
Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VI
Abkürzungen und Symbole	XIV
1 Einführung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Stand der Wissenschaft	2
1.3 Ziel und Inhalte der Arbeit	5
2 Grundlagen	7
2.1 LAMB-Wellen	7
2.1.1 Grundlagen der Wellenausbreitung	7
2.1.2 Grundlagen der LAMB-Wellen	9
2.1.3 Ausbreitungsverhalten von LAMB-Wellen in realen Medien	13
2.1.4 Anwendungsmöglichkeiten in SHM und NDT	16
2.1.5 Weitere Wellentypen in Platten	18
2.2 Piezoelektrische Sensoren und Aktoren	18
2.2.1 Der piezoelektrische Effekt	19
2.2.2 Materialien und Geometrien	20
2.2.3 Kopplung von Sensoren/Aktoren und Struktur	21
2.3 Signalverarbeitung	22
2.3.1 Fourier-Transformationen	22
2.3.2 Wavelet-Transformationen	25
2.3.3 Beschränkungen der Signalanalyse im Zeit-Frequenz-Bereich	28
2.3.4 Hilbert-Transformation	29
2.3.5 Korrelationsverfahren	31
2.3.6 Das Time-Reversal Verfahren	32
2.3.7 Verfahren der Rauschunterdrückung	33

3	Modellierung des Ausbreitungsverhaltens von LAMB-Wellen in viskoelastischen Medien	36
3.1	Einflussfaktoren auf das Ausbreitungsverhalten geführter Plattenwellen.....	36
3.1.1	<i>Beeinflussung des Ausbreitungsverhaltens</i>	36
3.1.2	<i>Beeinflussung des Abklingverhaltens</i>	37
3.2	Modellierung des idealen Ausbreitungs- und Abklingverhaltens	41
3.2.1	<i>Beschreibung des Ausbreitungsverhaltens</i>	41
3.2.2	<i>Dispersion</i>	42
3.2.3	<i>Materialdämpfung</i>	44
3.3	Verfahren zur Trennung der Lösungen der Wellenmoden	47
3.4	Grenzen der Modellierungsmethoden	48
3.4.1	<i>Reflexion und Modenkonversion</i>	49
3.4.2	<i>Verschmieren des Signals und Cone of Influence</i>	49
3.4.3	<i>Grenzen der Plattentheorie</i>	50
4	Modellierung der Einflüsse von Anregungs- und Messmethode auf die Ermittlung des Ausbreitungsverhaltens	52
4.1	Anregungssignale und Dehnungen	52
4.2	Wave Tuning	53
4.3	Shear Lag.....	57
4.4	Geometrieinfluss.....	62
4.5	Piezoelektrische Umwandlung am Sensor.....	63
4.6	Softwareimplementierung.....	64
5	Entwicklung eines umfassenden Modells zur analytischen Beschreibung des Messprozesses.....	67
5.1	Zusammenfassung der Einflussgrößen	67
5.2	Integration der Modellierungsansätze.....	68
5.3	Software-Implementierung.....	70
5.4	Modellierung der Datenverarbeitung.....	71
5.5	Vollständige Benutzeroberfläche.....	73
5.6	Abweichungen zu experimentellen Messungen	76
5.7	Resultate und Anwendungsmöglichkeiten des Vorhersageprogramms	80
6	Modellverifikation mittels experimenteller Untersuchungen.....	82

6.1	Material und Sensorik.....	82
6.2	Versuchsaufbau.....	83
6.3	Messung und Datenverarbeitung.....	84
6.3.1	<i>Automatisierung des Messvorgangs.....</i>	<i>85</i>
6.3.2	<i>Verbesserung der Signalqualität - Rauschgestützte Auflösungs- erhöhung.....</i>	<i>85</i>
6.3.3	<i>Bestimmung der Kennwerte der Sensorantwort</i>	<i>91</i>
6.3.4	<i>Automatisierte Datenauswertung.....</i>	<i>92</i>
6.4	Grenzen der experimentellen Messung mit einem oberflächenapplizierten ... SHM-System auf Piezobasis	93
6.5	Ergebnisse des Modells.....	97
6.6	Vergleich mit experimentellen Ergebnissen und Diskussion	99
7	Experimentelle Untersuchung der Auswirkung von Umgebungseinflüssen auf das Ausbreitungsverhalten von LAMB-Wellen in Faserverbundmaterialien	103
7.1	Temperatur.....	103
7.2	Feuchteaufnahme	107
7.3	Statische und dynamische Belastungen.....	115
7.3.1	<i>Auswirkungen von quasistatischer Belastung</i>	<i>116</i>
7.3.2	<i>Auswirkungen kombinierter quasistatischer und zyklischer Lasten</i>	<i>120</i>
7.4	Experimentelle Bestimmung der Änderung der viskoelastischen Materialeigenschaften	122
8	Berücksichtigung von Umgebungseinflüssen bei der in-situ-Strukturüberwachung	124
8.1	Analytische Vorhersage.....	124
8.1.1	<i>Methodische Vorgehensweise.....</i>	<i>125</i>
8.1.2	<i>Beispiel: Feuchteinfluss auf das frequenzabhängige Verhalten von LAMB-Wellen</i>	<i>125</i>
8.1.3	<i>Systembedingte Grenzen analytischer Vorhersagemöglichkeiten</i>	<i>128</i>
8.2	Aktive Systeme: Erweiterte Baseline-Verfahren.....	130
8.2.1	<i>OBS und BSS</i>	<i>131</i>
8.2.2	<i>Ähnlichkeitsbasiertes Baselineverfahren.....</i>	<i>133</i>
8.2.3	<i>Experimentelle Verifikation am Beispiel einfacher Platten.....</i>	<i>141</i>
8.2.4	<i>Eignung des Verfahrens zur Überwachung einer versteiften Platte</i>	<i>142</i>
8.3	Passive Systeme: Impaktrekonstruktion.....	145

8.3.1	<i>Prinzip der Rekonstruktion der Impaktkraft</i>	147
8.3.2	<i>Bestimmung der veränderlichen Parameter</i>	149
8.3.3	<i>Umsetzung der Kraftrekonstruktion mit Kompensation der Änderungen der viskoelastischen Kennwerte</i>	151
8.3.4	<i>Experimentelle Verifikation</i>	153
9	SHM mit LAMB-Wellen für reale Strukturen und Bedingungen - Einschränkungen und Lösungsansätze	159
9.1	Schadenslokalisierung und Quantifizierung	159
9.2	Verfahren zur Dateninterpretation	160
9.3	Grenzen der Verfahren und Kompensationsmethoden	165
9.4	Ansätze für das SHM mit LAMB-Wellen in realen, komplexen und anisotropen FVK-Strukturen	168
10	Zusammenfassung und Ausblick	170
10.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	170
10.2	Empfohlene zukünftige Arbeitsfelder	172
	Quellenverzeichnis	174
	Appendix A	187
A 1	Modellierung der dispersiven Geschwindigkeit und Dämpfung von LAMB-Wellen mit Hilfe der höheren Laminattheorie	187
A 1.1	<i>Verschiebungsansätze der höheren Laminattheorie</i>	187
A 1.2	<i>Berechnung der Dispersionskurven</i>	188
A 2	Viskoelastische Charakterisierung transversal isotroper Materialien in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchtigkeitsgehalt	198
	Appendix B	200
	Appendix C	201