
Ciplus
Band 2/2017

Structural Health Monitoring von Faserverbundstrukturen mittels Piezosensoren – Untersuchungen zum experimentellen Design

**Thomas Bartz-Beielstein, Jochen Blaurock, Sebastian Krey, Yixi Fu,
Niclas Kallenbach, Marc Möller**

**Technology
Arts Sciences
TH Köln**

STRUCTURAL HEALTH MONITORING VON FASERVERBUNDSTRUKTUREN MITTELS PIEZOSENSOREN – UNTERSUCHUNGEN ZUM EXPERIMENTELLEN DESIGN

THOMAS BARTZ-BEIELSTEIN, JOCHEN BLAUROCK, SEBASTIAN KREY, YIXI FU,
NICLAS KALLENBACH, MARC MÖLLER

ZUSAMMENFASSUNG. *Faserverbundwerkstoffe* (FVW) und Composites haben in der Luft- und Raumfahrtindustrie, im Automobilbau, beim Bau von Windenergieanlagen und in vielen weiteren zukunftssträchtigen Branchen eine große Bedeutung. Maßnahmen, die ein Erkennen von Schädigungen simultan zur Entstehung ermöglichen und Restbetriebszeiten prognostizieren können, sind geeignet, die Lebensdauer von FVW-Konstruktionen zu erhöhen. Darüber hinaus ist eine zustandsorientierte und somit kosteneffektive Wartung dieser Bauteile möglich. Sowohl die Prognose, als auch die Detektion von Schäden würde den ressourcenschonenden Einsatz dieser Werkstoffgruppe ermöglichen. Das sogenannte *Structural Health Monitoring* (SHM) bezeichnet in diesem Zusammenhang eine Methode, die es ermöglicht, kontinuierlich Anhaltspunkte über die Funktionsfähigkeit von Bauteilen und Konstruktionen zu erhalten. Dieser Artikel beschreibt die Planung, Durchführung und Analyse von SHM-Experimenten. Das Hauptziel bestand in der Planung von Experimenten zur Gewinnung von Messdaten mittels piezoelektrischen Elementen auf Versuchstafeln, bei denen bewusst Strukturbeschädigungen eingebracht wurden. Statistische Auswertungsmethoden sollen auf ihre Eignung getestet werden, Rückschlüsse aus den experimentell gewonnenen Daten auf die Art der Strukturbeschädigungen zu ziehen.

KEYWORDS. Design of Experiments; Structural Health Monitoring; Faserverbundwerkstoffe; Signalanalyse

SPOTSEVEN LAB, TH KÖLN, F10, STEINMÜLLERALLEE 1, 51643 GUMMERSBACH, GERMANY
E-mail addresses: thomas.bartz-beielstein@th-koeln.de, jochen.blaurock@th-koeln.de,
sebastian.krey@th-koeln.de, xixi1011@yeah.net, niclas.kallenbach@th-koeln.de,
marc.moeller@th-koeln.de.

1. EINLEITUNG

Faserverbundwerkstoffe (FVW) und Werkstoffverbund-Systeme, sogenannte Composites, haben in zahlreichen Branchen große Bedeutung. Airbus verbaut in seinem Superjumbo A 380 bis zu 22 % *kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe* (CFK), Boeing setzt im Dreamliner seit 2009 bis zu 50 % FVW ein. Hersteller von Handhabungssystemen an Großserienarbeitsplätzen substituieren aus ergonomischen Gründen bisherige metallische Lösungen durch CFK. Windenergieanlagen verwenden ebenfalls diese neuen Werkstoffkonzepte. Diese Anwendungen waren bis vor wenigen Jahren undenkbar, weil sie entweder ökonomisch nicht sinnvoll, technisch nicht umsetzbar oder schlichtweg nicht notwendig waren.

Der wesentliche Hintergrund beim Einsatz von faserverstärkten Verbundsystemen ist in der überwiegenden Mehrzahl der Anwendungen die mögliche Gewichtsreduktion. Das unbestreitbar vorhandene Leichtbaupotenzial lässt sich in der Praxis jedoch nicht immer voll ausnutzen, da das Schadensverhalten von faserverstärkten Kunststoffen weitaus komplexer als bei metallischen Werkstoffen ist. Darüber hinaus werden Schädigungen häufig nicht oder nur sehr schwer entdeckt und führen im ungünstigsten Fall zum schlagartigen Totalversagen der gesamten Struktur. Aus diesem Grund werden faserverstärkte Bauteile vielfach mit hohen Sicherheiten dimensioniert. Dies widerspricht jedoch dem Leitgedanken nach einer schlanken Konstruktion beim Einsatz dieser Werkstoffgruppe.

Maßnahmen, die ein Erkennen von Schädigungen simultan zur Entstehung ermöglichen und Restbetriebszeiten prognostizieren können, sind geeignet, die Lebensdauer von FVW-Konstruktionen zu erhöhen. Darüber hinaus kann eine zustandsorientierte und somit kosteneffektive Wartung dieser Bauteile durchgeführt werden. Sowohl die Prognose, als auch die effektive Detektion von Schäden würde die Voraussetzung für einen ressourcenschonenden Einsatz dieser Werkstoffgruppe schaffen und damit einen wesentlichen Beitrag zum gesellschaftlich gewollten Einsatz von umweltverträglichen Technologien leisten. Die dynamische Entwicklung im Bereich der Windenergie und die ersten Großserien-Anwendungen in der Automobilindustrie werden den Bedarf an derartiger Technologie in Zukunft wachsen lassen.

Das sogenannte *Structural Health Monitoring* (SHM) bezeichnet in diesem Zusammenhang eine Methode, die es ermöglicht, kontinuierlich Anhaltspunkte über die Funktionsfähigkeit von Bauteilen und Konstruktionen zu erhalten (Worden u. a., 2007). Es wird quasi in Echtzeit der Zustand der Anlage an eine zentrale Erfassungsstelle übermittelt. Bei der Erkennung von etwaigen Anomalien werden, sofern erforderlich, geeignete Maßnahmen eingeleitet. Dies erlaubt zum Beispiel eine zustandsorientierte Wartung der Konstruktion und im Idealfall konkrete Vorhersagen über die Restbetriebszeit der beobachteten Bauteile. Im Gegensatz zu reaktiven oder präventiven Instandhaltungsstrategien bietet eine zustandsorientierte Instandhaltung von Maschinen und Anlagen den größten ökonomischen Vorteil.

Zur Zeit gibt es einige Forschungsprojekte, die sich mit SHM befassen. So untersucht das Faserinstitut Bremen das Ausbreitungsverhalten von Lamb-Wellen in Composites zur Nutzung als Schadenssensor. Auch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt beschäftigt sich mit dieser Messtechnik. Die Fraunhofer Gesellschaft untersucht in diesem Zusammenhang in ihrer Adaptronik-Allianz drahtlose Sensornetze zur Verbindung von piezoelektrischen Detektoren.

Dieser Artikel beschreibt die Planung, Durchführung und Analyse der Experimente unter besonderer Berücksichtigung der Signalverarbeitung. Das Hauptziel bestand in der Planung von Experimenten zur Gewinnung von Messdaten mittels piezoelektrischen Elementen auf Versuchstafeln, bei denen bewusst Strukturbeschädigungen eingebracht wurden. Statistische Auswertungsmethoden sollen auf ihre Eignung getestet werden, Rückschlüsse aus den experimentell gewonnenen Daten auf die Art der Strukturbeschädigungen zu ziehen.

Im Folgenden präsentieren wir eine statistische Analyse zur Entwicklung von Verfahren für die Strukturüberwachung von Faser-Kunststoff-Verbunden. Die Durchführung der Messungen basiert auf der Verwendung von Lamb-Wellen, die mit den auf der Strukturoberfläche applizierten piezoelektrischen Elementen angeregt und gemessen werden. Die Versuchstafeln liegen in gleichen Größen und jeweils ohne bzw. mit Beschädigungen vor. Die Strukturschäden werden durch Bohrungen mit variierenden Durchmesser simuliert. Anschließend findet die Signalverarbeitung und die auf verschiedenen Features und Einflussgrößen der Messsignale basierenden Auswertungen statt. Als Ergebnis werden Erkenntnisse über die Möglichkeit der Schadenserkenkung erhalten.

Der Artikel gliedert sich wie folgt: Abschnitt 2 beschreibt die Aufgabenstellung. Der Versuchsaufbau wird im Abschnitt 3 beschrieben. Die Beschreibung der Experimente befindet sich im Abschnitt 4. Die Ergebnisse werden im Abschnitt 5 analysiert. Abschnitt 6 gibt eine Zusammenfassung und einen Ausblick.

2. AUFGABENSTELLUNG

Dieser Artikel fasst aktuelle Ergebnisse aus der Forschungsgruppe ISAFAN zusammen.¹ Im Projekt ISAFAN werden die folgenden Fragestellungen aus dem Bereich des SHMs bearbeitet:

- Welche Sensortechnik ist geeignet, um die Änderungen in der Faserverbundstruktur aufzunehmen?
- Welche Versagensmechanismen sind in den betrachteten Anwendungen dominierend?
- Welche preiswerten, nicht-invasiven Sensoren sind geeignet?

Die erforderlichen statistischen Auswertungen sowie die Planung der Experimente wurden im SPOTSeven Lab an der TH Köln durchgeführt.²

2.1. Faser-Kunststoff-Verbunde. “Ein Verbundwerkstoff ist ein Werkstoff aus zwei oder mehr verbundenen Materialien“ (Bonnet, 2016). *Faser-Kunststoff-Verbunde* (FKV) gehören zu der Gruppe der FVW und bestehen zum einen aus Fasern mit hoher gewichtsbezogener Festigkeit bzw. Steifigkeit, zum anderen aus einer vielfältig gestaltbaren Bettungsmasse (Matrix) (Ehrenstein, 2006). Durch diese Verbindung werden die positiven Eigenschaften der Einzelkomponenten kombiniert. Die anliegenden mechanischen Lasten werden durch hochfeste Fasern übernommen, während die Matrix die Fasern in der vorgegebenen Position fixiert und stützt (Schürmann, 2005). Die mechanischen Eigenschaften von FKV sind im Wesentlichen abhängig vom Volumenverhältnis Faser/Matrix und von der Anordnung der Verstärkungsfasern in der Matrix (Bonnet, 2016).

Die Fasern übernehmen die am Bauteil anliegenden Lasten, wobei sie hohe Steifigkeiten und Festigkeiten mitbringen müssen. Dafür sind starke atomare Bindungen die Voraussetzung. Darüber hinaus wird eine möglichst geringe Dichte für einen idealen Leichtbau-Werkstoff gefordert. Beide Forderungen erfüllen Stoffe in Faserform. Neben der Verstärkungsfasern ist die Matrix die zweite Komponente eines Faserverbundwerkstoffes. Die Fasern werden mit der Matrix imprägniert, so dass nach der Verarbeitung ein formstabiles Bauteil entsteht.

Die in diesem Artikel beschriebenen Versuche wurden an 2,5 mm dicken FKV-Versuchstafeln aus einem orthotropen *Glasfaser-Epoxidharz-Kreuzverbund* (GF-EP) der Kodierung $((0/90)^G - \text{Gewebe})_s$ durchgeführt. Bei der Gewebeart handelt es sich um E-Glas-Gewebe mit Leinwandbindung (Fu, 2017). Die mechanischen Eigenschaften des Laminats in Haupt- und Schubrichtung bei einem Faservolumengehalt (FVG) von 58-62% betragen $\bar{E}_1 = 17,25$ GPa (Ketttrichtung), $\bar{E}_2 = 16,99$ GPa (Schussrichtung), $\bar{G}_{21} = 6,07$ GPa.

¹<http://www.isafan.de>

²<http://www.spotseven.de>

2.2. **Schadensarten.** Durch den komplexen Aufbau von FKV ergeben sich viele Ursachen für Schädigungen. Das Auftreten von potenziellen Schäden kann dabei in drei Klassen eingeteilt werden (Farrar u. others, 2003):

- (1) Inkrementelle Schadenszunahme
- (2) Diskrete planmäßige Schadenszunahme
- (3) Diskrete außerplanmäßige Schadenszunahme

Insbesondere die Schadensentstehungen unter (1) und (2) können durch regelmäßige und kurze Wartungsintervalle reduziert, wenn nicht sogar ganz vermieden werden. Üblicherweise erfolgen diese Prüfungen von Bauteilen nach festgelegten Zeiten. Die Inspektionsintervalle müssen so gewählt sein, dass Schädigungen erkennbar sind, bevor es zu einem Totalausfall kommt. Diese regelmäßigen und engmaschigen Inspektionen sind jedoch ökonomisch betrachtet nicht sinnvoll und bei wirtschaftlich genutzten Anlagen oftmals nur schwer umsetzbar. Beim Einsatz von FVW im Konsumgüterbereich, wie beispielsweise bei Automobilen, ist der erhöhte Inspektionsaufwand zusätzlich nur schwer vermittelbar und häufig ein gewichtiges Kaufhindernis.

Bei diskreten außerplanmäßigen Schadensereignissen steht hingegen das geregelte Erkennen von etwaigen Schäden im Vordergrund. Eine Eintrittsvorhersage ist bei derartigen Schadensereignissen hingegen völlig ausgeschlossen. Trotzdem ist es in diesen Fällen hilfreich, eine Aussage über Art und Umfang der Schädigung treffen zu können. Ein geeignetes Prognoseverfahren könnte so den weiteren Verlauf des Schadens erklären und weitere Maßnahmen steuern.

Beim Versagen von Faserverbundstrukturen treten unterschiedliche Schadensbilder auf. Die vorausschauende Detektion des Schadensbildes hängt dabei maßgeblich vom Eintritt der ersten Veränderungen am Bauteil ab. Schadensursachen können hierbei sein:

- Überlastung
- Erosion
- Ermüdung
- Schäden an der Beschichtung
- Schäden an den Verklebungen
- Beulen
- Diskrete und außerplanmäßige strukturelle Schäden durch Impact (Vogel-schlag, Blitz, etc.)

Hinter den auftretenden Schadensbildern liegen bei Faserverbundstrukturen komplexe Versagensmechanismen, die je nach Schadensursache unterschiedliche Detektionsmethoden erfordern. Der unterschiedliche Charakter von Faser und Matrix zwingt zu einer Unterscheidung zwischen interlaminaeren Brüchen (Delamination) und intralaminaren Brüchen (Faser- und Zwischenfaserbrüchen) entsprechend Abbildung 1.

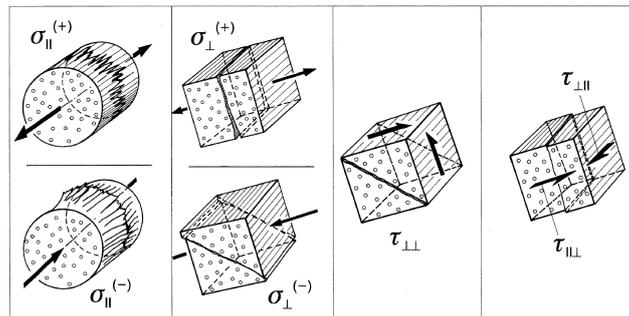


ABBILDUNG 1. Die intralaminaren Versagensmoden (Faser- und Zwischenfaserbruchmoden) der unidirektionalen Schicht nach Puck (Puck, 1996).

Während Delaminationsschäden im makroskopischen Bereich auftreten, erfordern Untersuchungen von Faser- und Zwischenfaserbrüchen Betrachtungen im mikroskopischen Bereich. Die unterschiedlichen Schadensmechanismen, zwei Faser- und drei Zwischenfaserbruchmoden in dünnwandigen Laminaten (vgl. Abbildung 1), haben hierbei auch einen maßgeblichen Einfluss auf die eingesetzte Sensortechnik und die zugehörigen Vorhersagemodelle. Auch wenn das Versagen von Laminaten bei statischer und zyklischer Beanspruchung phänomenologisch ähnlich ist, führen verschiedene Belastungsarten zu unterschiedlichen Versagensmoden, die für eine Überwachung eindeutig charakterisiert sein müssen. Bei einer zügig bis zum Bruch gesteigerten Längszugbelastung werden die Fasern zerrissen, d.h. ihre Kohäsivfestigkeit wird überschritten. Faserbruch unter Ermüdungsbelastung hingegen verläuft sehr komplex und wird sehr stark von der Matrix beeinflusst. Durch Schlagbelastungen (Impacts) entstehen im Inneren des Mehrschichtverbunds interlaminare Ablösungen zwischen den Schichten, die an der Oberfläche des Bauteils meist nicht zu erkennen sind. Unter weiterer Beanspruchung können großflächige Delaminationen zwischen den Schichten entstehen, die abrupt zu einem frühzeitigen, katastrophalen Versagen führen.

Schäden an Flügeln einer Windkraftanlage sind beispielsweise typische Schäden, wie sie aufgrund von Konstruktionsfehlern, Überlastung oder Fehlern während der Herstellung auftreten. Sie werden gegenwärtig in der Regel durch eine Sichtprüfung detektiert. Da die Zugänglichkeit derartiger Konstruktionen verständlicherweise höchst aufwendig ist, ist ein tiefgreifendes Verständnis des Versagensverhaltens und eine entsprechende sensorgestützte Überwachung natürlich überaus wünschenswert.

2.3. Piezoelektrische Wandler. Die Erfassung von Messwerten zur Detektion von Schäden an der Struktur soll idealerweise zerstörungsfrei durchgeführt werden. Die Qualität eines Werkstücks wird hierbei getestet, ohne das Material selbst zu beschädigen. Dazu werden physikalische Effekte ausgenutzt, welche hauptsächlich in die zwei Gruppen Defektoskopie und Qualimetrie eingeteilt werden können. Beispiele sind eingebettete faseroptische Sensoren zur Dehnungsmessung, miniaturisierte Beschleunigungssensoren zur Erkennung von Vibrationen, das aktive Ultraschallprüfverfahren und das passive Verfahren zur Schallemissionsprüfung oder Acoustic Emission Testing sowie die elektromechanische Impedanzmessung.

In unseren Experimenten wurden runde piezoelektrische Keramiken für die Anregung von Ultraschallwellen eingesetzt. Piezoelektrische Materialien haben die Eigenschaft, dass eine mechanische Deformation eine zu dieser Deformation proportionale elektrische Ladung erzeugt, die als elektrische Spannung abgegriffen wird (direkter piezoelektrischer Effekt). Umgekehrt kann das Anlegen einer elektrischen Spannung eine mechanische Deformation erzeugen (reziproker oder inverser piezoelektrischer Effekt) (Winner u. a., 2015). Beide Wirkrichtungen wurden für die Versuche ausgenutzt:

- Um Ultraschallwellen zu erzeugen, wurde eine elektrische Spannung angelegt. Dabei wurden die Piezowandler als Piezo-Aktoren zum Aussenden von Schall eingesetzt.
- Zum Empfangen von Schall wurden die Piezowandler als Piezo-Sensoren eingesetzt.

In der technischen Anwendung kommen primär drei piezoelektrische Werkstoffe zum Einsatz: Blei-Zirkonat-Titanat (PZT), Bariumtitanat (BTO) und Polyvinylidenfluorid (PVDF). Bei unseren Untersuchungen wurden runde piezoelektrische Elemente aus Blei-Zirkonat-Titanat verwendet. Bei den runden PZTs ist die Abstrahlcharakteristik der Ultraschallwellen radialsymmetrisch. Für die Versuche wurden die PZTs durch eine dünne, möglichst steife Klebstoffschicht mit der Strukturoberfläche verbunden.

3. VERSUCHSAUFBAU

Da die Präzision und Vertrauenswürdigkeit der Messergebnisse stark von der Art der Messung an der Struktur aber zusätzlich auch von der Position und deren Messgenauigkeit abhängt, ist die

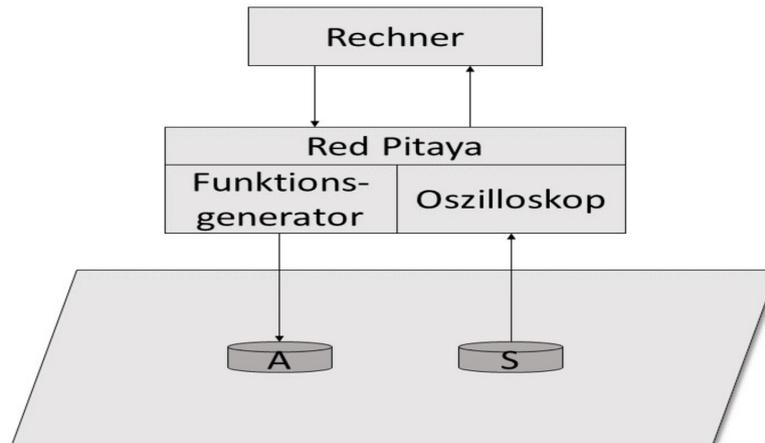


ABBILDUNG 2. Schematischer Versuchsaufbau. Abbildung entnommen aus Fu (2017).

optimale Positionierung der ausgewählten Schadensdetektionssensoren für spezielle industrielle Anwendungen von großer Bedeutung.

Im Folgenden werden Experimente beschrieben, um die verwendeten Sensoren ideal zu platzieren, so dass Schädigungen mit einer maximalen Wahrscheinlichkeit richtig detektiert werden können. Durch Verfahren der Systemidentifikation lassen sich Informationen aus dem geplanten Simulationsmodell zum aktuellen Strukturzustand ermitteln. Mittels Korrelation der einzelnen Messfelder soll eine verbesserte Aussage über die Schädigungszonen ermöglicht werden. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

Die wesentlichen Hardwarekomponenten umfassen einen Computer, einen Funktionsgenerator, ein Oszilloskop, einen Aktorverstärker, welcher das Signal des Funktionsgenerators auf ca. 60 V verstärkt, einen Messsignalfilter/-verstärker sowie eine Noppenschäumstoffmatte. Ein weiterer Bestandteil des Versuchsaufbaus waren mehrere auf die Oberfläche der Struktur der GF-EP-Platte aufgeklebte, runde piezoelektrische Elemente. Um die Struktur zu Schwingungen anzuregen, wurde an das als Aktor eingesetzte piezoelektrische Element ein Spannungssignal angelegt. Die angeregte Welle breitete sich in der Struktur aus. Das durch das als Sensor eingesetzte piezoelektrische Element empfangene Signal wurde mit Hilfe eines Oszilloskops gemessen und zur Darstellung an den Rechner gesendet. Hierbei wurden direkte und inverse piezoelektrische Effekte ausgenutzt. Das analoge Signal wurde in ein digitales Signal konvertiert und als *comma separated value* (CSV) Datei im Rechner gespeichert.

Die Anregefrequenz wurde entsprechend der Resonanzfrequenz der Versuchsplatte bestimmt. Der Aktor wurde mit einem sinusförmigen Burst mit 5 Perioden angeregt. Eine Periode des Sensorsignals besteht aus 90 Samples. Die Abtastrate beträgt $15,625 \text{ MSa/s}$, welches eine Abtastfrequenz f_s von 15,625 MHz entspricht.

3.1. Vorversuche. Zur Optimierung des Versuchsaufbaus wurden Vorversuche durchgeführt. Hierfür stand der in Abbildung 3 gezeigte Versuchsaufbau zur Verfügung. In der Abbildung sind die folgenden Elemente dargestellt:

- (1) Red Pitaya (data acquisition)
- (2) Aktorverstärker
- (3) Messsignalfilter/-verstärker

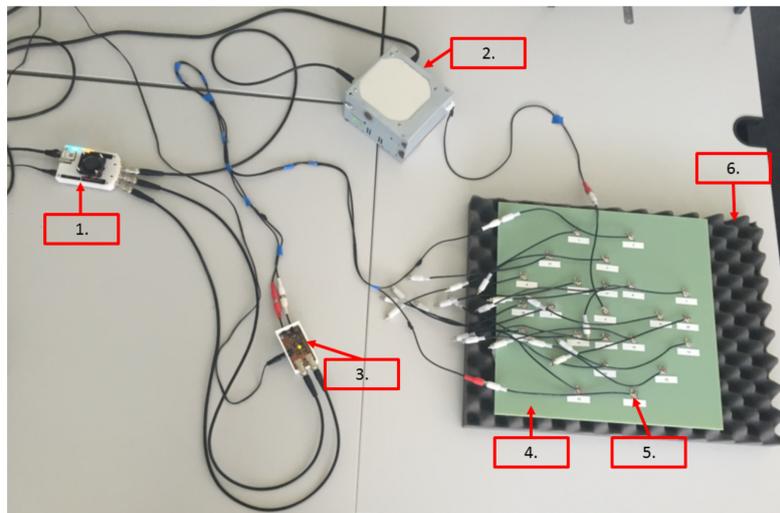


ABBILDUNG 3. 1. Red Pitaya (data acquisition), 2. Aktorverstärker, 3. Messsignalfilter/-verstärker 4. Versuchstafel (400 mm × 400 mm GF-EP-Platte) 5. Piezoelement 6. Noppenschäumstoffmatte. Abbildung entnommen aus Fu (2017).

- (4) Versuchstafel (400 mm × 400 mm GF-EP-Platte)
- (5) Piezoelement
- (6) Noppenschäumstoffmatte

Abbildung 4 zeigt die definierten Positionen auf der Strukturoberfläche für die Applizierung der Piezoelemente. Die Elemente wurden von 0 bis 22 nummeriert. Zur Durchführung des Vorversuchs wurde das Testsignal an den Piezo-Aktor an der Position 0 angelegt. Die Piezoelemente auf den anderen Punkten funktionieren dann als Sensoren. Dabei können zwei Sensorsignale gleichzeitig durch das Oszilloskop gemessen werden. Insgesamt werden für die Vorversuchsplatte 22 Aktor-Sensor-Konfigurationen mit jeweils zwei Beobachtungen gemessen, so dass die Daten von insgesamt 44 Beobachtungen erfasst werden. Abbildung 5 zeigt das Signal am Sensor 8. Es ist zu erkennen, dass das Sensorsignal teilweise mit dem am Sensor gemessenen Aktorsignal gemischt dargestellt wird, so dass der Startpunkt des Sensorsignals schwer abzulesen ist. Das führt zu der falschen Ermittlung der Eigenschaft von *Time of Flight*(TOF), die für die mathematische Auswertung von großer Bedeutung ist. Außerdem liegen die Kabel für die Spannungsversorgung am Aktor und die Kabel für die Messung am Sensor zu nah aneinander. Dies hat ein Übersprechen des Aktorsignals auf den Sensor zur Folge. Dies beeinträchtigt den Messprozess und resultiert in einer schlechten Datenqualität. Zusätzlich liegen die mit den Piezoelementen verlöteten Kabel direkt auf einer Hälfte der zu untersuchenden Struktur. Diese Aufbringung der zusätzlichen Kabelmasse kann eine für den Versuch unerwünschte Dämpfung des Signals bewirken. Um den Messprozess und die Datenqualität zu verbessern, wurde der Versuchsaufbau optimiert.

3.2. Optimierung des Versuchsaufbaus. Zur Optimierung des Versuchsaufbaus werden folgende Maßnahmen durchgeführt. Die zwei Verlängerungskabel zwischen dem Messverstärker und den Sensoren werden gespart. Um den Einfluss der Signallaufzeit zu minimieren, wurde das Aktorsignal über einen Tastkopf mit 10:1 Spannungsteiler am Ausgang des Aktorverstärkers gemessen. Damit die Aufbringung der zusätzlichen Kabelmasse auf der zu untersuchenden Struktur verhindert wird, wurde das in Abbildung 6 gezeigte Gitter verwendet. Der Messverstärker kann



ABBILDUNG 4. Positionen auf der Strukturoberfläche für die Applizierung der Piezoelemente. Die Position 0 befindet sich in der Mitte der Platte. Abbildung entnommen aus Fu (2017).

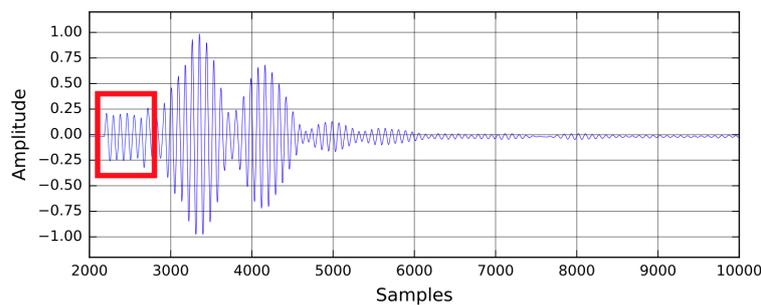


ABBILDUNG 5. Vorversuch: Signal am Sensor 8. Es ist zu erkennen, dass das Sensorsignal teilweise mit dem am Sensor gemessenen Aktorsignal gemischt dargestellt wird, so dass der Startpunkt des Sensorsignals schwer abzulesen ist. Abbildung entnommen aus Fu (2017).

so in unmittelbarer Nähe zu den Sensoren auf dem Gitter platziert werden. Den optimierten Versuchsaufbau zeigt Abbildung 7. Abbildung 8 zeigt das Sensorsignal am Punkt 8 nach der Versuchsaufbauoptimierung. Es ist zu erkennen, dass man den Startpunkt des Sensorsignals ungestört vom am Sensor gemessenen Aktorsignal ablesen kann.

3.3. Analyse der Vorversuche. Eigenschaften, die die Kennwerte der Signalkurve darstellen, werden als Features bezeichnet. Zur mathematischen Analyse der Vorversuche wurden die folgenden Features ermittelt:

- (1) Time of Flight (ToF): Das Feature ToF beschreibt die benötigte Dauer des Signals vom Aktor zum Sensor. Der Beginn der ToF ist der Zeitpunkt, bei dem die erste Schwingung des fünffachen Bursts des Aktorsignals erzeugt wird. Die ToF endet an dem Zeitpunkt,

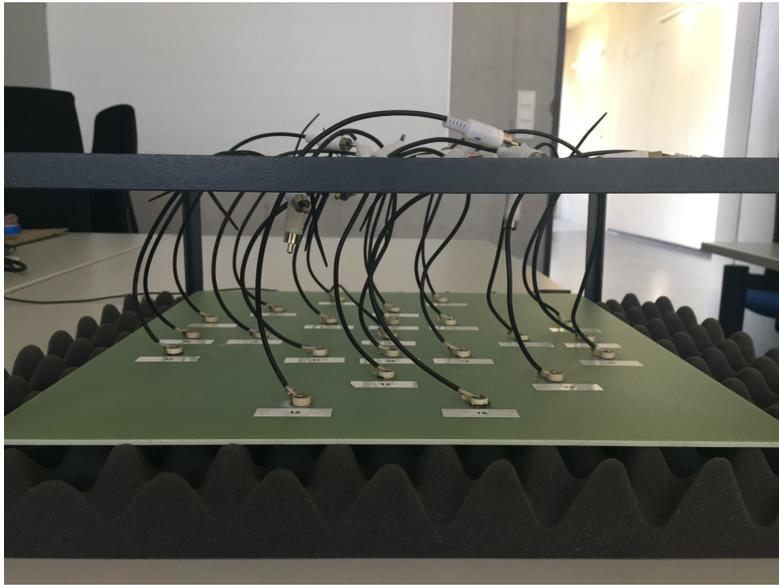


ABBILDUNG 6. Gitter zum Massetragen. Abbildung entnommen aus Fu (2017).

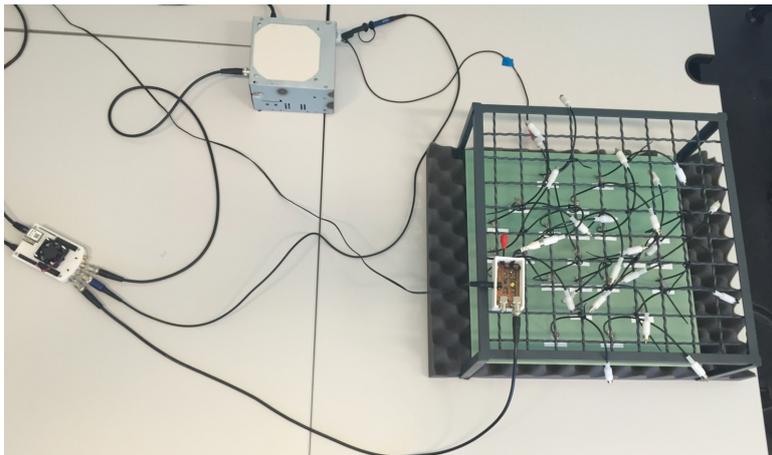


ABBILDUNG 7. Versuchsaufbau nach der Optimierung. Abbildung entnommen aus Fu (2017).

an dem das Sensorsignal gerade aufgenommen wird. Die ToF kann durch die folgende Formel bestimmt werden:

$$T_{\text{tof}} = X/f_s,$$

wobei X die Anzahl der zurückgelegten Stützpunkte (Samples) und f_s die Abtastfrequenz darstellen.

- (2) Peak to Peak (PtP): Der PtP bezeichnet ein Feature, das den Wert der maximalen Spannweite der Auslenkung der Amplitude des Sensorsignals beschreibt. Es wird als Differenz zwischen Maximal- und Minimalwert des Signals bestimmt.

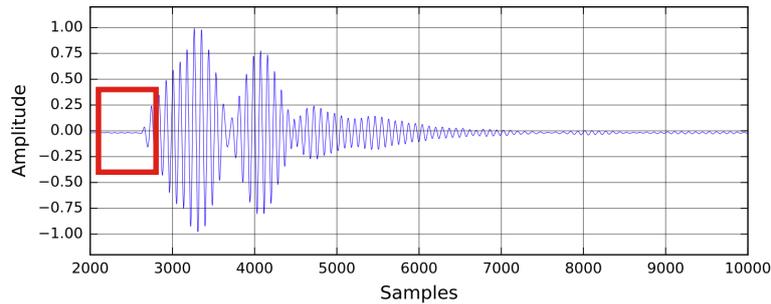


ABBILDUNG 8. Sensorsignal nach der Versuchsaufbauoptimierung. Abbildung entnommen aus Fu (2017).

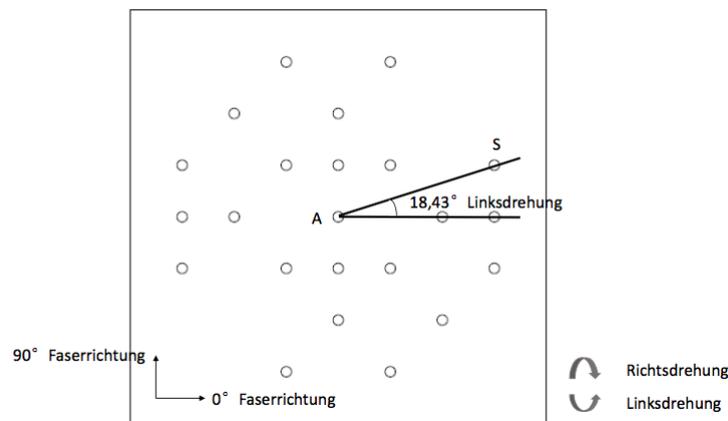


ABBILDUNG 9. Bei der dargestellten Aktor-Sensor-Kombination ergeben sich die Einflussgrößen Winkel mit $18,43^\circ$ und Drehrichtung mit dem Faktor 0 (in Linksdrehrichtung). Abbildung entnommen aus Fu (2017).

- (3) Power Spectral Density (PSD): Die PSD (spektrale Leistungsdichte) beschreibt die Verteilung der Leistung eines Signals über verschiedene Frequenzen. Angegeben wird sie in Watt (W) pro Hertz (Hz). Das Integral über ein bestimmtes Frequenzband ergibt die mittlere Leistung des Prozesses in diesem Band. Bei den Vorversuchen wurde lediglich der Maximalwert berücksichtigt.

Da die benutzte Versuchstafel mehrere Schichten der Leinwandgewebe mit $0^\circ/90^\circ$ -Faserrichtung hat, zeigt die Versuchstafel eine orthotrope Eigenschaft: das Verhalten der Platte ist je nach Beanspruchungsrichtung unterschiedlich groß. Die Einflussgrößen Winkel und Drehrichtung haben somit einen signifikanten Einfluss auf die Features. Die zwei Einflussgrößen werden folgend kurz erläutert. Die Drehrichtung wurde im Uhrzeigersinn als Rechtsdrehung (mit dem Faktor 1) und im Gegenuhrzeigersinn als Linksdrehung (mit dem Faktor 0) definiert. Im Winkel schneiden sich die Linie, die die Position eines Aktors (der Punkt 0) und die Position eines Sensors anschließt und die Linie der $0^\circ/90^\circ$ -Faserrichtung der GF-EP-Platte. Die Faserrichtungen haben den Winkel von 0° . Dabei ist der Winkel immer kleiner oder gleich 45° mit der definierten Drehrichtung. Abbildung 9 zeigt ein Beispiel für die Einflussgrößen Winkel und Drehrichtung.

3.4. Ergebnisse der Vorversuche. In diesem Abschnitt werden die Untersuchungen im Vorversuch anhand der Kenngrößen und der linearen Regression dargestellt. Die Aufgabe war es, die Änderung des Verlaufs von ToF über Distanz zwischen dem Aktor und dem Sensor mit einem Diagramm darzustellen, sowie die Distanz auf Grundlage des Sensorsignals zu rekonstruieren. Nach der erfolgreichen Optimierung des Versuchsaufbaus konnten die Distanzen zwischen den Piezoelementen aufgrund ihrer genauen Positionen bestimmt werden. Zudem nimmt, wie dies auch zu erwarten war, die ToF mit zunehmender Distanz zwischen dem Aktor und dem Sensor zu. Die Messungen mit gleicher Distanz vor der Optimierung des Versuchsaufbaus wiesen hingegen noch große Streuungen auf. Durch die Optimierung wurde das Problem der Ermittlung des Startpunktes der Sensorsignale behoben. Die Streuungen konnten reduziert werden.

Ein weiterer Untersuchungsgegenstand war es, die Distanz zwischen dem Aktor und dem Sensor auf Grundlage des Sensorsignals jeweils vor und nach der Optimierung des Versuchsaufbaus zu rekonstruieren. Hierfür wurde die lineare Regression angewendet. Dabei werden die Features ToF, PTP, PSD sowie die Einflussgrößen Winkel und Drehrichtung als Regressoren mit 44 Messwerten (nummeriert $i = 1, 2, \dots, 44$) zur Erklärung der Distanz y gemäß der folgenden Schätzgleichung benutzt.

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 T_{\text{tof}} + \hat{\beta}_2 PTP + \hat{\beta}_3 PSD + \hat{\beta}_4 \text{Winkel} + \hat{\beta}_5 \text{Drehrichtung}.$$

Dies führt zu den in den Abbildungen 10 und 11 dargestellten Regressionsergebnissen.

Das Bestimmtheitsmaß (oder auch R^2), das angibt, wieviel Variation in den Daten durch ein vorliegendes Regressionsmodell erklärt werden kann, stieg durch die Optimierung von 40,04 % auf 97,90 %. Das Ergebnis des Bestimmtheitsmaß bedeutet, dass 40,04 % der Varianz durch die lineare Regression vor der Optimierung des Versuchsaufbaus erklärt werden kann. Im Vergleich zu der Analyse vor der Optimierung steigt das Bestimmtheitsmaß nach der Optimierung auf 97,90 %.

Das als Standardfehler der Schätzung bezeichnete Maß ist eine Kenngröße dafür, wie nahe die durch das Regressionsmodell vorhergesagten Werte, an den wahren Werten liegen. Es lag vor der Optimierung bei 33,45 mm und nach der Optimierung bei 6,26 mm. Je kleiner der Standardfehler ist, desto höher ist die Zuverlässigkeit der Schätzergebnisse.

Zusätzlich wird ersichtlich, dass nach der Optimierung die Features TOF und Winkel die maßgeblichen Einflussfaktoren für die Regression sind. Beide Features haben sehr kleine p -Werte, so dass die Hypothese, dass sie den Wert Null haben und keinen Einfluss auf die Regressionsgerade haben, abgelehnt werden sollte. Dieses Ergebnis deckt sich hervorragend mit der physikalischen Theorie, dass die Time of flight von der Distanz zwischen Aktor und Sensor sowie der Schallgeschwindigkeit in Materie, die sich bei FKV abhängig von der Ausbreitungsrichtung der Welle im Verhältnis zur Faserlage ändert, bestimmt wird. Es ist ersichtlich, dass durch die Optimierung des Versuchsaufbaus bessere Daten für die Modellierung erhalten werden.

4. HAUPTVERSUCH-EXPERIMENTE

Dieser Abschnitt beschreibt die durchgeführten Versuchsreihen nach der Optimierung des Versuchsaufbaus. Hauptziel des Versuchs ist die Gewinnung von Messdaten anhand der Versuchstafeln ohne bzw. mit Strukturbeschädigungen, um anschließend basierend auf statistischen Auswertungsmethoden, Rückschlüsse über die Detektionsmöglichkeit beschädigter Strukturen zu ziehen.

4.1. Design. Für die Versuche wurden folgende Materialien verwendet:

- 4 x GF-EP Versuchstafeln: 400 mm × 400 mm × 2,5 mm
- 64 runde piezoelektrische Elemente aus Blei-Zirkonat-Titanat: Durchmesser 10 mm
- Sekundenkleber

Call:

```
lm(formula = Distanz ~ TOF + Winkel + Richtung + PTP + PSD, data = df)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-63.320	-25.311	-1.591	32.662	61.383

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	137.10892	14.86479	9.224	3.07e-11	***
TOF	0.03975	0.01804	2.204	0.03369	*
Winkel	-0.41800	0.29978	-1.394	0.17131	
Richtungr	42.04863	14.28501	2.944	0.00551	**
PTP	-40.48352	17.14982	-2.361	0.02348	*
PSD	-1.15319	1.62923	-0.708	0.48338	

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 33.45 on 38 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.4004, Adjusted R-squared: 0.3215

F-statistic: 5.075 on 5 and 38 DF, p-value: 0.001166

ABBILDUNG 10. Regressionsanalyse basierend auf den Daten vom 28.07.2016
(vor der Optimierung)

Call:

```
lm(formula = Distanz ~ TOF + Winkel + Richtung + PTP + PSD, data = df)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-14.3642	-2.1953	-0.5625	1.9149	10.7768

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	8.146076	6.601248	1.234	0.2248	
TOF	0.203662	0.007438	27.382	< 2e-16	***
Winkel	-0.373538	0.065575	-5.696	1.49e-06	***
Richtungr	-0.110594	2.827153	-0.039	0.9690	
PTP	3.153981	3.857478	0.818	0.4187	
PSD	-0.093824	0.053693	-1.747	0.0886	.

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 6.256 on 38 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.979, Adjusted R-squared: 0.9763

F-statistic: 354.7 on 5 and 38 DF, p-value: < 2.2e-16

ABBILDUNG 11. Regressionsanalyse basierend auf den Daten vom 18.08.2016
(nach der Optimierung)

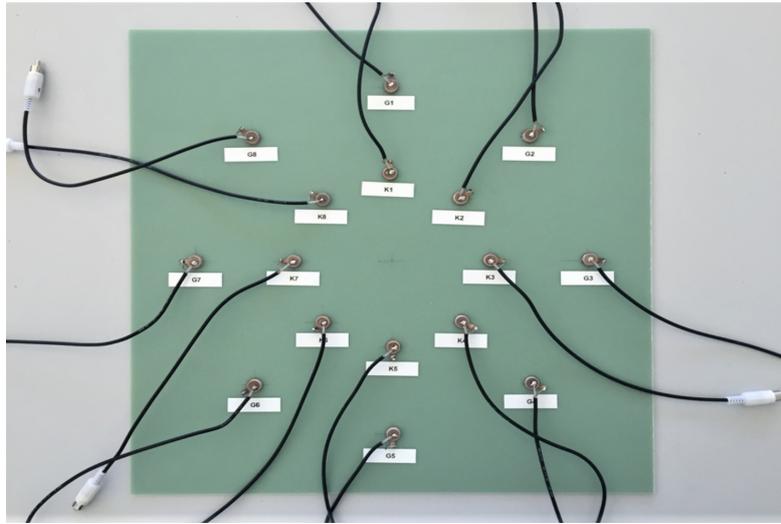


ABBILDUNG 12. Positionen für Piezoelemente. Abbildung entnommen aus Fu (2017).

- Hilfsutensilien: Cerafeldschaber, Schleifpapier

Die Parameter des Aktorsignals für die Hauptversuche wurden mit den gleichen Werten wie bei dem Vorversuch eingestellt. Erforderliche Bereiche auf der Tafeloberfläche wurden für die Applizierung der Piezoelemente definiert (siehe Abbildung 12). Die Piezoelemente auf dem Außenkreis werden jeweils mit G1, G2, ..., G8 nummeriert. Die Piezoelemente auf dem Innenkreis werden jeweils mit K1, K2, ..., K8 nummeriert. Wie im Vorversuch sind die Piezoelemente durch eine dünne, möglichst steife Klebstoffschicht mit der Strukturoberfläche verbunden. Für die Referenzmessung wurden zuerst alle Versuchsplatten (mit 1 bis 4 nummeriert) ohne Schädigung gemessen. Hierbei wurden die Piezoelemente an den Positionen G1, G2, K3 und K4 als Aktoren eingesetzt. Die 10 Piezoelemente, die auf der anderen Hälfte der Struktur gegenüber dem einzelnen Aktor liegen, funktionieren dann als Sensoren (siehe Abbildung 13). Somit wurden für jede Platte (außer Platte 4) die Daten von insgesamt 40 Messungen mit jeweils 2 Beobachtungen bzw. 80 Datensätze erfasst. Bei der Platte 4 wurden die Messungen mit dem Aktor G1 nur mit einer Beobachtung durchgeführt, somit stehen bei dieser Platte 70 Datensätze zur Verfügung.

Als zu untersuchende Beschädigung wurde eine Bohrung mit variierendem Durchmesser (5 mm, 10 mm und 20 mm) mittig in die Versuchsplatte eingebracht. Zur Gewinnung von Messdaten anhand der Versuchstafeln mit Strukturbeschädigungen wurden nach der Referenzmessung zuerst die 5 mm-Bohrung in die Platte 1 bis 3 eingebracht. Anschließend wurden die 40×3 Messungen an den drei Platten durchgeführt. Dabei sind die Messkonfigurationen gleich wie bei der Referenzmessung. Die weiteren Messungen mit 10 mm- und 20 mm-Bohrungen erfolgten danach wie bei der Messung mit der 5 mm-Bohrung. Zum Schluss wurde eine 1 mm-Bohrung mittig in die Platte 4 eingebracht, wobei 40 Messungen an der Platte durchgeführt werden (siehe Tabelle 1).

4.2. Features im Hauptversuch. Zur mathematischen Analyse der Hauptversuche wurden außer den in Abschnitt 3.1 vorgestellten Features ToF, PtP und PSD sowie den Einflussgrößen

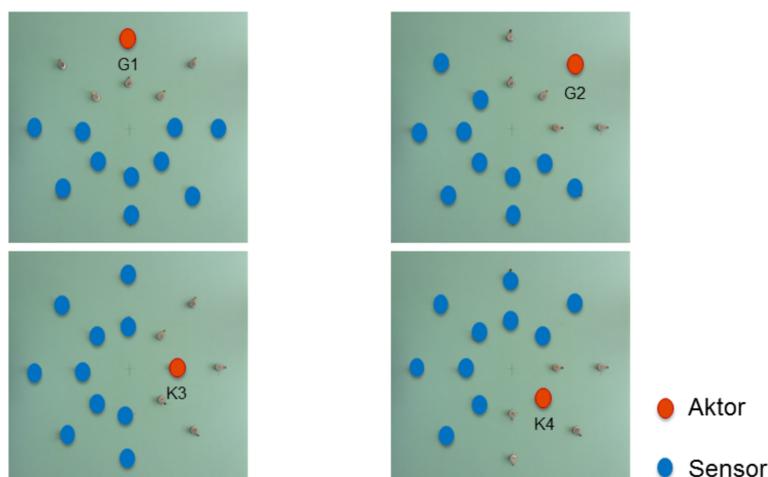


ABBILDUNG 13. Messkonfigurationen. Abbildung entnommen aus Fu (2017).

TABELLE 1. Messreihen der Hauptversuche

Nr.	Zustand der Struktur	Messungen
Platte 1	ohne Schädigung, 5 mm-, 10 mm- und 20 mm-Bohrungen	320
Platte 2	ohne Schädigung, 5 mm-, 10 mm- und 20 mm-Bohrungen	320
Platte 3	ohne Schädigung, 5 mm-, 10 mm- und 20 mm-Bohrungen	320
Platte 4	ohne Schädigung, 1 mm-Bohrung	150

Winkel, Drehrichtung, Distanz und vorhergesagte Distanz noch weitere Features und Einflussgrößen benötigt, die im Folgenden erklärt werden. Die Analyse mit mehreren Features und Einflussgrößen für Hauptversuche begründet sich auf die Erhöhung der Zuverlässigkeit der Modellierungen für die Schadensdetektion. Bei den zusätzlichen Features handelt es sich im Einzelnen um:

Winkelkorrektur: Die Fasern der Versuchstafeln wurden nicht genau in 0° und 90° Winkel verlegt, wobei eine Abweichung von ungefähr 3° (optisch mit dem Winkelmesser gemessen) bestand. Daraus ergibt sich die sogenannte Winkelkorrektur, die als weitere Einflussgröße berücksichtigt wurde. Zur automatisierten Ermittlung der Winkelkorrektur auf Basis der Sensordaten wurde eine lineare Regression zur Vorhersage der Distanz mit den Regressoren der ToF, des Winkels und der Drehrichtung durchgeführt.

$$(1) \quad \hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \times T_{\text{tof}} + \hat{\beta}_2 \times (\text{Winkel} + \text{Winkelkorrektur}) + \hat{\beta}_3 \times \text{Drehrichtung}.$$

Der Winkel wurde durch die Winkelkorrektur korrigiert, bis die Drehrichtung keinen Einfluss mehr auf die Distanzvorhersage hat bzw. der Parameter $\hat{\beta}_3 = 0$ ist.

Differenz der Winkelkorrekturen: Die Einflussgröße Differenz der Winkelkorrekturen bezeichnet die Differenz zwischen den Winkelkorrekturen aus der Analyse jeweils mit der Referenzmessung und mit der Messung mit Schädigung.

PSD 1-5: Das Feature PSD wurde in Abschnitt 3.3 vorgestellt. Während in der Analyse der Vorversuche nur der Maximalwert der spektralen Leistungsdichte über das Frequenzband (PSD 1) berücksichtigt wurde, wurden die fünf Maximalwerte der PSD (PSD 1-5) zur Analyse der Hauptversuche berücksichtigt.

Frequenz (FQ) 1-5: Die fünf zu PSD 1-5 gehörenden Frequenzwerte.

Frequenzänderung: Binäres Merkmal, das angibt, ob sich eine von der fünf Frequenzen FQ 1-5 im Vergleich zu den Frequenzen aus den Referenzmessdaten der jeweiligen Platte geändert hat.

Differenz der vorhergesagten Distanzen: In der Analyse der Hauptversuche wurden die reale Distanz zwischen dem Aktor und dem Sensor, die durch die lineare Regression (siehe die Schätzgleichung 1) vorhergesagte Distanz sowie die Differenz den vorhergesagten Distanzen als Einflussgrößen verwendet. Hierbei ist die Differenz der vorhergesagten Distanzen die Differenz zwischen den vorhergesagten Distanzen aus der Analyse jeweils mit der Referenzmessung und mit der Messung mit Schädigung.

4.3. Schadensklassifikation. In dieser Untersuchung wurden zwei Klassen zur Schadensklassifikation verwendet:

- (1) Versuchstafeln ohne Beschädigung und
- (2) Versuchstafeln mit Beschädigung.

Durch die Experimente wurde ermittelt, wie viele Datensätze anhand der statistischen Analyse zur Schadensdetektion der Versuchstafeln erkannt werden. Dabei wurden ein logistisches Regressionsmodell (Harrell, 2001), ein Entscheidungsbaum (engl. tree) (Breiman u. a., 1984) und ein Entscheidungswald (engl.: random forest) (Breiman, 2001) verwendet. Zum Prüfen der Zuverlässigkeit der jeweiligen Modellierungen wurde eine Kreuzvalidierung eingesetzt. Es ergeben sich vier Fälle bei der 2-Klassen- Klassifizierung, die in einer Konfusionsmatrix dargestellt werden können:

- (1) Der Datensatz gehört zu einer Platte ohne Beschädigung und das Modell hat dies richtig klassifiziert (richtig negativ).
- (2) Der Datensatz gehört zu einer Platte ohne Beschädigung und das Modell hat die Platte als mit Beschädigung klassifiziert (falsch positiv).
- (3) Der Datensatz gehört zu einer Platte mit Beschädigung und das Modell hat dies richtig klassifiziert (richtig positiv).
- (4) Der Datensatz gehört zu einer Platte mit Beschädigung und das Modell hat dies als Versuchstafel ohne Schaden vorhergesagt (falsch negativ).

5. ANALYSE

Die Daten wurden bei der separaten Untersuchung entsprechend der Bohrungsgröße getrennt, wobei der Bohrungsdurchmesser zwischen 5 mm, 10 mm und 20 mm variiert. Für die Klassifikation bei jeder Bohrungsgröße standen 550 Beobachtungen (Referenzmessdaten: $80 \times 3 + 70 = 310$ Beobachtungen, Messdaten von den Platten 1-3 mit Bohrung: $80 \times 3 = 240$ Beobachtungen) zur Verfügung.

Die Kreuzvalidierung wurde zum Prüfen der Zuverlässigkeit der jeweiligen Modellierungen eingesetzt (Efron, 1983; Kohavi, 1995). Bei der Kreuzvalidierung werden die Daten in mehrere (in dieser Artikel fünf) gleich große Teildatensätze aufgeteilt. In dem mehrschrittigen Verfahren wurde nacheinander ein Teildatensatz als Validierungsdaten zur Abschätzung der Prognosegüte und die übrigen Teildatensätze zur Schätzung der Modellparameter genutzt. Als Maß für die Prognosegüte wurde der Mittelwert der Prognosegüten aus den einzelnen Iterationen berechnet.

Die Fehlerrate der Modelle entsprach dem Quotienten aus der Summe der falsch klassifizierten Beobachtungen und der Summe aller Beobachtungen. Es ist zu erkennen, dass die Fehlerrate mit den drei Modellen in der separaten Untersuchung zwischen 23 % bis 39 % lagen. Dabei weist das logistische Regressionsmodell gegenüber den anderen zwei Modellen eine bessere Schadenserkennung auf. Es standen insgesamt 1030 Beobachtungen (Referenzmessdaten: $80 \times 3 + 70 = 310$

Beobachtungen, Messdaten von den Platten 1-3 mit allen Bohrungsgrößen: $80 \times 3 \times 3 = 720$ Beobachtungen) zur Verfügung.

Bei der Klassifikation der Versuchstafeln mit bzw. ohne Bohrung mithilfe des Entscheidungsbaums werden 592-mal keine Beschädigungen richtig und 402-mal ein Schaden richtig in der globalen Untersuchung erkannt. Das führt zu einer Fehlerrate von 3,50 %. Es ist erkennbar, dass der Entscheidungsbaum mit einer Fehlerrate von 3,50 % für die globale Untersuchung eine deutlich bessere Schadenserkenkung aufweist.

Bei der Klassifikation der Versuchstafel ohne bzw. mit 1 mm-Bohrung mithilfe des Entscheidungsbaums wurden 82-mal keine Beschädigungen richtig und 38-mal ein Schaden richtig erkannt. Daraus ergab sich eine Fehlerrate von 20,00 %.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Es wurden Messungen und Untersuchungen zur Schadensdetektion an Versuchstafeln von FKV durchgeführt. Das Hauptziel bestand in der Planung von Experimenten zur Gewinnung von Messdaten mittels piezoelektrischen Elementen auf Versuchstafeln, bei denen bewusst Strukturbeschädigungen eingebracht wurden. Statistische Auswertungsmethoden sollen auf ihre Eignung getestet werden, Rückschlüsse aus den experimentell gewonnenen Daten auf die Art der Strukturbeschädigungen zu ziehen. Hierfür wurden Vorversuche zur Optimierung des Versuchsaufbaus und Hauptversuche zur Gewinnung der Messdaten durchgeführt. Zur Untersuchung der Messsignale wurden verschiedene mathematische Modelle angewendet.

Basierend auf den umfangreichen Versuchen und der anschließenden mathematischen Analyse ergeben sich die folgenden Verbesserungsvorschläge:

Konstante Randbedingungen: Bei der Durchführung der Versuchsreihen konnten in jedem Experiment nur die Messdaten von einer Aktor-Sensor-Konfiguration gewonnen werden. Es muss darauf geachtet werden, dass die Versuche aller Aktor-Sensor-Konfigurationen unter denselben Randbedingungen durchgeführt werden. Ändern sich die Randbedingungen, so führt dies zur unerwünschten Varianz in den Messergebnissen.

Signalstörungen: In dem Versuch mit der Platte, auf der eine 1mm-Bohrung mittig aufgebracht wurde, ist aufgefallen, dass bereits das Anschließen der Kabel einen messbaren Einfluss auf die Messdaten hat, der bei der geringen Änderung der Features der Signalkurve auf Grund der sehr kleinen 1mm-Bohrung relevant sein kann.

Mehrere Messkanäle: Wenn mehrere Messkonfigurationen mit einem Aktorsignal gleichzeitig gemessen werden, würde die Effizienz der Durchführung der Versuchsreihen und die Qualität der Messdaten erhöht. Somit ist ein Messgerät mit mehreren Messkanäle vorzugsweise zu verwenden.

Differenzsignale: Zur Untersuchung mit den mathematischen Modellen könnten noch Differenzsignale eingesetzt werden. Dabei wird ein Differenzsignal durch Subtrahieren des Messsignals eines als unbeschädigt angenommenen Referenzzustands von dem Messsignal der aktuellen Messung gebildet. Somit werden dann die Messsignale und die Differenzsignale zur Schadensdetektion analysiert.

Schadensarten: Zur Simulation eines Schadens wurden Bohrungen mit variierenden Durchmesser aufgebracht. Die in die Platte geführte Welle wurde an der Kante der Bohrung reflektiert. In der Praxis ergeben sich noch mehr Schadensarten. Um die Versuche zu erweitern, könnten noch andere Schadensarten wie z.B. eine Delamination betrachtet werden, die durch einen modifizierten Kerbschlagversuch oder einen Impaktor mit bestimmter Schlagenergie simuliert werden kann. Durch die Delamination wird die in die Platte geführte Welle gedämpft, wodurch andere Eigenschaften der Signalkurve entstehen können. Anhand den Messdaten können Erkenntnisse über die Möglichkeit der Schadenserkenkung bei einer Delamination erhalten werden.

Lamb-Wellen: Für zukünftige Untersuchungen zur Schadenslokalisierung könnten die Eigenschaften von Lamb-Wellen in der anisotropen Struktur ermittelt werden, um diese in nachträglichen Analysen verwenden zu können. Dabei soll der Zusammenhang zwischen der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Lamb-Welle und der mechanischen Eigenschaften von FKV dargestellt werden.

Messqualität: Durch die Versuchsdurchführung und die mathematische Untersuchung kann man erkennen, dass die Schadenserkennung von Strukturen der FKV mit der in diesem Artikel beschriebenen Methode möglich ist. Um ein besseres Ergebnis zu erhalten, soll die Qualität der Messdaten verbessert werden.

Maschinelles Lernen: In dieser Untersuchung wurden einfache statistische Modelle (logistische Regression, Trees und Random Forests) eingesetzt. Die Verwendung weiterer Verfahren des maschinellen Lernens (Figueiredo u. a., 2011; Farrar u. Worden, 2013) oder deren Kombination (Bartz-Beielstein u. Zaefferer, 2017) ist sicherlich von großem Interesse.

LITERATUR

- [Bartz-Beielstein u. Zaefferer 2017] BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas ; ZAEFFERER, Martin: Model-based methods for continuous and discrete global optimization. In: *Applied Soft Computing* 55 (2017), 154 - 167. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2017.01.039>. – DOI 10.1016/j.asoc.2017.01.039. – ISSN 1568–4946
- [Bonnet 2016] BONNET, Martin: *Kunststofftechnik: Grundlagen, Verarbeitung, Werkstoffauswahl und Fallbeispiele*. Springer, 2016
- [Breiman 2001] BREIMAN, L: Random Forests. In: *Machine Learning* 45 (2001), Nr. 1, S. 5–32
- [Breiman u. a. 1984] BREIMAN, L ; FRIEDMAN, J H. ; OLSHEN, R A. ; STONE, C J.: *Classification and Regression Trees*. Monterey CA : Wadsworth, 1984
- [Efron 1983] EFRON, Bradley: Estimating the error rate of a prediction rule: improvement on cross-validation. In: *Journal of the American Statistical Association* 78 (1983), Nr. 382, S. 316–331
- [Ehrenstein 2006] EHRENSTEIN, Gottfried W.: *Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Eigenschaften*. 2. Hanser Verlag, 2006
- [Farrar u. others 2003] FARRAR, Charles R. ; OTHERS: Damage Prognosis: Current Status and Future Needs. Los Alamos National Laboratory, 2003. – Forschungsbericht
- [Farrar u. Worden 2013] FARRAR, Charles R. ; WORDEN, Keith: *Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective*. Wiley, 2013
- [Figueiredo u. a. 2011] FIGUEIREDO, Eloi ; PARK, Gyuhae ; FARRAR, Charles R. ; WORDEN, Keith ; FIGUEIRAS, Joaquim: Machine learning algorithms for damage detection under operational and environmental variability. In: *Structural Health Monitoring* 10 (2011), Nr. 6, 559–572. <http://dx.doi.org/10.1177/1475921710388971>. – DOI 10.1177/1475921710388971
- [Fu 2017] FU, Yixi: *Untersuchungen und mathematische Analyse von Piezosensoren zur Anwendung im Structural Health Monitoring für Faserverbundstrukturen*, Technische Hochschule Köln, Diplomarbeit, 2017
- [Harrell 2001] HARRELL, Frank E.: *Regression modeling strategies: with applications to linear models, logistic regression, and survival analysis*. Springer, 2001
- [Kohavi 1995] KOHAVI, Ron: A Study of Cross-Validation and Bootstrap for Accuracy Estimation and Model Selection. (1995), S. 1–8
- [Puck 1996] PUCK, Alfred: *Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten: Modelle für die Praxis*. München and Wien : Hanser, 1996. – ISBN 3–446–18194–6
- [Schürmann 2005] SCHÜRMAN, Helmut: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Springer, 2005

- [Winner u. a. 2015] WINNER, Hermann ; HAKULI, Stephan ; LOTZ, Felix ; SINGER, Christina: *Handbook of Driver Assistance Systems: Basic Information, Components and Systems for Active Safety and Comfort*. 1st. Springer Publishing Company, Incorporated, 2015. – ISBN 3319123513, 9783319123516
- [Worden u. a. 2007] WORDEN, Keith ; FARRAR, Charles R. ; MANSON, Graeme ; PARK, Gyuhae: The fundamental axioms of structural health monitoring. In: *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science* 463 (2007), Nr. 2082, 1639–1664. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2007.1834>. – DOI 10.1098/rspa.2007.1834

Kontakt/Impressum

Diese Veröffentlichungen erscheinen im Rahmen der Schriftenreihe "Ciplus". Alle Veröffentlichungen dieser Reihe können unter

<https://cos.bibl.th-koeln.de/home>
abgerufen werden.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Datum der Veröffentlichung: 06.04.2017

Herausgeber / Editorship

Prof. Dr. Thomas Bartz-Beielstein,
Prof. Dr. Wolfgang Konen,
Prof. Dr. Boris Naujoks,
Prof. Dr. Horst Stenzel
Institute of Computer Science,
Faculty of Computer Science and Engineering Science,
TH Köln,
Steinmüllerallee 1,
51643 Gummersbach
url: www.ciplus-research.de

Schriftleitung und Ansprechpartner/ Contact editor's office

Prof. Dr. Thomas Bartz-Beielstein,
Institute of Computer Science,
Faculty of Computer Science and Engineering Science,
TH Köln,
Steinmüllerallee 1, 51643 Gummersbach
phone: +49 2261 8196 6391
url: <http://www.spotseven.de>
eMail: thomas.bartz-beielstein@th-koeln.de

ISSN (online) 2194-2870

**Technology
Arts Sciences
TH Köln**

This work has been partially supported by the MIWF NRW
under grant agreement FH-STRUKTUR 2014/10 (ISAFAN).

Ministry of Innovation, Science
and Research of the State
of North Rhine-Westphalia



Technology
Arts Sciences
TH Köln