

## 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

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: Einzelstreu Probleme .....	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	Modellerstellung der heterogenen anisotropen Platte .....	77
6.3.4	Akustische Eigenschaften des Epoxydharzes .....	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

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