

Inhaltsverzeichnis

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Theoretische Grundlagen | 3 |
| 2.1 Physikalische Grundlagen der Wellenausbreitung in Festkörpern | 3 |
| 2.1.1 Die Bedeutung von mechanischen Schwingungen und Wellen..... | 3 |
| 2.1.2 Longitudinal- und Transversalwellen..... | 4 |
| 2.1.3 Biegewellen | 5 |
| 2.1.4 Geführte Ultraschallwellen | 6 |
| 2.1.5 Geführte Wellen in isotropen und anisotropen Medien und ihre Modellierung | 13 |
| 2.1.6 Anwendung von geführten Ultraschallwellen in der Strukturüberwachung und Effekte bei der Schadensdetektion | 14 |
| 2.1.7 Geführte Ultraschallwellen in Faserverbund-Metall-Laminaten | 16 |
| 2.2 Messverfahren zur Erfassung geführter Ultraschallwellen | 18 |
| 2.2.1 Flächenmessverfahren | 18 |
| 2.2.2 Punktuelle Messverfahren | 20 |
| 2.3 Methoden der Signalverarbeitung | 24 |
| 2.3.1 Fourier-Transformation und Short-Time Fourier-Transformation..... | 25 |
| 2.3.2 Continous Wavelet Transformation | 26 |
| 3 Forschungshypothesen und Motivation für die Arbeit | 29 |
| 3.1 Forschungsdefizit und Hypothesen | 29 |
| 3.1.1 Forschungshypothesen..... | 30 |
| 3.1.2 Arbeitshypothesen | 30 |
| 3.2 Ziele der Arbeit | 30 |
| 3.3 Aufbau der Arbeit | 31 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4 Die Beziehung der Schwingungsphasen auf Faser-Metall-Laminaten | 33 |
| 4.1 Ausgangssituation | 33 |
| 4.1.1 Existierende Beispiele für die Untersuchung von Schwingungsphasen. | 36 |
| 4.2 Forschungsdefizit und Motivation für eine experimentelle Untersuchung | 40 |
| 4.3 Forschungs- und Arbeitshypothese | 41 |
| 4.4 Entwicklung eines Verfahrens zur Abschätzung der Phasenbeziehung zwischen Schwingungen. | 42 |
| 4.4.1 Anforderungen an eine Methode zur Untersuchung der Phasenbeziehung | 42 |
| 4.4.2 Das Konzept der Phasendifferenzspektren und ihre Berechnung | 43 |
| 4.4.3 Gestaltung der Probekörper | 46 |
| 4.5 Abschätzung der Phasenbeziehung in numerisch generierten Zeitsignalen über das Verfahren der APDS an einem kongruenten Messpunkt | 47 |
| 4.5.1 Modellierung und Berechnung der Dispersionsrelation | 48 |
| 4.5.2 Auswahl der Anregungsfrequenzen und Messpunkte | 48 |
| 4.5.3 Einteilung der Zeitsignale in Signalgruppen an Messpunkt 1 | 50 |
| 4.5.4 Bestimmung der APDS-CWT an Messpunkt 1 | 52 |
| 4.5.5 Bestimmung der APDS-STFT an Messpunkt 1 | 54 |
| 4.5.6 Vergleich der APDS-Verfahren und Betrachtung der zeitlichen Übereinstimmung | 56 |
| 4.6 Abschätzung der Dispersion über Auswertung der Zeitsignalverläufe unter Variation der Messpunktpositionen | 56 |
| 4.6.1 Vorüberlegungen zur Untersuchung des dispersiven Verhaltens | 57 |
| 4.6.2 Erfassen der Wellenpaketbreite an den verschiedenen Messpunkten als Maß für die Dispersion im Zeitbereich | 58 |
| 4.6.3 Vergleich der Spektrenbreite der APDS zwischen den Messpunkten | 59 |
| 4.6.4 Bewertung der Dispersion bzw. zeitlichen Ausdehnung | 60 |
| 4.6.5 Diskussion der Ergebnisse | 61 |
| 4.7 Untersuchung des Einflusses des Metall-Volumen-Gehalts auf die Schwingungsphasenbeziehungen in einem Stahl-CFK-Laminat | 62 |
| 4.7.1 Aufbau des Probekörpers | 62 |
| 4.7.2 Anforderungen der experimentellen Untersuchung | 63 |
| 4.7.3 Aufbau und Durchführung des Experiments | 64 |
| 4.7.4 Betrachtung der gewonnenen Zeitsignale | 66 |

| | | |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.7.5 | Vorüberlegungen zu den erwarteten APDS aus den gewonnenen Zeitsignalen | 70 |
| 4.7.6 | Auswertung der aus den gemessenen Zeitverläufen gewonnenen APDS-CWT und APDS-STFT | 72 |
| 4.7.7 | Schlussfolgerung aus der Untersuchung des Stahl-CFK-Laminates | 74 |
| 4.8 | Diskussion und Schlussfolgerung | 74 |
| 4.8.1 | Phasenwinkellinien bei Phasenwinkeldifferenzen ungleich Null oder π | 75 |
| 4.8.2 | Einfluss der Modenwellenlängen auf die Auswertung von Phasendifferenzen. | 76 |
| 4.9 | Fazit und Motivation für das Folgeexperiment | 77 |
| 5 | Ein erster Blick ins Innere | 79 |
| 5.1 | Aktueller Stand der Forschung | 79 |
| 5.1.1 | Sensorkonzepte zur Erfassung geführter Ultraschallwellen im Strukturinneren | 79 |
| 5.1.2 | PVDF-basierte Sensoren als Alternative zur Detektion von geführten Ultraschallwellen | 81 |
| 5.2 | Motivation für das Experiment und Beschreibung des Forschungsdefizits | 84 |
| 5.3 | Forschungs- und Arbeitshypothesen | 85 |
| 5.4 | Betrachtung der Struktur-Sensor-Interaktion und Erfassen von relevanten Einflussgrößen auf das Sensorverhalten | 86 |
| 5.4.1 | Auswahl eines Sensormodells für eigene Experimente und Bestimmung der Eckfrequenz | 86 |
| 5.4.2 | Modellierung des Sensorverhaltens unter der Ausbreitung geführter Ultraschallwellen. | 88 |
| 5.4.3 | Geometrische und experimentelle Einflüsse auf die erfassten Sensorsignale | 93 |
| 5.4.4 | Formulierung von Anforderungen für die Auslegung eines Probekörpers | 96 |
| 5.5 | Faserverbund-Metall-Laminat mit integrierten PVDF-Foliensensoren | 97 |
| 5.5.1 | Aufbau des Probekörpers und Fertigung | 97 |
| 5.5.2 | Anbindung der Sensoren im Epoxidharz und erwartbare Rückwirkung auf die Ausbreitung geführter Ultraschallwellen durch die Sensorintegration | 100 |
| 5.6 | Experimentelle Untersuchung der Ultraschallwellenausbreitung. | 102 |
| 5.6.1 | Auslegung des Experiments. | 102 |
| 5.6.2 | Messaufbau und Versuchsdurchführung | 103 |
| 5.7 | Auswertung | 105 |
| 5.7.1 | Beschreibung der Zeitsignale. | 105 |

| | | |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.7.2 | Identifikation der Ausbreitungsgeschwindigkeiten und Modenidentifikation | 107 |
| 5.7.3 | Abschätzung des Verschiebungsfeldverlaufes über den Vergleich der Sensorsignale entlang der Laminatdicke | 108 |
| 5.8 | Interpretation und Diskussion der Ergebnisse | 112 |
| 5.8.1 | Diskussion über die Interpretierbarkeit und Verwendbarkeit der erfassten Messsignale | 112 |
| 5.9 | Zusammenfassung der Ergebnisse und Vorausblick auf das Folgeexperiment | 114 |
| 6 | Identifikation von Schadenscharakteristika in Abhängigkeit von der relativen Höhenlage in Faser-Metall-Laminaten | 117 |
| 6.1 | Aktueller Stand der Forschung | 117 |
| 6.1.1 | Grenzflächenschäden und Delaminationen in FML | 117 |
| 6.1.2 | Forschungsdefizit und Motivation für eigene experimentelle Untersuchungen | 126 |
| 6.2 | Forschungs- und Arbeitshypothesen | 127 |
| 6.3 | Auslegung und Fertigung der Probekörper | 129 |
| 6.3.1 | Verwendete Materialien | 130 |
| 6.3.2 | Auslegung der Probekörper bezüglich Größe, Lagenaufbau sowie Positionierung von Sensor und Schaden in der Ebene | 132 |
| 6.3.3 | Auslegung der Probekörper und Positionierung von Sensor und Schaden entlang der Laminatdicke | 133 |
| 6.4 | Modellierung des Gesamtlaminates und Bestimmung der Dispersionsrelationen. | 134 |
| 6.4.1 | Materialparameter und Berechnung der Dispersionsrelation | 135 |
| 6.4.2 | Modellierung des ungeschädigten Referenzlaminates | 135 |
| 6.4.3 | Die Wahl der Delaminationsgröße | 137 |
| 6.4.4 | Bestimmung der Dispersionsrelation für die entstehenden Teillamine | 137 |
| 6.4.5 | Fertigung der Laminate und Überprüfen der Anbindung innerhalb der Laminate | 140 |
| 6.5 | Experimentelle Durchführung | 142 |
| 6.5.1 | Beschreibung des Messpfades und der strukturellen Anregung. | 143 |
| 6.5.2 | Messplan für die Vergleichsmessungen über das Laser-Doppler-Vibrometer | 144 |
| 6.5.3 | Messplan für die Untersuchung der Laminate über die integrierten PVDF-Foliensensoren. | 145 |
| 6.6 | Beschreibung der unterschiedlichen Schadensinteraktionen in den Probekörpern über LDV-Messungen entlang des Messpfades | 146 |

| | | |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.6.1 | Erzeugung von B-Scans zur Darstellung der Wellenausbreitung | 147 |
| 6.6.2 | Variation der Amplitudenauflösung in den B-Scans über die Definition einer Grobdarstellung und Feindarstellung | 147 |
| 6.6.3 | Erfassung der Fundamentalmoden der ungestörten Wellenausbreitung im Referenzprobekörper (Probekörper 1) | 148 |
| 6.6.4 | Beobachtung der Welleninteraktionen verursacht durch die mittensymmetrische Delamination (Probekörper 2) | 150 |
| 6.6.5 | Beobachtung der Welleninteraktionen verursacht durch die außermittige Delamination an der Grenzfläche zwischen Metall und Faserverbundkunststoff (Probekörper 3) | 153 |
| 6.6.6 | Bedeutende Eigenschaften der Modenkonversionen und Reflexionen für Messungen über einen integrierten PVDF-Foliensensor | 155 |
| 6.7 | Ausgewählte Signalverarbeitungsverfahren und Bewertung ihrer Eignung hinsichtlich der Identifikation der Schadensinformation aus den PVDF-Sensorzeitsignalen | 159 |
| 6.7.1 | Schrittweise Zeitsignalanalyse der PVDF-Foliensensorsignale | 160 |
| 6.7.2 | Modenidentifikation über die Betrachtung der Signalmaxima und der Time-of-Flight der Wellenpakete (I) | 161 |
| 6.7.3 | Bewertung der Referenzsignalsubtraktion als Maß für das Verhältnis von schadensfreier Struktur zu den Laminaten mit integrierter Delamination (II) | 168 |
| 6.7.4 | Identifikation von unbekannten Wellenpaketen in den Zeitsignalen der delaminierten Probekörper über die Betrachtung verschiedener Wellenausbreitungsszenarien (III) | 172 |
| 6.7.5 | Betrachtung der Energieverteilung in den Zeitsignalen über die Amplitudenverhältnisse (IV) | 178 |
| 6.8 | Diskussion der Verfahren und Ergebnisse | 181 |
| 6.8.1 | Bewertung des Probekörperaufbaus und der strukturellen Anregung hinsichtlich der Vergleichbarkeit | 181 |
| 6.8.2 | Amplituden der konvertierten Moden bei Delaminationsaustritt und ihr Nutzen für die Schadenscharakterisierung in FML | 182 |
| 6.8.3 | Die Amplitudenhöhe der über die PVDF-Foliensensoren erfassten Wellenpakete als Schadensindiz | 183 |
| 6.8.4 | Qualitative Abschätzung der Wellenpakete über die aus Einhüllenden bestimmte ToF | 183 |

| | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.8.5 | Betrachtung der Referenzsignaldifferenz für den präsentierten Anwendungsfall | 184 |
| 6.8.6 | Fertigungsbedingte Fehlerquellen und Begrenzung der Komplexität der Probekörper. | 184 |
| 6.9 | Zusammenfassung der Ergebnisse und Fazit. | 186 |
| 7 | Zusammenfassung der Forschungsergebnisse | 189 |
| 7.1 | Ausblick und weiterführendes Forschungsinteresse | 192 |
| Anhang A: Die Beziehung der Schwingungsphasen auf Faser-Metall-Laminaten | | 195 |
| Anhang B: Ein erster Blick ins Innere | | 205 |
| Anhang C: Identifikation von Schadenscharakteristika in Abhängigkeit von der relativen Höhenlage im FML | | 207 |
| Theoretische Zusammenhänge | | 219 |
| Literatur. | | 223 |