

**Verbundprojekt: MegaYachtSchaum – Beschichtung großer mobiler maritimer Konstruktionen mit sprühfähigen Hartschäumen**

**FKZ: 03SX440E**

**Laufzeit des Verbundprojekts: 01.01.2019 – 30.09.2022**

## **Schlussbericht**

**zum Teilvorhaben 7 „Nicht-invasives akustisches Structural Health Monitoring System für PUR-basierte Beschichtungssysteme“**

Hochschule für angewandte Wissenschaften Coburg  
Institut für Sensor- und Aktortechnik (ISAT)  
Friedrich-Streib-Str. 2  
96450 Coburg

Projektleiter: Prof. Dr. Klaus Stefan Drese

Coburg, 27.03.2023



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Inhaltsverzeichnis

I. Zusammenfassung der Ausgangslage und des Projektablaufs .....	3
1. Aufgabenstellung .....	3
2. Voraussetzungen des Vorhabens .....	4
3. Planung und Ablauf des Vorhabens .....	5
4. Stand von Wissenschaft und Technik .....	7
5. Zusammenarbeit mit Partnern .....	8
II. Durchführung des Vorhabens und erzielte Ergebnisse.....	9
1. Verwendung der Zuwendung .....	9
a. Durchführung der Arbeiten .....	9
b. Erzielte Ergebnisse.....	28
c. Vergleich mit den Vorhabenzielen .....	29
2. Erläuterung des zahlenmäßigen Nachweises .....	32
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	33
4. Relevanz der Ergebnisse .....	34
a. Erzielter Anwendernutzen .....	34
b. Geplante Verwertung der Ergebnisse .....	34
5. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....	34
6. Veröffentlichung der Ergebnisse .....	35
III. Anlagen .....	36
Anlage 1: Schaltpläne.....	37
Anlage 2: Erfolgskontrollbericht.....	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>
Anlage 3: Berichtsblatt.....	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>
Literaturverzeichnis .....	39

# **I. Zusammenfassung der Ausgangslage und des Projektablaufs**

## **1. Aufgabenstellung**

Ziel des Teilvorhabens gemäß Projektplans war die Entwicklung eines zerstörungsfreien, robusten und onlinefähigen Structural Health Monitoring-Systems (SHM) für die orts aufgelöste Messung von Schäden am Schiffsrumpf, welches insbesondere an das im Vorhaben entwickelte schaubasierte PUR-System angepasst ist. Die Technologie zur Überwachung des Schiffsrumpfes sollte hierbei auf sogenannte geführte akustische Wellen – einer Sonderform des Ultraschalls – basieren und eine Weiterentwicklung der im ISAT entwickelten akustischen Messverfahren darstellen. Die SHM-Sensorik sollte dabei zum einen an neuralgische Stellen der Rumpffinnenseite angebracht werden, um nicht-invasiv und im laufenden Betrieb (auf See) die Ablösung der Hartschaumschicht vom Stahl oder das Eindringen von Wasser zu detektieren. Parallel sollte im Rahmen des Teilvorhabens untersucht werden, ob mit dem akustischen Verfahren auch eine Erkennung von Haarrissen auf der Lackbeschichtung des äußeren Schiffsrumpfes sowie die Messung der Delamination der PUR-Schaumschicht vom Decklaminat möglich ist. Zudem sollte geprüft werden, ob sich das akustische Verfahren auch zur Erkennung von Lufteinschlüssen in der Decklaminatschicht eignet. Ziel war die Entwicklung eines für die Überwachung großer Teilflächen des Schiffsrumpfes geeigneten Sensorsystems mit ausreichender Ortsauflösung, welches eine quasi-kontinuierliche Zustandsüberwachung von PUR-basierten Beschichtungssystem im Betrieb erlaubt und so zur Qualitätssicherung beiträgt.

## **2. Voraussetzungen des Vorhabens**

Antragsteller des Teilprojektes „Nicht-invasives akustisches Structural Health Monitoring System für PUR-basierte Beschichtungssysteme“ ist das Institut für Sensor- und Aktortechnik, ISAT, ein In-Institut der Hochschule Coburg. Besondere Kompetenzen besitzt das ISAT auf dem Gebiet der „Geführten Akustischen Wellen“ (GAW) und betreibt dort seit vielen Jahren anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung. Das umfassende Know-how des Antragstellers in der Wechselwirkung Geführter Akustischer Wellen mit Flüssigkeiten und Schichten bildeten die Grundlage für die Untersuchungen im Teilprojekt des MegaYachtSchaum-Projektes.

Als technische Voraussetzungen standen dem ISAT neben Großraumbüros ein Elektroniklabor, ein Laserlabor, zwei Messlabore sowie ein nasschemisches Labor gemäß dem aktuellen technischen Standard zur Verfügung. Alle Räumlichkeiten sind mit hochwertigen elektronischen Messgeräten (PC-Arbeitsplätze, digitale Speicheroszilloskope, Funktionsgeneratoren usw.) ausgestattet. Außerdem können an den PC-Arbeitsplätzen unterschiedliche, an der Hochschule Coburg verfügbare Softwarepakete zur Messdatenverarbeitung oder Simulation genutzt werden. z. B. LabView, MATLAB, COMSOL. Die Projektleitung und Supervision der Entwicklungsarbeiten, die fachliche Anleitung und Beratung bei der physikalischen Modellbildung, bei Präsentationen und Veröffentlichungen erfolgte durch Prof. Dr. K. Drese, den Leiter des ISAT.

### 3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Beginn des Vorhabens war der 01.01.2019, geplantes Ende des Vorhabens der 31.12.2021. Durch die kostenneutrale Verlängerung verschob sich das Projektende auf den 30.09.2022. Der Arbeitsplan ergab sich aus der oben genannten Fragestellung und bestand aus 11 Arbeitspaketen. Im Rahmen der Projektverlängerung und Aufgrund der Ausbreitung der weltweiten Corona-Pandemie mussten im Laufe des Projekts Änderungen am ursprünglich geplanten Versuchsvorhaben vorgenommen werden. Im Folgenden ist der ursprüngliche Arbeitsplan dargestellt. Die vorgenommenen Anpassungen werden im Anschluss daran erläutert.

Im Laufe des Projekts ergaben sich folgende das Projekt verzögernde Problemstellungen:

1) Corona-Pandemie:

Die Anfang 2020 weltweit aufkommende Corona-Pandemie führte zu starken Behinderungen bei der Projektbearbeitung. Dabei geltende Reise- und Kontaktbeschränkungen erschwerten die Arbeiten im Labor und die Zusammenarbeit mit den Projektpartnern im Rahmen der ursprünglich geplanten Messkampagnen. Hinzu kamen stetig steigende Lieferzeiten von Elektronikbauteilen und Sensorkomponenten, die sich auf die Entwicklung und den Aufbau der Messelektronik und des Phased-Array-Sensorkopfs auswirkten.

Der Projektplan wurde in den folgenden Punkten angepasst:

**Tabelle 1: Anpassungen des Projektplans**

AP	Ursprünglich Geplant	Anmerkungen
7.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Ausstattung von Musterplatten der Größe 150 cm x 150 cm mit einem Sensor-Array</li> <li>➤ Durchführung von Testmessungen mit dem Datenerfassungssystem aus AP 7.4</li> </ul>	<p>➤ Als Musterplatte wurde eine Aluminiumplatte anstelle einer Stahlplatte verwendet. Durch die geringen Fertigungstoleranzen im Vergleich zu den im Schiffsbau eingesetzten Stahlplatten konnte das Messsystem selbst optimiert werden, ohne zusätzliche Ungenauigkeiten durch die hohen Fertigungstoleranzen der Stahlplatten zu bekommen. Bezogen auf die akustischen Eigenschaften sind Stahl und Aluminium sehr ähnlich und können entsprechend miteinander verglichen werden.</p>
7.6	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Messungen an der Innenseite der Mock-Ups</li> <li>➤ Klimatests</li> </ul>	<p>➤ Durch zeitliche Verzögerung bei der Fertigstellung des Mock-Ups sowie Corona-bedingter Einschränkungen wurden die Messungen an dem Mock-Up durch zusätzliche Messungen im Labor ersetzt. Hierbei wurden Stahlplatten mit Schaum- und Lackschicht bis zu einer Länge von 2,5 m vermessen.</p> <p>➤ Im Vergleich zu einer zeitlich sehr begrenzten vor Ort Messung an einem</p>

		<p>Mock-Up konnten durch die Messungen im Labor zusätzliche Versuche mit unterschiedlichsten Messsystemeinstellungen zum Optimieren der Signalqualität durchgeführt werden.</p> <p>➤ Bei der ursprünglich im Antrag geplanten Messmethode sollte ein Piezo als Sender und ein anderer Piezo als Empfänger dienen und das zwischen diesen räumlich weit voneinander getrennt liegenden Piezos übertragene Signal ausgewertet werden. Die dabei auszuwertende Signalamplitude und Signalverschiebung sind stark temperaturabhängig, weshalb Klimatests geplant waren. Das entwickelte Phased-Array-Messsystem hingegen wertet das an einer Fehlstelle – z.B. Delamination der Schaumschicht – reflektierte Signal aus. Im Vergleich zu der ursprünglich geplanten Methode existiert somit nur bei Präsenz einer Fehlstelle ein auszuwertendes Signal. Eine Änderung der Amplitude oder minimale zeitliche Verschiebung der reflektierten Welle durch Temperatureffekte führen letztendlich nur zu einer geringfügigen Verschiebung der berechneten Fehlstellenposition. Dieser Effekt ist im Vergleich zu anderen Einflüssen, wie die Fertigungstoleranzen der Stahlplatten, vernachlässigbar. Aus diesem Grund wurden keine Klimatests mit dem entwickelten Messsystem durchgeführt.</p>
7.7	<p>➤ Entwicklung eines Sensors für die Überwachung der Schiffsaußenseite</p>	<p>➤ Das in AP 7 entwickelte Phased-Array-Messsystem wurde so ausgelegt, dass damit sowohl die Innenseite der Schiffsaußenhaut sowie deren Außenseite überwacht werden kann.</p>
7.8	<p>➤ Messungen an der Außenseite des Mock-Ups</p> <p>➤ Klimatests</p>	<p>➤ Wie bereits bei beschrieben AP 7.6 wurden diese Untersuchungen im Labor durchgeführt.</p> <p>➤ Klimatests: siehe AP 7.6 Anmerkungen</p>

## 4. Stand von Wissenschaft und Technik

Sowohl die Wechselwirkung von Lambwellen mit Materialdefekten als auch die Ausbreitungseigenschaften von Lambwellen in Mehrschichtsystemen sind bereits hinreichend untersucht und in der Literatur beschrieben [1-6]. Industriellen Einsatz finden Lambwellen-basierte SHM-Verfahren z.B. im Flugzeugbau, bei Pipelines, Bauwerken oder bei Rotorblättern von Windkraftanlagen; dort werden mittels der Technologie Materialermüdungserscheinungen und das Auftreten von Rissen detektiert [2,7,8]. Dabei kommen unter anderem auch 2D-Wandlerarrays zur orts aufgelösten Erkennung von Schäden zum Einsatz [10,11]. Auch Veränderungen in der kraftschlüssigen Verbindung zwischen zwei Schichten (Delamination) können mittels Lambwellen-basierter SHM-Verfahren erfasst werden. Die Verfahren zur Delaminationsdetektion werden bislang allerdings ausschließlich für feste Faserverbundwerkstoffe (GFK- und CFK-Werkstoffe) eingesetzt (z.B. bei Tragflächen im Flugzeugbau) [5][9].

Lambwellen-basierte SHM-Verfahren sind auch für den Einsatz an Schiffen grundsätzlich sehr gut geeignet. Für die Anwendung des Messverfahrens an Schiffsrümpfen existieren erste Laborprototypen zur Detektion von Materialdefekten an der Außenseite der Schiffshülle, es sind jedoch noch keine großflächigen Anwendungen von Sensorsystemen unmittelbar am Schiffsrumpf bekannt [12]. Der Einsatz eines Lambwellen-basierten SHM-Verfahrens bei einem schaubasierten Beschichtungssystem - wie es im geplanten MegaYachtSchaum-Vorhaben vorgesehen ist - stellt eine grundlegende Neuerung dar. Bisher wurden noch keine Studien zur Untersuchung der Delaminationen von Schaumschichten von einer festen Unterlage mittels Lambwellen-Sensorik veröffentlicht. Ferner ist nicht bekannt, dass ein industrieller Einsatz der Lambwellen-Technologie zur nicht-invasiven, orts aufgelösten Leckagedetektion erfolgt.

### Literatur

- [1] Rose, Joseph L. "Ultrasonic guided waves in structural health monitoring." *Key Engineering Materials*. Vol. 270. Trans Tech Publications, 2004.
- [2] Nayfeh, Adnan H *Wave propagation in layered anisotropic media: With application to composites*. Vol. 39. Elsevier, 1995.
- [3] Su, Zhongqing, and Lin Ye. *Identification of damage using Lamb waves: from fundamentals to applications*. Vol. 48. Springer Science & Business Media, 2009.
- [4] Kessler, Seth S., S. Mark Spearing, and Constantinos Soutis. "Damage detection in composite materials using Lamb wave methods." *Smart Materials and Structures* 11.2 (2002): 269.
- [5] Guo, N., and Peter Cawley. "The interaction of Lamb waves with delaminations in composite laminates." *The Journal of the Acoustical Society of America* 94.4 (1993): 2240-2246.
- [6] Alleyne, David N., and Peter Cawley. "The interaction of Lamb waves with defects." *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 39.3 (1992): 381-397.
- [7] Giurgiutiu, Victor. *Structural health monitoring: with piezoelectric wafer active sensors*. Academic Press, 2007.
- [8] Raghavan, Ajay, and Carlos ES Cesnik. "Review of guided-wave structural health monitoring." *Shock and Vibration Digest* 39.2 (2007): 91-116.
- [9] Busse, Gerhard and Solodov, Igor. „Neue Materialien auf dem Prüfstand. Innovative zerstörungsfreie Prüfung für Luftfahrtanwendungen. *Themenheft Forschung* 9(2013):66-78
- [10] Zhao, Xiang, et al. "Ultrasonic Lamb wave tomography in structural health monitoring." *Smart Materials and Structures* 20.10 (2011): 105002.
- [11] Aranguren, G., et al. "Ultrasonic wave-based structural health monitoring embedded instrument." *Review of Scientific Instruments* 84.12 (2013): 125106.
- [12] Sielski, Robert A. "Ship structural health monitoring research at the Office of Naval Research." *JOM* 64.7 (2012): 823-827.

## **5. Zusammenarbeit mit Partnern**

Die Arbeiten wurden in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern durchgeführt. Der regelmäßige Austausch wurde durch Telefonate, Videokonferenzen und drei persönliche Projekttreffen – am 22.01.2019, 06.08.2019 und 28.01.2020 – sichergestellt. Die Koordination erfolgte durch die Freese AG. Die für die Untersuchungen im ISAT benötigten Stahlplatten wurden von ABEKING & RASMUSSEN Schiffs- und Yachtwerft SE zur Verfügung gestellt. Das Aufbringen von Schaumschichten sowie Lackschichten auf diese Stahlplatten wurde durch die Freese AG übernommen.



## II. Durchführung des Vorhabens und erzielte Ergebnisse

### 1. Verwendung der Zuwendung

#### a. Durchführung der Arbeiten

##### Systemspezifikation

Nach Rücksprache mit den Projektpartnern wurden die für die Simulation benötigten Materialparameter sowie die bei den späteren Experimenten eingesetzten Dicken der Stahlplatte und der Schaumschicht definiert. Unter Berücksichtigung dieser wurde das Messsystem entwickelt.

##### Simulation der Schallinteraktion mit einer Schichtablösung und Wassereintritt

Anhand der von Projektpartnern gelieferten Materialeigenschaften und Schichtdicken wurden FEM-Simulationen (Finite-Elemente-Methode) in COMSOL Multiphysics durchgeführt. Ziel war es, die grundlegende Interaktion von geführten akustischen Wellen auf einer 7 mm dicken Stahlplatte mit 20 mm dicker Schaumschicht zu untersuchen, um letztendlich geeignete Arbeitspunkte für die spätere Messung an echten Schiffsplatten zu erhalten. Durch die Simulationen konnte ein relevanter Frequenzbereich von 30 – 300 kHz identifiziert werden.

Nachdem das Ablösen der Schaumschicht von der Stahlplatte sowie das Eindringen von Wasser einer der zu überwachenden Zustände sind, wurde diese Art von Fehlerbild auch simulativ untersucht. Das dafür verwendete COMSOL Modell ist in Abbildung 1 zu sehen.

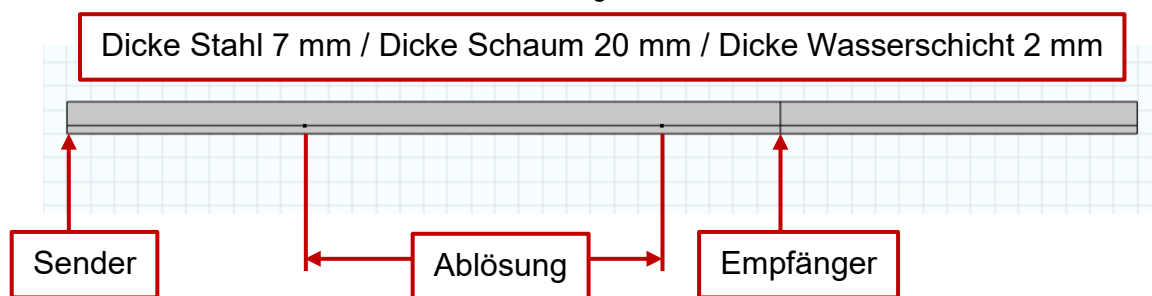
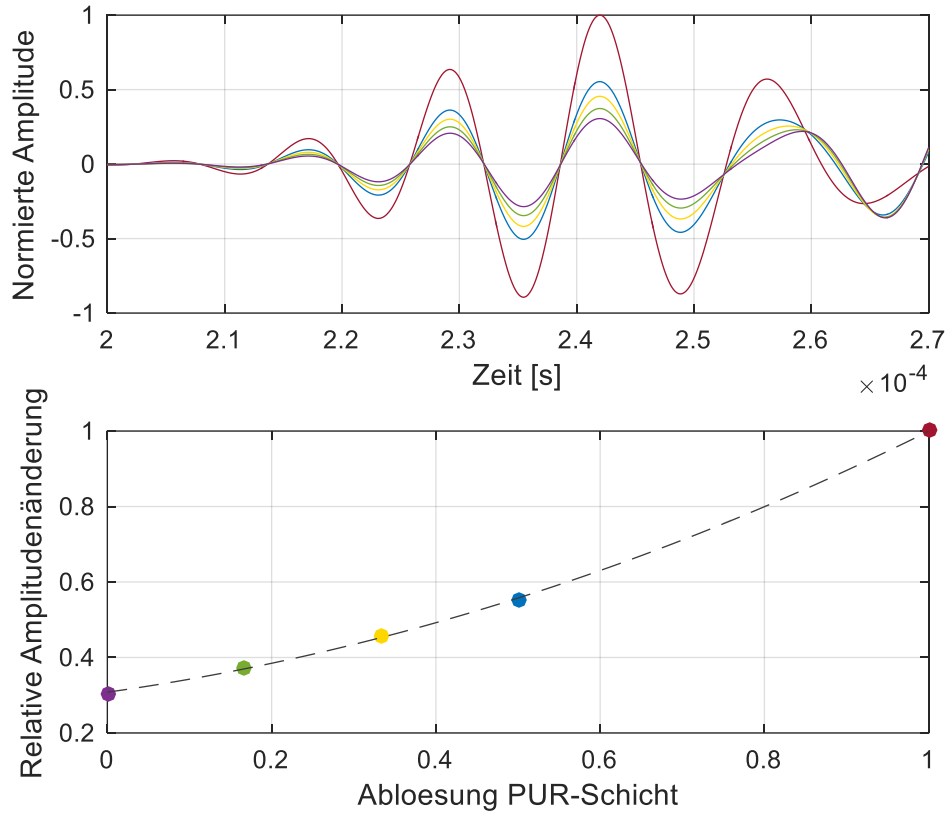
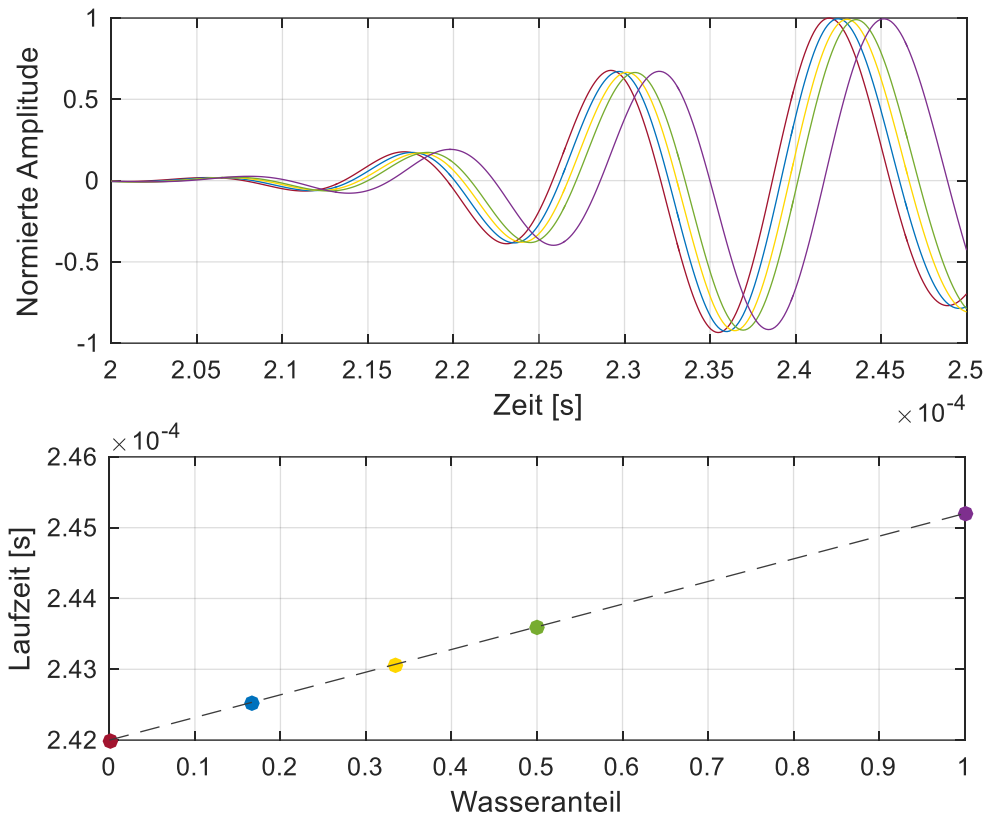


Abbildung 1: COMSOL Modell zur Simulation der Schichtablösung

In dem mit „Ablösung“ markierten Bereich – Anfang und Ende sind durch zwei Punkte im Schaubild dargestellt – wurde die mechanische Verbindung zwischen Stahlplatte und Schaumschicht durch Anpassen der Kontaktbedingungen getrennt und somit eine Schichtablösung simuliert. Für das Eindringen von Wasser wurde zwischen diesen zwei Punkten ein 2 mm hoher Streifen der Schaumschicht durch Wasser ersetzt und dadurch das Eindringen von Wasser simuliert. Dabei hat sich gezeigt, dass besonders die asymmetrische Lambwellen-Grundmode (A0) sensitiv gegenüber Schichtablösung und Eindringen von Wasser ist. In Abbildung 2 ist das gemessene Signal am Empfänger (oben) und die Amplitudenabhängigkeit der A0-Mode von der lokalen Schichtablösung (unten) dargestellt. Zu erkennen ist, dass eine zunehmende Schichtablösung zu einer Amplitudenerhöhung führt, die Position der Wellengruppe jedoch weitestgehend unverändert bleibt. Wenn der durch die Ablösung entstehende Spalt mit Wasser gefüllt ist, ergibt sich die in Abbildung 3 dargestellte Signalverschiebung. Entsprechend sorgt das Eindringen von Wasser vor allem für eine zeitliche Verschiebung des Empfangssignales.



**Abbildung 2: Einfluss der PUR-Schicht auf die Amplitude geführter akustischer Wellen. Oben: Amplitudenänderung des Empfangssignals. Unten: Darstellung der Amplitudenänderung über die PUR-Schichtablösung.**

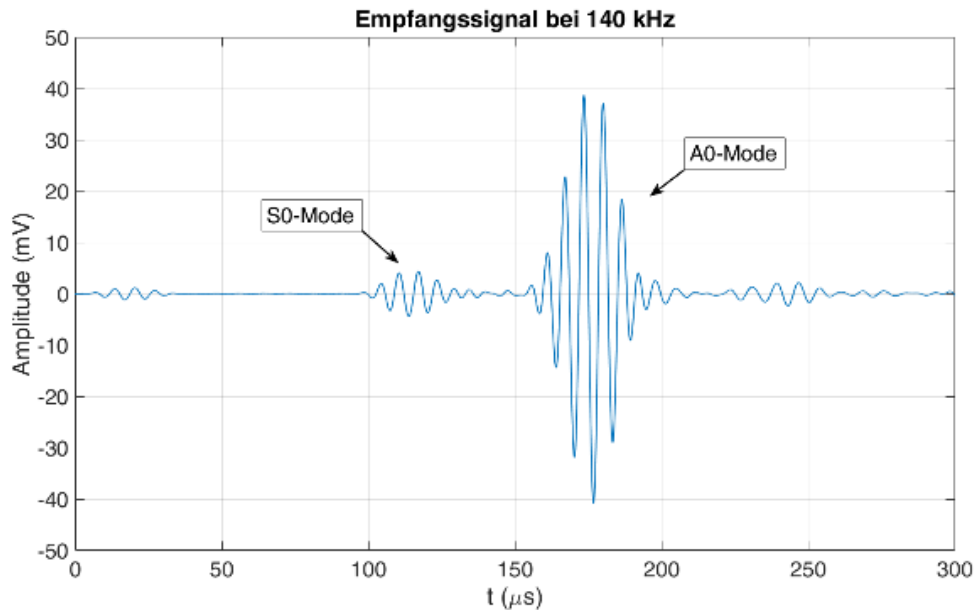


**Abbildung 3: Einfluss des Wassers auf die Laufzeit geführter akustischer Wellen. Oben: Änderung der Zeitsignale mit zunehmendem Wassereintritt. Unten: ausgewertete Laufzeitverschiebung bei Erhöhung des eindringenden Wasseranteils.**

Durch die Simulationen wurde gezeigt, dass die A0-Mode gegenüber der Schichtablösung und dem Eindringen von Wasser sensitiv ist. In den folgenden experimentellen Untersuchungen wurde daher eine Anregung der A0-Mode priorisiert. Alle weiteren Moden sollten nach Möglichkeit unterdrückt werden.

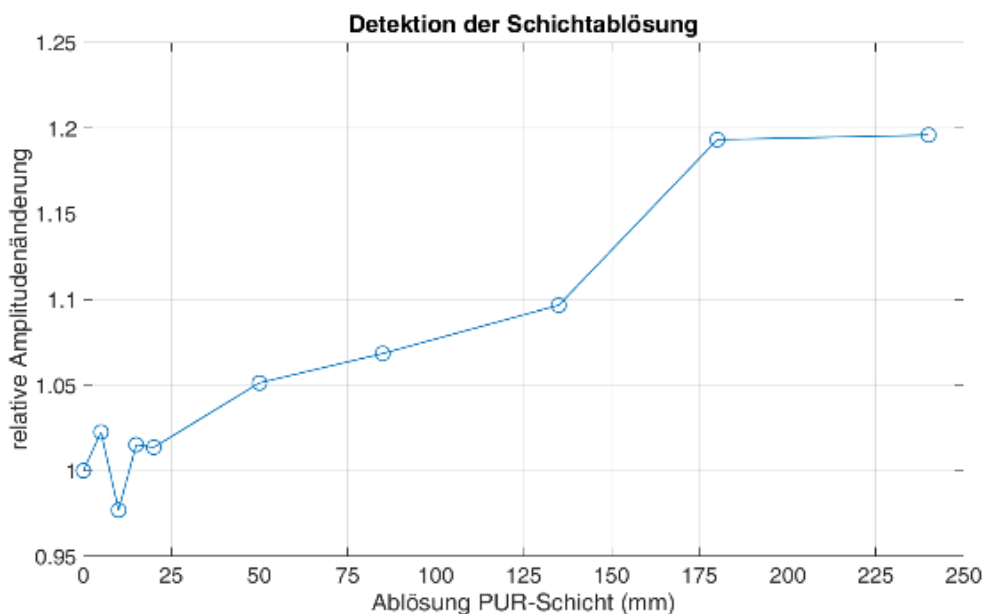
### Experimentelle Untersuchung der Signaländerung durch Schichtablösung

Aufbauend auf die Simulationen wurden experimentelle Untersuchungen zur Schichtablösung durchgeführt. Durch die ermittelte Anregungsfrequenz in Kombination mit der anzuregenden Mode wurden einige dafür in Frage kommende Piezokeramiken ausgelegt und im Labor untersucht. Ziel war es, die geeignetste Geometrie für eine saubere und möglichst Modenreine Anregung – überwiegende Anregung der A0-Mode bei gleichzeitiger Unterdrückung der S0-Mode – zu ermitteln. Abbildung 4 zeigt das Empfangssignal der Messstrecke zweier 30 mm langer, 10 mm breiter und 1 mm dicker Plattenpiezos vom Hersteller PICeramic und dem PIC151 Material die an den gegenüberliegenden Enden einer quadratischen Stahlplatte mit 50 cm Kantenlänge und 6 mm Dicke aufgeklebt wurden. Gut zu erkennen ist die dominante A0-Mode, die bei den weiteren Experimenten verwendet und ausgewertet wurde. Abweichend von den Simulationen hatte sich die Stahlplattendicke noch einmal leicht verändert. Die sich dadurch verschiebenden Arbeitsfrequenzen liegen jedoch weiterhin im Frequenzbereich der eingesetzten Piezos.



**Abbildung 4: Empfangssignal auf einer unbeschichteten Stahlplatte**

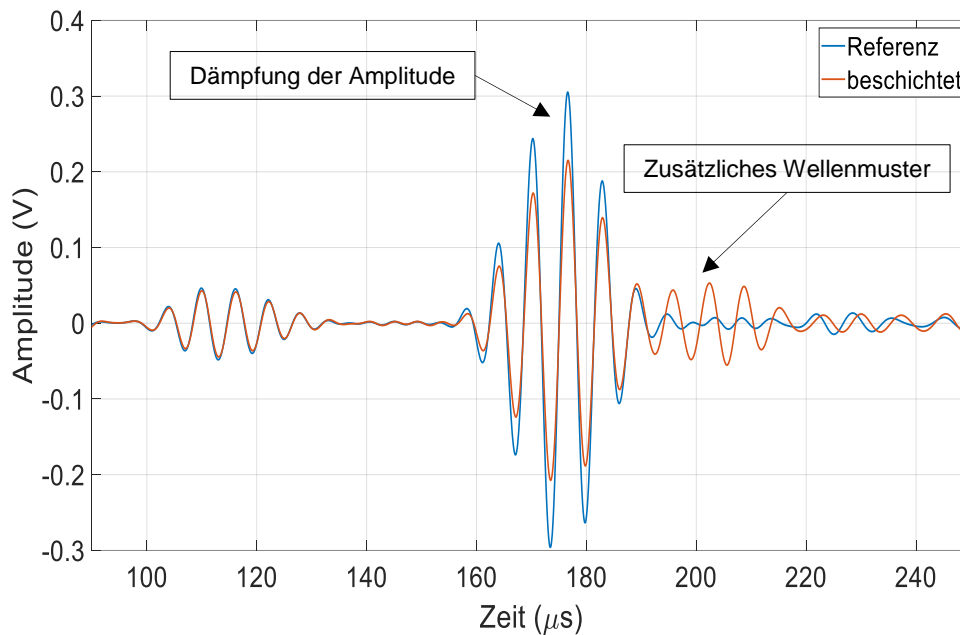
In einem weiteren Versuch wurde die simulierte Schichtablösung im Experiment nachgestellt. Das Ergebnis der Amplitudenänderung der A0-Mode ist in Abbildung 5 zu sehen. Analog zu den Simulationsergebnissen führt eine Schichtablösung, die im Experiment durch das streifenweise Herausfräsen der Schaumschicht senkrecht zur Signallaufstrecke zwischen den zwei Piezos simuliert wurde, zu einer Amplitudenzunahme und bestätigte damit die bisher gewonnenen Erkenntnisse. Bei weniger als 25 mm Schichtablösung konnte kein eindeutiger Messeffekt beobachtet werden. Eine mögliche Ursache können Reflexionen im Bereich der Ausfräsung sein, die sich mit dem Messsignal überlagern und die bestimmte Signalamplitude verfälschen.



**Abbildung 5: Einfluss der PUR-Schicht auf die Amplitude geführter akustischer Wellen**

Ergänzend zur Simulation der Schichtablösung durch Herausfräsen wurden vom Projektpartner einige Stahlplatten ohne Schaumschicht zur Verfügung gestellt, die mit Piezosensoren ausgestattet und vermessen wurden. Anschließend wurde die Schaumschicht aufgebracht sowie bei den einzelnen Platten unterschiedlich große Fehlstellen eingebaut. Die unzureichende Haftung der Schicht wurde durch das Einlegen von Papierstreifen umgesetzt, wodurch auch die Breite der Fehlstelle definiert

werden konnte. Abbildung 6 zeigt das Messsignal vor und nach dem Beschichten mit einer 10 mm breiten Fehlstelle. Wie zu erwarten führt die aufgebrauchte Schicht zu einer Dämpfung der A0-Mode, ohne die Position dieser relevant zu verschieben. Auffällig ist jedoch das zusätzliche Wellenmuster hinter der eigentlichen A0-Mode. Aus dieser kann man schlussfolgern, dass es eine Reflexion der Schallwellen an dem Übergang zwischen der beschichteten Stahlplatte und dem Teil ohne Schaumschicht geben muss. Da sowohl das Eintreten von Wasser als auch das Ablösen der Schicht immer einer Fehlstelle in der Beschichtung entspricht, wurde das Messprinzip dahingehend geändert, dass anstelle einer Vielzahl von Sender-Empfänger-Laufstrecken ein Phased-Array-System eingesetzt wird.



**Abbildung 6: Vergleich einer nicht beschichteten Platte (Referenz) mit einer beschichteten Platte mit künstlich eingebrachter Fehlstelle: Neben der Amplitudendämpfung können zusätzliche Wellenmuster beobachtet werden, die durch Reflexionen an Strukturgrenzen der Fehlstelle entstehen.**

### Phased-Array-System

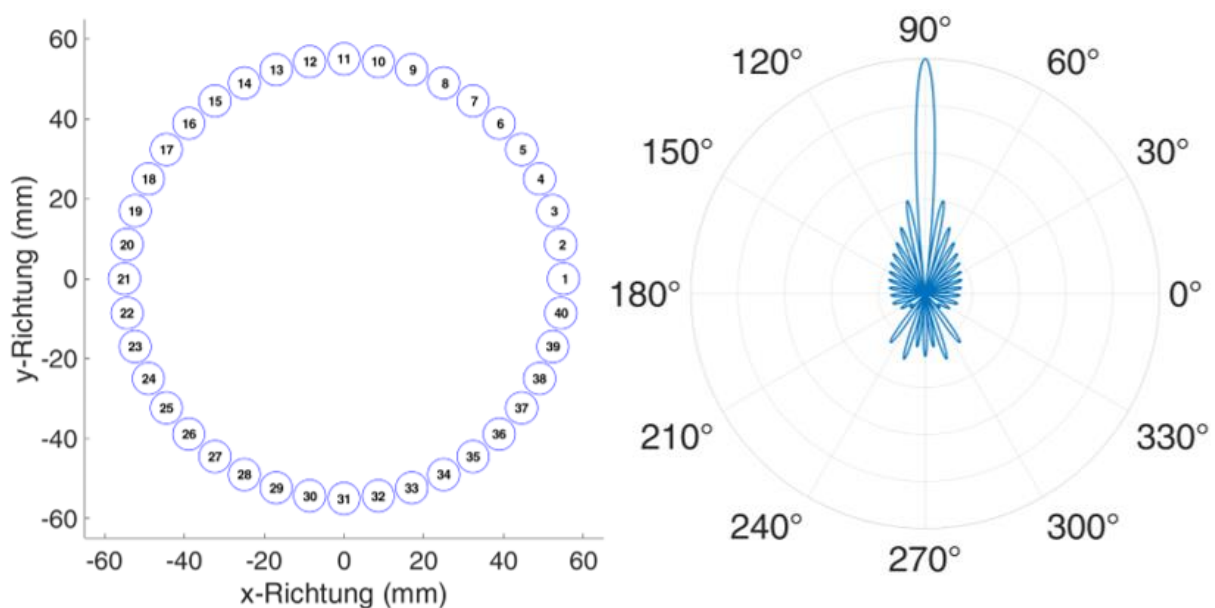
Bei der ursprünglich geplanten Messmethode sollte die Amplitudenänderung und Signallaufzeitverschiebung von Signalen zwischen zwei Piezopaaren, von denen einer als Sender und der andere als Empfänger fungiert, ausgewertet werden. Hierbei erhält man allerdings nur Informationen über den Zustand des Messsystems auf einer Linie zwischen den zwei Sensoren. Durch eine Vielzahl an Sensoren und die Auswertung von unterschiedlichsten Signalpfaden lässt sich zwar eine Oberfläche überwachen, die Anzahl der Sensoren für eine genaue Positionsbestimmung der Fehlstellen ist allerdings relativ hoch. Zudem benötigt jeder Sensor zwei Signalleitungen, was bei größeren Messflächen einen erheblichen Verkabelungsaufwand und Materialeinsatz bedeutet. Eine weitere Herausforderung dieser Methode ist die Temperaturabhängigkeit der Signalamplitude und Signallaufzeit. Diese müsste durch das Aufnehmen von Kalibriermessungen für das Messsystem bestimmt und während des Betriebs ständig kompensiert werden.

Das Auftreten von Reflexionen an den zu detektierenden Fehlstellen ermöglicht stattdessen den Einsatz eines sogenannten Phased-Array-Systems. Hierbei wird eine Vielzahl von Sensoren an einer einzelnen Position auf der zu überwachenden Oberfläche angebracht. Jeder dieser Sensoren kann dabei als Sender und Empfänger fungieren. Bei dem im Vorhaben aufgebauten Messsystem kommen insgesamt 40 Sensoren, die kreisförmig angeordnet sind, zum Einsatz. Die von jeweils einem Piezo kreisförmig ausgesendeten geführten akustischen Wellen breiten sich auf der zu überwachenden Oberfläche aus und werden beim Vorhandensein einer Fehlstelle an dieser reflektiert. Das reflektierte Signal wird von den 40 Sensoren wiederrum gemessen und kann anschließend ausgewertet werden. Durch die

bekannte Anordnung der einzelnen Sensoren zueinander können die einzelnen Messsignale so miteinander verrechnet werden, dass am Ende eine Bestimmung der Position der Fehlstelle möglich ist, von der die ausgesendete Schallwelle reflektiert wurde.

### Algorithmus zur Messdatenverarbeitung

Für den Aufbau eines solchen Phased-Array-Messsystems wurde sich im Rahmen dieses Projektes intensiv mit der Auslegung von Phased-Arrays auseinandergesetzt. Besonders entscheidend ist dabei die Auswertung der aufgenommenen Messdaten, die letztendlich eine räumliche Bestimmung der Fehlstelle ermöglicht. Hierfür existieren eine Vielzahl an Ansätze (Holmes et al. 2005; Holmes et al. 2008; Sumana et al. 2021; Xu und Wang 2022) die alle Vor- und Nachteile mit sich bringen. Unter Berücksichtigung der bisherigen Erkenntnisse sowie der Anforderungen an das Messsystem wurde sich für die unter dem Namen total focusing method (TFM) bekannte Methode entschieden (Holmes et al. 2005, 2004; Muller et al. 2017; Zhang et al. 2019; Li et al. 2022). Das Phased-Array wurde dabei als Circular-Ring ausgelegt. Diese kreisförmige Anordnung der insgesamt 40 Sensoren resultiert in einer nahezu gleichbleibenden 360° Empfindlichkeit um das Phased-Array herum. Die Anordnung der Sensoren ist in Abbildung 7 links zu sehen. Dadurch, dass alle 40 Sensoren sowohl Sender, als auch Empfänger sind, ergibt sich bei jeder Messung ein Datensatz aus 1600 Signalen. Die winkelabhängige Abstrahlung des Arrays lässt sich rechnerisch bestimmen und ist in Abbildung 7 rechts dargestellt. Die Abstrahlcharakteristik ist dabei beispielhaft für 90° abgebildet und ist für alle anderen Winkel näherungsweise identisch.



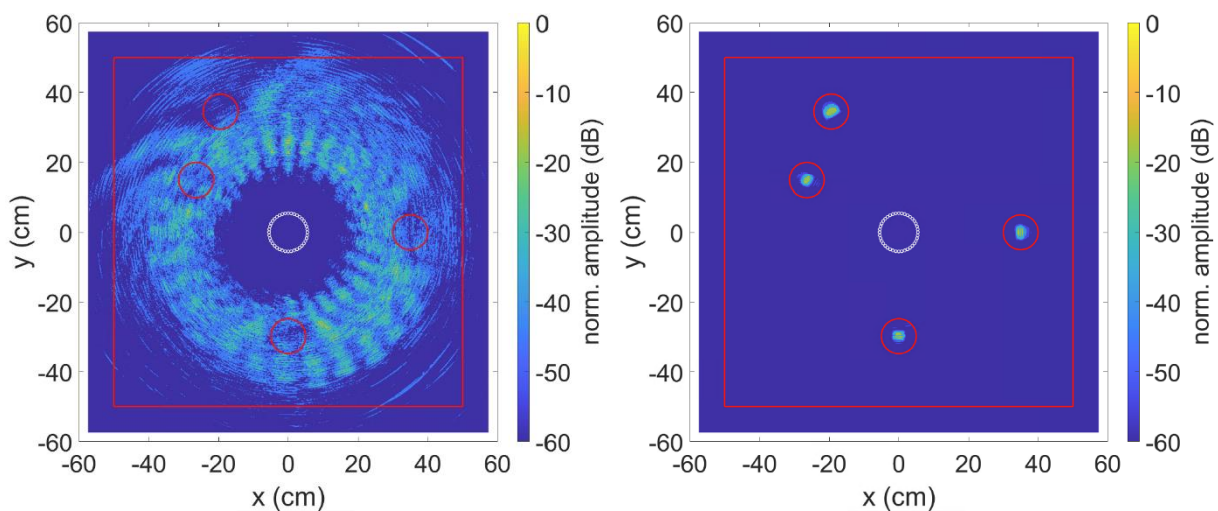
**Abbildung 7: Circular-Ring Phased-Array (links) mit der dazugehörigen Abstrahlcharakteristik (rechts) für einen 90° Beamwinkel**

Bei der eingesetzten TFM wird die zu überwachende Oberfläche in kleine Zellen zerlegt. Anhand der bekannten Position der einzelnen Sensoren sowie der Abstände zwischen den Sensoren und jeder einzelnen Zelle werden die aufgenommenen Signale miteinander verrechnet und man erhält so einen Wert für die jeweilige Zelle. Je höher der berechnete Wert ist, desto stärker wurde die ausgesendete Schallwelle im Bereich der Zelle reflektiert. Die Reflexion der Schallwelle an einer Fehlstelle führt somit zu einer lokalen Erhöhung der Zellenwerte und kann durch eine visuelle Darstellung aller berechneten Zellen sichtbar gemacht werden.

Die Genauigkeit des Standard TFM Algorithmus kann durch unterschiedlichste Erweiterungen erhöht werden. Besonders wirkungsvoll sind dabei Varianten, die die Phase der Signale berücksichtigen

(Camacho et al. 2009; Camacho et al. 2020). Eine dieser Erweiterungen ist die sign coherence factor (SCF). Ein Problem liegt dabei allerdings in der dispersiven Eigenschaft der verwendeten Lambwellen. Durch Dispersionseffekte kommt es zu einer Phasenverschiebung innerhalb der Signale die den Einsatz der SCF Erweiterung verhindern. Um dies zu umgehen müssen zuerst die Dispersionseffekte herausgerechnet werden. Die dabei eingesetzte Methode und die dadurch erzielbaren Ergebnisse werden aktuell in der wissenschaftlichen Fachzeitschrift Sensors vom MDPI-Verlag publiziert und befindet sich noch im Review-Prozess.

In Abbildung 8 ist das Ergebnis des TFM Algorithmus mit SCF Erweiterung dargestellt. Angewendet wurde dieser auf einen simulierten Datensatz. Dabei wurden die theoretischen Empfangssignale für eine quadratische Aluminiumplatte mit 1 m Kantenlänge und 1,5 mm Dicke bei der Präsenz von vier punktförmigen Fehlstellen berechnet. Die Position der Fehlstellen sind durch rote Kreise markiert. Das links dargestellte Bild zeigt das Ergebnis des SCF TFM Algorithmus ohne Kompensation der Dispersionseffekte. Eine Lokalisierung der Fehlstellen ist dabei unmöglich. Rechts dargestellt ist das Ergebnis mit kompensierten Dispersionseffekten. Der TFM Algorithmus mit SCF Erweiterung ist dabei in der Lage die Position der vier Fehlstellen eindeutig zu identifizieren und diese farblich hervorzuheben.



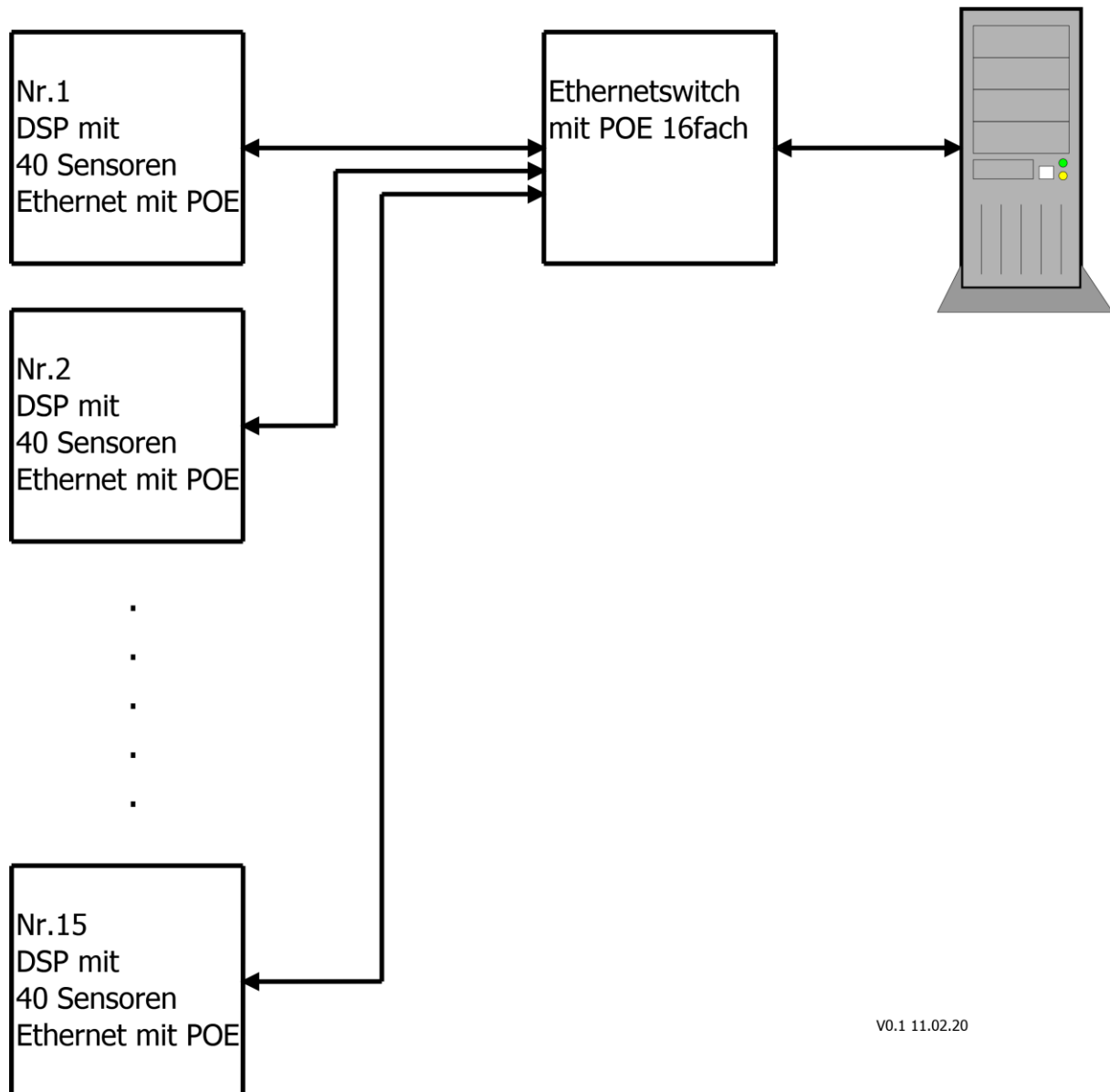
**Abbildung 8: Ergebnis des SCF TFM Algorithmus ohne (links) und mit (rechts) Dispersionskompensation für vier simulierte Fehlstellen. Die roten Kreise kennzeichnen die Position der Fehlstellen.**

### Entwicklung des Datenerfassungssystems

Aufgrund der Größe der Außenhaut des Schiffes kann diese nicht nur mit einem Sensorsystem überwacht werden. Während der Fertigung lässt sich die Überprüfung von unterschiedlichen Flächen durch das Versetzen des flexibel ankoppelbaren Phased-Array-Sensorkopfs realisieren. Für eine Langzeitüberwachung während des Schiffsbetriebs werden jedoch mehrere Sensoreinheiten benötigt. Diese müssen mit Spannung versorgt und angesteuert werden. Funksysteme zum Datenaustausch und zur Steuerung des Sensorsystems sind aufgrund der massiven Stahl-Außenhaut des Schiffes keine Option. Aus diesem Grund blieb nur die kabelgebundene Variante übrig. Um nicht jedes Sensorsystem mit Speicher und viel Rechenleistung auszustatten, wurde ein Konzept entwickelt, bei welchem jede Sensoreinheit die Messdaten an eine zentrale Recheneinheit schickt (siehe Abbildung 9). Das Datenaufkommen ist relativ groß, da jeder Piezo als Sender und Empfänger dient. Somit wurde bei der Sensoreinheit eine Netzwerkschnittstelle mit einer Datenübertragungsrate von 100 Mbit/s implementiert, über die Daten in beide Richtungen übertragen werden können. Die erste Variante des Datenerfassungssystems wurde über eine UART-Schnittstelle realisiert und entsprechend über USB an den Laptop angeschlossen. Die aufkommende Menge an zu übertragenden Daten führte jedoch dazu, dass eine einzelne Messung – bestehend aus 1600 Einzelmessungen, da jeder der 40 Piezos sowohl senden, als auch empfängt – ein bis zwei Stunden dauerte. Durch den Einsatz der Netzwerkschnittstelle konnte diese Zeit auf etwa fünf Minuten reduziert werden. Um keinen größeren Verkabelungsaufwand auf dem Schiff zu erzeugen, wurde die Spannungsversorgung über das Netzkabel mit realisiert.

Dies ist eine gängige Praxis und ist bekannt unter POE (Power over Ethernet). Im POE Standard stehen für jedes Sensorsystem bis zu 12 W Leistung zur Verfügung. Für die zentrale Datenauswertung wird ein Laptop eingesetzt. Auf diesem werden die Daten gespeichert und ausgewertet. Geplant war bis zu 16 Sensorsysteme auf dem Schiff an kritischen Stellen zu verteilen. Durch das Netzwerkprotokoll TCP/IP ist das System nicht beschränkt und kann auf mehrere hunderte Sensorsysteme erweitert werden.

Dezentrales AD-Sampling mit Zentraler Datenauswertung  
Übertragung erfolgt über Ethernet mit POE



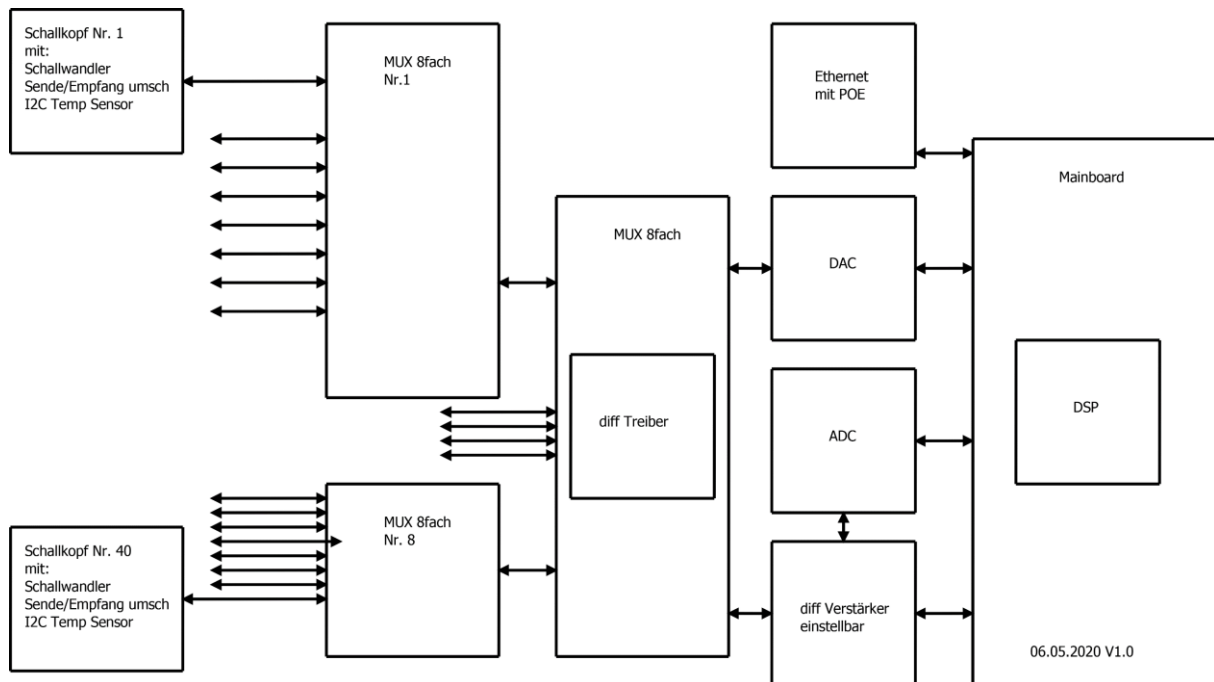
V0.1 11.02.20

Abbildung 9: Konzept zentrale Datenauswertung

Ein Sensorsystem besteht aus 40 Piezos, die alle Senden und Empfangen können, Vorverstärkern in unmittelbarer Nähe zum Piezo, analogen Schaltern (Multiplexer), die für das Umschalten der einzelnen Piezos (Kanäle) zuständig sind und einem einstellbarem Verstärker, der jeden Kanal verstärkt, so dass der nachgeschaltete ADC (Analog Digital Wandler) voll angesteuert werden kann. Weiterhin gehört zum Sensorsystem ein DSP, der den Messablauf steuert und die Daten speichert und zur zentralen Datenauswertung mittels Ethernet überträgt (siehe Abbildung 10). Für das Senden lädt der DSP mit einer Datenrate von 30 MHz digitale Daten in den DAC (Digital-Analog-Wandler). Der DAC wandelt dies



in ein Spannungssignal. Dieses wird vom differentiellen Treiber auf 20 Vpp verstärkt. Über den MUX wird das Sendesignal dann zu dem jeweiligen Piezo geschaltet, der senden soll.



**Abbildung 10: Platinen Konzept Sensorsystem**

Das Schaltungskonzept (siehe Abbildung 11) gibt einen Ausschnitt vom gesamten Sensorsystem wieder.

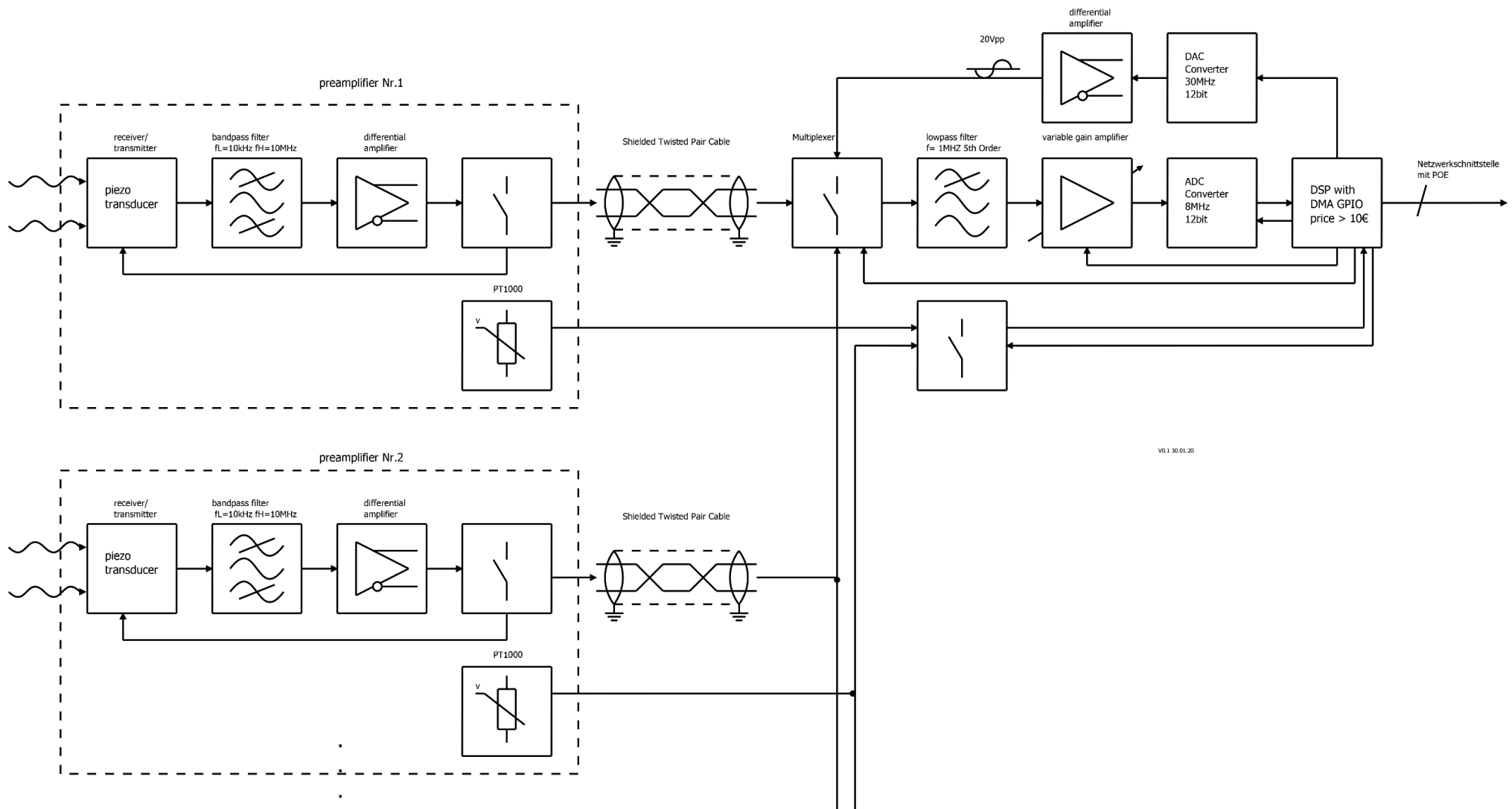


Abbildung 11: Schaltungskonzept Sensorsystem

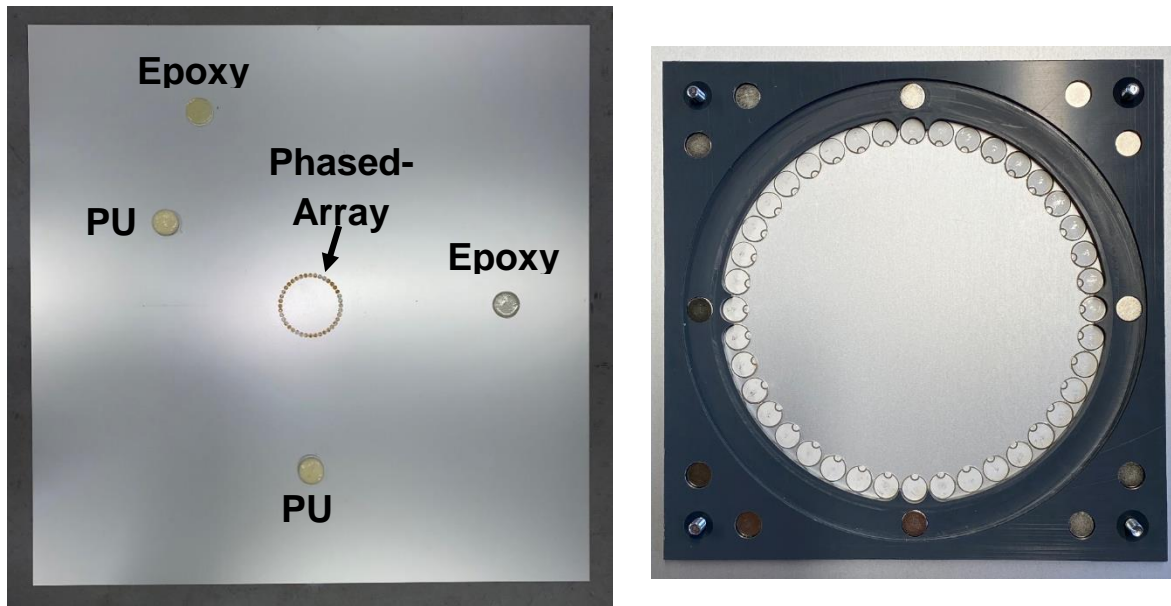
Jeder Piezo hat somit zwei Aufgaben, das Senden von geführten akustischen Wellen und das Empfangen der reflektierten Wellen. Die Umsetzung war insofern technisch herausfordernd, da die Piezos mit 20 Vpp getrieben werden mussten, um mit möglichst viel Sendeleistung auf den Stahl zu übertragen und so eine ausreichend hohe Amplitude im Empfangssignal zu erzeugen. Trotz dieser hohen Spannung war der Pegel des empfangenen Signals kleiner als 1 mVpp. Um ein störungsunempfindliches System zu realisieren wurde der Sendepfad und Empfangspfad differenziell umgesetzt. Dies fängt direkt am Piezo an, hat aber die erschwerende Aufgabe das der Piezo mit seinen Kontakten keine elektrische Verbindung zu dem Messobjekt haben darf. Zum Senden der GAW wurden niederohmige Spannungsquellen entwickelt. Für den Empfang der reflektierten Wellen wurde ein hochohmiger Verstärker in direkter Nähe jedes Piezos angebracht. Damit das Senden und Empfangen mit dem gleichen Piezo möglich ist, musste jeder Piezo mit Analogschaltern ausgestattet werden. Dieser schaltet den Piezo für das Senden bzw. Empfangen um. Die Analogschalter induzieren beim Schalten eine Spannungsspitze im Empfangspfad, was zur Folge hat, dass diese erst wieder entladen werden muss und somit zu einer Totzeit nach dem Senden führt, wenn auf dem Piezo gesendet und sofort danach Empfangen werden muss. Für die Verringerung der Totzeit wurden mehrere Ansätze verfolgt und deren Eignung überprüft.

Die Sendespannung von 20 Vpp ist für die Verstärkerstufe 1 kein Problem, aber für die Verstärkerstufe 2. Daher wurde zwischen den zwei Stufen ein Analogschalter eingefügt, der verhindert, dass während des Sendens und beim Umschalten Spannungsspitzen die 2. Verstärkerstufe erreichen. Schaltpläne der zwei Verstärkerstufen sind im Anhang in Abbildung 24 und Abbildung 25 dargestellt. Mit diesen Anpassungen war es möglich die Totzeit soweit zu reduzieren, dass sie keine relevante Auswirkung mehr hat.

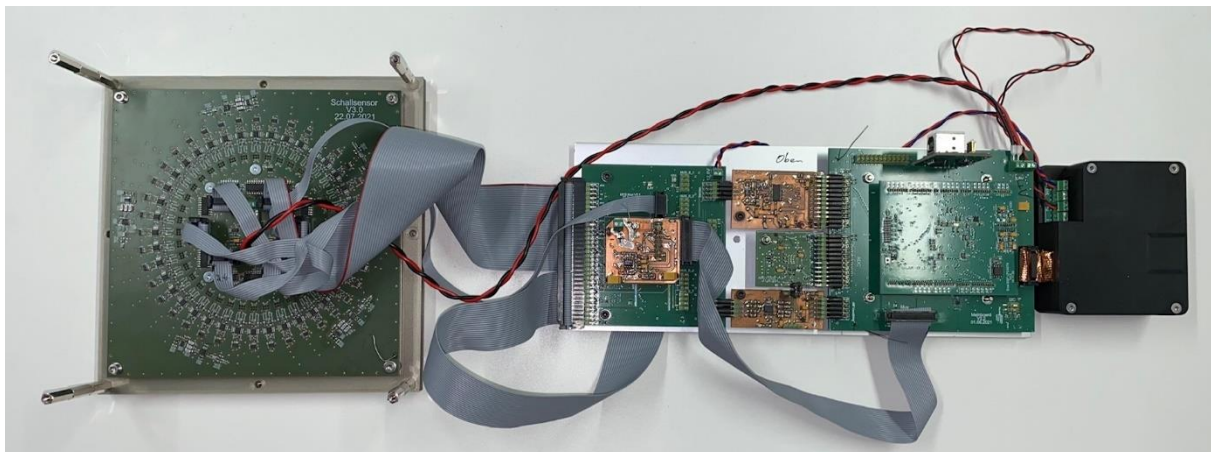
### **Detektion von Fehlstellen auf einer Aluminiumplatte**

Zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Sensorsystems wurde zunächst eine quadratische Aluminiumplatte mit 1 m Kantenlänge und 1,5 mm Dicke verwendet. Die Schallausbreitungseigenschaften sind dabei sehr ähnlich zu denen einer Stahlplatte. Durch die bekannten Materialeigenschaften und einer sehr gleichmäßigen Dicke ermöglichte die Aluminiumplatte die Untersuchung und Optimierung des Sensorsystems, ohne, dass die Einflüsse der Fertigungstoleranzen der später zu vermessenden Stahlplatten eine Rolle spielten. Durch das Aufkleben der Piezokeramiken auf die Aluminiumplatte wurde zudem ein Messsystem erzeugt, das im Vergleich zu einer Clamp-On-Variante reproduzierbare Ergebnisse liefert. Das aufgeklebte Circular-Ring-Array bestehend aus 40 Einzelsensoren und ist in Abbildung 12 zu sehen.

Die erste Variante des Datenerfassungssystems ist in Abbildung 13 dargestellt. Der links zu sehende Clamp-On-Sensorkopf wird dabei auf die in Abbildung 12 rechts dargestellten Halterung aufgeschraubt, die wiederum über Magnete in der Halterung und auf der Rückseite der Aluminiumplatte gehalten wird. Die Kontaktierung der Piezos erfolgte über Federkontakte.



**Abbildung 12: (links) Aluminiumplatte mit Piezo-Phased-Array und je zwei Fehlstellen aus flexiblem Polyurethanschaum (PU) und Epoxidharz, (rechts) Ringförmiges Piezo-Phased-Array mit Kunststoffhalterung für die Sensor-Kopf-Elektronik**



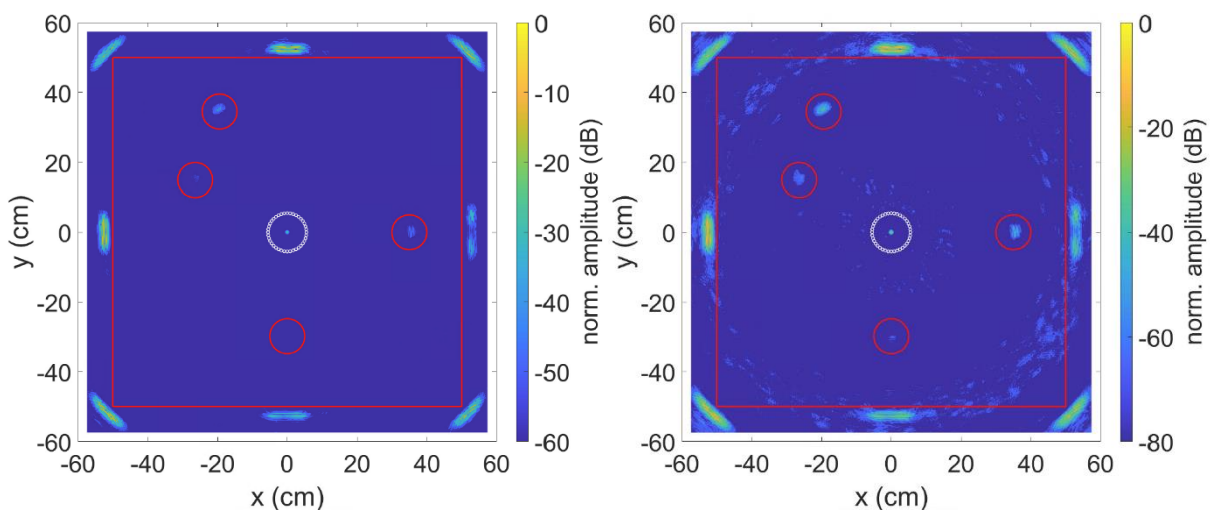
**Abbildung 13: Phased-Array-Sensorkopf mit Ansteuerungselektronik und Netzwerkschnittstelle**

Zur Simulation von zu erkennenden Fehlstellen wurden je zwei Kreise aus flexiblem Polyurethanschaum und Epoxidharz mit einem Durchmesser von 46 mm auf die Aluminiumplatte gegossen. Die so simulierten Fehlstellen sind in Abbildung 14 zu sehen. Dadurch ergibt sich, wie bei den später zu überwachenden Schiffsplatten, ein Übergang von einem Bereich mit und einem Bereich ohne Schaum an dem die Schallwellen reflektiert werden. Der gewählte Polyurethanschaum ist dabei weich und flexibel und stellt somit eine sehr schwach reflektierende und somit schwer zu erkennende Fehlstelle dar. Damit sollten die Grenzen des Messsystems untersucht werden. Das Epoxidharz hingegen ist relativ hart und ähnelt somit der auf den Stahlplatten aufgetragenen Schicht.



**Abbildung 14: Simulierte Fehlstelle aus flexiblem Polyurethanschaum (links) und Epoxidharz (rechts) mit einem Durchmesser von 46 mm**

Das Ergebnis der durchgeführten Messung und der Auswertung mit dem SCF TFM Algorithmus ist in Abbildung 15 dargestellt. Hierbei sind die Plattenkanten rot eingezeichnet und die Position der Fehlstellen durch einen Kreis mit 10 cm Durchmesser markiert. Im Zentrum der Platte sind zudem die 40 Piezosensoren als weiße Kreise angedeutet. Gut zu erkennen sind die vier Ecken der Aluminiumplatte sowie die Plattenkanten, die horizontal und vertikal zum Sensorarray liegen. Von diesen Positionen aus werden die vom Phased-Array ausgesendeten Schallwellen zurück zum Sensor reflektiert und können somit als Reflexionsstellen farblich hervorgehoben werden. Im linken Bild ist zudem zu erkennen, dass drei der vier aufgetragenen Fehlstellen lokalisiert werden können. Dabei sind die Fehlstellen aus Epoxidharz sehr gut zu erkennen und eine der Polyurethanschaum-Fehlstellen ist leicht hervorgehoben. Die in der Abbildung dargestellten Daten wurden dabei so normiert, dass die stärkste Reflexion den Wert 1 hat und somit in einer Dezibeldarstellung 0 entspricht. Der links dargestellte Farbbereich geht bis -60 dB. Das bedeutet, dass die vierte nicht erkannte Fehlstelle eine Reflexion hervorruft, die mehr als Faktor 1000 unterhalb der Reflexion an den Plattenkanten liegt. Durch das Erhöhen des dargestellten Datenbereichs auf -80 dB und damit einem Faktor von 10.000 zwischen kleinstem und größtem Wert, ist auch die vierte Fehlstelle erkennbar. In den Bereichen außerhalb der Fehlstellen treten dann jedoch Artefakte auf, die überwiegend auf Signalrauschen und diversen Fertigungstoleranzen des gesamten Versuchsaufbaus und Messsystems zurückzuführen sind. Durch diesen Versuch konnten somit auch die Grenzen des aufgebauten Messsystems ausgelotet werden.



**Abbildung 15: Ergebnis des SCF TFM Algorithmus für eine Aluminiumplatte mit vier Fehlstellen mit 60 (links) und 80 dB (rechts) Datenbereich. Die roten Kreise kennzeichnen die Position der Fehlstellen.**

## Entwicklung eines ankoppelbaren Phased-Array-Sensorkopfs

Für die Messungen an den Schiffsplatten wurde ein Clamp-On-Schallkopf entwickelt, der eine flexible Ankopplung des Messsystems an unterschiedliche zu untersuchende Platten ermöglicht. Zum Ausgleichen von Oberflächenunebenheiten oder leicht gekrümmten Flächen wurde die einzelnen Sensoren über eine flexible Leiterplatte kontaktiert. In Abbildung 16 ist der Schichtaufbau der 40 einzelnen Sensoren zu sehen. Die Piezos wurden dabei zwischen zwei Kontaktflächen auf die flexible Leiterplatte gelötet. Neben der elektrischen Kontaktierung konnten durch das Mehrschichtsystem der Leiterplatte auch eine Schirmung eingebracht werden, die die Piezos vor dem Einkoppeln von elektromagnetischen Störungen schützt und somit die Signalqualität erhöht. Zudem ermöglicht die Leiterplatte eine genaue Positionierung der Piezos zueinander. Die Kenntnis über die genaue Position der Sensoren zueinander ist für den Einsatz des SCF TFM Algorithmus essentiell. Das Edelstahlbacking oberhalb der Sensoren sorgt dafür, dass ein größerer Teil der Schallenergie vom Piezo in die Stahlplatte gelangen kann und erhöht somit die Signalamplitude. Ein durch 3D-Druck direkt in den Messkopfgehäuse integrierter Federmechanismus sorgt dafür, dass die Piezos mit ausreichend Kraft auf die zu überwachende Oberfläche gedrückt werden. Dies ist ebenfalls für eine möglichst hohe Signalamplitude entscheidend. Durch kugelförmige Auflagepunkte der Federn und dem Einsatz einer flexiblen Leiterplatte können dabei auch Unebenheiten auf der Oberfläche ausgeglichen werden.

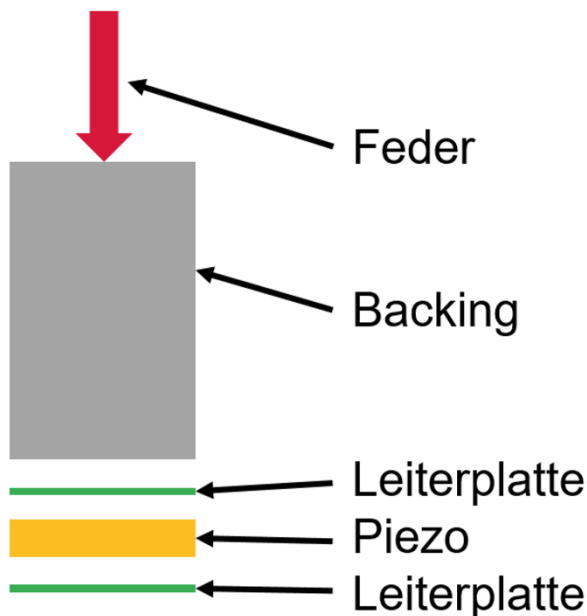


Abbildung 16: Schichtaufbau der einzelnen Piezosensoren

Abbildung 17 zeigt die flexible Leiterplatte mit den 40 Piezosensoren. Mit den in der Mitte des Rings befindlichen Stiftleisten kann diese mit den darüber befindlichen festen Leiterplatten aus FR4-Material verbunden werden. Das 3D-gedruckte Gehäuse für den Sensorkopf mit den integrierten Federelementen ist in Abbildung 18 links zu sehen. Auf der rechten Seite ist die Unterseite des zusammengebauten Sensorkopfs abgebildet. Gut zu erkennen ist das durch die Federn verursachte Herausdrücken der einzelnen Sensoren. Durch das Auflegen des Clamp-On-Sensors werden die Piezos in die eigentliche Messposition zurückgedrückt und dabei eine definierte Anpresskraft der einzelnen Sensoren erzeugt.



Abbildung 17: Circular-Ring Phased-Array mit Backing und flexibler Leiterplatte

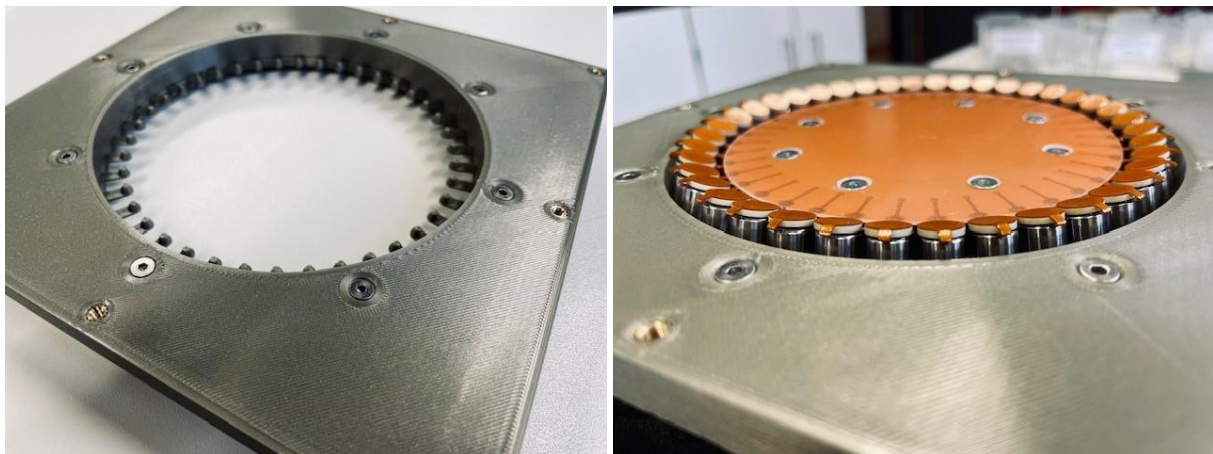
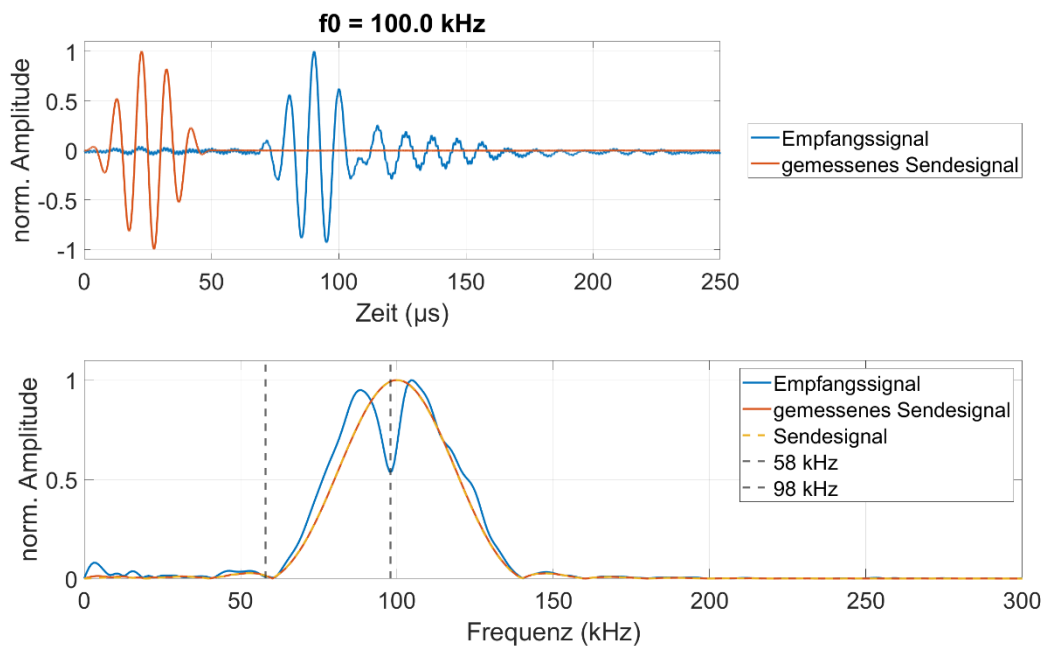


Abbildung 18: (links) 3D gedruckte Sensorkopfhaltung mit Federelementen, (rechts) Unteransicht des Sensorkopfs mit eingebautem Circular-Ring Phased-Array

### Simulative und Experimentelle Untersuchung der Schallausbreitung auf einer Stahlplatte mit PUR-Schicht

Mit dem aufgebauten Clamp-On-Messsystem wurden anschließend Messungen an einer 6 mm Stahlplatte mit 14 mm PUR-Schicht durchgeführt. Dabei wurde neben der Anregefrequenz auch die Anzahl der Sinusschwingungen im Sendesignal variiert. Eines der dabei aufgenommenen Signale ist in Abbildung 19 oben dargestellt. Auffällig ist, dass die Form des blau dargestellten Empfangssignals, welches durch den Abstand zwischen Sender und Empfänger zeitlich verschoben ist, stark von dem orange dargestellten Sendesignal abweicht. Die Ursache dafür lässt sich im darunter abgebildeten dazugehörigen Frequenzspektrum erkennen. Im Bereich um 98 kHz gibt es einen Amplitudeneinbruch im Empfangssignal. Das Fehlen dieser Frequenzen führt letztendlich zu der Signalverformung und Signalstreckung im Zeitbereich. Eine derartige Veränderung der Signale hat jedoch auch Auswirkungen auf die Ergebnisse des eingesetzten SCF TFM Algorithmus. So wird durch die langgezogene Signalform die räumliche Auflösung minimiert und damit auch die Fähigkeit, Fehlstellen genau zu lokalisieren.



**Abbildung 19: Signalverzerrungen und Frequenzeinbrüche durch das Aufbringen einer 14 mm PUR-Schicht auf eine 6 mm Stahlplatte**

Die Ursache für das Fehlen von gewissen Frequenzen lässt sich durch das Berechnen der zu den Stahlplatten mit Schaumschicht gehörenden Dispersionsdiagrammen beschreiben. Das Dispersionsdiagramm visualisiert dabei die frequenzabhängige Phasengeschwindigkeit der ausbreitungsfähigen Moden. Die blauen Kurven in Abbildung 20 zeigen die zwei berechneten Grundmoden A0 und S0 einer 6 mm dicken Stahlplatte, wobei der Sensor die A0-Mode dominant anregt. Durch das Aufbringen der 14 mm dicken PUR-Schicht kommen eine Vielzahl von zusätzlichen Moden dazu. Diese entstehen durch die Interaktion der sich ausbreitenden Welle in der Stahlplatte mit dem Schaum. In den Bereichen, in denen sich die schwarzen und blauen Kurven kreuzen, wird ein Großteil der in der Welle enthaltenen Energie nicht mehr innerhalb der Stahlplatte, sondern innerhalb der Schaumschicht transportiert. Die Energie verschwindet dabei nicht, sie wird nur in einer anderen Schicht des Mehrschichtsystems transportiert. Nachdem der Sensor allerdings auf der Stahlplatte aufgebracht ist, bedeutet dies, dass die sich im Schaum ausbreitende Welle nicht mehr detektiert werden kann, wodurch die in Abbildung 19 dargestellten Signalverzerrungen entstehen.



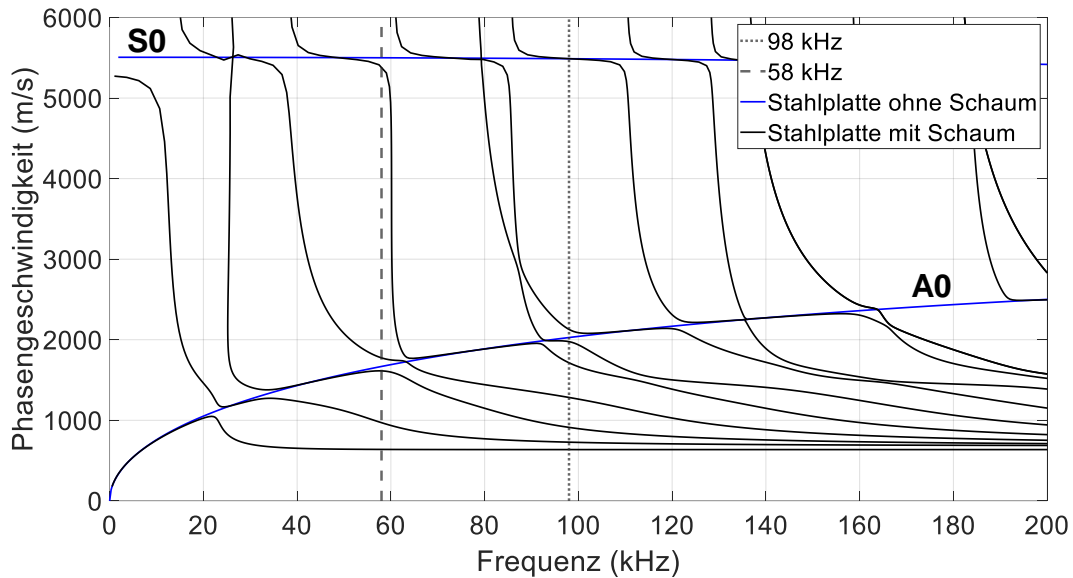


Abbildung 20: Dispersionsdiagramm einer 6 mm Stahlplatte ohne und mit 14 mm PUR-Schicht

Durch eine gezielte Anpassung des Sendesignals und eine damit verbundene Manipulation der verwendeten Frequenzen können diese Effekte jedoch weitestgehend verhindert werden. In Abbildung 21 ist dies beispielhaft dargestellt. Durch die Veränderung der Anrefrequenz und Anpassung der Periodenanzahl des Sendesignals kann ein Bereich im Dispersionsdiagramm verwendet werden, in dem sich die Energie der ausbreitenden Wellen überwiegend innerhalb der Stahlplatte befindet. Dadurch lässt sich eine nicht kontrollierbare Beeinflussung der räumlichen Auflösung des Sensorsystems umgehen.

Das Entstehen von Frequenzeinbrüchen durch das Aufbringen einer Schaumschicht auf die Stahlplatte kann jedoch auch als Messmethode eingesetzt werden. So hat unter anderem die Dicke der Schaumschicht einen Einfluss auf die Position der Frequenzeinbrüche. Durch die Bestimmung der Position lässt sich somit auf die Dicke der dafür notwendigen Schaumschicht zurückrechnen. Das dahintersteckende Potential zur Schichtdickenbestimmung soll in weiteren Untersuchungen im Anschluss an dieses Projekt genauer analysiert werden.

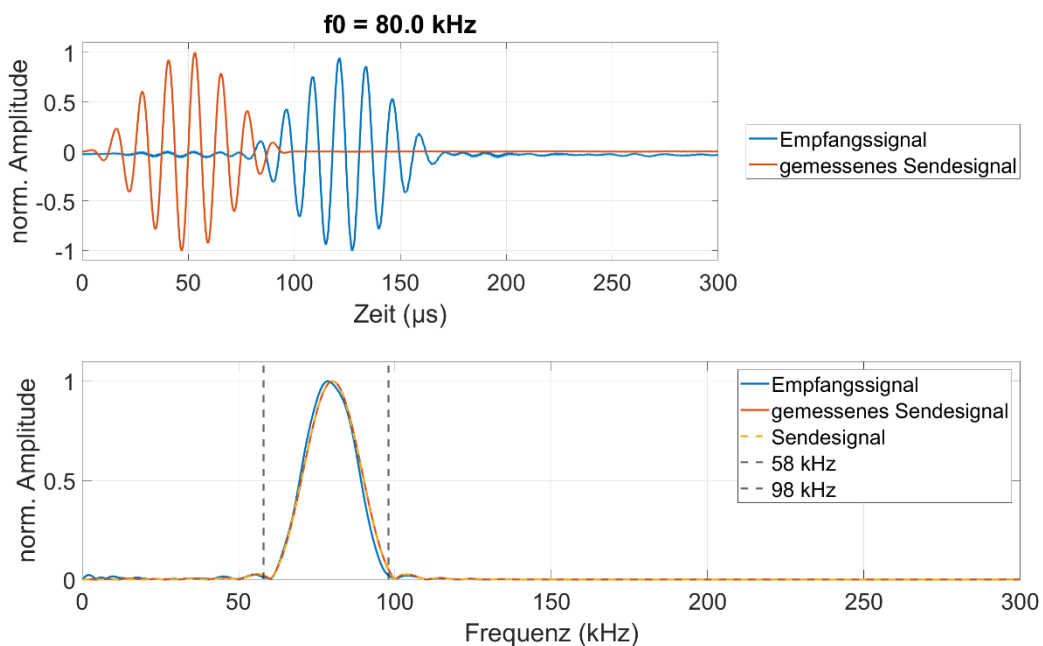


Abbildung 21: Zeitsignal und Frequenzspektrum des optimierten Sendesignals

## Detektion einer Schichtablösung auf einer 6 mm Stahlplatte

Nachdem geeignete Anregfrequenzen und Periodenanzahlen bestimmt wurden, konnten Versuche zur Schichtablösung durchgeführt werden. Hierzu wurde bei einer quadratischen Stahlplatte mit 1 m Kantenlänge und 6 mm Dicke, auf der eine 14 mm dicke PUR-Schicht aufgebracht war, ein Stück des Schaums herausgeschnitten. Der sich so ergebende Übergang zwischen Bereichen mit und ohne Schaumschicht ähnelt dem Übergang zu einem Bereich, in dem sich die Schaumschicht abgelöst hat. Das Ergebnis des SCF TFM Algorithmus ist in Abbildung 22 dargestellt. Neben den acht Reflexionen an den Plattenkanten und Plattenecken ist eine weitere Reflexion an der eingebrachten Fehlstelle zu erkennen. Der entwickelte Sensor ist somit in der Lage, die genaue Position der eingebrachten rechteckigen Fehlstelle zu erkennen und diese visuell darzustellen.

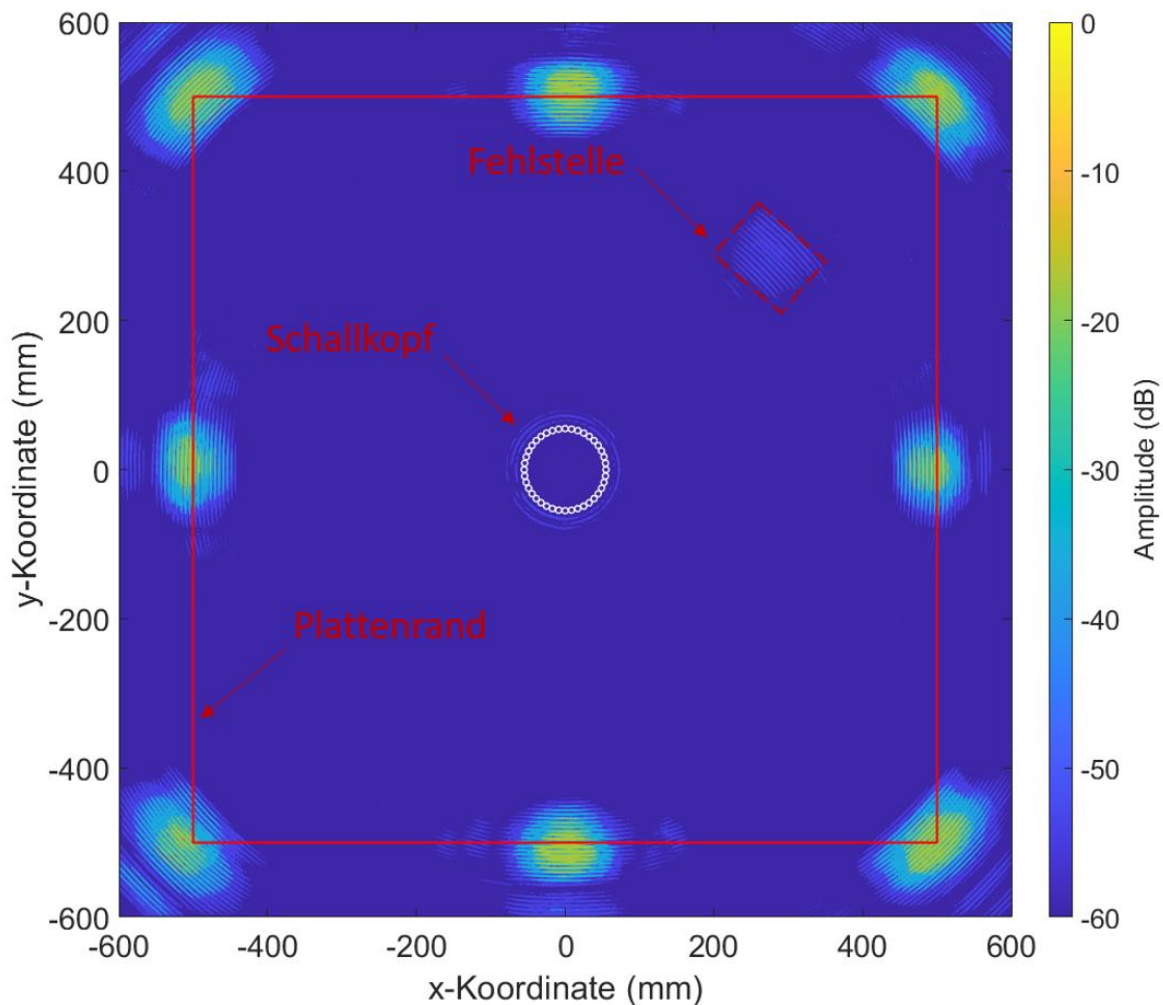
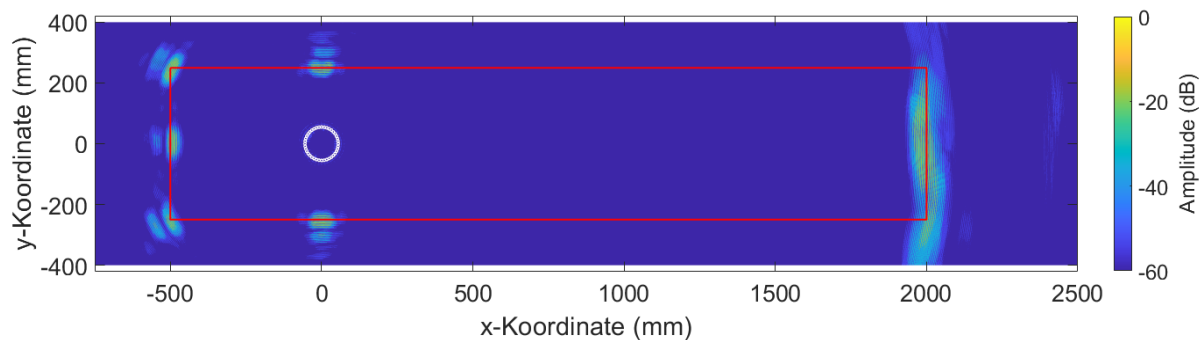


Abbildung 22: Ergebnisse der Messungen an einer 6 mm dicken Stahlplatte mit 14 mm PUR-Schicht und einer künstlich eingebrachten Fehlstelle

## Erweiterbarkeit des Messsystems auf größere Stahlplatten

Die bisherigen Versuche wurden auf Stahlplatten mit maximal 1 m Kantenlänge durchgeführt. Für den Einsatz an einem Schiff müssen jedoch deutlich größere Flächen überwacht werden. Die dafür benötigte Schallausbreitung über mehrere Meter hinweg wurde bereits bei der Entwicklung des Sensorsystems berücksichtigt. Dabei ist besonders die eingesetzte Arbeitsfrequenz entscheidend, da diese eine direkte Auswirkung darauf hat, wie weit sich Schallwellen ausbreiten bis sie z.B. durch eine auf die Stahlplatte aufgetragene Schaumschicht zu stark gedämpft werden und damit nicht mehr detektiert werden können.

In Abbildung 23 ist das Ergebnis der Messung an einer 50 cm breiten, 250 cm langen und 6 mm dicken Stahlplatte mit PUR-Schicht und zusätzlicher Lackschicht dargestellt. Der Sensorkopf ist dabei so positioniert, dass sich ein Abstand von 2 m zur rechten Plattenkante ergibt. Der Sensor ist dabei weiterhin in der Lage die Reflexion an dieser Plattenseite zu erkennen. Lediglich die räumliche Auflösung hat sich im Vergleich zu den bisherigen Messungen reduziert, was anhand des größeren, farblich hervorgehobenen Bereichs an der rechten Plattenkante im Vergleich zur linken Plattenkante erkennbar ist. Dies liegt daran, dass die räumliche Auflösung – die Winkelauflösung des Sensors – direkt proportional zum Abstand der reflektierenden Stelle vom Sensor ist. Bezogen auf einen späteren Einsatz an einem Schiff bedeutet das, dass der Sensor ohne Probleme Signale detektieren kann, die von einer 2 m entfernten Position reflektiert wurden. Die Schallwelle selbst hat dabei 4 m Signallaufstrecke zurückgelegt. Durch die außermittige Positionierung des Sensors kann die Messung mit einer quadratischen Fläche mit 4 m Kantenlänge verglichen werden, wenn der Sensor in der Mitte positioniert wird. Dadurch ergibt sich eine zu überwachende Oberfläche von 16 m<sup>2</sup>, die experimentell überprüft wurde.



**Abbildung 23: Ergebnisse der Messungen an einer 50 cm breiten, 250 cm langen und 6 mm dicken Stahlplatte mit PUR-Schicht**

### **Experimentelle Untersuchung der Schallausbreitung auf der Außenseite**

Neben der Sensoranbringung auf der Stahlseite des aus Stahl, PUR-Schicht und Lackschicht bestehenden Mehrschichtsystems wurde auch die Anbringung auf der Lackseite untersucht. Ziel war es herauszufinden, ob das Phased-Array auch in der Lage ist Risse in der Lackschicht zu detektieren. Wie anhand der vorangegangenen Untersuchungen auf der Stahlseite zu erwarten, gibt es auch auf der Lackseite eine frequenzabhängige Ausbreitungsfähigkeit von geführten akustischen Wellen. Das in Abbildung 19 und Abbildung 20 dargestellte Verhalten und damit verbundene Signalverzerrungen sind jedoch auf der Lackseite deutlich stärker ausgeprägt. Zudem haben Messungen mit einem Schichtdickenprüfgerät ergeben, dass die Dicke der Schaum- und Lackschicht zwischen 6 und 9 mm schwankt. Dies führt dazu, dass sich die in Abbildung 20 dargestellten Kreuzungen zwischen den Moden von Stahl und Schaum in der Frequenz verschieben und es dadurch schwieriger ist eine geeignete Anrefrequenz und Burstanzahl zu finden. Die besondere Herausforderung besteht allerdings darin, dass der SCF TFM Algorithmus ein in der Phase stabiles Signal benötigt. Wie zuvor beschrieben wird das durch das Entfernen der Dispersionseffekte erreicht. Dafür muss jedoch das Dispersionsdiagramm, welches anhand von Materialeigenschaften und Schichtdicken berechnet wird, bekannt sein. Bei der Sensorankopplung auf der Stahlseite ist dies ohne Probleme möglich, da das Material und vor allem die Dicke der Stahlplatte bekannt und weitestgehend konstant sind. Durch das starke Schwanken der Schichtdicke der PUR-Schicht mit Lack verändert sich auch ständig das dazugehörige Dispersionsdiagramm. Die Korrektur der Dispersionseffekte kann jedoch nur für ein Dispersionsdiagramm durchgeführt werden, wodurch es zu einer signifikanten Phasenverschiebung der einzelnen Sensorsignale zueinander kommt. Der SCF TFM Algorithmus ist in diesem Fall nicht mehr funktionsfähig. Eine Rissdetektion mit geführten akustischen Wellen – in diesem Fall Lambwellen – basierend auf einem Phased-Array-System konnte entsprechend nicht im Rahmen dieses Projektes realisiert werden. Das eingesetzte Messsystem stößt dabei an seine Grenzen. Eine Möglichkeit diese Herausforderung zu meistern, wäre der Einsatz einer Mode oder Wellenart, bei der es zu keiner Phasenverschiebung kommt. Bei Lambwellen gibt es zwar Frequenzbereiche, bei denen einige Moden

nur geringfügig dispersiv sind, diese Bereiche sind jedoch von der Schichtdicke abhängig und verschieben sich somit ebenfalls. Alternativ könnten anstelle von Lambwellen sogenannte Scherwellen eingesetzt werden. Bei dieser Art von geführten akustischen Wellen gibt es eine einzelne Mode, die nicht dispersiv und zugleich unabhängig von der Schichtdicke ist. Diese Mode ist bedingt durch ihre Schwingungseigenschaft – Schwingungen innerhalb der Plattenebene jedoch nicht aus der Platte heraus – jedoch nur schwer mit einem Clamp-On-Sensor anzuregen. Entsprechend sind weitere Untersuchungen erforderlich, wie sie dennoch für ein Clamp-On-Messsystem eingesetzt werden kann. Dieses Thema soll in zukünftigen Projekten genauer untersucht werden.

## **b. Erzielte Ergebnisse**

Innerhalb des MegaYachtSchaum-Projektes konnten tiefgreifende Erkenntnisse rund um die Ausbreitung von geführten akustischen Wellen auf Metallplatten mit einer Schichtbelegung gewonnen werden. Anhand der durchgeführten Simulationen konnte die A0-Mode als geeignete Mode für die Erkennung von einer Schichtablösung sowie dem Eindringen von Wasser identifiziert werden. Zudem konnte der relevante Frequenzbereich und somit die möglichen Arbeitspunkte des im Laufe des Projektes zu entwickelnden Sensor identifiziert werden.

Die simulativ bestimmten Veränderungen der Signalamplitude durch eine lokale Schichtablösung konnten anschließend im Experiment bestätigt werden. Bei den erweiterten Versuchen zur Schichtablösung, die durch das Einbringen von unterschiedlich breiten Fehlstellen zwischen Stahlplatte und Schaumschicht simuliert wurde, konnte zudem eine zusätzliche Wellengruppe identifiziert werden. Basierend darauf konnte geschlussfolgert werden, dass an den Übergängen von Bereichen, in denen sich die Schicht lokal abgelöst hat, ein signifikanter Teil der A0-Mode reflektiert wird. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde die Messstrategie überarbeitet und sich für ein Phased-Array basiertes Messsystem entschieden. Ein solches System ist speziell darauf ausgelegt, Reflexionen orts aufgelöst zu detektieren.

Durch das intensive Auseinandersetzen mit der Phased-Array-Thematik konnte ein umfassendes Wissen zur Auslegung eines Phased-Array-Sensors sowie der für die Messdatenauswertung benötigten Algorithmen etabliert werden. Dieses Wissen in Kombination mit der langjährigen Erfahrung des ISAT auf dem Gebiet der geführten akustischen Wellen und deren dispersiven Eigenschaften ermöglichte zudem den Einsatz von erweiterten Auswertungsalgorithmen, die nicht ohne weiteres auf dispersive Signale angewendet werden können. Entscheidend war hierbei das Implementieren einer Methode zum Kompensieren der Dispersionseffekte.

Basierend auf den gesammelten Erkenntnissen wurde ein Phased-Array-Sensorkopf, welcher mit einem Circular-Ring-Array bestehend aus 40 Einzelsensoren ausgestattet ist, entwickelt und aufgebaut. Durch den Einsatz von flexiblen Leiterplatten in Verbindung mit einer gefederten Sensoranpressung lässt sich der Sensorkopf an unterschiedlichste Oberflächen ankoppeln und ist dabei in der Lage, Unebenheiten auf der zu messenden Oberfläche auszugleichen. Die einzelnen Sensoren sind dabei so flexibel, dass Messungen an leicht gekrümmten Oberflächen theoretisch möglich sind.

Für die Ansteuerung des Sensorkopfs wurde ein vollständiges Datenerfassungssystem bestehend aus differentiellen Vorverstärkern, einem einstellbaren differentiellen Verstärker, Multiplexern, Analog-Digital-Wandler sowie einem digitalen Signalprozessor entwickelt. Durch den Einsatz eines Digital-Analog-Wandlers können nahezu beliebige Sendesignale bezogen auf Frequenz, Signalfrequenz und Signallänge erzeugt werden und ermöglichen somit eine gezielte Anpassung des Sensorsystems an das zu überwachende System. Sollten dennoch einzelne Komponenten an Grenzen stoßen, ermöglicht der modulare Aufbau eine individuelle Anpassung des Sensorsystems selbst an Messaufgaben, für das Datenerfassungssystem ursprünglich nicht ausgelegt wurde.

Durch die implementierte Netzwerkschnittstelle kann das Sensorsystem über ein einzelnes Netzkabel mit Strom versorgt und ferngesteuert werden. Der Computer zur Steuerung des Messsystems muss demnach nur im gleichen LAN-Netzwerk sein und sich nicht in unmittelbarer Nähe befinden.

Mit Hilfe des entwickelten Datenerfassungssystems inklusive Sensorkopf sowie der entwickelten und in MATLAB implementierten Auswertungsalgorithmen war es möglich, selbst schwach reflektierende

Fehlstellen auf einer Aluminiumplatte zu identifizieren. Durch diese Experimente konnten die Grenzen des Messsystems näher bestimmt werden. Zudem war der Sensor in der Lage, die simulierte Delamination in einem Mehrschichtsystem bestehend aus einer 6 mm dicken Stahlplatte mit 14 mm dicker PUR-Schicht zu erkennen und deren Position exakt zu bestimmen. Im Rahmen dieser Untersuchungen konnten auch Effekte bei der Schallausbreitung in Mehrschichtsystemen beobachtet werden, die sich unmittelbar auf die einsetzbaren Messfrequenzen und Sendesignalformen auswirken. Diese zeigen sich in lokalen Frequenzeinbrüchen und spiegeln dabei Frequenzen wieder, bei denen die angeregte Lambwelle sich nicht überwiegend innerhalb der Stahlplatte ausbreitet, sondern die Energie verstärkt in der PUR-Schicht konzentriert ist. Bei Messung an der Schiffsinnenseite und demnach einer Sensoranbringung auf der Stahlplatte können diese unerwünschten Effekte durch eine gezielte Anpassung des Sendesignals umgangen werden. Für Messungen auf der Lackseite stellen diese Effekte allerdings ein bisher nicht zu überwindendes Hindernis dar.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass im Rahmen dieses Projektes ein voll funktionsfähiges Phased-Array-Messsystem mit erweiterten Auswertungsalgorithmen entwickelt wurde, mit dem die Delamination innerhalb eines Mehrschichtsystems erkannt und deren Position visualisiert werden kann.

### c. Vergleich mit den Vorhabenzielen

In nachfolgender Tabelle sind die geplanten und erreichten SMARTen Ziele der einzelnen Meilensteine kurz aufgelistet. Details dazu sind dem vorangegangenen Projektbericht zu entnehmen.

Tab. 1: Übersicht SMARTe Ziele

AP	Messbares Zielkriterium	Stand
7.1	<b>Konzeptionierung und Auslegung des Messsystems</b>	✓ Rahmenbedingungen und Anforderungen an das akustische Structural Health Monitoring System wurden definiert
7.2	<b>Computersimulation zur Bestimmung von geeigneten Wandlergeometrie und Anregfrequenzen</b>	✓ Piezoabmessungen und geeignete Frequenzbereiche konnten identifiziert werden
7.3	<b>Entwicklung eines Sensors für die Überwachung der Schiffsinnenseite</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausstattung von Musterplatten mit aufgeklebten piezoelektrischen Wandlern und Durchführung von Messungen mit Laborgeräten</li> <li>• Durchführung von Messungen an unbeschichteten Musterplatten</li> <li>• Durchführung von Messungen an beschichteten Musterplatten mit Fehlstellen</li> <li>• Entwicklung eines Schallkopfes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Auf eine quadratische Aluminiumplatte mit 1 m Kantenlänge wurde ein Circular-Ring-Array bestehend aus 40 Piezos aufgebracht</li> <li>✓ Ein über Federkontakte anbringbarer Sensorkopf sowie die dazugehörige Multiplexer- und Verstärkerelektronik wurde entwickelt</li> <li>✓ Es wurden Messungen an der unbeschichteten Aluminiumplatte durchgeführt</li> <li>✓ Es wurden Messungen mit aufgetragenen Fehlstellen auf der unbeschichteten Aluminiumplatte durchgeführt</li> </ul>

- ✓ Die Messungen an einer beschichteten Musterplatte mit Fehlstellen wurden mit einem später entwickelten universell ankoppelbaren Phased-Array-Sensorkopf durchgeführt

#### Entwicklung eines Datenerfassungssystems

7.4

Das entwickelte Datenerfassungssystem besteht aus:

- ✓ Differentiellen Vorverstärker
- ✓ Einstellbarer Empfangsverstärker
- ✓ Multiplexer
- ✓ Analog-Digital-Wandler
- ✓ Digital-Analog-Wandler
- ✓ Digitaler Signalprozessor
- ✓ Netzwerkschnittstelle

- ✓ Über ein einzelnes Netzkabel erfolgt die Stromversorgung sowie die Kommunikation mit dem Phased-Array-Sensorsystem
- ✓ Die Ansteuerung des Messsystems sowie die Datenverarbeitung erfolgt über MATLAB

#### Entwicklung eines Sensor-Arrays

7.5

- Entwicklung eines Phased-Array-Sensorkopfs
- Entwicklung einer Softwareschnittstelle
- Ausstattung von Musterplatten und Durchführen und Testmessungen

- ✓ Phased-Array-Sensorkopf wurde entwickelt
- ✓ Als Array wird ein Circular-Ring-Array bestehend aus 40 Piezos verwendet
- ✓ Es wurden diverse Messungen an 100 cm x 100 cm Stahlplatten ohne und mit Schaumschicht sowie eingebrachten Fehlstellen durchgeführt
- ✓ Der Phased-Array-Sensorkopf ist direkt mit dem Datenerfassungssystem verbunden
- Weitere Anmerkungen zu Abweichungen von den Vorhabenzielen siehe Tabelle 1: Anpassungen des Projektplans

#### Messungen an der Innenseite der Mock-Ups

7.6

- Messungen an der Innenseite eines Mockups
- Klimatests

- ✓ Es wurden Messungen an Musterplatten mit Schaumschicht und eingebrachten Fehlstellen durchgeführt

- Anmerkungen zu Abweichungen von den Vorhabenzielen siehe Tabelle 1: Anpassungen des Projektplans

7.7	<b>Entwicklung eines Sensors für die Überwachung der Schiffsaußenseite</b>	✓ Der in AP 7.5 entwickelte Phased-Array-Sensorkopf kann auch für die Schiffsaußenseite eingesetzt werden
7.8	<b>Messungen an der Außenseite des Mock-Ups</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Messungen an der Außenseite eines Mock-Ups</li> <li>• Klimatests</li> </ul>	✓ Es wurden Messungen auf der Außenseite einer Musterplatte durchgeführt auf die eine Schaum- und Lackschicht aufgebracht wurde  • Weitere Anmerkungen zu Abweichungen von den Vorhabenzielen siehe Tabelle 1: Anpassungen des Projektplans
7.9	<b>Erstellung des Abschlussberichts</b>	✓ Abschlussbericht wurde erstellt

## 2. Erläuterung des zahlenmäßigen Nachweises

**Tabelle 2: Vergleich ursprünglicher Finanzierungsplan mit tatsächlichen Ausgaben im Projekt aufgeschlüsselt nach Ausgabearten**

Ausgabearten	Finanzierungsplan alt	Finanzierungsplan ab Nov. 2020	Finanzierungsplan ab 06/2021	Finanzierungsplan 08/2021	Finanzierungsplan 11/2021	Finanzierungsplan 09/2022	Ausgaben	übrige Mittel
0812 Beschäftigte E12-E15	262,006.00 €	262,006.00 €	262,006.00 €	262,006.00 €	266,228.83 €	266,228.83 €	264,005.99 €	2,222.84 €
0822 Beschäftigungsentgelte	28,280.00 €	28,280.00 €	28,280.00 €	28,280.00 €	34,623.54 €	36,323.54 €	37,897.54 €	- 1,574.00 €
0843 sonstige allgem. Verwalt.	91,100.00 €	63,500.00 €	43,500.00 €	51,058.37 €	46,000.00 €	52,000.00 €	51,535.12 €	464.88 €
0846 Dienstreisen	34,342.00 €	34,342.00 €	34,342.00 €	34,342.00 €	28,834.00 €	21,134.00 €	401.30 €	20,732.70 €
0850 Gegenstände >800/410/400	54,460.00 €	82,060.00 €	102,060.00 €	94,501.63 €	94,501.63 €	94,501.63 €	94,502.13 €	- 0.50 €
	470,188.00 €	470,188.00 €		470,188.00 €	470,188.00 €	470,188.00 €	448,342.08 €	21,845.92 €

In Tabelle 2 findet sich eine vergleichende Auflistung des ursprünglichen Finanzierungsplanes aufgeschlüsselt nach den Ausgabearten mit den bei Projektabschluss in den einzelnen Ausgabearten verausgabten Mittel. Das ursprüngliche beantragte Projektvolumen betrug 470.188 €, hiervon wurden 448.343,08 € vom Mittelempfänger abgerufen. Insgesamt konnten nur 21.845,92 € nicht abgerufen werden, so dass der ursprünglich beantragte finanzielle Umfang für den Forschungs- und Entwicklungsaufwand des Vorhabens im Wesentlichen angemessen war.

Bei den Personalkosten entstanden im Zuge des Vorhabens Mehrkosten sowohl beim wissenschaftlichen Personal (0812) als auch bei den Beschäftigungsentgelten, die durch Umwidmung aus der Position 0846 (Dienstreisen) gedeckt wurden. Die Mehrausgaben in der Position 0812 entstanden im Wesentlichen aufgrund von Tarifierhöhungen und tarifbedingten Stufenaufstieg in der Entwicklungsstufe der Mitarbeiter. Bei der letzten Mittelumwidmung wurden in Pos. 0812 insg. 266.228,83 € beantragt, von denen bis Projektabschluss 264.005,99 € ausgegeben wurden, so dass in Pos 0812 insgesamt 2.222,84 € nicht abgerufen wurden.

Aufgrund des erhöhten Arbeitsaufwandes bei der Entwicklung und Test des ringförmigen Phased-Arrays ergab sich im Projekt ein erhöhter Bedarf an studentischen Mitarbeitern zur Unterstützung der wissenschaftlichen Beschäftigten. Beantragt wurden für die 0822 insgesamt 28.280,00 €, bei der letzten Mittelumwidmung wurden für die Position 0822 insg. 36.323,54 € beantragt. Die Ausgaben bei Projektabschluss lagen in 0822 bei 37.897,54 €, so dass in dieser Position Mehrausgaben von 1.574,00 € entstanden sind.

In Position 0843 wurden bei Antragstellung 91.100 € beantragt und bis Projektabschluss 51.535,12 € ausgegeben. Im Projektverlauf gab es eine Umwidmung der nicht benötigten Mittel aus 0843 in die Position 0850 (Investitionen). Der Minderbedarf an Mitteln in 0843 im Vergleich zur Antragstellung resultiert daraus, dass ein anderes Sensorik-Konzept als bei der Beantragung vorgesehen umgesetzt wurde (Phased-Array mit 40 Einzelpiezoelementen anstatt eines großen flächigen Arrays). Insgesamt wurden deutlich weniger piezoelektrische Wandler als ursprünglich geplant benötigt und es war aufgrund der geänderten Arraygeometrie auch deutlich weniger Verkabelung erforderlich, wodurch die Materialkosten deutlich geringer ausfielen als geplant.

Bei den Dienstreisen in Position 0846 waren bei Beantragung 34.242 € eingeplant. Ausgegeben wurden bis Ende der Projektlaufzeit nur 401,30 €, da die Inlandsreisen wie bspw. die Messungen am Mock-up in Bremen aufgrund der Corona-Pandemie bedingten Reisebeschränkungen nicht wie ursprünglich geplant möglich waren und stattdessen beim Zuwendungsempfänger vor Ort durchgeführt wurden. Auch die ursprünglich zum Test der Sensorik bei Fahrbetrieb auf See vorgesehenen Auslandsreisen konnten aufgrund der Pandemie-bedingten Beschränkungen nicht durchgeführt und daher die Mittel nicht verbraucht werden. Die nicht benötigten Mittel aus den Dienstreisen Inland wurden zur Deckung der Mehrkosten in Position 0812 und 0822 eingesetzt und im Laufe der Projektlaufzeit entsprechend umgewidmet.



In Position 0850 entstanden Mehrkosten im Vergleich zur Antragstellung, da bei Entwicklung und Inbetriebnahme des ringförmigen Sensorarrays zur Messdatenspeicherung und auch zur Elektronikentwicklung weitere Geräte wie ein Net Access Storage, ein HF Generator und ein differentieller Tastkopf sowie eine Stromzange benötigt wurden. Weiterhin wurde abweichend von der ursprünglichen Planung in 0850 ein leistungsfähiges digitales Speicheroszilloskop zur hochpräzisen Messung kleinster Änderungen der Schalllaufzeit im ps-Bereich beschafft, welches zur Validierung des Ringarrays eingesetzt wurde. Die entstehenden Mehrkosten in 0850 im Vergleich zur Antragstellung (beantragt 54.460 €, tatsächlich ausgegeben bei Projektabschluss 94.502,63 €) wurden durch Umwidmung von Mitteln aus der Pos. 0843 gedeckt. Alle über Pos. 0850 angeschafften Geräte verbleiben im Institut und werden für zukünftige Arbeiten und Projekte in diesem Themengebiet eingesetzt.

### **3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Um eine erfolgreiche Bearbeitung des Fördervorhabens zu ermöglichen, waren alle im Projektplan vorgesehenen Ressourcen notwendig und angemessen. Der Umfang der Arbeitspakete und der hohe wissenschaftliche Anspruch des Projekts vor allem in Bezug auf die Entwicklung eines Phased-Array-Messsystems inklusive Datenerfassungssystem sowie der dahinterliegenden Auswertungsalgorithmen begründen den hohen Personal- und Sachmittelbedarf. Für die Bearbeitung des Vorhabens mussten keine zusätzlichen Ressourcen aufgewendet werden. Lediglich der Projekt- und Zeitplan musste aufgrund von Verzögerungen sowie Auswirkungen der Corona-Pandemie angepasst bzw. kostenneutral verlängert werden.

## **4. Relevanz der Ergebnisse**

### **a. Erzielter Anwendernutzen**

Als erzielter Anwendernutzen lassen sich an dieser Stelle vier wesentliche Punkte benennen:

- Das entwickelte Phased-Array-Messsystem ist so ausgelegt, dass eine Vielzahl von Fehlstellen auf Mehrschichtsystemen erkannt und deren Position bestimmt werden kann. Letztendlich können alle Arten von Fehlstellen erkannt werden, die einen ausreichend großen Teil der ausgesendeten Lambwellen reflektieren. Neben Schichtdelamination können dies auch z. B. Risse oder Korrosion sein.
- Durch die flexible Ankopplung des Sensorkopfs lässt sich der Sensor auf diverse zu überwachenden Oberflächen anbringen und ermöglicht die Überwachung ohne hohen Materialverschleiß durch aufgeklebte piezoelektrische Sensoren.
- Durch die Stromversorgung, Steuerung und Datenübermittlung über ein einzelnes Netzkabel ist der Sensor maximal flexibel. Durch die Einbindung in ein LAN-Netzwerk kann das Sensorsystem von einer beliebigen Position aus ferngesteuert werden und erfordert keinen direkten Zugang zur Elektronik.
- Das gesamte Messsystem ist modular aufgebaut und kann leicht an ein neues Einsatzgebiet angepasst werden. Zudem ist durch die verbauten Digital-Analog-Wandler die Erzeugung von nahezu beliebigen Messsignalen innerhalb einer großen Frequenzbandbreite möglich. Dadurch kann die Messfrequenz oder Signallänge an unterschiedliche Schichtdicken oder Materialeigenschaften angepasst werden.

### **b. Geplante Verwertung der Ergebnisse**

Das ISAT beabsichtigt das Thema Structural Health Monitoring mit geführten akustischen Wellen in zukünftigen Projekten fortzuführen und das Wissen weiter zu vertiefen. In Frage kommen dafür direkt Aufträge aus der Industrie, sowie weitere Förderprogramme der EU, des Bundes oder der Länder. Das entwickelte Datenerfassungssystem wird bereits jetzt bei mehreren Industrie- und Förderprojekten eingesetzt und soll auch zukünftig immer häufiger zum Einsatz kommen. Zudem werden die entwickelten und implementierten Auswertungsalgorithmen bei einem Förderprojekt zur Erkennung von Fehlstellen in Mauerwerken eingesetzt.

Während dem Projekt unterstützten studentische Hilfskräfte bei den durchzuführenden Arbeiten. Dies gilt insbesondere bei der Softwareprogrammierung der Netzwerkschnittstelle, dem Aufbau des Phased-Array-Sensorkopfs sowie der Unterstützung bei Messreihen. Im Rahmen von Praxissemestern von Studenten aus den Studiengängen Technische Physik und Elektrotechnik wurden einzelne Projektbestandteile gezielt vorangebracht. Neben einer Bachelorarbeit, die sich mit der Auslegung und dem Einfluss von Backing und Fronting von Piezos befasste, wurde eine Masterarbeit rund um das Thema Phased-Array-Systeme für das Structural Health Monitoring erfolgreich abgeschlossen, deren Ergebnisse große Relevanz für den Erfolg des Projekts hatte.

Eine Veröffentlichung in der wissenschaftlichen Fachzeitschrift Sensors vom MDPI-Verlag mit den Projektergebnisse befindet sich aktuell im Review-Prozess.

Das Phased-Array-System soll zudem auf der kommenden Fachmesse Sensor+Test in Nürnberg am Messestand des ISAT auf dem Gemeinschaftsstand Bayern Innovativ präsentiert werden.

## **5. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

In Hinblick auf die Delaminations- und Fehlstellenerkennung bei Mehrschichtsystemen, wie sie bei diesem Projekt eingesetzt wurden, sind dem Zuwendungsempfänger keine Fortschritte im Bereich des Structural Health Monitoring mit geführten akustischen Wellen bekannt geworden.

Lediglich im Bereich der Delaminationserkennung von Composite-Strukturen sowie bei Mehrschichtsystemen, die aus zwei aneinandergelassenen Aluminiumplatten bestehen, sind dem Zuwendungsempfänger neue Erkenntnisse bekannt geworden. Die dabei untersuchten Strukturen weichen jedoch stark von den in diesem Projekt eingesetzten Mehrschichtsystemen ab.

Anbei eine Auflistung einiger Veröffentlichungen in diesem Themengebiet.

- 1) Hanfei Mei, Mohammad Faisal Haider, Roshan Joseph, Asaad Migot, Victor Giurgiutiu: „Recent Advances in Piezoelectric Wafer Active Sensors for Structural Health Monitoring Applications“ (<https://doi.org/10.3390/s19020383>)
- 2) Hussain Altammar, Nathan Salowitz: „Ultrasonic Structural Health Monitoring Approach to Predict Delamination in a Laminated Beam Using d15 Piezoelectric Sensors“ (<https://doi.org/10.1115/1.4050521>)
- 3) Xiangting Xu, Zhichao Fan, Xuedong Chen, Jingwei Cheng, Yangguang Bu: „Ultrasonic Phased Array Imaging Approach Using Omni-Directional Velocity Correction for Quantitative Evaluation of Delamination in Composite Structure“ (<https://doi.org/10.3390/s23041777>)
- 4) Asaad Migot, Hanfei Mei, Victor Giurgiutiu: „Numerical and experimental investigation of delaminations in a unidirectional composite plate using NDT and SHM techniques“ (<https://doi.org/10.1177/1045389X20978294>)
- 5) Xinlin Qing, Wenzhuo Li, Yishou Wang, Hu Sun: „Piezoelectric Transducer-Based Structural Health Monitoring for Aircraft Applications“ (<https://doi.org/10.3390/s19030545>)
- 6) F. Hervin, L. Maio, P. Fromme: „Guided wave scattering at a delamination in a quasi-isotropic composite laminate: Experiment and simulation“ (<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114406>)
- 7) Hussain Altammar, Anoop Dhingra, Nathan Salowitz: „Damage Detection Using d15 Piezoelectric Sensors in a Laminate Beam Undergoing Three-Point Bending“ (<https://doi.org/10.3390/act8040070>)

## 6. Veröffentlichung der Ergebnisse

Die Endergebnisse des Forschungsprojekts sind bisher ausschließlich den Projektpartnern bekannt. Zwischenergebnisse wurden als Vortrag der ISAT-Geschäftsführerin Dr. Sabrina Tietze bereits auf dem Technologieforum „Sensors für Smart Materials and Structures“ vom Cluster Sensorik 17.02.2022 vorgestellt (Vortragstitel: „MegaYachtSchaum – überwachte Schiffsbeschichtung“). Eine erste Veröffentlichung des Gesamtvorhabens erfolgt im Rahmen dieses Berichtes. Zeitgleich zur Berichtserstellung findet ein Review-Prozess einer Paper-Einreichung bei der wissenschaftlichen Fachzeitschrift Sensors vom MDPI-Verlag statt. In dieser Veröffentlichung wird der Algorithmus zur Entfernung von Dispersionseffekten und der damit einhergehenden Möglichkeit des Einsatzes von erweiterten TFM Algorithmen beschrieben. Weitere auf diesem Projekt aufbauende Veröffentlichungen auf Konferenzen und in entsprechenden Fachzeitschriften werden folgen, sobald das Sensorsystem und die Algorithmen weiter erprobt wurden und die industrielle Relevanz besser dargestellt werden kann.

### III. Anlagen

# Anlage 1: Schaltpläne

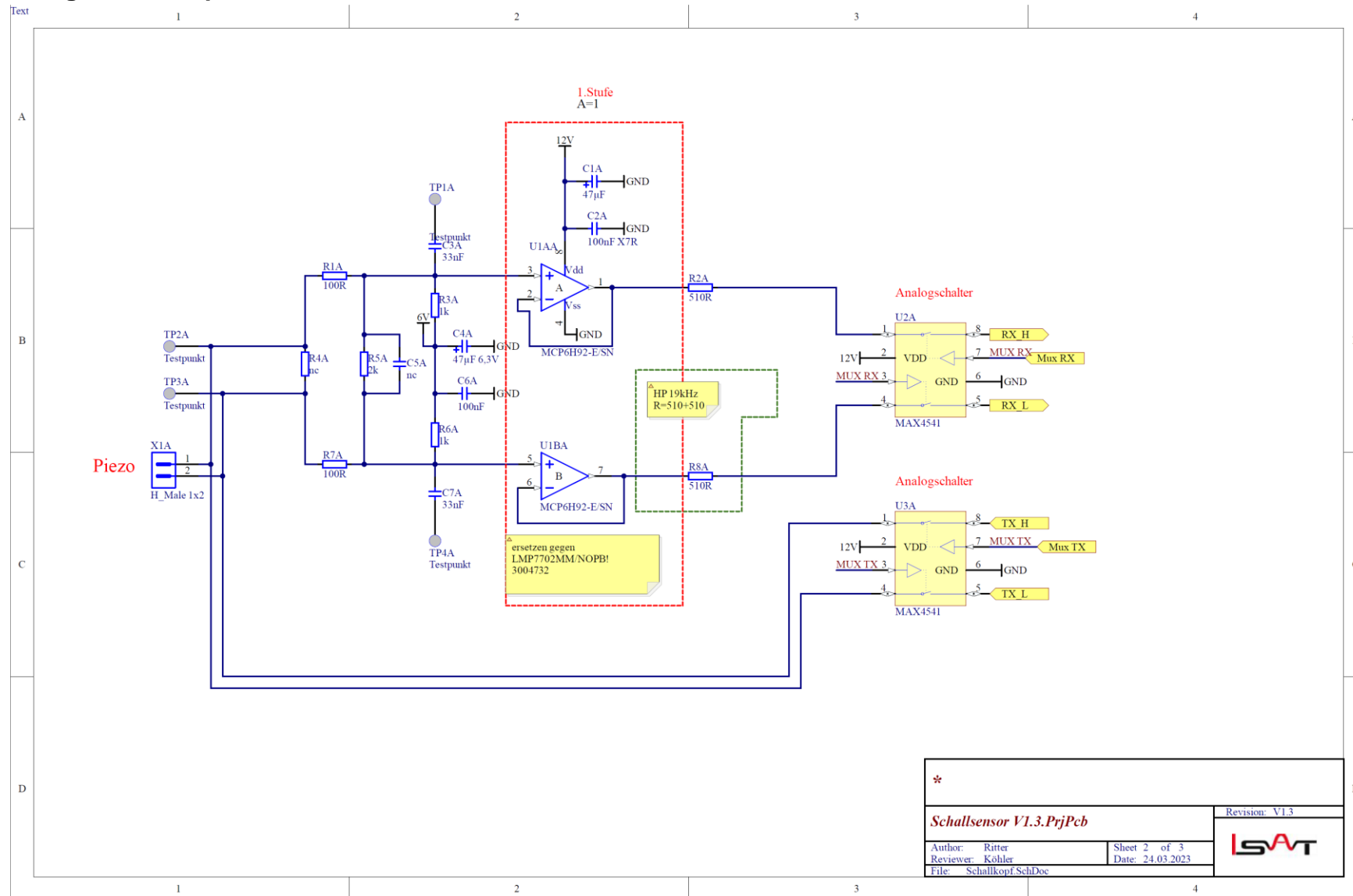


Abbildung 24: Vorverstärker V1.3 1.Stufe mit Piezo

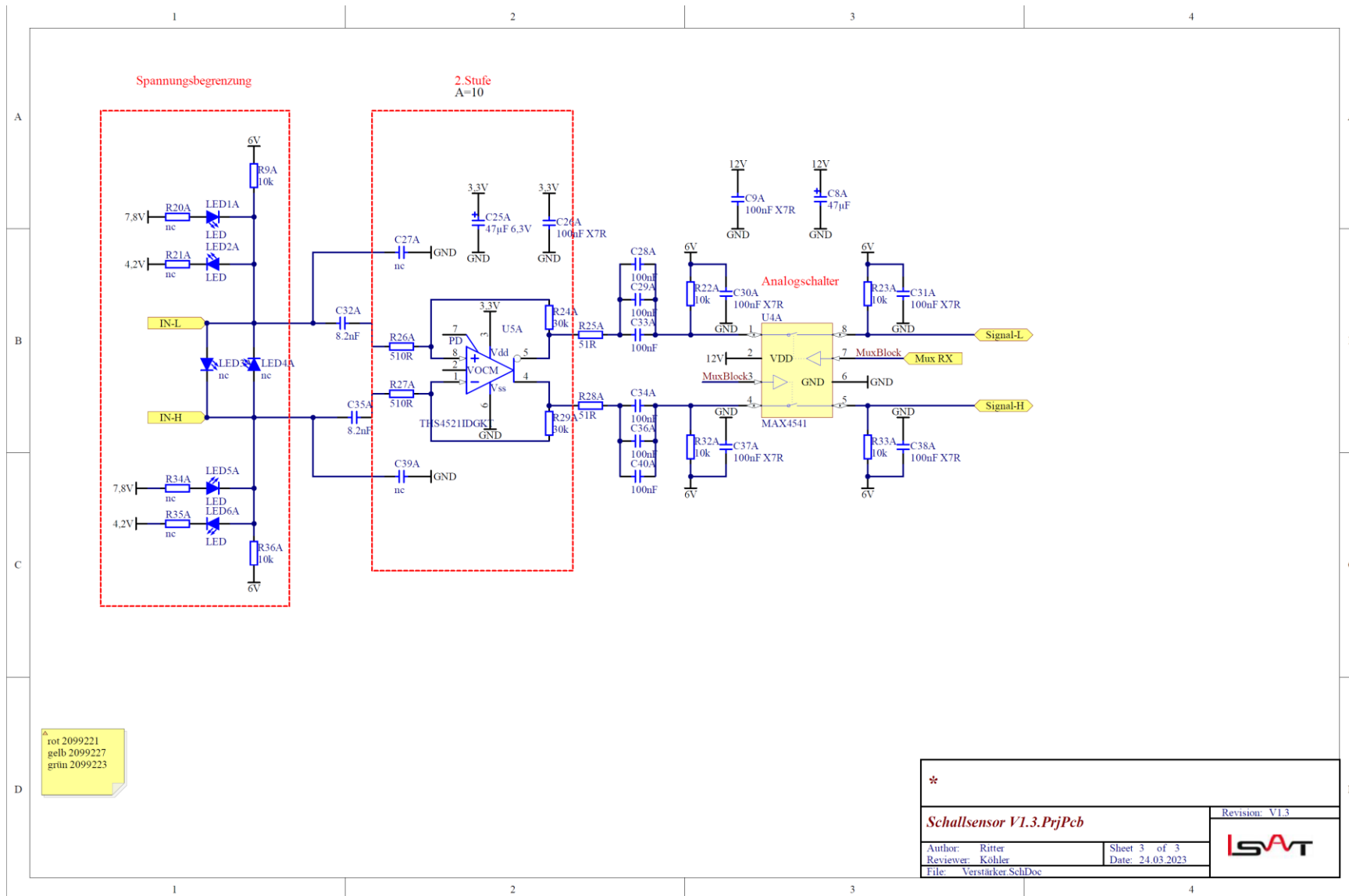


Abbildung 25: Vorverstärker V1.3 2.Stufe

## Literaturverzeichnis

- Camacho, J.; Parrilla, M.; Fritsch, C. (2009): Phase coherence imaging. In: *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 56 (5), S. 958–974. DOI: 10.1109/tuffc.2009.1128.
- Camacho, Jorge; Fritsch, Carlos; Fernandez-Cruza, Jorge; Parrilla, Montserrat (2020): Phase Coherence Imaging: Principles, applications and current developments. In: 178th Meeting of the Acoustical Society of America. 178th Meeting of the Acoustical Society of America. San Diego, California, 2–6 December 2019: ASA (Proceedings of Meetings on Acoustics), S. 55012.
- Holmes, C.; Drinkwater, B. W.; Wilcox, P. D. (2004): The post-processing of ultrasonic array data using the total focusing method. In: *insight* 46 (11), S. 677–680. DOI: 10.1784/insi.46.11.677.52285.
- Holmes, C.; Drinkwater, B. W.; Wilcox, P. D. (2005): Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit–receive array data for non-destructive evaluation. In: *NDT & E International* 38 (8), S. 701–711. DOI: 10.1016/j.ndteint.2005.04.002.
- Holmes, Caroline; Drinkwater, Bruce W.; Wilcox, Paul D. (2008): Advanced post-processing for scanned ultrasonic arrays: application to defect detection and classification in non-destructive evaluation. In: *Ultrasonics* 48 (6-7), S. 636–642. DOI: 10.1016/j.ultras.2008.07.019.
- Li, Fan; Yao, Aizhou; Zhu, LiMin; Yang, Chenlong; Zhang, Yang (2022): An Accelerated Post-processing Calculation Method of Curved Surface Profile Extraction Based on the Total Focusing Method of Ultrasonic Phased Array. In: *J. Phys.: Conf. Ser.* 2242 (1), S. 12001. DOI: 10.1088/1742-6596/2242/1/012001.
- Muller, A.; Robertson-Welsh, B.; Gaydecki, P.; Gresil, M.; Soutis, C. (2017): Structural Health Monitoring Using Lamb Wave Reflections and Total Focusing Method for Image Reconstruction. In: *Appl Compos Mater* 24 (2), S. 553–573. DOI: 10.1007/s10443-016-9549-5.
- Sumana; Ponseenivasan, S.; Kumar, Anish (2021): Comparative Study on Using Ultrasonic Array-Based Techniques for Detection of Flaws in Thick and Attenuating Materials. In: *Trans Indian Inst Met* 74 (2), S. 499–510. DOI: 10.1007/s12666-020-02181-7.
- Xu, Qian; Wang, Haitao (2022): Sound Field Modeling Method and Key Imaging Technology of an Ultrasonic Phased Array: A Review. In: *Applied Sciences* 12 (16), S. 7962. DOI: 10.3390/app12167962.
- Zhang, Haiyan; Liu, Y.; Fan, G.; Zhang, Hui; Zhu, W.; Zhu, Q. (2019): Sparse-TFM Imaging of Lamb Waves for the Near-Distance Defects in Plate-Like Structures. In: *Metals* 9 (5), S. 503. DOI: 10.3390/met9050503.

## Berichtsblatt

<b>1. ISBN oder ISSN</b>	<b>2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)</b> Schlussbericht	
<b>3. Titel</b> Nicht-invasives akustisches Structural Health Monitoring System für PUR-basierte Beschichtungssysteme		
<b>4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]</b> Klaus Stefan Drese	<b>5. Abschlussdatum des Vorhabens</b> 30.09.2022	
	<b>6. Veröffentlichungsdatum</b>	
	<b>7. Form der Publikation</b>	
<b>8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)</b> ISAT - Institut für Sensor- und Aktortechnik Hochschule für angewandte Wissenschaften Coburg Am Hofbräuhaus 1b 96450 Coburg	<b>9. Ber.-Nr. Durchführende Institution</b>	
	<b>10. Förderkennzeichen</b> 03SX440E	
	<b>11. Seitenzahl</b> 38	
<b>12. Fördernde Institution (Name, Adresse)</b> BMWK	<b>13. Literaturangaben</b> 29	
	<b>14. Tabellen</b> 2	
	<b>15. Abbildungen</b> 25	
<b>16. DOI (Digital Object Identifier)</b>		
<b>17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)</b>		
<b>18. Kurzfassung</b> Ziel dieses Teilvorhabens war die Entwicklung eines zerstörungsfreien Structural Health Monitoring-Systems für die orts aufgelöste Messung von Schäden am Schiffsrumpf, welches insbesondere an das im Vorhaben entwickelte schaubasierte PUR-System angepasst ist. Hierbei wurde innerhalb des Projekts ein Phased-Array-Messsystem entwickelt. Dieses besteht aus einem flexibel ankoppelbaren Messkopf bestehend aus 40 Einzelsensoren und ein Datenerfassungssystem. Angesteuert wird das System über eine Netzwerkschnittstelle und ermöglicht somit das einfache Einbinden von mehreren Sensoren in ein LAN-Netzwerk und die Steuerung aller Sensorsysteme von einem einzelnen Rechner aus. Das Sensorsystem in der Lage Lambwellen – eine Sonderform von geführten akustischen Wellen – auf der zu überwachenden Oberfläche anzuregen und zu detektieren. Die durch Fehlstellen reflektierten Signale können durch implementierte Auswertungsalgorithmen so ausgewertet werden, dass deren Position auf der zu überwachenden Oberfläche sichtbar wird. Dadurch lassen sich bei der Fertigung oder während dem Betrieb des Schiffes auftretende Fehlstellen erkennen, lokalisieren und somit gezielt beheben.		
<b>19. Schlagwörter</b> Structural Health Monitoring, Geführte Akustische Wellen, Lambwellen		
<b>20. Verlag</b>	<b>21. Preis</b>	

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 1825041-5