

Inhalt

Symbolverzeichnis	v
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	3
2.1 Sandwichverbundbauweise	3
2.1.1 Faserverbundlamine für Sandwichanwendungen	4
2.1.2 Arten und Formen von Sandwichkernen	6
2.1.3 Herstellung von Sandwichstrukturen	8
2.1.4 Versagensmodi von Sandwichverbunden	9
2.2 Auslegungsphilosophien für Sandwichverbunde in der Luftfahrt	10
2.3 Methoden der Schadensdetektion	11
2.4 Anwendung numerischer Verfahren	12
2.4.1 Finite-Elemente-Methoden für dynamische Prozesse	13
2.4.2 Materialmodell für papierartige Werkstoffe	14
2.4.3 Vorschriften und Normen	16
2.4.4 Luftfahrtrelevante Strukturbelastungsszenarien	18
2.4.5 Delaminationsmoden	19
3 Stand der Forschung	21
3.1 Luftfahrtanwendungen von Sandwichstrukturen	21
3.2 Methoden zur Abbildung des mechanischen Verhaltens der Sandwichstrukturbe- standteile	22
3.2.1 Modellierungsansätze von Sandwichstrukturen	22
3.2.2 Papierartige Sandwichkernmaterialien	24
3.2.3 Idealisierungsansätze von Sandwichimperfektionen	25
3.2.4 Deckschichtlamine	26
3.3 Methoden zur Vorhersage des Schlagschädigungs- und Resttragverhaltens	27
3.3.1 Experimentelle Untersuchung	28
3.3.2 Analytische Methoden	30
3.3.3 Numerische Untersuchung	31
3.3.4 Methoden zur Charakterisierung von Materialparametern	33
3.4 Einfluss statischer Vorlasten auf das Schlagschädigungsverhalten	34
3.4.1 Untersuchung von Faserverbundlamine	34
3.4.2 Untersuchung von Sandwichstrukturen	36

i

3.4.3 Fazit der Literaturrecherche	40
3.4.4 Ableitung der Untersuchungsschwerpunkte	41
3.4.5 Ablauf der Untersuchungen	42
4 Experimentelle Untersuchung des Schlagschädigungsverhaltens von Sandwichstrukturen unter Berücksichtigung struktureller Vorlasten	45
4.1 Bestimmung der Materialeigenschaften der Sandwichstrukturbestandteile	47
4.1.1 Zellwandmaterial	47
4.1.2 Untersuchung der Herstellung von Harzschichten zur Materialcharakterisierung	55
4.1.3 Deckschichtmaterial	59
4.1.4 Honigwabenkernstruktur	68
4.1.5 Kern-Deckschicht-Anbindung	77
4.2 Imperfektionen diskret stützender Sandwichstrukturen	79
4.2.1 Systematisierung von Imperfektionen	79
4.2.2 Vermessung der Honigwabenzellgeometrie	81
4.2.3 Quantifizierung von Strukturimperfektionen	82
4.3 Schlagschädigungsversuche unter Druckvorlast stehender Sandwichstrukturen	88
4.3.1 Probenvorbereitung	88
4.3.2 Grundaufbau der Vorbelastungsvorrichtung	89
4.3.3 Prüfaufbau	90
4.3.4 Versuchsdurchführung	92
4.3.5 Methoden zur Untersuchung der Strukturschäden	93
4.3.6 Auswertung druckvorbelasteter Schlagversuche	95
4.3.7 Schlagschadenanalyse	102
4.4 Versuche zur Bestimmung des Trag- und Resttragvermögens vorbelasteter Sandwichstrukturen	107
4.4.1 Prüfaufbau Druckbelastung nach Schlagschaden	107
4.4.2 Versuchsdurchführung	108
4.4.3 Versuchsauswertung	108
5 Simulation des Schlagschädigungs- und Tragverhaltens von Sandwichstrukturen unter Berücksichtigung struktureller Vorlasten	111
5.1 Simulationsmodellentwicklung	111
5.1.1 Berücksichtigung von Imperfektionen im Simulationsmodell	113
5.1.2 Modellentwicklung für Schlagschädigungssimulation unter Druckvorlasten .	115
5.1.3 Modellentwicklung für die Bestimmung des Trag- und Resttragvermögens .	117
5.2 Simulationen zur Abbildung der mechanischen Eigenschaften der Sandwichbestandteile	118
5.2.1 Nachrechnung der Versuche an Honigwabenzellwandmaterial	118
5.2.2 Nachrechnung der Phenolharzeigenschaften der Zellwabenecken	120
5.2.3 Nachrechnung der Deckschichtversuche	121

5.2.4	Untersuchung des Einflusses von Imperfektionen auf die mechanischen Eigenschaften von Honigwabenkernen	133
5.2.5	Nachrechnung der Honigwabenkernversuche	135
5.3	Schlagschädigungssimulation	140
5.3.1	Entwicklung eines mehrstufigen Simulationsansatzes	140
5.3.2	Schlagschädigungssimulation druckvorbelasteter Sandwichstrukturen	143
5.3.3	Vergleich der simulierten Schlagschäden mit den Versuchsergebnissen . . .	151
5.3.4	Simulation des Trag- und Resttragverhaltens von Sandwichstrukturen . . .	155
5.3.5	Entwicklung einer Methodik zur Schadensapproximation im Hinblick auf die Bestimmung des Resttragverhaltens von Sandwichstrukturen	160
6	Zusammenfassung und Ausblick	167
Literaturverzeichnis		171
Abbildungsverzeichnis		189
Tabellenverzeichnis		197
Anhang		199
A	Detektierte Schlagschädigungen an Deckschichtlaminaten	199
B	Quantifizierung von Imperfektionen an Honigwaben-Sandwichstrukturen	202
B.1	Mikroskopiebilder der Honigwabenzellquerschnitte	203
B.2	Quantifizierung der Schrägstellung der Wabenzellwände	204
C	Simulationsergebnisse der Schlagschädigung an Deckschichtlaminaten	205
D	Simulationsergebnisse der Schlagschädigung von Sandwichstrukturen unter statischer Druckvorlast	209
E	Relative Abweichungen der Simulationsergebnisse zu den im Versuch gemessenen Schlagschädigungsparametern an Sandwichstrukturen unter statischen Druckvorauslasten	225
F	Auswertung der in der Simulation bestimmten Schlagschäden an druckvorbelasteten Honigwaben-Sandwichstrukturen	231
G	Vergleich der mittels Ultraschall gemessenen Kern- und Deckschichtschäden mit den Simulationsergebnissen an vorbelasteten Sandwichstrukturen	247