

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	Continuous 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 Lamine und Überprüfen der Anbindung innerhalb der Lamine	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 Lamine 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