

Abschlussbericht (Teil I und II)

zum Technologietransfer-Programm Leichtbau
des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie

**Thema: Ressourceneffiziente Sandwichelemente durch
zerstörungsfreies Monitoring für den Leichtbau**

Akronym: ReSaMon

Förderkennzeichen: 03LB3029

Projektleiter/

Verbundkoordinator:

Dr.-Ing. Sebastian Zareba
Covestro Deutschland AG
Kaiser-Wilhelm-Allee 60
51373 Leverkusen
Tel.: +49 214 6009 7092
E-mail: sebastian.zareba@covestro.com

Förderzeitraum:

01.10.2021-31.03.2025

Verbundpartner:

Covestro Deutschland AG,
ArcelorMittal Building Solutions Deutschland GmbH,
iS-engineering GmbH,
Inoson GmbH,
IFSW TU Darmstadt,
MuST TU Darmstadt,
Fraunhofer LBF

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

I. Kurze Darstellung

1. Aufgabenstellung

Das Vorhaben ReSaMon zielte auf die Entwicklung eines zerstörungsfreien Monitoringsystems für Sandwichelemente im Leichtbau. Kernziel war die Steigerung der Ressourceneffizienz durch die Entwicklung und Integration einer neuartigen kontaktfreien Ultraschalltechnik in die kontinuierliche Produktionsstrecke von Sandwichelementen. Das System sollte Fehlstellen und Ungenauigkeiten während der Produktion sofort erkennen und durch einen Digitalen Zwilling Korrelationen zwischen Prozess- und Materialparametern identifizieren. Perspektivisch soll dieses Ultraschallsystem nicht nur während der Produktion, sondern auch bei verbauten Elementen zum Einsatz kommen, um die langfristige Änderung der Materialeigenschaften zu bewerten.

Ein weiteres Teilziel des Projekts war die Untersuchung der über die Zeit veränderlichen Werkstoffeigenschaften des Kernmaterials. Aufgrund der Vielzahl an Neuentwicklungen im Bereich der Schaumsysteme sind die zeit- und temperaturabhängigen Veränderungen der mechanischen Kennwerte, insbesondere des Elastizitäts- und Schubmoduls, bei Elementen mit neueren Schaumsystemen bislang nur unzureichend untersucht. Im Rahmen des Projekts wurden diese Kennwerte daher gezielt analysiert.

Die spezifischen Arbeitsziele umfassten:

- Die Charakterisierung der auftretenden Anomalien und Ermittlung der Anforderungen an ein Messsystem
- Entwicklung eines kontaktlosen ultraschallbasierten Messsystems für die Produktions- und Produktlebensdauerüberwachung
- Aufbau eines experimentellen Bauteiltestverfahrens
- Erstellung einer umfassenden Materialdatensammlung
- Entwicklung eines echtzeitfähigen Digitalen Zwillings
- Entwicklung eines verbesserten Bemessungsverfahrens

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben wurde als Verbundprojekt unter Koordination der Covestro Deutschland AG durchgeführt. Die Projektpartner brachten komplementäre Expertisen ein:

Covestro Deutschland AG als führender Hersteller für Polyurethanrohstoffen

Covestro arbeitet bereits seit einigen Jahren an digitalen Lösungen, um die Qualität der kontinuierlich produzierten Sandwichelemente dauerhaft zu überwachen und damit langfristig die Qualität zu steigern. In diesem Zuge werden bereits Algorithmen zur Datenanalyse eingesetzt. Zudem wurden umfangreiche Vorarbeiten im Bereich der Alterung von PUR-Hartschäumen durchgeführt, um deren mechanische und chemische Alterung zu beschreiben und zu verstehen. Bisher fanden jedoch keine Untersuchungen an PIR-Schäumen, wie sie im Sandwichelement genutzt werden, statt. Auch blieb bisher unberücksichtigt, inwiefern die mechanische und chemische Alterung bei der Materialmodellierung in den Simulationen genutzt werden kann.

ArcelorMittal Building Solutions Deutschland GmbH mit Expertise in der Sandwichelementproduktion

AMCD hatte zwei grundlegende Aufgaben im Projekt – die Produktion von Paneelen zur Ausführung experimenteller Untersuchungen und das Verfügbarmachen der Produktionslinie zur Erprobung etwaiger Messvorrichtungen, die im Projektverlauf entwickelt werden sollten.

iS-engineering GmbH mit der Expertise als Sachverständigenbüro

Die iS-engineering GmbH ist ein spezialisiertes Ingenieur- und Sachverständigenbüro mit Fokus auf Sandwichelementtechnik, Metalleichtbau und Baustatik. Sie bietet Leistungen wie Tragwerksplanung, Typenstatiken, Zulassungsverfahren sowie Schadensgutachten durch vereidigte Sachverständige. Zudem entwickelt sie eigene Softwarelösungen wie SandStat zur Bemessung von Sandwichbauteilen und ist aktiv in Normungsgremien wie DIN und IFBS vertreten.

Inoson GmbH Expertise auf dem Gebiet für Messtechnikentwicklung

Inoson war im Rahmen des Projektes für die Umsetzung des vom MuST entwickelten Verfahrens in ein Prüfgerät verantwortlich. Hierzu konnte auf die vorhandenen Möglichkeiten zur Entwicklung und Herstellung von Ultraschallwandlern sowie die Design- und Umsetzungsmöglichkeiten für Elektronik (Embedded Systems) zurückgegriffen werden. Die vorhandene Erfahrung bei der Realisierung von Systemen für zerstörungsfreie Prüfverfahren und ein Ultraschall-Messlabor ermöglichten ein zielgerechtes Vorgehen in diesem Projekt.

IfSW und MuST der TU Darmstadt für Bauteilprüfung und Ultraschallmessung

Das Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik (IfSW), stand während der Projektdurchführung am Fachgebiet Stahlbau unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Jörg Lange und war innerhalb des Projekts primär für die Planung, Durchführung und Auswertung von experimentellen Untersuchungen von Sandwichelementen verantwortlich. Das IfSW konnte bei der Projektdurchführung auf seine langjährige Expertise im Bereich der Sandwichtechnik zurückgreifen. Das IfSW verfügt über ein akkreditiertes Prüflabor, welches für die Durchführung der Versuche genutzt wurde.

Das Fachgebiet Mess- und Sensortechnik (MuST) unter der Leitung von Prof. Dr. mont. Mario Kupnik forscht seit Jahren intensiv an der Entwicklung und Anwendung luftgekoppelter Ultraschallsysteme. Insbesondere der Einsatz von Ultraschallarrays, in denen mehrere Wandler vorteilhaft kombiniert sind, bildet einen Schwerpunkt der Arbeiten. Diese Arrays ermöglichen berührungslose, zerstörungsfreie Prüfverfahren, die besonders für industrielle Prozesse mit hohen Anforderungen an Geschwindigkeit und Flexibilität geeignet sind.

Fraunhofer LBF für Modellierung und digitalen Zwilling

Das Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit (LBF) unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. Tobias Melz bearbeitet anwendungsorientiert wissenschaftliche Fragestellungen aus den Themenbereichen Betriebsfestigkeit, Kunststoffe und Adaptronik und hat langjährige Erfahrung mit Simulationsdienstleistungen u. a. zum Thema Digitaler Zwilling in unterschiedlichen Programmierumgebungen. Dabei kommen Modellierungsmethoden wie die FEM aber auch datenbasierte Methoden zur direkten Ableitung von Modellen aus Messdaten zum Einsatz. Das LBF war im Vorhaben an der Entwicklung eines Digitalen Zwillings beteiligt bestehend aus physikalischen und datenbasierten Simulationsmodellen sowie einer daran anknüpfenden Datensammlung.

Zeitliche Voraussetzung

Das Projekt startete im November 2021 und hatte ursprünglich eine geplante Projektlaufzeit von 36 Monaten, endend im September 2024. Aufgrund der schwierigen Anfangsphase während der Corona Pandemie und den daraus auch teilweise erheblich eingeschränkten Lieferketten ist während des Projektes klar geworden, dass eine Verlängerung um weitere 6 Monate notwendig werden würde. Das Projektlaufzeitende änderte sich daher, nach entsprechender Bewilligung, zum 31.03.2025.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde in mehreren, teilweise aufeinander aufbauenden, Phasen durchgeführt:

Phase 1: Ermittlung der Anforderungen an das Messsystem

- Analyse der Produktionsumgebung
- Definition der Messgrößen und Genauigkeitsanforderungen
- Festlegung der Systemgrenzen und Schnittstellen
- Erstellung des Anforderungskatalogs

Phase 2: Entwicklung der Messtechnik

- Entwicklung und Aufbau des kontaktlosen Ultraschall-Messsystems
- Integration der Hardware in eine Testumgebung
- Entwicklung der erforderlichen Firmware und Software

Phase 3: Bauteilprüfung und Datenerfassung

- Entwicklung spezifischer Bauteilprüfverfahren
- Durchführung von Messungen an Probekörpern mit und ohne Fehlstellen
- Aufbau einer umfassenden Materialdatenbank
- Erfassung von Alterungsverhalten und Temperaturabhängigkeit

Phase 4: Digitaler Zwilling und Modellierung

- Entwicklung parametrischer mechanischer Modelle
- Implementierung von Algorithmen zur Fehlerdetektion
- Aufbau eines echtzeitfähigen Digitalen Zwillings
- Identifikation von Prozess-Produkt-Korrelationen

Phase 5: Validierung und Optimierung

- Praxiserprobung des Gesamtsystems
- Optimierung der Produktionsparameter
- Entwicklung verbesserter Bemessungsansätze

Folgend der Projektablaufplan inklusiver verlängerter Projektlaufzeit.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde

Der Stand der Technik zu Projektbeginn war durch folgende Aspekte gekennzeichnet:

Prüfverfahren und Qualitätssicherung

- Keine verfügbaren Online und Inline-Verfahren zur zerstörungsfreien Detektion von Fehlstellen in Sandwichelementen
- Ein für die kontinuierliche Produktionsüberwachung verfügbares auf der Basis von berührungslos über die Luft eingekoppelten Ultraschall ist nicht verfügbar.
- Bestehende Prüfmethode (visuelle Inspektion, Infrarotthermographie, Kontaktprüfung) waren für Produktionsgeschwindigkeiten ungeeignet
- Charakterisierung erfolgte durch aufwändige 6-Punkt-Biegeversuche und punktuelle Dehnungsmessstreifen

Materialverhalten und Bemessung

Sandwichelemente werden aufgrund ihrer Verwendung als Fassadenverkleidung über längere Zeiträume hinweg erheblichen Temperaturbeanspruchungen ausgesetzt. Vor diesem Hintergrund wurde zu Projektbeginn die Hypothese aufgestellt, dass die Kombination aus thermischer Belastung und lokal vorhandenen Fehlstellen im Verbund zwischen Deckblech und Kernmaterial eine potenzielle Ursache für die in der Praxis beobachtete Blasenbildung darstellt. Die Annahme stützt sich sowohl auf ingenieurtechnische Erfahrung als auch auf wiederkehrende Beobachtungen aus der Praxis, die unter anderem ein temperaturabhängiges Wachstum bestehender Blasen dokumentieren. Diese Hypothese findet eine gewisse Unterstützung in der wissenschaftlichen Literatur, wenngleich dort zumeist keine belastbare experimentelle oder rechnerische Herleitung erfolgt. So stellt Davies (1987) fest, dass der durch Erwärmung induzierte Gasdruck selbst bei Oberflächentemperaturen von bis zu 80°C nicht ausreicht, um eine Blasenbildung im Deckblech zu verursachen. In einer späteren Veröffentlichung postuliert Davies (2001) hingegen, dass die Blasenbildung auf einen schnellen Temperaturanstieg zurückzuführen sei. In dessen Folge könnten eingeschlossene Gase im Kernmaterial in vorhandene Fehlstellen wandern und dort zur lokalen Druckerhöhung führen. Beide Arbeiten beschränken sich jedoch auf eine qualitative Beschreibung dieses Mechanismus; eine systematische Analyse oder empirische Validierung der beschriebenen Vorgänge wird nicht geliefert. Darüber hinaus bleibt offen, ob die angenommenen Mechanismen auch für die aktuell verwendeten Kernmaterialien (PIR statt PUR) mit veränderten thermisch-mechanischen Eigenschaften gelten.

Die ersten theoretischen Ansätze zur nicht-experimentellen Bestimmung der Biegetragfähigkeit von Sandwichelementen gehen auf Arbeiten von Plantema (1966)

sowie Stamm und Witte (1974) zurück. Diese Modelle basieren auf der Annahme eines idealen, homogenen Kernwerkstoffs.

In der Praxis erfolgt die baustatische Bemessung von Sandwichelementen in der Regel auf Grundlage experimentell ermittelter Tragfähigkeiten, gemäß den Vorgaben der DIN EN 14509:2013. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Tragverhalten der Bauteile, insbesondere unter Druckbeanspruchung, durch komplexe Instabilitätsprobleme wie das Knitterversagen bestimmt wird. Dabei handelt es sich um ein nichtlineares Eigenwertproblem, bei dem die kritische Knitterspannung maßgeblich von der Faltenamplitude abhängt, welche jedoch nicht im Vorherein bekannt ist und stark von lokalen Imperfektionen, wie z.B. Welligkeiten oder Inhomogenitäten im Kernmaterial, abhängt. Analytische Ansätze können diese Effekte nur unzureichend erfassen und liefern in der Regel entweder unrealistisch konservative oder unsichere Ergebnisse. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass die mechanischen Kennwerte typischer Kernmaterialien, etwa PUR- oder PIR-Schäume, produktionstechnisch bedingten Schwankungen unterliegen.

Einen ersten experimentellen Ansatz zur Bewertung des Einflusses von Fehlstellen unternahm Ewert et al. (2001), indem sie gezielt Haftimperfektionen und Lunker im Kernmaterial untersuchten. Zwar konnte erwartungsgemäß eine Verringerung der Knitterspannung beobachtet werden, jedoch ließen sich aus den Ergebnissen keine unmittelbar verwertbaren Schlussfolgerungen für die Bemessung oder Qualitätssicherung ableiten. Pozorski und Pozorska (2017) führten ergänzend dazu numerische Untersuchungen zum Einfluss lokaler Delaminationen durch. Diese beruhen jedoch auf idealisierten Annahmen und wurden nicht durch Versuche validiert, wodurch die Übertragbarkeit auf reale Bauteile eingeschränkt ist.

Ein weiterer wichtiger Aspekt, ist das zeitabhängige Materialverhalten des Kernwerkstoffs. Polymere Schäume wie PUR und insbesondere PIR, die seit einigen Jahren verstärkt als Kernmaterial eingesetzt werden, zeigen ein über die Zeit veränderliches Verhalten, das zu einer Veränderung der mechanischen Eigenschaften führt. Diese Effekte wirken sich insbesondere unter Langzeitbeanspruchung oder erhöhten Temperaturen auf das Tragverhalten der Bauteile aus.

Trotz der zunehmenden Verwendung von PIR-Schäumen liegen derzeit keine umfassenden, validierten Daten zum zeitabhängigen mechanischen Verhalten dieses Werkstoffs vor. Das erschwert verlässliche Prognosen zur Dauerhaftigkeit von Sandwichelementen mit PIR-Kern. Zur qualitativen Bewertung solcher Effekte sieht die DIN EN 14509 sogenannte DUR-Versuche vor. In diesen Versuchen werden mechanische Kennwerte (z. B. Druckfestigkeit, Schubmodul etc.) von konditionierten und nicht-konditionierten Probekörpern miteinander verglichen.

Ultraschallsensorik

- Ein luftgekoppeltes Ultraschall Phased Array existierte bereits.
- Es wurden bereits erste Versuche zur berührungslosen zerstörungsfreien Prüfung von dünnen Stahlblechen durchgeführt. Designs für Labor-Luftschallwandler im Frequenzbereich von 40 kHz bis 700 kHz sind bereits verfügbar, aber in dieser Bauform nicht für den industriellen Einsatz geeignet.
- Einsatz von luftgekoppeltem Ultraschall zur Anomalieerkennung an Sandwichelementen wurden weder wissenschaftlich untersucht noch praktisch eingesetzt.

Produktionsüberwachung und -Bewertung

- Erste Softwarelösungen mit Kamera-Sensorik für Inline-Schnittkanten-Messungen existieren
- Keine Quellen zur produktionsinternen Abbildung als Digitaler Zwilling zur Prozessoptimierung
- Prozessdatensammlung in Verbindung mit Fehlstellen gar nicht oder nur lückenhaft vorhanden.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit erfolgte im Rahmen des Verbundprojekts mit klar definierten Aufgabenbereichen.

Industriepartner:

- Covestro Deutschland AG (Koordination): Neben der Verbund-Koordinierung lag der Fokus auf der Simulationsentwicklung, insbesondere der Materialmodellierung in Abhängigkeit der Alterung, der thermischen Verformung und der damit mechanischen Belastung auf das Bauteil.
- ArcelorMittal Construction Deutschland GmbH: Einbringung der Produktionsexpertise und Durchführung diverser Versuche an der Produktionsanlage zur Fehlstellengenerierung, Fokus auf Produktionsintegration des Messsystems und Prozessoptimierung.
- iS-engineering GmbH: Entwicklung von Bemessungsverfahren und Prüfnormen
- Inoson GmbH: Entwicklung der Hardware- und Softwarekomponenten für das Messsystem

Forschungspartner:

- TU Darmstadt
 - IFSW: Entwicklung von Bauteilprüfverfahren und Analyse des Alterungsverhaltens
 - MuST: Entwicklung des Ultraschall-Messsystems und Validierung
- Fraunhofer LBF: Modellierung und Entwicklung des Digitalen Zwillings

Die Partner standen in regelmäßigem Austausch in dem sie:

- an dem in der Regel zweiwöchig stattfindenden Jour Fixe teilnahmen,
- diese Themen in regelmäßigen Arbeitstreffen in kleinerer Runde vertieften,
- am quartalsweise stattfindenden vor-Ort Projekttreffen teilnahmen sowie
- an gemeinsamen Entwicklungsarbeiten, die teils vor Ort teils online stattfanden teilnahmen.

Durch die komplementären Kompetenzen haben alle Partner miteinander zusammengearbeitet oder dem anderen zugearbeitet. Es gab keine zweitrangigen Beteiligungen.

Es bestand zu keinem Zeitpunkt des Projekts eine Zusammenarbeit mit weiteren anderen Stellen.

Die Betreuung des Projektes erfolgte durch den Projektträger Jülich.

II. Eingehende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

AP 1: Ermittlung der Anforderungen an das Messsystem

- UAP 1.1: Ableitung von Anforderungen an das Messsystem

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde zunächst ein Anforderungsprofil für das zu entwickelnde Messsystem erstellt. Die Grundlage hierfür bildeten die Analyse der relevanten Herstellungsprozesse von Sandwichelementen im Bauwesen sowie die systematische Betrachtung potenzieller Fehlerquellen innerhalb der Bauteile. Ergänzend wurden die Umgebungsbedingungen während der Produktion sowie im eingebauten Zustand berücksichtigt, um ein umfassendes Bild der Anforderungen zu erhalten.

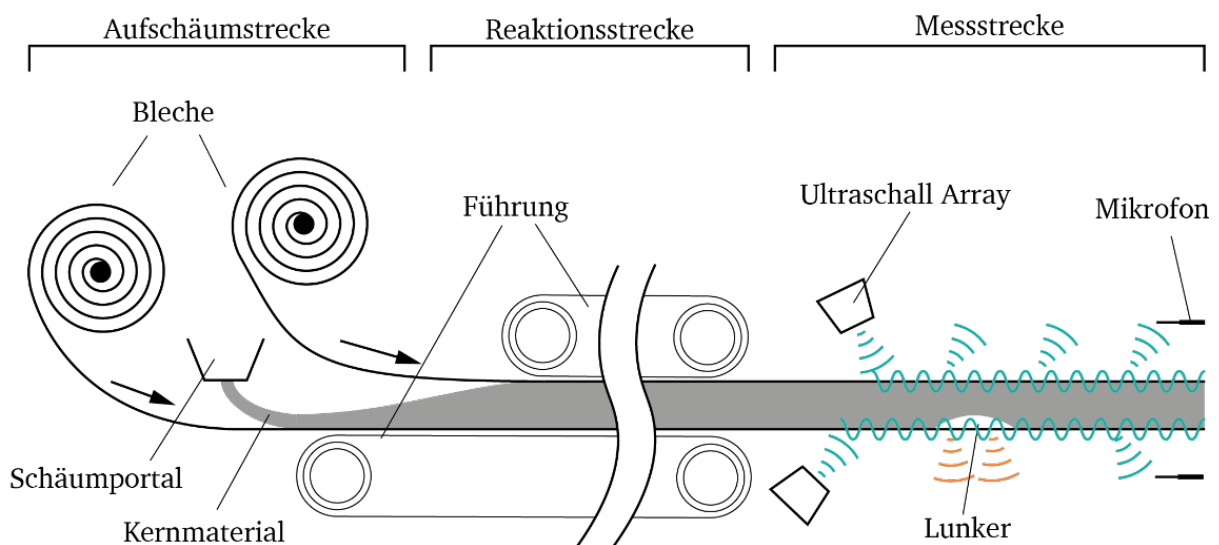


Bild 1: Schematische Darstellung einer kontinuierlichen Produktionsstrecke für Sandwichelemente und des möglichen Einbauortes des US-Systems

Zu den Anforderungen an das Ultraschall-Messsystem gehörte unter anderem die Ermittlung des Einbauortes. Dafür standen mehrere Orte zur Diskussion. Möglich sind der Einbau zwischen Führung und Säge (Bild 1) nach der Säge oder vor dem Verladen. Diese Orte haben unterschiedliche Vor- und Nachteile, beispielsweise verfügbarer Platz an der Produktionsanlage oder Lärm und Verschmutzung. Letztlich wurde die Messung zwischen Führung und Säge ausgewählt, da das Sandwichelement dort langsam und kontinuierlich durchfährt. Außerdem kann noch reagiert werden, wenn ein Fehler detektiert wird, indem dieser von der Säge ausgeschnitten wird.

- UAP 1.2: Entwicklung und Aufbau eines Bauteiltestverfahrens, welches Schädigungen durch Lunker explizit berücksichtigt

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde ein umfassendes Testverfahren zur gezielten Erfassung und Bewertung von Schädigungen durch produktionsbedingte Fehlstellen in Sandwichelementen entwickelt. Ziel war es, reproduzierbare Methoden zur künstlichen Fehlstellenherstellung zu etablieren, deren Einfluss auf die Tragfähigkeit experimentell zu untersuchen und das daraus resultierende Bauteilverhalten messtechnisch zu analysieren. Der Fokus lag insbesondere auf Lunkern, Blasen und Delaminationen. Es handelt sich dabei um Fehlstellen, die in der industriellen Herstellung oder während der Lebensdauer der Sandwichelemente auftreten können.

Erste Untersuchungen erfolgten durch Biegeversuche an Probekörpern mit gezielt eingebrachten Ölflecken. Diese sollten als Trennmedium eine Delamination zwischen Deckblech und Schaumkern provozieren. Die genaue Lage und Ausdehnung der eingebrachten Fehlstellen waren dabei zunächst unbekannt. Entsprechend zeigten die Ergebnisse keine nennenswerten Unterschiede zur Tragfähigkeit fehlerfreier Elemente. Nach Abzug der Deckbleche stellte sich heraus, dass die gewünschte Delamination nicht zuverlässig eingetreten war. Als Reaktion darauf wurde ein alternatives Verfahren auf Basis eingelegter Folien entwickelt, das eine gezielte und reproduzierbare Entkopplung zwischen Deckschicht und Kernmaterial ermöglicht.

Da sich die gezielte Herstellung fehlerhafter Elemente im laufenden Produktionsprozess als technisch anspruchsvoll erwies, wurde eine Methode zur nachträglichen Fehlstellenintegration entwickelt. Für Bauteile mit ebenen Deckschichten konnte gemeinsam mit den Projektpartnern ein Verfahren etabliert werden, bei dem die Deckbleche lokal geöffnet und manipuliert werden, um reproduzierbare Schädigungen zu erzeugen. Ein weiterer zentraler Fortschritt wurde im Bereich der künstlichen Blasenbildung erzielt. Hierfür wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem durch Überdruck, eingebracht über am Deckblech montierte Ventile, eine Trennung des Verbunds zwischen Deckschicht und Kernmaterial erreicht wird. So konnten realitätsnahe Delaminationen erzeugt und in zahlreichen Biegeversuchen untersucht werden. In diesen Versuchsreihen wurden verschiedene Parameter variiert, darunter die Bauteilhöhe, die Deckblechprofilierung, die Blasengröße sowie deren Position.

Durch systematische Vergleichstests mit unbeschädigten Referenzbauteilen konnte der Einfluss dieser künstlichen Blasen auf das Tragverhalten zuverlässig quantifiziert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere großflächige Blasen (> 200 mm Durchmesser) in Abhängigkeit von ihrer Lage und den Bauteilparametern zu einer Verminderung der Tragfähigkeit führen können. Besonders kritisch erwies sich die Blasenpositionierung im Bereich der maximalen Biegebeanspruchung, während sich Schädigungen im Bereich von Auflagern als weniger relevant erwiesen. Wesentlich für das Versagen war jedoch nicht allein die Blase selbst, sondern die mit ihr

einhergehende Delamination, deren Ausbreitung im Belastungsfall maßgeblich das Strukturverhalten beeinflusst.

Ein zusätzlicher Untersuchungsbereich befasste sich mit der Entstehung von Blasen infolge hoher Temperaturbeanspruchung. Es handelt sich dabei um einen Schadensmechanismus, der auch in der Praxis häufig beobachtet wird. Hierfür wurden sogenannte Blistering-Tests durchgeführt. Ziel war es, typische thermisch induzierte Fehlstellen realitätsnah zu simulieren. Der Versuchsaufbau wurde so modifiziert, dass jeweils zwei Paneele mit verdeckter Befestigung durch Spanngurte gesichert wurden, um ein Öffnen der Längsfugen zu verhindern. Die Befestigung an der Unterkonstruktion wurde durch Schraubzwingen nachgebildet. Anschließend wurden die Bauteile einseitig auf 85°C erhitzt und über einen Zeitraum von zwei Stunden dieser Temperatur ausgesetzt. Dieses Vorgehen ermöglichte es in mehreren Fällen, ein praxisnahes Schadensbild zu reproduzieren, bei dem sich Blasen an der Überdecknase der verdeckten Befestigung bildeten. Die gezielte Analyse dieser Blasen offenbarte eine Ablösung des Deckblechs in den betroffenen Bereichen, was ein entscheidender Befund für das Verständnis der zugrunde liegenden Schadensmechanismen darstellte.

In die Blistering-Versuche wurden sowohl intakte Bauteile aus der laufenden Produktion als auch zuvor montierte und aufgrund von Blasenbildung reklamierte Paneele einbezogen. Dadurch konnte ein direkter Vergleich zwischen provozierten und real aufgetretenen Schäden gezogen und die Validität des experimentellen Ansatzes gestärkt werden. Im Rahmen der Untersuchungen wurden die betroffenen Bereiche aufgesägt und analysiert. Dabei zeigte sich, dass nicht unter jeder Blase ein Lunker vorlag. Aus dieser Beobachtung lässt sich ableiten, dass Lunker keine notwendige Voraussetzung für das Auftreten von Blasen darstellen und entsprechend nicht zwangsläufig aus jedem Lunker eine Blase resultiert. Dennoch kann ein Lunker eine potenzielle Schwachstelle im Bauteil darstellen, aus der in Kombination mit weiteren Einflussfaktoren eine Blase entstehen könnte.

- UAP 1.3: Definition von abzubildenden Workflow-Prinzipien und Analyse aller benötigten In- und Outputs

Um sicherzustellen, dass jeder Partner alle Informationen oder auch Proben zur rechten Zeit zur Verfügung hat oder gestellt bekommt, wurde mehrstufig auf die benötigten Voraussetzungen geachtet. Auf der langen Zeitskala wurden die In- und Outputs anhand des Projektablaufplanes definiert. Grundlage bildete hier der Projektantrag in der Fassung vom 16.07.2021. Dieser (Zeit-)Plan wurde bereits zum ersten Kickoff-Termin angepasst, da das Projekt aus mehreren Gründen etwas später gestartet ist als ursprünglich geplant. Auch haben sich die Voraussetzungen und zu diesem Zeitpunkt möglichen Arbeiten stark geändert. Aufgrund der gesetzlichen Verordnungen und Bestimmungen wegen der Corona-Pandemie mussten punktuell Arbeitspakete zeitlich umgeplant werden. Ebenso haben massive Lieferschwierigkeiten in dieser Zeit

Beschaffungen unvorhersehbar gemacht. Hierdurch war der Ablauf geringfügig ineffizienter und unstrukturierter als ursprünglich geplant. Im weiteren Verlauf des Projektes, insbesondere in den Jahren 2023 und 2024 konnte der ursprüngliche Plan wieder etabliert werden. Mittelfristig dienen die quartalweise stattfindenden Status Meeting zum Abgleich der In und Outputs. Kurzfristig würde der zweiwöchige JF für Absprachen genutzt.

- UAP 1.4: Definition einer Datenstruktur-Konvention

Gemeinsam mit den Partnern, unter UAP-Leitung des Fraunhofer LBFs wurde die Definition einer Datenstruktur-Konvention zur einheitlichen Ablage der Mess- und Simulationsdaten bearbeitet. Die Datenablage bildete eine Grundlage für die Erstellung eines digitalen Zwillings für Sandwichelemente und sollte im Laufe des Projekts stetig um neue Daten ergänzt werden.

Zur Ablage der Daten wurde das Datenformat hdf5 ausgewählt. Die Vorteile dieses Formates sind:

- Selbstbeschreibend
- Unterstützung von heterogenen Daten
- Große Datenmengen und komplexe Datenstrukturen
- Unterstützung von Data Slicing
- Open Source – Standard Software-Tools verfügen über Schnittstellen

Das Ziel der Datenstruktur war die ganzheitliche und strukturierte Beschreibung der Sandwichelemente. Daher wurde ein Ansatz gewählt, der jedem Element die vorhandenen Daten zuweist. Jedem Element werden Metadaten, wie die bekannten Prozessparameter und weitere Spezifikationen (z.B. Hersteller, Sollgeometrie, etc.) zugewiesen. Darüber hinaus werden vorhandene Mess- und Simulationsdaten zu jedem Element abgelegt. Bei den Messdaten wird zwischen Metadaten, dynamischen und statischen Kenngrößen sowie zerstörenden Messungen unterschieden. Die Messdaten bilden die Grundlage zur Parameterkalibrierung und Modellvalidierung der Simulationsdaten.

Für die Daten wurden Matlab-Einleseskripte definiert, die die Daten in ein gewünschtes Format bringen und Ausleseskripte, die bspw. die Spannungs-Dehnungs-Verläufe der Daten formatiert ausgeben (siehe Bild 2).

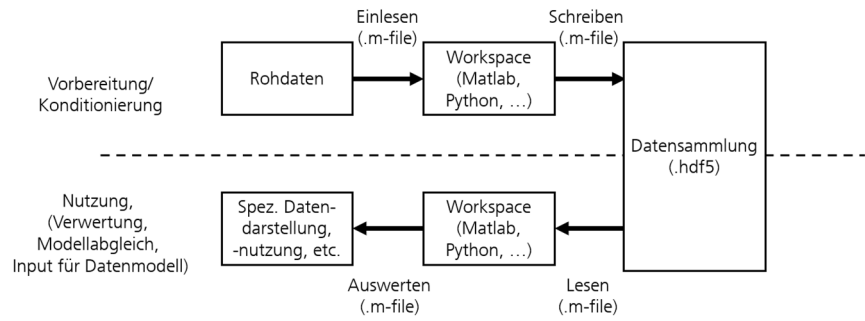
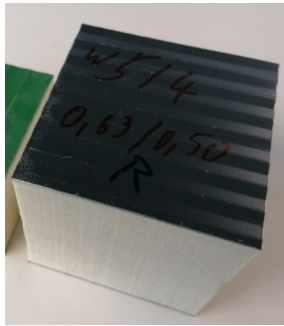


Bild 2: Getestete Sandwichwürfel (links) für die Datensammlung und Darstellung des Einlese- und Ausleseprozesses der Daten (rechts)

In diesem Zusammenhang wurde in Abstimmung mit den Partnern eine Konvention zur Datenübergabe definiert. Hierbei war das Ziel eine möglichst effiziente Übergabe der Daten durch die Ergänzung minimalistisch gehaltener Metadaten. Die Metadaten beschreiben den Namen der Datei, den adressierten Knoten in der Datenstruktur, den Datentyp sowie die zugehörigen Zeilen und Spalten in der Datei. Mithilfe dieser Metadaten lässt sich der Schreibvorgang der Daten in die hdf5-Struktur automatisieren.

Im Rahmen mehrerer Arbeitstreffen zum Thema der Datenstruktur mit den Partnern wurde weiterhin geklärt, welche Partner welche Datentypen liefern werden und welche Daten davon für Workflows im Projekt und/oder für die Verwertung verwendet werden. Um hierbei den Zusammenhang mit dem Projektziel der Erkennung von Fehlstellen in Sandwichelementen in den Fokus zu rücken, wurde die Gesamtstrategie unter Zuhilfenahme des Digitalen Zwillings diskutiert.

Während beim experimentellen Vorgehen zur Erkennung von Fehlstellen in Sandwichelementen die Schritte „Produktion“, „Messaufbau“, „Messung“, „Überprüfung“, und „Interpretation“ durchlaufen werden müssen, kann der modellbasierte Ablauf schon durch die drei Schritte „Modellbildung“, „Simulation“ und „Interpretation“ gelingen. Beim Experiment ist der Ablauf zur Erstellung eines Datenmodells mit sehr hohen Kosten verbunden, da im Sinne der statistischen Mustererkennung sehr viele Daten zu Sandwichelementen vorliegen müssen. Daher müssten vorab sehr viele Elemente produziert, vermessen und überprüft werden, um eine Datenbasis zu generieren. Jeder der Schritte bringt einen hohen personellen und finanziellen Aufwand mit sich. Daher wird im Vorhaben ein großer Teil der Datenbasis zur Erzeugung von Datenmodellen für das Structural Health Monitoring (SHM) simulationsgetrieben erzeugt. Modelle können beliebig parametrisiert werden und mit den im Vorhaben erarbeiteten bzw. verwendeten Methoden automatisiert berechnet werden. Eine Interpretation der Daten ist deutlich einfacher als im Experiment, da bspw. schon bei der Erstellung des Modells bekannt ist, ob eine Fehlstelle vorliegt oder nicht.

AP 2: Entwicklung der Messtechnik

- UAP 2.1 – Akustisch-mechanisch gekoppelte Simulation der Einkopplung von Lamb-Wellen und der Wirkung von Lunkern auf deren Auskopplung

Ziel des Arbeitspakets 2.1 war es, mithilfe akustisch-mechanisch gekoppelter Finite-Elemente-Simulationen die Einkopplung luftgekoppelter Lamb-Wellen in Sandwichstrukturen sowie deren Ausbreitungsverhalten bei ungestörten und gestörten Bedingungen realitätsnah abzubilden. Der Fokus lag dabei insbesondere auf der Wechselwirkung mit Fehlstellen, wie sie typischerweise im Produktionsprozess durch Lunker oder Poren im Schaumkern entstehen können.

- Es wurde ein umfassendes Simulationsmodell auf Basis von COMSOL Multiphysics erstellt, das sowohl die Luft- als auch die Festkörperdomäne berücksichtigt und die Einkopplung der Wellen durch ein luftgekoppeltes Phased-Array realitätsnah nachbildet. Das Modell berücksichtigt die reale Geometrie der Sandwichstrukturen (Blechdicke, Profilierung), den Primerauftrag, thermische Vorbehandlung sowie die Materialeigenschaften des Schaums (inkl. viskoelastischem Verhalten).
- In einem ersten Schritt wurde die ungestörte Schallausbreitung untersucht. Hierbei konnten die Lamb-Wellenmoden (insb. A0 und S0) eindeutig identifiziert und in ihrer Ausbreitungscharakteristik simuliert werden. Der Einfluss der Blechdicke, des Schaums sowie der akustischen Randbedingungen wurde systematisch variiert. Die Ergebnisse dienten als Referenz für die Bewertung gestörter Wellenfelder.
- Im zweiten Schritt wurden Fehlstellen in Form von Lunkern in das Simulationsmodell integriert, ähnlich wie ein künstlicher mechanischer Defekt (siehe AP4.2). Dabei wurde die Defektgröße, -tiefe, -form sowie der Kontakt zum Blech systematisch variiert. Die Simulationen zeigten klar reproduzierbare Reflexions- und Streuungsmuster an den Defekten, die in guter Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen stehen.
- Darüber hinaus wurde der Einfluss liniertes Bleche auf die Lamb-Wellenausbreitung untersucht, insbesondere in orthogonaler Richtung zur Wellenausbreitung. Es zeigte sich, dass insbesondere kleine Biegeradien zu signifikanter Reflexion und Modenkonversion führen. Die Ergebnisse sind in einer eigenen wissenschaftlichen Publikation dargestellt worden [Haugwitz.2022].
- Parallel wurde die Einkopplung durch das luftgekoppelte Phased-Array modelliert und experimentell validiert. Die Simulationen lieferten eine exakte Vorhersage des optimalen Kopplungswinkels für die Anregung der A0-Mode (simuliert: 37,5°, gemessen: 34,3°) sowie eine detaillierte Abbildung des Abstrahlverhaltens [Hinrichs.2022].
- Die Simulationsergebnisse wurden durch zahlreiche experimentelle Vorvalidierungen gestützt, u. a. durch den Einsatz eines Laser-Doppler-Vibrometers (LDV) zur Erfassung der Wellenfelder an Referenzproben mit

definierten Defekten. Die Messergebnisse bestätigten die wesentlichen Trends und Verläufe aus den Simulationen.

Alle im Projektantrag definierten Ziele für UAP 2.1 wurden vollständig erreicht:

- Der Einsatzbereich der akustischen Prüfmethode wurde durch Parametervariationen (Frequenz, Geometrie, Defekttyp) systematisch bestimmt.
- Es liegen valide Modelle für die Schallausbreitung in intakten und fehlerbehafteten Sandwichelementen vor.
- Die Einflussfaktoren der Blechprofilierung und thermischen Vorbehandlungen wurden untersucht und dokumentiert.

Es wurden empfehlenswerte Versuchsgeometrien, Vorlaufstrecken und Sensorkonfigurationen identifiziert. Ergänzend zu den Arbeiten des FG MUST wurde die Modellierung der Anregung mittels luftgekoppelten Ultraschalls in ANSYS Workbench durch das Fraunhofer LBF durchgeführt. Hierzu wurde eine Geometrie bestehend aus einem dünnen Streifen Luft, Stahlblech und PU-Schaum aufgebaut. In beiden Fällen wurde die Geometrie so fein vernetzt, dass allen relevanten Wellenlängen in Luft, Stahl und Schaum bei der Frequenz von 42 kHz gerecht wurde. In der Luft zeigte sich in beiden Fällen eine Ausbreitung der Druckwelle, überlagert mit einer Reflexion derselben am Stahlblech in Kombination mit einer wieder abgestrahlten Welle aus dem Stahlblech. Durch das modellierte Fluid-Struktur-Interface wird ein Teil der akustischen Energie in das Sandwichelement eingekoppelt und es bildet sich eine mechanische Welle im Stahlblech und Schaum. Einerseits zeigte sich, dass die Welle über die Dicke des Schaums mehr und mehr gedämpft wurde. Andererseits war am Stahlblech eine nur schwach gedämpfte Welle zu sehen. Diese ließ sich auch im Fall mit Fehlstelle aufgrund ihrer Form als A0-Mode einer Lamb-Welle identifizieren, wie sie in der Planung des Vorhabens vermutet wurde. Es wurde für beide Fälle die Amplitude und Phase des Übertragungsverhaltens an sieben Messpunkten bei der betrachteten Frequenz untersucht. Dabei stellte sich, eine maximale Abweichung der Amplitude von 1,71 % und der Phase von 0,51 % heraus. Diese Ergebnisse können je nach Messung in der Größenordnung des üblichen Messrauschens liegen, womit untermauert wird, dass für gewisse Arten von Fehlstellen eine nachgelagerte algorithmenbasierte Klassifizierung des Zustands der Elemente notwendig sein kann. Diese wird in AP 3 in Zusammenhang mit SHM weiter diskutiert.

- UAP 2.2: Durchführen von Experimenten für verschiedene Geometrieabstände und Einkopplungswinkel

Ziel dieses Arbeitspakets war die experimentelle Überprüfung und Validierung der zuvor im Rahmen von UAP 2.1 erstellten Simulationen zur Lamb-Wellenausbreitung und Defektdetektion in Sandwichelementen. Dabei wurden Parameterstudien zu

Einkopplungswinkeln, Geometrieabständen und Defekttypen durchgeführt. Die Aufgabe umfasste den Aufbau geeigneter Laborumgebungen, die gezielte Herstellung definierter Materialfehler sowie den systematischen Abgleich von Simulation und Messung.

Zur Durchführung der Messkampagnen wurden mehrere Laboraufbauten am Fachgebiet MuST realisiert, die eine flexible Justierung der Luftultraschallarrays, Laser-Doppler-Vibrometer (LDV) und Mikrofonarrays ermöglichten. Mehrere Laboraufbauten wurden ebenso bei der Inoson GmbH realisiert. Die Konstruktion erlaubte die Untersuchung verschiedener Geometrieabstände zwischen Ultraschallquelle und Prüfkörper sowie die präzise Einstellung variabler Einkopplungswinkel zur Lamb-Wellenanregung.

Für die Versuche wurden eine Vielzahl von Sandwichproben mit definierten Fehlstellen verwendet. Ein Teil dieser Proben wurde durch die Industriepartner bereitgestellt, ein anderer Teil wurde direkt am Fachgebiet MUST oder von Inoson GmbH hergestellt oder verändert. Die folgenden Arten künstlicher Defekte kamen zum Einsatz:

Während der Produktion eingebrachte Fehlstellen

- Sonnenblumenöl, Klotzkettenfett, Wasser: auf die untere Blechlage vor dem Aufschäumen appliziert, um lokale Adhäsionsstörungen oder Inhomogenitäten im Schaum zu erzeugen.
- Papier, Teflonfolie, Aluminiumfolie: als feste Inlays im Schaumbereich zur Simulation von Delamination oder Lufteinschlüssen.
- Eiswürfel: auf das Trägerblech gelegt, um durch lokales Abschmelzen und Abkühlen Hohlräume im Schaum zu erzeugen.
- Schaumwürfel mit Löchern oder eingebrachten Kanälen: gezielt mit strukturellen Inhomogenitäten versehen und vor dem Aufschäumen platziert.

Nach der Produktion eingeführte Fehlstellen

- Delamination durch Messerschnitt: gezielte Schädigung der Klebeverbindung zwischen Blech und Schaum durch Einschnitte mit scharfen Werkzeugen.
- Ausgefräste oder ausgeschabte Schaumstellen: Nachbildung von Hohlräumen und Lunkern mit definierten Geometrien.
- Speziell für die Untersuchung geschäumte Testobjekte mit eingebrachten Störstellen: Herstellung eigener Proben mit gezielter Defekteinbringung.

Diese systematische Variation der Fehlstellen ermöglichte eine realitätsnahe Abbildung der in der Produktion auftretenden Normfehler und bildete die Grundlage für den experimentellen Abgleich mit den Simulationsergebnissen. Im Fokus der Experimente standen:

- die systematische Variation des Einkopplungswinkels sowohl mithilfe eines luftgekoppelten Phased-Array-Systems (40 kHz und 220 kHz), als auch mittels eines mechanisch verstellbaren Einzelwandlers
- die Untersuchung verschiedener Abstände zwischen Schallquelle und Prüfkörper,
- sowie die Detektion und Charakterisierung von Fehlstellen anhand reflektierter und gestreuter sowie transmittierter gedämpfter Lamb-Wellen.

Zur Validierung der Simulationsergebnisse wurden die Messdaten – insbesondere Signalformen, Amplituden, Phasenlagen und Signal-Rausch-Verhältnisse – mit den erwarteten Wellenformen aus der FEM-Simulation (AP 2.1) verglichen. Dabei zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung in Bezug auf:

- den optimalen Kopplungswinkel für die A0-Mode,
- die reflektierten Signalanteile bei Defekten,
- und die Dämpfungs- bzw. Dispersionscharakteristik der Lamb-Wellen im Sandwichverbund.

Darüber hinaus konnten durch die Messungen spezifische Störeinflüsse identifiziert werden, etwa:

- Beeinflussung des Schallsignals durch lokale Dickenschwankungen der Schaumstruktur,
- variierende Adhäsionseigenschaften zwischen Primer und Blech,
- und Beugungseffekte bei stark profilierten Blechen.

Alle im Antrag definierten Ziele für UAP 2.2 wurden vollständig erreicht:

- Validierung der Simulationsdaten durch eine breite Datenbasis aus Labormessungen mit realitätsnahen und systematisch variierenden Defekten.
- Ermittlung geeigneter Geometrieabstände und Einkopplungswinkel, insbesondere im Hinblick auf Inline-Messbarkeit.
- Bereitstellung relevanter Messdatensätze für die Folgeanalyse und weitere algorithmische Auswertung.

Die Arbeiten wurden dokumentiert und sind teilweise bereits in der Dissertation von Jan Hinrichs [HinrichsDiss.2024] veröffentlicht sowie in verschiedenen Berichten der Inoson GmbH enthalten.

- UAP 2.3: Entwicklung und Aufbau der nötigen Datenerfassungselektronik und Signalverarbeitung für Laufzeitbestimmung und Visualisierung der integralen Amplitudeninformation.

Das Ziel dieses Arbeitspakets war die Entwicklung einer anwendungsoptimierten Elektronik zur Ansteuerung luftgekoppelter Ultraschallwandler sowie zur Datenerfassung und Signalverarbeitung im Kontext der Inline-Prüfung von Sandwichelementen. Die Arbeiten umfassten sowohl die Sende- und Empfangseinheiten als auch die zugehörige Prüfsoftware und bildgebende Auswertungsmethoden.

Basierend auf den Ergebnissen aus UAP 1.1, UAP 2.1 und UAP 2.2 wurde zu Beginn eine detaillierte Anforderungsanalyse durchgeführt. Dabei wurden insbesondere folgende Aspekte berücksichtigt:

- EMV-Anforderungen gemäß EN 61000-6 und EN 61326 für industrielle Anwendungen, insbesondere bei der Integration in bestehende Fertigungsanlagen.
- Akustische Störgrößen: In realen Produktionsumgebungen wurden frequenzübergreifende Störungen bis zu 30 kHz identifiziert, woraus entsprechende Anforderungen an die Filterung und Signalanalyse resultierten.
- Frequenzbereich und Signalauflösung: Die Experimentdaten aus UAP 2.2 zeigten, dass höhere Frequenzen (z. B. 220 kHz) eine höhere Empfindlichkeit gegenüber kleinen Defekten liefern, jedoch eine präzisere Elektronik zur Signalerzeugung und -verarbeitung erfordern.

Am Fachgebiet MuST wurde zunächst die bestehende Array-Elektronik auf Basis früherer Projekte grundlegend überarbeitet. Die überarbeitete Version ermöglichte eine höhere Ansteuerpräzision, größere Leistung und höhere Signalbandbreite. Im späteren Projektverlauf wurde durch die Inoson GmbH eine eigene, industriegeeignete Sendeelektronik entwickelt, die auf den Erkenntnissen und Anforderungen aus den vorherigen Tests aufbaute. Diese Version ist speziell auf den robusten Betrieb in der Produktionslinie bei ArcelorMittal ausgelegt und erfüllt die geforderten industriellen EMV- und Leistungsstandards.

Parallel zur Sendeseite wurden verschiedene Empfangskonzepte untersucht:

- Vergleichende Tests mit Transducern als Empfänger sowie MEMS-Mikrofonarrays wurden durchgeführt.
- Ein Mikrofonarray mit elektronischer Strahlformung erwies sich als besonders geeignet zur Unterdrückung direkter Luftwellen und zur selektiven Detektion der leaky Lamb-Wellen.
- Ergänzend wurde ein LDV eingesetzt, um die experimentelle Validierung der Lamb-Wellen im Blech zu ermöglichen.

Darüber hinaus wurden digitale Filter für die Signalaufbereitung entwickelt, um eine stabile Auswertung bei niedrigem Signal-Rausch-Verhältnis zu gewährleisten.

Zur Verarbeitung der Labormessdaten und zur Visualisierung der Prüfergebnisse während der Entwicklung wurde seitens des Fachgebiets MUST eine Softwarelösung auf Basis von MATLAB entwickelt. Diese beinhaltet Algorithmen zur Laufzeitbestimmung und Amplitudenauswertung und Verfahren zur Bildgebung mit den Signalen des Arrays. Im Rahmen einer Publikation [Haugwitz.2025] wurden Teile davon veröffentlicht. Seitens der Inoson GmbH wurde ebenfalls eine Softwarelösung aufgebaut, diese allerdings für die Anwendung während der Produktion. Diese beinhaltet ähnliche Features wie die Laborvariante vom Fachgebiet MUST, wurde aber ergänzt um Möglichkeiten zur Fehlerbewertung und Darstellung der Prüfergebnisse in Echtzeit und Schnittstellen zur Anbindung an industrielle Prozessleitsysteme.

Die entworfenen Elektroniken wurde umfangreich charakterisiert und in mehreren Testkampagnen erprobt. Dabei wurden u.a. folgende Parameter untersucht:

- Messfrequenzbereich und Bandbreite: Systeme arbeiteten zuverlässig im Bereich von 40 kHz bis 220 kHz.
- Auflösung und Empfindlichkeit der Empfangseinheiten unter Praxisbedingungen.
- Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) in industrieller Umgebung.
- EMV-Festigkeit.

Alle geplanten Aufgaben des Arbeitspakets wurden vollständig und erfolgreich bearbeitet:

- Eine optimierte Arrayelektronik für Forschung und Laborbetrieb wurde am Fachgebiet MuST entwickelt und eingesetzt.
 - Eine industriegeeignete Elektroniklösung wurde durch die Inoson GmbH konzipiert, gefertigt und für den späteren Einsatz in Industrieumgebungen angepasst.
 - Der Funktionsnachweis des Gesamtsystems (Sendung, Empfang, Verarbeitung, Visualisierung) konnte erbracht werden und bildet die technische Grundlage für eine skalierbare Inline-Prüflösung im Leichtbau.
-
- UAP 2.4: Aufbau eines Messsystems zur Detektion von Lunkern und mechanischen Spannungszuständen an verschiedenen typischen Sandwichelementen.

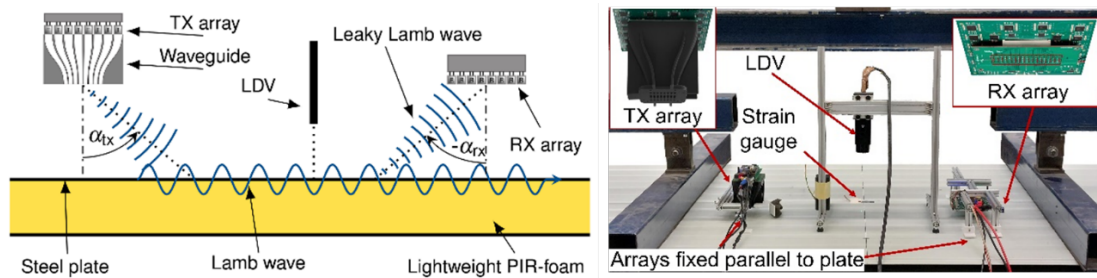


Bild 3: Aufbau des Messsystems: schematische Darstellung (links) und reale Umsetzung (rechts)

In Bild 3 ist die von MUST genutzte Ultraschallmessanlage besteht aus einem 8×8 40-kHz-Sende-Phased-Array, das auf verschiedene Kopplungswinkel ausgerichtet werden kann, dargestellt. Zur direkten Messung der Lamb-Welle wird ein Laser-Doppler-Vibrometer (LDV) verwendet, während ein 64-Mikrofon-Phased-Array-Empfänger zur Messung des Winkels der austretenden Lamb-Welle dient. Alle Komponenten sind auf der Sandwichplatte mit fixen Abständen zueinander positioniert. Die Lamb-Welle breitet sich hauptsächlich durch die Stahlplatte aus, wobei der PIR-Schaum hauptsächlich die Dämpfung verändert.

Das Ziel von UAP 2.4 war der Aufbau eines modularen, realitätsnahen und industriell anschlussfähigen Messsystems zur berührungslosen Detektion von Lunkern sowie zur spannungsabhängigen Charakterisierung von Sandwichelementen. Die entwickelte Lösung sollte sowohl für die Anwendung in der laufenden Produktion als auch für die Prüfung im eingebauten Zustand – etwa im Rahmen von Zulassungsprüfungen – geeignet sein. Dabei lag der Fokus auf einer praxisorientierten Umsetzung unter Berücksichtigung industrieller Randbedingungen.

Basierend auf den zuvor entwickelten Komponenten (Sende- und Empfangseinheit aus UAP 2.3, sowie geometrische Erkenntnisse aus UAP 2.2) wurden mehrere kleinere Laborprüfstände konzipiert und aufgebaut, sowohl beim Fachgebiet MUST, als auch bei der Inoson GmbH. Diese ermöglichten:

- Die automatische Positionierung der Sensorik auf dem zu testenden Sandwichelement.
- die Bewegung kleinerer Sandwichelemente auf Rollen, analog zur Fördertechnik in industriellen Fertigungsanlagen,
- die präzise Ausrichtung der Sensorik zur Definition von Kopplungswinkeln und Abständen,
- und die flexible Anpassung an verschiedene Plattentypen und Befestigungssituationen.

Das Kernmesssystem wurde mit Blick auf zukünftige Anwendungen außerhalb des Labors klein und mobil ausgelegt:

- Alle Komponenten (Sensorik, Elektronik, Datenerfassung) können auf Stativsystemen montiert werden, die transportfähig sind.

- Zur praktischen Nutzung in Industrieumgebungen wurden Einhausungen für den Transport, Kabelführungen sowie ein kompakter Aufbau der Elektronik entwickelt.
- Die Konfiguration erlaubt sowohl stationäre Prüfungen als auch messende Durchläufe bei konstanter Geschwindigkeit, wie sie in Produktionsprozessen auftreten.

Nach dem Aufbau wurde das Gesamtsystem in mehreren Stufen getestet:

- In Labormessreihen wurden zunächst Sandwichelemente mit und ohne definierte Fehlstellen (vgl. UAP 2.2) geprüft. Dabei konnte die zuverlässige Detektion von Lunkern unterschiedlicher Größe und Tiefe bestätigt werden. Mit niedrigeren Frequenzen, wie etwa 40 kHz kann man größere Defekte, die etwas tiefer im Schaum vergraben sind, detektieren und mit höheren Frequenzen, wie etwa 220 kHz kann man dafür kleinere Defekte detektieren, die aber nicht so tief im Schaum vergraben sein dürfen.
- Das System wurde außerdem für die kontaktlose mechanische Spannungsmessung getestet. Die entwickelten Algorithmen zur Auswertung des Kopplungswinkels lieferten stabile und reproduzierbare Ergebnisse in standardisierten Biegeversuchen.
- In Zusammenarbeit von Fachgebiet MUST, der Inoson GmbH und dem Industriepartner ArcelorMittal wurde das System erfolgreich unter realen Bedingungen in der Produktionsumgebung in Brehna erprobt.

Ein strukturierter Testplan wurde erstellt, mit den Industriepartnern abgestimmt und auf verschiedene Anwendungsbedingungen angepasst (z.B. Messung vor/nach dem Aufschäumen, an fertigen Bauteilen, unter thermischer Belastung).

Die Arbeiten führten zur erfolgreichen Realisierung eines voll funktionsfähigen, modularen Prüfsystems mit folgenden Eigenschaften:

- Messfrequenzbereich: 40–220 kHz, je nach Prüfziel und Bauteildicke.
- Auflösung: Lunkergrößen ab ca. 30 mm Durchmesser konnten zuverlässig detektiert werden.
- Detektionsprinzip: Lamb-Wellen, luftgekoppelt angeregt, ausgewertet über Phasengeschwindigkeit und Amplitudenbildgebung.
- Spannungsmessung: Basierend auf der Änderung des Kopplungswinkels bei mechanischer Belastung.
- Systemstabilität: EMV-robust, industrietauglich, tragbar, mit hoher Wiederholgenauigkeit der Ergebnisse.

Alle im Projektantrag definierten Ziele des Unterarbeitspakets 2.4 wurden erreicht. Das entwickelte Messsystem stellt die technische Grundlage für die weitere Anwendung und Skalierung der Prüftechnologie dar – sowohl im Kontext der Serienfertigung von Sandwichelementen als auch im Bereich der Zustandsüberwachung im Betrieb.

AP 3: Erstellung eines Digitalen Zwillings für Sandwichelemente

- UAP 3.1: Entwicklung eines mechanischen Modells, welches zeitliche Veränderungen der Werkstoffeigenschaften sowie Mängel im Verbund berücksichtigt.

Zur Untersuchung des Einflusses von zeitlich veränderlichen Werkstoffeigenschaften auf das Produktverhalten wurde ein Simulationsmodell herangezogen, welches das thermo-mechanische Verhalten eines Verbunds von mehreren Sandwichpaneelen bei Sonneneinstrahlung berechnet. Hierzu wurde die Simulationssoftware ABAQUS der Firma Dassault Systems verwendet. Dieses Modell wurde so erweitert, dass zeitabhängige Materialeigenschaften (insbesondere Elastizitätsmodul und Wärmeausdehnungskoeffizient) mitberücksichtigt werden. Die entsprechenden Materialdaten wurden von beschleunigten Alterungstests entnommen. Mit dem Modell wurde anschließend untersucht, inwiefern die zeitabhängigen mechanischen Eigenschaften das Verhalten von Sandwichelementen unter Einfluss der Sonneneinstrahlung beeinflussen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die zeitliche Veränderung von Elastizitätsmodul und Wärmeausdehnungskoeffizienten einen signifikanten Einfluss auf die Spannungsverteilung im Sandwichelement haben und zu zeitlich steigenden Spannungen (und damit verbunden erhöhtem Risiko einer Blasenbildung) führen können. Entsprechend bedeutsam ist eine Berücksichtigung von zeitlich veränderlichen Materialeigenschaften bei der Auslegung von Sandwichelementen.

Im nächsten Schritt wurde zusätzlich ein erstes Simulationsmodell in ANSYS Workbench Mechanical entwickelt, mit dem der Einfluss von Mängeln und Fehlstellen in Sandwichelementen mitberücksichtigt werden kann. In dem Modell wurde ein Ausschnitt aus dem kritischen Bereich des Sandwichelementes (Bereich um die verdeckte Befestigung) mit vorgegebenem Defekt abgebildet. Diese Simulationen belegen, dass eine Fehlstelle in kritischen Sandwichelementbereichen zu signifikanten Spannungsspitzen und somit erhöhter Versagensgefahr führen kann. Eine Übertragung der Defektmodellierung auf das Simulationsmodell von Sandwichelementen im Verbund (als Vergleich zu einer realen Einbausituation) hat sich allerdings aufgrund zu langer Rechenzeiten nicht als sinnvoll ergeben.

Im nächsten Schritt wurde ein parametrisches Finite Elemente Modell in der ANSYS Parametric Design Language (APDL) aufgebaut, das als Erweiterung zum bisherigen Modell auch die skriptbasierte Änderung von Geometrieparametern erlaubt. Dazu wurde ein parametrischer Querschnitt modelliert, der extrudiert wurde und periodisch erweitert werden kann, um gesamte Sandwichelemente zu erzeugen. Das Modell ist parametrisch definiert hinsichtlich

- Materialparameter (Schaum, Blech)
- Geometrieparameter (Schaum, Blech)
- Fehlstellenparameter (Ort, Geometrie)

Die Fehlstellen wurden vorerst geometrisch als Würfel modelliert, wobei das eingeschlossene Gas nicht explizit mitmodelliert wurde. Parametrisch wurde die Fehlstelle jedoch hinsichtlich des Ortes und der Kantenlänge modelliert, sodass diese Eigenschaften bspw. randomisiert werden können. Der Code wurde so aufgebaut, dass auch die Vernetzung automatisiert in Abhängigkeit der randomisierten Geometrie funktioniert.

Um eine große Anzahl von Simulationen für den automatisierten Modellabgleich bzw. für die Generierung einer Datenbasis für das SHM durchführen zu können, wurde das parametrische Modell mit der Matlab-ANSYS Schnittstelle kombiniert. Die Schnittstelle ermöglicht eine automatisierte Variation der Designparameter über die Matlab-Oberfläche, womit Simulationsergebnisse mit bspw. randomisierten Parameterwerten in beliebiger Anzahl erstellt werden können.

- UAP 3.2: Entwicklung eines parametrischen Modells für das Produkt.

Im Vorhaben wurden unterschiedliche Simulationsmodelle von Sandwichelementen erstellt. Hierzu wurde in der Simulations-Software ANSYS ein numerisches Modell erzeugt. Die Modelle bestanden aus je drei Komponenten, einem Kern aus PU-Schaum und jeweils einem profilierten Stahlblech an der Ober- und Unterseite. Startwerte zentraler Materialparameter wurden in Abstimmung mit den Konsortialpartnern sowie anhand von Literaturdaten abgeschätzt. In erster Näherung wurde sowohl für den Schaum als auch für den Stahl ein isotropes Materialmodell angenommen, um die Anzahl an Parametern gering zu halten. Die Parameterwerte sollten im Folgenden durch Modelfit-Algorithmen automatisiert angepasst werden, um Zielgrößen wie Systemeigenfrequenzen und Eigenmoden aus Messungen realistisch abzubilden.

Hinsichtlich der Simulation des thermo-mechanischen Verhaltens von Sandwichelementen bei Sonneneinstrahlung wurde das Modell aus UAP 3.1 parametrisiert und weiterentwickelt. Experimentelle Untersuchungen an produzierten Sandwichelementen hatten gezeigt, dass im Schaum des Sandwichelementes lokal unterschiedliche sowie anisotrope mechanische und thermische Eigenschaften vorliegen. Ursache hierfür ist die lokal unterschiedliche Zellstruktur im Schaum. Aus diesem Grund wurde ein mehrschichtiges Schaummodell entwickelt, sodass später je nach Schaumeigenschaften dem Sandwichelement lokal unterschiedliche, anisotrope Eigenschaften zugeordnet werden können.

In diesem Modell wird das Sandwichelement zunächst in Dickenrichtung in mehrere Schichten unterteilt, die sich hinsichtlich ihrer Zellstruktur voneinander unterscheiden. Die genaue Festlegung der Schichten erfolgt auf Basis einer mikroskopischen Analyse der Zellstrukturverteilung in Dickenrichtung des Sandwichelementes. Anschließend werden für jede festgelegte Schicht die dazugehörigen anisotropen thermo-mechanischen Materialeigenschaften definiert. Die Bestimmung dieser

schichtabhängigen Materialeigenschaften erfolgt mittels einer mesoskaligen Simulation auf Basis der Methode des repräsentativen Volumenelements. Hierbei wird ein Ausschnitt der Schaumzellen (bestehend aus ca. 100 Zellen) als repräsentatives Volumenelement einer einzelnen Schicht abgebildet und mit einer definierten mechanischen oder thermischen Last belastet. Aus der resultierenden Spannungs- bzw. Verformungsantwort ausgehend von der vorliegenden Zellstruktur und den Materialeigenschaften des ungeschäumten Materials werden das Elastizitätsmodul und die Wärmeausdehnung der entsprechenden Schicht abgeleitet. Diese Mesoskalensimulation wird pro Schicht durchgeführt. Die erhaltenen Materialdaten werden anschließend in dem Modell des vollständigen Sandwichelementes als Materialeigenschaften in den zuvor definierten Schichten herangezogen.

Mit diesem Modell wurde im nächsten Schritt eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um zu bewerten, welche Materialinputgrößen (Schaumstruktur, Schaumorientierung, Materialeigenschaften des ungeschäumten Materials) einen Einfluss auf das zeitabhängige mechanische Verhalten haben. Dabei stellten sich insbesondere die Zellorientierung, das Aspektverhältnis der Zellen (Verhältnis längste zur kürzesten Achse der Schaumzelle) sowie das Elastizitätsmodul des ungeschäumten Materials als wesentliche Parameter heraus. Ein Vergleich des Mehrschichtmodells mit dem Modell mit homogenen Materialeigenschaften belegt zudem, dass die lokal unterschiedlichen Materialeigenschaften bei der Sandwichelement-Auslegung mitberücksichtigt werden sollten, da diese die resultierende Spannungsverteilung maßgeblich beeinflussen.

In der zweiten Projekthälfte wurden Sandwichelementgeometrien als technische Zeichnungen vom Partner ArcelorMittal bereitgestellt. Diese weisen eine definierte Querschnittsgeometrie auf. Diese Querschnittsgeometrie wurde in ANSYS parametrisch nachmodelliert und den bereits vorhandenen Modellen in der Modellsammlung des Digitalen Zwillinges hinzugefügt. Die Modelle werden über den parametrischen APDL-Code automatisch erzeugt. Ausgehend vom Volumenmodell wurde ein Finite-Elemente-Modell durch Vernetzung erzeugt. Hierbei wurde eine Konvergenzanalyse durch Betrachtung der Änderung der Eigenfrequenzen nach einer Modalanalyse durchgeführt. Hiermit wurde die notwendige Netzgröße abgeschätzt. Die Moden wurden im Anschluss verwendet, um eine harmonische Analyse für definierte Punkte über eine modale Superposition durchzuführen.

- UAP 3.3: Automatisierter Model-Fit anhand von Messdaten.

Für einen Abgleich wurden die gemessenen und numerisch bestimmten Eigenmoden miteinander verglichen. Hierzu wurde das sogenannte Modal Assurance Criterion (MAC) verwendet. Das MAC nimmt Werte zwischen 0 und 1 an, wobei 1 eine genauere Übereinstimmung zwischen den Eigenmoden entspricht. Das MAC ist definiert über

$$MAC(\phi_r, \phi_s) = \frac{|\phi_r^T \phi_s|^2}{\phi_r^T \phi_r \phi_s^T \phi_s}$$

wo ϕ die gemessenen und numerisch bestimmten Eigenmoden beschreiben. In der Praxis wird für MAC-Werte $> 0,8$ eine Übereinstimmung angenommen. Unter dieser Annahme werden die gemessenen und numerisch bestimmten Eigenfrequenzen miteinander verglichen. Bis zur zwölften Eigenfrequenz wird das Verhalten vom Modell unterschätzt. Für die darüberliegenden Eigenfrequenzen wird die Höhe der Eigenfrequenzen überschätzt. Die elfte und zwölfte Eigenfrequenz sind vertauscht. Diese Differenzen motivierten eine Parameterkalibrierung, um das gemessene Verhalten besser abbilden zu können. Zur objektiven Kalibrierung der Modellparameter wurde ein sensitivitätsbasierter Optimierungsalgorithmus verwendet. Im ersten Schritt wurden die Modellparameter ausgewählt, die einen großen Einfluss (Sensitivität) auf das Simulationsergebnis haben. In diesem Fall wurden folgende Parameter für den Abgleich ausgewählt:

- E-Modul Stahl
- E-Modul Schaum
- Querkontraktionszahl Schaum
- Dichte Schaum

Zur Beschleunigung des sogenannten Modellabgleichs wurde das parametrische Modell in der Simulationsumgebung ANSYS Mechanical verwendet. Der Vergleich und die Bestimmung eines neuen Parametersatzes erfolgte in der Entwicklungsumgebung MATLAB. Im Rahmen des APs wurde die bereits vorhandene Schnittstelle zwischen ANSYS Mechanical und MATLAB erweitert und in den Abgleichsalgorithmus integriert. Der Workflow wurde komplett automatisiert, sodass die Messdaten der experimentellen Charakterisierung und die Simulationsdaten über die Matlab-ANSYS Schnittstelle verarbeitet und kombiniert werden. Auf dieser Basis konnte ein Abgleich und eine Parameterkalibrierung über einen sensitivitätsbasierten Ansatz durchgeführt werden. Es wurde wiederum ein MAC-Abgleich durchgeführt, damit nur Eigenfrequenzen miteinander verglichen werden, deren Eigenmoden einen MAC-Wert $> 0,8$ haben. Die Diskrepanz zwischen den Eigenfrequenzen bis zur zwölften Eigenfrequenz wurde durch die Anpassung der Modellparameter verringert. Allerdings sind die elfte und zwölfte Eigenfrequenz vertauscht und für die höheren Eigenfrequenzen (größer 12) ist die Differenz größer. Die Anpassung wurde hauptsächlich durch eine Erhöhung des E-Moduls des Stahls erreicht. Die Höhe der Anpassung von +30% und die Tatsache, dass die elfte Eigenfrequenz verschoben ist, lässt auf Ungenauigkeiten in der Modellierung schließen. Mögliche Ungenauigkeiten können die Dicken der Stahlbleche des Sandwich und der Geometrie der Profilierung sein.

- UAP 3.4: Echtzeit-Model-Fit

Die Echtzeitfähigkeit der Modellanpassung kann und soll nur für ausgewählte, kritische Eigenschaften erreicht werden. Im Rahmen des Projektes waren insbesondere Fehlstelleneigenschaften wie die Existenz (Detektion) und die Position (Lokalisation)

von Interesse. Eine echtzeitfähige Modellanpassung des Digitalen Zwillings wurde im Vorhaben über datenbasierte Methoden im Sinne des SHM erreicht. Ziel war es, über ein vorgelagertes Training von Datenmodellen (KI-Modellen), ein tatsächlich echtzeitfähiges Modell zu erhalten, das in der Größenordnung von Sekunden eine Aussage über den Zustand der Fehlstellen in Sandwichelementen treffen kann und dazu lediglich Messdaten (reale oder synthetische) verwendet.

Vorerst wurden an einem Kirchhoff-Plattenmodell Algorithmen der Schadensdetektion mithilfe von Übertragungsfunktionen implementiert und veranschaulicht. Im Sinne der statistischen Mustererkennung (Statistical Pattern Recognition SPR) wurde dazu ein Modell aufgebaut bzw. „erlernt“, das unbeschädigte Daten aus dem normalen Betriebszustand umfasst und möglichst alle relevanten Betriebs- und Umwelteinflüsse berücksichtigt. Das entwickelte Modell kann im Anschluss idealerweise Daten von unbeschädigten und beschädigten Elementen unterscheiden und damit klassifizieren. Die Klassifizierung selbst erfolgt durch eine Metrik bzw. einen Algorithmus.

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden auf das erstellte parametrische Finite Elemente Modell der Sandwichelemente übertragen. Zur Schadensdetektion wurde zunächst das Finite Elemente Modell der Sandwichstruktur verwendet, welches mit einer normalverteilten Streuung der Deckblech-Steifigkeit (2 % Standardabweichung) beaufschlagt wurde. Diese repräsentiert die normale statistische Streuung ohne Einfluss einer Schädigung. Für den Fall der beschädigten Elemente, wurde die geometrisch modellierte Fehlstelle hinsichtlich ihres Orts entlang der Länge des Elements randomisiert. Die Übertragungsfunktionen einer lateralen Kraft an einem Punkt auf die laterale Beschleunigung an zwei Messpunkten wurde für mehrere Elemente ohne und mit Fehlstelle berechnet.

Im nächsten Schritt wurden „Features“ definiert, die aus den Übertragungsfunktionen abgeleitet wurden. Mithilfe der berechneten Features wurde eine mehrdimensionale Punktwolke der Daten generiert. Mithilfe einer Abstandsmetrik (Mahalanobis-Abstand: bestimmt Abstand von Einzelmessung zur Gesamtverteilung mit Einbezug der Kovarianz) wurde ein Klassifizierungsalgorithmus der Datenpunkte ausgelegt. Es wurde ein automatisiertes Festsetzen des Grenzwerts definiert, der sich aus dem Mittelwert der bekannten Minimalwerte der Elemente mit Fehlstellen und dem Maximalwert der Elemente ohne Fehlstellen ableitet. Um die Daten zur Klassifizierung realitätsgetreuer darzustellen, wurden die Übertragungsfunktionen mit einem weißen Rauschen überlagert. Es wurde eine Klassifizier-Genauigkeit von knapp 90 % erreicht, die durch die Streuung weiterer Parameter noch stärker abgesenkt wurde.

Da die Erkennungsrate bei komplexeren Modellen mit realistischen Materialparameter-Streuungen deutlich unter 60 % sank, wurde im nächsten Schritt die Klassifizierung über ein künstliches neuronales Netz untersucht. Im Rahmen des Vorhabens wurden mehrere Datensätze zu unterschiedlichen Fehlstellenvarianten und Klassifizierungsarten erstellt und zum Testen des Workflows mit neuronalem Netz verwendet. Der Datensatz wurde stets randomisiert und in Trainings- (Daten, die das neuronale Netz für das Training verwendet hat) sowie Testdaten (Daten, die das

neuronalen Netz noch nicht zum Training gesehen hat) aufgeteilt. Stets wurde die Erkennungsrate der Testdaten wie üblich in der Literatur als relevante Metrik zur Beschreibung der Güte des Datenmodells verwendet, da hiermit die Zuverlässigkeit der Klassifizierung von Fehlstellen robust beschrieben wird.

Das FE-Modell eines Sandwichelements wurde in einem ersten Schritt an einem Punkt mit einer Einheitskraft angeregt, an insgesamt 15 Punkten die Beschleunigungsreaktion ausgewertet und Übertragungsfunktionen bestimmt. Die Fehlstellen wurden als Würfel mit 2 cm x 2 cm Kantenlänge im Schaum unter dem Deckblech modelliert und hinsichtlich Position im Modell randomisiert. Um im Anschluss die Lokalisation durchführen zu können, wurde das Modell in 15 Substrukturen als diskrete Positionsklassen unterteilt. Insgesamt wurden 600 gelabelte Datensätze erzeugt – 300 ohne und 300 mit Defekt.

Wie zuvor wurde ein Feature-Engineering durchgeführt, das jedoch erweitert wurde. Hierfür wurden die Frequenzbereichs-Features mean frequency, mean phase, maximum value, minimum value, curtosis und skewness verwendet. Die berechneten Features wurden im Anschluss normalisiert, also auf ein Intervall von -1 bis +1 transformiert. Somit wird verhindert, dass einzelne Features um Größenordnungen höhere Werte besitzen als andere. Schließlich wurde eine principal component analysis durchgeführt, mit der die Dimension der Feature-Matrizen reduziert wurde, wodurch die Recheneffizienz gesteigert wurde. Schließlich wurden die ermittelten Feature-Matrizen als Eingänge für ein neuronales Netz genutzt, das im Anschluss trainiert wurde. Für die Detektion konnte eine richtige Zuordnung der Testdaten von 97.5 % erreicht werden, was als ausreichend genau für die adressierte praktische Anwendung gesehen werden kann. Bei der Lokalisation wurde eine richtige Zuordnung der Testdaten von 58.3 % erreicht. Diese Abweichung lässt sich mit einem Overfitting erklären, das im weiteren Projektverlauf minimiert wurde.

Der Workflow zur Fehlstellendetektion und Lokalisation wurde um eine Black Box Optimierung (Optimierungstool: Optuna) ergänzt, um eine sinnvolle Kombination von Hyperparametern des Datenmodells auszuwählen. Mithilfe einer Bayes'schen Optimierung wurde dabei die Erkennungsrate der Testdaten als Zielfunktion maximiert, womit gleichzeitig Overfitting reduziert wurde. Als Parameter fungierten dabei die Hyperparameter wie Anzahl Epochen des Trainings, Anzahl der Elemente in den hidden layers, der loss factor und die learning rate.

Der gesamte Workflow, der im Vorhaben vielfach verwendet wurde, fasst die wesentlichen Schritte zusammen und ist in Bild 4 dargestellt.

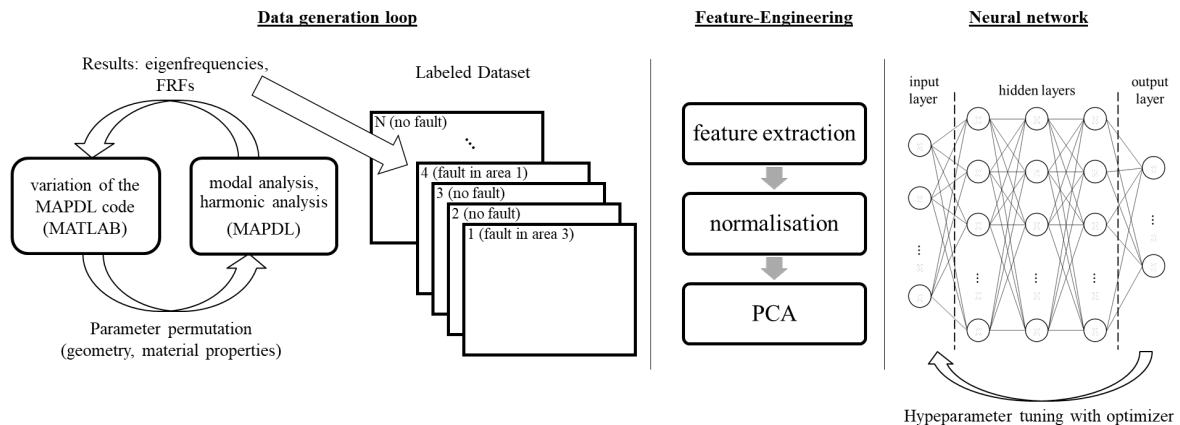


Bild 4: Workflow für Datengeneration, Feature Engineering und Fehlerklassifikation

Im beschriebenen Datensatz mit 600 Samples konnte die Detektion schon ohne Optimierer sehr zufriedenstellende Ergebnisse liefern. Die Lokalisation der Fehlstellen konnte mit einem grid search Algorithmus von 58.3 % auf 72.3 % erhöht werden (wobei der Zufall 6,7 % entspricht). Unter Verwendung der Bayes'schen Optimierung ließ sich die Erkennungsrate weiter auf 76,3 % verbessern.

In nächsten Schritt wurde der Datensatz angepasst. Es wurde eine Variante mit 15 Substrukturen und quaderförmigen Fehlstellen mit variabler Kantenlänge (1 cm bis 5 cm) getestet. Dabei wurden sowohl die Position als auch die Kantenlänge gleichverteilt randomisiert. Weiterhin wurde der E-Modul mit einer normalverteilten Variation mit einer Standardabweichung von 7,85 % um den Mittelwert von 3,75 MPa versehen. Die Werte wurden vom Partner IFSW aus Materialprüfungen im Rahmen des Projekts bereitgestellt. Durch die größere Variation zentraler Modellparameter war zunächst ein deutlich niedrigerer Wert der Zielfunktion nach Training des neuronalen Netzes zu erwarten als beim bisherigen Modell. Es ergab sich nach Optimierung mit Optuna eine Erkennungsrate der Detektion von 95,3 % (Zufall == 50 %) und bei der Lokalisation von nur noch 50 % (Zufall == 6,7 %).

Aus diesem Grund wurde das Feature Engineering nochmals erweitert. Dies wurde durch Einbindung von Zeitbereichs-Features über einer inverse FFT der Frequenzbereichs-Daten bei Annahme einer Anregungskraft von 1 N und einer Dauer von 1 s erreicht. Die verwendeten Zeitbereichs-Features waren dabei folgende: Min, Max, Mittelwert, Rms-Wert, Varianz, Standardabweichung, Leistung, Peak-Wert, Peak-to-Peak-Wert, CrestFactor, Skewness, Kurtosis, FormFactor, PulseIndicator. Für den Datensatz ergab sich nach Optimierung ein Wert der Zielfunktion von 62,5 %.

In einem weiteren Test wurden die bisherigen Datensätze zu einem großen Datensatz von 1800 Samples zusammengefasst. Damit traten Fehlstellen mit variabler und konstanter Kantenlänge (2 cm) und zudem unterschiedliche Schaum-E-Moduln mit unterschiedlichen Standardabweichungen zusammen auf. Damit wurde gezeigt, dass das Modell auch für verschiedene Sandwichelement-Typen zugleich trainiert werden kann. Es wurde ein Wert der Zielfunktion von 95,3 % bei der Detektion und von 67,5 % bei der Lokalisation erreicht. Letzterer ist höher als beim Datensatz, in dem nur die Variante der variablen Fehlstellengröße vorkam.

Im Rahmen von Projekttreffen wurde diskutiert, dass für die praktische Anwendung eine Aufteilung in Substrukturen in einer Raumdimension praktikabler erscheint, da in der Produktion bei Auftreten einer Fehlstelle keine Würfel, sondern ganze Streifen aus den Paneelen herausgeschnitten werden würden. Daher wurde für weitere Tests die Struktur in Streifen unterteilt. Die bisherigen Datensätze konnten einfach für die entsprechenden Tests verwendet werden, indem die Labels zusammengefasst wurden. Es ergab sich für den gemischten Datensatz ein Wert der Zielfunktion von 74,0 % (Zufall == 20 %). Der erreichte Wert stellte ein vorerst zufriedenstellendes Ergebnis dar, da die Lokalisation als Ergänzung der Detektion zu sehen ist, welche eine deutlich höhere Erkennungsrate aufwies.

Im nächsten Schritt erfolgte eine Modifikation und Erweiterung des Modells, um neue Datensätze erzeugen zu können. Dazu wurde eine periodische Randbedingung von fest-los-Lagerungen mit freier Rotation in den Code des parametrischen Modells implementiert, um die Lagerung ähnlich wie in der Produktion zu simulieren. Weiterhin wurde eine neue Variante der Fehlstellengeometrie in Form von Halbkugeln mit gleichverteiltem variablem Durchmesser von 1 cm bis 5 cm eingeführt.

Es wurden Streuungen zusätzlicher Materialparameter (Dichten Schaum und Stahl, E-Modul Stahl) in das Modell einbezogen und das FE-Netz an der Oberfläche des Schaums wurde verfeinert, um auch eine Ultraschall-Anregung abbilden zu können. Für das APDL-Skript wurden je nach verwendetem Frequenzbereich unterschiedliche Varianten implementiert. Im niedrigen Frequenzbereich (hier 0-1000 Hz) wurde wie zuvor die Modale Superposition zur Lösung der Harmonischen Analyse genutzt, im Ultraschall-Bereich (hier 38 – 42 kHz, um die Frequenz der Ultraschallanregung des Partners der TU Darmstadt einzuschließen) wurde die harmonisch volle Lösung im Workflow implementiert. Diese ist beim vorliegenden Modell im niederfrequenten Bereich rechenintensiver als die modale Superposition, jedoch im Ultraschallbereich deutlich effizienter. Dabei wurden weniger Frequenzstützstellen pro Hertz verwendet als im niederfrequenten Bereich, da im sehr hohen Frequenzbereich keine scharfen Überhöhungen der Amplitude zu erwarten sind, die eine feine Abtastung erforderlich machen würden.

Zuerst wurden unterschiedliche Größen von Datensätzen für den niederfrequenten Fall erzeugt. Für 200 Samples ergab sich ein Wert der Zielfunktion von 68,75 % nach Optimierung. Für 400 Samples wurde hingegen schon ein Wert von 81,25 % erreicht. Dieser Wert konnte auch durch mehrmalige Vergrößerung des Datensatzes nicht mehr weiter gesteigert werden. Weiterhin wurde das Datenmodell mit simulierten Übertragungsfunktionen im Ultraschallbereich getestet. Für die Analyse wurde ein Datensatz mit 200 Samples mit der ANSYS-Matlab-Schnittstelle erstellt. Zur Lokalisation von Fehlstellen wurde eine Optimierung mit 4000 Iterationen unter Verwendung des Optuna-Tools durchgeführt. Die Ergebnisse der Zuordnung der Testdaten zeigen, dass eine richtige Zuordnung von 69,99 % erreicht wurde. Der Zufallswert für diese Zuordnung würde bei etwa 20 % liegen. Im Vergleich zu den Ergebnissen im niederfrequenten Bereich wurde eine etwas geringere Genauigkeit erreicht. Die Ergebnisse zeigen, dass auch der Ultraschallbereich Informationen

enthält, die für die Fehlstellenklassifizierung nützlich sein können. Diese Informationen können in der Simulation aber auch in der praktischen Anwendung kombiniert genutzt werden, um die Erkennungsrate weiter zu erhöhen. Weiterhin wurde gezeigt, dass der aufgebaute Simulationsworkflow ohne Weiteres auf den Ultraschallbereich erweitert werden konnte.

Es wurde ein weiteres Feature-Selektionsverfahren implementiert und mit dem bisherigen verglichen. Grund hierfür ist, dass das bisherige Verfahren der Principal Component Analysis (PCA) ein Projektionsverfahren ist, das keine Aussage über besonders relevante Features in der Feature-Matrix ermöglicht. Die physikalische Bedeutung der Features geht bei der Hauptkomponententransformation verloren, auch wenn das Verfahren an sich funktional für die Dimensionsreduktion der Feature-Matrix ist. Das weitere getestete Verfahren war der Feature Auswahl-Algorithmus Minimum-Redundancy-Maximum-Relevance (MRMR). Dieser wählt die relevantesten Features der Feature-Matrix aus und erstellt eine Rangfolge. Alle physikalischen Informationen bleiben erhalten und es kann erkannt werden, welches Feature besonders relevant ist. Die Verfahren wurden anhand von Datensätzen aus früheren Berichtzeiträumen miteinander verglichen. Aus 1000 Datensamples (je eine Simulation) wurden je 412 Features abgeleitet. Daraus wurden die N relevantesten mit PCA und MRMR ausgewählt und 20 Optimierungszyklen des neuronalen Netzes in Optuna bzgl. Genauigkeit der Klassifizierung Lokalisation (mit implizierter Detektion) durchlaufen.

Es war zu sehen, dass die PCA etwas höhere Zuordnungsgenauigkeiten ermöglicht als der MRMR-Algorithmus. Dies liegt daran, dass die PCA per Definition alle Informationen auf den optimalen Raum transformiert. Bei der MRMR bleibt der gleiche Raum vorhanden, es werden aber gewisse Informationen komplett gelöscht. Dieses Resultat deckt sich in Teilen mit der Literatur und bestätigt hier den Tradeoff zwischen Performanz und Interpretierbarkeit.

- UAP 3.5: Validierung der Methoden des Digitalen Zwillings

Im diesem Arbeitspaket wurde in Zusammenarbeit mit dem FG Mess- und Sensortechnik die Eignung von Modalhammer-Messungen gestartet, die ergänzend zu den Messungen mit dem Ultraschall-Array eingesetzt werden können. Eine impulsartige Anregung regt idealerweise einen sehr großen Frequenzbereich an. Die Hypothese war, dass durch die breitbandige Anregung viele Informationen über das System zu gewinnen sind, da sehr viele Moden angeregt werden. Durch die Fehlstelle entsteht ein freier Überhang des Blechs, das in diesem Bereich mit deutlich weniger Dämpfung schwingen kann als bei Schaumkontakt. Es treten sog. lokale Schwingformen auf, die einen Einfluss auf die Übertragungsfunktionen haben können.

Um die Datenmodelle auch in der Praxis zu testen, wurde als nächster Schritt eine experimentelle Untersuchung durchgeführt. Dabei wurde vorerst der niedrige Frequenzbereich genutzt. Dazu wurde eine Anregung mit einem automatischen

Modalhammer zusammen mit einer Messung mit einem Laser Doppler Vibrometer genutzt. Die Messung erfolgte an vordefinierten Messpunkten. Der Abstand zwischen den Punkten betrug je 20 cm. Um die Erkennung der Fehlstellen möglichst zu verallgemeinern, wurde nicht direkt auf den Fehlstellen (örtlich gesehen) und nicht direkt auf den Messpunkten angeregt. Stattdessen wurde bei etwa einem Drittel der Panelbreite angeregt, da somit eine geringe Wahrscheinlichkeit für die Anregung in Schwingungsknoten bestand. Insgesamt wurden vier Sandwichelemente vermessen, zwei ohne Fehlstelle und zwei mit im Konsortium definierten Norm-Fehlstellen.

Der Messablauf zur Erstellung der einzelnen Datensamples des Datensatzes lässt sich wie folgt beschreiben:

- Positionierung des Paneels an der Ausgangsposition (ganz am Rand)
- Anregung des Paneels und Messung aller 15 Messpunkte im Messfenster mit fünffacher Mittelung.
- Labeling der aufgezeichneten Daten (zum Beispiel: Ist ein Schaden im Paneel vorhanden und falls ja, ist er im aktuellen Messfenster?).
- Verschiebung in das nächste Messfenster, wobei immer um den Abstand der Messpunkte verschoben wurde.
- Das Vorgehen wurde so lange wiederholt, bis das Ende des Sandwichelements erreicht wurde.
- Jedes Sandwichelement wurde auf diese Weise dreimal vermessen, um statistische Schwankungen der Positionierung der Paneele im Datensatz widerzuspiegeln.
- Das Labeling der Daten erfolgte im Anschluss auf unterschiedliche Weisen, um die Güte für unterschiedliche Anwendungsfälle (bspw. je nach Interesse des Herstellers) zu testen.

Fall eins definiert die strikte Klassifizierung danach, ob die Fehlstelle im Messbereich vorhanden ist oder nicht. Diese Klassifizierung kann verwendet werden, um im Herstellungsprozess zu detektieren, welche Stellen des Sandwichelements von Fehlstellen betroffen sind. Damit kann der entsprechende Abschnitt des Sandwichelements abgeschnitten und entsorgt werden. Fall zwei beschreibt den Fall, dass nur danach unterschieden wird, ob eine Messung an einem Sandwichelement mit oder ohne Fehlstelle durchgeführt wurde. Diese Klassifizierung kann verwendet werden, um schon hergestellte Sandwichelemente zu klassifizieren, falls eine der Herstellung nachgelagerte Messung stattfindet. Fall drei unterscheidet drei Labels: eine Fehlstelle ist entweder im Sandwichelement nicht vorhanden oder falls eine Fehlstelle vorhanden ist, wird noch danach unterschieden, ob die Fehlstelle im Messbereich liegt oder nicht. Damit kann bspw. eine Lokalisation in schon hergestellten Sandwichelementen durchgeführt werden.

Es wurden, wie im Messablauf beschrieben, Datensätze erzeugt. Zur Klassifizierung der Daten wurde der gleiche Workflow verwendet, der in den vergangenen Berichten beschrieben wurde. Die durch die Messung erzeugten Datensätze ersetzen lediglich den Schritt der modellbasierten Erzeugung. Weiterhin wurden alle Datensätze in das hdf5-Format überführt, um diese auch nach Projektende in einem

domänenübergreifenden, standardisierten Datenformat nutzen zu können. Auf die weiteren Schritte der Datenverarbeitung und Klassifizierung wird nicht näher eingegangen, da diese analog zum simulationsbasierten Verfahren durchlaufen wurden.

Es war zu sehen, dass im Fall eins die Klassifikationsgenauigkeit schon nach einem Training mit wenigen Datensätzen sehr hoch war. In den Fällen zwei und drei wurden mehr Trainingsdaten benötigt. In allen Fällen konnte jedoch eine Zuordnungsgenauigkeit von 100 % erreicht werden, wenn 80 % (oder mehr) des Datensatzes aus Trainingsdaten besteht. Dies weist darauf hin, dass die induzierten Fehler in diesem Aufbau zuverlässig erkannt werden können. In der Praxis sind solch hohe Genauigkeiten allerdings nicht oder nur mit deutlich größeren Datensätzen zu erwarten, da die hier auftretenden Fehlergeometrien sehr unterschiedlich in Form und Position sind. Insgesamt zeigte sich aber, dass der vorerst rein mit simulativ getestete Workflow in der Praxis erfolgreich Anwendung finden konnte, womit die Methoden des Digitalen Zwillinges als validiert angesehen werden können (AP 3.5, AP4.3 & MS4).

In einer weiteren Studie wurden 20 Sandwichelemente, mit den Abmessungen $1000 \times 1000 \times 60 \text{ mm}^3$ die von ArcelorMittal bereitgestellt wurden, untersucht. Unter den Sandwichelementen waren vier ohne Fehlstelle und 16, in die während der Produktion Schaumwürfel eingelegt wurden. Die Schaumwürfel hatten entweder einen zylindrischen Hohlraum oder keinen Hohlraum. Ziel der Messungen war wie zuvor der Aufbau eines Datensatzes aus Messdaten. Im Vergleich zu früheren Messungen weisen die Fehlstellen allerdings einen deutlich geringeren Durchmesser von nur 20 mm auf und durch das Einlegen der Fehlstellen in der laufenden Produktion sind die Stahlbleche auf beiden Seiten unbeschädigt. Damit ist die Detektion und Lokalisation grundsätzlich deutlich erschwert im Vergleich zur bisherigen Messreihe. Durch die größere Datenbasis (durch mehr Paneele) als bisher wurde allerdings ein ausgleichender Effekt erwartet.

Der Messaufbau (siehe Bild 5) wurde ähnlich wie bei der ersten Studie genutzt. Die relative Position der Messpunkte des Laser-Doppler-Vibrometers sind wie bisher konstant und es wurde lediglich das Sandwichpaneel bewegt. Der Messablauf wurde im Vergleich zur ersten Studie wie folgt verändert:

- Die Aufzeichnung der Daten erfolgte im Zeitbereich. Hiermit war gewährleistet, dass auch Informationen über die absolute Amplitude des Messsignals vorhanden ist, wodurch Zeitbereichs-Features realistischer abgeleitet werden können als bei der Rücktransformation aus dem Frequenzbereich.
- Die Messpunkte wurden in der Breite auf 6 erhöht, sodass in einem Messfenster 18 Messpunkte vermessen wurden.
- Es wurde keine direkte Mittelung einzelner Messungen mehr durchgeführt, sondern mehrere Einzelmessungen. Dies soll einerseits die Möglichkeit geben, die Mittelung nachträglich durchzuführen oder nicht und damit Einsicht darüber geben, ob diese notwendig ist. Damit soll die Messung aber auch realistischeren Bedingungen gerecht werden.

- Das Labeling wird wie bisher durchgeführt. Da die Fehlstellen von außen nicht ersichtlich sind, wird (auch wenn der Ort in etwa bekannt ist) im Anschluss an die Messreihe das Deckblech von allen Elementen abgezogen.
- Eine Variation der Messfenster wird auch wie zuvor durchgeführt nur, dass durch die kürzere Länge der neuen Elemente lediglich drei Messfenster pro Element genutzt werden.
- Die Paneele werden am Ende eines Durchlaufs einmal um 180° um die Hochachse gedreht, wodurch sich die Position der Anregung ändert. Hiermit können mehr Daten für den Datensatz gewonnen werden.
- Die Lagerung der Paneele erfolgt bei den Messungen auf Schaumstoff, wodurch eine frei-frei Lagerung angenähert wird, die einfacher numerisch abzubilden ist.

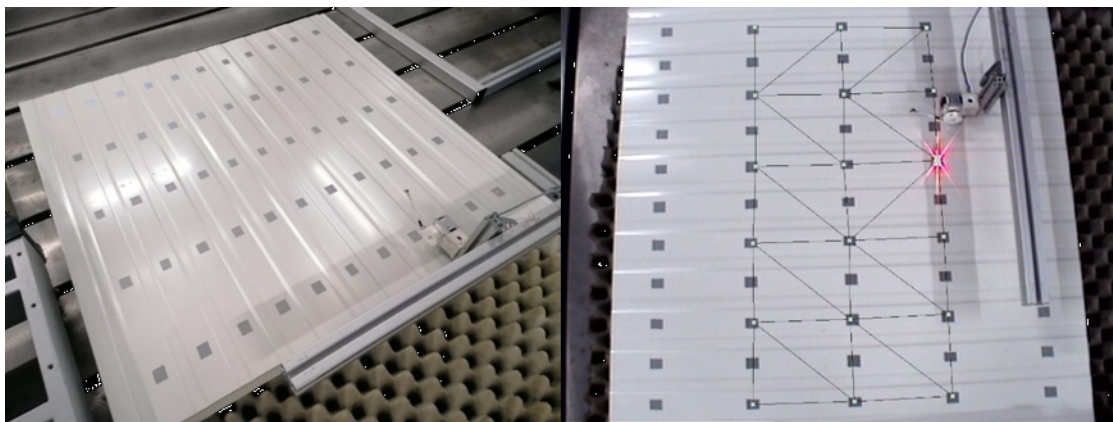


Bild 5: Messaufbau mit Paneelen von ArcelorMittal Building Solutions Deutschland GmbH

Die ersten Messergebnisse wiesen durch die Änderung des Messaufbaus und -ablaufs auch ohne Mittelung Übertragungsfunktionen mit einem niedrigen Signal-Rausch-Verhältnis auf. Durch die Mittelung von drei Messungen konnte das Rauschen weiter reduziert werden. Hiermit sinkt prinzipiell die Gefahr für eine fehlerhafte Kategorisierung der Sandwichpaneele.

AP 4: "Gewinnung der Messdaten (zerstörungsfrei und experimentell mit Zerstörung) "

- UAP 4.1: Mechanische Bauteilversuche, Kurzzeitversuche und Zeitreihen, Materialbeprobung

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden umfangreiche mechanische Versuche durchgeführt, um eine belastbare Datengrundlage für den Aufbau eines Digitalen Zwillings zu schaffen.

Hierfür wurden zahlreiche Versuchsreihen zur Bestimmung des Materialverhaltens gemäß DIN EN 14509:2013 geplant, durchgeführt und ausgewertet. Die zugehörigen Probekörper wurden von den Projektpartnern Covestro und ArcelorMittal Building Solutions bereitgestellt. Die untersuchten Sandwichelemente bestanden aus einem Polyisocyanurat (PIR)-Schaumkern und Deckschichten aus Stahl in unterschiedlichen Geometrien (eben, gesickt, mikroprofiliert). Diese Kombination entspricht dem im Bauwesen üblichen Aufbau industriell gefertigter Sandwichelemente. Bei der Auswahl der Proben wurde darauf geachtet, eine breite Palette an Produktparametern abzudecken, darunter verschiedene Deckbleche, Kerndicken und Schaumtypen.

Zusätzlich konnten bei einzelnen Produktionsserien gezielt Parameter variiert werden, um den Einfluss spezifischer Parameter auf das mechanische Verhalten der Sandwichelemente systematisch zu erfassen. In einer dieser Serien wurde insbesondere die Rohdichte des Kernmaterials und die Druckzonentemperatur (Temperatur im Doppelband) gezielt verändert. Dadurch konnten dem Digitalen Zwilling weiterführende Informationen zur Verfügung gestellt werden, etwa zu den Auswirkungen spezifischer Fertigungsbedingungen auf das mechanische Verhalten der Bauteile.

Zur Ermittlung der für die Modellierung relevanten Materialkennwerte kamen unterschiedliche Prüfverfahren zum Einsatz. So wurden Biegeversuche zur Bestimmung der Knitterspannung der Deckschichten, Schubalkenversuche zur Ermittlung des Schubmoduls und der Schubfestigkeit des Kerns sowie Würfelversuche zur Charakterisierung der Druck- und Querkzugfestigkeit einschließlich der zugehörigen Elastizitätsmoduln durchgeführt. Die mechanischen Eigenschaften des Kernmaterials wurden dabei an kleinteiligen Probekörpern gemäß DIN EN 14509:2013 bestimmt. Für die Zug- und Druckversuche wurden würfelförmige Proben mit den Abmessungen 100 mm x 100 mm x Dicke verwendet und für die Schubversuche Balkenproben mit den Maßen Länge x 100 mm x Dicke, wobei die Länge in Abhängigkeit von der Dicke der Probekörper gewählt wurde. Im Einzelnen wurden folgende Probekörper untersucht:

Bauteil-, Zug-, Druck- und Schubversuche:

1. Sandwichwandelemente, $D = 40$ mm, äußeres Deckblech eben ($t = 0,45$ mm) und inneres Deckblech eben ($t = 0,445$ mm)
2. Sandwichwandelemente, $D = 40$ mm, äußeres Deckblech gesickt ($t = 0,63$ mm) und inneres Deckblech gesickt ($t = 0,50$ mm)
3. Sandwichwandelemente, $D = 100$ mm, äußeres Deckblech mikroprofiliert ($t = 0,63$ mm) und inneres Deckblech gesickt ($t = 0,50$ mm)
4. Sandwichwandelemente, $D = 100$ mm, äußeres Deckblech eben ($t = 0,425$ mm) und inneres Deckblech gesickt ($t = 0,420$ mm)

Nur Bauteilversuche (zum Teil reklamierte Baustellenrückläufer mit lokalen Fehlstellen):

1. Sandwichwandelemente, $D = 100$ mm, äußeres Deckblech mikroprofiliert ($t = 0,63$ mm) und inneres Deckblech gesickt ($t = 0,50$ mm)
2. Sandwichwandelemente, $D = 60$ mm, äußeres Deckblech mikroprofiliert ($t = 0,50$ mm) und inneres Deckblech gesickt ($t = 0,40$ mm)

Die Biegeversuche wurden an großformatigen Bauteilen mit voller Breite durchgeführt. Die Länge der Probekörper wurde so gewählt, dass primär ein Biegeversagen, in der Regel durch das Knittern der druckbeanspruchten Deckschicht, hervorgerufen werden konnte und kein Schubversagen dominierte. Aus den resultierenden Kraft-Verformungs-Diagrammen konnte die maximal aufnehmbare Last bestimmt und die aufnehmbare Knitterspannung berechnet werden.

Neben intakten Referenzbauteilen wurden dabei auch Bauteile mit lokal vorhandenen Fehlstellen in Form von Deckblechablösungen getestet. Diese Versuche dienten der systematischen Untersuchung des Einflusses solcher Unregelmäßigkeiten auf die Tragfähigkeit (siehe auch UAP 1.2).

Die Ergebnisse der mechanischen Versuche der kleinteiligen Probekörper lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- **Zugversuche:** Bestimmung von Zugmodul (E_{ct}) und Zugfestigkeit (f_{ct}) des Kernmaterials
- **Druckversuche:** Bestimmung von Druckmodul (E_{cc}) und Druckfestigkeit (f_{cc}) des Kernmaterials
- **Schubversuche:** Ermittlung von Schubmodul (G_c) und Schubfestigkeit (f_{cv}) des Kernmaterials

Insgesamt konnten durch die umfangreichen Versuchsreihen eine breite Datengrundlage zum mechanischen Verhalten der Sandwichbauteile geschaffen werden. Diese Datensammlung bildet nicht nur die Basis für den Digitalen Zwilling, sondern lieferte auch wertvolle Erkenntnisse für die spätere Entwicklung des Bemessungstools im Rahmen von UAP 5.2.

Des Weiteren wurden Bruchzähigkeitsuntersuchungen mittels J-Integral in Hinblick auf Alterungsverhalten und Weichmachergehalt durchgeführt. Die J-Integralprüfung wurde

mittels SENB-Proben (Single Edge Notched Beam) nach der Begley-Landes-Methode durchgeführt. Die Proben wurden mit einer Kreissäge auf 20 mm Breite, 40 mm Höhe und 180 mm Länge zugeschnitten, mit einer Risslänge von 20 mm. Die Tests erfolgten bei 23°C und 49% relativer Luftfeuchtigkeit mit einer Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min und einem Stützabstand von 160 mm.

Die Untersuchungen umfassten die Charakterisierung ungealterter Sandwichelemente, Referenzmaterialien sowie Alterungsstudien bei 110°C und 130°C für bis zu 64 Tage unter Lufteinfluss. Zusätzlich wurden Formulierungsvariationen mit unterschiedlichen Weichmachergehalten (0-16 Gew.-%) untersucht und bei 110°C bis zu 32 Tage gealtert.

Die Ergebnisse zeigten hochreproduzierbares Bruchverhalten mit positionsabhängigen J-Integral-Werten zwischen 38,4 und 51,3 J/m. Bei der Alterung wurde ein starker anfänglicher Abfall der Bruchzähigkeit (0-1 Tag) beobachtet, gefolgt von einer kontinuierlichen Abnahme nach einem Potenzgesetz. Höhere Temperaturen beschleunigten die Degradation erwartungsgemäß, mit einer Aktivierungsenergie von 129 kJ/mol.

Überraschenderweise führte ein höherer Weichmachergehalt zu geringerer Bruchzähigkeit, jedoch zu langsamerer Alterung. Die Selbstähnlichkeit im logarithmischen Maßstab ermöglichte die Anwendung der Zeit-Temperatur-Superposition (TTS).

- UAP 4.2: Charakterisierung von Proben mit bekannten Eigenschaften und Fehlstellen.

Das Ziel des Arbeitspakets 4.2 war die experimentelle Charakterisierung von Sandwichelementen mit gezielt eingebrachten, bekannten Fehlstellen. Diese Datengrundlage ist essenziell für die spätere algorithmische Auswertung und Modellbildung, da nur auf Basis eindeutig dokumentierter Fehlertypen und -geometrien eine zuverlässige Detektion und Klassifizierung durch das Messsystem erfolgen kann.

(1) Herstellung und Auswahl charakterisierter Prüfproben

Zur Abbildung realistischer Fehlerbilder wurden in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Covestro und ArcelorMittal unterschiedliche Prüfproben mit gezielt eingebrachten Fehlstellen hergestellt. Ziel war es, verschiedene Typen von Normfehlern (Lunker, Delaminationen, Einschlüsse) in Lage, Größe und Tiefe systematisch zu variieren. Zum Einsatz kamen dabei unter anderem:

- Sonnenblumenöl, Schmierfett, Wasser: Als flüssige Trennmedien auf das untere Blech appliziert, um Adhäsionsstörungen im Schaum zu erzeugen.

- Papier, Aluminiumfolie, Teflonfolie: Als feste Einschlüsse zur Simulation von Delaminationen oder Lufteinschlüssen im Schaumkern.
- Eiswürfel: Während der Produktion eingesetzt, um lokal definiert Lunker zu erzeugen. Hierbei war die Theorie, dass der Eiswürfel durch die Wärme schmilzt und im Zuge der Verschäumung ein Hohlraum bilden kann.
- Schaumwürfel mit definierten Hohlräumen: Als künstliche Inhomogenitäten in der Kernstruktur.
- Nachträgliche Defekte: Durch Schnitte mit scharfen Werkzeugen (Messern), Ausfräsungen, Ausschabungen oder punktuelle Überlastung (Heizmatte).

Für die Ultraschallmessung zeigte sich im Laufe des Projekts ausschließlich die nachträgliche Ausfräsung als Hilfreich und so wurde auch der Normfehler definiert. Im späteren Verlauf des Projektes wurden auch eingelegte Schaumwürfel mit definierten Hohlräumen verwendet, da diese sich einfach in eine Produktionslinienmessung integrieren lassen.

(2) Messdatenerhebung und -auswertung

Die Proben wurden mit dem entwickelten luftgekoppelten Ultraschallsystem (vgl. AP 2) umfangreich untersucht. Dabei kamen unterschiedliche Konfigurationen zum Einsatz, z.B. die Nutzung verschiedener Empfänger (Laser-Doppler-Vibrometer, Mikrofone, Mikrofonarrays), oder verschiedene Kopplungswinkel und Abstände.

Ziel war es, robuste Parameterbereiche zu identifizieren, in denen die Fehlstellen zuverlässig detektiert werden können. Die durchgeführten Messungen erfolgten stets im Vergleich mit Referenzproben ohne Defekte, um Differenzanalysen (Amplitude, Laufzeit, Wellenform, SNR) zu ermöglichen.

(3) Bewertungskriterien

Basierend auf den Messungen wurden Metriken zur Defektdetektion dargestellt. Diese sind aber stark von Umgebungsbedingungen abhängig und lassen sich nicht einfach aufstellen. Defekte werden vor allem durch eine lokale Änderung der Signalamplitude um einige Prozent festgestellt. Hierbei muss allerdings beachtet werden, dass z.B. Temperaturänderungen einen ähnlichen Effekt haben können, nur langsamer. Darüber hinaus wurden Empfehlungen zu optimalen Messkonfigurationen (Kopplungswinkel, Frequenzbereich, Geometrieabstand) formuliert.

- UAP 4.3: Aufnahme von Messdaten bei der Herstellung und im eingebauten Zustand.

Ziel dieses Arbeitspakets war die Durchführung systematischer Messreihen mit dem luftgekoppelten Ultraschallsystem während des Produktionsprozesses sowie im eingebauten Zustand. Die Messungen während der Produktion waren erfolgreich. Es wurden aber in diesem Projekt keine Messungen an verbauten Sandwichelementen durchgeführt

Planung der Versuchsreihen in der Produktion

Basierend auf den Ergebnissen aus den vorangegangenen Arbeitspaketen (insb. AP 2.2, AP 2.4, AP 4.2) wurden detaillierte Versuchsreihen geplant, die auf reale Produktionsbedingungen abgestimmt waren. Messungen wurden an einer definierten Stelle entlang der Produktionslinie durchgeführt; konkret nach der Druckzone, allerdings noch vor der Säge. Verschiedene Produkttypen mit variierenden Blechdicken und Oberflächenprofilierungen wurden berücksichtigt. Die Messreihen fanden in enger Abstimmung mit den Industriepartnern Covestro und ArcelorMittal statt und wurden unter realen Produktionsbedingungen durchgeführt.

Durchführung der Versuchsreihen im Produktionsumfeld

Das luftgekoppelte Messsystem wurde unter anderem in der Produktionslinie im Werk Brehna bei ArcelorMittal eingesetzt. Dort wurden mehrere Chargen von Sandwichelementen unterschiedlicher Bauart untersucht. Im Verlauf der Versuche wurden unter anderem:

- Künstliche Defekte in frisch geschäumten Elementen detektiert,
- Umgebungsbedingungen, wie z.B. Störsignale analysiert
- Unterschiede zwischen Chargen erfasst und ausgewertet,
- und die Signalqualität unter verschiedenen Prozessbedingungen (z.B. Variation der Produktionsgeschwindigkeit, Temperaturschwankungen, Umgebungsgeräusche) erfasst.

Die Ergebnisse bestätigten die prinzipielle Eignung des Messsystems für die Inline-Prüfung in einer industriellen Umgebung.

Neben den Messdaten des neuen ultraschallbasierten Messsystem wurden während der Produktion auch weitere Prozessparameter durch die bereits verbaute Sensorik erfasst und aufgezeichnet. Covestro hat die Prozessparameter der für ReSaMon erstellten Paneele mit den Partnern umfänglich geteilt. Die Zeitreihen, bestehend aus Temperaturverläufen, Massenströmen, Drücken und weiteren wichtigen Parameter geben einen wichtigen Einblick in die Herstellung der Paneele. Die Parameter sind in das vom LBF erstellte Datenmodell eingeflossen.

- UAP 4.4: Verifizierung des mechanischen Modells mittels Abgleiches mit Versuchsergebnissen sowie produktionsbegleitenden Messungen.

In diesem Arbeitspaket wurde das Ziel verfolgt, die im Projekt entwickelten mechanischen Modelle zur Spannungsverteilung in Sandwichelementen zu verifizieren und zu verbessern. Hierzu wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt, bei denen klassische Biegeversuche mit zerstörungsfreier, luftgekoppelter Ultraschallspannungsmessung kombiniert wurden. Das Fachgebiet MUST und das IFSW haben alle vorgesehenen Arbeiten erfolgreich durchgeführt.

Durchführung von Biegeversuchen mit paralleler Ultraschallmessung

Zur Verifizierung der Modelle wurden Vier-Punkt-Biegeversuche gemäß EN 14509:2013 durchgeführt. Dabei kamen handelsübliche, geschäumte Sandwichpaneele zum Einsatz, die über eine 0,5 mm dicke, liniert Stahldeckschicht und einen PIR-Schaumkern verfügen. Die Belastung erfolgte bis 120 MPa Normalspannung in der Deckschicht.

Die Spannung wurde mit zwei Verfahren simultan gemessen: Klassisch mittels Dehnungsmessstreifen (DMS), sowie neuartig über nicht-kontaktierende Ultraschallmessung durch das luftgekoppelte System von MUST.

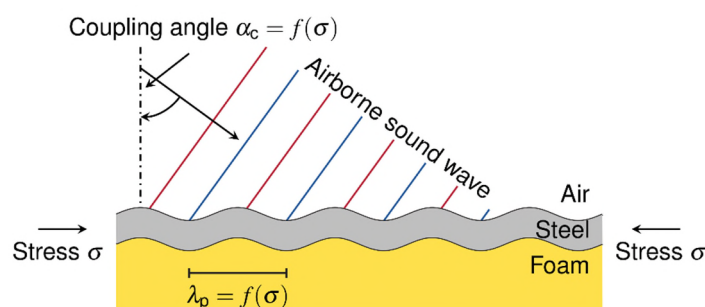


Bild 6: Der Einkoppelwinkel der luftgekoppelten Ultraschallwelle wird genutzt um die mech. Spannung im Sandwichelement zu bestimmen.

Hierbei wurde sowohl die Transitzeit (Gruppengeschwindigkeit) als auch der Einkopplungswinkel (Phasengeschwindigkeit) luftgekoppelter Lamb-Wellen als Messgröße verwendet, siehe Bild 6.

Es wurde ein Modell zur Bestimmung der mech. Spannung aus den Ultraschalldaten (sowohl Laufzeit als auch Einkoppelwinkel) entwickelt. Es zeigte sich, dass die Modellergebnisse gut mit den Messergebnissen übereinstimmen. Kleinräumige Abweichungen (<5 MPa) konnten auf Fertigungstoleranzen (z. B. variable Profiltiefe, Blechdicke) zurückgeführt werden. Durch gezielte Variation des Kopplungswinkels konnte der Einfluss von lokalen Spannungsfeldern direkt gemessen werden.

In Zukunft könnten durch Kombination von Gruppen- und Phasengeschwindigkeit sowohl lokale Spannungen als auch Materialparameter wie Blechdicke simultan

geschätzt werden. Der Vergleich mit Referenzdaten zeigte eine gute Reproduzierbarkeit:

- Wiederholgenauigkeit der Transitzeitmethode: 2,1 MPa
- Wiederholgenauigkeit der Kopplungswinkelmethode: 4,1 MPa (Empfangsarray) bzw. 5,3 MPa (Sendearray)

Damit liegt die Genauigkeit auf einem Niveau mit aktuellen kontaktbasierten Methoden, jedoch mit den Vorteilen einer berührungslosen, zerstörungsfreien und wiederverwendbaren Messtechnik.

Alle in diesem Arbeitspaket vorgesehenen Tätigkeiten wurden planmäßig und erfolgreich umgesetzt. Die im Projekt entwickelte luftgekoppelte Spannungsmessung konnte modelltheoretisch validiert, experimentell nachgewiesen und mit klassischen Methoden verglichen werden. Die Kombination aus transitzeitbasierter und kopplungswinkelbasierter Messung erlaubt die gleichzeitige Detektion lokaler Spannungsspitzen sowie die Bewertung über größere Pfade. Die Ergebnisse wurden in einer wissenschaftlichen Veröffentlichung im Fachjournal „IEEE Open Journal of Ultrasonics“ präsentiert und tragen damit auch zur internationalen wissenschaftlichen Sichtbarkeit des Projekts bei (Zitieren Haugwitz.2025).

AP 5: Zeitabhängige Beschreibung des Schaumkerns und Produktoptimierung für die Sandwichelemente

- UAP 5.1: Beschleunigte Alterung bei erhöhter Temperatur und Übertrag auf Betriebstemperatur und lange Zeiträume

Neben den in AP 4 beschriebenen normbasierten Kurzzeitversuchen wurden auch Alterungsversuche durchgeführt. Dabei stand insbesondere die Veränderung der mechanischen Eigenschaften infolge beschleunigter Alterung im Fokus. Die Erfassung dieser Veränderungen ist ein zentraler Bestandteil der digitalen Modellbildung und für den Einsatz des Digitalen Zwillings in praxisrelevanten Szenarien von großer Bedeutung.

Für die Untersuchungen wurden in Anlehnung an UAP 4.1 folgende Sandwichelemente mit PIR-Kern und Stahl-Deckschichten getestet:

1. Sandwichwandelemente, D = 40 mm, äußeres Deckblech eben ($t = 0,45$ mm) und inneres Deckblech eben ($t = 0,445$ mm)
2. Sandwichwandelemente, D = 40 mm, äußeres Deckblech gesickt ($t = 0,63$ mm) und inneres Deckblech gesickt ($t = 0,50$ mm)
3. Sandwichwandelemente, D = 100 mm, äußeres Deckblech mikroprofiliert ($t = 0,63$ mm) und inneres Deckblech gesickt ($t = 0,50$ mm)
4. Sandwichwandelemente, D = 100 mm, äußeres Deckblech eben ($t = 0,425$ mm) und inneres Deckblech gesickt ($t = 0,420$ mm)

Eine der getesteten Serien wurde gezielt mit veränderten Produktionsparametern gefertigt, um deren Einfluss auf das Alterungsverhalten zu untersuchen. Dabei wurden zwei Parameter systematisch variiert:

- Rohdichte des PIR-Kerns: Übliche Ausführung mit 38 kg/m^3 sowie eine reduzierte Variante mit 35 kg/m^3
- Druckzonentemperatur im Doppeltransportband: Standardtemperatur von 60°C sowie eine erhöhte Variante mit 80°C .

Es zeigte sich, dass beide Parameter einen Einfluss auf das zeitabhängige Verhalten des Kernmaterials haben. Die Rohdichte bestimmt nicht nur den Grad der relativen Veränderung der mechanischen Eigenschaften, sondern auch, ob sich diese eher zeit- oder temperaturbedingt verändern. Die Doppeltransportbandtemperatur beeinflusst insbesondere die Haftung zwischen Deckschicht und Kern. Bei erhöhter Doppelbandtemperatur (80°C) konnte eine tendenziell schwächere Verbundhaftung festgestellt werden. Diese könnte wiederum eine potenzielle Schwachstelle im Hinblick auf mögliche Schadensfälle darstellen und die Schadensanfälligkeit der Elemente im Langzeiteinsatz beeinflussen.

Ergänzend sei zu erwähnen, dass versucht worden ist die Druckzonentemperatur auf 50°C weiter zu senken. Dies war allerdings mit der chemischen Rezeptur nicht möglich gewesen. Aufgrund der niedrigen Temperatur in der Druckzone war die Haftung zwischen Deckblech und PIR-Schaumkern dermaßen schlecht, dass bereits eine

Abstapelung der Paneele nicht möglich gewesen ist. Dieser Versuch musste gestoppt werden und zeigt, dass 60 °C bereits nah am unteren Limit sind. 80°C waren bei dahingehend das Maximum, was die Anlage bei Covestro technisch im Stande gewesen ist zu leisten, und markierte das obere Limit.

Die Alterung der Probekörper erfolgte in gestaffelten Zeitintervallen zwischen 0 und 42 Tagen, wobei die Lagerungstemperaturen ebenfalls variiert wurden:

- Raumtemperatur
- 80°C (in einer Klimakammer)
- Bei einer Serie zusätzlich auch 110°C und 130°C

Die Probekörper wurden nach der Lagerung entsprechend den Vorgaben aus der DIN EN 14509 bei Raumtemperatur geprüft. Dabei wurden die Zug- und Druckeigenschaften des Kernmaterials an würfelförmigen Proben mit den Abmessungen 100 mm x 100 mm x Dicke untersucht und für die Schubversuche wurden Balken mit den Abmessungen Länge x 100 mm x Dicke verwendet. Ausgewertet wurden jeweils die Modul- und Festigkeitswerte.

Die Versuche zeigten sowohl in Bezug auf Steifigkeit und Festigkeit eine deutliche Veränderung der mechanischen Eigenschaften des Kernmaterials infolge der künstlichen Alterung. Die Trends variierten je nach getesteter Serie (siehe Bild 7).

	E_{ct}	f_{ct}	G_c	f_{cv}
Serie 1_C D = 40 mm	↗	↗	↗	↘
Serie 2_A D = 40 mm	↗	↗	↗	↘
Serie 3_C D = 100 mm	↗	↘	↗	↗
Serie 4_A D = 100 mm	↗	↗	↘	↗

Bild 7: Trenddarstellung der mechanischen Parameter für die einzelnen Serien

Diese Ergebnisse bilden eine wesentliche Grundlage zur Berücksichtigung des zeit- und temperaturabhängigen Materialverhaltens bei der Bemessung von Sandwichelementen, wie es in UAP 5.2 im Rahmen der Entwicklung des Bemessungstools erforderlich ist.

Die oben beschriebenen Untersuchungen wurden am IFSW durchgeführt. Zusätzlich hat Covestro die strukturellen und thermo-mechanischen Alterungsprozesse in PUR/PIR-Schäumen untersucht. Der Fokus lag auf physikalisch-morphologischen Veränderungen, da die chemischen Alterungsmechanismen in der Literatur bereits gut dokumentiert sind.

Zur Untersuchung wurden MP-Muster mit 100 mm Schaumdicke beschleunigt gealtert (110 °C–170 °C, bis zu 16 Tage). Verschiedene Analysemethoden kamen zum Einsatz: DMA, TMA, AFM, SEM, optische Mikroskopie sowie Farb- und Dichteanalysen.

Wesentliche Ergebnisse:

- Zellstruktur: Die ursprünglich anisotrope Zellmorphologie (z. B. gestreckte Zellen in Produktionsrichtung) wird mit zunehmender Alterung runder – ein Relaxationsprozess in Richtung des energetisch günstigeren Zustands. Dies führt zu makroskopischen Dimensionsänderungen: Schrumpfung in Produktionsrichtung, Ausdehnung in Steigrichtung.
- Innere Spannungen: Da die Schäume zwischen Stahlblechen fixiert sind, kann die natürliche Relaxation nicht stattfinden. Es entstehen interne Spannungen, die Delamination und Knittern begünstigen.
- Phasenmorphologie: AFM zeigt eine Homogenisierung des ursprünglich zweiphasigen Systems (PUR-Matrix mit PIR-reichen Domänen). Diese führt zu einer Erhöhung der Erweichungstemperatur und mechanischen Steifigkeit, jedoch auch zu möglicher Versprödung.
- Thermomechanik: DMA und TMA zeigen klare Alterungseffekte – besonders die Softening-Temperatur verschiebt sich stark nach oben (z. B. von ca. 145 °C auf über 180 °C). Der Einfluss der Temperatur ist hierbei deutlich größer als der der Zeit.
- Vorhersage durch TTS: Die Alterungsprozesse (z. B. Massenverlust, Farbänderung, Dimensionsänderung) können durch Zeit-Temperatur-Superposition gut beschrieben werden. Die ermittelten Aktivierungsenergien (z. B. 80 kJ/mol für Masse, 224 kJ/mol für Softening) zeigen die Temperatursensitivität der jeweiligen Prozesse.

Fazit: Die Alterung von PUR/PIR-Schäumen betrifft nicht nur chemische, sondern auch strukturelle und mechanische Eigenschaften. Besonders kritisch ist die durch Alterung bedingte Zellrelaxation, die bei fixierten Systemen zu Spannungen und somit zu relevanten Schadensbildern wie Delamination führen kann. Zur Verbesserung der Langzeitstabilität sollten runde Zellformen und homogene Netzwerke bereits in der Herstellung angestrebt werden.

- UAP 5.2: Entwicklung eines Bemessungsverfahrens und Kopplung desselben an den Digitalen Zwilling.

Zur Entwicklung des geplanten Bemessungsverfahrens, welches das zeit- und temperaturabhängige Verhalten des Kernmaterials berücksichtigt, wurden die Versuchsergebnisse aus UAP 5.1 systematisch analysiert.

Die Analyse diente der Identifikation und Interpretation von Alterungstrends unterschiedlicher Schaumsysteme, um deren Einfluss auf die Tragfähigkeit im Langzeiteinsatz besser zu verstehen.

Abweichend vom ursprünglich vorgesehenen Bemessungskonzept wurde ein anwendungsorientiertes Bemessungstool entwickelt. Dieses ermöglicht die Analyse der Auswirkungen veränderter Materialkennwerte auf die Schnittgrößenverteilung in Sandwichelementen.

In einem Arbeitstreffen zum Arbeitspaket wurde die Möglichkeit der Anbindung der Datensammlung (AP 1) an die Norm EN 14509 diskutiert. Aufgabe des LBF war die Kopplung des Bemessungsverfahrens an den Digitalen Zwilling. Hierbei wurde nach Rücksprache mit dem Partner IFSW und is-engineering die Norm EN 14509:2013 genutzt. Die Formel für den Abminderungsfaktor verwendet Informationen über E-Modul und Festigkeit von Materialproben, die bei unterschiedlichen Temperaturen gelagert wurden. Für Paneele in Außenanwendungen mit leicht profilierten oder flachen Oberflächen und einer Oberflächentemperatur über +20 °C müssen übliche Festigkeitsergebnisse mit dem Faktor k_1 reduziert werden. Die Kopplung an die Datenstruktur ist mithilfe der vorgestellten Routinen zur systematischen Darstellung und Durchsuchbarkeit möglich.

- UAP 5.3: Modellierung des Effekts von Eingangsparametern auf Material- und Alterungseigenschaften.

Simulative Untersuchungen mit dem Simulationsmodell aus UAP3 zum Einfluss der Schaumalterung auf das Sandwichelementverhalten haben gezeigt, dass die zeitliche Veränderung von Elastizitätsmodul und Wärmeausdehnungskoeffizienten einen signifikanten Einfluss auf die Spannungsverteilung im Sandwichelement haben und zu zeitlich steigenden Spannungen führen können. Insbesondere bewirkt die Schaumalterung, dass die bereits vorhandenen Spannungsspitzen im kritischen Bereich des Sandwichelements (nahe der Überdecknase im Bereich der verdeckten Befestigung) signifikant zunehmen und damit verbunden eine erhöhte Gefahr der Blasenbildung entsteht. Entsprechend bedeutsam ist eine Berücksichtigung von zeitlich veränderlichen Materialeigenschaften bei der Auslegung von Sandwichelementen.

Im nächsten Schritt wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, bei der in dem in UAP3 entwickelten Simulationsmodell die Eingangsgrößen des Schaums (Schaumstruktur, Schaumorientierung, Materialeigenschaften des ungeschäumten Materials) systematisch variiert wurden. Ziel der Analyse war es zu bewerten, inwiefern diese Eingangsgrößen einen Einfluss auf das zeitabhängige mechanische Verhalten des Schaums haben. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse belegen, dass insbesondere Zellorientierung, Aspektverhältnis der Zellen sowie das Elastizitätsmodul des ungeschäumten Materials einen wesentlichen Einfluss auf das anisotrope Sandwichelementverhalten zeigen. Vernachlässigbar ist dagegen der Einfluss der Zellstruktur. Entsprechend ist abzuleiten, dass bei einer Optimierung der Sandwichelementherstellung der Fokus auf Zellorientierung, Aspektverhältnis und Rezeptur gelegt werden sollte.

Ein Vergleich des Mehrschichtmodells mit dem Modell mit homogenen Materialeigenschaften belegt zudem, dass die lokal unterschiedlichen Materialeigenschaften bei der Sandwichelementauslegung mitberücksichtigt werden sollten, da diese die resultierende Spannungsverteilung maßgeblich beeinflussen. So zeigen die Simulationen, dass lokal unterschiedliche Materialeigenschaften zu einer Erhöhung der Spannungen in kritischen Bereichen des Sandwichelements führen und damit verbunden das Versagensrisiko über Blasenbildung steigern können.

Durch das LBF wurden Messdaten des IFSW mithilfe vorgefertigter Batch-Files aus Excel in hdf5 in die Datensammlung eingelesen. Die Daten konnten im Anschluss über Auswerteroutinen einfach visualisiert werden. Dabei wurden Messdaten unterschiedlichster Sandwichelement mit unterschiedlichen Lagerungsdauern vom Partner IFSW ausgewertet und dargestellt. Nach Rücksprache mit den Partnern IFSW und iS-engineering wurde entsprechend AP 5.2 die Norm EN 14509 genutzt. Die Formel für den Abminderungsfaktor verwendet Informationen über E-Modul und Festigkeit von Materialproben, die bei unterschiedlichen Temperaturen gelagert wurden. Für Sandwichelemente in Außenanwendungen mit leicht profilierten oder flachen Oberflächen und einer Oberflächentemperatur über +20 °C müssen übliche Festigkeitsergebnisse mit dem Faktor k_1 reduziert werden. Die Kopplung an die Datenstruktur wurde wie beschrieben durchgeführt. Der Abminderungsfaktor wurde aus den Messergebnissen zu E-Modul und Festigkeit ermittelt und es zeigte sich ein allgemeiner Trend, dass der Faktor bei längeren Lagerungsdauern herstellerübergreifend absinkt, siehe Bild 8. Die Routine kann von den Projektpartnern perspektivisch verwendet werden.

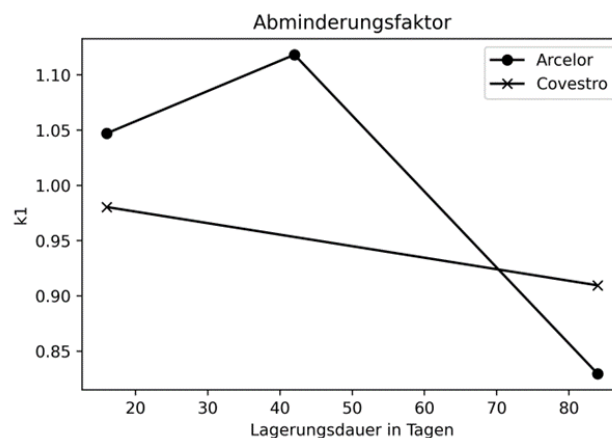


Bild 8: Darstellung des Abminderungsfaktors über der Lagerungsdauer entsprechend Bemessungsnorm

- UAP 5.4: Iterative Verifikation und Validierung für Materialgenerationen.

Zur Verifikation und Validierung der Simulationen wurden die Simulationsergebnisse mit den Ergebnissen aus experimentellen Untersuchungen an einem Thermoschock-Prüfstand verglichen. Hierbei ist jedoch nur ein qualitativer Vergleich möglich, da der Thermoschock-Prüfstand keine quantitativen Ergebnisse generiert. Bei diesem Prüfverfahren wird ein Verbund von 3 Sandwichelement für mehrere Tage

abwechselnd per IR-Strahler aufgeheizt und dann per Wasserbesprühung wieder abgekühlt. Auf diese Weise wird die zyklische Aufheizung (durch Sonneneinstrahlung) und Abkühlung der Sandwichelemente im Feldeinsatz nachgebildet. Das Ergebnis dieser Prüfung ist eine optische Begutachtung der Panels hinsichtlich Blasenbildung. Entsprechend können die Ergebnisse von Simulation und Thermoschocktest nicht direkt verglichen werden. Allerdings ist ein indirekter Vergleich durch Abgleich der berechneten Position von Spannungsspitzen in der Simulation und der Position der Blasenbildung im Thermoschocktest möglich. Dieser Vergleich offenbart, dass die Simulation genau an den Stellen (Bereich nahe der verdeckten Befestigung an der Überdecknase) Spannungsspitzen vorhersagt, an denen Blasenbildung im Thermoschocktest (und auch in der Praxis an bereits verbauten Paneelen) beobachtet werden können. Damit verstärkt es die Annahme, dass die thermo-mechanische Belastung von Sandwichelementen durch den Tag-Nacht-Zyklus zur Blasenbildung führen oder zumindest diese verstärken kann.

AP 6: Industrialisierung und Prototypenbau

- UAP 6.1: Anpassung des Messsystems an die jeweiligen Produktionsanlagen

Ziel der Arbeiten war die Umsetzung der Ergebnisse aus AP2 in ein industrietaugliches Prüfsystem. Eine Herausforderung dabei war die kontinuierliche Optimierung des Verfahrens in AP2 die letztlich zu einer erhöhten Anforderung an die Flexibilität des Prototyps gestellt hat, damit dieser im geplanten Zeitfenster fertiggestellt werden konnte. Dies wurde erreicht, indem eine sehr breitbandige Sende- und Empfangsstufe entwickelt wurde, die im Frequenzbereich von 60 bis 300 kHz einsetzbar ist.

Letztlich zeigten die Labormessungen, dass ein guter Kompromiss hinsichtlich Sensitivität, Fehlergröße und Fehlertiefe mit einer geführten Plattenwelle bei einer Arbeitsfrequenz von 200 kHz erreicht werden konnte. Im Gegensatz zu den im AP2 eingesetzten scannenden Verfahren war im industriellen Umfeld aufgrund der ständigen Bewegung des Prüflings eine echtzeitfähige, flächige Analyse erforderlich. Im Entwurf des Lösungsansatzes wurden dann lineare Anordnungen von Sende- und Empfangswandlern vorgesehen, welche jeweils eine Spur des sich ebenfalls linear bewegenden Sandwichs überprüfen. Dieses Konzept basiert auch auf der, in den meisten Fällen auftretenden linearen Profilierung des Bleches, welche zu einer zusätzlichen horizontalen Wellenleitung führt. Im Gegensatz zu der aus AP1 (Umgebungsgeräusche, Störschall) resultierenden optimalen Sensorposition nach der Säge musste hierbei jedoch auf eine Messposition mit kontinuierlichem Materialtransport, also zwischen Presse und Säge ausgewichen werden. Der Nachteil der erhöhten Störsignale konnte durch ein aufwändigeres Filterdesign und eine schnelle Messabfolge ausgeglichen werden. Im Einzelnen wurden folgende Unterkomponenten entwickelt:

(1) Ultraschallwandler

Für die Erzeugung der geführten akustischen Wellen im Deckblech musste eine linear fokussierte Schallwelle auf dem Deckblech erzeugt werden. Eine zweidimensional, dynamisch und elektronisch fokussierte Arrayanordnung war in der Mehrkanalanordnung nicht umsetzbar. Insofern wurde ein Konzept erarbeitet, bei dem mittels 4 Sendeschallwandler und einer optimierten Position eine ebene Welle auf der Oberfläche entsteht. Durch einen elektronischen Feinabgleich lässt sich das Sendesystem auf unterschiedliche Blechstärken justieren. Die erforderlichen 200 kHz Schallwandler wurden sehr breitbandig (rel. Bandbreite 35%) ausgelegt und erreichen mittels piezokeramischen Resonators sowie einer Kombination aus Dicken- und Biegeschwingung auch ausreichend Schalldruck zur akustischen Beleuchtung des Messortes. Im Rahmen der Arbeiten wurden unterschiedliche Schallwandler Konzeptionen erarbeitet und diese auch für unterschiedliche Arbeitsfrequenzen zwischen 60 kHz und 700 kHz ausgelegt und hergestellt. Diese Ultraschallwandler wurden auch in den scannenden Systemen in AP2 für Labormessungen eingesetzt. Insbesondere die 200 kHz-4 Elementversion wurde ausgehend, auch in scannenden

Verfahren und mit den Standardfehlern untersucht und final optimiert, bevor die Herstellung der Sendeelemente für das 12-Kanal Produktionssystem erfolgte. Die Herstellungsmethode wurde genauso wie die Messprotokolle der Einzelemente dokumentiert, um eine spätere Überführung in eine Serienproduktion zu gewährleisten.

(2) Vor-Ort Signalverarbeitung (Analogelektronik)

Das industrielle Messumfeld ist nicht nur durch akustische Störgeräusche, sondern insbesondere auch durch elektromagnetische Störungen geprägt. Deshalb wurden bereits bei der Konzeptionierung eine sensornahe Signalvorverarbeitung vorgesehen und diese auch inkl. Vorfiltern Sendespannungserhöhung, Elementverzögerung und dynamisch geregelten Verstärkerstufen umgesetzt. Die Arbeiten erfolgten unter Nutzung von Simulationswerkzeugen unter Berücksichtigung der frequenzabhängigen Quell- bzw. Lastimpedanzen der Schallwandler, um die Übertragungsfunktion zu optimieren. Es wurden Versuchsmuster hergestellt und hinsichtlich der Übertragungsfunktion charakterisiert und die Entstörfunktion überprüft. Das Layout und die Aufbau- und Verbindungstechnik wurden so gestaltet, dass die Schallwandler integriert werden konnten und kompakte, scheibenförmige Elemente entstanden. Diese sind nun leicht aneinander zu reihen, um die komplette Panel Breite abzudecken. Die Ausgangssignale erlauben die störungsfreie Übertragung der Signale an die Auswerteeinheit, die wiederum die Parameter der Vor-Ort Module dynamisch definieren kann. Es wurden alle für das Industriesystem erforderlichen Einheiten aufgebaut, überprüft und charakterisiert.

(3) Auswerteeinheit (Digitalelektronik mit Firmware)

Auch wenn die Fehlerbewertung im Rahmen des AP2 für Labormessungen überwiegend auf Basis der Zeitsignale erfolgte und dadurch auch Verfahren mit Nullpunktkorrekturen über die gesamte Prüfplatte oder aber Differentialauswertungen genutzt werden konnten, so ist das in der Industrieanwendung nicht mehr der Fall. Das Panel läuft weiter und eine Fehlerentscheidung muss daher umgehend getroffen werden. Die Auswerteeinheit digitalisiert alle Kanalsignale und steuert auf Basis deren Empfangsverhaltens die Parameter wie Verstärkung, Filterung und Verzögerung für alle Einzelkanäle dynamisch. Gleichzeitig werden die Kanal Empfangssignale digitalisiert, digital gefiltert und mittels eines Kalman-Filters sowie dynamischen Komparators bewertet. Der Datenstrom wird also pro Kanal und Messpunkt auf einen 16 Bit Wert reduziert. Diese Werte für alle 12 Kanäle werden zusammengefasst und über eine Ethernet Schnittstelle an die darstellende Elektronik (PC) weitergegeben. Im Rahmen der Arbeiten wurde das Feinkonzept für diese Elektronik sowie Schaltpläne, und Layout in unterschiedlichen Verbesserungsstufen erstellt und schließlich neben Testschaltungen auch das Gerät für den Industrieinsatz hergestellt und geprüft. Einen wesentlichen Teil der Arbeiten machte die Firmwareentwicklung zur Steuerung und

Auswertung der Signale in einem digitalen schnellen Signalprozessor sowie FPGA's aus.

(4) Ergebnisdarstellung

Die Ergebnisse werden mittels Ethernet an einen PC übertragen, der die ausschließliche Aufgabe der Fehlerdarstellung hat. Hierzu werden diese Ergebnisse farbkodiert in Streifen (je Kanal) über die Zeit angezeigt. Fehler fallen sofort durch eine ins rot übergehende Farbe auf.

Das Gesamtsystem lässt sich einfach mittels zwei Stativen unterhalb des Transportbandes positionieren. Der übliche Abstand der Transportrollen ist ausreichend, so dass keine Rolle entfernt werden muss. Das Prüfsystem erreicht dabei folgende Eigenschaften:

Controller / System

Betriebsspannung:	24Vdc, 3A (Einschaltstrom), 1A wenn alle 4 Sender bei allen 12 Kanälen aktiv sind
Schnittstelle:	1GB LAN
ADC:	12 Kanäle, 14bit
ADC-Clock:	5MHz
Speichertiefe einstellbar bis:	8000 Punkte
Zusätzliche Verstärkung:	je Kanal 0-45dB in 3dB Schritten
Messrate:	250 Messungen/s bei 12 Kanälen mit je 1000 Punkten
Speicherbedarf:	18GB für 1h bei 12 Kanälen, 1000 Punkten, 250 Messungen/s

Sender

Phasensynchrone Sendestufen:	4 Stück
Sendespannung fest:	200Vpp an 50Ω.
Sendefrequenz einstellbar:	50kHz – 500kHz in 1kHz Schritten
Pulswiderholrate einstellbar:	250/s max.
Pulsanzahl einstellbar:	30 pulse max.
Jede Sendestufe ist einzeln selektierbar	

Empfänger

Verstärkerstufe 1:	+26dB
Bandpass 3.Ordnung:	-3dB bei f_u 135kHz und f_o 300kHz
Verstärkerstufe 2:	+26dB
Verstärkerstufe 3: (Leitungstreiber)	+14dB
Eingangsruschen:	$2\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$

- UAP 6.2 Durchführung von Messreihen bei laufender Produktion

Die Systemabnahme erfolgte im Dezember 2024 bei ArcelorMittal bei laufender Produktion. Hierzu wurden im Vorfeld durch ArcelorMittal Einlegefehler definiert und hergestellt, mit denen Fehler simuliert werden konnten. Bereits im Vorfeld wurden einzelne Platten mit solchen Einlegefehler bestückt, um diese im Labor mit dem Prüfsystem untersuchen zu können. Dadurch konnte die Vorgehensweise bestätigt werden. Die Prüfanlage wurde bei der Inoson GmbH im Vorfeld überprüft und kalibriert und teildemontiert nach Brehna transportiert. Der Aufbau erfolgte bei stillstehender Anlage, allerdings musste die Justierung und der Abgleich dann aus betrieblichen Gründen bei laufender Produktion erfolgen. Nach einem Vorlauf von ca. 100m Sandwich erfolgte ein im Ultraschall deutlich sichtbarer Coilwechsel des Deckbleches der nun als Synchronisation zwischen Ultraschallmesswerten und Sandwichelementposition diente. Im Laufe der folgenden 130 Produktionsmeter wurden 37 Fehlstellen manuell im Auftragsbereich vor der Gießharke eingebracht. Die Position wurde mit Aufklebern vermerkt, die teilweise (produktionsbedingt) nicht immer sichtbar waren.

Die sich ergebende Fehlerausgabe zeigte, dass 24 Fehler wieder aufgefunden wurden. Es konnte anhand der Aufkleber auch nachgewiesen werden, dass sich Fehlstellen im Produktionsprozess entgegen der Bandrichtung verschoben haben. Es wurde ebenfalls sichtbar, dass sich Fehler quer zur Sicke verschoben haben. Bei den nicht detektierten Fehlern ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass die Einlegefehler aufgeschwommen sind. Zusammenfassend konnte nachgewiesen werden, dass viele Fehler, aber nicht alle erkannt worden sind. Es sind allerdings auch weitere Fehleranzeigen entstanden, deren Ursache noch nicht bekannt sind, deren Signalverhalten allerdings auf reelle Produktionsfehler schließen lassen. Insbesondere betrifft dies auch den Randbereich, wo Merkmale hinsichtlich eines nicht optimalen Primerauftrages sichtbar waren und auch im Nachhinein durch Abziehen des Deckbleches bestätigt werden konnten. Zu der Versuchsdurchführung wurde eine ausführliche Dokumentation erstellt.

- UAP 6.3 Vermessung unter unterschiedlichen Umgebungsbedingung zur Gewinnung von Kalibrierdaten

Die Kalibrierdaten wurden im Labor an Referenzpaneelen und mit Referenzfehlern, die vorher im Team abgesprochen worden sind, kalibriert. Hierzu wurden die Sandwichelemente mittels manueller Präparation von der Rückseite so bearbeitet, dass oberflächennahe Fehler in der Größe 30 x 30 mm entstanden sind. Diese Fehler wurden nun mit der Sensorik des Messsystems aus UAP 6.2 welches an einem mechanischen Manipulator befestigt worden war, abgetastet. Hierdurch konnte der industrielle Messablauf ausreichend simuliert werden. Variiert wurden die Temperatur (Heißluftgebläse), die Blechstärke (unterschiedliche Sandwichelemente), die Profilierung der Deckseite (unterschiedliche Sandwichelemente) und der Abstand der Sensoren zum Sandwich. Die erreichten Fehlerauflösungen bzw. -empfindlichkeiten wurden nicht wesentlich beeinflusst. Mittels der Ergebnisse wurde eine "Toleranz-Nulllinie" ermittelt anhand derer der Fehler von einem OK-Signal unterschieden werden kann. Diese Parametrierung wurde auch in UAP 6.2 verwendet.

Zusammenfassend wurden die Ziele des Arbeitspunktes 6 erreicht und es steht nun für anschließende Versuche ein funktionsfähiges, erprobtes und in der Produktion einsetzbares Prüfsystem zur Verfügung.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

IfSW

Im Rahmen des Projekts wurden seitens des Instituts für Stahlbau und Werkstoffmechanik vor allem Verbrauchsmaterialien für das Prüflabor erworben sowie Wartungsmaßnahmen, insbesondere der Klimakammer, durchgeführt, um einen reibungslosen Ablauf der Versuchsdurchführung zu gewährleisten. Zudem erwarb das IfSW einen Klimaschrank (Typ FD 720) der Firma Binder, um die Kapazitäten zur Konditionierung der kleinteiligen Probekörper zu erweitern. Dies war notwendig, um eine größere Anzahl an Probekörpern für Untersuchungen zum zeit- und temperaturabhängigen Verhalten bei unterschiedlichen Temperaturen vorzubereiten. Zur Unterstützung der Versuchsbedingungen wurden zudem Heizmatten beschafft, um Fehlstellen (Blasen) durch gezielte Temperaturbeanspruchung in den Sandwichelementen zu erzeugen.

MuST

Seitens des Fachgebiet MUSTs wurde ein Laser Doppler Vibrometer angeschafft zur berührungslosen Validierung und Messung von Lamb Wellen im Sandwichpaneel. Die Elektronik zur Ansteuerung des Phased Arrays wurde überarbeitet und neu bestellt – dies war nötig für die veränderten Anforderungen an das Phased Array zur zerstörungsfreien Prüfung. Außerdem wurde ein Teststand mit Linearachse zur Verfahrnung der Messeinrichtung zusammengestellt. Abgesehen davon waren Personalkosten die größten Kostenpunkte.

COV

Als Covestro wichtigste Positionen sind die „Kosten für innerbetrieblichen Leistungen“, sowie die direkten Personalkosten der am Projekt beteiligten Personen zu nennen. Die für das Projekt benötigten Sandwichelemente wurden mit der Doppeltransportband Versuchsanlage hergestellt und entsprechend unter innerbetrieblichen Leistungen verbucht. Zur Auswertung der Materialcharakteristik hinsichtlich Alterung wurde eine Spezialsoftware beschafft.

AMC

AMCD hat Teile des Budgets für die Anschaffung eines Versuchsstands für Blistering-Tests verwendet. Eine weitere große Position war die Nutzung des Thermal Shock Teststands. Die in Summe höchsten Kosten wurden durch die Her- und Bereitstellung von Sandwichelementen an die Projektpartner generiert.

LBF

Verbrauchsmaterial für Lasermessungen.

Inoson

Im Rahmen der Entwicklung geeigneter Ultraschallwandler war es erforderlich piezokeramische Resonatoren in unterschiedlichen Werkstoffen und Geometrien zu beschaffen. Diese sind jeweils nur als Sonderfertigung erhältlich und stellten daher einen wesentlichen Teil im Materialbudget dar. Ein weiterer Posten sind elektronische Bauteile, insbesondere schnelle Prozessoren inkl. Rohplatinen die für die schnelle Signalverarbeitung in verschiedenen Versionen benötigt wurden. Alle diese Komponenten gehen über den normalen Bedarf hinaus und mussten speziell für dieses Projekt beschafft werden

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten waren aus mehreren Gründen notwendig und angemessen:

Wirtschaftliche Notwendigkeit

- Jährliche Produktion von über 20 Mio. m² Sandwichelementen allein in Deutschland
- Bisherige Ausschussquote von etwa 1% verursachte erhebliche wirtschaftliche und ökologische Verluste
- Steigende Anforderungen an Ressourceneffizienz und CO₂-Einsparung

Technologische Notwendigkeit

- Fehlende Online-Prüfverfahren für Produktionsüberwachung
- Unzureichende Datenlage zum Langzeitverhalten moderner Schaumsysteme
- Bedarf an verbesserten Bemessungsgrundlagen für effizientere Materialnutzung

Angemessenheit des Lösungsansatzes

- Kombination aus Messtechnik und digitalem Zwilling ermöglicht ganzheitliche Prozessoptimierung
- Interdisziplinärer Ansatz durch Zusammenarbeit von Industrie und Forschung
- Stufenweise Entwicklung und Validierung sicherte Praxistauglichkeit

4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Wirtschaftlicher Nutzen

- Durch die ausführliche Untersuchung zum Alterungsverhalten und die Überarbeitung der Bemessungsnorm ist die Zulassung von Sandwichelementen für den Leichtbau modernisiert worden. Dies gibt zukünftigen Bauherren die Gewissheit das richtige Produkt zu verwenden. Hierdurch können insbesondere die industriellen Partner profitieren.
- Sandwichelemente mit PIR-Schaumkern sind und bleiben daher eine der Lösungen für recyclingfähigen Leichtbau

Technologischer Nutzen

- Erstmalige Online-Qualitätskontrolle in der Sandwichelementproduktion
- Verbesserte Prozesssteuerung durch Digitalen Zwilling
- Fundierte Datenbasis zum Langzeitverhalten moderner Schaumsysteme
- Optimierte Bemessungsgrundlagen für ressourceneffiziente Konstruktion

Übertragbarkeit der Ergebnisse

- Anwendbarkeit der Messtechnik auf verschiedene Sandwichbauteile
- Einsetzbarkeit in verwandten Branchen (Kühlkette, Schiffbau)
- Übertragbarkeit auf Mineralwolle-Sandwichelemente
- Nutzung der Erkenntnisse für Weiterentwicklung von Schaumsystemen

Marktpotenzial

- Direkter Zugang zum deutschen Markt (20 Mio. m²/Jahr)
- Erschließung des europäischen Marktes (200 Mio. m²/Jahr)
- Potenzial für Technologietransfer in andere Branchen

5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens

Entwicklungen im Marktumfeld

- Zunehmender Fokus auf nachhaltige Bauprodukte und CO₂-Reduktion
- Steigende Anforderungen an Energieeffizienz von Gebäudehüllen
- Verstärkte Nachfrage nach qualitätsgesicherten Sandwichelementen

Technologische Entwicklungen

- Weiterentwicklung von Schaumsystemen durch verschiedene Hersteller
- Fortschritte in der Sensorik und Digitalisierung von Produktionsprozessen
- Neue Ansätze im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung

Normative Entwicklungen

- Überarbeitung relevanter Normen (DIN EN 14509)
- Verschärfte Anforderungen an Energieeffizienz
- Neue Richtlinien zur CO₂-Bilanzierung von Bauprodukten

Wettbewerbssituation

- Keine vergleichbaren Systeme zur Online-Qualitätskontrolle am Markt
- Einzelne Entwicklungen im Bereich der Offline-Prüfung
- Verstärkte Aktivitäten im Bereich der digitalen Prozessüberwachung

Akademische Betrachtungen

- Während der Projektlaufzeit wurden Vorversuche zur zerstörungsfreien Prüfung von Sandwichelementen mittels luftgekoppelten Ultraschalls von Yang et al. veröffentlicht [Yang.2023].

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11

Konferenzbeiträge

- 9. Forum Leichtbau (29.09.2022): H. Holzmann: ReSaMon - Ressourceneffiziente Sandwichelemente durch zerstörungsfreies Monitoring für den Leichtbau
- Eurosteel Conference 2023, Amsterdam, Netherlands, 12.-14.9.2023
- Nordic Steel Conference 2024, Lulea, Sweden, 26.-28.6.2024
- ICSS14, International Conference on Sandwich Structures, Genova, Italy, 16.-18.6.2025
- IABSE Congress Ghent 2025, Ghent, Belgium, 27.-29.8.2025
- International Ultrasonics Symposium 2022, Venice, Italy, 10–13 October 2022
- International Ultrasonics Symposium 2023, Montreal, Canada, 3–8 September 2023
- Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint Symposium 2024, Taipei, Taiwan, 22–26 September 2024
- IEEE SENSORS 2023, Vienna, Austria, 29 October – 1 November 2023
- 7th International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures (SMAR), Salerno, Italy, 4-5 September 2024

Erfolgte Veröffentlichungen

- C. Haugwitz, A. Reinartz, J.-H. Dörsam, S. Wismath, G. Allevalo, J. Hinrichs, P. Gorol, A. Kühn, T. Hahn-Jose, J. Lange, et al.,
“Air-coupled Lamb wave testing of buried air-voids in foam-filled sandwich panels,” IEEE Open Journal of Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2024.
- C. Haugwitz, A. Schardt, T. Hahn-Jose, J. H. Dörsam, S. Wismath, S. Soenneken, H. Holzmann, H. Atzrodt, J. Lange, J. Steckel, et al.,
“Non-contact ultrasonic stress measurement using lamb waves,” NDT & E International, vol. 2025, Art. no. 103419, 2025.
- Kühn, Annalena; Haugwitz, Christoph; Hinrichs, Jan; Kupnik, Mario; Lange, Jörg:
Investigating the impact of thermal stresses on blistering effects in sandwich panels. In: ce/papers: Proceedings in Civil Engineering, 6 (3/4), S. 22-27, Berlin, Ernst & Sohn, Eurosteel 2023, Amsterdam, Netherlands, 12. bis 14.9.2023, ISSN 2509-7075, DOI: 10.1002/cepa.2311, Konferenzveröffentlichung.
- Kühn, Annalena; Haugwitz, Christoph; Kupnik, Mario; Lange, Jörg:
Experimental studies on the influence of blisters on the load-bearing capacity of sandwich panels. Nordic Steel 2024, The 15th Nordic Steel Construction

Conference, Lulea, Sweden, 26. bis 28. Juni 2024, DOI: 10.5281/zenodo.12350360, Konferenzveröffentlichung.

- Schardt, Annalena; Rädels, Felicitas; Lange, Jörg:
Face Delaminations and Blistering in PIR-Core Sandwich Panels: Influence of Time, Temperature and Production Parameters. ICSS14, 14th International Conference on Sandwich Structures, Genova, Italy, 16. bis 18. Juni 2025, Konferenzveröffentlichung (akzeptiert, 11. März 2025, Veröffentlichung vsl.: Juni 2025).
- Schardt, Annalena; Haugwitz, Christoph; Kupnik, Mario; Lange, Jörg:
Investigating Blister Formation in PIR-Core Sandwich Panels. IABSE Congress Ghent 2025, Ghent, Belgium, 27. bis 29. August 2025, Konferenzveröffentlichung (akzeptiert, 12. April 2025, Veröffentlichung vsl.: August 2025).
- C. Haugwitz, J. Hinrichs, M. Rutsch, G. Allevato, J. H. Dörsam, and M. Kupnik,
“Lamb wave reflection and transmission in bent steel sheets at low frequency,” in Proc. IEEE Int. Ultrasonics Symp. (IUS), 2022, pp. 1–4.
- J. Hinrichs, C. Haugwitz, M. Rutsch, G. Allevato, J. H. Dörsam, and M. Kupnik,
“Simulation of Lamb Waves Excited by an Air-Coupled Ultrasonic Phased Array for Non-Destructive Testing,” in Proc. IEEE Int. Ultrasonics Symp. (IUS), 2022, pp. 1–4.
- C. Haugwitz, T. Hahn-Jose, G. Allevato, J. Hinrichs, J. H. Dörsam, A. Kühn, S. Steineck, J. Lange, and M. Kupnik,
“Detection of Air-Voids in Foam-filled Sandwich Panels using Air-Coupled Lamb Waves,” in Proc. IEEE Int. Ultrasonics Symp. (IUS), 2023, pp. 1–4.
- F. Laub, C. Haugwitz, G. Allevato, J. Seiler, R. Findeisen, and M. Kupnik,
“Non-Contact Lamb Wave Defect Detection Based Solely on Air-Coupled Ultrasonic Phased Arrays,” in Proc. IEEE SENSORS, 2023, pp. 1–4.
- J. H. Dörsam, C. Kayser, A. A. Altmann, S. Suppelt, C. Hartmann, C. Haugwitz, S. Wismath, S. Soennecken, and M. Kupnik,
“Exploring Clamping Mechanisms for Air-Coupled High-Power Ultrasound Transducers,” in Proc. IEEE UFFC Joint Symp., 2024, pp. 1–4.
- S. Soennecken, J. H. Dörsam, C. Haugwitz, A. Jäger, S. Wismath, N. Demuth, and M. Kupnik,
“Waveguide based acoustic levitation device for moving objects in a large volume,” in Proc. IEEE UFFC Joint Symp., 2024, pp. 1–4.
- J. H. Dörsam, S. Suppelt, T. Bossert, A. A. Altmann, C. Hartmann, C. Haugwitz, Y. Schroedel, T. Lang, A. Harth, C. Heyl, et al.,
“Precise resonance frequency tracking based on a DSP-implemented virtual vector voltmeter,” in Proc. IEEE UFFC Joint Symp., 2024, pp. 1–4.
- C. Haugwitz, F. Krauß, G. Allevato, M. Rutsch, J.-H. Dörsam, S. Wismath, S. Soennecken, A. Harth, C. M. Heyl, C. Othmani, et al.,
“A 220 kHz Air-Coupled Spiral Ultrasonic Phased Array Using Waveguides,” in Proc. IEEE UFFC Joint Symp., 2024, pp. 1–4.
- H. Holzmann, M. Hülsebrock, A. Kühn, H. Atzrodt, J. Lange,
Simulation workflow for fault detection and localization in sandwich panels, Procedia Structural Integrity, Volume 64, 2024, Pages 1303-1310, ISSN 2452-3216, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.09.201>.

Geplante Journalbeiträge: Modellierung des Langzeitverhaltens von PIR-Schäumen

- Digitaler Zwilling in der Sandwichelementproduktion

Technische Dokumentation

- Erstellung von Handlungsempfehlungen für die Industrie
- Beiträge zur Normungsarbeit
- Technische Richtlinien für die Implementierung des Messsystems

Öffentlichkeitsarbeit

- Projektwebseite mit regelmäßigen Updates
 - <https://www.lbf.fraunhofer.de/de/projekte/resamon-nachhaltige-herstellung-bau.html>
- Fachbeiträge in Industriezeitschriften
- Präsentationen bei Industrieverbänden