Europäische Forschungsgesellschaft
für Blechverarbeitung e.V., Hannover

EFB-Forschungsbericht Nr. 479

Analyse und Simulation mechanischer Eigenschaften bei der Entwicklung adaptierter papierartiger Werkstoffe für Falt- und Honigwaben-Sandwich-Kerne

Ergebnisse eines Vorhabens der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) gefördert über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V.

AiF

aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Verfasser:

Prof. Dr. Frank Miletzky

Dipl.-Ing.(FH) Johann Strauß

Dr.-Ing. Timo Kuntzsch

Prof. Dr.-Ing. Klaus Wolf

Dr.-Ing. Falk Hähnel

Dipl.-Ing. Alexander Bugiel

Inhalt

Abbildungsverzeichnis **14**
Tabellenverzeichnis **18**
Zusammenfassung **19**
1 Einleitung **21**
1.1 Leichtbaustrukturen und ihre Anwendung 21
1.1.1 Leichtbau mit großer Anwendungsbreite 21
1.1.2 Leichtbaustrukturen im Flug-zeug- und Schienenfahrzeugbau 21
1.1.3 Kernmaterialien und deren Nachteile 21
1.1.4 Defizite und notwendige Optimierung des Kernaufbaus 22
1.1.5 Potenzial für papierbasierte Werkstoffe 22
1.1.6 Papier als konstruktiver Werkstoff 22
1.2 Papierartige Werkstoffe und ihre Herstellung 23
1.2.1 Papier, Papier-herstellung 23
1.2.2 Papierwerkstoffe durch Einsatz von Füllstoffen und Additiven 23
1.2.3 Papierwerkstoffe durch Einsatz von Kunststoff-fasern 23
1.3 Materialverhalten papierbasierter Werkstoffe 23
1.3.1 Einordnung in Materialmodelle papierbasierter Werkstoffe 23
1.3.2 Vorhandene Messmethoden 24
1.4 Hochleistungs-Sandwich-Kerne auf Basis papierartiger Werkstoffe 24
1.4.1 Diskret stützende Hochleistungs-Sandwich-Kerne auf der Basis von Papiermaterialien 24
1.4.2 Stabilitätsversagen von diskret stützenden Kernen 25
1.4.3 Schädigung und Systemversagen 25
1.4.4 Simulation von Sandwich-Kernen aus Papierwerkstoffen 25
1.4.5 Optimierung von Falt- oder Wabenkernen 26
2 Forschungsziele **27**
3 Gesamtvorgehen **28**
3.1 Übersicht 28
4 Material und Methoden **31**
4.1 Aufbereitung der Faserstoffe und Additive 31
4.1.1 Faserstoffe: 31
4.1.2 Füllkörper / Füllstoffe: 31
4.2 Grundcharakterisierung der Faserstoffe bzw. Füllkörper 31
4.2.1 Faserstoffe / Füllkörper 31
4.2.2 Messverfahren 31

4.3 Papierherstellung im Labor 32
4.3.1 Vorgehen 32
4.3.2 Rapid-Köthen-Verfahren (RK-Verfahren) 32
4.4 Papierherstellung im Technikum – Versuchspapiermaschine (VPM) 32
4.4.1 Aufbau 32
4.4.2 Blattbildung VPM - Option Lang-sieb und Schräg-sieb 33
4.5 Charakterisierung der papierartigen Werkstoffe im nichtimprägnierten Zustand 33
4.5.1 Messverfahren: 33
4.6 Analytik der papierartigen Werkstoffe im imprägnierten Zustand 33
4.6.1 Messverfahren: 33
4.7 Verfahren zur Sandwichkerncharakterisierung 34
4.7.1 Normverfahren: 34
4.7.2 Kernschubprüfung 34
4.8 Verformungsmessung mit ARAMIS 35
4.8.1 ARAMIS-System 35
4.9 Auswerteverfahren zur Bestimmung von Material- und Sandwichkernparametern 35
4.9.1 Messverfahren - Aufgenommene Messdaten 35
4.9.2 Maximale Spannung 35
4.9.3 Steifigkeit 35
4.10 Modellierung von Falt- und Honigwabenstrukturen 36
4.10.1 Das Programm SandMesh 2.1.0 36
4.10.2 Benötigte Parameter von Falt- und Honig-wabenkernen 36
4.10.3 Abbildung geometrischer Parameter 37
4.11 Explizite Simulation 37
4.11.1 Das Programmpaket LS-DYNA und LS-PrePost 37
4.11.2 Nutzung des Programmpakets 38
5 Definition von Anforderungen an den zu entwickelnden Papierwerkstoff (vgl. AP 1) 39
5.1 Vorgehen 39
5.2 Anforderungsprofil der Grundmaterialien 39
5.3 Mechanische Anforderungen 39
5.4 Literaturrecherche bezüglich der Erhöhung der Biegesteifigkeit von Kernwänden 40
5.5 Ansatz des dreilagigen adaptierten papierartigen Werkstoffes 40
5.6 Ergebnis - Materialauswahl 40
5.7 Ergebnis – Verbesserungspotenzial 40

6 Rohstoffauswahl, -beschaffung, Grundcharakterisierung und Versuchsprogramm für Laborversuche zur Materialherstellung (vgl. AP 2) 41
6.1 Überblick über die Faserstoffe für die Versuche zur Werkstoffherstellung 41
6.1.1 Ergebnisse – Auswahl der Fasern 41
6.1.2 Fasertypen - Aramid 42
6.1.3 Aramidfasern: Faser-Charakterisierung 42
6.1.4 Mineralische Fasern / Carbonfasern 42
6.1.5 Polymere Hochtemperaturfaser - Fasertypen 43
6.2 Überblick über die Füllkörper für die Versuche zur Werkstoffherstellung 43
6.3 Werkstoffherstellung - Versuchsplanung 43
6.3.1 Hintergrund 43
6.3.2 Versuchsplanung zur Entwicklung Faltkernwerkstoff 43
6.3.3 Faserstoff-Screening 44
7 Materialherstellung im Labormaßstab – einlagiger Papierwerkstoff (vgl. AP 3) 45
7.1 Vorgehen 45
7.1.1 Entwicklungs-phasen 45
7.1.2 Überblick Faser-stoff-Screening / Blattbildung 45
7.2 Faserstoffaufbereitung 45
7.2.1 Faserstoff-Dispergierung / Suspendierung 45
7.2.2 Ergebnis 46
7.3 Bindemittelsystem 46
7.3.1 Ziel 46
7.3.2 Papierwerkstoff - Einsatz Bindemittelsystem 46
7.3.3 Papierwerkstoff - Einsatz Bindemittelsystem 47
7.4 Herstellung Papierwerkstoff – Einsatz Faserstoff auf Basis Aramid 47
7.4.1 Blattbildungsversuche 47
7.4.2 Papierwerkstoff - Typ fibrillierte Aramidfasern 47
7.4.3 Papierwerkstoff - Typ fibrillierte Aramidfasern 48
7.4.4 Papierwerkstoff - Typ fibrillierte Aramidfasern 48
7.4.5 Papierwerkstoff - Aramid-Fibride in Kombination mit Aramid-Kurz-schnitt-Fasern 49
7.5 Herstellung Papierwerkstoff – Anteiliger Ersatz von Aramidfasern durch Mineral- / Carbonfasern 50
7.5.1 Abbildung der Variation Anteil Basalt-/ Carbonfasern 50
7.5.2 Variation Anteil Basalt-/ Carbon-fasern 51
7.6 Herstellung einlagiger Papierwerkstoff – Anteiliger Einsatz von speziellen Kunststofffasern (Hochtemperaturfasern) 51

7.6.1 Eigenschaften der Laborblätter bei anteiligem Einsatz von speziellen Kunststofffasern ... 52
7.6.2 Anteiliger Einsatz von speziellen Kunststofffasern (Hochtemperatur-fasern) ... 52
7.7 Blattbildungsversuche am Dynamischen Blattbildner (DBB) ... 53
7.8 Zusammenfassung der Ergebnisse ... 53
7.8.1 Faserarten und Blattbildung ... 53
7.8.2 Einsatz von Bindemittel (Phenolharz) bei der Blattbildung ... 53
8 Materialherstellung im Labormaßstab – einlagiger Papierwerkstoff mit Füllkörper (vgl. AP 4) ... 55
8.1 Herstellung einlagiger Papierwerkstoff mit Füllkörper – Einfluss Art und Anteil der Füllkörper ... 55
8.1.1 Vorgehen ... 55
8.2 Herstellung einlagiger Papierwerkstoff mit Füllkörper – Einfluss des Einsatzes von Additiven bei der Blattbildung am Beispiel von Glashohlkugeln (GK1) ... 56
8.3 Zusammenfassung der Ergebnisse ... 58
8.3.1 Fazit ... 58
9 Materialherstellung im Labormaßstab – mehrlagiger Papierwerkstoff (vgl. AP 5) ... 59
9.1 Mehrlagiger Papierwerkstoff – Variation der Materialzusammensetzung der Innenlage (unterschiedliche Füllkörper) bei konstanter Materialzusammensetzung der Decklage ... 59
9.1.1 Mehrlagiger Papierwerkstoff - Variation Materialzusammensetzung der Innenlage ... 59
9.2 Mehrlagiger Papierwerkstoff - Variation der Materialzusammensetzung (Faserstoffvariante) der Decklage in Kombination mit Innenlage mit Füllkörper ... 60
9.2.1 Mehrlagiger Papierwerkstoff - Variation Materialzusammensetzung der Decklagen ... 61
9.3 Mehrlagiger Papierwerkstoff - Ersatz Carbon-Frischfaser durch Carbon-Rezyklat-Faser in Decklage und Innenlage ... 61
9.3.1 Mehrlagiger Papierwerkstoff - Vergleich Carbon-Frisch-faser / Carbon-Rezyklat-Faser ... 62
9.4 Ergänzende Laborversuche als Vorbereitung zur kontinuierlichen Papierherstellung - Anpassung der Rezeptur auf Basis der ersten VPM-Versuche ... 62
9.4.1 Mehrlagiger Papierwerkstoff - Ersatz Aramid-Kurzschnitt-Faser in der Aramid-Faser-Komponente ... 63
9.5 Zusammenfassung und Fazit ... 63
10 Übertragung der Materialherstellung (Papierwerkstoff) von Labor auf kontinuierliche Fertigung auf der Versuchspapiermaschine (vgl. AP 6) ... 65
10.1 Vorgehen - Versuchsansätze ... 65
10.2 Herstellung einlagiger Papierwerkstoff ohne / mit Füllkörper mittels Langsiebfahrweise ... 65

10.2.1 Versuchsansatz I 65
10.2.2 Ergebnisse Versuchsansatz II 66
10.2.3 Ergebnisse Versuchspapiermaschine - Einlagig ohne Füllkörper 66
10.2.4 Ergebnisse Versuchspapiermaschine - Einlagig mit Füllkörper 67
10.3 Mehrlagige Herstellung – 3-schichtiger Papierwerkstoff mittels Schrägsiebfahrweise 67
10.4 Mehrlagige Herstellung - Herstellung 3-lagiger Papierwerkstoff mittels Langsiebfahrweise 68
10.5 Mehrlagige Herstellung - Alternative Vorgehensweise zur Herstellung des 3-lagigen Papierwerkstoffs: Verklebung der einzelnen Lagen 68
10.5.1 Ergebnisse Screening Kleb-stoffe / Auftragssystem 68
10.5.2 Mehrlagiger Werkstoff – Vergleich Lagen vergautscht (Labor) mit Lagen verklebt (VPM) 69
10.5.3 Mehrlagiger Werkstoff – Vergleich Lagen vergautscht (Labor) mit Lagen verklebt (VPM) 69
11 Methodik zur Prüfung der mechanischen Eigenschaften der Papierwerkstoffe (vgl. AP 7) 71
11.1 Entwicklung, Herstellung einer Vorrichtung für Schubprüfung in der Papierfläche (vgl. AP 7.1) 71
11.1.1 Literaturrecherche und Auswertung des bisherigen Schubrahmens 71
11.1.2 Ableitung und Entwicklung eines neuen Schubrahmens 72
11.2 Entwicklung, Herstellung einer Vorrichtung für Druckprüfung in der Papierfläche (vgl. AP 7.2) 75
11.2.1 Literaturrecherche 75
11.2.2 Abbildung der entwickelten Prüfvorrichtung 76
11.2.3 Entwicklung Prüfvorrichtung 76
11.2.4 Materialverhalten 76
12 Prüfung der mechanischen Eigenschaften der Kernwerkstoffe (vgl. AP 8) 78
12.1 Experimentelle Ermittlung der mechanischen Eigenschaften in der Papierfläche (vgl. AP 8.1) 79
12.1.1 Druckversuche FS2 79
12.1.2 In-plane-Methoden FS3 79
12.1.3 Zugversuche - Beurteilung der Papiere aus AP5 und AP6 80
12.1.4 Beurteilung der Versuchsergebnisse - Auswahl eines Werkstoffes 80
12.1.5 Zugversuche - Bestimmung der Eigenschaften von APW^P und N636 80
12.1.6 Druckversuche - Bestimmung der Eigenschaften von APW^P und N636 81
12.1.7 Schubversuche - Bestimmung der Eigenschaften von $V92^P$ und N636 81
12.2 Experimentelle Ermittlung der mechanischen Eigenschaften senkrecht zur Papier-fläche (vgl. AP 8.2) 82
12.2.1 Schubverhalten out-of-plane 82

12.2.2 3-Punkt-Biege-Versuche 83
12.2.3 Beurteilung der Versuchsergebnisse 83
12.3 Experimentelle Ermittlung der mechanischen Eigenschaften von Kernstrukturen (vgl. AP 8.3) 83
12.3.1 Kernherstellung 83
12.3.2 Druckprüfung 84
12.3.3 Schubprüfung in L-Richtung 84
12.3.4 Schubprüfung in W-Richtung 84
12.3.5 Kraft-Weg-Verläufe der Versuche 84
13 Entwicklung und Implementierung eines geeigneten Materialmodells für Papier (vgl. AP 9) 86
13.1 Elastisch-plastisches Materialmodell nach Mäkelä und Östlund 86
13.1.1 Isotrop-plastisch äquivalentes Material 86
13.1.2 J2-Theorie 86
13.1.3 Erläuterung des Verzerrungskörpers 87
13.1.4 Hintergrund 87
13.2 Entwicklung eines angepassten zweidimensionalen Materialmodells 88
13.2.1 Ableitung des neuen Verzerrungskörpers 88
13.2.2 Abbildung des neuen Verzerrungskörpers 88
13.2.3 Skalierungs- und Verschiebungs-faktoren 88
13.2.4 Rotationsfaktoren 89
13.3 Ableiten eines dreidimensionalen Materialmodells 89
13.4 Wiederbelastungsmodell 90
13.4.1 Wiederbelastung bei Mäkelä und Östlund 90
13.4.2 Wiederbelastungsmodell - Grundlagen 90
13.4.3 Wiederbelastungsmodell – Auswertung der Versuchsdaten 91
13.4.4 Abbildung des Abschwächungsverhältnisses 91
13.4.5 Definition des Abschwächungsverhältnisses 91
13.5 Implementierte Versagensmodelle 92
13.5.1 Maximale Spannung 92
13.5.2 Teilellipsoide 92
13.5.3 Tensorial Strength Analysis mit $F12 = 0$ 92
13.5.4 Tensorial Strength Analysis mit $F12 = f(\sigma 45°)$: 92
13.6 Implementierung, Validierung und Anwendung des Materialmodells 92
13.6.1 Ableitung der mechanischen Kenngrößen aus den Versuchen an APW^P und N636 im AP8.2 93
14 Simulation statischer und dynamischer Belastungsversuche an den entwickelten Papierwerkstoffen und Referenzmaterialien (vgl. AP 10) 94
14.1 Validierung des Simulationsmodells anhand der Testergebnisse 94

14.1.1 Modellerstellung 94
14.1.2 Elementgrößenabhängigkeit 94
14.1.3 Prüfgeschwindigkeit in den Simulationen 95
14.1.4 Nachrechnung der Testergebnisse 95
14.1.5 Vergleich der Versuchs- und Simulationsergebnisse 95
14.2 Vorhersage der spezifischen Eigenschaften von Faltkernen 96
14.2.1 Materialanpassung $N636^{SW}$ 96
14.2.2 Vorhersage der Kerneigenschaften 96
14.2.3 Einordnung der gewichtsspezifischen Ergebnisse 96
14.3 Vorhersage der spezifischen Eigenschaften von Honigwabenkernen 98
14.3.1 Vorhersage der statischen spezifischen Kerneigenschaften 98
14.3.2 Einordnung der gewichtsspezifischen Ergebnisse 98
14.3.3 Vorhersage der dynamischen spezifischen Kerneigenschaften 99
15 Optimierung der Sandwich-Kernstruktur bezüglich der mechanischen Eigenschaften (vgl. AP 11) 100
15.1 Optimierungsergebnisse 100
15.2 Faltkerne – optimierte Geometrien 101
16 Herstellung von Funktionsmustern (vgl. AP 12) 102
16.1 Durchführung 102
17 Glossar 103
17.1 Abkürzungen 103
17.2 Lateinische Formelzeichen 104
17.3 Griechische Formelzeichen 105
17.4 Exponenten 106
17.5 Index 106
18 Literatur 108