrukturen mittels Laserbohren umgesetzt werden, an denen die struktur-integrierte und anpassbare schallreduzierende Wirkung der perforierten Sandwichstrukturen nachgewiesen wurde. Die anwendungsorientierte Entwicklung und Erprobung entsprechender Modifikationen der Funktionsintegration trägt dazu bei, dass sich die Entwicklungsmöglichkeiten der INVENT

GmbH für zukünftige Anwendungen der Luftfahrt als auch auf andere Märkte erhöhen wird. Die experimentell und simulativ durchgeführten strukturmechanischen Analysen sowie die zerstörende Prüfung ergab keine Beeinflussung der mechanischen Kennwerte am Sandwich. Für die reinen Decklagen traten im Zugversuch die durch die Perforation zu erwartenden reduzierten Festigkeiten auf. Ein Einfluss durch das Laserbohren selbst wurde nicht festgestellt. Hieraus ergibt sich eine Portfolioerweiterung in Bezug auf die Bereitstellung von Dienstleistungen zum Design und der Auslegung von mikro-perforierten Sandwichstrukturen sowie die daraus resultierende akustische Anpassung. Da die INVENT GmbH direkt an der Entwicklung des Mikrobohrverfahrens mitwirkte und Hauptverantwortlich für die werkstoffseitige Entwicklung der Sandwichpatten, deren Simulation und Qualität war, besteht eine Verwertungsmöglichkeit in der direkten Kooperation mit einem oder mehreren OEMs in Folgeprojekten. Das betrifft sowohl die mögliche Entwicklung neuer Produkte, in denen die Technologie mit dem Ziel verbesserter Schallschutzeigenschaften eingesetzt wird, als auch die Fertigung von Bauteilen, Komponenten oder Strukturen mit Mikrobohrungen. Durch die Präsentation der Ergebnisse konnte bereits Kontakt zu Firmen mit der Expertise zur Vermeidung störender Vibrationen und Schallabstrahlung hergestellt werden. Mit Erweiterung von Akustiksimulationen um Realkennwerte (seitens Mikroperforation und FVK-Spezifika), kann dann bereits frühzeitig im Planungs- und Entwicklungsprozess eine entsprechende Funktionsintegration effizient berücksichtigt werden.

Die erzielten Ergebnisse weisen ferner darauf hin, dass die Laser-Technologie als potenzielle Alternative für den Teilprozessschritt der Nachbearbeitung von FVK-Strukturen sowohl in monolithischer als auch in Sandwich-Bauweise in Betracht gezogen werden kann. Mit der Option zur Implementierung als weiteren bzw. externen Teilprozessschritt wird die eigene Fertigung flexibel gehalten, als auch die Variantenvielfalt von FVK-Strukturen erhöht, indem kundenspezifisch und nachgeschaltet Funktionen integriert werden können. Dies ist besonders für Bauteile oder Strukturelemente, die in Kleinserien bzw. mittleren Stückzahlen hergestellt werden, interessant. Hierbei sehen wir kurzfristig (1-3 Jahre nach Projektende) die Weiterführung der Arbeiten im Zielmarkt neuer Anwendungen, wie beispielsweise UL-Hubschrauber oder unbemannte Luftfahrzeuge. Es wird erwartet, dass in diesen Märkten eine erste Realisierung der neuen Technologie einfacher möglich sein wird als in der klassischen, allgemeinen Verkehrsluftfahrt.

Durch die Identifikation und die Prüfung von industriell anwendbaren Verfahren zur Prozess- und Qualitätssicherung von Mikrobohrungen an Sandwichwerkstoffen wird zudem sichergestellt, dass für INVENT ein einfaches Verfahren zur (Wareneingangs-) Prüfung für solche extern bearbeiteten / bereitgestellten Halbzeuge zur Verfügung steht. Hiermit ergibt sich für INVENT ein Wettbewerbsvorteil, der sowohl in den Produkten selbst als auch in den zugehörigen effizient gestalteten und nachhaltigeren Fertigungsprozessen liegt, wenn entsprechende Komponenten zu realisieren sind. Damit verbunden ist die Schaffung von 1-2 weiteren Arbeitsplätzen, je nach Volumen der Entwicklungsaufträge (aufgeteilt auf die Bereiche Entwicklungsingenieur, Techniker und qualifizierter Fertigungsmitarbeiter).

Ein weiteres kurzfristiges Verwertungsziel soll durch die Fortführung der Arbeiten mit dem Ziel des Erreichens eines höheren technologischen Reifegrades bei der entwickelten

Laserbohrmethodik erreicht werden. Hierzu werden momentan Abstimmungen zu Folgeaktivitäten durchgeführt. Thematisch orientieren sich Nachfolgeprojekte dabei auf die industrielle Nutzbarmachung des Laserprozesses durch eine Übertragung und Skalierung auf Bauteile innerhalb eines automatisierten Bohrprozesses sowie dessen Anwendung an fertigen FVK-Komponenten. Zudem sind größere Testreihen an unterschiedlichen Materialkombinationen und Lagenaufbauten notwendig, um universelle Laserbohrparameter ableiten zu können. Langfristig soll so an einem Hochlohnstandort wie Deutschland für den Bereich Luftfahrt der Prozess des Laserbohrens entweder von externen Dienstleistern durchgeführt oder auch als eigener Prozess etabliert werden, wodurch sich weitere Verwertungsmöglichkeiten ergeben.

Vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeit ist langfristig mit einem möglichen Einsatz von Rezyklat-Materialien, Naturfaserkunststoffen und deren Hybriden zu rechnen. Durch diese Ausweitung auf weitere Materialkombinationen im Sinne der 9R-Strategie, sind jedoch weitere Aktivitäten notwendig, um die Prozesskompatibilität sicher zu stellen, Materialdegradation zu vermeiden und ein ganzheitliches Wohlbefinden des Flugpassagiers über die Akustik hinaus zu ermöglichen.

Die INVENT GmbH erzielte durch das Vorhaben allgemein und durch die Realisierung der Funktionsmuster im Speziellen einen erheblichen Erkenntnisgewinn im Bereich der Charakterisierung, Auslegung und Fertigung von mikro-perforierter Sandwichstrukturen für die Anwendung in der Luftfahrt. Dadurch kann die INVENT GmbH ihr Angebotsportfolio für weitere Branchen und Prozesse erweitern.

5.2 Wissenschaftliche / wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die enge Verzahnung der Forschungspartner mit den Industriepartnern stellt eine praxisrelevante Entwicklung sicher und gewährleistet eine vollständige Abwicklung der Prozesskette. Zum jetzigen Stand sind für spätere Ausbaustufen und Erweiterungen zusätzliche Partner nötig. Darüber hinaus können die im Vorhaben entwickelten Halbzeuge, Verfahren und Auslegungsmethoden auf andere Industriezweige wie den Schienenverkehr oder die Raumfahrt übertragen werden. Durch geplante sowie bereits erfolgreich akquirierte Nachfolgeprojekte mit den im Konsortium vertretenen Partnern kann die Zusammenarbeit intensiviert werden. Zusätzlich finden sich Synergien mit laufenden Projekten wieder, in denen INVENT an neuartigen Materialien und Bauweisen für Sandwichstrukturen, sowie deren Recyclingstrategien arbeitet und die hier gewonnen Erkenntnisse umsetzen kann.

Die Firma INVENT plant weiterhin, die Etablierung als Spezialist für Hochleistungsprodukte fortzuführen. Vielversprechend ist auch, die neu erarbeiteten Verfahren und Technologien in andere interne Arbeitsbereiche zu übertragen, wie etwa die Bearbeitung von Sandwichstrukturen mittels Laser als Alternative zu spanenden Verfahren oder die individuelle Perforation von Halbzeugen für Faser-Metall-Laminate mit dem Ziel, eine effizientere und robustere Fertigung sicherzustellen. Weiterhin ist das Verfahren ggf. geeignet, die Perforation von inhouse gefertigten CFK-Waben durchzuführen, wodurch sich der Fertigungsaufwand und die Materialkosten reduzieren würden, da dann keine vorperforierten Halbzeuge mehr genutzt

werden müssen. Ein entsprechendes Projekt zur Entwicklung dieser Technologie ist in Planung.

In der Luft- und Raumfahrt, den Kerngeschäftsfeldern von INVENT, sind im Bereich neuartiger und hochbelasteter Strukturen viele Fragen noch nicht abschließend beantwortet. Weitere industrielle Anknüpfungen werden deshalb im Bereich der robusten Leichtbaustrukturen für den Anlagenbau nach Projektende verfolgt. Somit erschließt sich INVENT einerseits den Zugang zu einem neuen Marktsegment und stützt andererseits die auszubildende Wertschöpfungs- und Zulieferkette.

Es wurden keine Erfindungen oder Schutzanmeldungen vom Zuwendungsempfänger angemeldet.

6 Externer Fortschritt auf dem Gebiet

Im Projekt INTONATE - Future Aircraft INTeriOr Noise and VibrATion Evaluation beschäftigt sich das DLR mit den auf Kabinen einwirkenden Lärmquellen: https://www.dlr.de/ae/desktopdefault.aspx/tabid-17953/28468_read-73831/ und zeigt damit die Bedeutung der Thematik sowie die Erfordernisse von Lösungen seitens Anwendung und Prozess.

7 Veröffentlichungen der Ergebnisse nach Nr. 5 der NKBF

Seitens des Teilvorhabens wurden die Ergebnisse nicht eigenständig durch die INVENT GmbH auf Konferenzen oder in referenzierten Veröffentlichungen publiziert.

Allerdings konnte die INVENT GmbH mit ihren Arbeiten zu folgenden Veröffentlichungen beim Projektpartner LZH beitragen:

- Veröffentlichung der Ergebnisse zur Durchschneidkontrolle auf der Photonics West 2022 in San Francisco, https://doi.org/10.1117/12.2607494
- Veröffentlichung der Ergebnisse zur Bohrbearbeitung auf der ICALEO 2022 in Orlando & Journal of Laser Applications, https://doi.org/10.2351/7.0000809
- Veröffentlichung zur Bohrbearbeitung auf der ICCM Belfast 2023
- Veröffentlichung auf der Photonics West 2024 in San Francisco, https://doi.org/10.1117/12.3001372
- Veröffentlichung eines Artikels zu miBoS in der phi, https://doi.org/10.48811/phi-24-005

Die umgesetzten Funktionsmuster wurden einem breiten Publikum auf der Hannover Messe 2024, Niedersachsen Aviation und Space Tech Expo live präsentiert, sowie medienwirksam über die sozialen Plattformen. Bei der INVENT GmbH liegen für potenzielle Anwender und Interessenten alle Funktionsmuster sowie erzeugte Prozesstechnologien und Qualitätssicherungsmethoden bereit.