

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	1
1 Einleitung	6
1.1 Hintergrund und Motivation	6
1.2 Zielstellung und Vorgehensweise	8
2 Sandwich-Strukturen	11
2.1 Sandwich-Bauweise	11
2.2 Versagensarten von Sandwich-Strukturen	15
2.3 Schädigung von Sandwich-Strukturen durch Schlagbelastungen	17
2.3.1 Klassifizierung von Schlagbelastungen	17
2.3.2 Schädigungsmechanismen	18
2.4 Schadenstoleranz	20
2.5 Methoden zur Schädigungsvorhersage schlagbelasteter Sandwich-Strukturen	22
2.5.1 Analytische Methoden	22
2.5.2 Methoden basierend auf Schalentheorien für den Gesamt-Sandwich	23
2.5.3 Methoden basierend auf numerischen Simulationsmodellen mit detailliert diskretisiertem Sandwich-Aufbau in Dickenrichtung . .	24
2.6 Anmerkungen zur Lösung nichtlinearer hochdynamischer Probleme der Strukturmechanik	26
3 Honigwabenkerne	28
3.1 Einführung	28
3.2 Nomex®-Honigwabenkern	30
3.2.1 Nomex®-Papier	30
3.2.1.1 Fasermaterial	30
3.2.1.2 Herstellung von Nomex®-Papier	30
3.2.1.3 Einfluss des Herstellungsprozesses auf die mechanischen Eigenschaften von Papieren	32
3.2.1.4 Eigenschaften und Anwendung	34
3.2.2 Phenolharz	34
3.2.3 Charakterisierung der Nomex®-Honigwabenkerne	36
3.2.3.1 Herstellung	36
3.2.3.2 Struktureller Aufbau	36
3.3 Erkenntnisse und Anforderungen an die numerische Modellierung	38
4 Mechanische Eigenschaften der Zellwandmaterialien	40
4.1 Einführung	40

4.2	Vorgehensweise zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften	44
4.3	Probenmaterial und Prüfprogramm	45
4.3.1	Charakterisierung des Probenmaterials	45
4.3.2	Bestimmung der Dicken des Probenmaterials	46
4.3.3	Probenherstellung	49
4.3.4	Prüfprogramm	50
4.4	Zugbelastung	51
4.4.1	Prüfaufbauten	51
4.4.1.1	L&W Tensile & Fracture Toughness Tester SE 064	51
4.4.1.2	Universalprüfmaschine	51
4.4.2	Auswertung	53
4.4.2.1	Spannungs-Dehnungs-Verlauf, Bruchspannung, Bruchdehnung	53
4.4.2.2	Elastizitätsmodul	53
4.4.2.3	Querkontraktionszahl	54
4.4.3	Ergebnisse	56
4.4.3.1	Unbeschichtetes Papier - einfach statisch belastet	56
4.4.3.2	Beschichtetes Papier - einfach statisch belastet	57
4.4.3.3	Materialkennwerte der Papiere	58
4.4.3.4	Einfluss der Orthotropie	60
4.4.3.5	Unbeschichtetes Papier - wiederholt be- und entlastet	60
4.4.3.6	Unbeschichtetes Papier - Einfluss der Verklebung	61
4.5	Druckbelastung einlagiger Proben	63
4.5.1	Prüfaufbau	63
4.5.2	Auswertung	65
4.5.3	Ergebnisse	65
4.5.3.1	Unbeschichtete Papiere	65
4.5.3.2	Beschichtete Papiere	68
4.6	Sequentielle Druck-/Zugbelastung mehrlagiger Proben	71
4.6.1	Prüfaufbau	71
4.6.2	Ergebnisse	72
4.7	Druckbelastung mehrlagiger Proben	73
4.7.1	Prüfaufbau	73
4.7.2	Auswertung	74
4.7.3	Ergebnisse	74
4.7.3.1	Unbeschichtete Papiere - einfach statisch belastet	74
4.7.3.2	Beschichtete Papiere - einfach statisch belastet	75
4.7.3.3	Unbeschichtetes Papier - wiederholt be- und entlastet	76
4.8	Schubbelastung	77
4.8.1	Prüfaufbau	79
4.8.2	Auswertung	80
4.8.3	Ergebnisse	83
4.8.3.1	Unbeschichtete Papiere - einfach statisch belastet	83
4.8.3.2	Beschichtete Papiere - einfach statisch belastet	84
4.8.3.3	Materialkennwerte der Papiere	85

4.8.3.4	Unbeschichtetes Papier - wiederholt be- und entlastet	86
4.9	Systematisierung der Ergebnisse der experimentellen Papieruntersuchungen	87
4.9.1	Eigenschaften der unbeschichteten Nomex®-Papiere	87
4.9.2	Eigenschaften des Phenolharzes	87
5	Numerische Simulation des mechanischen Verhaltens des Zellwandmaterials	92
5.1	Idealisierungsansätze	92
5.2	Modellbildung	93
5.2.1	Grundlegende Annahmen	93
5.2.2	Materialmodelle	93
5.2.3	Elementformulierungen	95
5.2.4	Idealisierung von Versuchsrandbedingungen	95
5.2.4.1	Zugbelastung	95
5.2.4.2	Druckbelastung	96
5.2.4.3	Schubbelastung	96
5.3	Modellkalibrierung	97
5.3.1	Kalibrierung des Materialmodells für die Nomex®-Papiere	97
5.3.1.1	Zugbelastung	97
5.3.1.2	Druckbelastung	99
5.3.1.3	Schubbelastung	101
5.3.2	Kalibrierung des Materialmodells der Phenolharzschichten	102
5.3.2.1	Zugbelastung	103
5.3.2.2	Druckbelastung	105
5.3.2.3	Schubbelastung	106
6	Mechanische Eigenschaften von Nomex®-Honigwabenkernen	109
6.1	Probenmaterial und Prüfprogramm	110
6.2	Zugbelastung in T-Richtung	111
6.2.1	Prüfaufbau	111
6.2.2	Auswertung	112
6.2.3	Ergebnisse	112
6.3	Druckbelastung in T-Richtung	116
6.3.1	Prüfaufbau	116
6.3.2	Auswertung	117
6.3.3	Ergebnisse	118
6.3.3.1	Grundlegendes Verhalten	118
6.3.3.2	Einfluss der Luft in der HC-Zelle	122
6.4	Schubbelastung in der TL- und TW-Ebene	123
6.4.1	Prüfaufbau	123
6.4.2	Auswertung	124
6.4.3	Ergebnisse	124
6.4.3.1	Grundlegendes Verhalten	124
6.4.3.2	Einfluss der Luft in der HC-Zelle	126
6.5	Crush Belastung in T-Richtung	127
6.5.1	Prüfaufbau	127

6.5.2	Auswertung	128
6.5.3	Ergebnisse	128
7	Numerische Simulation des Versagens von Nomex®-Honigwaben	130
7.1	Modellbildung	130
7.1.1	Charakterisierung realer Honigwabenstrukturen	130
7.1.2	Grundlegende Annahmen, Materialmodelle und Elementformulierungen	132
7.1.3	Problematik der Dehnratenabhängigkeit	132
7.1.4	Idealisierung	133
7.1.4.1	Honigwabenkern	133
7.1.4.2	Zugbelastung	134
7.1.4.3	Druckbelastung	135
7.1.4.4	Schubbelastung	135
7.1.4.5	Crush-Belastung	135
7.2	Modellvalidierung	136
7.2.1	FE-Modell des Wabenkerns	136
7.2.2	Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit	137
7.2.3	Einfluss von Vorverformungen der Wabenwände	138
7.2.4	Validierung unter Zugbelastung	138
7.2.5	Validierung unter Druckbelastung	140
7.2.6	Validierung unter Schubbelastung	140
7.2.7	Validierung unter Crush-Belastung	144
8	Anwendung: Simulation von Schlagvorgängen auf Honigwaben-Sandwich-Strukturen	146
8.1	Simulationsmodell	147
8.1.1	Sandwich-Struktur	147
8.1.2	Schlagbelastung	149
8.2	Simulationsergebnisse	151
8.2.1	Belastung mit 2J Schlagenergie	151
8.2.2	Belastung mit 15J Schlagenergie	153
9	Zusammenfassung und Ausblick	155
	Literaturverzeichnis	158
A	Existierende Materialdaten	191
B	Ergebnisse der experimentellen Papieruntersuchungen	196
B.1	Spannungs-Dehnungs-Verläufe zugbelasteter unbeschichteter Nomex®-Papiere	197
B.2	Spannungs-Dehnungs-Verläufe zugbelasteter beschichteter Nomex®-Papiere	202
B.3	Elastizitätsmoduln zugbelasteter Papiere	208
B.4	Querkontraktionszahlen zugbelasteter Nomex®-Papiere	210

B.5	Verhalten von Nomex®-Papieren bei wiederholter Be- und Entlastung im Zugversuch	215
B.6	Versagensspannungen druckbelasteter Nomex®-Papiere	217
B.7	Schubspannungs-Schubverformungs-Verläufe untersuchter Nomex®-Papiere	220
B.8	Schubmoduln untersuchter Nomex®-Papiere	224
C	Berechnungen zum Einflusses der Probenkrümmung auf die Querkontraktionszahlen	225
D	Ergebnisse der Materialmodellkalibrierung	227
D.1	Unbeschichtete Papiere	228
D.1.1	Zugbelastung	228
D.1.2	Druckbelastung	229
D.1.3	Schubbelastung	229
D.2	Beschichtete Papiere	232
D.2.1	Zugbelastung	232
D.2.2	Druckbelastung	233
D.2.3	Schubbelastung	233
E	Zellquerschnitte untersuchter Nomex®-Wabenkerne	234
F	Weitere Ergebnisse der Wabenmodellvalidierung	239
F.1	Einfluss der Vorbeulen auf die Simulationsergebnisse	240
G	Ergebnisse der Schlagsimulationen	242