

Entwicklung eines referenzfreien, elektronischen Ultraschall-Prüfsystems für Faserverbundwerkstoffe

Kilian TSCHÖKE¹, Tobias GAUL¹, Lars SCHUBERT¹, Henrik WITTKÉ²,
Friedrich VON DUNGERN², Marijan CUSTIC³

¹ Fraunhofer IKTS, Dresden

² INVENT GmbH, Braunschweig

³ AUCOTEAM GmbH, Berlin

Kontakt E-Mail: kilian.tschoeke@ikts.fraunhofer.de

Kurzfassung. Die steigenden ökologischen Anforderungen im Mobilitätssektor erfordern neben der Gewichtsreduktion auch alternative Antriebstechniken. Zur Umsetzung der Elektromobilität existieren sowohl batteriebetriebene als auch alternative Antriebskonzepte. Insbesondere der Wasserstoffantrieb und Leichtbau sind daher Märkte mit hohen Wachstumschancen. Die zentrale Komponente zur Speicherung des flüssigen Wasserstoffs im Fahrzeug ist der Drucktank, der immer häufiger als gewickeltes Faserverbundbauteil hergestellt wird.

Die vorgestellten Ergebnisse des Verbundvorhabens „CarbonSafe 2“ (Förderkennzeichen: 16ME0119) adressieren eine kontinuierliche Zustandsüberwachung kritischer Bauteile wie Wasserstofftanks für Brennstoffzellen sowie Flüssiggasbehälter. Bisher verfolgte Ansätze Lambwellen-basierter Verfahren der Zustandsüberwachung gelten als vielversprechend bei der Bewertung strukturelevanter Faserverbundmaterialien. Die eingesetzten Monitoringsysteme beruhen in der Regel auf dem Vergleich von zwei gemessenen Zuständen, dem Referenzzustand, der sog. Baseline, und dem jeweils aktuellen Messzustand. Daten von Referenzmessungen stehen jedoch nicht zwangsläufig bei jeder Überprüfung von Fahrzeugkomponenten zur Verfügung.

Die Entwicklung einer referenzfreien Herangehensweise hebt Systeme der Zustandsüberwachung auf ein höheres Leistungsniveau. Für referenzfreie Verfahren ist darüber hinaus die Entwicklung angepasster, multimodaler Wandler notwendig. Die Entwicklung wird durch Untersuchungen zur Zuverlässigkeit und Langzeitbeständigkeit der Wandler nach branchenüblichen Normen und Standards ergänzt, um einen Transfer der erzielten Ergebnisse zügig zu ermöglichen.

Motivation und Stand der Technik

Zur Umsetzung der Elektromobilität existieren sowohl batteriebetriebene als auch alternative Antriebskonzepte. Die Lithium-Ionen-Technologie zeichnet sich durch hohe Energiedichten aus und wird daher für Batterien von Elektroautomobilen verwendet. Für deren Herstellung ist die Verfügbarkeit von bestimmten Rohstoffen (Lithium, Kobalt, Nickel, Mangan) von hoher Bedeutung. Eine attraktive Alternative bilden Brennstoffzellen-Antriebskonzepte. Diese bieten hinsichtlich Effizienz, Reichweite und Tankzeiten erhebliche Vorteile und deren Entwicklung wird momentan von zahlreichen Automobil- und Nutzfahrzeugherstellern



verfolgt. Die Gewinnung des notwendigen Wasserstoffs ist bereits unter Verwendung erneuerbarer Energien ökologisch vertretbar zu realisieren. Die zentrale Komponente zur Speicherung des flüssigen Wasserstoffs im Fahrzeug ist der Drucktank. Aufgrund des Leichtbaupotentials und den hervorragenden Eigenschaften unter zyklischer Belastung kommen im Fahrzeugbau vermehrt Drucktanks aus faserverstärkten Kunststoffen zum Einsatz. In gasbetriebenen PKWs werden diese bereits mehr und mehr anstelle von Stahl tanks verbaut. Für die Wasserstoffspeicherung im PKW-Bereich werden Kryo-Drucktanks in Faserverbundbauweise jedoch erst zunehmend entwickelt. Das verbreitetste Herstellungsverfahren für Tanks ist das Wickelverfahren, mit dem lastgerechte Orientierungen des Rovings möglich sind. Damit lässt sich ein besonders hohes Leichtbaupotenzial bei einem gleichzeitig hohen Automatisierungsgrad umsetzen. Für einen Typ IV Druckbehälter kann bspw. eine Gewichtsreduktion von bis zu 79 % erreicht werden. Neben der zyklischen Belastung durch die wiederholte Betankung und Entnahme des Wasserstoffs ist als weitere Belastung der hohe Druck zu berücksichtigen. Bei der gasförmig-gespeicherten Verwendung des Wasserstoffs ist ein guter Kompromiss zwischen Systemkomplexität und Nutzwert realisierbar. Diese Herangehensweise wird auch von den Automobilherstellern weitestgehend angewandt. Dennoch wird aufgrund dieser Herausforderungen eine Zustandsüberwachung zur Bewertung der Betriebsfestigkeit des Behälters als notwendig erachtet. Zwischenfälle beim Betrieb von Drucktanks in Fahrzeugen unterstreichen die Notwendigkeit einer Sicherung.

In bisherigen Arbeiten konnte gezeigt werden, dass Ansätze der integrierten Strukturüberwachung als vielversprechend zu bewerten sind [1, 2]. Das entwickelte Monitoringsystem beruht auf dem Vergleich von zwei gemessenen Zuständen. Bei diesen Zuständen handelt es sich um den Gutzustand, die sog. Baseline, und den jeweils aktuellen Messzustand. Für den Durchbruch von Structural Health Monitoring (SHM)-Systemen sind jedoch referenzfreie Messungen (d. h. ohne Kenntnis des Ausgangszustandes) essenziell. Zwei Aspekte spielen hierbei eine wesentliche Rolle. Zum einen unterliegen Produktionsprozesse in der Automobilbranche bestimmten Vorgaben hinsichtlich der Dauer jedes Produktionsschrittes. Erst die Freiheit von der Referenzmessung ermöglicht es, die Produktionsdauer einzelner Komponenten nicht zu erhöhen und somit, insbesondere bei großen Stückzahlen, die Kosten zu verringern. Zum anderen stehen während der Lebenszeit der Fahrzeuge eventuell die Daten der Referenzmessungen nicht in jeder vom Fahrzeugnutzer gewählten Werkstatt zur Verfügung.

Für referenzfreie Verfahren basierend auf geführten Wellen werden grundsätzlich drei Arten unterschieden [3]. Zum einen werden darunter Methoden verstanden, die einen Sende-Empfangs-Pfad mit einem anderen vergleichen. Dafür wird kein historischer Datensatz des betrachteten Pfades benötigt, sondern es wird die Gleichheit der Pfade angenommen und für die Beurteilung herangezogen. Dies wurde im Labormaßstab auf einfachen Platten gezeigt, allerdings ist die Vergleichbarkeit verschiedener Sende-Empfangs-Pfade an realen Strukturen selten gegeben. Die zweite Methode nutzt eine Anordnung von mehreren Wandlern, um den eintreffenden Wellenmode zu identifizieren. Geführte Wellen zeigen Modenkonzersion beim Auftreffen auf Geometrieänderungen in der Sende Empfangsstrecke. Trifft beispielsweise ein S₀ Wellenmode auf einen Schaden, erfolgt neben der Reflexion des S₀ Wellenmodes auch die eines A₀ Wellenmodes. Umgekehrt erfolgt das gleiche durch den A₀ Wellenmode. Bei einem schadensfreien Sende-Empfangs-pfad würden nur die beiden gesendeten Wellenmoden S₀ und A₀ am Empfänger eintreffen. Sind Schäden in der Struktur vorhanden, gibt es zusätzliche Wellenpakete, die aus Modenkonzersionen bestehen, woraus auf einen Bauteilschaden in der Sende-Empfangsstrecke geschlossen werden kann. Die dritte Methode nutzt Wellenmoden in Transmission, wie dies beispielweise bei Prüftechniken mit Scherwellen angewandt wird. Dabei werden die Reflexionen an Bauteilunstetigkeiten erfasst und visualisiert. Sind die

Schäden groß genug, können diese mit dieser Methode recht zuverlässig erkannt werden. Nachteilig ist, dass kleinere Schäden nur geringe Reflexionen erzeugen, so dass auch diese Prüfmethode nur größere Schäden zuverlässig detektiert. Hinzu kommt, dass vor allem Impactschäden in CFK Materialien nur geringe bis keine Wechselwirkungen mit SH Wellen erzeugen und somit kein Echo am Sender erfasst werden kann.

Vor allem der zweite Ansatz zeigt erhebliches Potenzial, welches durch spezielle Wandlerdesigns gehoben werden kann. Die Wellenmodeidentifikation ist z. B. möglich, da die fundamentalen Moden S0 und A0 unterschiedliches Schwingverhalten über den Querschnitt einer plattenförmigen Struktur aufweisen. Die symmetrischen Moden, wie der S0, können stark vereinfacht als Druckwelle/Longitudinalwelle in einem Festkörper gesehen werden und breiten sich daher in der Regel auch schneller aus. Die langsameren Moden, die asymmetrischen Moden, wie der A0, können als Scherwelle/Transversalwelle interpretiert werden. Bei gestapelten oder ringförmig angeordneten Wandlern nehmen die verschiedenen, verbauten Piezokeramiken die Auslenkung der Struktur z. B. über unterschiedliche Biegeradien wahr und induzieren somit unterschiedliche, elektrische Messsignale an derselben Messposition. Somit ist eine Identifikation eines Wellenmodes grundsätzlich möglich.

Messsystementwicklung

Die Messsystementwicklung begann mit einer Spezifikationsphase, in der Anforderungen für unterschiedliche Anwendungsfälle aus verschiedenen Sichtweisen erfasst, bewertet, abgestimmt und in einer Anforderungsliste zusammengefasst wurden.

Zunächst wurden typische Fehlerarten in Wasserstofftanks und deren Versagensursachen zusammengetragen [4, 5]. Zu den Fehlerarten gehören beim Einsatz im Automobil- und Nutzfahrzeugbereich die Betriebsbedingungen der Fahrzeuge (z. B. Straßenbedingungen, Kollisionen, Betriebstemperatur von -40°C bis 85°C , Ladezyklen von leer bis voll), eine fehlerhafte Behälterkonstruktion (z. B. unzureichende Verbundstruktur, schlechte Kuppelgeometrie, ineffiziente Wickelmuster), die Unverträglichkeit von Materialien (z. B. Wasserstoffversprödung von Stahl-Linern), eine unzulängliche Herstellung (z. B. niedriger Harzgehalt, unzureichende Faserspannung) sowie falsche Installationen (z. B. zu nah an der Straße). Die Druckbehälter können im Betrieb versagen durch Fahrzeugbrand, Umweltschäden (z. B. Spannungsrissskorrosion), Herstellungsprobleme der metallische Liner bzw. der Kunststoff-Liner, Überdruck (z. B. durch eine fehlerhafte Betankungsvorrichtung), aber insbesondere durch mechanische Beschädigung (externer Abrieb, Schnitte und/oder Stöße, Stürze oder mechanische Beschädigungen). Eine umfangreiche Zusammenstellung der letztgenannten Versagensursache liefert [4]. Darin werden insbesondere Impact-Ereignisse als der relevanteste Schadensfall für gewickelte Druckbehälter betrachtet, die Faserbrüche, Matrixrisse, Faser-Matrix-Debonding sowie Delaminationen verursachen können. Im Zulassungsprozess von neu entwickelten Wasserstofftanks werden diese Umwelttests (z. B. Beaufschlagung mit Medien), Temperaturtests (zyklische Belastung bei 85°C maximaler Temperatur und -40°C minimaler Temperatur), hydrostatischen Berstdrucktest (mindestens 225 % des Nenndrucks), Falltests und Impacttests unterzogen. Im Betrieb von Fahrzeugen werden Drucktanks bisher nach Unfällen oder im Falle eines Ereignisses (Kollision, Feuer, Impact) visuell inspiziert. Die Inspektion ist entsprechend der ISO 19078:2013 oder der CGA C-6.4 durchzuführen und der Tank je nach Resultat zu zerstören oder wieder in Betrieb zu nehmen.

Basierend auf den gesammelten Spezifikationen wurden erste Entwürfe für Wandler entwickelt, die für referenzfreie Prüfverfahren eingesetzt werden sollen. Solche Wandler sollten insbesondere in der Lage sein, unterschiedliche geführte Wellenmoden (S0, A0) bei

einer Messung zu identifizieren. In ersten Prototypen wurden gestapelte Wandler aufgebaut. Bei einer Stapelung piezoelektrischer Wandler ist zu erwarten, dass der äußere („obere“) Wandler eine stärkere Biegung erfährt und daher ein stärkeres Messsignal empfängt, wenn ein A0-Mode (Biegewelle) aufgezeichnet wird. Für Testmessungen wurden solche Wandler auf einer CFK-Platte appliziert. Hierbei wurden 2 gestapelte Wandler appliziert, also insgesamt 4 Piezokeramiken.

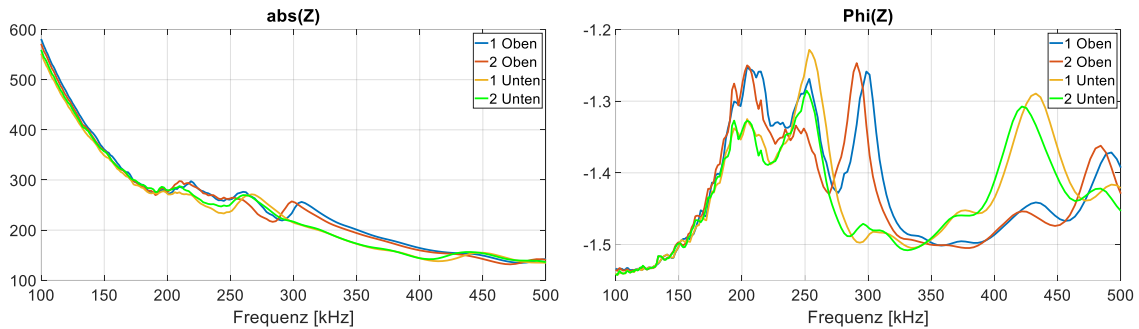


Abbildung 1: Ergebnisse einer exemplarischen Impedanzspektroskopie an den prototypischen Wandlern. Links: Betrag der Impedanz für alle 4 Piezokeramiken. Rechts: Phasenwinkel der Impedanz für alle 4 Piezokeramiken.

Der erste Schritt der Untersuchungen war eine Impedanzspektroskopie. Aus den Ergebnissen lässt sich ein Zusammenhang zwischen den elektrischen Eigenschaften der Piezokeramiken und den mechanischen Eigenschaften des Objekts (Wandler + Platte) ableiten. Unstetigkeiten in einer aufgezeichneten Impedanzkurve entsprechen mechanischen Resonanzen des Objekts. Die Ergebnisse einer solchen Messung zeigt Abbildung 1. Links zu sehen ist der Betrag der Impedanz über einem Frequenzbereich. Im unteren Frequenzbereich ist der elektrische Widerstand der Wandler höher, da ein piezokeramischer Wandler als Kapazität aufgefasst werden kann. Zu erkennen ist ebenfalls, dass sich die jeweils „oberen“ Wandler bei 200 kHz, 250 kHz und 300 kHz anders verhalten als die jeweils „unteren“ Wandler. Dies zeigt sich ebenfalls in dem Diagramm des Phasenwinkels. Der Phasenwinkel kann als Maß verstanden werden, wie ungehindert ein Wandler schwingen kann. Insbesondere aus den Abweichungen der „oberen“ Wandler bei 200 kHz und 300 kHz lässt sich schließen, dass sie in diesem Messfrequenzbereich sensitiver für bestimmte Schwingformen sind als die „unteren“ Wandler.

Um die Ergebnisse der Impedanzuntersuchungen zu verifizieren, und um genauere Einblicke in das Auslenkungsverhalten der gestapelten Wandler zu erhalten, wurde eine Untersuchung mittels 3D-Laservibrometrie angeschlossen. Bei dieser Untersuchung kann optisch und berührungslos die Auslenkung der elastischen Wellen innerhalb der Platte aufgezeichnet werden. Für die Messungen wurde die CFK-Platte mit den applizierten Prototypen der Wandler auf einem Stativ angebracht und anschließend wurden Sendempfangsmessungen zwischen den Wandlern durchgeführt. Mittels Laservibrometer wurde die Auslenkung der Platte auf der Strecke zwischen den Wandlern erfasst und ausgewertet.

Als Anregungssignal wurde ein breitbandiger Sinc-Impuls verwendet. In der anschließenden Signalauswertung konnte somit gezielt auf Frequenzanteile innerhalb des Signals gefiltert werden. Durch die unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten des S0-Modes (überwiegend Longitudinalwelle) und des A0-Modes (überwiegend Transversalwelle in Dickenrichtung) konnten diese entlang der Ausbreitungsstrecke zwischen den Wandlern identifiziert werden. Die Ausbreitungsgeschwindigkeiten wurden aus analytisch ermittelten Dispersionsdiagrammen entnommen, die mit Hilfe von Materialparametern der CFK-Platte bestimmt wurden. Aus der 3D-Auslenkungsinformation konnte dann das Verhältnis von S0- zu S0-Auslenkung und zwischen A0- zu A0-Auslenkung zwischen den jeweils „oberen“ und „unteren“ Wandlern berechnet werden. Theoretisch ist zu erwarten, dass bei einem gestapelten Wanderaufbau der „obere“ Wandler eine stärkere Biegung in

z-Richtung erfährt, wohingegen beide Wandler bei einer Druckwelle (S0-Mode) keine großen Unterschiede zeigen sollten. Die entsprechenden Messungen zeigt Abbildung 2.

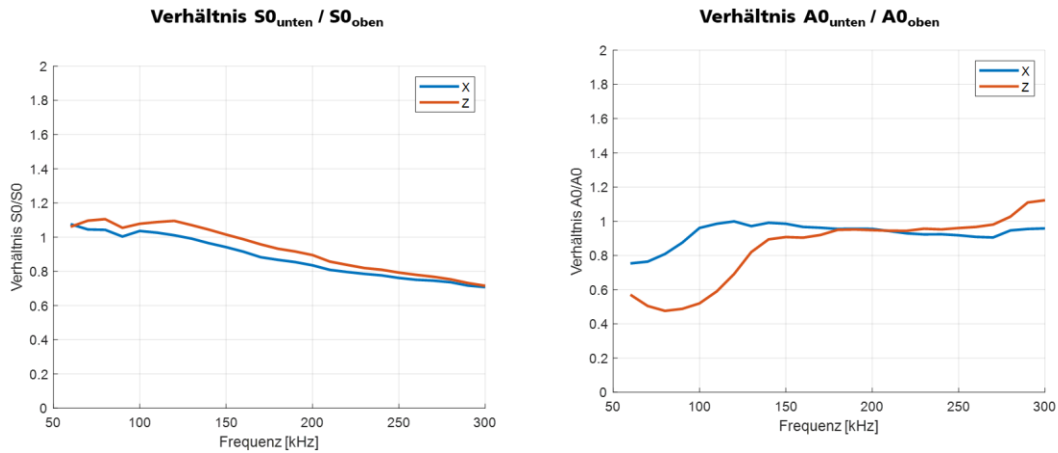


Abbildung 2: Amplitudenverhältnis zwischen „unteren“ und „oberen“ Wandlern. Links: Für den S0-Mode. Rechts: Für den A0-Mode.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die theoretischen Überlegungen bestätigen, zumindest in gewissen Frequenzbereichen. Über den gesamten Messbereich von 50 kHz bis 300 kHz zeigt sich kaum ein Unterschied in der x-Komponente (In-Plane Schwingungsanteil der Welle, besonders ausgeprägt bei S0-Druckwelle) und in der z-Komponente (Out-of-Plane Schwingungsanteil der Welle, besonders ausgeprägt bei Biegewelle) der Auslenkung entlang der Messstrecke. „Oberer“ und „unterer“ Wandler regen den S0-Mode also vergleichbar gut an. Für den A0-Mode, also für die Biegewelle, sendet der „obere“ Wandler zwischen 50 kHz und 150 kHz jedoch eine stärkere Signalamplitude aus. Dies ist an dem Amplitudenverhältnis von unter 1 in der z-Komponente in dem rechten Diagramm von Abbildung 2 zu erkennen. Das Optimum bei ca. 100 kHz ergibt sich dort, wo die Wellenlänge des A0-Modes und der Durchmesser des Wandlers übereinstimmen. Zusammengefasst bestätigen diese Messungen zunächst die theoretischen Überlegungen zu einem gestapelten Wandleraufbau.

Referenzfreies Messverfahren

Basierend auf den Voruntersuchungen zur Wandlerentwicklung konnte ein Messsetup für das referenzfreie Messverfahren entwickelt und aufgebaut werden. Aus der Spezifikationsphase konnte entnommen werden, dass Impactereignisse relevante Schadensfälle für Drucktanks sind. Entstehende Schäden sind z. B. Kerben, Schnitte und Delaminationen. Deswegen wurde entschieden, dass Kerben als künstliche Fehler in Couponproben eingebracht werden. In Abbildung 3 ist ein solcher Schaden im Versuchsaufbau markiert. Der Schaden wurde außermittig und nicht symmetrisch zu den Wandlern eingebracht. Darüber hinaus wurde der Schaden in mehreren Stufen vergrößert. Eine Übersicht der Schadensgrößen gibt Tabelle 1.

Tabelle 1: Nummerierung und Maße der eingebrachten künstlichen Schäden in der Couponprobe aus Abbildung 3.

Schaden	1	2	3	4	5	6	7
Länge in mm	20	20	20	20	20	40	40
Tiefe in mm	0,3	0,5	1,0	1,6	2,3	0,3	0,5

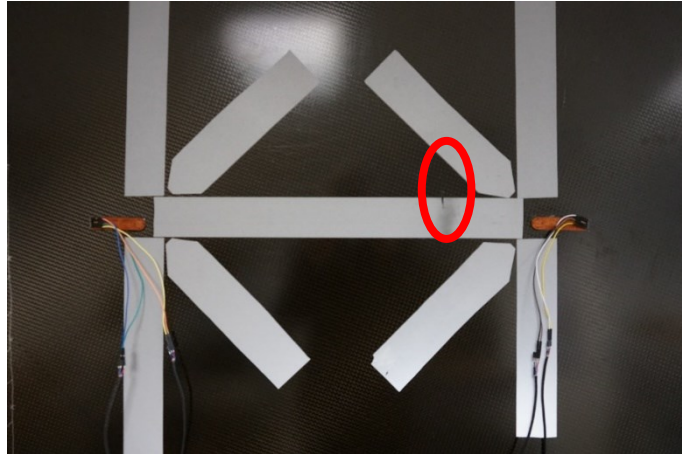


Abbildung 3: Couponprobe für Laborversuche mit dem referenzfreien Messverfahren unter Nutzung der entwickelten Wandler. Rot markiert ist ein eingebrachter Schaden.

Durch die Applikation von 2 Wandlern mit je 2 Piezokeramiken stehen insgesamt 4 Keramiken zur Verfügung. Als Bezeichnungen wurden „Wandler A“ und „Wandler B“ gewählt mit den Keramiken „oben“ und „unten“, kurz Au, Ao, Bu, Bo. In einem ersten Schritt wurden reziproke Pfade ausgewertet, also Pfade, bei denen Hin- und Rückrichtung einer Sende-Empfangsmessung identisch sind, z. B. AuBu und BuAu. Bei diesen Pfaden wird keine Signaldifferenz erwartet, sie können also genutzt werden, um das Rauschen des Messsystems zu beurteilen. Anschließend werden sog. gekreuzte Pfade ausgewertet, z. B. AuBo und BuAo. Bei solchen Pfaden wird erwartet, dass eine durch einen Schaden auftretende Modenkonzersion Differenzen der Wellenpakete erzeugt. Sie werden also für die Schadensdetektion genutzt. Eine Übersicht aller Pfadkombinationen zeigt Tabelle 2.

Tabelle 2: Übersicht der Pfadkombinationen auf der Couponprobe zwischen den jeweils „oberen“ und „unteren“ Keramiken der Wandler A und B.

Pfad	Reziproke Pfade				Pfade zur Schadensdetektion			
	AuBu- BuAu	AoBo- BoAo	AuBo- BoAu	AoBu- BuAo	AuBo- BuAo	AoBu- BoAu	AuBo- AoBu	BuAo- BoAu
#	1	2	3	4	5	6	7	8

Abbildung 4 zeigt beispielhafte Zeitsignale des reziproken Pfads AuBu bzw. BuAu. Als Anregungssignal wurde ein schmalbandiger RC5-Impuls mit einer Mittenfrequenz von 100 kHz verwendet. Sowohl im ungeschädigten Fall als auch im Fall des Schadens 7 auf der Couponprobe sind die Signale der Hin- und Rückrichtung nahezu deckungsgleich. Die Annahme der Reziprozität des Pfads wird bestätigt. Im Gegensatz dazu zeigt Abbildung 5 Zeitsignale des Pfades AuBo bzw. BuAo. Im ungeschädigten Fall (Abbildung 5, links) sind die Signale ebenfalls nahezu deckungsgleich. Eine Modenkonzersion kann nicht detektiert werden. Im Fall des Schadens 7 (Abbildung 5, rechts) sind jedoch Abweichungen der Signale zu erkennen. Aus den Hüllkurven der beiden Signale wird anschließend die Differenz gebildet und davon die Energiesumme berechnet. Dieser Zahlenwert dient als Schadensindikator.

Die Schadensindikatoren aller Pfadkombination, aller Schäden und für zwei verschiedene Messfrequenzen sind in Abbildung 6 dargestellt. Das Rauschniveau des Schadensindikators ist auf den Pfaden 1-4 zu erkennen (siehe auch Tabelle 2). Zu erkennen ist ebenfalls, dass der Schadensindikator signifikant höher ist, wenn sich ein Schaden in der Couponprobe befindet. Es lässt sich somit ein Schwellwert für die Schadensdetektion bestimmen. Auch zu erkennen ist, dass der Indikator mit zunehmender Schadensgröße

wächst (Abbildung 6, links). Zu erwähnen ist, dass diese referenzfreie Schadensdetektion für eine Messfrequenz von 100 kHz funktioniert, nicht jedoch für 150 kHz. In diesem Fall ist zu erkennen, dass zwar zwischen ungeschädigtem Zustand und Schadensfall unterschieden werden könnte, jedoch scheint kein Zusammenhang zwischen Schadensgröße und wachsendem Indikator zu bestehen (Abbildung 6, rechts). Die Abhängigkeit zwischen Frequenz und Modenselektivität der Wandler erklärt sich aus dem Verhältnis zwischen Wellenlänge des Signals und der geometrischen Abmessung des Wandlers.

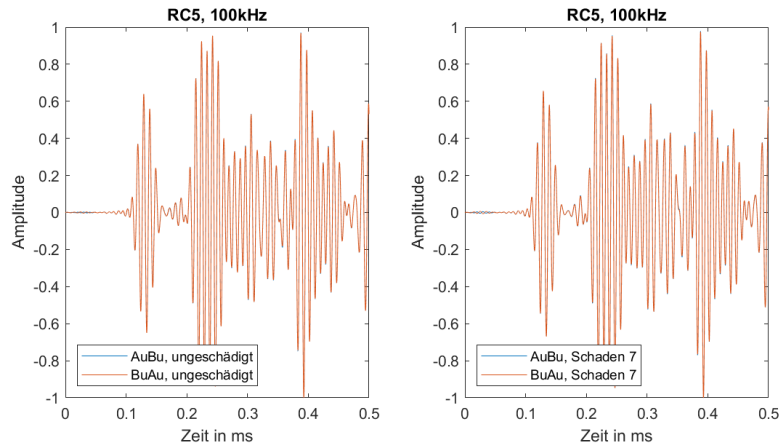


Abbildung 4: Zeitsignale reziproker Pfade, die zur Beurteilung des Signalrauschens verwendet wurden. Link: Couponprobe ohne Schaden, Pfad AuBu. Rechts: Couponprobe mit Schaden 7, Pfad AuBu.

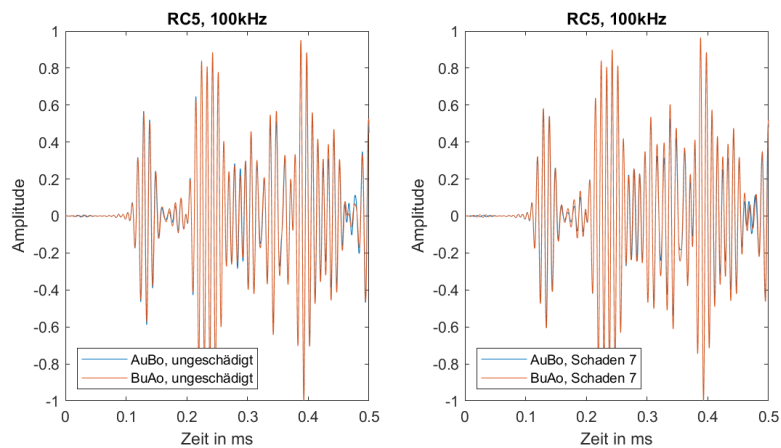


Abbildung 5: Zeitsignale eines Pfades, der zur Schadensdetektion verwendet wurden. Link: Couponprobe ohne Schaden, Pfad AuBo. Rechts: Couponprobe mit Schaden 7, Pfad AuBo.

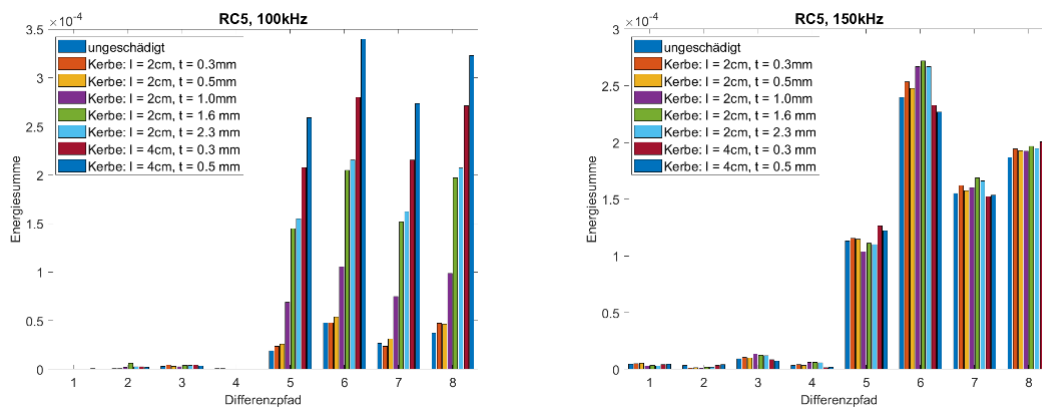


Abbildung 6: Schadensindikatoren aller Pfadkombinationen und aller Schäden. Links: Für eine Messfrequenz von 100 kHz. Rechts: Für eine Messfrequenz von 150 kHz.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Manuskripts konnten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des vom BMBF-geförderten Projekts „CarbonSafe 2“ gezeigt werden. Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung eines referenzfreien Messverfahrens für Faserverbundwerkstoffe, insbesondere für hochbelastete und sicherheitskritische Komponenten wie z. B. gewickelte Drucktanks zur Speicherung von Wasserstoff. Es wurde ein Konzept der Wellenmodeidentifikation auf Basis gestapelter piezoelektrischer Wandler vorgestellt. Die entwickelten Wandler wurden charakterisiert und Laborexperimente zur Schadensdetektion an CFK-Proben mit den entwickelten, gestapelten Wandlern durchgeführt. Mithilfe der entwickelten multimodalen Wandler können definierte Schäden nachgewiesen werden. Eine technische Herausforderung bleibt der eingeschränkte Frequenzbereich für die Wellenmodeidentifikation. Dies würde eine Anpassung der entwickelten multimodalen Wandler erforderlich machen, da die Geometrie der Wandler auf die Messfrequenz abzustimmen ist.

Weiterführende Arbeiten umfassen weitere Untersuchungen des referenzfreien Messverfahrens an Verbundwerkstoffkomponenten, die gewickelten Drucktanks nachempfunden sind und darüber hinaus zyklische Belastungs- und Lebensdauerversuche der Wandler. Zum anderen steht die weiterführende Integration des Wandler systems inkl. Leiterbahnen in gewickelte Bauteile im Fokus. Am Ende des Projektes soll ein vollintegriertes Demonstratorbauteil stehen.

Danksagung

Die Arbeiten wurden unterstützt vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Schwerpunktprogramms KMU Innovativ als Förderprojekt „CarbonSafe 2“ (Förderkennzeichen: 16ME0119).

Referenzen

- [1] K. Tschöke, T. Gaul, T. Klesse, U. Lieske, F. von Dungern, J. Guerrero-Santafe und H. Wessel-Segebade, „Integrierte Strukturüberwachung für kohlefaserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe im Automobil,“ in *DGZfP-Jahrestagung*, Leipzig, 2018.
- [2] K. Tschöke, T. Gaul, L. Schubert, F. von Dungern und J. Guerrero Santafe, „Strukturüberwachung von Kohlefaserkunststoffverbunden im Automobilbau mittels integrierten Wandlernetzwerken,“ in *4SMARTS - Symposium für Smarte Strukturen und Systeme*, 2019.
- [3] U. Lieske, T. Gaul und L. Schubert, „Entwicklung von baseline-freien Verfahren für die Schadensdetektion mit geführten Wellen,“ in *2nd World Congress on Condition Monitoring*, 2019.
- [4] HyPactor, „Review of international impact related incidents on pressurecomposite tanks,“ 2017.
- [5] F. Nony, N. Alexandre, D. Tranquille, P. Blanc-Vannet, O. Bardoux, P. Breuer, F. Dahmene, S. Bittendiebel, K. Lasn, A. Echtermeyer, M. Barcicowski und A. Maldachowska, „COPV resistance to mechanical impact,“ in *WHEC*, 2016.