	Abschlussbericht 300421 HYPE	Dok-Nr.: 300421-INV-TN T1u2 Datum: 27.02.2025 Verfasser: HARO/HUOL Version.: A
---	--	---

Titel:

Schlussbericht der INVENT GmbH (Teil I und Teil II)


Zuwendungsempfänger: INVENT GmbH	Förderkennzeichen: 20W1926A
--	---------------------------------------

Vorhabenbezeichnung:
HYPE: Hybrides, berührungsloses Ultraschallprüfverfahren für komplexe Faserverbundbauteile mit multipler Aktuatorik und virtuellem Ergebnisabgleich


Teilvorhaben:
Entwicklung von multiplen Aktuatoren und deren Applikationsmethodik

Laufzeit des Vorhabens:
 01.05.2021 bis 31.10.2024

Berichtszeitraum:
 01.05.2021 bis 31.10.2024

<p>Beschreibung:</p> <p>Der vorliegende Sachbericht beschreibt die wesentlichen Arbeiten und Ergebnisse der INVENT GmbH im Verbundvorhaben HYPE.</p> <p>Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Zuwendungsempfänger.</p> <p>Der Bericht umfasst:</p> <p>36 Seiten</p> <p>35 Abbildungen</p> <p>0 Tabellen</p> <div style="text-align: center;"> <p>Gefördert durch:</p>  <p>Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz</p> <p>aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages</p> </div>	<p>Verteiler (alphabetisch):</p> <p>INVENT GmbH</p> <p>Technische Informationsbibliothek (TIB)</p> <p>Projekträger Luftfahrt</p>
---	---

--


	Abschlussbericht 300421 HYPE	Dok-Nr.: 300421-INV-TN T1u2 Datum: 27.02.2025 Verfasser: HARO/HUOL Version.: A
---	--	---

Änderungslenkung

Version	Datum	Änderung	Seiten	Verfasser
A	28.02.2028	Ursprungfassung	alle	HARO / HUOL

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.....	6
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	7
2	Eingehende Darstellung	8
2.1	Erzielte Ergebnisse	8
2.2	HYPE-Testkörper.....	8
2.3	Entwicklung von hybriden Aktuatoren	19
2.4	Expertentool.....	24
2.4.1	Datenbankmodul.....	25
2.4.2	Volumenscanmodul.....	26
2.4.3	C-Scan (LW) Modul.....	27
2.5	Verifikation und Demonstration	28
	Quellen	29
3	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	30
4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	30
5	Nutzen, Verwertbarkeit (fortgeschriebener Verwertungsplan).....	31
5.1	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten.....	31
5.2	Wissenschaftliche / technische Erfolgsaussichten.....	32
5.3	Wissenschaftliche / technische Anschlussfähigkeit	33
6	Externer Fortschritt auf dem Gebiet.....	34
7	Veröffentlichungen der Ergebnisse nach Nr. 5 der NKBF	36

	Abschlussbericht 300421 HYPE	Dok-Nr.: 300421-INV-TN T1u2 Datum: 27.02.2025 Verfasser: HARO/HUOL Version.: A
---	--	---

1 Kurzbericht


1.1 Aufgabenstellung

Die Qualitätssicherung von CFK-Bauteilen im Bereich Luftfahrt basiert weitgehend auf ressourcenintensive luftgekoppelte bzw. wasserangekoppelte Ultraschallprüfverfahren. Ziel des Gesamtvorhabens ist daher die Steigerung der Effizienz und Senkung der Kosten für die Qualitätssicherung. Dazu sollen die im Vorgängerprojekt NOISYC erarbeiteten Technologien für ein berührungsloses luftgekoppeltes Ultraschallprüfverfahren, welches auf das Prinzip der Anregung von Lambwellen mittels auf dem Bauteil applizierten Piezowandlern basiert, weiterentwickelt werden. Ziel ist die Anwendbarkeit der Technologie auf komplexe Faserverbundstrukturen. Die Technologie soll sowohl im Rahmen der Qualitätssicherung während der Fertigung aber auch für Komponenten von Flugzeugen, die sich in der Wartung befinden, angewendet werden können. Auf Ebene des Gesamtprojektes sollen die folgenden Technologien erarbeitet werden:

- **Applikator:** Entwicklung einer Applikationstechnologie zur reversiblen und rückstandsfreien Anbindung von Piezowandlern auf Faserverbundstrukturen
- **Aktuatorik:** Erarbeitung eines innovativen Piezowandlers zur Anregung eines möglichst breiten Frequenzspektrums. Darüber hinaus die Erweiterung der bestehenden Messtechnik zur Anregung mehrerer Aktuatoren / Sensoren.
- **Experten-Tool:** Entwicklung eines Experten – Tools zur effizienten simulationsgestützten Bewertung von experimentellen Ultraschallmessdaten bzw. Befunden
- **Prüftechnik:** Weiterentwicklung der Prüftechnik zur Anwendung auf komplexen Faserverbundstrukturen

Im Rahmen des vorliegenden Teilvorhabens sollen von der INVENT GmbH die folgenden wesentlichen Aufgaben übernommen werden:

- **Probekörper:** Erarbeitung und Herstellung von Probekörpern zur Erprobung der im Projekt zu entwickelnden Technologien
- **Aktuatorik:** Erarbeitung eines innovativen Piezowandlers zur Anregung eines möglichst breiten Frequenzspektrums.
- **Experten - Tool:** Entwicklung eines Assistenzsystems zur simulationsgestützten Bewertung von Ultraschallmessdaten.
 - Erstellung einer geeigneten Benutzeroberfläche zur effizienten Auswertung von Ultraschalldaten
 - Erstellung einer Datenbank und eines dazugehörigen Datenbankabgleichs.
 - Integration verschiedener Module in das Experten-Tool.

	Abschlussbericht 300421 HYPE	Dok-Nr.: 300421-INV-TN T1u2 Datum: 27.02.2025 Verfasser: HARO/HUOL Version.: A
---	--	---

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde


Das Verbundvorhaben wurde initiiert, um die in Abschnitt 1.1 beschriebenen Technologien zu erarbeiten. Hauptvoraussetzung für die Vorhabensdurchführung war die interdisziplinäre Zusammenarbeit der einzelnen am Projekt beteiligten Partnern mit ihren Fachkompetenzen der am Projekt beteiligten Partner sowie deren interdisziplinäre Zusammenarbeit.

Zu den Projektpartnern zählen HNDDT als Anbieter für kundenoptimierte Ultraschallprüftechnik und das Fraunhofer IFAM mit tiefgreifenden Kompetenzen zur Entwicklungen innovativer Fügetechnologien und Lambwellensimulationen für Faserverbundstrukturen. Das interdisziplinäre Team sowie dessen Vorarbeiten in verschiedensten Forschungsthemen bildeten eine tiefgreifende fachliche Grundlage für die Bearbeitung des Projektes.

Für die erfolgreiche Bearbeitung des Vorhabens waren die Verteilung, Bearbeitung und Koordinierung der Aufgaben entsprechend den jeweiligen Kompetenzfeldern sowie ein intensiver interdisziplinärer Austausch zwischen den Partnern notwendig.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Berichtszeitraum erstreckt sich vom 01. Mai 2021 bis zum 31. Oktober 2024. Von der INVENT GmbH wurden die Arbeitspakete 0.1, 1.1, 1.2, 1.4, 1.5, 1.6, 2.2, 2.5, 2.7, 3.2., 3.3, 3.4, 3.5, 4.2, 4.3 und 4.4. In Abbildung 1 ist der Projektplan dargestellt. Der initiale Bearbeitungszeitraum erstreckte sich vom 01. Mai 2019 bis 30. April 2024. Für das Forschungsprojekt wurde eine Projektverlängerungen beantragt und genehmigt. Der Abschließende Bearbeitungszeitraum erstreckte sich damit bis zum 31. Oktober 2024.

	Abschlussbericht 300421 HYPE	Dok-Nr.: 300421-INV-TN T1u2 Datum: 27.02.2025 Verfasser: HARO/HUOL Version.: A
---	--	---


Bezüglich Piezowandlern wurden in den letzten Jahren kontinuierlich Fortschritte erzielt. Piezokeramiken finden aufgrund ihrer Eigenschaft zur direkten Umwandlung von elektrischer in mechanische Energie in vielen Bereichen der Technik Anwendung und eignen sich aufgrund ihrer schnellen Ansprechzeit ideal für den Einsatz als Ultraschallquelle.

Vom DLR Braunschweig wurde im Jahr 2000 eine innovative Bauweise für Piezowandler entwickelt, die durch INVENT gefertigt und seit 2007 vom Vertriebspartner PI Ceramic weltweit vermarktet werden. Zur Herstellung der Piezowandler werden dünne piezokeramische Platten in eine duroplastische Hülle eingebettet. Diese Hülle enthält außerdem flächige Elektroden, die nahezu die gesamte Keramik bedecken sowie elektrische Anschlüsselemente für den Anschluss von Kabeln und Signalleitungen enthalten. Die Applikation der Wandler erfolgt durch die Verklebung mit hochfesten Strukturklebstoffen. Typische Anwendungsfälle für diese Piezowandler sind hochdynamische Sensoren und adaptronische Anwendungen.

Von der INVENT GmbH wurden die Bauweisen und die Anwendungsmöglichkeiten der Piezowandler kontinuierlich weiterentwickelt. Neben großflächigen Sensornetzen bestehend aus vielen kleinen Patches, erfolgte beispielsweise die Entwicklung von Energy-Harvestern, mit deren Hilfe mechanische Schwingungen in elektrische Energie umgewandelt werden können. Ferner wurden Herstellungsmethoden untersucht, die eine kostengünstige und ressourcenschonende Herstellung großer Stückzahlen ermöglichen sollen. Im Projekt HYPE zielt die Entwicklung auf Piezowandler mit optimiertem Frequenzgang hin.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen der Ergebnisse Dritter wurden vergleichbare Arbeiten von Premium Aerotec zum Projekt HYPE identifiziert. Zur Diskussion und Abgrenzung der Projektinhalte fand im Dezember 2021 ein digitales Treffen zwischen Premium Aerotech und dem HYPE-Konsortium statt. Für weitere Details dazu sei an dieser Stelle auf Abschnitt 6 „Externer Fortschritt auf dem Gebiet“ verwiesen. Darüber hinaus ist keine direkte Zusammenarbeit mit externen Partnern erfolgt.

	Abschlussbericht 300421 HYPE	Dok-Nr.: 300421-INV-TN T1u2 Datum: 27.02.2025 Verfasser: HARO/HUOL Version.: A
---	--	---

2 Eingehende Darstellung

2.1 Erzielte Ergebnisse

In den folgenden Abschnitten werden die im Rahmen des Teilvorhabens durchgeführten wesentlichen Arbeiten und Projektergebnisse vorgestellt.

2.2 HYPE-Testkörper

Zentrales Ziel des Projektes ist die Erarbeitung einer Technologie zur berührungslosen Qualitätssicherung von Luftfahrtbauteilen in Faserverbundbauweise mittels luftgekoppelter Ultraschallprüfung durch die Einbringung von geführten Lambwellen. Lambwellen werden mit Hilfe reversibel verklebter, piezoelektrischer Flächenwandler in das zu prüfende Bauteil eingekoppelt und durch ein Mikrofon abgegriffen. Um einen möglichst breiten Einsatz der Technologie sicherzustellen, sollen dafür anwendungsnahe Strukturen untersucht werden. Dafür wurde ein Probekörperprogramm definiert. Die besondere Herausforderung war die Komplexität von Luftfahrtstrukturen mit bspw. Sandwichbauteilen, Versteifungselementen und Dickensprüngen abzubilden, gleichzeitig aber eine hohe Signalgüte (Kompromiss aus Anregungssignal, Aktuatordurchmesser und Plattendicke) für die Lambwellen zu gewährleisten und die Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse untereinander zu gewährleisten. Weiterhin musste die reproduzierbare Einbringung unterschiedlicher Fehlstellen sowie deren Positionen berücksichtigt werden. Dies galt es außerdem im Kontext semi-finiten FE-Simulationen der Probekörper durch den Projektpartner IFAM zu betrachten. Die Probekörper und Fehlstellen müssen hinsichtlich ihrer Eigenschaften für die Simulation möglichst genau nachbildbar sein, ohne dabei Einschränkungen wie eine maximal zulässige Größe des FEM – Modells als Resultat der verwendeten Simulationssoftware zu vernachlässigen. Im Umkehrschluss müssen die Probekörper hinsichtlich ihrer Fertigungstoleranzen möglichst nah am „Ideal“ liegen.

Die im Projekt definierten Probekörper sind in Abbildung 2 schematisch dargestellt. Grundsätzlich sind die Probekörper in die 5 verschiedenen Bauweisen unterteilt. Es wurden Probekörper als ebene Platten, als Platte mit Dickensprung, als Platte mit Stringer, eine Platte mit Doubler sowie Sandwichplatten konzipiert und gefertigt. Hinsichtlich der Fehlertypen wurden Sacklochbohrungen mit drei unterschiedlichen Durchmessern und einer Tiefe von $\frac{1}{2}$ Plattendicke sowie eingelegte Fremdkörper in Form von Schutzfolien in unterschiedlichen Typen, Größen und Tiefen definiert. Alle gefertigten Probekörper weisen die gleiche Grundfläche mit den Abmaßen 450 mm x 450 mm auf. Für die Probekörper wurden die drei unterschiedlichen nominellen Laminatdicken 1 mm, 2 mm und 4 mm berücksichtigt.

Die ebenen Platten wurden in allen Kombinationen (Laminatdicke und Fehlertyp) gefertigt. Die Probekörper mit Dickensprung weisen im dünnen Bereich eine Laminatdicke von 2 mm und dicken Bereich eine Laminatdicke von 4 mm auf. Die Probekörper mit Stringer weisen eine Laminatdicke von 2 mm auf. Die Probekörper in Sandwichbauweise weisen je ein Facesheet mit der Dicke 1 mm und ein Facesheet mit der Dicke 2 mm auf. Des Weiteren wurde ein Probekörper mit beidseitig 1 mm dicken Facesheets und zusätzlichen Doublern gefertigt. Die

Probekörper in Sandwichbauweise wurden mit einem Aramid-Wabenkern gefertigt. Darüber hinaus wurde ein Probekörper mit einer Aluminiumwabe als Kern gefertigt. Mit den beschriebenen Probekörpern kann eine steigende Komplexität für die Untersuchungen dargestellt werden. Vergleiche hierzu Abbildung 2.

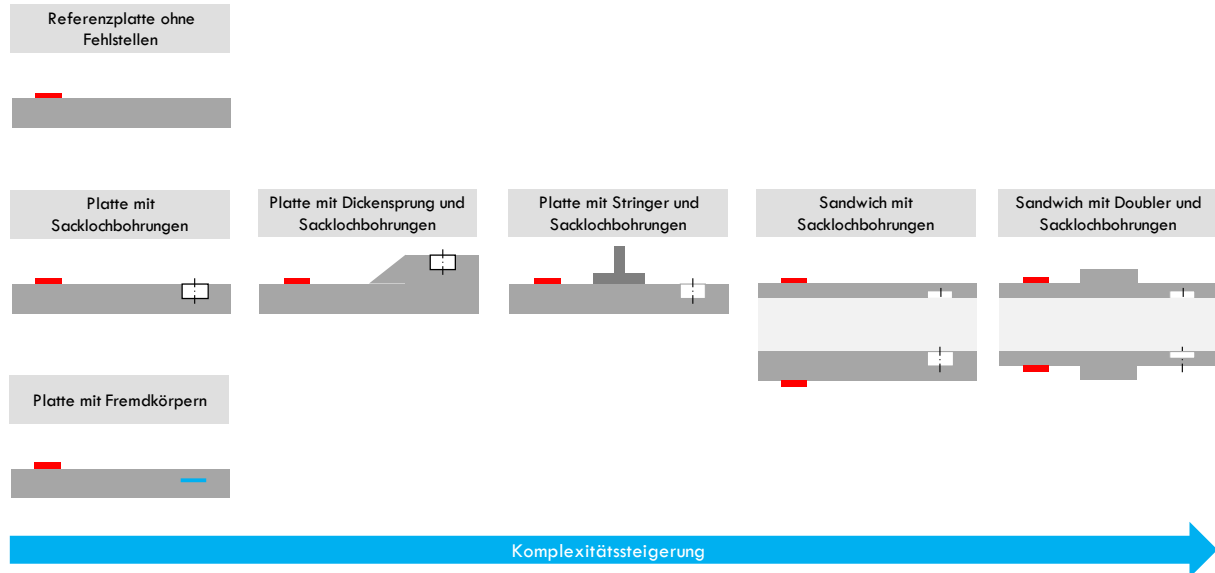


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Probekörper inklusive deren Komplexitätssteigerung im Projektverlauf.

Eine detaillierte Beschreibung der Probekörper ist in Abbildung 3 bis Abbildung 10 auf den Seiten 10 bis 13 dargestellt. Die im Projekt hergestellten Probekörper sind in Abbildung 11 bis Abbildung 18 auf den Seiten 14 bis 16 dargestellt. Die gefertigten Probekörper wurden für experimentelle Untersuchungen an den Verbundpartner HNDT übergeben.

Darüber hinaus wurden Probekörper für Rollenschälversuche zur Klebstoffcharakterisierung für den Applikator gefertigt. Dazu zählen lackierte und unlackierte Probekörper aus CFK sowie Probekörper aus Aktuatorssubstrat ohne integrierter Piezokeramik. Darüber hinaus wurden Probenkörper in Form der später verwendeten Piezowandler beige stellt. Die Probekörper sind in Abbildung 19 bis Abbildung 23: Probekörper in Form der später verwendeten Piezowandler ohne integrierter Keramik für Applikationsversuche durch das Fraunhofer IFAM.

auf den Seiten 16 bis 18 dargestellt und wurden an den Projektpartner Fraunhofer IFAM für experimentelle Untersuchungen beigestellt.

Referenzplatten ohne Fehlstellen

- Zielstellung: Referenzplatten

- Verschiedene Solldicken (1,05 mm → 1mm, 2,10 mm → 2 mm und 4,2 mm → 4 mm) und Laminataufbauten

- Aktuator auf glatter Seite

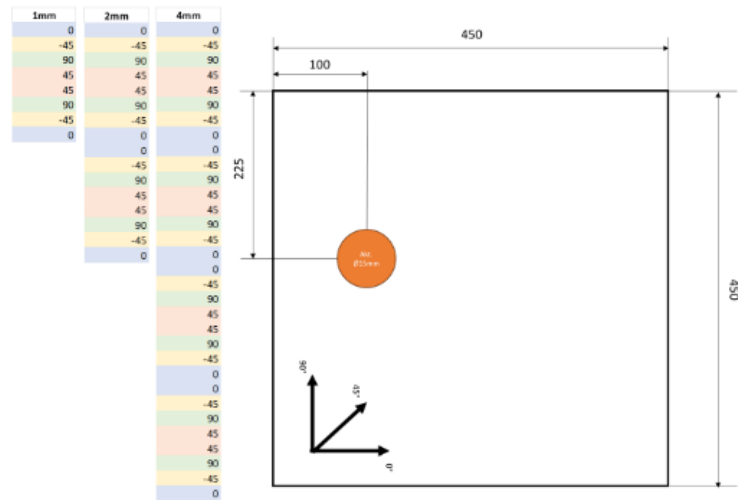


Abbildung 3: Probekörperdefinition für Referenzplatten ohne Fehlstellen

Referenzplatten Sacklochbohrungen

- Referenzplatte mit Sacklochbohrungen

- Aktuatoren auf glatter Seite

- Verschiedene Solldicken (1,05 mm → 1mm, 2,10 mm → 2 mm und 4,2 mm → 4 mm) und Laminataufbauten

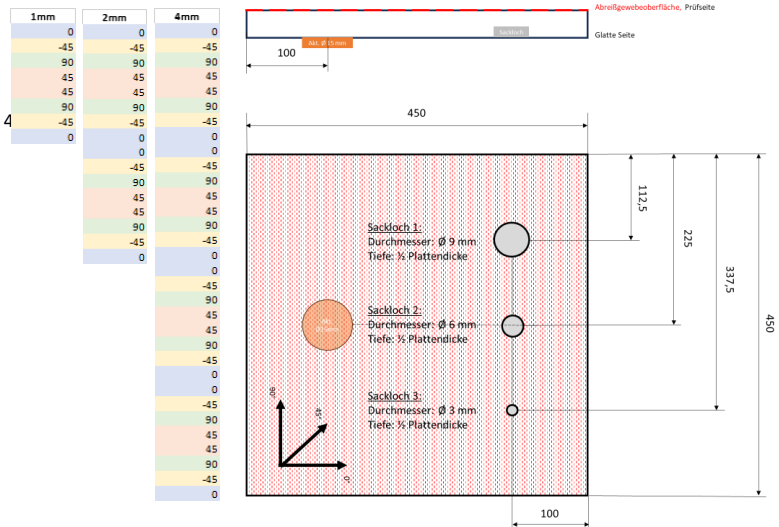


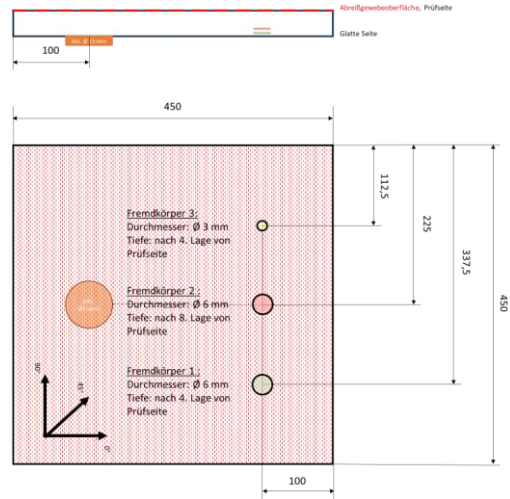
Abbildung 4: Probekörperdefinition für ebene Platten mit Fehlstellen in Form von Sacklochbohrungen

Referenzplatten mit Fremdkörpern



- Referenzplatte mit Fremdkörper
- Aktuatoren auf glatter Seite
- Verschiedene Soll-dicken (1,05 mm → 1 mm, 2,10 mm → 2 mm und 4,2 mm → 4 mm) und Laminataufbauten
- Folientyp 1 und Folientyp 2 als Fremdkörper

1mm	2mm	4mm
0	0	0
-45	-45	-45
90	90	90
-45	-45	-45
45	45	45
90	90	90
-45	-45	-45
0	0	0
0	0	0
-45	-45	-45
90	90	90
-45	-45	-45
45	45	45
90	90	90
-45	-45	-45
0	0	0
0	0	0
-45	-45	-45
90	90	90
-45	-45	-45
45	45	45
90	90	90
-45	-45	-45
0	0	0



6

PASSION FOR COMPOSITES

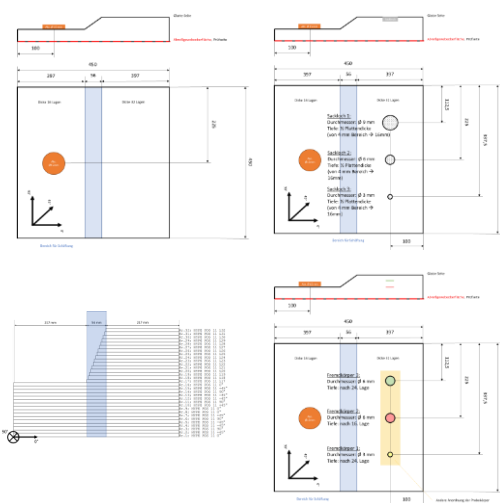
Abbildung 5: Probekörperdefinition für ebene Platten mit Fehlstellen in Form von Folien als Fremdkörper

Platten mit Dicksprung



- Platten mit Dicksprung sowie mit und ohne Fehlstellen
- Dicke auf der dünnen Seite 2,1 mm
- Dicke auf der dicken Seite 4,2 mm
- Aktuatoren auf glatter Seite

2mm	4mm
	0
	-45
	90
	-45
	-45
	90
	-45
	45
	90
	-45
	-45
	90
	-45
	45
0	0
45	45
90	90
-45	-45
-45	-45
90	90
0	0
0	0
45	45
90	90
-45	-45
-45	-45
90	90
45	45
0	0



7

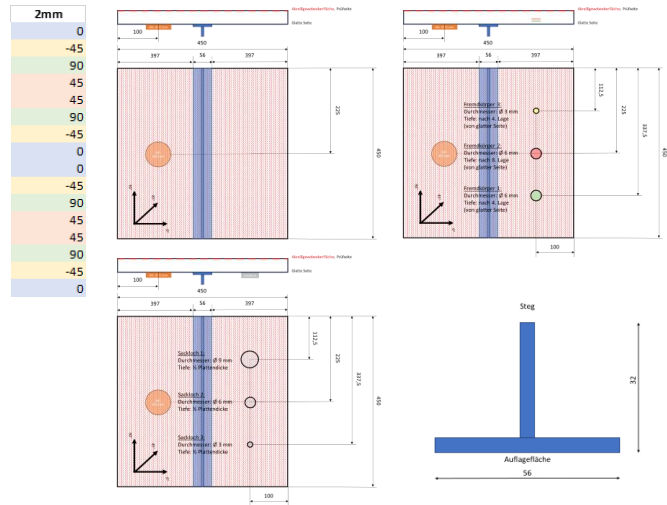
PASSION FOR COMPOSITES

Abbildung 6: Probekörperdefinition für Platten mit Dicksprung in den Konfigurationen unbeschädigt, mit Sacklochbohrungen und mit Fremdkörpern

Platten mit Stringer



- Platten mit Stringer sowie mit und ohne und Fehlstellen
- Alle Probekörper haben gleichen Lagenaufbau mit 2mm Dicke
- Aktuatoren auf glatter Seite
- Abmessungen Stringer:
 - Anzahl Lagen Steg: 26
 - Dicke Steg: 4,104 mm
 - Anzahl Lagen Auflagefläche: 13
 - Dicke Auflagefläche: 2,074 mm



8

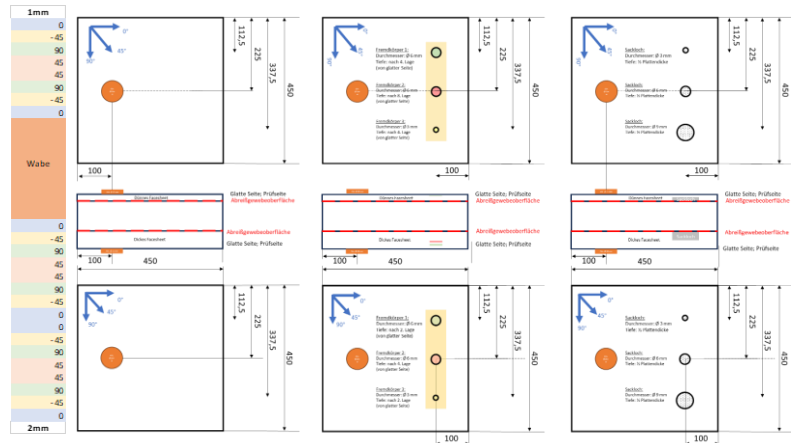
PASSION FOR COMPOSITES

Abbildung 7: Probekörperdefinition für Platten mit Stringer in den Konfigurationen unbeschädigt, mit Sacklochbohrungen und mit Fremdkörpern

Sandwichplatten ohne Fehlstellen / mit Fehlstellen / mit Fremdkörpern



- Sandwichplatten mit und ohne und Fehlstellen
- Fehlstellen sind fluchtend zueinander angeordnet
- Alle Probekörper haben ein Facesheet mit 1 mm dicke und ein Facesheet mit 2 mm dicke
- Aktuatoren auf glatter Seite
- Abreißgewebeoberfläche ist mit Wabenkern verklebt
- Wabenkern: Aramid- Papier



9

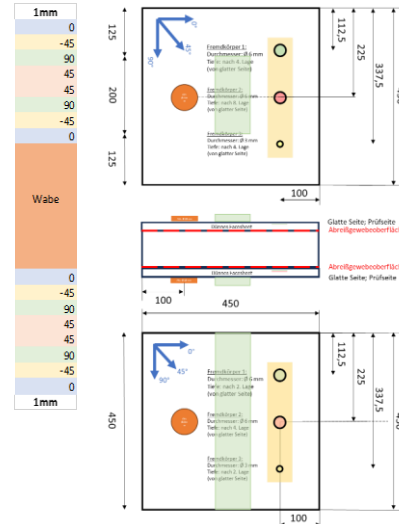
PASSION FOR COMPOSITES

Abbildung 8: Probekörperdefinition für Sandwichplatten in den Konfigurationen unbeschädigt, mit Sacklochbohrungen und mit Fremdkörpern

Sandwichplatte mit Doubler und Fremdkörper



- Platte mit Doubler und Fremdkörper
- Abweichender Lagenaufbau gegenüber bisherigen Probekörpern. Beide Seiten haben 1mm dicke Facesheets
- Aktuatoren auf glatter Seite
- Doubler:
 - Breite wie bei Stringer
 - Lagenaufbau: wie 1mm Facesheets
 - unterschiedliche Länge auf beiden Seiten



10

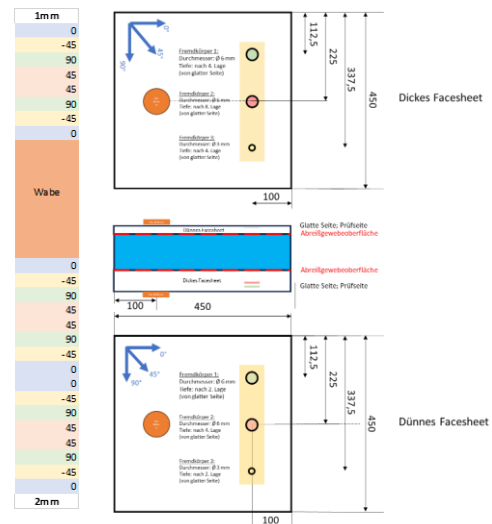
PASSION FOR COMPOSITES

Abbildung 9: Probekörperdefinition für Sandwichplatte mit applizierten Doublern und integrierten Fremdkörpern.

Sandwichplatte mit Aluminiumwabe und Fremdkörper



- Sandwichplatten mit und ohne und Fehlstellen
- Fehlstellen sind fluchtend zueinander angeordnet
- Ein Facesheet mit 1,05 mm dicke und ein Facesheet mit 2,1 mm dicke
- Aktuatoren auf glatter Seite
- Wabenkern: Aluminiumwabe



11

PASSION FOR COMPOSITES

Abbildung 10: Probekörperdefinition für Sandwichplatte Aluminiumwabe statt Aramidwabe und integrierten Fremdkörpern.



Abbildung 11: Gefertigte Referenzprobekörper ohne Fehlstellen (von links nach rechts: Probekörper mit den Laminatdicken 1 mm, 2 mm und 4 mm)



Abbildung 12: Gefertigte Probekörper mit integrierten mit Fehlstellen in Form von Sacklochbohrungen (von links nach rechts: Probekörper mit den Laminatdicken 1 mm, 2 mm und 4 mm)



Abbildung 13: Gefertigte Probekörper mit integrierten Fehlstellen in Form von eingelegten Schutzfolien. (von links nach rechts: Probekörper mit den Laminatdicken 1 mm, 2 mm, 2 mm und 4 mm; Grüner Rahmen: Probekörper mit Folientyp 1, blauer Rahmen: Probekörper mit Folientyp 2)

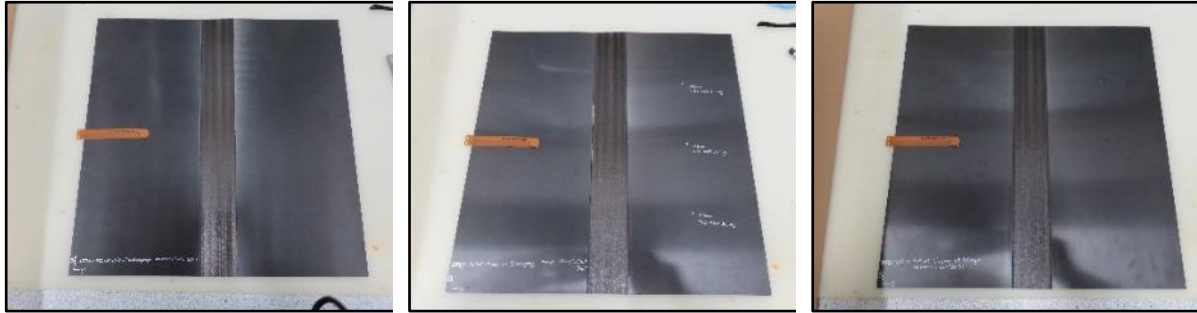


Abbildung 14: Gefertigte Probekörper mit Dickensprung (von links nach rechts: Probekörper ohne Fehlstellen, Probekörper mit Fehlstellen in Form von Sacklochbohrungen, Probekörper mit Fehlstellen in Form von Fremdkörpern)



Abbildung 15: Gefertigte Probekörper mit verklebtem Stringer (von links nach rechts: Probekörper ohne Fehlstellen, Probekörper mit Fehlstellen in Form von Sacklochbohrungen, Probekörper mit Fehlstellen in Form von Fremdkörpern)

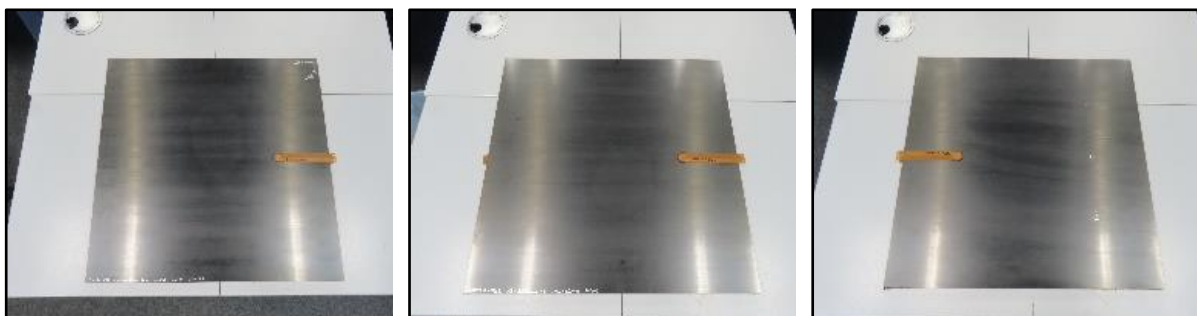


Abbildung 16: Gefertigte Probekörper in Sandwichbauweise (von links nach rechts: Probekörper ohne Fehlstellen, Probekörper mit Fehlstellen in Form von Sacklochbohrungen, Probekörper mit Fehlstellen in Form von Fremdkörpern)

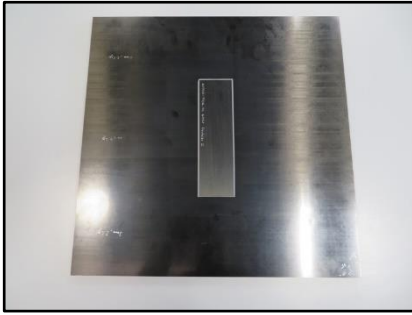


Abbildung 17: Gefertigte Sandwichplatte mit appliziertem Doubler und integrierten Fremdkörpern. Der Doubler auf der Rückseite des Probekörper verläuft über die gesamte Breite des Probekörpers.

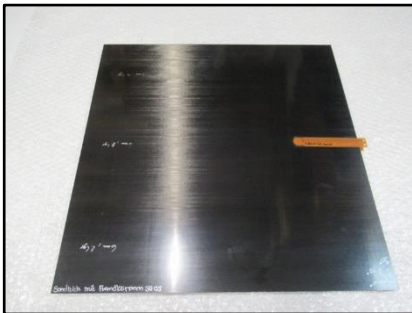


Abbildung 18: Gefertigte Sandwichplatte mit Aluminiumwabe und integrierten Fremdkörpern.

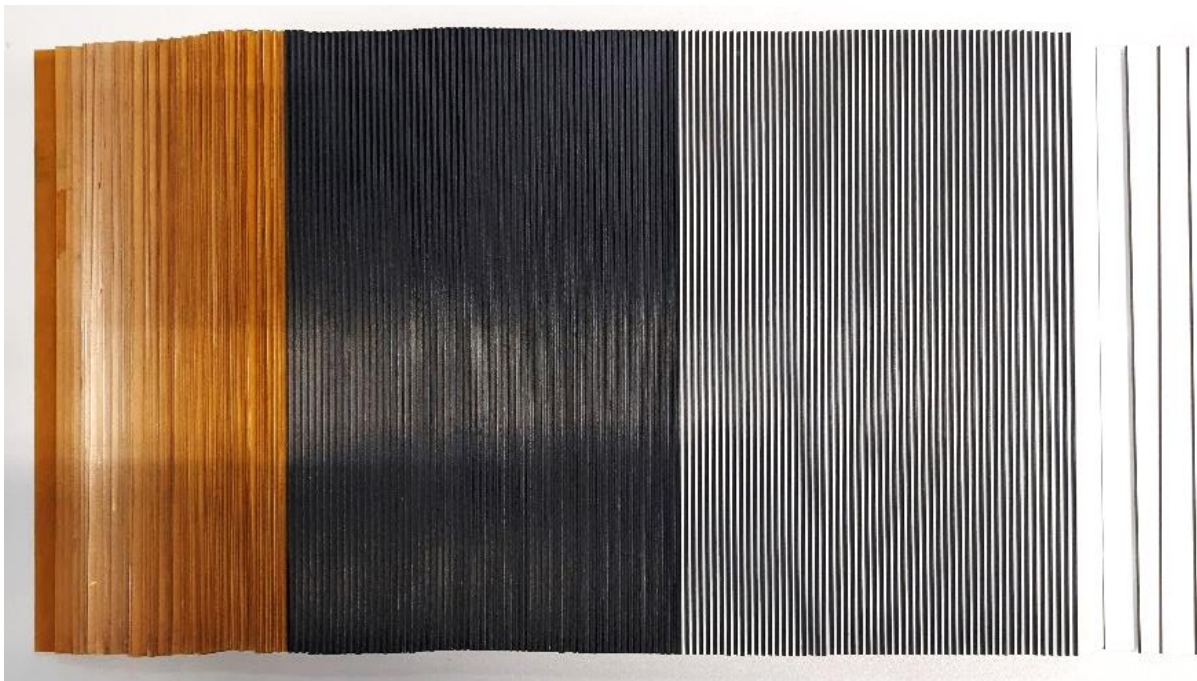


Abbildung 19: Probekörper für Rollenschälversuchskörper

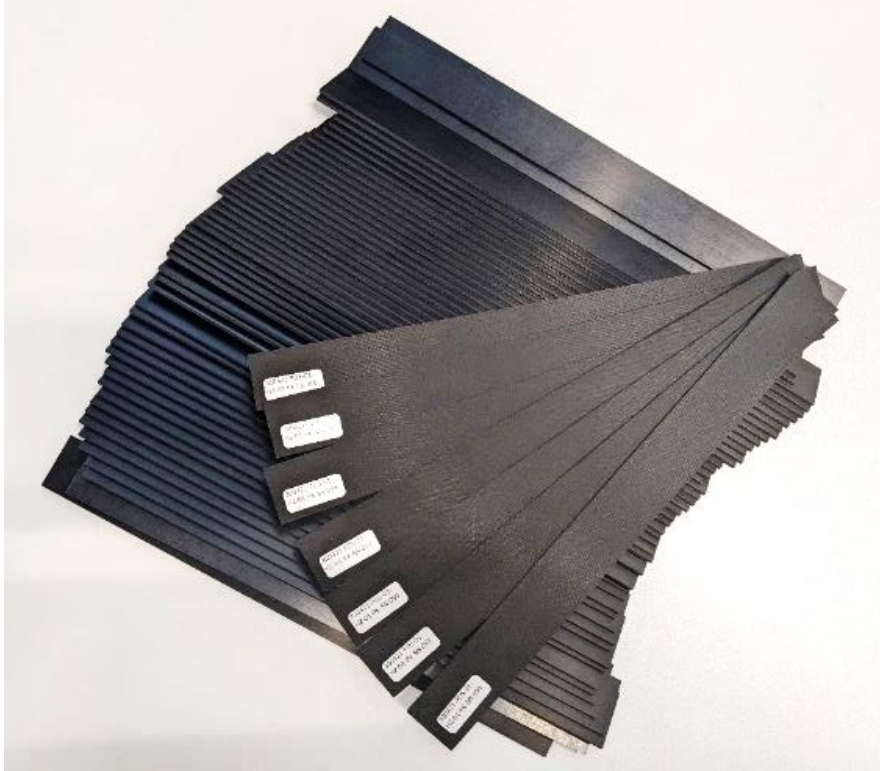


Abbildung 20: Probekörper für Klebstoffversuche mit unlackierter Oberfläche

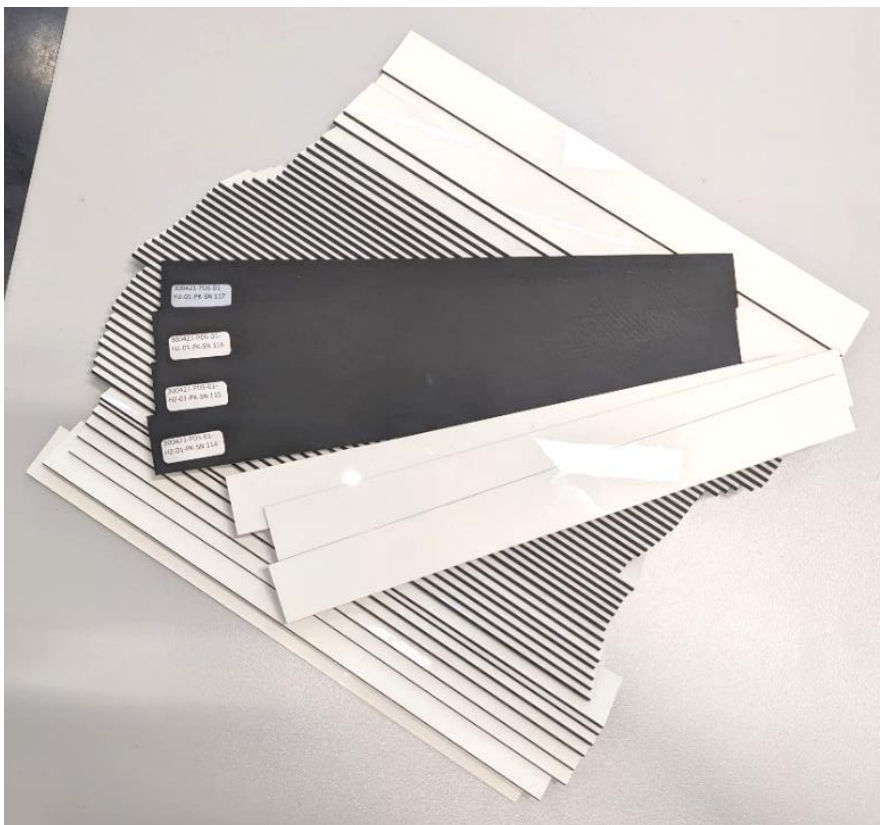


Abbildung 21: Probekörper für Klebstoffversuche mit lackierter Oberfläche



Abbildung 22: Probekörper aus Aktuatorssubstrat für Untersuchungen an flexiblen Strukturen mit verschiedenen Klebstoffen

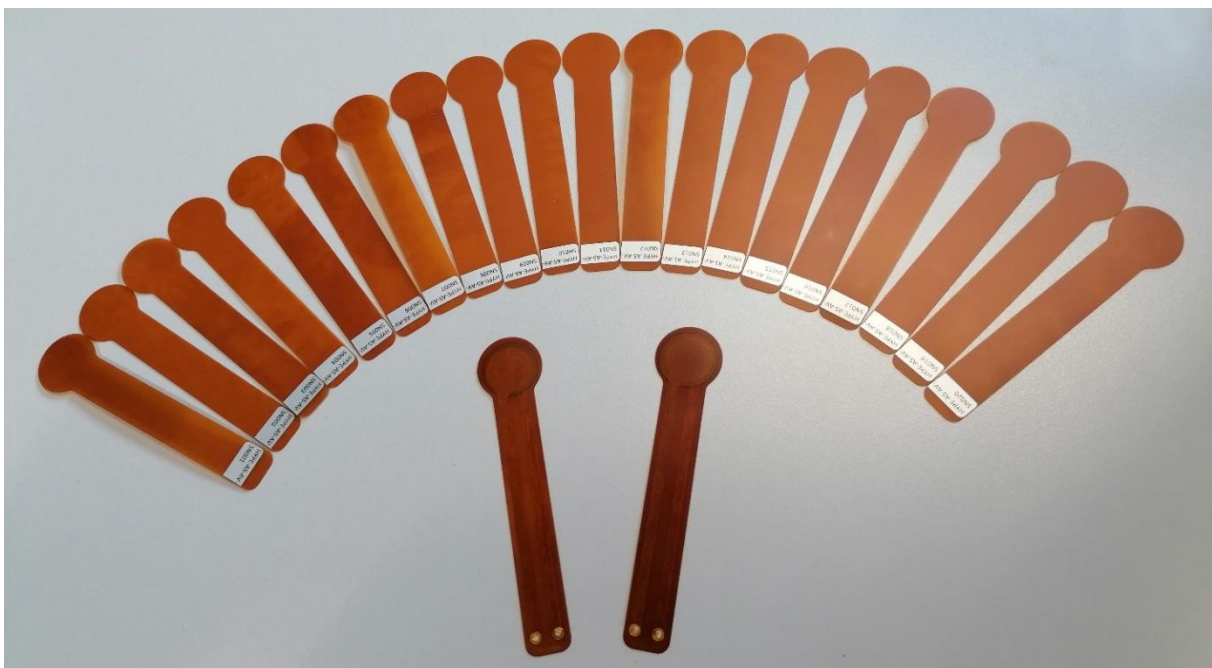



Abbildung 23: Probekörper in Form der später verwendeten Piezowandler ohne integrierter Keramik für Applikationsversuche durch das Fraunhofer IFAM.

	Abschlussbericht 300421 HYPE	Dok-Nr.: 300421-INV-TN T1u2 Datum: 27.02.2025 Verfasser: HARO/HUOL Version.: A
---	--	---

2.3 Entwicklung von hybriden Aktuatoren

Die wichtigsten Ergebnisse der Aktuatorentwicklung umfassen folgende Stichpunkte:

- Konzeptionierung, Konstruktion, Fertigung und Test eines phasengesteuerten Wandlerarrays mit gezielter Modenverstärkung in einem großen Frequenzbereich.
- Entwicklung einer optimierten Wandlerbauform basierend auf einer simulativen Parameterstudie zur effektiven Lambwellenanregung in den hergestellten Prüfkörpern

Im Projekt wurden piezoelektrische Aktuatoren mit dem Ziel entwickelt, Lambwellen bei mehreren Prüffrequenzen über eine große Bandbreite effektiv und homogen im Prüfkörper anzuregen. Die Materialzusammensetzung des Prüfkörpers sowie die Art und der Ort der identifizierenden Defekte haben dabei wesentlichen Einfluss auf die zu verwendenden Prüffrequenzen.

In der Konzeptionsphase (AP1.5 und AP1.6) wurde nach eingehender Literaturrecherche das Modell eines phasengesteuerten Wandlerarrays nach Kannajosyula [1] als geeignete Bauform identifiziert. Abbildung 24 zeigt das Array. Es besteht aus mehreren, konzentrisch angeordneten, ringförmigen Piezokeramiken. Maßgeblich für das Design sind Anzahl der Elemente ($m = 1, \dots, M$), der Abstand zwischen den Elementen p und die Breite der Ringelemente ΔR . Durch die von innen nach außen verlaufende, phasenversetzte, Anregung der Elemente besteht die Möglichkeit einzelne Wellenmoden gezielt zu verstärken, indem die durch die Elemente einzeln angeregten Wellen sich konstruktiv überlagern. Der rotationssymmetrische Charakter der Ringelemente führt in diesem Fall auf eine ungerichtete, omnidirektionale Ausbreitung des Wellenfelds.

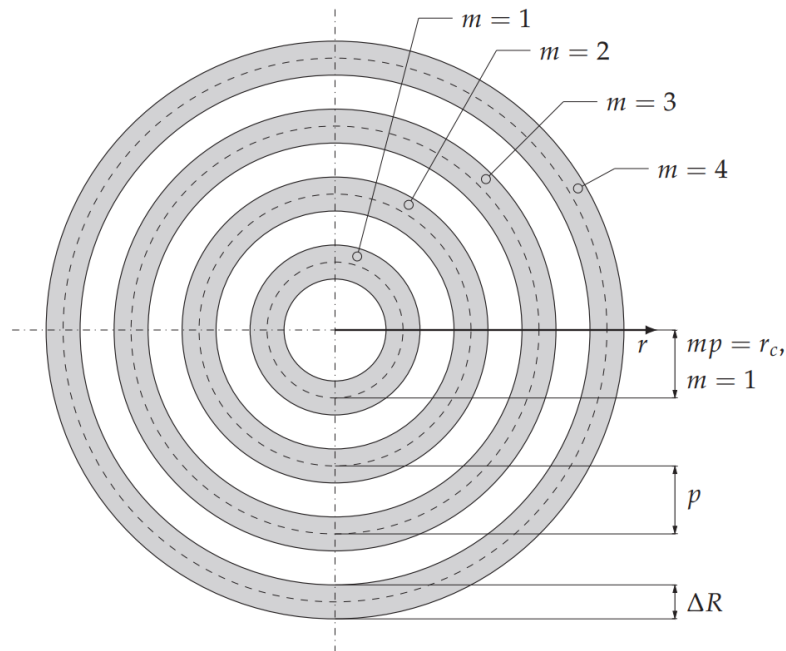


Abbildung 24: Modell des Ringarrays

Die fertigungstechnische Umsetzung erfolgte in AP2.7 unter Anwendung der DuraAct™ - Technologie als Piezokomposit, bei der eine spröde Piezokeramik durch Einbettung in eine duroplastische Matrix mechanisch vorgespannt und somit biegsam wird. Das Design und die produzierten Bauteile sind in Abbildung 25 zu sehen. Der Aktuator ist als Kammwandler ausgelegt, d.h. die Dünnschichtelektroden der Keramik sind einseitig strukturiert. Die wesentlichen Auslegungsparameter sind die Anzahl, die Breite und der Abstand der Elemente. Breite und Abstand sind durch die fertigungstechnische Umsetzbarkeit auf mindestens 0,5 mm begrenzt. Die Anzahl der Elemente wird durch das Messsystem bestimmt. Aufgrund der vergleichsweise hohen Anzahl an Keramikelementen wurde für eine bessere Ergonomie ein Flachleiter inklusive Steckverbinder integriert. Der Flachleiter dient gleichzeitig als Abzuglasche für die reversible Verklebung.

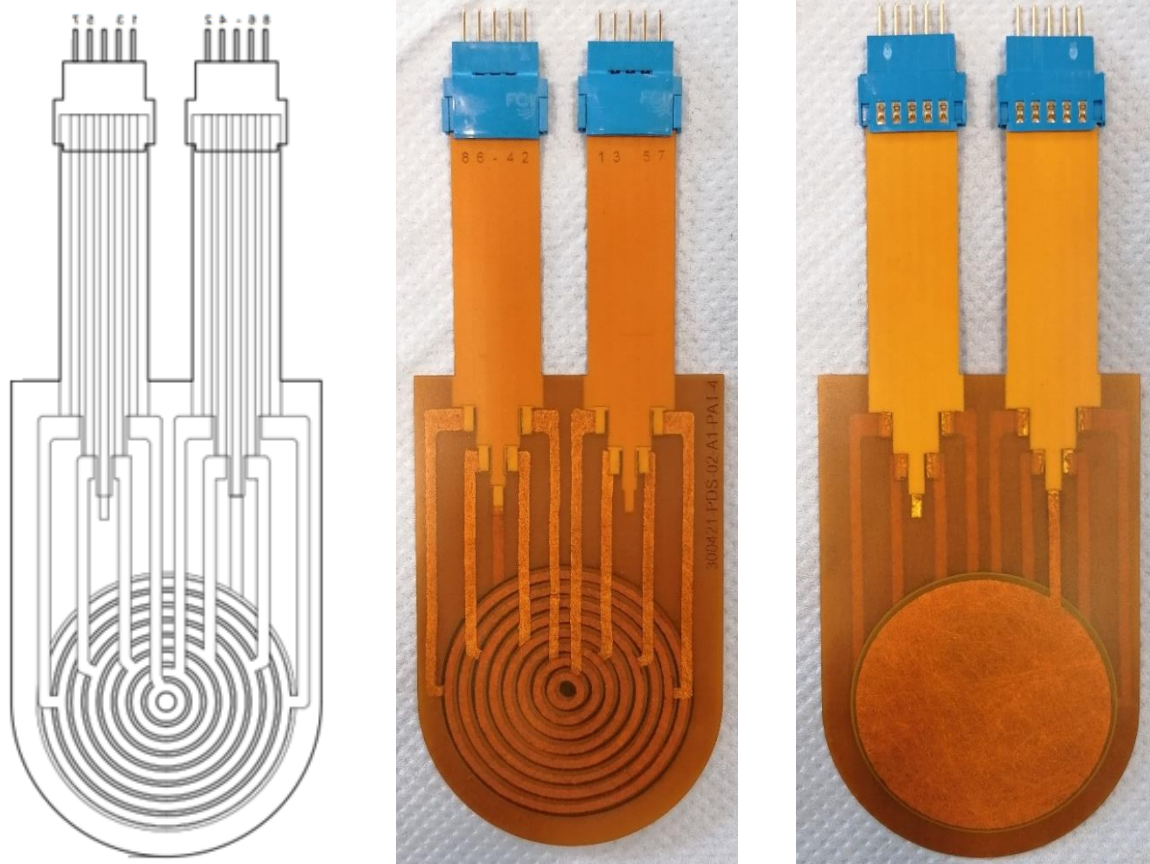


Abbildung 25: Aktuatordesign (l.), Aktuatorvorderseite (m.) und Aktuatorrückseite (r.)

Der Aktuator wurde auf dem schematisch in Abbildung 26 dargestellten Prüfstand bei Hillger NDT getestet. Ziel war die selektive Anregung der S₀ - Mode bei 300 kHz. Die erhaltenen Volumendatensätze wurden im Anschluss in Form von C-, B- und A - Bildern ausgewertet. Exemplarische Bilder der Auswertung sind in Abbildung 27 zu sehen. Eine Selektive Anregung der Moden konnte bisher nicht erreicht werden. Aus den Datensätzen der einzeln angeregten Elemente des Wandlerarrays lassen sich jedoch die individuellen Phasenversätze zwischen den angeregten Moden ermitteln. Diese bieten eine wichtige Grundlage für die gezielte, konstruktive Überlagerung einer bestimmten Mode. Eine Ansteuerung mit individuellem Phasenversatz zwischen den Elementen war mit der im Projekt vorhandenen Messtechnik nicht möglich. Das Potential für eine derartige Lösung ist jedoch vorhanden und soll in einem nachgelagerten Projekt verfolgt werden.

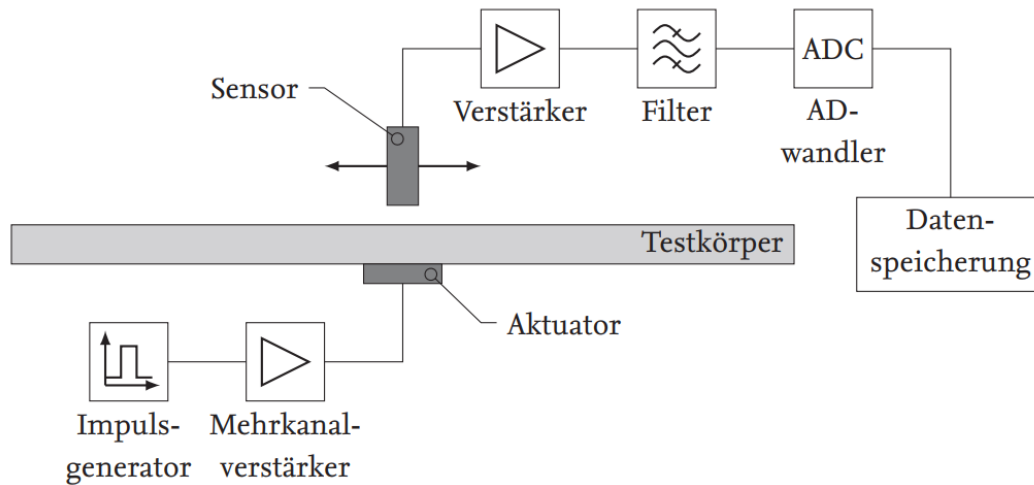


Abbildung 26: Messaufbau zum Testen des phasengesteuerten Wandlerarrays

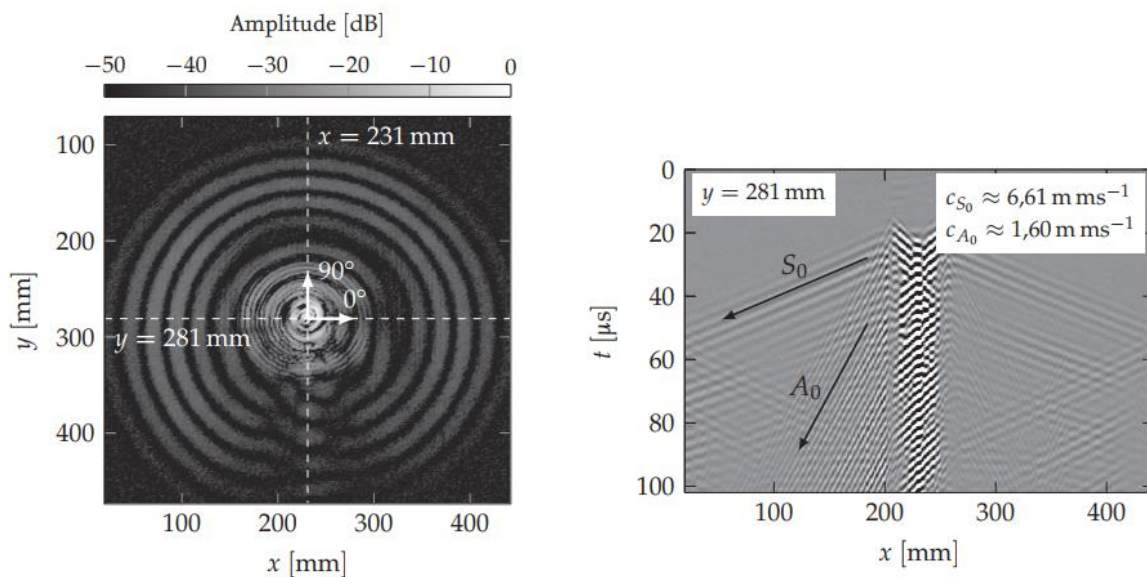



Abbildung 27: C-Bild zum Zeitpunkt $t = 50 \mu s$ (l.) und B-Bild (r.) eines Datensatzes

Im weiteren Verlauf des Projekts wurde ein alternativer Weg verfolgt, der auf der numerischen Simulation der Lambwellenausbreitung bei verschiedenen Prüffrequenzen basiert. Dazu führte das IFAM eine Parameterstudie durch, bei der sowohl der Prüfkörper als auch die Prüffrequenzen und der Keramikdurchmesser variiert wurde. Theoretisch kann gezeigt werden, dass die Amplitude der angeregten Moden mit dem Keramikdurchmesser korreliert [2]. Im Rahmen der Parameterstudie konnte jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen den angeregten Amplitudenhöhen ermittelt werden. Als Ergebnis ergab sich ein Keramikdurchmesser von 15 mm als beste Option für Sandwiches und monolithische Bauteile.

	Abschlussbericht 300421 HYPE	Dok-Nr.: 300421-INV-TN T1u2 Datum: 27.02.2025 Verfasser: HARO/HUOL Version.: A
---	--	---

Auf Grundlage der Ergebnisse der Parameterstudie wurde ein neuer Wandler konstruiert. Hierbei wurde zusätzlich noch die Randbedingung einer Abzuglasche berücksichtigt, die für die vom IFAM entwickelte reversible Verklebung mittels Applikators notwendig ist. Das Design der Neukonstruktion ist in Abbildung 28 dargestellt.

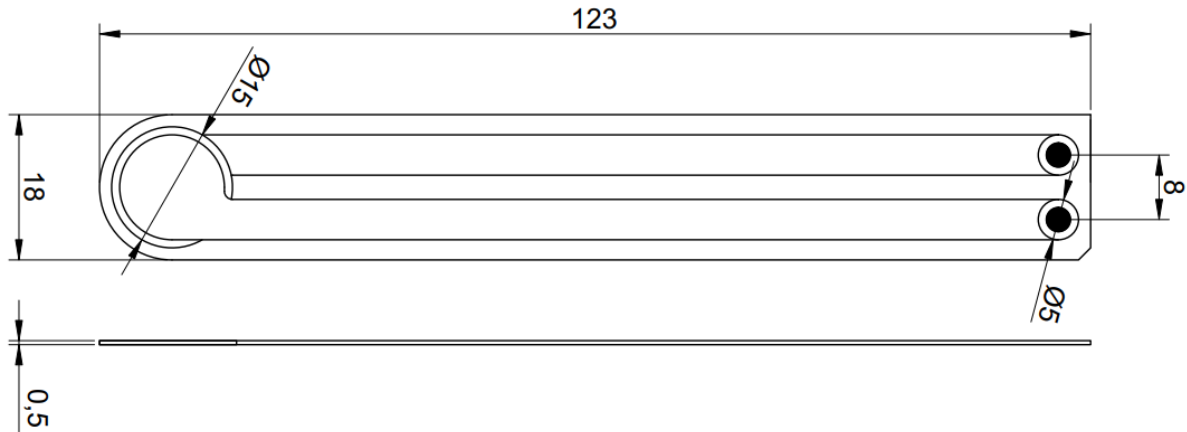


Abbildung 28: Neues Wandlerdesign

Zur Integration der Abzuglasche wurden die Leiter zur elektrischen Kontaktierung der Dünnschichtelektroden auf der Piezokeramik verlängert, um ein integrales Design zu ermöglichen. Als elektrische Anschlusspunkte wurden Löt pads gewählt. Die scheibenförmige Keramik weist einen Durchmesser von 15 mm und eine Dicke von 0,2 mm auf. Als Keramikwerkstoff wurde PIC255 verwendet. Insgesamt wurde ein Batch von 40 Wandler hergestellt, mit denen zum einen die Probekörper instrumentiert wurden und zum anderen Applikationsversuche beim IFAM durchgeführt wurden. Einer der gefertigten Wandler ist in Abbildung 29 gezeigt.



Abbildung 29: Piezoelektrischer Flächenwandler mit verlängerten Anschlussleitungen, Abzuglasche und 15 mm Keramikdurchmesser

2.4 Expertentool

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde mehrere Module des Expertentools, das als Assistenzsystem für das Prüfpersonal bei der Auswertung der Ultraschall- und Simulationsdaten dient, von Grund auf entwickelt. In der frühesten Entwicklungsphase (AP 1.4 und AP 1.6) wurden die Module und ihre Funktionen zunächst in mehreren Workshops zusammen mit dem Konsortium konzeptioniert. Exemplarisch zeigt Abbildung 30 ein Ergebnis der Workshops.

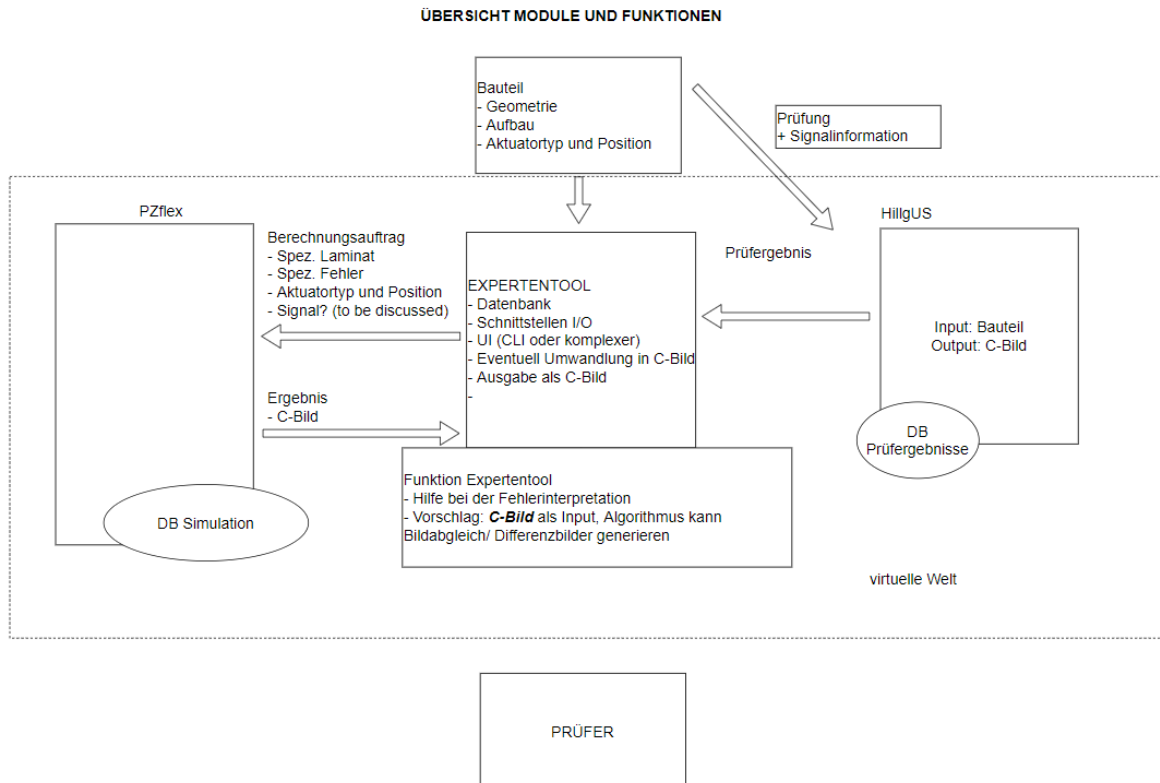


Abbildung 30: Grafische Darstellung der für das Experten-Tool geplanten Module und Funktionen

In der darauffolgenden Planungsphase (AP2.5) wurden die Werkzeuge zur Umsetzung der geplanten Module festgelegt. Im Zuge dessen wurde dem Expertentool die Model-View-Controller (MVC) Softwarearchitektur zu Grunde gelegt. Die Programmierung erfolgte in der Programmiersprache Python 3 mit einem objektorientierten Programmieransatz. Zusätzlich wurden mehrere Softwarebibliotheken verwendet, darunter PySide6 und PyQtGrpah für das Frontend sowie Xarray, SciPy, Numpy, Pandas und SQLite für das Backend. Die Umsetzung der grafischen Benutzeroberfläche durch PySide6 und PyQtGraph erfolgte nach einem Versuch, die Benutzeroberfläche als Webapp zu programmieren. Dieser Ansatz musste aufgrund der anfallenden Datenmenge und des daraus resultierenden Performanceverlusts verworfen werden. Abbildung 31 zeigt schematisch den Aufbau der MVC-Architektur und die Zugehörigkeit der verwendeten Softwarebibliotheken.

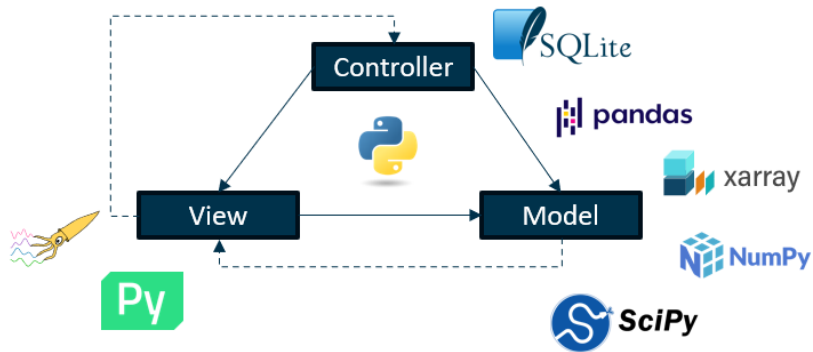


Abbildung 31: Schematische Darstellung der Model-View-Controller Softwarearchitektur und die Einordnung der verwendeten Softwarebibliotheken

Nach der Konzept- und Planungsphase wurden in AP3.2 und AP3.3 drei Module des Expertentools umgesetzt.

2.4.1 Datenbankmodul

Beim Datenbankmodul in Abbildung 32 handelt es sich um eine Visualisierung einer SQL-Datenbank, die zur Verwaltung der Datensätze aus der Ultraschallmessung und der Simulation dient. Aus dem Modul können die Datensätze ausgewählt und für die weitere Bearbeitung in weitere Module des Expertentools geladen werden. Das Anlegen von Metadaten, wie Bauteilbezeichnung, Defekttyp, Geometrie und Material erlaubt die einfachere Zuordnung der Probekörper und erlaubt perspektivisch die Filterung der Datensätze nach den individuellen Bedürfnissen des Prüfers.

ID	Serial number	Description	Type	Defect	Width	Length	Thickness	Number of Layers
1	300421-PDS-04 SN06	Platte ohne Anomalie	Laminate		450	450	1	8
2	300421-PDS-05 SN08	Platte ohne Anomalie	Laminate		450	450	2	16
3	300421-PDS-06 SN04	Platte ohne Anomalie	Laminate		450	450	4	32
4	300421-PDS-04 SN07	Platte mit Sacklochbohrungen	Laminate	Blind Hole	450	450	1	8
5	300421-PDS-05 SN09	Platte mit Sacklochbohrungen	Laminate	Blind Hole	450	450	2	16
6	300421-PDS-06 SN05	Platte mit Sacklochbohrungen	Laminate	Blind Hole	450	450	4	32
7	300421-PDS-07 SN03	Platte mit Fremdkörper	Laminate	Foreign Body	450	450	1	8
8	300421-PDS-08 SN01	Platte mit Fremdkörper	Laminate	Foreign Body	450	450	2	16
9	300421-PDS-08 SN02	Platte mit Fremdkörper	Laminate	Foreign Body	450	450	2	16
10	300421-PDS-09 SN01	Platte mit Fremdkörper	Laminate	Foreign Body	450	450	4	32
11	300421-PDS-10 SN01	Platte mit Dickersprung	Laminate		450	450	2/4	16
12	300421-PDS-10 SN02	Platte mit Dickersprung und Sacklochbohrung	Laminate	Blind Hole	450	450	2/4	16
13	300421-PDS-11 SN01	Platte mit Dickersprung und Fremdkörper	Laminate	Foreign Body	450	450	2/4	16
14	300421-PDS-05 SN10	Platte mit Stringer	Laminate		450	450	2	16
15	300421-PDS-05 SN11	Platte mit Stringer und Sacklochbohrungen	Laminate	Blind Hole	450	450	2	16
16	300421-PDS-08 SN03	Platte mit Stringer und Fremdkörper	Laminate	Foreign Body	450	450	2	16
17	300421-PDS-04 SN08	Platte ohne Anomalie (Facesheet)	Laminate		450	450	1	8
18	300421-PDS-05 SN12	Platte ohne Anomalie (Facesheet)	Laminate		450	450	2	16
19	300421-PDS-12 SN01	Sandwich ohne Fehler	Sandwich		450	450	14	
20	300421-PDS-04 SN09	Platte mit Sacklochbohrung (Facesheet)	Laminate	Blind Hole	450	450	1	8
21	300421-PDS-05 SN13	Platte mit Sacklochbohrung (Facesheet)	Laminate	Blind Hole	450	450	2	16
22	300421-PDS-12 SN01	Sandwich mit Bohrung	Sandwich	Blind Hole	450	450	14	
23	300421-PDS-08 SN04	Platte mit Fremdkörper (Facesheet)	Laminate	Foreign Body	450	450	2	16
24	300421-PDS-07 SN04	Platte mit Fremdkörper (Facesheet)	Laminate	Foreign Body	450	450	1	8
25	300421-PDS-12 SN01	Sandwichplatten mit Fremdkörper	Sandwich	Foreign Body	450	450	14	
26	300421-PDS-03-A-PK-SN01_1	Element PAT	Laminate		450	450	2	16
27	300421-PDS-03-A-PK-SN01_2	Element PAT	Laminate		450	450	2	16
28	300421-PDS-03-A-PK-SN01_3	Element PAT	Laminate		450	450	2	16

Abbildung 32: Datenbankmodul

2.4.2 Volumenscanmodul

Das Volumenscanmodul ermöglicht eine intuitive Sichtung der komplexen Volumendatensätze. Die Datensätze werden durch das zweidimensionale Abrastern des Testkörpers aufgenommen, indem der Prüfkopf äquidistante Punkte auf der Prüffläche anfährt und für eine definierte Zeitspanne ein Signal aufnimmt. Die Signale werden anschließend in einen dreidimensionalen Datenwürfel überführt. Vergleiche hier Abbildung 33. Zwei der Dimensionen geben die Ortskoordinaten (x, y) der Prüffläche wieder. Die Dritte Dimension bildet die Prüfzeit t ab. Je nachdem welche der drei Koordinaten (x, y, t) konstant gehalten wird, ergeben sich A-, B- und C-Bilder, die Rückschlüsse auf den Zustand des geprüften Bauteils zulassen.

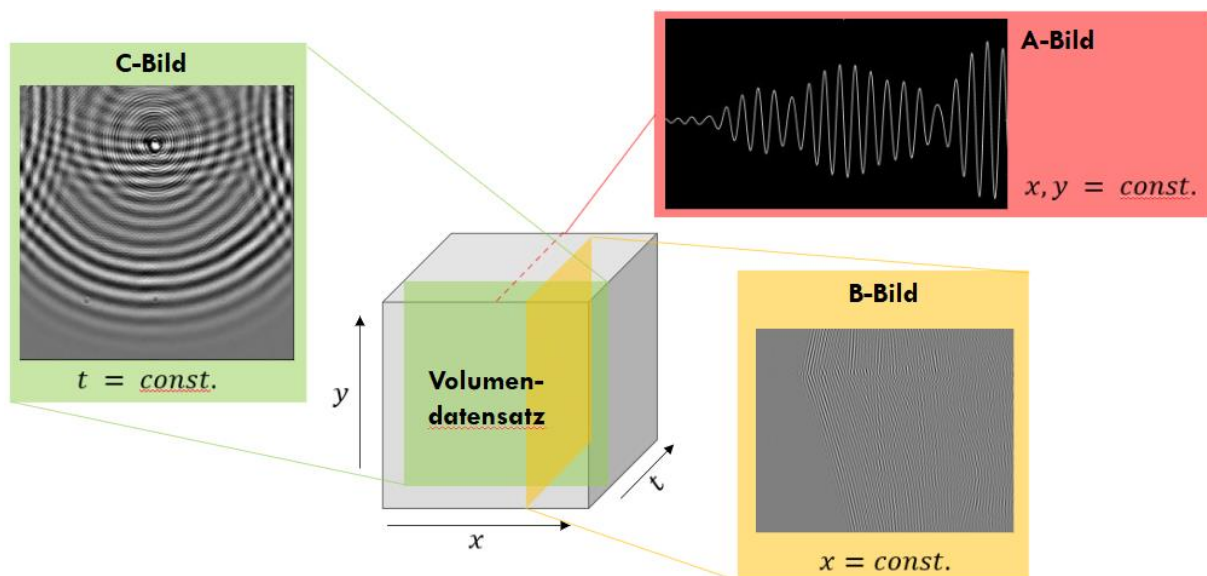


Abbildung 33: Datenwürfel eines Volumenscandatensatzes

Das Volumenscanmodul ermöglicht die Sichtung der Datensätze in Form dieser Bilder durch entsprechende Datenschnitte, die durch Slider- und Slicerelemente gesetzt werden. Abbildung 34 zeigt das Modul. Im oberen Bild wird das C-Bild für einen Zeitpunkt t gezeigt. Durch Verschieben des Sliders kann der Zeitpunkt angepasst werden. Im C-Bild wird dieser Umstand durch die Ausbreitung der Wellenfronten visualisiert. Die Slicer 1 und 2 ermöglichen einen horizontalen und vertikalen Datenschnitt, wodurch die B-Bilder in der Mitte des Moduls entstehen. Hieraus können beispielsweise Rückschlüsse auf die Geschwindigkeiten, der sich ausbreitenden Wellen geschlossen werden. Die Slicer 3 und 4 führen wiederum auf die A-Bilder im unteren Bereich der Abbildung und geben die Zeitsignale eines einzelnen Punktes des Prüfrasters wieder. Die intuitive Erkundung des Datensatzes wird neben den Auswählelementen durch Quality of Life - Features wie interaktive Graphen, Skalierung und Änderung der Colormaps sowie Werteverteilungen in Histogrammen unterstützt. Nichtsdestotrotz sind die zu sichtenden Datensätze komplex. Daher wurde im Rahmen von AP3.2 von HNDT ein Algorithmus entwickelt, der den Datensatz von einem dreidimensionalen Volumenscan auf einen

zweidimensionalen zeitunabhängigen C - Scan (LW) komprimiert. Dieser C - Scan (LW) kann anschließend einfach zur Auswertung von Defekten im Prüfkörper verwendet werden.

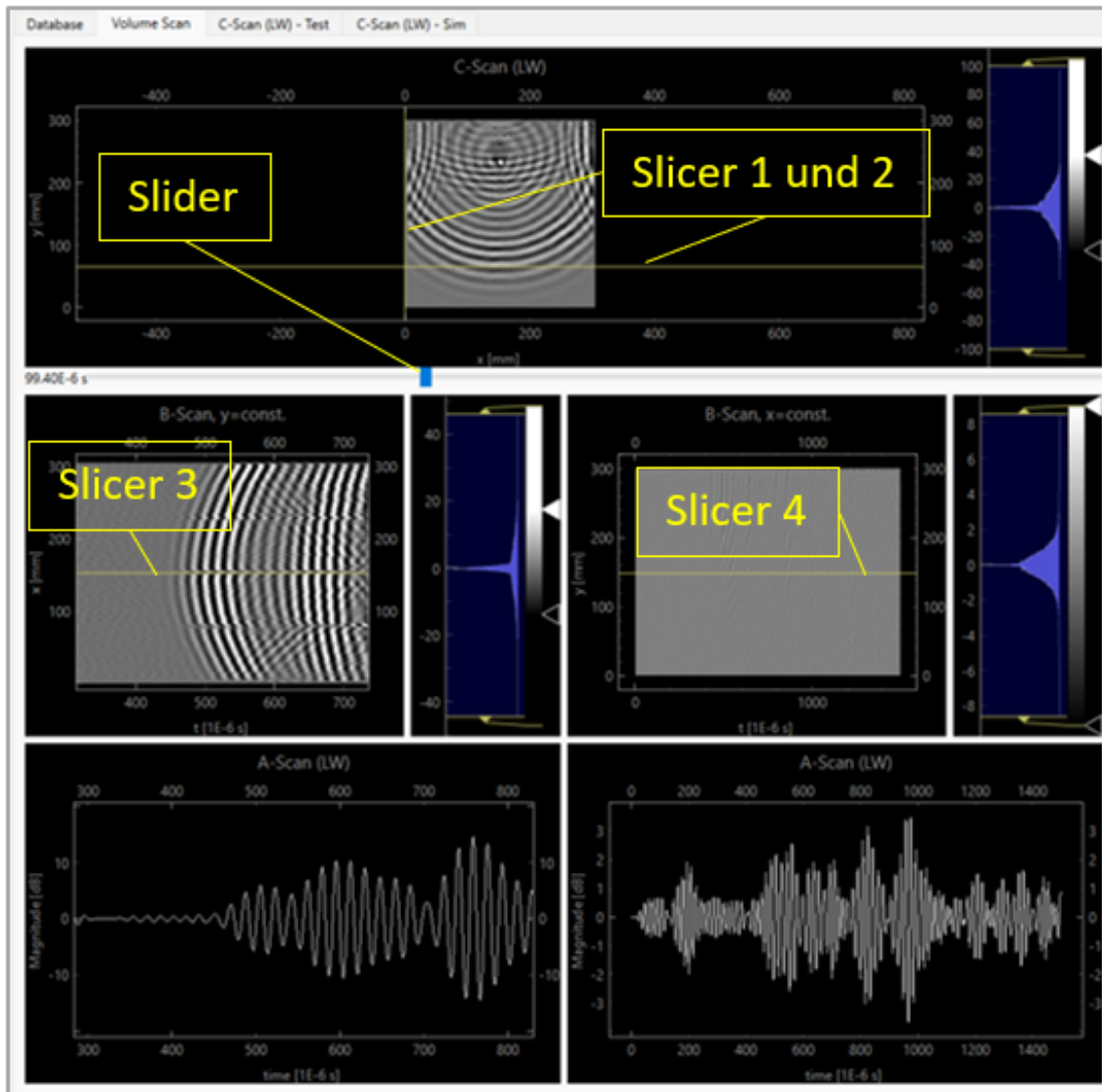


Abbildung 34: Volumenscanmodul

2.4.3 C-Scan (LW) Modul

Das C - Scan (LW) Modul, vergleiche hierzu Abbildung 35, ermöglicht die Auswertung der Prüfkörper auf Defekte. Dazu werden zunächst zwei Auswahlelemente auf den C - Scan (LW) links in der Abbildung angewendet. Zum einen ein Slicer längs dessen Verlauf die zugehörige Echodynamik rechts unten in der Abbildung ausgegeben wird. Zum anderen eine Region – of - Interest (ROI) in Form eines rechteckigen Auswahlbereichs. Die Vergrößerung des Bereichs wird oben rechts in der Abbildung dargestellt. In der Echodynamik kann nun durch einen weiteren Slicer ein Schwellwert gesetzt werden. Datenpixel der ROI, die oberhalb dieses Schwellwerts liegen werden rot eingefärbt und als Fehler detektiert. Eine Umrechnung der Pixel auf die Probekörperdimensionen erlaubt eine Quantifizierung der Fehlergröße. Momentan erfolgt

die Auswertung der Fehler noch manuell. Für ein weiterführendes Projekt wäre die automatisierte Auswertung und Charakterisierung der Defekte denkbar.

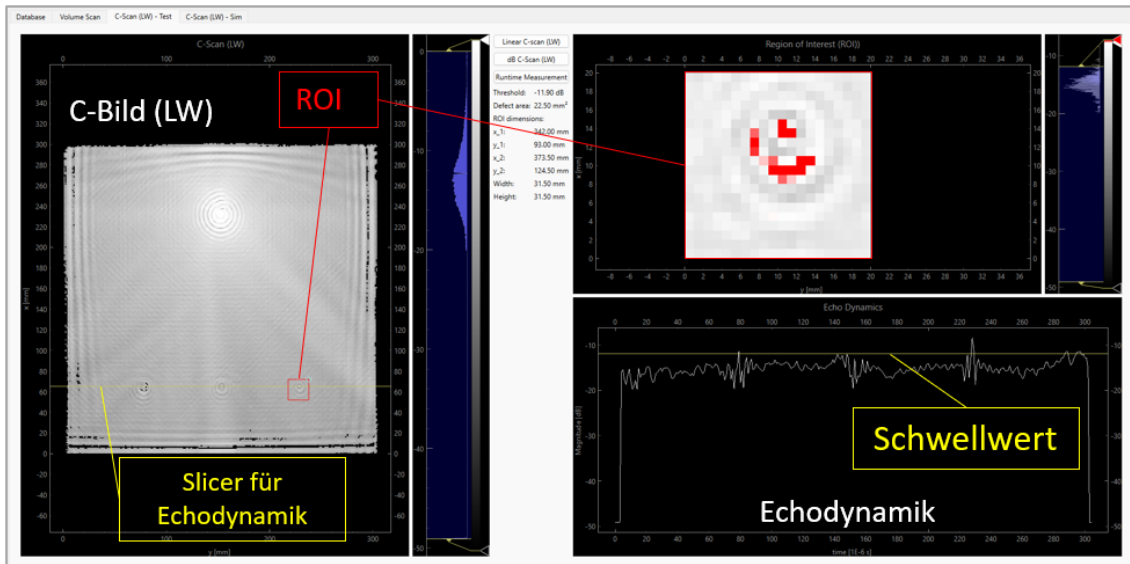



Abbildung 35: C-Scan (LW) Modul

2.5 Verifikation und Demonstration

Zum Abschluss des Projektes wurde die Funktionsweise des gesamten Prüfprozesses zusammen mit den Projektpartnern aufgearbeitet. Um die Darstellung der Ergebnisse bzw. die Demonstration auch außerhalb des Projektes präsentieren zu können, wurde dafür eine Demonstration in Form einer Präsentation erarbeitet. Die Präsentation enthält alle wesentlichen Projektinhalte und beschreibt im Wesentlichen den Prozessablauf zur Prüfung von Faserverbundstrukturen mittels Piezowandlern zur Lambwellenanregung in Kombination mit einem luftgekoppelten Ultraschallsensor.

Die Demonstration gliedert sich in mehrere Abschnitte und umfasst insgesamt 22 Seiten. Nach der Vorstellung der Motivation und Zielstellung folgt die Beschreibung der Probekörper und des Wirkprinzips der Lambwellenanregung. Anschließend werden der Applikator, die Simulationen zur Prozessoptimierung bzw. zur Bestimmung der Parameter zur Lambwellenanregung und das Experten - Tool zur Prüfdatenanalyse erläutert. Anschließend werden die übergeordneten Projektergebnisse zusammengefasst.

Zunächst werden die verwendeten Testkörper vorgestellt. Diese weisen steigende geometrische Komplexität und unterschiedliche Fehlstellen auf, darunter Sacklochbohrungen, Fremdkörper, Dickenübergänge, Stringer und Sandwichtaufbauten. Diese Variation ermöglicht die umfassende Validierung der Prüftechnologie unter praxisnahen Bedingungen.

	Abschlussbericht 300421 HYPE	Dok-Nr.: 300421-INV-TN T1u2 Datum: 27.02.2025 Verfasser: HARO/HUOL Version.: A
---	--	---

Anschließend wird im Abschnitt "*Applikator – Aufbau, Funktion und Fügeprozess*" die temporäre Ankopplung des Piezowandlers beschrieben. Der Applikator fixiert den Wandler mithilfe von Saugnäpfen und härtet den Klebstoff mit einer integrierten Heizmatte ressourcenarm aus.

Danach wird die Funktion des eingesetzten optimierten Piezowandlers erläutert. Dieser regt Lambwellen gezielt an, indem er ein Sinusburst-Signal mit einer Frequenz unter 1 MHz ein-koppelt. Die Wellen breiten sich aus und verändern sich an Fehlstellen durch Modenkonversion. Diese Veränderungen werden mit luftgekoppeltem Ultraschall berührungslos erfasst, um Defekte sichtbar zu machen.

Anschließend wird die Simulation zur Ermittlung der Prüfparameter beschrieben. Mittels der Simulation werden die optimalen Anregungsfrequenzen bestimmt. Der Abgleich experimenteller Ergebnisse mit numerischen Berechnungen verbessert die Detektionssicherheit und ermöglicht eine gezieltere Fehleranalyse.


Nach der anschließenden Versuchsdurchführung folgt die Auswertung der Ergebnisse mittels A-, B-, C- und zeitunabhängigen C - Bildern für die Messwerte und den Simulationsdaten im Expertentool. Eine Datenbank verwaltet Mess- und Simulationsdaten und gleicht experimentelle Befunde mit bekannten Defektmustern ab.

Zum Abschluss wird das Entfernen des Piezowandlers nach der Prüfung erläutert. Der Wandler wird durch eine schälende Belastung im 45°-Winkel von der Oberfläche gelöst. Verbleibende Klebstoffreste können mit einer Kunststoffklinge entfernt werden, ohne das CFK-Substrat zu beschädigen.

Die Demonstration bestätigt die Umsetzung der Prüftechnologie. Der Applikator ermöglicht eine zuverlässige, rückstandsfreie temporäre Ankopplung, Simulationen optimieren den Prüfprozess und das Experten-Tool erleichtert die Datenauswertung. Die Lambwellenanregung erweist sich als geeignetes Verfahren zur Defekterkennung in komplexen Faserverbundstrukturen.

Quellen

- [1] H. L. C. J. & R. J. L. Kannajosyula, „Analysis of annular phased array transducers for ultrasonic guided wave mode control,“ *Smart Materials & Structures*, Bd. 22, Nr. 8, p. 085019, jul 2013.
- [2] D. Schmidt, *Modenselektive Übertragung von Lambwellen in Faserverbundstrukturen*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., 2014.
- [3] P. Z. J. N. V. v. G. M. W. J. D. A. Römmeler, „Air coupled ultrasonic inspection with Lamb waves in plates showing mode conversion,“ *Ultrasonics*, 2019.

	Abschlussbericht 300421 HYPE	Dok-Nr.: 300421-INV-TN T1u2 Datum: 27.02.2025 Verfasser: HARO/HUOL Version.: A
---	--	---

3 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Den größten Umfang haben die Personalkosten eingenommen. Fremdleistungen sowie Material- und Reisekosten stellten in diesem Vorhaben den geringeren Anteil dar.


4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die ursprüngliche Notwendigkeit der Förderung wurde mit einem hohen technologischen Risiko begründet, insbesondere im Bereich der Hybridaktuatoren und der Applikationsmethodik. Die durchgeführten Arbeiten haben gezeigt, dass die selektive Modenanregung technologisch anspruchsvoller ist als zunächst angenommen. Trotz vielversprechender Ansätze konnte eine reine S0-Modenanregung im Rahmen des Projekts nicht erreicht werden, da zusätzlich die unerwünschte A0-Mode angeregt wurde. Dies bestätigte die im Antrag formulierte Herausforderung und Notwendigkeit zur Förderung des Forschungsprojektes. Für den hybriden Wandler ist ein weiteres Forschungsprojekt zur Erhöhung der technologischen Reife erforderlich. Die Initiierung des Projekts FrADura verfolgt genau dieses Ziel. Damit bleibt die ursprüngliche Einschätzung des technologischen Risikos und die Notwendigkeit zur Förderung gültig.

Während der Projektlaufzeit wurden vielversprechende Ergebnisse bei der Applikationsmethodik erzielt. Erste Tests zeigen, dass das System grundsätzlich für den industriellen Einsatz geeignet ist, auch wenn eine wirtschaftliche Bewertung für den Einsatz bei INVENT noch aussteht. Die Verwertungsrechte liegen beim Fraunhofer IFAM, sodass eine weitere Entwicklung nur in Zusammenarbeit mit diesem Partner erfolgen kann. Im Gegensatz zum hybriden Aktuator erscheint hier ein kurzfristiges Folgeprojekt mit einer Laufzeit von etwa sechs Monaten als realistisch, um offene technische und wirtschaftliche Fragen zu klären. Die ursprüngliche Annahme, dass die Applikationsmethode einen hohen Entwicklungsaufwand erfordert, wurde damit bestätigt, jedoch mit der positiven Erkenntnis, dass eine marktfähige Lösung mittelfristig möglich ist.

Das Experten-Tool ist für die simulationsgestützte Auswertung von Ultraschallbefunden vorgesehen. Während des Projekts wurde jedoch deutlich, dass INVENT die Software nicht professionell entwickeln und vermarkten kann. Ohne die Förderung wäre die Entwicklung des Tools mit den derzeitigen Funktionen nicht möglich gewesen, da die Integration der verschiedenen Subsysteme hohe Aufwände erforderte. Die erarbeiteten Lösungen schaffen nun die Basis für eine mögliche Weiterentwicklung durch einen spezialisierten Partner.

Die Notwendigkeit einer Förderung für die initiale Entwicklungsphase hat sich somit klar bestätigt, da ohne diese Unterstützung wesentliche technologische Erkenntnisse nicht hätten erarbeitet werden können.

	Abschlussbericht 300421 HYPE	Dok-Nr.: 300421-INV-TN T1u2 Datum: 27.02.2025 Verfasser: HARO/HUOL Version.: A
---	--	---

5 Nutzen, Verwertbarkeit (fortgeschriebener Verwertungsplan)

Während der Bearbeitung des Projektes HYPE haben sich die Verwertung des Projektes gegenüber der Teilvorhabenbeschreibung bzw. den Zwischenberichten angepasst. Die aktuelle Verwertbarkeit wird in den folgenden Abschnitten beschrieben. Entsprechend der Teilvorhabenbeschreibung wird dabei zwischen 4 Technologien unterschieden, die hier nochmal 1 zu 1 aufgeführt sind.

Ergebnis 1: Entwicklung einer Bauweise für hybride Aktuatoren. Die hybriden Aktuatoren ermöglichen selektiv optimierte Emissionen spezifischer Frequenzen, was mit bisherigen Aktuatoren nicht möglich ist.

Ergebnis 2: Entwicklung eines reproduzierbaren reversiblen Anbindungsverfahrens für Piezowandler, das automatisierbar ist. Bisher erfolgt die Ankopplung in der Regel mittels struktureller Verklebung, d.h. der Wandler ist unlösbar mit dem Prüfobjekt verbunden und muss dort dauerhaft verbleiben. Lösbare Verklebungen erreichen nicht die nötige Steifigkeit für eine effiziente Schwingungsübertragung.

Ergebnis 3: Expertentool, das es erlaubt, verschiedene Softwareprodukte miteinander zu vernetzen und einen Mehrwert bei der Datenauswertung zu generieren

Ergebnis 4: Prüfsystem, das es erlaubt, effizient, berührungslos und kontaminationsfrei (d. h. ohne Koppelmedium bzw. mit Luftkopplung) komplexe Strukturen automatisiert zu prüfen.


5.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Kurzfristig (1–3 Jahre nach Projektabschluss)

Der hybride Piezowandler kann kurzfristig nicht wirtschaftlich vertrieben werden. Für den kommerziellen Einsatz ist aus Sicht von INVENT zunächst ein weiteres Forschungsvorhaben zur Steigerung der technologischen Reife notwendig. Für weitere Informationen dazu sei an dieser Stelle auf die Wissenschaftliche / Technische Anschlussfähigkeit verwiesen.

Das Experten-Tool ist für INVENT nicht direkt verwertbar. Der simulationsgestützte Ansatz zur Auswertung von Ultraschallbefunden bleibt zwar vielversprechend, kann aber nicht von INVENT weiterentwickelt werden, da das Unternehmen auf die Entwicklung und Fertigung von Faserverbundstrukturen spezialisiert ist. Die Weiterentwicklung muss durch Dritte erfolgen, beispielsweise durch den Verbundpartner Hillger NDT, der sich auf Ultraschallprüfverfahren und zugehörige Auswertesoftware spezialisiert hat. INVENT prüft nach Projektabschluss die Übertragung der Projektergebnisse und deren Verwertung an Hillger NDT. Das Experten-Tool wird in den folgenden Abschnitten nicht detailliert betrachtet.

Für das ganzheitliche Prüfsystem (Prüfverfahren mit Experten – Tool) wird an dieser Stelle ebenfalls auf den Verbundpartner Hillger NDT verwiesen. INVENT kann das System erst nach Abschluss der Entwicklung kommerziell nutzen. Eine Zusammenarbeit von INVENT mit Hillger NDT, beispielsweise im Rahmen einer Auftragsfertigung von komplexen Teststrukturen, ist

	Abschlussbericht 300421 HYPE	Dok-Nr.: 300421-INV-TN T1u2 Datum: 27.02.2025 Verfasser: HARO/HUOL Version.: A
---	--	---

jedoch denkbar. Hierfür erhofft sich INVENT kurzfristig Aufträge in Höhe von 50.000 bis 100.000 Euro.

Mittelfristig (3-5 Jahre nach Projektabschluss)

In Bezug auf den hybriden Aktuator erhofft sich INVENT den erfolgreichen Abschluss des geplanten Projektes FrADura (vergleiche hierzu die kurzfristige wissenschaftliche Anschlussfähigkeit) sowie die anschließende Kommerzialisierung bzw. Markteinführung entsprechender Wandler. Vorsichtige Abschätzungen ergeben einen Stückpreis in einer Preisspanne von 200 bis 400 Euro. Als mögliche Endkunden werden mittelfristig nationale und internationale Universitäten und Forschungseinrichtungen erwartet.

In Bezug auf das ganzheitliche Prüfsystem erhofft sich INVENT auch mittelfristig die kommerzielle Auftragsfertigung von großen komplexen Teststrukturen. Hierzu strebt INVENT ein Auftragsvolumen von 100.000 bis 150.000 Euro an.

Langfristig (5-10 Jahre nach Projektabschluss)

In Bezug auf den hybriden Aktuator erhofft sich INVENT eine steigende Nachfrage nach hybriden Piezowandlern. Grundvoraussetzung ist hierfür eine geeignete mindestens teilautomatisierte Serienfertigung, die in der wissenschaftlichen bzw. technischen Anschlussfähigkeit weiter betrachtet wird. Durch die Automatisierung des Herstellungsprozesses erhofft sich INVENT die Reduzierung der Fertigungsaufwände um mindestens 10%. Als mögliche Endkunden werden nationale und internationale Unternehmen mit Fokus auf die Fertigung von Faserverbundstrukturen in den Bereichen Luft- und Raumfahrt gesehen.


Langfristig erhofft sich INVENT die Qualifizierung des ganzheitlichen Prüfprozesses für Luft- und Raumfahrtanwendungen. Als Schlussfolgerung strebt INVENT den Einsatz der Technologie im eigenen Unternehmen an. Grundvoraussetzung dafür ist die erfolgreiche Weiterentwicklung der Teiltechnologien durch den Verbundpartner Hillger NDT.

Mit dem Applikator und einem weitgehend automatisierten Prüfsystem kann die Technologie sowohl zur Qualitätssicherung als auch zur Wartung bestehender Faserverbundstrukturen eingesetzt werden. INVENT erwartet daher, den hybriden Aktuator auch an Endkunden wie Fluggesellschaften zu vermarkten.

5.2 Wissenschaftliche / technische Erfolgsaussichten

Kurzfristig (1–3 Jahre nach Projektabschluss):

Die experimentellen Ergebnisse mit dem kreisförmig aufgebauten Kammwandler haben gezeigt, dass die angestrebte reine S₀-Modenanregung noch nicht erreicht ist. Dennoch besteht aus technologischer Sicht die Möglichkeit, durch phasengesteuerte Aktuatorsegmente die Modenselektion weiter zu verbessern. Dazu wurde eine Projektskizze für das Forschungsprojekt FrADura eingereicht (vergleiche kurzfristige Wissenschaftliche / technische Anschlussfähigkeit). Die Erreichbarkeit der Ziele wird aus aktueller Sicht als hoch eingestuft.

	Abschlussbericht 300421 HYPE	Dok-Nr.: 300421-INV-TN T1u2 Datum: 27.02.2025 Verfasser: HARO/HUOL Version.: A
---	--	---

Mittelfristig (3–5 Jahre nach Projektabschluss):

Gelingt die angestrebte Verbesserung der hybriden Piezowandler, wird eine breite Palette wissenschaftlich-technischer Anwendungen möglich. Dazu zählen nicht nur zerstörungsfreie Prüfverfahren für großflächige Faserverbundstrukturen, sondern auch potenzielle Perspektiven in der aktiven Schwingungs- und Schalldämpfung. Die grundlegenden Erfahrungen aus dem Projekt HYPE deuten darauf hin, dass eine zuverlässige Modenselektierung wesentlich zur effizienten Datenauswertung beitragen kann, weil unerwünschte Modenanteile verringert werden.

Langfristig (5–10 Jahre nach Projektende):


Langfristig sieht sich INVENT in einer technologischen Vorreiterrolle im Bereich hybrider Aktuatoren. Neben der Anwendung der hybriden Aktuatoren im Bereich Qualitätssicherung strebt INVENT die Anwendung auch in anderen Bereichen wie der Schwingungsreduktion an. Hierdurch kann INVENT neue Märkte aufbauen und bedienen, die den Mitbewerbern mangels entsprechenden Knowhows nicht ohne weiteres zugänglich sind. Durch die gewonnenen Erkenntnisse kann INVENT zukünftig eine bedeutende Rolle im Bereich der Entwicklung der Strukturen spielen und sich als Experte auf diesem Gebiet etablieren.

5.3 Wissenschaftliche / technische Anschlussfähigkeit

Kurzfristig (1–3 Jahre nach Projektabschluss):

Für den hybriden Aktuator wird ein weiteres Forschungsvorhaben angestrebt. Der Grund dafür ist, dass in den experimentellen Versuchen neben der gewünschten S0-Mode auch die unerwünschte A0-Mode angeregt wurde. Eine selektive Modenanregung konnte bisher nicht nachgewiesen werden. Als Ursache sind Einschränkungen der Anregungselektronik aufzuführen. Dennoch erscheint eine gezielte Modenanregung technologisch möglich. Daher wurde eine Projektskizze für das ZIM-Projekt FrADura beantragt. Projektpartner sind die Universität Siegen, US4US und die Gdansk University of Technology, begleitet von PI Ceramic (Vertrieb der INVENT-Piezowandler), Vallen Systeme und der Universität Bologna. INVENT will damit die technologische Reife steigern, die Elektrodenstruktur numerisch optimieren und das Know-how zur phasengesteuerten Modenanregung sowie zur kostengünstigen Fertigung komplexer Wandler vertiefen. Grundlage dafür sind die Ergebnisse aus dem Projekt HYPE.

Die Projektergebnisse zum Applikator sind vielversprechend. Eine wirtschaftliche Bewertung für den Einsatz bei INVENT steht noch aus. Die Verwertungsrechte liegen beim Fraunhofer IFAM. Als nächste Schritte empfiehlt INVENT ein sechsmonatiges Forschungsprojekt, um die Technologie mit den bestehenden Applikationskonzepten zu vergleichen, den manuellen und automatisierten Einsatz zu bewerten und spezifische Anwendungen zu identifizieren. Abhängig von den Ergebnissen soll eine Roadmap zur Kommerzialisierung erstellt werden. INVENT möchte mindestens als assoziierter Partner teilnehmen. Einen erfolgreichen Projektabschluss vorausgesetzt würde INVENT an ein weiteres Forschungsprojekt zur Erhöhung der technologischen Reife des Applikators partizipieren.

	Abschlussbericht 300421 HYPE	Dok-Nr.: 300421-INV-TN T1u2 Datum: 27.02.2025 Verfasser: HARO/HUOL Version.: A
---	--	---

Mittelfristig (3–5 Jahre nach Projektabschluss):

Nach dem erfolgreichen Abschluss des Projekts FrADura strebt INVENT mittelfristig einen geeigneten Serienprozess für die Fertigung der komplexen hybriden Piezowandler an. Ziel ist mindestens die Teilautomatisierung des Fertigungsprozesses. Dadurch verspricht sich INVENT die Reduzierung der Fertigungskosten um mindestens 10% gegenüber den Fertigungsaufwänden im Projekt HYPE. Durch den breitbandigen Einsatz des hybriden Aktuators erhofft sich INVENT außerdem dessen Eignung für weitere Anwendungsfelder. Mögliche Anwendungsfelder sind beispielweise Technologien zur Schwingungs- und Schallreduktion. Diese sollen mittelfristig identifiziert und wenn möglich langfristig erschlossen werden.

Langfristig (5–10 Jahre nach Projektende):

Langfristige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten als direkte Folge aus dem Projekt HYPE, insbesondere in Bezug auf den hybriden Wandler, werden derzeit nicht gesehen. Unabhängig davon strebt INVENT die Serienfertigung der hybriden Piezowandler an. Zur Steigerung der Profitabilität sollen die Fertigungsprozesse für Piezowandler in DuraAct – Bauweise schrittweise gesenkt werden.

Parallel dazu soll langfristig das Vertriebsnetzwerk gestärkt werden. Der bestehende Vertriebspartner PI Ceramic kann eine Schlüsselrolle übernehmen. Zusätzlich sollen weitere Verwertungs- und Vertriebspartner gewonnen werden. Mögliche Partner sind Hillger NDT als Anbieter kommerzieller Prüfsysteme mit den Piezowandlern von INVENT.


Der Applikator wird aus Sicht von INVENT langfristig zur Weiterentwicklung des Gesamtsystems beitragen können. In Kombination mit einem automatisierten Prüfsystem kann er die Qualitätssicherung und insbesondere die Wartung von Faserverbundstrukturen vereinfachen. INVENT strebt daher die Begleitung der langfristigen Entwicklungen an. Darüber hinaus prüft INVENT kontinuierlich die Integration der Technologie in die Prozesse bei INVENT.

6 Externer Fortschritt auf dem Gebiet

Im Rahmen der Projektbearbeitung sind Ergebnisse Dritter bekannt geworden. In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse zusammengefasst und gegenüber den im Projekt HYPE durchgeführten Arbeiten abgegrenzt.

Boeing: Patente EP 2 333 537 B1 und US 8,544,328 B2

Im Rahmen der Literaturrecherche zur Realisierung multifrequenter Piezoaktuatoren wurden zwei Patente im Hinblick auf mögliche Interessenskonflikte mit der Funktionsweise des geplanten Messsystems geprüft. Dabei handelt es sich um die Patente EP 2 333 537 B1 und US 8,544,328 B2. Die Zielsetzung dieses Projektes unterscheidet sich insofern von den geschützten Inhalten, als dass die Aktuator-Sensor Strecke durch die Kombination von Piezowandler und Luftultraschallsensor umgesetzt wird, während im zweiten Fall ein Strukturüberwachungssystem aus mehreren fest installierten Piezowandlern aufgebaut wird. Die in den Patenten

	Abschlussbericht 300421 HYPE	Dok-Nr.: 300421-INV-TN T1u2 Datum: 27.02.2025 Verfasser: HARO/HUOL Version.: A
---	--	---

vorgestellten Wandler sind aus mehreren, teils axialsymmetrischen Elementen aufgebaut. Ein ähnlicher Wandleraufbau wurde auch im Projekt HYPE erarbeitet, wobei diese Strukturen aufgrund der erforderlichen Keramikgeometrie technisch bedingt sind, um beispielsweise omnidirektionale Lambwellenfelder anzuregen oder Lambwellenmoden spezifischer Wellenlänge zu erzeugen. Das Messsystem in Patent EP 2 333 537 B1 basiert auf der Modenselektion mit Hilfe einer Skalierungsmatrix, die durch die Nutzung unterschiedlicher Aktuator- beziehungsweise Sensorelemente ermittelt wird. Dem Messsystem in Patent US 8,544,328 B2 liegt die Ermittlung der Geschwindigkeiten der eintreffenden Wellen an den Elementen des Sensors zu Grunde.


Empa - Materials Science and Technology; ETH-Zürich, Institute for Mechanical Systems: Luftgekoppelte US-Prüfung mit Lamb-Wellen

Im Rahmen der Literaturrecherche wurde die Veröffentlichung [3] analysiert. Hier wird ein Ultraschallprüfverfahren mit Lambwellen untersucht. Das hierbei verwendete System besteht aus jeweils einem Aktuator und einem Sensor. Die modenselektive Anregung wird durch eine gegenüber der Strukturoberfläche angewinkelte Anordnung in Form von „Keilwandlern“ ermöglicht. Im Projekt HYPE wurden die Modenselektive Anregung unter anderem multifrequente breitbandige Aktuatoren mit der in Abschnitt 2.3 dargestellten Bauweise verwendet und bietet damit eine Abgrenzung. Im Weiteren wurden standardisierte ebene Piezowandler statt Keilwandler verwendet. Eine maßgebliche Abgrenzung besteht in der Einkopplung der Lambwellen in die Prüfkörper. Im Gegensatz zu den luftgekoppelten Ultraschallaktuatoren in [3] werden die Lambwellen im Projekt HYPE durch Scherkräfte übertragen, die die Piezowandler durch ihre Verformung bei Beaufschlagung mit einem elektrischen Signal in der Struktur anregen.

Ergänzend wird in der vorliegenden Veröffentlichung eine automatisierte Auswertung der Messdaten beschrieben. Weil die detaillierte Umsetzung des Experten-Tools erst im nächsten Berichtszeitraum beginnt, kann die Abgrenzung zu den verwendeten Algorithmen noch nicht genau beschrieben werden. Das Risiko, dass eine Abgrenzung hierzu nicht möglich ist, wird im Konsortium als sehr gering eingeschätzt, unter anderem weil sich die gesamte Methodik auf isotrope Probekörper bezieht, während in diesem Verbundvorhaben anisotrope Faserverbundkunststoffe im Vordergrund stehen.

Premium Aerotec: KI-gestützte Fehleridentifikation

Im Rahmen der Recherchearbeiten wurden ähnliche Arbeiten seitens des Unternehmens Premium Aerotech identifiziert. Zur Abgrenzung des Projektes fand ein digitales Treffen zwischen Premium Aerotech und dem HYPE-Konsortium statt. Während Premium Aerotech C-Bilder aus klassischen Ultraschallverfahren verwendet, werden im Projekt HYPE zeitunabhängige C-Bilder, die auf die Auswertung von Lambwellen basieren, verwendet. Das in HYPE entwickelte Verfahren nutzt neben dem reinen Vergleich zwischen einer Referenzstruktur und einem Istzustand einer neu gefertigten Struktur zusätzliche numerische Simulationen zur Bewertung des Befundes und geht damit ebenfalls über diese Arbeiten hinaus. Je nach Aussagequalität,

	Abschlussbericht 300421 HYPE	Dok-Nr.: 300421-INV-TN T1u2 Datum: 27.02.2025 Verfasser: HARO/HUOL Version.: A
---	--	---

die Rahmen des Projektes HYPE nicht abschließend bewertet werden konnte, kann damit perspektivisch auf Referenzstrukturen verzichtet werden, was den Ressourcenverbrauch reduziert. Durch die Anwendbarkeit der in HYPE entwickelten Technologie auf bereits eingesetzte Strukturen, die sich beispielsweise in der Wartung befinden, grenzen sich die Arbeiten zusätzlich ab.

Mondiac (Spinoff der ETH Zürich): Digitaler Zwilling für zerstörungsfreie Prüfung mittels Lambwellen

Während der Projektbearbeitung sind Ergebnisse des Spinoff Mondaic der ETH Zürich bekannt geworden. Das Unternehmen beschäftigt sich mit der Entwicklung eines digitalen Zwillings für zerstörungsfreie Prüfung und Zustandsüberwachung von Kohlefaserstrukturen. Die Projektergebnisse sind während eines Webseminars bekannt geworden, das vom Composites United e. V. organisiert wurde. Hierbei werden geführte Wellen ebenfalls mit einem Wandler in einen Testkörper eingekoppelt. Im Gegensatz zum Projekt HYPE werden die Wellen jedoch nicht mittels Luftultraschall, sondern mittels Laservibrometrie erfasst. Darüber hinaus erfolgt der Datenabgleich zwischen Simulation und Experiment iterativ. Im Vergleich zum Projekt HYPE, in dem der Probekörper möglichst realitätsnah simuliert wurde, um einen Vergleich mit den Messdaten zu ermöglichen, werden hier Messdaten genutzt, um das simulierte Modell schrittweise an die Realität anzupassen. Für die Simulationen wird die FE-Analyse verwendet. In Projekt HYPE wird im Gegensatz dazu die weniger rechenintensive semi-finite FE-Analyse genutzt. Mondaic hatte nach eigener Darstellung bisher monolithische Platten simuliert. Als nächste Komplexitätsstufe sollen monolithische Platten mit Stringerverstärkung untersucht werden. Ähnliche Untersuchungen wurden auch in Projekt HYPE durchgeführt. Jedoch ist die Stringeranbindung nur ein Teil einer komplexeren Probekörperserie, die untersucht wurde.

7 Veröffentlichungen der Ergebnisse nach Nr. 5 der NKBF

Seitens der INVENT GmbH wurden bisher keine Projektergebnisse veröffentlicht. Im Nachgang zum Projekt sind jedoch gemeinsame Veröffentlichungen mit dem Konsortium geplant. Hierzu zählen ein Konferenzbeitrag sowie eine Journalveröffentlichung. Darüber hinaus wurde im Projekt eine gemeinsame 22-seitige Präsentation erarbeitet, die den Prozessablauf der erarbeiteten Technologie sowie den wesentlichen Teiltechnologien darstellt. Die Demonstration eignet sich zur Anwendung auf Konferenzen und Messeausstellungen.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN Nicht verfügbar	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
2. Titel HYPE: Hybrides, berührungsloses Ultraschallprüfverfahren für komplexe Faserverbundbauteile mit multipler Aktuatorik und virtuellem Ergebnisabgleich; Teilvorhaben: Entwicklung von multiplen Aktuatoren und deren Applikationsmethodik	
4. Autoren [Name, Vorname] Oliver Huxdorf Robert Hanelt Maik Wonneberger	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.10.2024
	6. Veröffentlichungsdatum 28.02.2025
	7. Form der Publikation Technischer Bericht, pdf
8. Durchführende Institution [Name, Adresse] INVENT GmbH Christian-Pommer-Straße 47 38112 Braunschweig	9. Ber. Nr. Durchführende Institution 300421-INV-TN T1u2
	10. Förderkennzeichen 20W1926A
	11. Seitenzahlen 36 Seiten
12. Fördernde Institution [Name, Adresse] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) Scharnhorststraße 34-37 10115 Berlin	13. Literaturangaben 3
	14. Tabelle 0 Tabellen
	15. Abbildungen 35 Abbildungen
16. Zusätzliche Angaben Keine zusätzlichen Angaben	
17. Vorgelegt bei [Titel, Ort, Datum] Keine zusätzlichen Angaben	
18. Kurzfassung Die INVENT GmbH entwickelt im Projekt HYPE gemeinsam mit den Partnern Hillger NDT und Fraunhofer IFAM ein innovatives Prüfsystem zur Qualitätssicherung von Faserverbundstrukturen mit Lambwellenanregung durch Piezowandler. Dazu werden hybride Piezowandler gefertigt und erprobt, um eine gezielte und selektive Modenanregung zu ermöglichen. Ergänzend wird ein alternativer Piezowandler mit für die Probekörper optimierten Anregungseigenschaften und Abziehlaschen für eine rückstandsfreie Entfernung entwickelt. Zur experimentellen Untersuchung werden realitätsnahe Probekörper, die luftfahrtrelevante Strukturen und typische Fehlstellen abbilden und einen verlässlichen Vergleich mit Simulationen ermöglichen. Weitere Probekörper werden für Applikationsversuche beim Fraunhofer IFAM bereitgestellt. Für eine effiziente Datenverwaltung und Fehlerbewertung entsteht ein datenbankgestütztes Experten-Tool, das experimentelle und simulationsbasierte Prüfdaten speichert und analysiert. Es bietet Funktionen zur Identifikation und Bewertung von Befunden sowie Schnittstellen zur Anbindung der Simulation. Die erzielten Ergebnisse und der gesamte Prozessablauf werden zur Demonstration aufbereitet, um die Technologie darzustellen.	
19. Schlagwörter <i>Faserverbundstruktur, Piezowandler, Lambwellen, Qualitätssicherung, Wartung</i>	
20. Verlag Nicht verfügbar	21. Preis Nicht verfügbar

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN Not applicable	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title HYPE: Hybrides, berührungsloses Ultraschallprüfverfahren für komplexe Faserverbundbauteile mit multipler Aktuatorik und virtuellem Ergebnisabgleich; Subproject: Entwicklung von multiplen Aktuatoren und deren Applikationsmethodik	
4. author(s) (family name, first name(s)) Oliver Huxdorf Robert Hanelt Maik Wonneberger	5. end of project 31.10.2024
	6. publication date 28.02.2025
	7. form of publication Technical report, pdf
8. performing organization(s) (name, address) INVENT GmbH Christian-Pommer-Straße 47 38112 Braunschweig	9. originator's report no. 300421-INV-TN T1u2
	10. reference no. 20W1926A
	11. no. of pages 36 pages
12. sponsoring agency (name, address) Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action Scharnhorststraße 34-37 10115 Berlin	13. no. of references 3
	14. no. of tables 0 tables
	15. no. of figures 35 figures
16. supplementary notes No supplementary notes.	
17. presented at (title, place, date) No supplementary notes.	
18. abstract In the research project HYPE the INVENT GmbH, together with its partners Hillger NDT and Fraunhofer IFAM, is developing an innovative ultrasonic inspection system for the quality assurance of fiber-reinforced composite structures using Lamb waves. To achieve this, hybrid piezoelectric transducers were manufactured and tested to enable targeted and selective mode excitation. Additionally, an alternative piezoelectric transducer was developed with peel-off tabs for residue-free removal and optimized excitation properties based on the specimens' material properties and geometry. To support experimental investigations, realistic specimens were produced that replicate aerospace-relevant structures and typical defects, ensuring reliable comparability with simulations. Furthermore, test specimens were provided to Fraunhofer IFAM for application trials. A database-driven expert tool is being developed for efficient data management and defect assessment, storing and analyzing both experimental and simulation-based test data. It includes functions to identify and evaluate defects, as well as interfaces for integrating simulation results. The results achieved and the overall test process were prepared for demonstration to showcase the performance and applicability of the technology.	
19. keywords <i>Fiber-reinforced composite structure, Piezoelectric transducer, Lamb waves, Quality assurance, Maintenance</i>	
20. publisher Not applicable	21. price Not applicable