

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziel der Arbeit und Übersicht.....	3
2 Ultraschallprüfung von Faserverbundwerkstoffen.....	6
2.1 Faserverbundwerkstoffe	6
2.1.1 Aufbau und Herstellungsverfahren von Faserverbundwerkstoffen	6
2.1.2 Materialverhalten isotroper, transversal-isotroper und orthotroper Medien.....	11
2.1.3 Fehlstellen.....	15
2.2 Grundlagen der Ultraschallprüfung	19
2.2.1 Wellenausbreitung in Festkörpern.....	19
2.2.2 Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung mit Ultraschall	23
2.2.2.1 Impuls-Echo-Verfahren.....	23
2.2.2.2 Transmissionsverfahren	27
2.2.2.3 Der (getaktete) Gruppenstrahler.....	27
2.2.2.4 Acousto-Ultraschall	27
2.2.3 Signalerzeugung und -verarbeitung.....	28
2.3 Ultraschallprüfung poröser Faserverbundwerkstoffe	32
3 Werkstoffmodellierung	34
3.1 Modellierungsebenen.....	34
3.2 Mischungsregeln für Verbundwerkstoffe	36
3.3 Komponenten des <i>WiseTex</i> -Tools und ihre Funktionen	40
3.4 Erstellung der <i>WiseTex</i> -Modelle	40
3.5 Modellierungen in <i>MikrUSS</i>	42
4 Simulationsmethoden zur Berechnung der Wellenausbreitung im Überblick.....	44
4.1 Analytische Verfahren.....	44
4.2 Numerische Verfahren.....	45
4.3 Halbanalytische Verfahren	47
4.4 Auswahl einer Methode	48
5 Elastodynamische Finite Integrationstechnik.....	50
5.1 Einleitung	50
5.2 Grundgleichungen	50
5.3 Diskretisierung	52
5.4 Stabilität und räumliche Auflösung	57

Inhaltsverzeichnis

5.5 Rand- und Übergangsbedingungen	58
5.5.1 Spannungsfreie Randbedingungen	58
5.5.2 Periodische Randbedingungen (Randbedingung ebener Wellen)	59
5.5.3 Randbedingungen für Materialübergänge	60
5.6 3D-EFIT-Implementierung mit C++	62
5.6.1 Parallelisierung	63
5.6.2 Datenauswertung	65
6 Validierung des entwickelten Simulationsprogramms.....	66
6.1 Isotropes homogenes Modell: Reflexion an der schiefen Ebene ..	66
6.2 Isotropes heterogenes Modell: Einzelstreuprobleme	68
6.3 Heterogenes Mikrostrukturmodell: Validierung mittels experimentellem Vergleichs	72
6.3.1 Fertigung einer Gewebeplatte.....	72
6.3.2 Experimentelle Ultraschallprüfung der Gewebeplatte	76
6.3.3 Modellestellung der heterogenen anisotropen Platte	77
6.3.4 Akustische Eigenschaften des Epoxyharzes	78
6.3.5 Simulation der Ultraschallwellenausbreitung in der heterogenen anisotropen Platte	80
6.3.6 Vergleich der Ergebnisse.....	81
6.4 Ergebnis der Validierung.....	82
7 Untersuchung der Mikrostruktur.....	84
7.1 Signale	84
7.2 Vergleich mit einem Modell mit homogenisierten Lagen.....	84
7.3 Einfluss der Stapelung	87
8 Einfluss der Porosität auf die Gewebeeigenschaften	89
8.1 Werkstoffe	90
8.2 Generierung der Gewebemodelle	97
8.3 Bearbeitung der Modelle und Modellierung der Poren mit FEM..	98
8.4 FE-Simulationen zur Bestimmung der mechanischen Kennwerte.....	104
8.5 Ultraschallsimulationen in porösem Gewebe	110
8.6 Verknüpfung der Ergebnisse	116
9 Zusammenfassung und Ausblick	119
Publikationen.....	122
Literatur	123
Tabellenverzeichnis	135

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	136
Anhang	141
A.1 Koordinatensysteme und Koordinatentransformation	141
A.2 Vergleich verschiedener Homogenisierungsansätze	145
A.3 Mittelung der Pseudokomponenten	149
Lebenslauf	150