

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungs- und Symbolverzeichnis</b>	<b>1</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>6</b>
1.1 Hintergrund und Motivation . . . . .	6
1.2 Zielstellung und Vorgehensweise . . . . .	8
<b>2 Sandwich-Strukturen</b>	<b>11</b>
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
<b>3 Honigwabenkerne</b>	<b>28</b>
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
<b>4 Mechanische Eigenschaften der Zellwandmaterialien</b>	<b>40</b>
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
<b>5</b>	<b>Numerische Simulation des mechanischen Verhaltens des Zellwandmaterials</b>	<b>92</b>
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
<b>6</b>	<b>Mechanische Eigenschaften von Nomex®-Honigwabenkernen</b>	<b>109</b>
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
<b>7</b>	<b>Numerische Simulation des Versagens von Nomex®-Honigwaben</b>	<b>130</b>
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
<b>8</b>	<b>Anwendung: Simulation von Schlagvorgängen auf Honigwaben-Sandwich-Strukturen</b>	<b>146</b>
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
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>155</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>158</b>
<b>A</b>	<b>Existierende Materialdaten</b>	<b>191</b>
<b>B</b>	<b>Ergebnisse der experimentellen Papieruntersuchungen</b>	<b>196</b>
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
<b>C Berechnungen zum Einflusses der Probenkrümmung auf die Querkontraktionszahlen</b>	<b>225</b>
<b>D Ergebnisse der Materialmodellkalibrierung</b>	<b>227</b>
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
<b>E Zellquerschnitte untersuchter Nomex®-Wabenkerne</b>	<b>234</b>
<b>F Weitere Ergebnisse der Wabenmodellvalidierung</b>	<b>239</b>
F.1 Einfluss der Vorbeulen auf die Simulationsergebnisse . . . . .	240
<b>G Ergebnisse der Schlagsimulationen</b>	<b>242</b>