

Material- und Prozesscharakterisierung zur Herstellung von Sandwichleichtbauteilen mit Papierwabenkern und thermoplastischen faserverstärkten Deckschichten für die Anwendung im Fahrzeuginterieur

Von der Graduate School of Excellence
advanced Manufacturing Engineering der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Benno Simon Stamp
aus Stuttgart

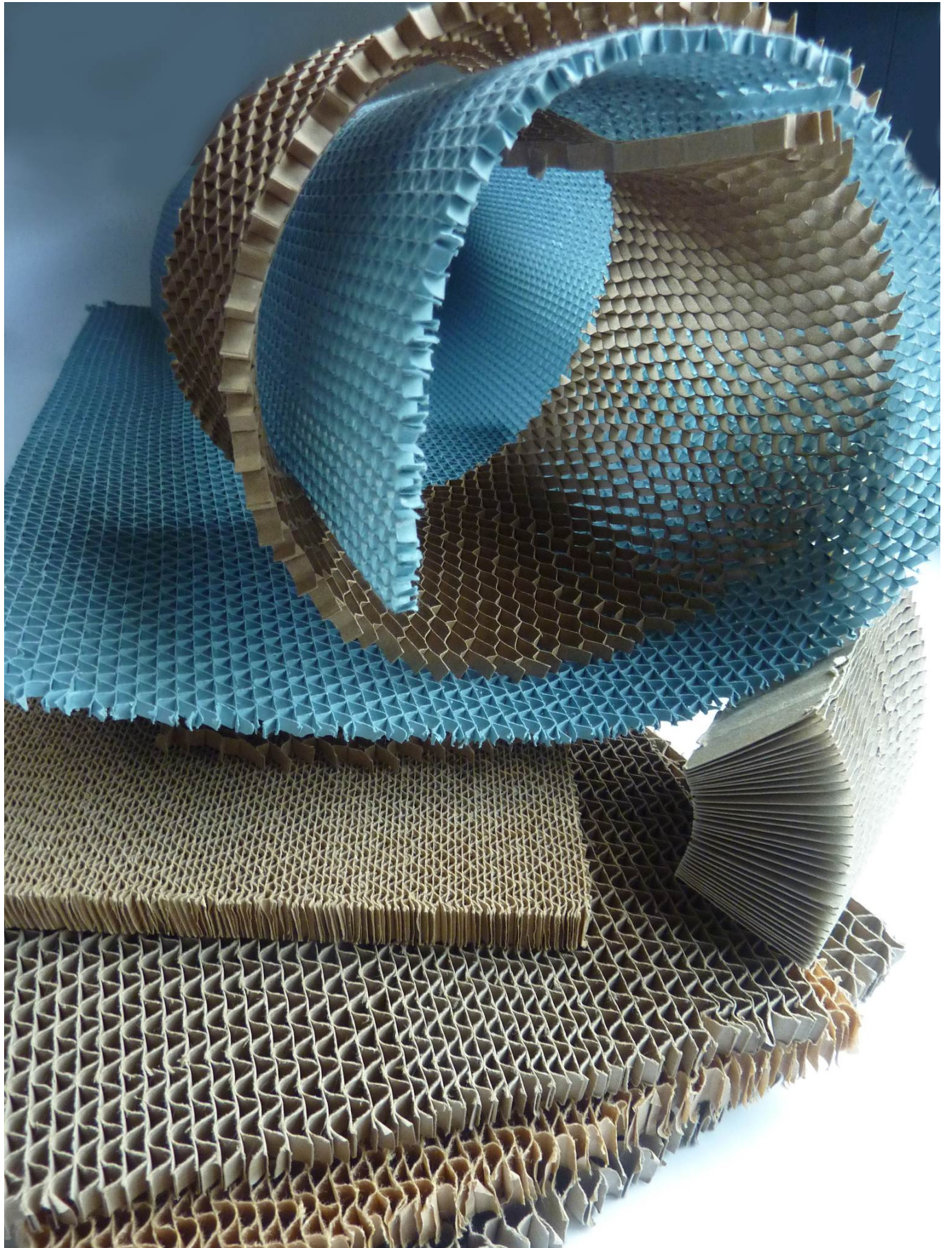
Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult.
Engelbert Westkämper

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler

Tag der mündlichen Prüfung: 18.02.2013

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb
der Universität Stuttgart

2013



Abstract

Sandwich structures with honeycomb core and fibre-reinforced cover layers are widely used in the aircraft industry because of their potential in lightweight components. A transfer and implementation of these sandwich technologies into automotive applications is challenging due to high materials costs as well as the large quantity requirement. In the present work, a novel sandwich structure, consisting of thermoplastic fibre-reinforced cover layers and a paper honeycomb, is analysed in consideration of the specific performance requirements of car interior parts.

Experimental as well as analytical calculation methods were investigated to analyse the mechanical behaviour of the cellulose paper honeycombs. Experimental results helped in formulating the approximate equations - based on regression analysis - to improve the prediction of the mechanical characteristics of the honeycombs.

To understand the manufacturability of formed sandwich components, the deformability behaviour of the honeycombs as a function of their geometric parameters was investigated. For validating the theoretical results, experimental sensitive analyses were executed. The series of experiments showed, that the shaping potential of the honeycombs can be influenced positively by the humidity content.

Hybrid needle-punched non-wovens were predominantly considered as cover layer material, which contains glass and natural fibres as reinforcing materials, and polypropylene as matrix. The influences of various parameters on mechanical behaviour of the sandwich composite were examined by conducting quasi-static tests. A significant increase of the mechanical properties was observed through the experiments by adding a fusible foil layer between paper honeycomb and cover layer. Based on the material properties, generated in the experimental series, an analytical and a numerical approach were developed for calculating the sandwich stiffness.

For industrial implementation of the component manufacturing, different manufacturing concepts and tool concepts are presented. With the help of friction welding tests it was proven, that a connection between sandwich part and plastic support bracket is producible.

With the aid of material testing in environmental conditions, the combustion behaviour as well the mechanical degradation at high humidity were determined. The higher thermal insulation performance in comparison to conventional facing materials was observed during material tests.

The ecological relevance of this sandwich technology is shown through a life cycle assessment. For material recycling, a recycling process by compounding the sandwich materials into injection moulding granulates was carried out and their mechanical characteristics was determined.

Kurzfassung

Sandwichstrukturen mit Wabenkernen und faserverstärkten Kunststoffdeckschichten haben sich im Flugzeugbau aufgrund ihres Leichtbaupotenzials in zahlreichen Bauteilen etabliert. Entgegen gesetzt hierzu konnten sich die Sandwichtechnologien des Flugzeugbaus im Automobilbau aufgrund der hohen Materialkosten und den erheblichen Bedarfsstückzahlen nicht durchsetzen. Unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen des Automobilbaus wird in der vorliegenden Arbeit ein neuartiger Sandwichverbund bestehend aus thermoplastischen faserverstärkten Deckschichten und einem Papierwabekern untersucht, wobei als Einsatzgebiet das Fahrzeuginterieur gewählt wurde.

Zur Analyse des mechanischen Verhaltens der Papierwaben wurden deren mechanischen Eigenschaften durch Versuchsreihen und analytische Berechnungsmethoden untersucht. Unter Zuhilfenahme der experimentellen Ergebnisse sind Näherungsgleichungen - basierend auf Regressionsanalysen - zur verbesserten Vorhersage der mechanischen Papierwabekennwerte formuliert worden. Mit dem Ziel, geformte Sandwichbauteile herzustellen, wurde mittels einer Modellvorstellung das Umformverhalten der Papierwaben in Abhängigkeit ihrer geometrischen Parameter analysiert. Zur Bestätigung der theoretischen Erkenntnisse wurden experimentelle Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Die experimentellen Untersuchungen zeigten, dass das Umformpotenzial z. B. durch erhöhte Papierwabenfeuchtigkeit positiv beeinflusst wird.

Als Deckschichtmaterial wurde vorwiegend der Einsatz von Hybrid-Nadelvliesen betrachtet, wobei Glas- und Naturfasern als Verstärkungsmaterial der Polypropylenmatrix untersucht wurden. Mit dem Ziel das mechanische Verständnis für den Sandwichverbund zu fördern, wurden verschiedene Einflüsse durch quasi statische Versuchsreihen untersucht. Hierbei konnte insbesondere eine Steigerung der mechanischen Eigenschaften durch eine Schmelzfolie zwischen der Papierwabe und den Deckschichten nachgewiesen werden. Basierend auf den experimentell gewonnenen Halbzeugkennwerten wurden zur Berechnung der Sandwichsteifigkeit ein analytischer und numerischer Ansatz vorgestellt. Zur industriellen Umsetzung der Bauteilfertigung wurden zum einen verschiedene Fertigungsvarianten und zum anderen unterschiedliche Werkzeugkonzepte präsentiert. Mit Hilfe der durchgeführten Reibschweißversuche konnte nachgewiesen werden, dass eine Verbindungsherstellung zwischen Sandwichbauteil und Kunststoffträger herstellbar ist.

Mit Hilfe umgebungsbedingter Werkstoffprüfungen wurden das Brennverhalten des Sandwichverbundes und die mechanische Degradation bei hoher Luftfeuchtigkeit untersucht. Ebenso konnte durch die Betrachtung der thermischen Isolationseigenschaft der Vorteil des Sandwichverbundes im Vergleich zu konventionellen Verkleidungsmaterialien aufgezeigt werden.

Die ökologische Relevanz der betrachteten Sandwichtechnologie wurde mit Hilfe einer Ökobilanz aufgezeigt. Für die stoffliche Wiederverwertung wurde ein Recyclingprozess durch Compoundierung des Sandwichverbundes zum Spritzgussgranulat durchgeführt und deren mechanische Eigenschaften ermittelt.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit an der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME) der Universität Stuttgart in den Jahren 2008 bis 2012 entstanden.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper für die Übernahme des Hauptberichters und das Engagement in der GSaME, die durch ihre interdisziplinäre Ausrichtung sowohl den Inhalt dieser Arbeit als auch mich persönlich geprägt hat. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler möchte ich mich für das Interesse an der Arbeit, die initiierten Gespräche sowie für die Übernahme des Mitberichters bedanken. Für die informativen Gespräche sowie die Bereitstellung des Technikums bin ich Herrn Dipl.-Ing. Rainer Kehrle sehr dankbar.

Ohne die fachliche und finanzielle Unterstützung der Daimler AG wäre die Durchführung dieser Arbeit nicht möglich gewesen. Aus diesem Grund gilt mein besonderer Dank den Herren Dr. Ralph Greiner und Dipl.-Ing. Hubert Bieder für ihre tatkräftige Unterstützung in zahlreichen Fällen. Bei meinen stets aufgeschlossenen Kollegen Dr. Tobias Blumenstock und Dipl. Wi.-Ing. Roman Wittig möchte ich mich für die fachlichen Diskussionen, das angenehme Zusammenarbeiten sowie für ihr großes Engagement beim Korrekturlesen bedanken. Ein besonderer Dank gilt meinen studentischen Mitarbeitern M.Eng. Marcio Trombin, Dipl.-Ing. Sven Karthäuser, Dipl.-Ing. Benjamin Krug sowie Dipl.-Ing. Viktor Buchmiller, deren durchgeführte Arbeit ich sehr schätze. Darüber hinaus möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Sebastian Iwan für die zahlreichen Stunden im Technikum und für die gewissenhafte Unterstützung bei der Durchführung einiger Versuchsreihen bedanken.

Zuletzt danke ich von ganzem Herzen meinen Eltern, die mir einen permanenten Rückhalt boten und mich liebevoll motivierten. Bei meiner Freundin Patricia Blaschke möchte ich mich für die mit Arbeit belasteten Wochenenden entschuldigen und mich für ihr enormes Verständnis sowie für ihre Unterstützung bedanken.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	A
Abbildungsverzeichnis.....	E
Tabellenverzeichnis	J
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	K
1 Einleitung	1
1.1 Einführung.....	1
1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit.....	2
2 Stand der Technik	4
2.1 Sandwichbauweise	4
2.2 Sandwichtechnologien.....	5
2.3 Kriterienvergleich der Sandwichtechnologien	9
3 Eigenschaften von Papierwaben	11
3.1 Kernmaterialien basierend auf Cellulose	11
3.1.1 Papiergrammatur	11
3.1.2 Papiere für die Wabenherstellung.....	11
3.1.3 Papierwabenherstellung.....	14
3.1.3.1 Wellstegwaben	14
3.1.3.2 Expansionswaben	15
3.1.4 Mechanische Eigenschaften des Werkstoffs Papier.....	16
3.1.5 Klebstoffe für die Wabenherstellung	17
3.2 Charakterisierung der Papierwabengeometrie.....	18
3.2.1 Nomenklatur der Papierwaben	18
3.2.2 Geometrische Beschreibung der Wellstegwaben	18
3.2.3 Berechnung der Wellstegwabendichte.....	21
3.2.4 Geometrische Beschreibung der Expansionswabe.....	22
3.2.5 Berechnung der Expansionswabendichte.....	22
3.3 Mechanische Eigenschaften der Papierwaben.....	23
3.3.1 Druckeigenschaften der Papierwaben.....	24
3.3.1.1 Analytische Methode zur Bestimmung des elastischen Verhaltens.....	24
3.3.1.2 Experimentelle Methode zur Bestimmung der Druckkennwerte	25
3.3.1.3 Gegenüberstellung der Ergebnisse.....	26
3.3.2 Schubeigenschaften der Papierwaben.....	28
3.3.2.1 Analytische Methode zur Bestimmung des elastischen Verhaltens.....	28
3.3.2.2 Experimentelle Methode zur Bestimmung der Schubkennwerte	31
3.3.2.3 Gegenüberstellung der Ergebnisse.....	32

3.3.3	Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse	34
4	Umformung von Papierwaben	36
4.1	Theoretische Untersuchung des Umformverhaltens.....	36
4.1.1	Geometrisches Modell zur Beschreibung des Umformverhaltens.....	38
4.1.2	Ergebnisdarstellung der theoretischen Umformanalyse	41
4.2	Experimentelle Untersuchung des Umformverhaltens	43
4.2.1	Feuchtigkeitskonditionierung	43
4.2.2	Umformanalyse mittels Werkzeug	44
4.2.2.1	Versuchsdurchführung.....	44
4.2.2.2	Auswertungsmethodik	45
4.2.3	Umformanalyse mittels Biegeversuch	46
4.2.3.1	Versuchsdurchführung.....	46
4.2.3.2	Auswertungsmethodik	47
4.2.4	Ergebnisdarstellung der experimentellen Umformanalyse.....	47
4.3	Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse.....	52
5	Mechanische Materialcharakterisierung des Sandwichverbundes.....	54
5.1	Eigenschaften der Hybrid-Nadelvliesstoffe	54
5.1.1	Nadelvliesstoffherstellung.....	55
5.1.2	Eingesetzte Fasersorten	56
5.1.3	Materialcharakterisierung.....	58
5.1.3.1	Versuchsbeschreibung	58
5.1.3.2	Ergebnisdarstellung	59
5.2	Charakterisierung des Sandwichverbundes mit Nadelvliesdeckschichten.....	61
5.2.1	Versuchsdurchführung	61
5.2.1.1	Sandwichprobenherstellung.....	61
5.2.1.2	Nomenklatur der Sandwichverbunde	62
5.2.1.3	Versuchsbeschreibungen	63
5.2.2	Einfluss der Deckschichtanbindung auf den Sandwichverbund.....	65
5.2.2.1	Auswirkung des Fasermassenanteils.....	66
5.2.2.2	Auswirkung der Schmelzfolie.....	67
5.2.2.3	Auswirkung der Wabenausprägung	69
5.2.3	Einfluss der Deckschichtausprägung auf den Sandwichverbund	71
5.2.3.1	Auswirkung des Fasermassenanteils.....	72
5.2.3.2	Auswirkung der strukturellen Deckschichtkonsolidierung.....	74
5.2.3.3	Auswirkung der Verstärkungsfaserart.....	76
5.2.3.4	Auswirkung des Flächengewichtes	77
5.2.4	Einfluss der Wabenzellengröße und -ausrichtung auf den Sandwichverbund.....	77
5.3	Mechanische Eigenschaften des Sandwichverbundes mit alternativen Deckschichten	78
5.4	Theoretische Betrachtung der Sandwichsteifigkeit	80
5.4.1	Analytische Betrachtung der Sandwichsteifigkeit	80
5.4.2	Numerische Betrachtung der Sandwichbauteilsteifigkeit.....	83
5.4.2.1	Erzeugung des FEM-Modells	83
5.4.2.2	Validierung des FEM-Modells durch den Vier-Punkt-Biegeversuch.....	85
5.4.2.3	Simulation der Bauteilsteifigkeit am Beispiel Hutablage.....	87

5.5	Zusammenfassung	88
6	Prozesscharakterisierung der Bauteilfertigung	90
6.1	Thermisches Prozessfenster	90
6.1.1	Versuchsbeschreibung	90
6.1.2	Ergebnisdarstellung	91
6.2	Fertigungsverfahren	92
6.2.1	Preformherstellung der Papierwabe	92
6.2.2	Zyklische Werkzeugtemperierung	93
6.2.3	Konstante Werkzeugtemperierung	94
6.2.4	Zusammenfassung	95
6.3	Werkzeugkonzepte	96
6.3.1	Werkzeugkonzept mit weggesteuertem Werkzeugschließvorgang	97
6.3.2	Werkzeugkonzept mit kraftgesteuertem Werkzeugschließvorgang	99
6.3.3	Zusammenfassung	100
6.4	Bauteilumsetzung	101
6.5	Grundlagenuntersuchungen zum Fügen durch Reibschweißen	102
6.5.1	Versuchsdurchführung	103
6.5.2	Ergebnisdarstellung	104
6.5.3	Zusammenfassung	105
7	Umgebungsbedingtes Werkstoffverhalten des Sandwichverbundes.....	107
7.1	Tropenklimasimulation	107
7.1.1	Versuchsdurchführung	107
7.1.2	Ergebnisdarstellung	108
7.1.3	Zusammenfassung	110
7.2	Brennverhalten des Sandwichverbundes	110
7.2.1	Versuchsdurchführung	111
7.2.2	Ergebnisdarstellung	111
7.3	Wärmeisolationseigenschaften des Sandwichverbundes	112
7.3.1	Theoretische Betrachtung der Wärmeisolationseigenschaft	112
7.3.2	Experimentelle Untersuchung der Wärmeisolationseigenschaft	115
7.3.3	Gegenüberstellung der theoretischen und experimentellen Ergebnisse	116
7.3.4	Gegenüberstellung mit herkömmlichen Interieurmaterialien	116
8	Ökologische Bauteilbilanzierung	119
8.1	Bauteilökobilanz am Beispiel Hutablage	119
8.1.1	Produktionsphase	119
8.1.1.1	Sachbilanz der formgepressten Hutablage	120
8.1.1.2	Sachbilanz der Sandwichhutablage	122
8.1.1.3	Wirkungsabschätzung	124
8.1.2	Nutzungsphase	125
8.1.2.1	Sachbilanz	125
8.1.2.2	Wirkungsabschätzung	126

8.1.3	Verwertungsphase	127
8.1.3.1	Sachbilanz	127
8.1.3.2	Wirkungsabschätzung	128
8.2	Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse	128
9	Stoffliche Wiederverwertung des Sandwichverbundes	130
9.1	Herstellung der Recyclatprüfkörper	130
9.1.1	Schüttgutherstellung	130
9.1.2	Granulatherstellung	131
9.1.3	Prüfkörperherstellung	131
9.2	Mechanische Materialeigenschaften des Recyclatcompounds	132
9.2.1	Zugeigenschaften	132
9.2.1.1	Versuchsdurchführung	132
9.2.1.2	Ergebnisdarstellung	133
9.2.2	Charpy-Schlageigenschaften	134
9.2.2.1	Versuchsdurchführung	134
9.2.2.2	Ergebnisdarstellung	135
9.3	Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse	135
10	Zusammenfassung	137
	Literaturverzeichnis	I
	Normenverzeichnis	XII
	Datenblätter	XIV
	Patent- und Offenlegungsschriften	XV
	Anhang	XVI
	Anhang Kapitel 3	XVI
	Anhang Kapitel 4	XVIII
	Anhang Kapitel 5	XXIII
	Anhang Kapitel 6	XXVI
	Anhang Kapitel 7	XXVI
	Anhang Kapitel 8	XXVII
	Anhang Kapitel 9	XXVIII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Flugzeugkabinenkomponenten in Sandwichbauweise.....	1
Abbildung 1.2: Gliederung der Arbeit	2
Abbildung 2.1: Belastungen im Sandwichverbund	4
Abbildung 2.2: Sandwichbauteilherstellung durch Autoklavverfahren	5
Abbildung 2.3: Sandwichbauteilherstellung im RTM-Verfahren (li.), Querschnitt durch Sandwichprobe hergestellt im RTM-Verfahren (re.)	6
Abbildung 2.4: Sandwichbauteilherstellung durch RIM-Verfahren	7
Abbildung 2.5: Querschnitt durch Sandwichproben hergestellt im Baypreg [®] -Verfahren.....	7
Abbildung 2.6: Sandwichbauteilherstellung durch einstufiges Thermoformen	7
Abbildung 2.7: Papierwaben mit faserverstärkten Deckschichten	8
Abbildung 3.1: Mikroskopieaufnahme Wellenstoff.....	12
Abbildung 3.2: Mikroskopieaufnahme Testliner.....	13
Abbildung 3.3: Mikroskopieaufnahme Kraftsackpapier	14
Abbildung 3.4: Herstellungsverfahren der Wellstegwaben	15
Abbildung 3.5: Herstellungsverfahren der Hexagonalwaben	16
Abbildung 3.6: Papierausrichtung im Wabenkern	17
Abbildung 3.7: Geometrische Größen einer Wellstegwabe	18
Abbildung 3.8: Verlauf eines Wellenzugs im Wabenkern	19
Abbildung 3.9: Vergleich numerischer und analytischer Wellenzuglänge	21
Abbildung 3.10: Geometrische Größen einer Expansionswabe	22
Abbildung 3.11: Hexagonalwabe mit $D_c = 8$ mm	22
Abbildung 3.12: Darstellung des Kraft-Weg-Verlaufs bei Druckbelastung (A ~ TL-90 WG)	25
Abbildung 3.13: Druckmodul der Wabenkerne in Abhängigkeit der Kerndichte.....	27
Abbildung 3.14: Druckfestigkeit der Wabenkerne in Abhängigkeit der Kerndichte	28
Abbildung 3.15: Kraft-Schubverzerrung einer A ~ TL-90 WG in Ebene ₃₂	31
Abbildung 3.16: Kraft-Schubwinkel-Verlauf einer A ~ TL-90 WG in beiden Richtungen	32
Abbildung 3.17: G_{31} der Wabenkerne in Abhängigkeit der Kerndichte	32
Abbildung 3.18: Schubfestigkeit der Wabenkerne in Ebene ₃₁	33
Abbildung 3.19: Gegenüberstellung der Druckmoduln von Papierwaben mit weiteren Wabenkernen.....	35
Abbildung 3.20: Gegenüberstellung der Druckfestigkeit von Papierwaben mit weiteren Wabenkernen.....	35
Abbildung 3.21: Gegenüberstellung der Schubmoduln G_{31} von Papierwaben mit weiteren Wabenkernen.....	35

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4.1: Wabenausrichtungen bei Umformung.....	37
Abbildung 4.2: Umformzonen in Abhängigkeit von Biegewinkel und -kraft.....	37
Abbildung 4.3: Modell einer umgeformten Einheitszelle	39
Abbildung 4.4: Theoretischer Innenradius und Biegewinkel in Abhängigkeit der Wabenhöhe	41
Abbildung 4.5: Abhängigkeit des Innenradius von Papier- und Wabendicke	42
Abbildung 4.6: Einfluss der Zellgeometrie auf den theoretischen Innenradius	42
Abbildung 4.7: Umformzonen einer Papierwabe umgeformt mit Werkzeug	46
Abbildung 4.8: Einfluss der Papierfeuchtigkeit und der Wabendicke auf das Umformverhalten	48
Abbildung 4.9: Einfluss der Zellgeometrie auf das Umformverhalten bei paralleler Ausrichtung	49
Abbildung 4.10: Einfluss der Zellgeometrie auf das Umformverhalten bei senkrechter Ausrichtung	49
Abbildung 4.11: Anzahl der Einheitszellen bei senkrechter und paralleler Biegebeanspruchung.....	50
Abbildung 4.12: Einfluss der Geschwindigkeit auf das Umformverhalten	50
Abbildung 4.13: Einfluss der Papiersorte auf das Umformverhalten bei senkrechter (li.) und paralleler (re.) Ausrichtung.....	51
Abbildung 4.14: Einfluss der Klebstoffart auf das Umformverhalten	52
Abbildung 5.1: Formpressen von thermoplastischen Hybrid-Nadelvliesstoffen	55
Abbildung 5.2: Nadelvliesherstellung.....	55
Abbildung 5.3: Aufnahme der PP/GF-Nadelvliese (li.) und PP/NF-Nadelvliese (re.).....	57
Abbildung 5.4: Mechanische Kennwerte in Abhängigkeit des Fasermassenanteils konsolidierter GMT-Proben quer zur Maschinenrichtung (li.) und in Maschinenrichtung (re.).....	60
Abbildung 5.5: Mechanische Kennwerte in Abhängigkeit des Fasermassenanteils konsolidierter NMT-Proben quer zur Maschinenrichtung (li.) und in Maschinenrichtung (re.).....	60
Abbildung 5.6: Mechanische Kennwerte in Abhängigkeit des Konsolidierungsgrades von GMT-Proben quer zur Maschinenrichtung (li.) und in Maschinenrichtung (re.)...	61
Abbildung 5.7: Probenherstellung des Sandwichverbundes.....	62
Abbildung 5.8: Nomenklatur der Sandwichprobenbezeichnung	63
Abbildung 5.9: Sandwichprobenbezeichnungen	63
Abbildung 5.10: Bemaßungsgrößen des Sandwichverbundes	65
Abbildung 5.11: Mikroskopieaufnahme der Deckschichtanbindung mit duroplastischer (li.) und thermoplastischer Matrix (re.).....	66
Abbildung 5.12: Auswirkungen des Fasermassenanteils auf die mechanischen Eigenschaften des Sandwichverbundes - Schälkraft (li.) und Biegekraft (re.).....	67
Abbildung 5.13: Papierpartikel an PP/GF-Deckschicht nach Schälversuch - $\varphi_M = 60\%$ (li.) und $\varphi_M = 30\%$ (re.)	67

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 5.14: Mikroskopieaufnahme der Deckschichtanbindung mit und ohne Schmelzfolie.....	68
Abbildung 5.15: Auswirkungen der Schmelzfolie auf die mechanischen Eigenschaften des Sandwichverbundes für Schälkraft (li.) und Biegekraft (re.).....	68
Abbildung 5.16: Sandwichversagen durch lokale Intrusion (PP/GF-Vlies, 400 g/m ² , 0,1 mm Folie).....	69
Abbildung 5.17: Auswirkung der Wabenkernausprägung auf die Schälkraft.....	70
Abbildung 5.18: Deckschichtinnenseite nach Schälversuch mit 0,3 mm Schmelzfolie von A ~ TL-115 WG (li.) und Hex TL-150 WL (re.)	71
Abbildung 5.19: Mikroskopie durch Zellquerschnitt A ~ TL-115 WG mit 400 g/m ² PP/GF-Nadelvliesdeckschicht bei 30 % Fasermassenanteil (li.) und 60 % Fasermassenanteil (re.)	72
Abbildung 5.20: Einfluss des Fasermassenanteils auf die mechanischen Eigenschaften der Deckschichten	73
Abbildung 5.21: Einfluss des Glasfaseranteils auf die Biegekraft des Sandwichverbundes	73
Abbildung 5.22: Einfluss des Glasfaseranteils auf die Biegesteifigkeit des Sandwichverbundes	74
Abbildung 5.23: Topografische Aufnahme der Deckschichtinnenseite.....	74
Abbildung 5.24: Einfluss der Waben- und Vliesausrichtung auf die mechanischen Deckschichteigenschaften E-Modul (li.) und Zugkraft (re.).....	75
Abbildung 5.25: Normierte Biegesteifigkeit in Abhängigkeit der Halbzeugausrichtung.....	76
Abbildung 5.26: Einfluss der Verstärkungsfaserart.....	76
Abbildung 5.27: Einfluss des Deckschichtflächengewichtes auf Biegekraft (li.) und norm. Biegesteifigkeit (re.).....	77
Abbildung 5.28: Einfluss der Wabenkernausprägung auf Biegekraft (li.) und norm. Biegesteifigkeit (re.)	78
Abbildung 5.29: Oberflächenaufnahmen eines Sandwichverbundes mit verschiedenartigen PP/GF-Deckschichten.....	78
Abbildung 5.30: Mechanische Eigenschaften der Sandwichverbunde mit alternativen Deckschichten	79
Abbildung 5.31: Parameter des symmetrischen Sandwichverbundes.....	80
Abbildung 5.32: Analytische Biegesteifigkeit im Vergleich zur experimentell bestimmten	82
Abbildung 5.33: Einfluss der Schmelzfolie auf den Kraft-Weg-Verlauf der Sandwichverbunde	83
Abbildung 5.34: Modellvereinfachung des Sandwichverbundes.....	84
Abbildung 5.35: Modellaufbau des Vier-Punkt-Biegeversuchs	85
Abbildung 5.36: Kennwerte und Elementtypen bei der FEM	86
Abbildung 5.37: Gegenüberstellung des experimentellen und numerischen Kraft-Weg-Verlaufs.....	87
Abbildung 5.38: Vernetzte Sandwichhutablage	87
Abbildung 5.39: Fixierungs- und Auflageelemente der Sandwichhutablage.....	88

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 5.40: Gegenüberstellung der experimentellen und numerischen Hutablagensteifigkeit.....	88
Abbildung 6.1: TGA-Kurve des Testliners (li.) und DSC-Kurven der PP-Fasern (re.)	91
Abbildung 6.2: Herstellung der Papierwabenpreform.....	92
Abbildung 6.3: Zyklische Werkzeugtemperierung zur Sandwichbauteilherstellung	93
Abbildung 6.4: Sandwichbauteilherstellung mit konstanter Werkzeug- und Pressentemperierung.....	94
Abbildung 6.5: Sandwichbauteilherstellung mit konstanter Werkzeugtemperierung	95
Abbildung 6.6: Schematische Darstellung eines teilautomatisierten Fertigungsprozesses	96
Abbildung 6.7: Oberflächengüte in Abhängigkeit des Werkzeugspaltes.....	97
Abbildung 6.8: Schematischer Werkzeugaufbau mit weggesteuertem Werkzeugschließvorgang	98
Abbildung 6.9: Schematischer Werkzeugaufbau mit kraftgesteuertem Werkzeugschließvorgang	99
Abbildung 6.10: Sandwichhutablage mit weggesteuertem Werkzeugschließvorgang.....	101
Abbildung 6.11: Verkleidungsteil mit kraftgesteuertem Werkzeugschließvorgang	102
Abbildung 6.12: Einspannvorrichtung zur Bestimmung der Auszugskräfte.....	104
Abbildung 6.13: Mikroskopieaufnahme Reibschweißverbindung	105
Abbildung 6.14: Kraft-Weg-Verlauf des Auszugsversuchs an vibrationsgeschweißten Proben..	105
Abbildung 7.1: Klimasandwichplatten.....	107
Abbildung 7.2: Massenzunahme in Abhängigkeit der Zeit während Tropenklimalagerung	109
Abbildung 7.3: Querschnitt durch Brandprobe	111
Abbildung 7.4: Wärmeübertragungsmechanismen im Sandwichverbund mit Wabenkern.....	112
Abbildung 7.5: Aufbau der Einplattenapparatur zur Bestimmung des Wärmedurchgangswiderstands	115
Abbildung 7.6: Vergleich zwischen experimentellen und theoretischen Wärmedurchgangswiderständen	116
Abbildung 7.7: Wärmedurchgangswiderstand über Flächengewicht verschiedener Interieurmaterialien	117
Abbildung 7.8: Temperierte Sandwichplatte - beheizte Vorderseite (li.) und Rückseite (re.).....	118
Abbildung 7.9: Temperierte NF-Platte - beheizte Vorderseite (li.) und Rückseite (re.)	118
Abbildung 8.1: Flussdiagramm der Produktionsphase der formgepressten Hutablage.....	121
Abbildung 8.2: Flussdiagramm der Produktionsphase der Sandwichhutablage	123
Abbildung 8.3: Primärenergiemengen und CO ₂ -Emissionen in Produktionsphase (Sekundärfasern)	125
Abbildung 8.4: Primärenergiemengen und CO ₂ -Emissionen in Nutzungsphase bei 160 000 km.....	127
Abbildung 8.5: CO ₂ -Emissionen und Primärenergiemengen in Verwertungsphase	128
Abbildung 8.6: Energiebedarf und CO ₂ -Emissionen über Produktlebensdauer (Sekundärfasern)	128

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 9.1: Herstellungsschritte des Spritzgussgranulats.....	130
Abbildung 9.2: Mikroskopie des Spritzgussrecyclats I.....	131
Abbildung 9.3: Materialkennwerte der Recyclate bei Zugbelastung.....	133
Abbildung 9.4: Charpy-Schlageigenschaften der Recyclate.....	135

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Technologien zur Sandwichbauteilherstellung im Vergleich	9
Tabelle 3.1: Zugkennwerte von Papier	17
Tabelle 3.2: Klassifizierung der Wellpappe	19
Tabelle 3.3: Versuchsparameter der Druckprüfung	25
Tabelle 3.4: Versuchsparameter der Schubprüfung	31
Tabelle 4.1: Untersuchte Papierwaben bei der Umformanalyse	43
Tabelle 4.2: Versuchsparameter der Umformung mit Werkzeug	44
Tabelle 4.3: Schädigungsfaktoren der umgeformten Papierwaben	45
Tabelle 4.4: Versuchsparameter der Biegeprüfung	47
Tabelle 4.5: Bewertung der Einflussparameter auf das Umformverhalten anhand Referenztyp	53
Tabelle 5.1: Materialkennwerte eingesetzter Fasern	57
Tabelle 5.2: Versuchsparameter der Zugprüfung	58
Tabelle 5.3: Versuchsparameter zum Vier-Punkt-Biegeversuch	64
Tabelle 5.4: Versuchsparameter zum Trommel-Schälversuch	64
Tabelle 5.5: Füllungsgrade der untersuchten Papierwaben	70
Tabelle 6.1: Gegenüberstellung der Herstellungsvarianten	96
Tabelle 6.2: Gegenüberstellung der Werkzeugkonzepte	101
Tabelle 6.3: Sandwichkonfigurationen der Schweißproben	103
Tabelle 6.4: Versuchsparameter der Auszugsversuche	104
Tabelle 7.1: Versuchsparameter zur Bestimmung der Materialdegradation nach Tropenklimalagerung	108
Tabelle 7.2: Mechanische Degradation der Sandwichverbunde nach Tropenklimalagerung	109
Tabelle 7.3: Betrachtete Sandwichkonfigurationen bei der Bewertung des Brennverhaltens	111
Tabelle 7.4: Wärmeleitkoeffizienten verschiedener Materialien	117
Tabelle 8.1: Hauptparameter der ökologisch bewerteten Hutablagenvarianten	120
Tabelle 8.2: Basiswerte der veranschlagten Marktpreisallokation	122
Tabelle 8.3: Fahrzeugkennzahlen in der Nutzungsphase	126
Tabelle 9.1: Recyclatbestandteile des Compounds	131
Tabelle 9.2: Versuchsparameter der Zugprüfung des Recyclats	133
Tabelle 9.3: Versuchsparameter der Schlagzähigkeitsprüfung	134

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen

CAD	computer-aided design
CD	cross direction
CF	Kohlenstofffaser
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DSC	Differential Scanning Calorimetry
E-Modul	Elastizitätsmodul
EN	Europäische Norm
EP	Epoxidharz
EPP	Expandiertes Polypropylen
FEFCO	Europäische Vereinigung der Wellpapperhersteller
FEM	Finite-Elemente-Methode
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
GF	Glasfaser
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
Gl.	Gleichung
GMT	glasfasermattenverstärkter Thermoplast
Hobe	honeycomb before expansion
Hex	Hexagonalwabe/Expansionswabe
ISO	International Organization for Standardization
KSP	Kraftsackpapier
MD	machine direction
NF	Naturfaser
NFK	naturfaserverstärkter Kunststoff
NMT	naturfasermattenverstärkter Thermoplast
PA	Polyamid
PEI	Polyetherimid
PES	Polyester
PP	Polypropylen
ProBas	Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente
PTFE	Polytetrafluorethylen
PUR	Polyurethan
PVAc	Polyvinylacetat
RIM	Reaction Injection Moulding
RTM	Resin Transfer Moulding

TGA	Thermogravimetrische Analyse
TL	Testliner
V	Vliesstoffausrichtung
v. a.	vor allem
W	Wabenausrichtung
WG	Wasserglas
WL	Weißleim
WPC	Wood-Plastic-Compounds
WS	Wellenstoff
WZ	Werkzeug

Lateinische Symbole

ΔL_F	Federauslenkung	mm
a_A	Auflagerabstand	mm
A_c	Oberfläche einer Wabeneinheit	m^2
A_{Ks}	Klebstofffläche eines Wabeneinheit	mm^2
A_{Lu}	Fläche der Luft einer Einheit	mm^2
A_P	Papierfläche eines Wabeneinheit	mm^2
A_{pr}	projizierte Bauteilfläche	mm^2
A_s	Grundfläche einer Einheit	m^2
D_0	Biegesteifigkeit der Deckschicht	Nmm
d_A	Auflagerdurchmesser	mm
$d_{\ddot{a}q}$	Wabendurchmesseräquivalent	mm
D_c	Zellweite der Hexagonalwabe	mm
D_{exp}	experimentelle, breitennormierte Biegesteifigkeit	Nmm
d_F	Biegefinnendurchmesser	mm
D_F	Federkonstante	N/mm
D_f	normierte Biegesteifigkeit der Einzeldeckschichten	Nmm
D_{th}	theoretische, breitennormierte Biegesteifigkeit	Nmm
D_w	normierte Biegesteifigkeit des Wabekerns	Nmm
E	Elastizitätsmodul	MPa
E_c	Elastizitätsmodul Wabekern	MPa
E_f	Elastizitätsmodul Deckschicht	MPa
E_N	Bauteiltransportenergie	J
E_s	Elastizitätsmodul Wabekernmaterial	MPa
E_{sw}	Biegemodul des Sandwichverbundes	MPa
F_F	Federkraft	N
F_L	Fahrzeuglaufleistung	km
f_{rel}	relative Luftfeuchtigkeit	%
F_{ST}	Stempelkraft	N
G	Schubmodul	MPa

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

G_c	Schubmodul Wabenkern	MPa
G_s	Schubmodul Wabenkernmaterial	MPa
G_{ST}	Stempelgewichtskraft	N
H_c	Wellenhöhe Wellstegwabe	mm
h_c	Wabendicke	mm
H_i	Materialheizwert	J/kg
H_S	volumenspezifischer Kraftstoffheizwert	J/l
h_{sw}	Sandwichdicke	mm
H_V	rückgewonnene Energiemenge durch Verbrennung	J/kg
k	Konsolidierungsgrad	-
K_E	Kraftstoffeinsparung	l/(100 km 100 kg)
K_V	Kraftstoffverbrauch	l/100 km
L_c	Länge der verklebten Hexagonalwabenzellwand	mm
l_i	Werkzeugkantenlänge	mm
L_{UZ}	Summe der Werkzeugkantenlängen	mm
m_B	Bauteilmasse	kg
m_F	Fahrzeugmasse	kg
m_i	Massenanteil	-
n	Probenanzahl	-
P_c	Wellenteilung der Wellstegwabe	mm
P_e	effektive Fahrzeugleistung	kW
P_{el}	zugeführte elektrische Leistung	W
p_{ST}	Stempeldruck	MPa
P_W	Widerstandsleistung	kW
R	Radius	mm
r_a	Außenradius	mm
r_i	Innenradius	mm
R_{SW}	Wärmedurchgangswiderstand Sandwichverbund	$(K \cdot m^2)/W$
R_{UZ}	Schädigungszahl	%
S_a	Zugseite der Einheitszelle	mm
S_c	Wellenzuglänge der Wellstegwabe	mm
S_i	Druckseite der Einheitszelle	mm
t_c	Zellwanddicke	mm
t_f	Deckschichtdicke	mm
t_{min}	Dicke vollkonsolidierter Hybridnadelvliese	mm
T_o	Temperatur der Oberseite	°C
T_u	Temperatur der Unterseite	°C
t_w	Probendicke	mm
v_F	Fahrzeuggeschwindigkeit	km/h
W_c	Länge der unverklebten Hexagonalwabenzellwand	mm
W_L	Luftwiderstandsanteil	-

Griechische Symbole

α	Winkel	°
α_c	Biegewinkel einer Wabeneinheit	°
α_u	Umformwinkel	°
Γ	Grammatur	g/m ²
ε_P	Emissionsgrad von Papier	-
$\varepsilon_{PP/GF}$	Emissionsgrad der PP/GF-Deckschicht	-
ε_{res}	flächenanteilbezogener Emissionsgrad	-
η_D	Druckverhältnis	-
θ	Expansionswinkel Hexagonalwabe	°
λ_C	Wärmeübertragung durch Wabekern	W/(m·K)
λ_f	Wärmeleitkoeffizient der Deckschicht	W/(m·K)
λ_{Ks}	Wärmeleitkoeffizient des Klebstoffs	W/(m·K)
λ_{Lu}	Wärmeleitkoeffizient der Luft	W/(m·K)
λ_P	Wärmeleitkoeffizient von Papier	W/(m·K)
μ_K	Wärmetransport durch Konvektion	W/(m·K)
μ_L	Wärmetransport durch Konduktion	W/(m·K)
μ_S	Wärmetransport durch Strahlung	W/(m·K)
ξ	Quotient aus Elastizitätsmoduln	-
ρ	Dichte	g/cm ³
ρ_c	Wabendichte	kg/m ³
ρ_F	Dichte der Verstärkungsfaser	g/cm ³
ρ_M	Dichte der Matrix	g/cm ³
ρ_s	Dichte Wabenmaterial	g/cm ³
σ	Spannung	MPa
σ_B	Stefan-Boltzmann-Konstante	W/(m ² ·K ⁴)
σ_C	Wabendruckfestigkeit	MPa
τ_C	Schubspannung	MPa
φ_B	Skalierungsfaktor	10 ⁶ (N·m/kg)
φ_K	Gewichtsfaktor	-
φ_L	Luftvolumenanteil	-
φ_m	Fasermassenanteil	-
φ_v	Faservolumenanteil	-
ψ_{FG}	Füllungsgrad	-

1 Einleitung

1.1 Einführung

Steigende Sicherheitsanforderungen und Komfortansprüche führen seit den achtziger Jahren zu einer Fahrzeuggewichtszunahme in der Mittel- und unteren Oberklasse von etwa 15 kg pro Jahr. Unter Berücksichtigung des massenabhängigen Mehrverbrauchs von 0,3 bis 0,6 l Kraftstoff pro 100 kg Mehrgewicht wird die Bedeutung des Leichtbaus zur Schonung fossiler Kraftstoffe und zur Verringerung der CO₂-Emissionen deutlich [BR05]. Neben ökologischen Aspekten wirken sich Leichtbaumaßnahmen positiv auf Fahrzeugagilität und Beschleunigung aus. Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) haben sich im Fahrzeuginterieur wegen ihrer gewichtsspezifischen Werkstoffeigenschaften etabliert. Der Einsatz von Sandwichbauteilen beschränkt sich heutzutage jedoch auf wenige Anwendungen.

Im Flugzeugbau hat sich hingegen die Sandwichbauweise aufgrund ihres Leichtbaupotenzials in zahlreichen Bauteilanwendungen bewährt. Wie in Abbildung 1.1 dargestellt, bestehen heutzutage nahezu alle Kabinenverkleidungsteile eines Passagierflugzeugs aus einem Sandwichverbund mit Wabenkern [HE06].



Abbildung 1.1: Flugzeugkabinenkomponenten in Sandwichbauweise nach [HE06]

Der unterschiedliche ökonomische Stellenwert des Leichtbaus in der Fahrzeug- und Flugzeugindustrie spiegelt sich in der Bereitschaft zu Mehrausgaben wider. Für ein eingespartes Kilogramm werden im Fahrzeugbau fünf Euro gebilligt. Im Flugzeugbau dürfen hingegen einige hundert Euro für dieselbe Gewichtsreduzierung investiert werden [BU09]. Die Überführung etablierter Sandwichtechnologien aus dem Flugzeug- in den Fahrzeugbau ist infolgedessen ohne die Akzeptanz höherer Bauteilkosten nicht möglich. Neben den anfallenden Mehrkosten stellen die deutlich höheren Bedarfsstückzahlen der Fahrzeugindustrie ein weiteres Hindernis der Technologieadaption dar. Dieser Sachverhalt zeigt die Notwendigkeit auf, dass Sandwichtechnologien für die spezifischen Anforderungen des Fahrzeuginterieurs gefunden und entwickelt werden müssen.

1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die umfassende Betrachtung von Sandwichbauteilen mit Papierwabenkernen und thermoplastischen faserverstärkten Deckschichten. Die Arbeitsergebnisse sollen einen Beitrag zur Erweiterung der industriellen Einsatzgebiete leisten, wobei als Anwendungsfeld das Fahrzeuginterieur zu wählen ist. Hierbei sind materialspezifische Eigenschaften zu untersuchen und fertigungstechnische Lösungen aufzuzeigen. Abbildung 1.2 gibt anhand der Gliederung einen Überblick der vorliegenden Arbeit.

• Kapitel 2	Stand der Technik
• Kapitel 3	Mechanische Eigenschaften von Papierwaben
• Kapitel 4	Umformung von Papierwaben
• Kapitel 5	Materialcharakterisierung des Sandwichverbundes
• Kapitel 6	Prozesscharakterisierung der Bauteilfertigung
• Kapitel 7	Umgebungsbedingtes Werkstoffverhalten
• Kapitel 8	Ökologische Bauteilbilanzierung
• Kapitel 9	Stoffliche Wiederverwertung

Abbildung 1.2: Gliederung der Arbeit

Zur Charakterisierung des Sandwichverbundes sind die **mechanischen Eigenschaften der Papierwaben** bei Druck- und Schubbelastung durch analytische Berechnungsmethoden zu bestimmen und mit experimentellen Versuchsergebnissen zu vergleichen. Zur Berücksichtigung der Material- und Fertigungseinflüsse sind auf Basis der gewonnenen Versuchsergebnisse Näherungsgleichungen zu definieren, die eine optimierte Prognose der mechanischen Eigenschaften ermöglichen. Die Näherungsgleichungen sollen des Weiteren eine Gegenüberstellung mit anderen Wabenkernen erlauben, wodurch die mechanischen Eigenschaften der Papierwaben veranschaulicht werden.

Mit dem Ziel geformte Sandwichbauteile darzustellen, ist eine Analyse bezüglich des **Umformverhaltens von Papierwaben** durchzuführen. Hierbei ist zum einen das Umformverhalten der Papierwaben anhand eines geometrischen Modells zu beschreiben. Mit Hilfe experimenteller Sensitivitätsanalysen sollen zum anderen materialspezifische und geometrische Einflussparameter der Papierwaben untersucht werden, die das theoretische Modell stützen.

Bei der **Materialcharakterisierung des Sandwichverbundes** ist insbesondere der Materialverbund, bestehend aus Papierwabenkern und Hybrid-Nadelvliesdeckschichten, als Gegenstand der Untersuchungen zu wählen. Anhand einer Parameterstudie sollen die mechanischen Eigenschaften der Deckschichten ohne Beeinflussung des Wabenkerns analysiert werden. Hierbei sind die Auswirkungen des Verstärkungsfaseranteils, der Verstärkungsfaserart und des Konsolidierungsgrads zu betrachten. Die Einflüsse der Deckschicht- und Wabenparameter, auf die mechanischen Eigenschaften des Sandwichverbundes, sind durch Werkstoffprüfungen systematisch zu untersuchen. Die gewonnenen Versuchsergebnisse und deren Interpretation sollen einen Beitrag zum Verständnis für das mechanische Verhalten des Sandwichverbundes leisten. Mit Hilfe analytischer und numerischer Berechnungsmethoden soll aufgezeigt werden, wie aus den experimentell bestimmten Halbzeugkennwerten die Sandwich- und Bauteilsteifigkeit ermittelt werden kann.

Die fertigungstechnische Umsetzung der **Bauteilfertigung** ist anhand von Fahrzeuginterieurbau- teilen aufzuzeigen. Zur Vermeidung thermischer Materialbeeinträchtigung soll das Prozessfenster zum Aufheizen der Halbzeuge durch thermische Analyseverfahren untersucht werden. Für die Darstellung der industriellen Umsetzbarkeit sind stückzahlabhängige Fertigungsvarianten aufzu- zeigen und entsprechende Werkzeugkonzepte darzustellen. Des Weiteren sind experimentelle Untersuchungen zum Fügen durch Reibschweißen durchzuführen.

Für den Fahrzeuginnenraum relevante Untersuchungen sollen das **umgebungsbedingte Werkstoffverhalten** des Sandwichverbundes aufzeigen. Die Betrachtung des Brennverhaltens und die mechanische Degradation durch Feuchtigkeitseinwirkung sind mit Hilfe experimenteller Materi- aluntersuchungen zu bewerten. Das thermische Isolationsverhalten des Sandwichverbundes ist durch bekannte analytische Berechnungsmethoden zu bestimmen und durch Versuchsergebnisse zu bestätigen. Mit Hilfe des aufgezeigten analytischen Ansatzes ist ein Vergleich des Isolations- verhaltens zu konventionellen Verkleidungsmaterialien darzustellen.

Zur ökologischen Bewertung der betrachteten Sandwichtechnologie ist eine **Bauteilökobilanz** durchzuführen. Mit Hilfe eines Kennwertevergleichs, zwischen einem Sandwichbauteil und einem konventionell gefertigten Bauteil, soll die ökologische Bedeutung der Materialsubstitution darge- stellt werden.

Am Ende dieser Arbeit ist ein Recyclingprozess durch Compoundierung für die **stoffliche Wie- derverwertung** des Sandwichverbundes aufzuzeigen. Die experimentell ermittelten Material- kennwerte der hergestellten Spritzgussrecyclate sollen einen Vergleich mit konventionellen Spritzgussmaterialien ermöglichen.

2 Stand der Technik

2.1 Sandwichbauweise

Die evolutionäre Entwicklung der Natur hat verschiedene Leichtbaulösungen auf Basis der Sandwichbauweise hervorgebracht. Die erste technische Anwendung ist auf die 1849 erbaute Brücke in Nordwales zurückzuführen [HR04]. Heutzutage wird die Sandwichbauweise beispielsweise in der Luft- und Raumfahrt [KE09, CA06], der Möbelindustrie [BR09, TU05], der Sportgerätektechnik [BO05], der Energietechnik [HA08], im Schiffsbau [KO08] und in der Architektur [MO09] eingesetzt.

Die Sandwichbauweise ist technologisch als Verbundbauweise anzusehen [WI07] und beschreibt die Anordnung von meist drei Schichten. Der Sandwichverbund setzt sich aus den außen liegenden, dehnsteifen Deckschichten und der innen liegenden schub- und drucksteifen Kernschicht zusammen. Die schub- und zugfesten Verbindungen der Deckschichten mit der Kernschicht ermöglichen die Kraftübertragung innerhalb des Sandwichverbundsystems. Die charakteristische Dicke der innen liegenden, leichten Kernstruktur bewirkt durch den Abstand der Deckschichten ein hohes Flächenträgheitsmoment, wodurch sich der prägnante Vorteil der Sandwichbauweise, die hohe Biegesteifigkeit, einstellt.

Neben dem Leichtbaupotenzial und der hohen Steifigkeit werden in [HR04] unter anderen die Schallisolation, Wärmedämmung, Feuerisolation und die Sicherheit gegen Durchstoß als Vorteile der Sandwichbauweise aufgeführt.

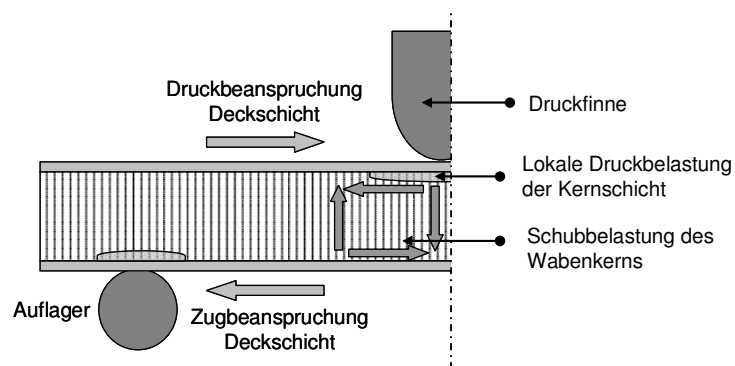


Abbildung 2.1: Belastungen im Sandwichverbund

Abbildung 2.1 zeigt am Beispiel einer Biegebelastung die dominierend auftretenden Belastungsarten der einzelnen Sandwichkomponenten. Hierbei wird die oben liegende Deckschicht auf Druck belastet, während die untere auf Zug beansprucht wird. Die mittig angeordnete Kernschicht erfährt zum einen eine Schubbeanspruchung durch die entgegengesetzte Deckschichtverschiebung und zum anderen eine lokale Druckbelastung an den Stellen der Krafteinleitung.

2.2 Sandwichtechnologien

Aufgrund verschiedener Bauteilanforderungen und Materialpaarungen haben sich unterschiedliche Verfahren zur Sandwichbauteilherstellung mit Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) etabliert. Die Herstellungstechnologien lassen sich in die Differenzial- und Integralbauweise unterteilen. Unter der Differenzialbauweise ist die singuläre Erzeugung der Halbzeugkonturen mit einem darauffolgenden Arbeitsschritt zur Verbindungsherstellung zwischen Deckschicht und Kernstruktur zu verstehen. Die Integralbauweise beschreibt hingegen die Verbindungsherstellung zwischen Deckschichten und Kernstruktur bei gleichzeitiger Erzeugung der Bauteilkontur [FL96]. Im Folgenden werden ausgewählte Herstellungsverfahren von Sandwichbauteilen vorgestellt und anschließend unter Berücksichtigung verschiedener Bewertungskriterien miteinander verglichen. Hierbei werden nachstehende Verfahren betrachtet:

- Vakuum- und Autoklavverfahren
- Resin Transfer Moulding (RTM)
- Reaction Injection Moulding (RIM)
- Thermoformen mit konsolidierten Deckschichthalbzeugen
- Formpressen von Papierwaben mit faserverstärkten Deckschichten

Beim **Vakuum- und Autoklavverfahren** werden die textilen Deckschichten auf dem einschaligen Formwerkzeug und der Kernschicht drapiert. Die Sandwichherstellung erfolgt unter einer Vakuumfolie, wobei die Lagerung zur Verstärkung des wirkenden Drucks und zur beschleunigten Aushärtung in einem Autoklav erfolgen kann. Aufgrund der niedrigen Viskosität des Harzes bilden sich Kehl-nahte zwischen Deckschichten und Wabenzellwänden aus, wie in Abbildung 2.2 dargestellt. Der herrschende Überdruck im Autoklav und der vorliegende Unterdruck im evakuierten Raum begünstigen den Einfall der Deckschichten in die Zellwandzwischenräume. Dieser Oberflächeneffekt ist unter der Bezeichnung Telegraphing bekannt [FU01, HE08].

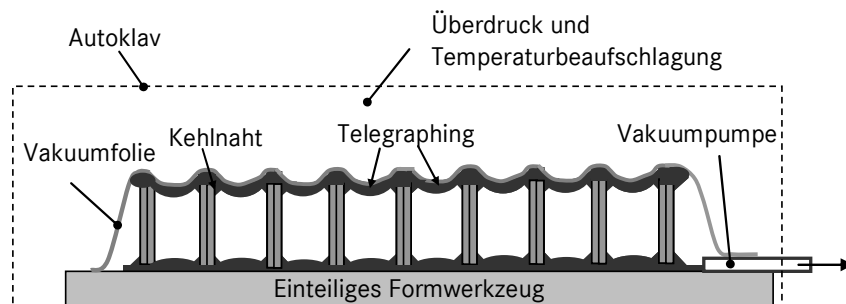


Abbildung 2.2: Sandwichbauteilherstellung durch Autoklavverfahren, angelehnt an [HE08]

Beide Verfahren eignen sich zur Herstellung von Sandwichbauteilen mit niedrigen Stückzahlen. Beispielsweise wird das Autoklavverfahren in der Luftfahrt zur Herstellung von Interieurbauteilen angewendet.

Beim **Resin Transfer Moulding (RTM)**, auch Harzinjektionsverfahren genannt, erfolgt die Imprägnierung der Deckschichten im Gegensatz zum Vakuumverfahren durch Überdruck in einem geschlossenen, beheizten Werkzeug. Für ein schnelles Füllen der Kavität, zur Vermeidung eines hohen Injektionsdrucks und zur vollständigen Faserimprägnierung werden Harzsysteme mit niedriger Viskosität eingesetzt. Die Infiltration und die Oberflächenqualität kann durch Anlegen eines zusätzlichen Vakuums verbessert werden [SC05].

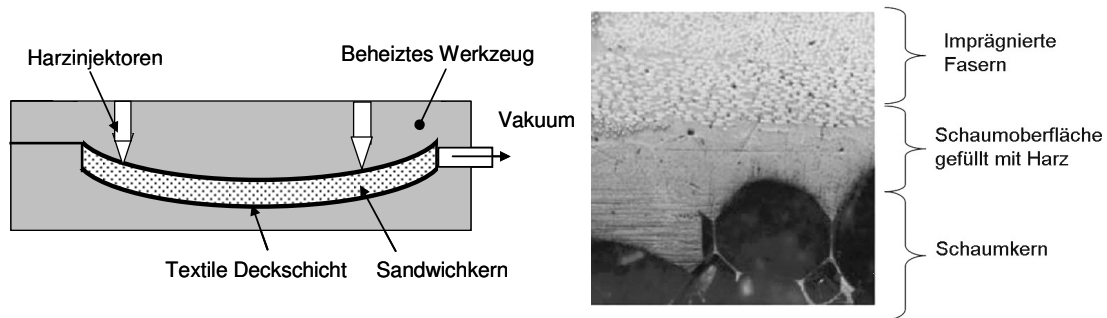


Abbildung 2.3: Sandwichbauteilherstellung im RTM-Verfahren (li.),
Querschnitt durch Sandwichprobe hergestellt im RTM-Verfahren [SC05] (re.)

Das RTM-Verfahren ist für Sandwichbauteile mit geschlossenporigen Schaumkernen geeignet. Abbildung 2.3 zeigt eine Mikroskopieaufnahme eines Sandwichverbundes mit Rohacell®-Schaumkern. Auf der glatten Sandwichoberfläche sind die imprägnierten Fasern zu erkennen. Zwischen dem geschlossenporigen Schaumkern und der Sandwichoberfläche ist die Ausbildung eines Zwischenbereichs zu sehen, bei dem die Oberfläche des Schaumkerns mit Harz gefüllt ist. Bei Verwendung von Wabenkernen führt der anliegende Überdruck zur Füllung der Zellen, wodurch Wabenstrukturen nur durch aufwendige Vorbehandlungen eingesetzt werden können. Die Technologie eignet sich für kleine und mittelgroße Stückzahlen mit hoher Oberflächenqualität [KA97, SC05]. Das RTM-Verfahren zur Herstellung von Sandwichbauteilen findet beispielsweise im Automobil-, Flugzeug- und Schiffsbau seine Anwendung.

Als **Reaction Injection Moulding (RIM)** werden Verfahren bezeichnet, bei denen die Aushärtung der reaktiven duroplastischen Matrix in einer geschlossenen Werkzeugkavität erfolgt. Im Automobilbau hat sich als Sonderverfahren das sogenannte **Baypreg®-Verfahren** für Trägerteile etabliert. Hierbei werden, wie in Abbildung 2.4 dargestellt, die konfektionierten Sandwichhalbzuge, bestehend aus Wabenkern (v. a. Papierwaben) und Deckschicht (v. a. Glas-Wirrvliese), mit einem Zwei-Komponenten-Polyurethan (PUR) besprüht. Bei einer Werkzeugtemperatur von 120 bis 140 °C und einer Pressenzeit von 60 bis 90 Sekunden erfolgt die Aushärtung der Matrix. Mit Hilfe eines anschließenden Arbeitsschrittes werden die Bauteile beispielsweise durch Presskaschieren mit einer Dekorware versehen. Typische Bauteilanwendungen sind Hutablagen, Ladeböden und Schiebedächer [PL11, HE04]. Nach [BA03] können Sandwichbauteile mit einem Flächengewicht ab 2 200 g/m² gefertigt werden.

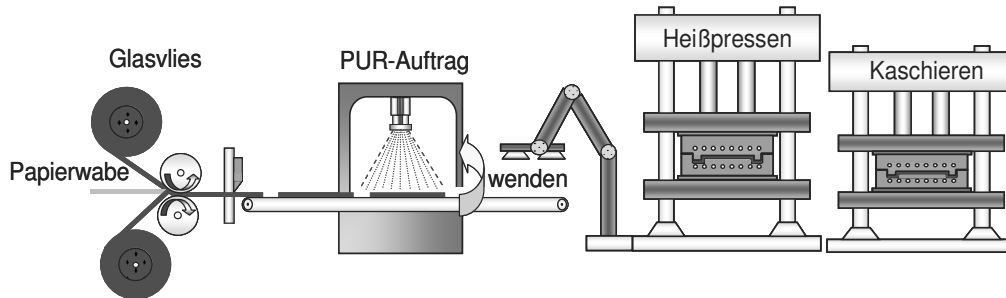


Abbildung 2.4: Sandwichbauteilherstellung durch RIM-Verfahren, angelehnt an [PL11, HE04]

Wie in Abbildung 2.5 ersichtlich, ergeben sich beim Baypreg[®]-Verfahren durch das Aufschäumen des Polyurethans geschlossene Oberflächen. Bei Verwendung großer Wabenzellen und leichter Glaswirlvliese kann das Eindringen der PUR-Matrix aufgrund der Gewichtserhöhung als Nachteil des Verfahrens angesehen werden (siehe linke Querschnittsaufnahme von Abbildung 2.5).

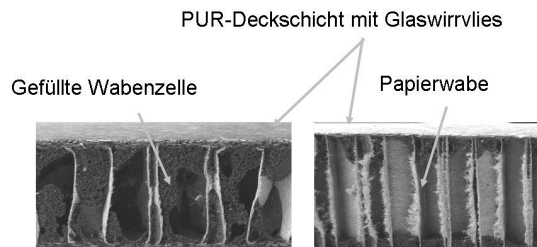


Abbildung 2.5: Querschnitt durch Sandwichproben hergestellt im Baypreg[®]-Verfahren

Wegen der kostengünstigen Halbzeugmaterialien, des hohen Automatisierungsgrades und der kurzen Zykluszeit wird das Baypreg[®]-Verfahren bei hohen Stückzahlen in der Automobilindustrie eingesetzt.

Beim **Thermoformen mit konsolidierten Deckschichthalbzeugen**, sogenannten Organoblechen, werden, im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Verfahren, thermoplastische Deckschichtmatrixes verwendet. Bei der Bauteilherstellung in mehreren Schritten erfolgt die Umformung der Deckschichten und des Kerns getrennt voneinander, was ein anschließendes Fügen der umgeformten Halbzeuge notwendig macht. Die Halbzeugumformung erfolgt durch Aufheizen und anschließendes Formpressen in einer kalten Werkzeugkavität. Nachteile des Verfahrens sind die Menge an benötigten Werkzeugen und die hohe Anzahl an Umformschritten [SC04].

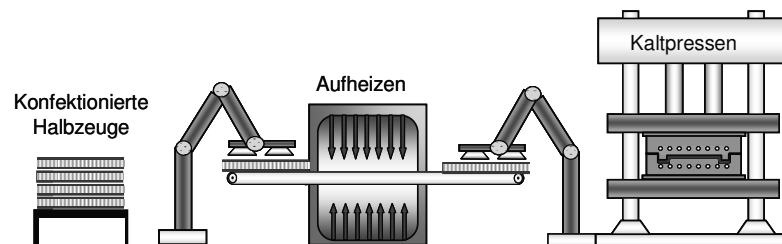


Abbildung 2.6: Sandwichbauteilherstellung durch einstufiges Thermoformen, angelehnt an [SO04]

Beim Sandwichumformen in einem Schritt werden, wie in Abbildung 2.6 schematisch dargestellt, die thermoplastischen konfektionierten Halbzeuge gleichzeitig in einem Infrarotstrahlungsfeld erwärmt und anschließend in einer Presse umgeformt, wobei sich die Deckschichten mit der Kernschicht verbinden. Die Herausforderung des Fertigungsprozesses stellt die Temperaturführung während der Aufheizphase dar, da ein vollständiges Aufschmelzen der Matrix erreicht werden muss, jedoch ein Schmelzen der thermoplastischen Kernschicht zu vermeiden ist [SO04, BR98]. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit des Einsatzes von Kernmaterialien mit hohem Schmelzpunkt, die allerdings zu den kostenintensiven Kernstrukturen zählen. In [SC04] wird als Beispiel eine Sitzschale mit Deckschichten aus Polyamid (PA) und Kohlenstofffasern (CF) sowie einem Polyetherimid-schaumkern (PEI) angeführt.

Das **Formpressen von Papierwaben und thermoplastischen faserverstärkten Deckschichten**, die die zentrale Technologie dieser Arbeit darstellt, wird in der Publikation [PL02] unter Verwendung von naturfasermattenverstärktem Thermoplasten (NMT) beschrieben. Wie in Abbildung 2.7 dargestellt, erfolgt die Bauteilherstellung durch gleichzeitiges Aufheizen der Halbzeuge (Papierwabenkern und NMT-Deckschichten) bei 200 °C und anschließendem Umformen im kalten Pressenwerkzeug. Durch das Aufschmelzen und Abkühlen der Polypropylenmatrix findet zum einen die Umformung der Sandwichhalbzeuge statt und zum anderen werden die Deckschichten mit dem Papierwabenkern verbunden.

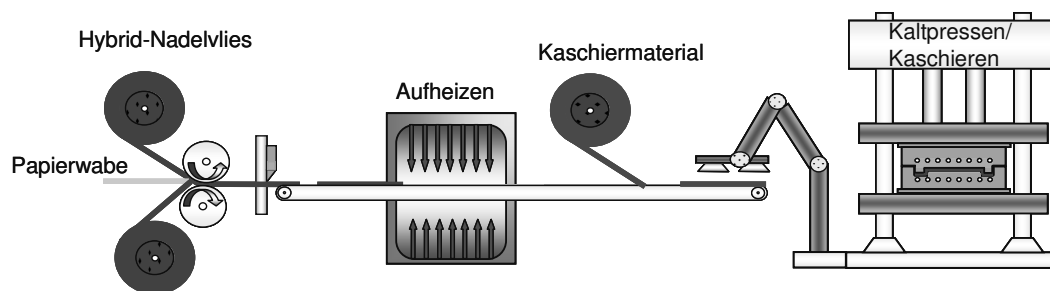


Abbildung 2.7: Papierwaben mit faserverstärkten Deckschichten, angelehnt an [PL02]

Das Aufbringen eines textilen Kaschiermaterials nach der Aufheizphase ermöglicht, im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Technologien, eine in situ Kaschierung auch von leichten, textilen Dekorwaren. In [PL02] wird des Weiteren angeführt, dass Forschungsaktivitäten zur Abstimmung der Halbzeuge und zur Prozessoptimierung notwendig sind, um die Anforderungen der Automobilindustrie zu erfüllen. Weitere Publikationen zur Herstellungstechnologie bzw. zur Materialcharakterisierung des Sandwichverbundes mit Papierwabenkern und thermoplastischen faserverstärkten Deckschichten sind nicht bekannt. In der Patentschrift [P-SP05] wird, identisch zur Veröffentlichung [PL02], ein Sandwichverbund bestehend aus Papierwabenkern und thermoplastischen Deckschichten in Form von Wirrvliesen beschrieben. Zur Deckschichtverstärkung ist der Einsatz von Naturfasern angeführt. Als Anwendungsbeispiel wird in der Offenlegungsschrift ein Dachhimmel in Sandwichbauweise angegeben. Der industrielle Einsatz dieses Sandwichverbundes beschränkt sich heutzutage auf die Herstellung ebener Ladeböden mit hohem Flächengewicht von ca. 3 000 g/m². Hieraus ist nachzuvollziehen, dass zur Erweiterung der Bauteilanwendungen Un-

tersuchungen des Werkstoffverhaltens bei niedrigeren Flächengewichten notwendig sind. Ebenfalls sind zur Herstellung geformter Bauteile Analysen bezüglich des Umformverhaltens der Papierwaben sowie darauf angepasste Werkzeug- und Fertigungstechnologien erforderlich.

2.3 Kriterienvergleich der Sandwichtechnologien

Anhand des in Tabelle 2.1 dargestellten Kriterienvergleichs sind die beschriebenen Technologien zusammengefasst. Bei der qualitativen Bewertung der Sandwichverbundsysteme wurden die Materialpaarungen aus den zuvor angeführten Beispielen berücksichtigt. Sonderverfahren können zu Abweichungen führen.

Tabelle 2.1: Technologien zur Sandwichbauteilherstellung im Vergleich

	Deckschichtmatrix				
	Duroplast			Thermoplast	
	Vakuum- und Autoklavverfahren	RTM-Verfahren	Baypreg®-Verfahren	Einstufiges Thermoformen konsolidierter Deckschichten	Formpressen von Papierwaben mit faserverstärkten Deckschichten
Mechanische Eigenschaften	sehr hoch	sehr hoch	hoch	hoch	niedrig #
Mögliche Kernstrukturen	Waben- und Schaumkern	überwiegend Schaumkern	Waben- und Schaumkern	Waben- und Schaumkern	Wabenkern #
Oberflächenbeschaffenheit	einseitig Telegraphing	häufig Sichtoberfläche	anschl. Kaschierung	glatte Oberfläche	in situ # Kaschierung
Schweißbarkeit	nicht möglich	nicht möglich	nicht möglich	möglich	möglich #
Recycling	nicht möglich	nicht möglich	nicht möglich	möglich	möglich #
Prozessrobustheit	niedrig	hoch	sehr hoch	hoch	sehr hoch #
Zykluszeit	sehr lang ° / lang *	lang	kurz	sehr kurz	sehr kurz #
In situ Kaschierung	nicht möglich	nicht möglich	nicht möglich	bei dünner, textiler Dekorware nicht möglich	möglich #
Halbzeugkosten	sehr hoch	sehr hoch	niedrig	sehr hoch	sehr niedrig #
Anlageninvestment	sehr gering ° / hoch *	hoch	sehr hoch	hoch	hoch
Werkzeuginvestment	niedrig	niedrig	hoch	hoch	hoch
Automatisierbarkeit	niedrig	hoch	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch
Reifegrad	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch	hoch	niedrig #

° Vakuumverfahren, * Autoklavverfahren, # Gegenstand der Arbeit

Wie aus dem Vergleich der Technologien ersichtlich, eignen sich Papierwaben mit thermoplastischen faserverstärkten Deckschichten für die Anwendung im Fahrzeuginterieur aufgrund mehrerer Aspekte. Die hohe Automatisierbarkeit in Verbindung mit der niedrigen Zykluszeit ermöglicht die Sicherstellung der Qualitätsansprüche und der notwendigen Stückzahlen für Großserienanwendungen. Die in situ Kaschierung erlaubt eine Verschlankung der Prozessschritte, wodurch eine Kosteneinsparung ermöglicht wird. Des Weiteren wird durch die thermoplastische Matrix die Verbindungsherstellung zwischen Sandwichträger und Fügeelementen durch Schweißen möglich. Die niedrigen Halbzeugkosten gestatten eine weitgehende Materialsubstitution konventioneller Trägermaterialien.

3 Eigenschaften von Papierwaben

Papier als Werkstoff findet heutzutage in verschiedensten Branchen und Produkten seinen Einsatz. Das natürlich nachwachsende Ausgangsmaterial sowie die Wiederverwertbarkeit stellen zwei herausragende und bekannte Eigenschaften des Papiers dar. Die Betrachtung der mechanischen Materialeigenschaften zeigt einen weiteren oft unterschätzten Vorteil des Werkstoffs Papier auf. Recyclingpapier erreicht beispielsweise die Zugsteifigkeit und -festigkeit eines Polypropylens bei gleichzeitig geringerer Dichte. Aufgrund der Herstellungstechnologie können Papiere mit niedrigen Dicken, vergleichbar zu Polymerfolien, hergestellt werden. Diese Materialeigenschaften begünstigen den Einsatz von Papier, basierend auf Cellulose, als ökologisches Kernmaterial in Sandwichverbunden.

3.1 Kernmaterialien basierend auf Cellulose

Im Folgenden werden die eingesetzten Papiersorten zur Herstellung von Papierwaben mit ihren Eigenschaften beschrieben sowie die Fertigung der Wellsteg- und Expansionswaben vorgestellt.

3.1.1 Papiergrammatur

Die Angabe der flächenbezogenen Masse von Papier erfolgt gewöhnlich in g/m^2 und wird als Papiergrammatur Γ bezeichnet. Papierdichten und Papierdicken werden lediglich als Zusatzgrößen aufgeführt. Die Papierdichte befindet sich in einem Bereich von 300 bis 1 000 kg/m^3 , wobei die Dichte der reinen Cellulose bei 1 500 kg/m^3 liegt [EK09].

3.1.2 Papiere für die Wabenherstellung

Die Art der Aufbereitung bzw. die Länge und die Bindungsart der Cellulosefasern dominieren den Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von Papier [JA80]. Papiersorten lassen sich anhand ihrer Ausgangsmaterialien in drei Hauptgruppen unterteilen. Die Aufbereitung der Holzhackschnitzel sowie die Unterscheidung der verwendeten organischen Ausgangsmaterialien ermöglichen die Klassifizierung in folgende Hauptgruppen [KA06]:

- Hadern und hadernhaltige Papiere
- Holzhaltige Papiere
- Holzfremde Papiere

Lumpenfasern aus Hanf, Sisal, Flachs oder Baumwolle bilden das Ausgangsprodukt für die Herstellung **hadernhaltiger Papiere**. Im Vergleich zu holzhaltigen Papieren zeichnen sich diese durch längere Fasern aus, wodurch Gebrauchs- und Verarbeitungsqualität sowie Papierfestigkeit positiv beeinflusst werden. Üblicherweise werden aus diesem hochwertigen Papiermaterial Banknoten und Urkunden gefertigt [GO99].

Holzhaltige Papiere enthalten neben gebleichtem oder ungebleichtem Zellstoff mindestens fünf Massenprozent Holzschliff. Bei der mechanischen Aufbereitung der Holzhackschnitzel zum Holzschliff findet eine Verkürzung der Faserlänge statt. Zeitungspapier ist eine typische Anwendung holzhaltiger Papiere [PA99, L10].

Zellstoff stellt den Hauptbestandteil von **holzfreien Papieren** dar und ist das Produkt aus dem chemischen Aufschluss des Lignins aus den Hackschnitzel [BL10]. Holzfreies Papier besteht im Vergleich zu holzhaltigem Papier aus längeren und reißfesteren Fasern und kann aus diesem Grund häufiger recycelt werden. Das Mischungsverhältnis aus Zellstoff und Holzschliff entscheidet über die Papierqualität [KA06, GO99].

Bei der Herstellung von Papierwaben werden heutzutage ausschließlich Recyclingpapiere wie Wellenstoff und Testliner verwendet. Im Folgenden wird das Kraftsackpapier neben den etablierten Papiersorten für die Wabenherstellung auf seine Eigenschaften als Kernmaterial untersucht. Die verwendeten Papiere lassen sich anhand ihres Recyclatanteils und ihrer Ausgangsmaterialien in folgende Papiersorten unterteilen:

- Wellenstoff (WS)
- Testliner (TL)
- Kraftpapier (KP)/Kraftsackpapier (KSP)

Bei der Erzeugung von **Wellenstoff** wird ausschließlich auf recycelte Altpapiersorten zurückgegriffen. Durch die Wiederaufbereitung findet eine Verkürzung der Cellulosefasern statt [CO80]. Wellenstoff wird üblicherweise in der Verpackungsindustrie als Wellenlage von Wellpappen eingesetzt, wobei das Papier in einem Grammaturbereich von 90 bis 180 g/m² hergestellt wird. Als Ausgangsmaterial findet gemischtes Altpapier und Kaufhauspapier seine Anwendung [GO99, BL10].

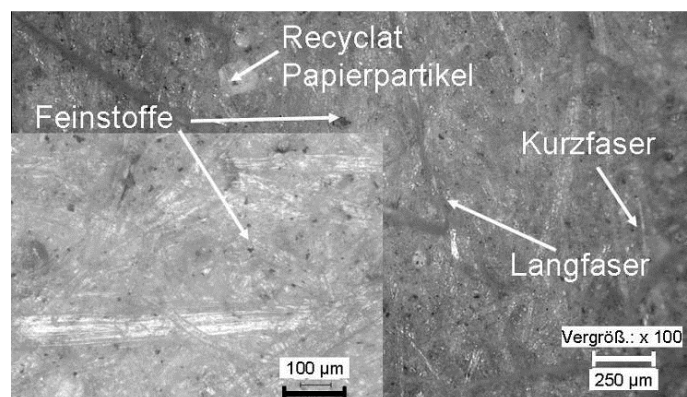


Abbildung 3.1: Mikroskopieaufnahme Wellenstoff

Abbildung 3.1 zeigt eine Mikroskopieaufnahme des Wellenstoffs, die aus den nachfolgend untersuchten Papierwaben entnommen wurde. Aufgrund der mechanischen Aufbereitung des Holz-

schliffs und der Verwendung von Recyclingpapier zeigen die Papierbestandteile ein inhomogenes Erscheinungsbild. Neben Lang- und Kurzfasern sind Feinstoffe wie Schleim- und Mehlstoffe, die durch mechanischen Aufschluss der Holzhackschnitzel entstehen, zu erkennen. Ebenfalls sind in den Aufnahmen Papierpartikel des Altpapiers zu sehen.

Das Ausgangsmaterial bei der Erzeugung von **Testliner** besteht nahezu ausschließlich aus Altpapierstoff, z. B. aus Illustrierten, Zeitungen und Kartonagen [BL10]. Hierbei ist der Anteil des Zellstoffs im Vergleich zum Kraftpapier gering. Testliner wird primär als Deckenpapier bei der Herstellung von Wellpappe verwendet und besitzt im Vergleich zum Wellenstoff höhere mechanische Eigenschaften [GO99].

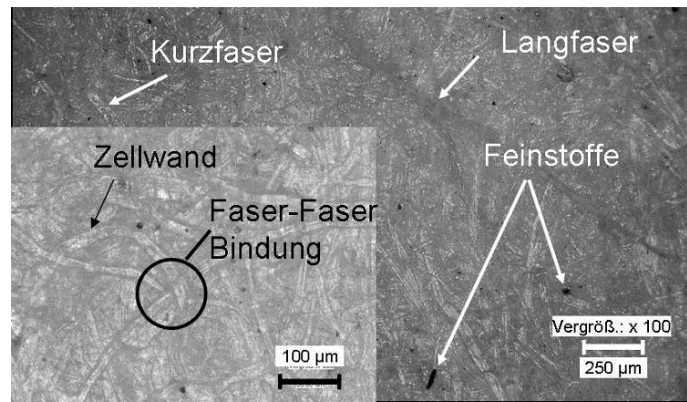


Abbildung 3.2: Mikroskopieaufnahme Testliner

In der Mikroskopieaufnahme in Abbildung 3.2 ist aufgrund des beigemengten Zellstoffs ein deutlich geringerer Feinstoffanteil im Vergleich zum Wellenstoff zu erkennen. Die Mikroskopieaufnahme zeigt des Weiteren eine deutlich ausgeprägte Faser-Faser-Bindung, die für die Papierfestigkeit entscheidend ist. Durch die erhöhte Anzahl der Bindungen steigen die mechanischen Eigenschaften des Papiers, wodurch der Einfluss der Langfasern deutlich wird [GR11].

Frischer Zellstoff mit einem Mindestanteil von 80 % ist das Ausgangsmaterial für **Kraftpapiere**. Das Papier besitzt aufgrund des hohen Zellstoffanteils eine hohe Geschmeidigkeit und Festigkeit. Kraftpapier wird üblicherweise in einem Grammaturbereich von 60 bis 115 g/m² hergestellt und liegt damit unter dem Grammaturbereich des Wellenstoffs [VE09, BL10, GO99]. Kraftpapiere und Kraftsackpapiere gehören wegen des hohen Zellstoffanteils zur Hauptgruppe der holzfreien Papiere und werden üblicherweise nicht als Papiermaterial für die Wabenherstellung verwendet.

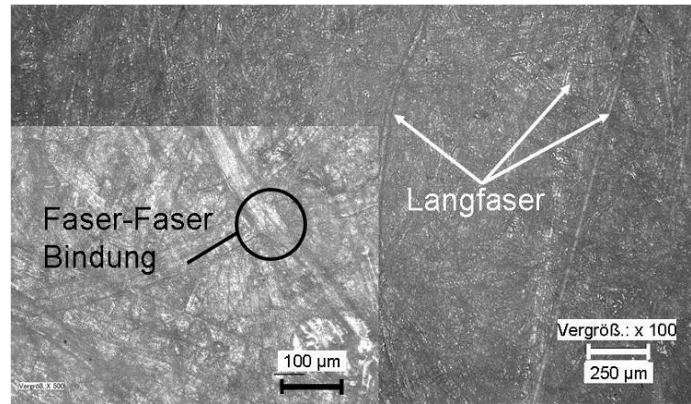


Abbildung 3.3: Mikroskopieaufnahme Kraftsackpapier

Im Gegensatz zu recycelten Papieren zeigt die Mikroskopieaufnahme in Abbildung 3.3 eine homogene Verteilung der Cellulosefasern sowie eine durchschnittlich höhere Faserlänge. Aufgrund der chemischen Aufbereitung des Zellstoffs ist nahezu kein feinteiliges Material im Vergleich zu den Recyclingpapieren zu erkennen.

3.1.3 Papierwabenherstellung

Hexagonal- und Wellstegwaben sind die meistverbreiteten Papierwaben am Markt. Hexagonalwaben finden ihre ursprüngliche Anwendung in der Möbel- und Türenindustrie. Die Wellpappe, die das Ausgangsmaterial der Wellstegwabe bildet, ist das klassische Kartonagenmaterial der Verpackungsindustrie. Mit zunehmendem Anteil gewinnt die Automobilindustrie als Abnehmer an Bedeutung. Papierwaben haben sich als Kernmaterialien beim Baypreg[®]-Verfahren (siehe Kapitel 2.2) zur Herstellung von Kofferraumladeböden aufgrund ihres Leichtbaupotenzials und ihrer niedrigen Materialkosten etabliert.

Wegen der aktuell begrenzten Verfügbarkeit am Markt wird auf die Herstellung von Faltkernen, bei denen ebenfalls Recyclingpapier verwendet werden kann, nicht eingegangen. Nähere Informationen über deren kontinuierliche Herstellung und deren Eigenschaften sind aus [KE04, HE08, KE09, KT09, FI09, GR10] zu entnehmen.

3.1.3.1 Wellstegwaben

Wellstegwaben werden wegen ihrer charakteristischen Zellenform auch als stehende Wellen oder Sinuswaben bezeichnet. In Abbildung 3.4 sind die Schritte der Wellstegwabenfertigung dargestellt. Die Fertigung lässt sich in die Produktion der einseitigen Wellpappe, das Verkleben zu einem Wabenblock und das Zusägen zu einer Wellstegwabenplatte unterteilen.

Zur Erzeugung der einseitigen Wellpappe wird das Papier durch Vorheizzyylinder in einen Temperaturbereich von 85 bis 95 °C überführt und durch eine Dampfsprüheinrichtung mit Feuchtigkeit beaufschlagt [WO77]. Das vorbehandelte Papier wird den beheizten Riffelwalzen zugeführt, wobei Walzentemperaturen über 180 °C Versprödungen und Verhornungen verursachen [LE79]. Unter Zuführung von Wärme, Feuchtigkeit und durch die Riffelwalzenkontur wird das Wellenpapier zur genormten Wellenart geformt. Das Wellenpapier wird darauffolgend mit einer glatten Papierbahn zur einseitigen Wellpappe verleimt. Die anschließende Trocknung und das Aufrollen

schließen die Herstellung der einseitigen Wellpappe ab. Die Wellpappenherstellung erfolgt üblicherweise nicht beim Papierwabenhersteller, sondern wird von diesem zugekauft.

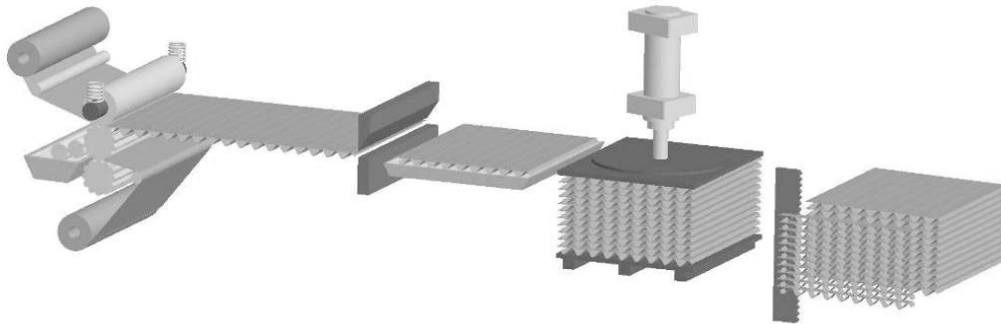


Abbildung 3.4: Herstellungsverfahren der Wellstegwaben, angelehnt an [BR09]

Beim Wabenhersteller wird die Wellpappe auf Zielmaß konfektioniert und durch ein Leimbad geführt. Unter Druckbeaufschlagung erfolgt die Verleimung der gestapelten Wellpappen zu einem Wabenblock. Mit Hilfe von Bandsägen werden die Wellstegwabenplatten aus dem Wabenblock getrennt, wodurch eine raue Oberfläche an der Schnittfläche entsteht. Aufgrund der benötigten Stabilität beim Sägen sind Wellstegwaben mit kleinen Zellgrößen ab 3 mm und mit großen Zellen ab 5 mm Wabendicke herstellbar. Wegen des diskontinuierlichen Herstellungsverfahrens und der meist nicht vollautomatisierten Produktion sowie des höheren Materialeinsatzes stellen Wellstegwaben im Vergleich zu Expansionswaben das kostenintensivere Kernmaterial dar. Für die folgenden Versuchsreihen wurden die Wellstegwaben von der Firma WF Wabenfabrik bezogen.

Ein alternatives Herstellungsverfahren von Wellstegwaben wird in [PF02, PF04] aufgezeigt. Die doppelt aneinanderliegenden Stege ohne Bindung zueinander stellen die Besonderheit dieser Wellstegwabe dar. Im Rahmen dieser Arbeit wird dieser Wellstegwabentyp nicht näher betrachtet.

3.1.3.2 Expansionswaben

Die Fertigung der Expansionswaben erfolgt im Gegensatz zu den Wellstegwaben direkt von der Papierrolle im kontinuierlichen Herstellungsprozess beim Wabenproduzenten. Wegen ihrer Geometrie werden Expansionswaben auch als Hexagonalwaben bezeichnet. Wie in Abbildung 3.5 dargestellt, werden die Papierbahnen von bis zu zwölf Rollen gleichzeitig abgewickelt [BR09]. Der Abstand der aufgetragenen Klebstoffstreifen definiert die spätere Zellgröße. Durch Beaufschlagung von Druck findet die Verleimung der einzelnen Papierbahnen statt. Das Zuschneiden der verklebten Papierbahnen definiert die Wabendicke. Im Gegensatz zu Wellstegwaben besitzen Hexagonalwaben, durch die Ablängung mit einem Schneidmesser, eine glatte Schnittfläche. Durch die Verklebung der abgelängten Streifen wird ein endloser Hobe (honeycomb before expansion) erzeugt, welcher durch ein nachgeschaltetes Expansions- und Trocknungsaggregat expandiert wird. Zur Reduzierung der Transportkosten kann die Expansion der Kernstruktur im verarbeitenden Betrieb erfolgen [BR09]. Der Papierhobe wird hierbei mit Feuchtigkeit beaufschlagt und zur Hexagonalstruktur gereckt. Durch anschließende Trocknung erfolgt die Stabilisierung der Hexagonalgeometrie.

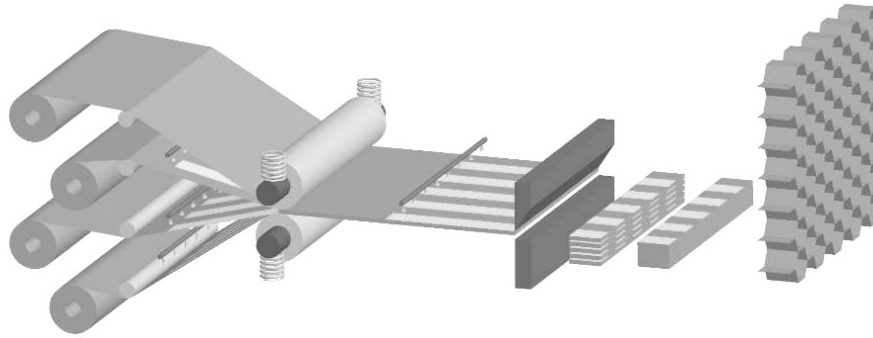


Abbildung 3.5: Herstellungsverfahren der Hexagonalwaben, angelehnt an [BR09]

Aufgrund der hygroskopischen Eigenschaft des Papiers und der unstabilierten Struktur besteht bei hoher Luftfeuchtigkeit die Gefahr des Schrumpfens (teilweise Rückbildung in den unexpandierten Zustand), wodurch die Lagerung erschwert wird. Die untere Grenze der herstellbaren Wabendicke liegt bei 6 mm, wobei Zellweiten von 8 bis 40 mm realisierbar sind [BR09]. Die Dichte von Expansionswaben ist aufgrund ihrer Zellweite im Regelfall deutlich niedriger als die der Wellstegwaben. Die im Folgenden untersuchten Expansionswaben wurden von der Axxion Group bezogen.

3.1.4 Mechanische Eigenschaften des Werkstoffs Papier

Die Sieb- und die wiederholten Walzvorgänge bei der Papierherstellung bewirken eine Vorzugsrichtung der Cellulosefasern parallel zur MD-Richtung (Maschinenrichtung), wodurch sich höhere Papierfestigkeiten und -steifigkeiten im Vergleich zur CD-Richtung (senkrecht zur Maschinenrichtung) einstellen [WI99]. Aufgrund dieser richtungsabhängigen Materialeigenschaften wird Papier als orthotroper Werkstoff betrachtet.

In Tabelle 3.1 sind die gemittelten mechanischen Kennwerte sowie die Kraft-Dehnungs-Verläufe aus den Zugversuchen, angelehnt an [DIN EN ISO 1924-2], vom Testliner mit einer Grammatur von 115 g/m² und vom Kraftsackpapier mit 90 g/m² dargestellt. Beide betrachteten Papiersorten weisen höhere mechanische Eigenschaften in Maschinenrichtung sowie höhere Streckdehnungen quer zur Maschinenrichtung auf. Die Versuchsparameter zu den durchgeführten Zugversuchen sind im Anhang Kapitel 3 hinterlegt.

Tabelle 3.1: Zugkennwerte von Papier

Ausrichtung		MD	CD
Papiersorte		Testliner (TL) (115 g/m ² ; 0,17 mm; 0,68 g/cm ³)	
Zugfestigkeit [MPa]		37	18
Zugmodul [MPa]		5104	2016
Papiersorte		Kraftsackpapier (KSP) (90 g/m ² ; 0,11mm; 0,82 g/cm ³)	
Zugfestigkeit [MPa]		31	12
Zugmodul [MPa]		4529	1164

Zugprüfungen vom Testliner mit einer Papiergrammatur von 115 g/m² wurden ebenfalls in der Dissertationsschrift von Pohl [PO09] durchgeführt. Die vorgestellten Papierkennwerte sind im Vergleich zu denen aus Tabelle 3.1 höher, wodurch die Qualitätsschwankungen innerhalb einer Papiersorte, beispielsweise durch Faserverkürzungen aufgrund des Recyclings, deutlich werden.

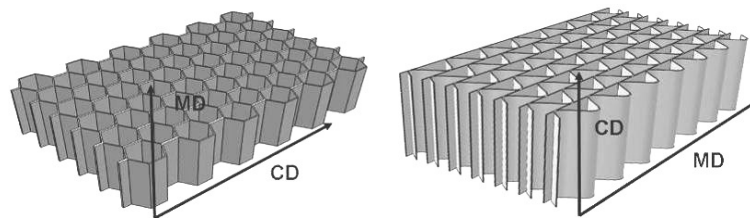


Abbildung 3.6: Papierausrichtung im Wabenkern

Wie in Abbildung 3.6 dargestellt, ist die Papierausrichtung beider betrachteten Wabentypen fertigungsbedingt verschieden. Unter Berücksichtigung der höheren mechanischen Eigenschaften in MD-Richtung, ist bei Wellstegwaben von einer Steigerung der mechanischen Zug- und Druckeigenschaften durch eine 90°-Drehung des Papiers auszugehen.

3.1.5 Klebstoffe für die Wabenherstellung

Bei der Verleimung der einseitigen Wellpappe zu den Wabenkernen werden überwiegend Wasserglasklebstoffe (WG) eingesetzt. Natriumsilikate werden wegen ihrer Wasserlöslichkeit als Wassergläser bezeichnet. Durch die Verschmelzung von Natriumkarbonat mit reinem Quarzsand wird Natriumsilikat hergestellt. Die Lagerung des Natriumsilikats in Wasser, bei gleichzeitiger Einwirkung von Hitze und Druck, führt zur Bildung der zähflüssigen Wasserglaslösung. Die Aushärtung des Wasserglasklebstoffs erfolgt durch Trocknung, wobei gleichzeitig eine Polykondensationsreaktion unter Einwirkung des in der Luft enthaltenen Kohlenstoffdioxids stattfindet [CH94, SR05].

Neben den einseitigen Wellpappen, die mit Wasserglas zu Wellstegwaben verleimt sind, werden in den folgenden Versuchsreihen Wellstegwaben mit Weißleim (WL) untersucht. Alle betrachte-

ten Expansionswaben sind ebenfalls mit einem Polyvinylacetatklebstoff (PVAc-Klebstoff) verklebt worden. Aufgrund der weißen Farbe werden Polyvinylacetatklebstoffe auch als Weißleime bezeichnet. PVAc-Leim ist ein thermoplastischer Klebstoff, welcher durch Polymerisation von Vinylacetat gewonnen wird. Die Ausbildung der Klebefläche findet durch Verdunstung des Dispersionsmittels Wasser statt, wodurch sich die Kunststoffbestandteile aneinander annähern und sich eine plastische Leimschicht ausbildet [JO09, DU02].

3.2 Charakterisierung der Papierwabengeometrie

Nachfolgend wird die geometrische Gestalt der Hexagonal- und Wellstegwabenzellen mathematisch beschrieben, wodurch die Berechnung der mechanischen Wabenkennwerte durch analytische Ansätze ermöglicht wird.

3.2.1 Nomenklatur der Papierwaben

Papierwaben lassen sich entsprechend ihres fertigungsbedingten Aufbaus, wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben, in Wellsteg- und Hexagonalwaben unterteilen. Durch folgende Material- und Geometrieparameter sind die Papierwabenkerne eindeutig definiert:

- Wabenzellentyp: z. B. A-Welle, C-Welle, Hex
- Papiersorte: z. B. TL (Testliner), KSP (Kraftsackpapier), WS (Wellenstoff)
- Papiergrammatur: z. B. 90 g/m², 115 g/m²
- Klebstoffart: z. B. WG (Wasserglas), WL (Weißleim)

Die Wabenkerne werden im Folgenden über die Nomenklatur bezeichnet:

- Wellstegwaben: A ~ TL-90 WG
- Hexagonalwaben: Hex TL-150 WG

Die Abkürzung der Hexagonalwaben sieht keine Angabe der Zellweite vor, da im Folgenden nur Wabenkerne mit einer Zellweite von 8 mm betrachtet werden.

3.2.2 Geometrische Beschreibung der Wellstegwaben

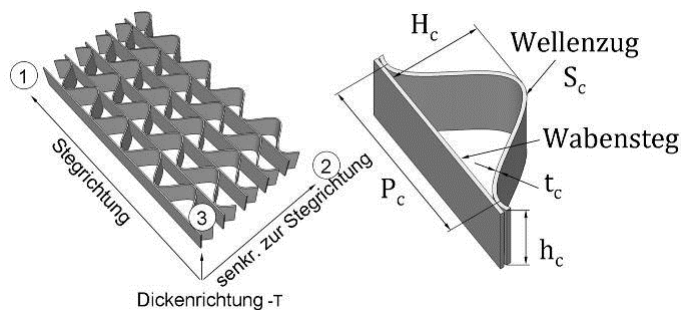
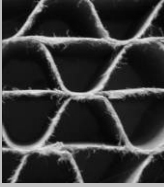
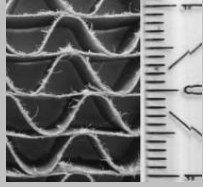
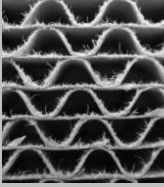
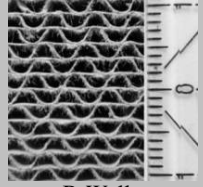


Abbildung 3.7: Geometrische Größen einer Wellstegwabe

Die geometrische Gestalt der Wellstegwabe (siehe Abbildung 3.7) wird durch das Ausgangsmaterial der einseitigen Wellpappe festgelegt. In [DIN 55468], siehe Tabelle 3.2, werden Wellpappen anhand ihrer geometrischen Dimension in Klassen unterteilt. Die Parameter zur Beschreibung und zur Klassifizierung der Wellpappbahnen sind zum einen die Wellenhöhe H_c und zum anderen

die Wellenteilung P_c , wobei die Wellenhöhe den maximalen Abstand des Wellenzuges vom linearen Steg beschreibt und die Wellenteilung der projizierten Länge eines Wellenzugs entspricht.

Tabelle 3.2: Klassifizierung der Wellpappe nach [DIN 55468]

Wellenart	Bezeichnung	Wellenteilung P_c [mm]	Wellenhöhe H_c [mm]	Wellentypen	
					
G-Welle	k. A.	$\leq 1,8$	$\leq 0,55$		
F-Welle	Miniwelle	1,9 bis 2,6	0,6 bis 0,9		
E-Welle	Feinstwelle	3,0 bis 3,5	1,0 bis 1,8		
D-Welle	Midiwelle	3,8 bis 4,8	1,9 bis 2,1		
B-Welle	Feinwelle	5,5 bis 6,5	2,2 bis 3,0		
C-Welle	Mittelwelle	6,8 bis 7,9	3,1 bis 3,9		
A-Welle	Grobwelle	8,0 bis 9,5	4,0 bis 4,9		
K-Welle	k. A.	$\geq 10,0$	$\geq 5,0$		

Der Materialbedarf einer Wellstegwabe lässt sich in wiederkehrende Segmente, sogenannte Einheitszellen, unterteilen, welche aus dem Stegsegment P_c und aus dem Wellenzugsegment S_c zusammengesetzt sind. Der Verlauf des Wellenzugs kann über eine Sinusfunktion in Abhängigkeit der Wellenhöhe H_c und Wellenteilung P_c abgebildet werden:

$$y = f(x) = \frac{H_c}{2} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{P_c} \cdot x\right) \quad (3.1)$$

In Abbildung 3.8 ist eine maßstabgetreue Überlagerung einer Fotoaufnahme mit einem Funktionsverlauf aus Gl. (3.1) dargestellt. Herstellerangaben für Wellenhöhe und Wellenteilung sind als Eingangsgrößen für die Abbildung des Funktionsverlaufs berücksichtigt worden [D-WF11]. Die Überlagerung zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen Wellenzug und Funktionsverlauf.

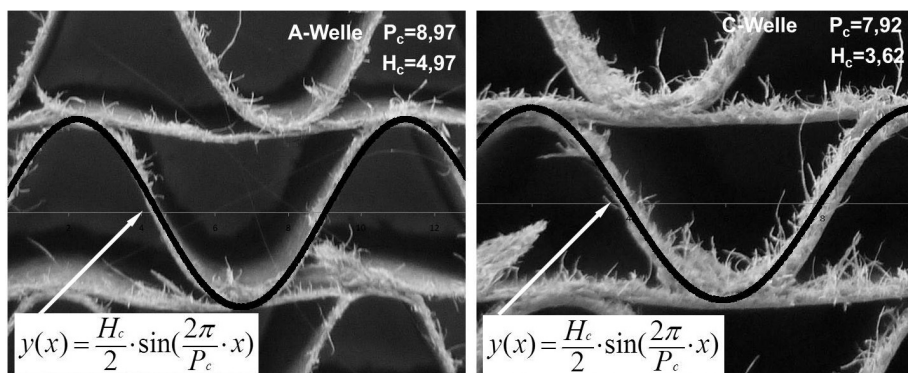


Abbildung 3.8: Verlauf eines Wellenzugs im Wabenkern

In [PO09] wird eine Alternative zur mathematischen Beschreibung des geometrischen Verlaufs der Wellpappe aufgezeigt. In der Betrachtung nach Pohl wird der Wellenzugverlauf in Kreisbögen und Tangentelemente unterteilt. Die Überprüfung der von Pohl vorgestellten Methode führt bei den betrachteten Kernmaterialien zu einer Verschlechterung der Funktionsüberlagerung. Ein ho-

her beaufschlagter Druck während der Verklebung der einseitigen Wellpappe zu einem Wabenblock kann zu einer ausgeprägten Stauchung des Wellenzuges und somit zur Vergrößerung der Klebefläche führen. Bei der mathematischen Beschreibung solch eines Funktionsverlaufs kann die Methode nach Pohl - aufgrund der verwendeten Kreisbögen - vorteilhaft sein.

Die Bestimmung der Wellenzuglänge S_c lässt sich durch folgenden Zusammenhang durchführen:

$$S_c = \int_a^b \sqrt{1 + y'^2(x)} dx \quad (3.2)$$

Gl. (3.2) führt unter Verwendung des sinusförmigen Funktionsverlaufs aus Gl. (3.1) auf ein nicht elementar lösbares elliptisches Integral. Daher ist S_c durch Approximation eines numerischen Ansatzes mit hinreichend vielen Polygonzügen zu bestimmen:

$$S_c = \sum_{j=1}^n |\bar{x}(t_j) - \bar{x}(t_{j-1})| \quad (3.3)$$

Der europäische Verband der Wellpappen-Fabrikanten FEFCO veröffentlichte in [FE09] eine Alternative zur Berechnung der Wellenzuglänge S_c in Abhängigkeit des experimentell bestimmten Take-up Faktors. Hierbei wird die Wellenzuglänge über das Produkt aus Take-up Faktor und Wabensteglänge berechnet. Der angegebene Bereich des Take-up Faktors beschränkt sich auf definierte Wellenhöhen einzelner Wellenarten, wodurch keine Berechnung der Wellenzuglänge in Abhängigkeit der Wellenteilung und der Wellenhöhe möglich ist. Im Folgenden wird eine einfache analytische Gleichung zur Bestimmung der Wellenzuglänge in Abhängigkeit von Wellenteilung und Wellenhöhe vorgestellt. Durch Regressionsanalysen, basierend auf den numerisch gewonnenen Ergebnissen von Gl. (3.3), ist eine analytisch erfassbare Gleichung (3.4) in Abhängigkeit der Wellenhöhe und der Wellenteilung ermittelt worden.

$$S_c = \sqrt{\frac{22}{5} \cdot H_c \cdot P_c} \quad (3.4)$$

In Abbildung 3.9 sind die Wellenzuglängen aus den numerischen (3.3) und analytischen (3.4) Ansätzen gegenübergestellt. Die dargestellten Wellenzuglängen bilden sich aus den jeweiligen maximalen, mittleren und minimalen Wellenhöhen und Wellenteilungen (definiert nach [DIN 55468]) der abgebildeten Wellenarten. Die durchschnittliche Abweichung beschreibt die gemittelte prozentuale Differenz zwischen den Wellenzuglängen - ermittelt aus der numerischen und analytischen Methode - für die drei veranschlagten geometrischen Paarungen der Wellenhöhen und Wellenteilungen.

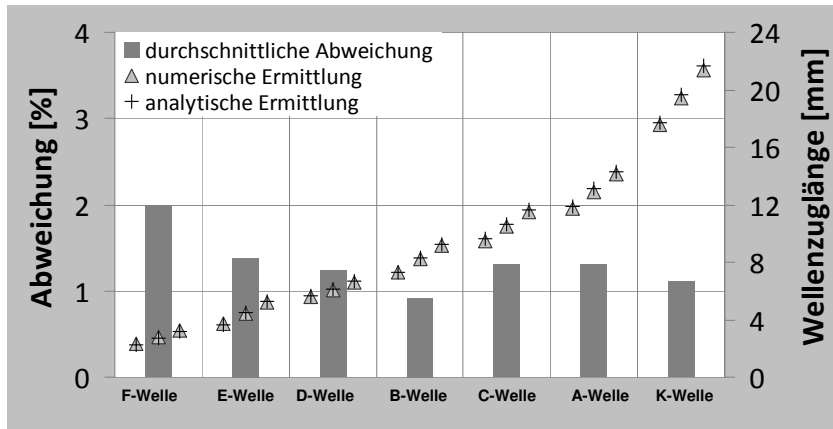


Abbildung 3.9: Vergleich numerischer und analytischer Wellenzuglängen

Aufgrund der geringen Abweichung der Ergebnisse beider Methoden wird im Folgenden zur Bestimmung der Wellenzuglängen die analytische Methode durch Näherungsgleichung (3.4) verwendet.

3.2.3 Berechnung der Wellstegwabendichte

Die Wabenkerndichte lässt sich aus der Grundfläche der Einheitszelle A_s , der senkrecht stehenden Wabenoberfläche A_c und der verwendeten Materialdichte ρ_s nach [ZE97, GI97] bestimmen.

$$\rho_c = \frac{A_c}{A_s} \rho_s \quad (3.5)$$

Bezogen auf die Geometrie der Wellstegwabe ergibt sich hieraus folgende Gleichung:

$$\rho_c = \frac{(P_c + S_c)}{P_c \cdot H_c} t_c \cdot \rho_s \quad (3.6)$$

In Abhängigkeit der Papiergrammatur Γ lässt sich nachstehender Term aus Gl. (3.6) bilden:

$$\rho_c = \frac{(P_c + S_c)}{P_c \cdot H_c} \Gamma \quad (3.7)$$

Unter Berücksichtigung der eingeführten Gl. (3.4), zur Bestimmung der Wellenzuglängen, kann die Dichte einer Wellstegwabe durch Gl. (3.8) berechnet werden.

$$\rho_c = \frac{\left(P_c + \sqrt{\frac{22}{5} \cdot H_c \cdot P_c} \right)}{P_c \cdot H_c} \Gamma < \frac{\left(P_c + \sqrt{\frac{22}{5} \cdot H_c \cdot P_c} \right)}{P_c \cdot H_c} \Gamma \cdot (1 + \varphi_K) \quad (3.8)$$

Der Vergleich der theoretisch berechneten Kerndichten zu den gravimetrisch bestimmten, zeigt eine positive Abweichung von 6 bis 34 Prozent. Wellstegwaben mit kleinen Zellgrößen weisen aufgrund des höheren flächenbezogenen Klebstoffauftrags eine höhere Abweichung zur theoretisch bestimmten Kerndichte auf. Die Druckbeaufschlagung während der Wabenblockverleimung

führt des Weiteren zu einer Zunahme der Kerndichte. Die Anpassung der theoretischen zur gewogenen Kerndichte kann mit Hilfe des Gewichtsfaktors φ_K erfolgen, wobei dieser im Bereich von $0,06 < \varphi_K < 0,34$ liegt. Im Anhang Kapitel 3 sind die gewogenen Kerndichten der betrachteten Papierwaben hinterlegt.

3.2.4 Geometrische Beschreibung der Expansionswabe

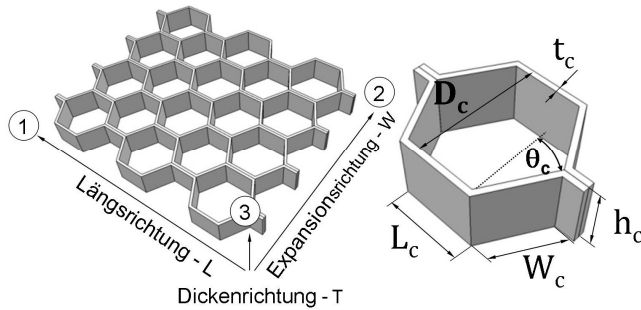


Abbildung 3.10: Geometrische Größen einer Expansionswabe

Die wiederkehrenden sechseckigen Strukturen sind das charakteristische Merkmal einer Expansionswabe. Die doppelwandigen Zellwände in Längsrichtung resultieren aus der Verleimung beim Herstellungsprozess. Eine Hexagonalwabe lässt sich durch die Zellweite D_c , die Kernhöhe h_c und Zellwanddicke t_c geometrisch beschreiben. Anstelle der Zellwanddicke wird bei den Pa-

pierhexagonalwaben im Gegensatz zu den Aluminiumhexagonalwaben die Grammatur des verwendeten Papiers zur Materialbeschreibung angegeben. Hexagonalwaben aus Papier besitzen an den Zellwänden mit Doppelwandung L_c tendenziell kürzere Zellwandlängen, wie dies in Abbildung 3.11 zu erkennen ist. Durch den Expansionsprozess ist eine Erhöhung oder Verringerung der Zellweiten in Expansionsrichtung steuerbar. Diese Kernstruktur wird als über- oder unterexpandierte Hexagonalwabe bezeichnet. Beide strukturellen Ausprägungen weisen im Vergleich zur balancierten Geometrie (regelmäßiges Sechseck) eine höhere Dichte auf.

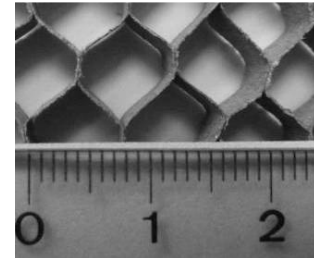


Abbildung 3.11: Hexagonalwabe mit $D_c = 8$ mm

3.2.5 Berechnung der Expansionswabendichte

Die Kerndichte einer Expansionswabe lässt sich ebenfalls aus der geometrischen Gestalt einer Einheitszelle und deren Materialdicke bestimmen [GI97].

$$\rho_c = \frac{A_c}{A_s} \cdot \rho_s = \frac{\rho_s \cdot t_c}{W_c} \cdot \frac{\left(1 + \frac{L_c}{W_c}\right)}{\left(\frac{L_c}{W_c} + \sin \theta_c\right) \cdot \cos \theta_c} \quad (3.9)$$

Für eine balancierte doppelwandige Hexagonalwabe mit $L_c = W_c$ und $\theta_c = 30^\circ$ gilt:

$$\rho_c = \frac{8 \cdot \rho_s \cdot t_c}{W_c \cdot 3 \cdot \sqrt{3}} \quad (3.10)$$

Unter Berücksichtigung der Papiergrammatur lässt sich die Wabenkerndichte einer balancierten Expansionswabe durch Gl. (3.11) berechnen.

$$\rho_c = \frac{8 \cdot \Gamma}{W_c \cdot 3 \cdot \sqrt{3}} \quad (3.11)$$

Der geometrische Aufbau eines regelmäßigen Sechsecks ermöglicht die Beschreibung der Zellweite in Abhängigkeit der Zellwandlänge:

$$W_c = \frac{D_c}{\sqrt{3}} \quad (3.12)$$

Gl. (3.12) in Gl. (3.11) eingesetzt, gestattet die Berechnung der Wabenkerndichte einer balancierten doppelwandigen Hexagonalwabe in Abhängigkeit der Zellweite und der verwendeten Papiergrammatur. Analog zur Wellstegwabe kann bei der Expansionswabe der Gewichtungsfaktor φ_K zur Berücksichtigung des Klebstoffanteils beachtet werden.

$$\rho_c = \left(\frac{8}{3}\right) \cdot \frac{\Gamma}{D_c} < \left(\frac{8}{3}\right) \cdot \frac{\Gamma}{D_c} (1 + \varphi_K) \quad (3.13)$$

3.3 Mechanische Eigenschaften der Papierwaben

Mechanische Kennwerte von Wabenkernen ermöglichen eine frühzeitige Abschätzung der mechanischen Eigenschaften eines Sandwichverbundes, zum Beispiel durch analytische Berechnungsmethoden oder numerische Simulationen. Der Zusammenhang der Spannungs-Dehnungs-Beziehung wurde in verschiedenen Veröffentlichungen für Hexagonalwaben [ZE97], Wellstegwaben [PO05] und Falzwaben [FI11] untersucht. Mechanische Kennwerte etablierter Wabenkerne der Luftfahrt, wie zum Beispiel Aluminium- und Aramidwaben, sind in Datenblättern der Hersteller hinterlegt. Hierbei werden vorwiegend transversale Schubsteifigkeiten und -festigkeiten senkrecht zur Dickenrichtung sowie Drucksteifigkeiten und -festigkeiten in Dickenrichtung veröffentlicht. Deutlich weniger Publikationen und Materialkennwerte sind über die mechanischen Eigenschaften von Papierwaben bekannt, da diese ihre primäre Anwendung in der Möbelindustrie finden und ihr Einsatz in anderen Industriebereichen erst seit kurzer Zeit verfolgt wird [TU05, BR09]. In [PO09, HA05] werden einzelne Papierwabenkennwerte vorgestellt. Eine systematische Betrachtung der mechanischen Eigenschaften unter Berücksichtigung verschiedener Material- und Strukturparameter ist nicht bekannt.

Im Rahmen dieses Kapitels werden bekannte analytische Berechnungsmethoden zur Bestimmung der elastischen Eigenschaften von Wabenkernen vorgestellt, wobei diese mit experimentellen Versuchsdaten verglichen werden. Durch Regressionsanalysen aus den experimentell gewonnenen Daten werden Zielfunktionen bestimmt, die eine realitätsnahe Berechnung der mechanischen Kennwerte ermöglichen. Des Weiteren wird auf einzelne Einflussfaktoren, wie zum Beispiel Klebstoffart und Papiersorte, eingegangen. Zur Veranschaulichung des mechanischen Potenzials der Papierwaben werden deren Kennwerte in Gesamtbezug zu anderen etablierten Wabenkernen gesetzt.

3.3.1 Druckeigenschaften der Papierwaben

Bei lokaler Druckbelastung eines Sandwichverbundes sind sowohl die Drucksteifigkeit als auch die -festigkeit des Wabenkerns die entscheidenden Größen, um einen lokalen Eindruck zu verhindern. Des Weiteren wird bei Biegebeanspruchung des Sandwichverbundes der Kern an der krafteinleitenden Stelle lokal auf Druck beansprucht. Im folgenden Kapitel wird eine bekannte analytische Methode zur Abschätzung des elastischen Verhaltens bei Druckbeanspruchung in Dickenrichtung auf die Anwendbarkeit von Papierwabenkernen untersucht. Für weitere analytische Betrachtungen - beispielsweise Druckbeanspruchungen senkrecht zur Wabenebene oder abweichende Zellstrukturen - sei auf die Übersichtswerke [GI97, XU01] und die Dissertationsschrift [HE08] verwiesen.

3.3.1.1 Analytische Methode zur Bestimmung des elastischen Verhaltens

Bei Beanspruchung der Wabenstruktur in Dickenrichtung bildet der lineare Zusammenhang zwischen Wabendichte und Drucksteifigkeit des Wabenkerns die Grundlage der analytischen Berechnungsmethode. In [GI97, ZE97] wird dieser Zusammenhang für isotrope Kernmaterialien durch Gl. (3.14) beschrieben.

$$E_{C_{33}} = E_s \cdot \frac{\rho_c}{\rho_s} \quad (3.14)$$

Hierbei repräsentiert E_s das Elastizitätsmodul und ρ_s die Dichte des Kernmaterials. Unter Berücksichtigung von Gl. (3.8) lässt sich das Elastizitätsmodul einer **Wellstegwabe** durch Gl. (3.15) bestimmen.

$$E_{C_{33}} = E_s \frac{\left(P_c + \sqrt{\frac{22}{5} \cdot H_c \cdot P_c} \right)}{P_c \cdot H_c \cdot \rho_s} \cdot \Gamma < E_s \frac{\left(P_c + \sqrt{\frac{22}{5} \cdot H_c \cdot P_c} \right)}{P_c \cdot H_c \cdot \rho_s} \cdot \Gamma \cdot (1 + \varphi_K) \quad (3.15)$$

Unter Bezugnahme auf Gl. (3.13) lässt sich das Elastizitätsmodul einer doppelwandigen balancierten **Hexagonalwabe** nach dem Ansatz von Gl. (3.14) herleiten:

$$E_{C_{33}} = E_s \left(\frac{8}{3} \right) \cdot \frac{\Gamma}{D_c \cdot \rho_s} < E_s \left(\frac{8}{3} \right) \cdot \frac{\Gamma}{D_c \cdot \rho_s} \cdot (1 + \varphi_K) \quad (3.16)$$

Wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben, zeigen die theoretisch berechneten Kerndichten, im Vergleich zu den gravimetrisch bestimmten, eine positive Abweichung zwischen 6 und 34 Prozent. Bei der analytischen Berechnung des Elastizitätsmoduls muss für realitätsnahe Bedingungen eine Anpassung der theoretischen Dichte über den Gewichtungsfaktor φ_K vorgenommen werden. Dies bedeutet, dass aufgrund des linearen Zusammenhangs zwischen Wabendichte und Wabendrucksteifigkeit eine Erhöhung des theoretischen Elastizitätsmoduls im Bereich von 6 bis 34 Prozent erforderlich ist. Hierdurch findet allerdings eine Gleichstellung des mechanischen Verhaltens zwischen einge-

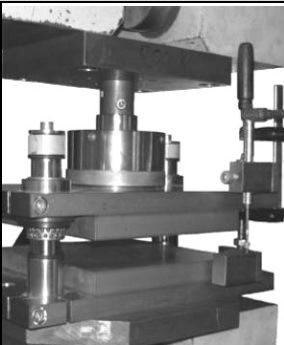
setztem Papier und verwendetem Klebstoff statt, wodurch dies zu einer Abweichung der realen Wabenbeschaffenheit führt.

3.3.1.2 Experimentelle Methode zur Bestimmung der Druckkennwerte

Die experimentelle Analyse der mechanischen Druckkennwerte in Dickenrichtung erfolgte an verschiedenen Wabengeometrien mit unterschiedlichen Kernmaterialien und Klebstoffen. Zur Beurteilung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens der Papierwabenkerne ist die Druckprüfung im Sandwichverbund nach [DIN 53291] durchgeführt worden, wofür die Papierwaben mittels Epoxidharz mit GFK-Deckschichten verklebt wurden. Bei der Verklebung ist auf einen dünnen Epoxidharzauftrag geachtet worden, wodurch eine Beeinflussung, verursacht durch die lokale Imprägnierung der Papierwabe, als gering einzustufen ist. Zur Realisierung einer konstanten Prüfkraft über der gesamten Probenfläche wurde die Prüfmaschine mit einer Druckplattenvorrichtung ausgerüstet. In Tabelle 3.3 sind die Versuchsparameter der Druckprüfung angegeben.

Tabelle 3.3: Versuchsparameter der Druckprüfung

Druckprüfung in Dickenrichtung	
Prüfvorschrift	[DIN 53291]
Prüfmaschine	Schenk-Trebel RM 250
Probengröße [mm]	50 x 50 x 10
Wabekernproben	siehe Anhang Kapitel 3
Klima	Raumklima
Prüfgeschwindigkeit	0,5 mm/min
Probenanzahl	5
Probenaufbereitung	im Kernverbund



In Abbildung 3.12 ist der Kraft-Weg-Verlauf einer A ~ TL-90 WG mit einer Kernhöhe von 10 mm repräsentativ für alle betrachteten Wabenkerne abgebildet. Qualitative Unterschiede beziehungsweise Besonderheiten konnten bei den untersuchten Wabentypen nicht erkannt werden. Der Funktionsverlauf lässt sich, wie für imprägnierte Nomex[®] Honigwaben, nach Heimbs in fünf Bereiche unterteilen [HE08].

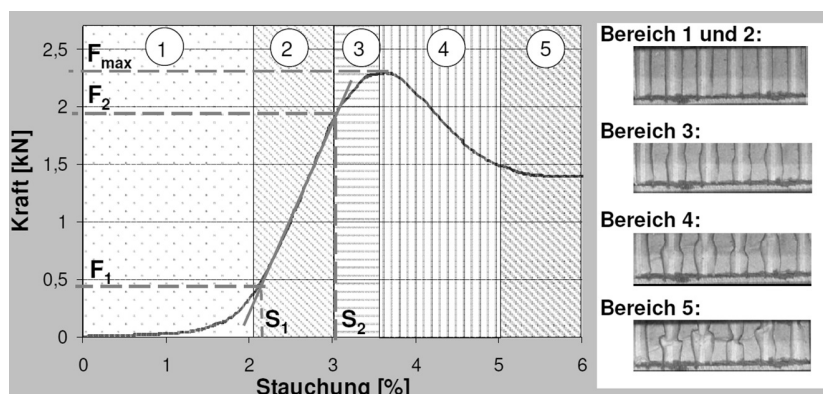


Abbildung 3.12: Darstellung des Kraft-Weg-Verlaufs bei Druckbelastung (A ~ TL-90 WG)

Im ersten Bereich findet die Ausrichtung der Probekörper innerhalb der Druckplattenvorrichtung statt. Des Weiteren werden geringe lokale Dickenschwankungen durch die einwirkenden Druckkräfte ausgeglichen. Im zweiten Gebiet, im elastischen Bereich, ist die nahezu lineare Zunahme der Kraft über den Verfahrweg zu erkennen. Durch auftretendes Beulen mittig der Wabenstruktur verläuft die Kraft-Stauchungs-Kurve im dritten Abschnitt degressiv. Das Extremum, welches die Begrenzung zwischen drittem und viertem Bereich darstellt, repräsentiert die maximal ertragbare Druckkraft F_{\max} des Wabenkerns. Aufgrund des Zellwandknitterns und der damit einhergehenden Instabilität verringert sich die Druckkraft im vierten Stadium. Der fünfte Bereich beschreibt die Ausprägung der nahezu konstanten Plateauspannung auf annähernd dem Niveau der halben Maximalkraft. Bei weiterer Beanspruchung des Wabenkerns findet bei ca. 75 %-iger Stauchung ein Kraftanstieg aufgrund der verblockten Kernstruktur statt.

3.3.1.3 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Die experimentell bestimmten Druckmodule und -festigkeiten der Papierwabenkerne sind in Abhängigkeit ihrer gravimetrischen Kerndichten in Abbildung 3.13 und Abbildung 3.14 dargestellt. Anhand der Legende ist eine Unterscheidung zwischen eingesetzten Papiersorten und Klebstoffen möglich. Im Anhang Kapitel 3 sind die Druck- und Schubkennwerte der untersuchten Papierwaben aufgelistet. Die Erhöhung der Druckmoduln und -festigkeiten mit steigender Kerndichte ist in beiden Diagrammen zu erkennen. Der nahezu lineare Verlauf und die geringen Abweichungen zwischen den einzelnen Kennwerten veranschaulichen, dass die Zellgröße, der Klebstoff und die Papiersorte keinen dominierenden Einfluss auf die Druckeigenschaften haben. Bei Betrachtung der spezifischen Drucksteifigkeit sind geringfügig höhere Kennwerte der Expansionswabe bei gleicher Papiersorte im Vergleich zur Wellstegwabe zu erkennen. Wie in Kapitel 3.1.4 beschrieben, kann dies auf die unterschiedliche Ausrichtung der Cellulose im Wabenkern zurückgeführt werden. Die abgebildeten Versuchsergebnisse zeigen des Weiteren, dass Wabenkerne aus Kraftsackpapier im Vergleich zu Wabenkernen aus Testliner tendenziell niedrigere gewichtsspezifische Steifigkeiten und Festigkeiten besitzen. Wie die Ergebnisse der Zugversuche aus Tabelle 3.1 veranschaulichen, ist dies auf geringere mechanische Eigenschaften des Kraftsackpapiers im Vergleich zum Testliner zurückzuführen. Der Vergleich der eingesetzten Klebstoffsysteme zeigt, dass Wabenkerne mit Wasserglas (WG) höhere Festigkeiten und Steifigkeiten aufweisen als Wabenkerne, die mit Weißleim (WL) verklebt wurden. Eine deutliche Abweichung zum linearen Verlauf zeigt der Wabenkern des Typs E ~ KSP-50 WG mit der höchsten Wabenkerndichte von ca. 175 kg/m^3 (siehe Anhang Kapitel 3). Die hohen mechanischen Kennwerte sind auf den hohen Klebstoffanteil, verursacht durch niedrige Papiergrammatur und kleine Wabenzellgröße, zurückzuführen. Aufgrund der hohen Dichte und der aufwendigen Produktion wird diese Wellpappe üblicherweise nicht zur Herstellung von Wabenkernen verwendet. Die Kennwerte dieses Wabentyps werden in den folgenden Diagrammen nicht dargestellt, sie sind allerdings im Anhang Kapitel 3 angeführt.

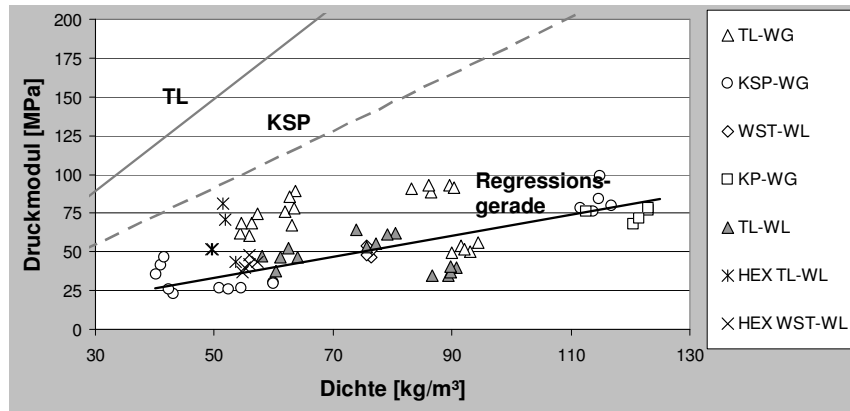


Abbildung 3.13: Druckmodul der Wabenkerne in Abhängigkeit der Kerndichte

Die hellen Geraden aus Abbildung 3.13 zeigen die Funktionsverläufe aus Gl. (3.14), bei denen die Zugmoduln des TL und KSP in CD-Richtung von Tabelle 3.1 berücksichtigt sind. Der Vergleich beider Funktionen mit den Versuchsergebnissen veranschaulicht die deutliche Überschätzung des theoretischen Druckmoduls durch den analytischen Ansatz, was beispielsweise auf niedrigere elastische Druckeigenschaften im Vergleich zu den Zugeigenschaften sowie auf das anisotrope Verhalten des Papiers zurückzuführen ist. Aufgrund der geringen Papierdicken konnten keine Druckmoduln der Papiere bestimmt und für die Darstellung der Funktionsverläufe berücksichtigt werden. In der Veröffentlichung [FO06] von Foo et al. wird ein Vergleich zwischen theoretischer (siehe Gl. (3.14)) und gemessener Drucksteifigkeit von Aramidwaben angestellt, wobei die mechanischen Kennwerte des Nomexpapiers mit Hilfe von Zugprüfungen experimentell bestimmt und als Ausgangsgrößen zur theoretischen Drucksteifigkeitsbestimmung verwendet wurden. Die in der Publikation dargelegte Gegenüberstellung zeigt ebenfalls eine deutliche Abweichung zum analytischen Ansatz auf.

Wie in Abbildung 3.13 durch die Regressionsgerade dargestellt, ermöglicht die Näherungsgleichung eine deutliche Verbesserung der Prognose für das elastische Druckverhalten. Wie aus Gl. (3.14) bekannt, besteht eine lineare Abhängigkeit zwischen Dichte und Druckmodul des Wabenkerns. Diese Beziehung verweist auf eine lineare Zielfunktion der Näherungsgleichung, welche in Gl. (3.17) für die betrachteten Papierwabenkerne angegeben ist. Der im Folgenden als konstant gehaltene Skalierungsfaktor $\varphi_B = 10^6 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{kg}$ ermöglicht die Anpassung der physikalischen Einheiten.

$$E_{C_{33}} = f(\rho_c) \approx 0,68 \cdot \varphi_B \cdot \rho_c \quad \text{für} \quad 40 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \leq \rho_c \leq 125 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (3.17)$$

Ein Term zur Abschätzung des Druckversagens durch Überschreitung der Druckfestigkeit des Zellwandmaterials wird in [GI97] durch folgende Gleichung beschrieben:

$$\sigma_{C_{33}} = \sigma_s \cdot \frac{\rho_c}{\rho_s} \quad (3.18)$$

Analog zu Gl. (3.14) besteht in Gl. (3.18) ein linearer Zusammenhang zwischen Wabendichte und dem gesuchten Kennwert.

Abbildung 3.14 zeigt zum einen die experimentell bestimmten Druckfestigkeiten und zum anderen die aus Gl. (3.18) berechneten Geradenverläufe, bei denen die Zugfestigkeiten der Papiere aus Tabelle 3.1 berücksichtigt wurden. Die Gegenüberstellung der Messergebnisse und der theoretischen Funktionsverläufe zeigen geringe Überschätzungen des analytischen Ansatzes. Die Differenz zwischen theoretischen Ergebnissen und Messdaten kann auf niedrigere Papierdruckfestigkeiten im Vergleich zu den Zugfestigkeiten zurückgeführt werden.

Eine Überschätzung der Druckeigenschaften aus analytischen Ansätzen im Vergleich zu experimentellen Messdaten wird ebenfalls in [WI07] beschrieben.

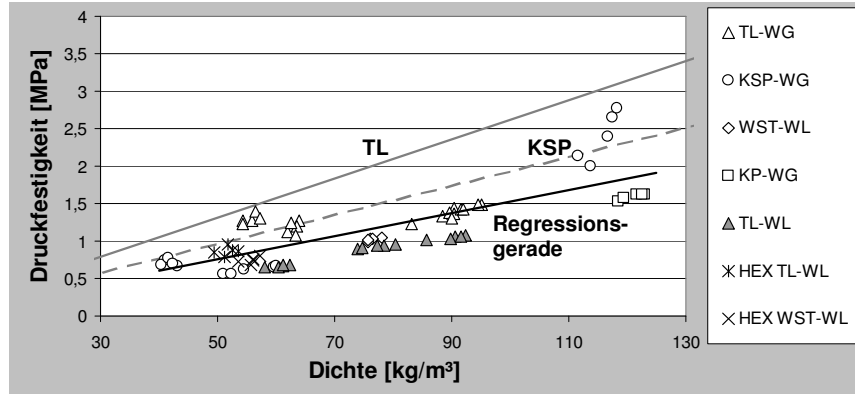


Abbildung 3.14: Druckfestigkeit der Wabenkerne in Abhängigkeit der Kerndichte

Bei analogem Vorgehen zur Verbesserung der Vorhersagen der Drucksteifigkeit ergibt sich folgende lineare Näherungsgleichung zur Optimierung der Druckfestigkeit:

$$\sigma_{C_{33}} = f(\rho_c) \approx 0,015 \cdot \varphi_B \cdot \rho_c \quad \text{für} \quad 40 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \leq \rho_c \leq 125 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (3.19)$$

Die geringeren Schwankungen der Festigkeits- im Vergleich zu den Steifigkeitskennwerten innerhalb der Versuchsreihe (vgl. hierzu Abbildung 3.13 mit Abbildung 3.14) sind auf Nivellierungsprozesse in der Prüfvorrichtung, verursacht durch Unregelmäßigkeiten bei der Probenpräparation sowie lokale Schwankungen der Wabenkerndicke, zurückzuführen.

3.3.2 Schubeigenschaften der Papierwaben

Bei Biegebeanspruchung des Sandwichverbundes wird der Wabenkern durch die entgegengesetzten Verschiebungen der Deckschichten (siehe Abbildung 2.1) auf Schub beansprucht. Die transversalen Schubfestigkeiten und -steifigkeiten senkrecht zur Dickenrichtung stellen somit neben den Druckeigenschaften die relevanten mechanischen Größen von Kernstrukturen im Sandwichverbund dar. Wegen der fertigungsbedingten richtungsabhängigen Zellengeometrie der Papierwaben werden die mechanischen Kennwerte bei Schubbelastung in Ebene₃₁ und Ebene₃₂ betrachtet.

3.3.2.1 Analytische Methode zur Bestimmung des elastischen Verhaltens

Die Biegesteifigkeit kann gegenüber der Schubsteifigkeit der Wabenzellwände aufgrund der deutlich kleineren Papierdicken im Vergleich zu den Einheitszellengrößen vernachlässigt werden. Bei

Betrachtung der Schubverformung sind somit nur die jeweils zur Belastungsrichtung parallelen Zellwandkomponenten von Relevanz [KL09].

In der Veröffentlichung von Xu et al. [XU01] wird eine allgemeine Methode zur Homogenisierung der transversalen Schubsteifigkeit von Wabenkernen unter Verwendung eines analytischen Ansatzes beschrieben. Mit Hilfe der vorgestellten Parameter, zur Beschreibung der Wabengeometrie (Abbildung 3.7), lässt sich folgende Gleichung für das Schubmodul einer **Wellstegwabe** in Ebene₃₁ formulieren:

$$G_{C_{31}} = G_s \cdot \left(\frac{t_c}{H_c} + \frac{P_c \cdot t_c}{H_c \cdot S_c} \right) \quad (3.20)$$

Unter Berücksichtigung von Gl. (3.6) und (3.4) lässt sich der Schubmodul in Abhängigkeit der Kerndichte und der Zellgeometrie durch Gl. (3.21) darstellen. Der nahezu konstante Quotient von ca. 2,2 - gebildet aus Wellenteilung und Wellenhöhe (siehe Anhang Kapitel 3) - ermöglicht eine weitere Vereinfachung des Terms.

$$G_{C_{31}} = G_s \cdot \frac{\rho_c}{\rho_s} \cdot \sqrt{\frac{5P_c}{22H_c}} \approx G_s \cdot \frac{\rho_c}{\rho_s} \cdot 0,7 \quad (3.21)$$

Bei analogem Vorgehen kann der Schubmodul einer Wellstegwabe in Ebene₃₂ durch folgende Gleichung berechnet werden:

$$G_{C_{32}} = G_s \cdot \left(\frac{4 \cdot H_c \cdot t_c}{P_c \cdot S_c} \right) \quad (3.22)$$

In Abhängigkeit der Wabenkerndichte und des Quotienten P_c/H_c von ca. 2,2 kann der Schubmodul senkrecht zu den Wabenstegen durch folgende Abhängigkeit beschrieben werden:

$$G_{C_{32}} = G_s \cdot \frac{\rho_c}{\rho_s} \cdot \frac{4}{\frac{22}{5} + \sqrt{\frac{22P_c}{5H_c}}} \cdot \frac{H_c}{P_c} \approx G_s \cdot \frac{\rho_c}{\rho_s} \cdot 0,24 \quad (3.23)$$

Beim Vergleich von Gl. (3.21) mit (3.23) ist aufgrund der unsymmetrischen Wellstegwabenstruktur eine nahezu dreifache Schubsteifigkeit in Stegrichtung festzustellen.

In [GI97] wird für Waben mit **Hexagonalstruktur** und Doppelwandung folgende Gleichung zur Berechnung der minimalen Kernschubsteifigkeit in Ebene₃₁ eingeführt:

$$G_{C_{31}} = G_s \cdot \left(\frac{t_c}{W_c} \right) \cdot \frac{(L_c/W_c + \sin \theta)}{(L_c/W_c + 1) \cos \theta} \quad (3.24)$$

Unter Berücksichtigung von Gl. (3.10) und der Annahme

$$L_c = W_c \text{ und } \theta = 30^\circ \quad (3.25)$$

lässt sich der Schubmodul in Richtung der Doppelwandung in Abhängigkeit der Wabendichte durch folgende Gleichung bestimmen:

$$G_{C_{31}} = G_s \cdot \frac{9 \cdot \rho_c}{16 \cdot \rho_s} \approx G_s \cdot \frac{\rho_c}{\rho_s} \cdot 0,56 \quad (3.26)$$

Für die Kernschubsteifigkeit einer Hexagonalwabe wird in [GI97] für Schubbelastung in Expansionsrichtung folgender Term eingeführt:

$$G_{C_{32}} = G_s \cdot \left(\frac{t_c}{W_c} \right) \cdot \frac{\cos \theta}{(L_c/W_c + \sin \theta)} \quad (3.27)$$

Unter Berücksichtigung der balancierten Struktur und Gl. (3.10) kann der Schubmodul in Abhängigkeit der Kerndichte senkrecht zur Doppelwandung durch Gl. (3.28) berechnet werden:

$$G_{C_{32}} = G_s \cdot \frac{3 \cdot \rho_c}{8 \cdot \rho_s} = G_s \cdot \frac{\rho_c}{\rho_s} \cdot 0,375 \quad (3.28)$$

Das anisotrope Verhalten der Hexagonalwabe wird durch die 50 % höhere Schubsteifigkeit in Längsrichtung ersichtlich (vgl. hierzu Gl. (3.26) mit (3.28)).

In der Dissertationsschrift von Pohl [PO09] werden fünf verschiedene Ansätze von Panc [PA75], Cambell [CA61], Schulgasser [SC81], Darwin und Pecknold [DA77], Mäkelä und Östlund [MA03] zur Bestimmung der Papierschubsteifigkeit vorgestellt, welche auf rein analytischen oder semi-empirischen Ansätzen basieren. Die ermittelten Papierschubsteifigkeiten nach der Methode von Schulgasser führen beim Einsetzen in Gl. (3.21), (3.23), (3.26) und (3.28) zu den geringsten Abweichungen der experimentell bestimmten Wabenschubmoduln.

Durch einen semi-empirischen Ansatz, unter Berücksichtigung des anisotropen linear elastischen Verhaltens des Papiers, zeigt Schulgasser in [SC81, SC83] eine Methode zur Abschätzung der Schubsteifigkeit durch folgende Gleichung auf:

$$G_s = E_{MD} \cdot \frac{2(1 + \xi) - (\xi^2 + 14\xi + 1)^{1/2}}{(\xi - 1)^2} \quad \text{wobei} \quad \xi = \frac{E_{MD}}{E_{CD}} \quad (3.29)$$

Mit Hilfe der experimentell bestimmten Elastizitätsmoduln aus Tabelle 3.1 lassen sich die Schubmoduln der betrachteten Papiersorten durch die Näherungsgleichung (3.29) bestimmen.

3.3.2.2 Experimentelle Methode zur Bestimmung der Schubkennwerte

Die Versuchsdurchführung zur Ermittlung der Schubkennwerte erfolgte anhand präparierter Sandwichproben. Die Papierwaben wurden mit Epoxidharz an GFK-Deckschichten geklebt. Der ausgehärtete Sandwichverbund ist zur Krafteinleitung, wie in Tabelle 3.4 zu sehen, mit Hilfe des Epoxidharzklebefilms-REDUX® der Firma WELA an zwei Stahlplatten befestigt worden.

Tabelle 3.4: Versuchsparameter der Schubprüfung

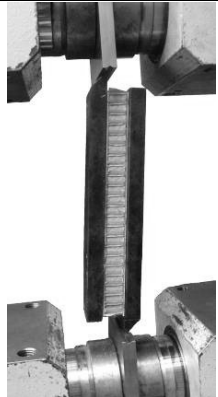
Schubprüfung		
Prüfvorschrift	[DIN 53 294]	
Prüfmaschine	Schenk-Trebel RM 250	
Probengröße [mm]	200 x 50 x 10	
Wabenproben	siehe Anhang Kapitel 3	
Klima	Raumklima	
Prüfgeschwindigkeit	0,5 mm/min	
Probenanzahl	3	
Probenaufbereitung	im Sandwichverbund	

Abbildung 3.15 zeigt den Kraft-Schubverzerrungs-Verlauf einer A ~ TL-90 WG repräsentativ für die untersuchten Wabenkerne. Der Verlauf lässt sich anhand der Verformungserscheinungen der Zellwände in drei Bereiche unterteilen. Der Geradenverlauf bei Versuchsbeginn veranschaulicht das linear elastische Verhalten des Wabenkerns. Durch die zunehmende entgegengerichtete Verschiebung der Stahlplatten wird das Zellwandbeulen lokal eingeleitet, welches sich bei zunehmender Verzerrung über den gesamten Wabenprobenkörper verteilt und einen Kraftabfall durch Schädigung der Zellstruktur bewirkt. Im dritten Bereich ist aufgrund der zunehmenden Schubbeanspruchung ein weiterer Kraftabfall zu erkennen, welcher zum einen durch irreversibles Knittern der Zellwände und zum anderen durch Risse der Zellstruktur verursacht wird.

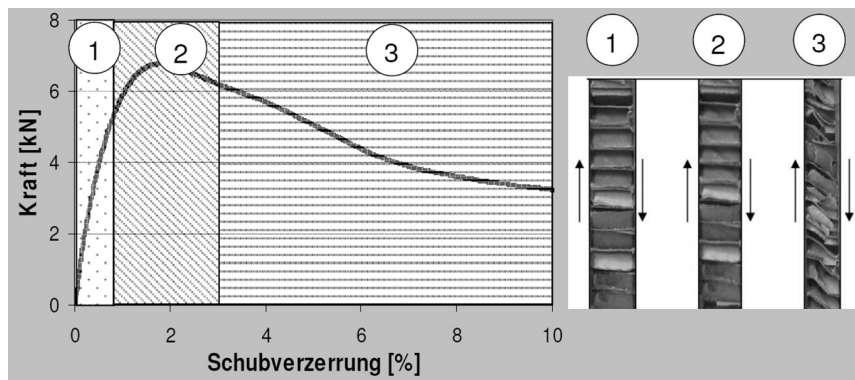


Abbildung 3.15: Kraft-Schubverzerrung einer A ~ TL-90 WG in Ebene₃₂

Abbildung 3.16 zeigt den Einfluss der Wabenausrichtung auf das Schubverhalten. Bei den Versuchen wurden bei paralleler Ausrichtung der Wabenstege zur Belastungsrichtung durchgehend höhere Schubsteifigkeiten und -festigkeiten festgestellt.

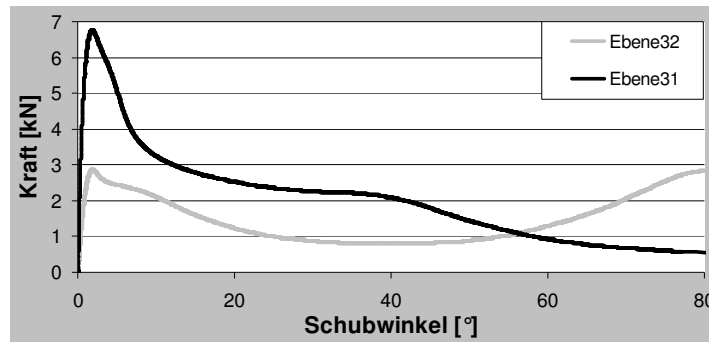


Abbildung 3.16: Kraft-Schubwinkel-Verlauf einer A ~ TL-90 WG in beiden Richtungen

Bei senkrechter Anordnung der Wabenstege (Ebene₃₂) findet mit fortschreitendem Schubwinkel (bei ca. 60°) ein deutlicher Kraftanstieg aufgrund der anwachsenden Zugbeanspruchung der Wabenstege statt. Bei Schubbelastung parallel zu den Wabenstegen (Ebene₃₁) verhindern Zellwandknittern und Zellwandrisse einen zweiten Kraftanstieg.

3.3.2.3 Gegenüberstellung der Ergebnisse

In Abbildung 3.17 sind die experimentell bestimmten Schubmoduln der Wabenkerne sowie die theoretischen Schubmoduln aus Gl. (3.21) dargestellt. Bei den Regressionsanalysen wurden als Eingangsgrößen lediglich die experimentell bestimmten Kennwerte der Wellstegwaben einbezogen. Bei den hellen Funktionsverläufen sind die Elastizitätsmoduln und die Papierdichten des Kraftsackpapiers und des Testliners aus Tabelle 3.1 sowie die resultierenden Papierschubmoduln nach der Methode von Schulgasser aus Gl. (3.29) berücksichtigt. Analog zur Ergebnisdarstellung der Druckversuche ist kein dominierender Einfluss der Papiersorte auf die Schubsteifigkeit des Wabenkerns feststellbar. Tendenziell niedrigere Prüfergebnisse sind bei Verwendung eines Weißleims im Vergleich zum Wasserglas zu erkennen.

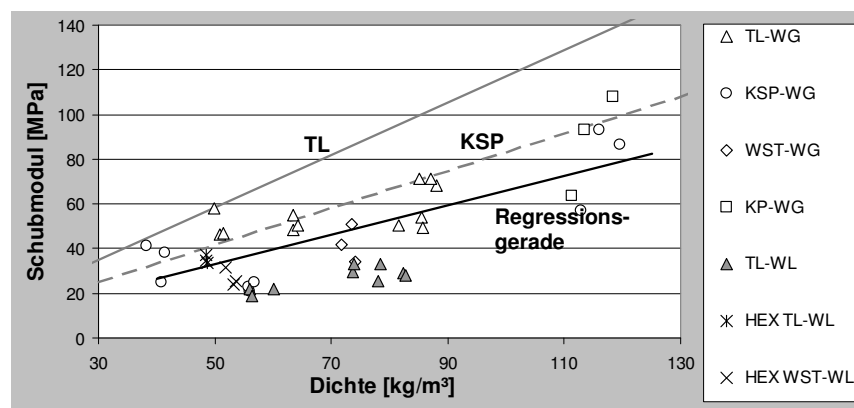


Abbildung 3.17: G_{31} der Wabenkerne in Abhängigkeit der Kerndichte

Die Gegenüberstellung der experimentell bestimmten Kennwerte und der Geradenverläufe, resultierend aus Gl. (3.21), veranschaulicht die Überschätzung des analytischen Ansatzes. Die linearen Zielfunktionen der Regressionsanalysen ermöglichen eine Verbesserung der Vorhersagen, wie in Abbildung 3.17 zu erkennen, durch Näherungsgleichung (3.30) und (3.31).

$$G_{C_{31}} = f(\rho_c) \approx 0,66 \cdot \varphi_B \cdot \rho_c \quad \text{für} \quad 40 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \leq \rho_c \leq 125 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (3.30)$$

Bei gleichem Vorgehen ergibt sich folgende Näherungsfunktion für G_{32} :

$$G_{C_{32}} = f(\rho_c) \approx 0,22 \cdot \varphi_B \cdot \rho_c \quad \text{für} \quad 40 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \leq \rho_c \leq 125 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (3.31)$$

Analog zu den Näherungsgleichungen weisen die richtungsabhängigen Schubsteifigkeiten des analytischen Ansatzes (vgl. hierzu Gl. (3.21) und (3.23)) ebenfalls eine nahezu dreifache Schubsteifigkeit der Wellstegwabe in Stegrichtung auf.

Analytische Berechnungsmodelle zur Abschätzung der Schubfestigkeit von Wellstegwaben sind nicht bekannt. Abbildung 3.18 lässt für die untersuchten Kernstrukturen auf einen linearen Zusammenhang zwischen Schubfestigkeit und Dichte des Papierwabenkerns schließen.

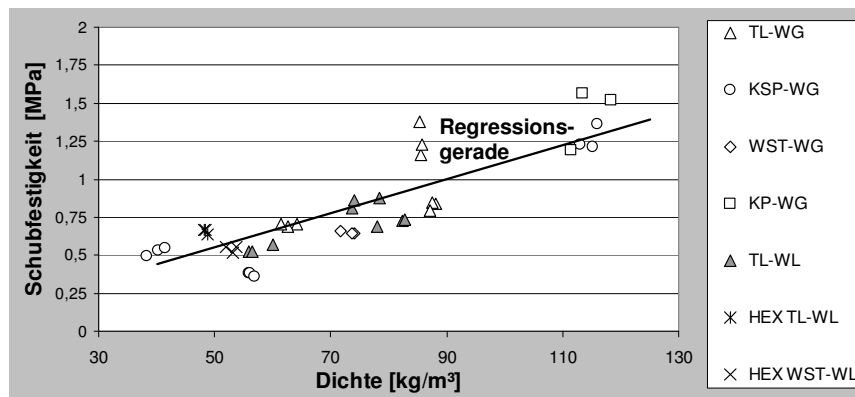


Abbildung 3.18: Schubfestigkeit der Wabenkerne in Ebene₃₁

Unter Voraussetzung der linearen Abhängigkeit kann die Schubfestigkeit der Wellstegwaben durch die empirischen Kennwerte mit Hilfe folgender Regressionsgeraden angenähert werden:

$$\tau_{C_{31}} = f(\rho_c) \approx 0,011 \cdot \varphi_B \cdot \rho_c \quad \text{für} \quad 40 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \leq \rho_c \leq 125 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (3.32)$$

Bei gleichem Vorgehen resultiert für die Schubfestigkeit τ_{32} folgende Näherungsgleichung:

$$\tau_{C_{32}} = f(\rho_c) \approx 0,004 \cdot \varphi_B \cdot \rho_c \quad \text{für} \quad 40 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \leq \rho_c \leq 125 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (3.33)$$

3.3.3 Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse

Durch die Versuchsreihen sind mechanische Kennwerte von Papierwaben bestimmt worden, wodurch eine Gegenüberstellung verschiedener Einflussparameter möglich wurde. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Wabenkerndichte die mechanischen Kennwerte dominierend beeinflusst. Die Gegenüberstellung der eingesetzten Klebstoffe verdeutlicht, dass Papierwaben, verklebt mit Wasserglas, tendenziell höhere mechanische Kennwerte im Vergleich zu weißleimverklebten Papierwaben aufweisen. Eine eindeutige Differenzierung zwischen den eingesetzten Papiersorten und den dichtespezifischen Wabenkennwerten konnte anhand der ermittelten Versuchsergebnisse nicht festgestellt werden, weshalb der Einfluss der betrachteten Papiersorten auf die mechanischen Eigenschaften der Wabenstruktur als gering zu bewerten ist.

Der Vergleich zwischen analytisch berechneten und experimentell bestimmten Kennwerten (bei Druck- und Schubbeanspruchung) veranschaulicht eine Überschätzung der Ergebnisse aus den analytischen Gleichungen. Das anisotrope Verhalten des Werkstoffs Papier und der Einfluss des Klebstoffs sowie fertigungsbedingte Imperfektionen, wie unregelmäßige Zellengeometrien und Schwankungen beim Zuschnitt des Wabenkerns, können zur Überschätzung der analytischen Berechnungsmethode beigetragen haben. Durch den vorgestellten semi-empirischen Ansatz zur Bestimmung der Schub- und Druckmoduln und der Schub- und Druckfestigkeiten konnte eine Verbesserung der Vorhersagen im Vergleich zu den rein analytischen Ansätzen erzielt werden. Mit Hilfe von Regressionsanalysen aus den Versuchsergebnissen wurden Näherungsgleichungen definiert, die die fertigungsbedingten und materialspezifischen Abweichungen im Gegensatz zur idealen Modellvorstellung berücksichtigen. Zur Ausdehnung des Betrachtungsbereichs, besonders für Papierwaben mit hohen Kerndichten, ist eine Erweiterung durch zusätzliche Versuche und Anpassung der Näherungsgleichungen bei zukünftigen Analysen von Interesse. Ebenso ist zur Verbesserung der Prognosen eine Untersuchung des Einflusses der Wabenkernhöhe auf die mechanischen Kennwerte von Bedeutung.

Abbildung 3.19 und Abbildung 3.21 stellen anhand der Regressionsgeraden die elastischen Materialeigenschaften der Papierwellstegwaben in Gesamtbezug zu anderen Wabenkernen dar. Im Vergleich zu den Papierwaben sind die deutlich höheren spezifischen Druck- und Schubmoduln der Aluminium- und Glasfaserwaben in beiden Diagrammen ersichtlich. Aufgrund der ähnlichen Materialkennwerte des Polypropylens (PP) und des Papiers sind die dichtespezifischen Druckeigenschaften der PP-Tubuswaben vergleichbar zu denen der Wellstegwaben. Durch Werkstoffpaarungen innerhalb eines Wabenkerns sind Materialeigenschaften einstellbar, welche mechanische Kennwerte zwischen den dargestellten ermöglichen. Dieser Vorteil der Werkstoffpaarung ist in der Patentschrift [P-ST10] offengelegt, die während der Erstellung dieser Arbeit entstanden ist.

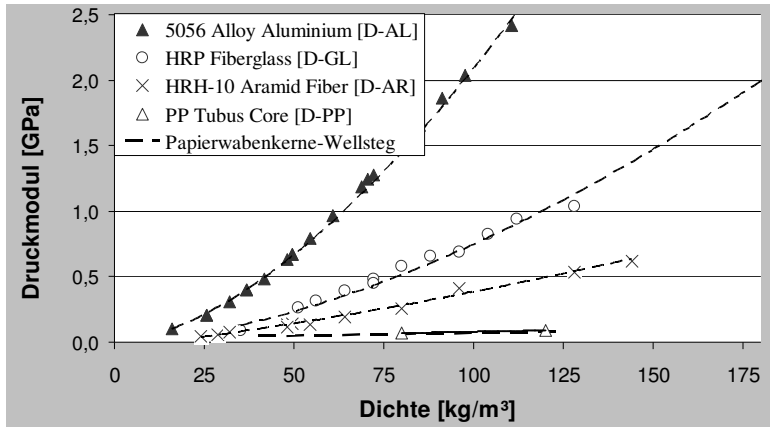


Abbildung 3.19: Gegenüberstellung der Druckmoduln von Papierwaben mit weiteren Wabenkernen

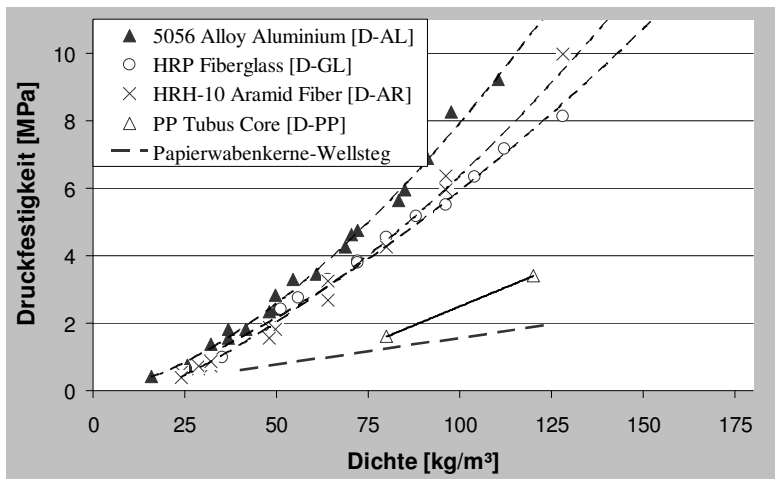


Abbildung 3.20: Gegenüberstellung der Druckfestigkeit von Papierwaben mit weiteren Wabenkernen

Wegen des fertigungsbedingten unsymmetrischen Aufbaus weisen Wellstegwaben bei Schubbelastung in Stegrichtung deutlich höhere Schubmoduln im Vergleich zu Tubuswaben aus Polypropylen auf (siehe Abbildung 3.21).

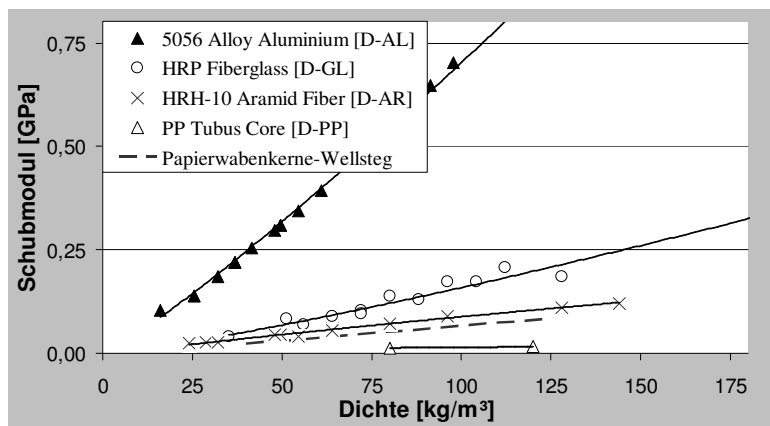


Abbildung 3.21: Gegenüberstellung der Schubmoduln G_{31} von Papierwaben mit weiteren Wabenkernen

4 Umformung von Papierwaben

Sandwichstrukturen mit Wabenkern finden ihre Anwendung bei planen oder schwach gekrümmten Bauteilen, da sie im Sandwichverbund keine gezielte plastische Umformung zulassen. Bauteilkonturen aus Sandwichplatten werden beispielsweise durch Fügen von planen Sandwichelementen, wie in [BI97] dargestellt, realisiert. Funke beschreibt in [FU01] die Herstellung einer gekrümmten Sandwichplatte durch Biegen des Verbunds entlang einer definierten Fräsnut in einer Deckschicht, wodurch der Wabenkern lokal gefaltet und der Sandwichverbund umgeformt werden kann.

Zur Prozessvereinfachung ist ein Umformen des Papierwabenkerns in einer Werkzeugkavität ohne anschließende Nachbearbeitung oder Fügen wünschenswert. Hierbei kann die Umformung des Wabenkerns alleine oder gemeinsam mit den Deckschichten erfolgen, wobei während der Umformung keine Verbindung zwischen dem Wabenkern und der Deckschicht besteht. Beschädigungen der Wabenstruktur in Form von Zellwandrissen oder Ablösungen an den Klebeflächen verursachen neben mechanischen Beeinträchtigungen des Sandwichverbundes Abzeichnungen an den Sandwichoberflächen.

Ziel der durchgeführten Untersuchungen ist die Analyse der Einflussparameter auf das Umformverhalten von Papierwaben. Zu Beginn dieses Kapitels wird mit Hilfe eines geometrischen Modells das Umformverhalten von Papierwaben theoretisch beschrieben und Einflussparameter auf die Umformmechanik dargestellt. Experimentelle Untersuchungen zeigen qualitative Unterschiede verschiedener Papierwaben und Prozessparameter bezüglich ihres Umformverhaltens auf. Die quantitativen Ergebnisse aus den Versuchen, wie der realisierbare Biegewinkel und der Biegeradius, sind in Abhängigkeit der Papierwabenbeschaffenheit aufbereitet und können als Konstruktionsrichtlinien zur Gestaltung von Sandwichbauteilen herangezogen werden.

4.1 Theoretische Untersuchung des Umformverhaltens

Nach [DIN 8580] versteht man unter dem Umformen Fertigungstechniken, durch die die gegebene Form eines festen Körpers in eine andere Form überführt wird, wobei Massen und Stoffzusammenhänge erhalten bleiben. Das Umformen beschreibt das Vollziehen einer Formänderung unter beherrschbaren Geometrien. Im Gegensatz dazu beschreibt der Begriff Verformen eine Formänderung ohne Beherrschung der Geometrie [LA02, DO10]. Verschiedenste Umformtechnologien haben sich für diverse Materialien etabliert. Die Verfahren zur Blechumformung lassen sich in die Grundverfahren Biegen, Tiefziehen und Formstanzen unterteilen [RO59]. Für thermoplastisch faserverstärkte Kunststoffe werden in [IN10] das Stempelumformen, die Diaphragmatechnik und das Vakuumverfahren als die relevanten und etablierten Umformtechnologien angeführt. Eine Einflussanalyse bzgl. der Umformeigenschaften von Wabenkernen ist aus der Fachliteratur nicht bekannt.

Der Papierwabenkern ist durch seine Struktur definiert aufgebaut und besitzt im Vergleich zu den klassischen umzuformenden Materialien keinen Vollkörper. Unter dem Umformen eines Papier-

wabenkern ist ein lokales Falten der Wabenzellwände zu verstehen, ohne dass sich Risse an den Zellwänden bilden oder Ablösungen an den Klebeflächen entstehen. Bei der Papierwabenumformung wird wegen des fertigungsbedingten, richtungsabhängigen Aufbaus zwischen paralleler und senkrechter Anordnung der Biegekante zum Steg einer Wellstegwabe (siehe Abbildung 3.7) bzw. zur Längsrichtung einer Hexagonalwabe (siehe Abbildung 3.10) unterschieden.

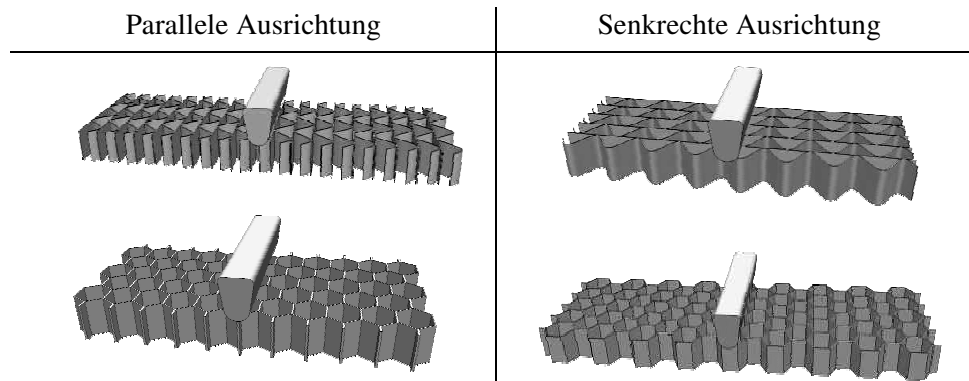


Abbildung 4.1: Wabenausrichtungen bei Umformung

Das Umformverhalten eines Papierwabenkerns ist in Abbildung 4.2 anhand der Biegeumformung schematisch aufgeführt. Die Beschreibung zum Versuchsaufbau ist in Kapitel 4.2.3.1 angegeben. Die Fotoaufnahmen des Biegeversuchs sind bei senkrechter Ausrichtung der Wabenstege zum Biegestempel aufgenommen. Der Biegeumformprozess lässt sich für Wabenkerne in vier Zonen unterteilen, die nachfolgend beschrieben werden.

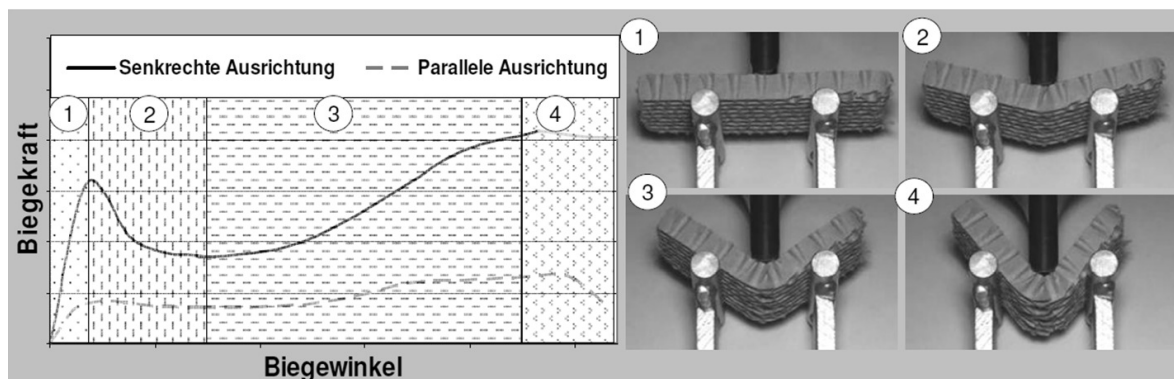


Abbildung 4.2: Umformzonen in Abhängigkeit von Biegewinkel und -kraft

○ Umformzone 1: Elastischer Bereich

Die erste Umformzone beschreibt ein nahezu rein elastisches Verformen durch Dehnung der Wabenstruktur, jedoch ohne Faltungen oder sonstige irreversible Gestaltänderungen. Bei Aufhebung der induzierten Biegekraft nimmt der Wabenkern die Ausgangsform reversibel ein. Wegen des höheren Flächenträgheitsmoments sind bei senkrechter Anordnung der Biegekante höhere Biegesteifigkeiten und Biegekräfte im Vergleich zur parallelen Ausrichtung sowohl bei Wellstegwaben als auch bei Hexagonalwaben zu erkennen. Aufgrund des Gleichgewichtszustands zwischen der Zug- und Druckseite befindet sich die neutrale Faser in der Mitte des Wabenkerns. Dieser Um-

formbereich erstreckt sich bei dünnen Kernstrukturen (Wabendicke 3mm) bis zu einem Biege-
winkel von 15 Grad. Bei Waben mit kleinen Zellen tritt häufig bei paralleler Ausrichtung, verur-
sacht durch die hohe Biegesteifigkeit, ein Versagen der Leimverbindung unmittelbar nach der
ersten Umformzone auf.

- Umformzone 2: Plastische Strukturverformung der Druckseite

Die zweite Umformzone beginnt mit dem Wechsel vom elastischen reversiblen Bereich in den
Bereich der plastischen Wabenstrukturverformung. Auf der Druckseite falten sich die Zellwände
lokal zusammen, während die Wabenstruktur der Zugseite nahezu formstabil bleibt. Es findet
aufgrund der lokalen Instabilitäten der Druckseite eine Verschiebung der neutralen Faser zum
Randbereich der Zugseite statt. Die zweite Umformzone erstreckt sich bis zu einem Biege-
winkel von 30 bis 50 Grad. Waben mit hohen Papiergrammaturen oder kleinen Zellgrößen weisen durch
die hohe Biegesteifigkeit eine kürzere zweite Umformzone auf.

- Umformzone 3: Plastische Strukturverformung der Druck- und Zugseite

Die dritte Umformzone beginnt mit einem Anstieg der Biegekraft und stellt den größten Umform-
bereich dar. Die fortschreitende Faltung der Zellwände auf der Druckseite und die damit einher-
gehenden Kontakte der Zellwände untereinander erhöhen lokal den Widerstand und erzeugen eine
Gegenkraft auf der Zugseite. Hierdurch wird eine Dehnung der Zellstruktur auf der Zugseite ver-
ursacht. Es findet eine kontinuierliche Verschiebung der neutralen Faser vom Randbereich der
Zugseite zur Wabenkernmitte statt. Sind Zug- und Drucksteifigkeiten im Gleichgewicht und ist
keine Kraftaufnahme durch Formänderung möglich, wird das Versagen durch plastische Dehnung
des Papiers eingeleitet.

- Umformzone 4: Bereich des Wabenversagens

Die vierte Umformzone beschreibt das Versagen der Wabenstruktur. Bei paralleler Ausrichtung
wird das Versagen meist durch Lösen der Zellwände an den Klebeflächen eingeleitet. Es findet,
wie in Abbildung 4.2 dargestellt, ein abrupter Kraftabfall und ein durchgehendes Lösen der Wa-
benstege vom Wellenzug statt. Hingegen bilden sich bei senkrechter Ausrichtung an der Zugseite
der Stege Risse, die einen Kraftabfall des Funktionsverlaufs verursachen. Trotz langsamer Riss-
ausbreitung ist bei senkrechter Ausrichtung des Wabenkerns eine weitere Umformung und Kraft-
aufnahme möglich. Aus diesem Grund werden Funktionsverläufe bei senkrechter Ausrichtung
nach dem Auftreten eines Risses mit hellem Farbton weiter dargestellt.

4.1.1 Geometrisches Modell zur Beschreibung des Umformverhaltens

Ziel des Modells ist die Bewertung des Umformverhaltens mit Hilfe theoretisch abbildbarer Radi-
en in Abhängigkeit geometrischer Einflussparameter. Die betrachteten geometrischen Parameter
der Wellstegwabe sind die Wellenteilung, die Wellenhöhe, die Wabenkernhöhe sowie die Papier-
grammatur und die daraus resultierende Papierdicke. Das Modell beruht auf der Annahme, dass

das Versagen zu Beginn der zweiten Umformzone durch geometrische Reglementierung der Zellgeometrie eingeleitet wird. Die Zellwände in der Randzone der Druckseite falten sich vollkommen zusammen und bauen keinen Widerstand auf, wodurch keine Kräfte auf die Zugseite übertragen werden. Das Wabenversagen wird bei maximaler Komprimierung durch Falten der Zellwände auf der Druckseite eingeleitet. Die Wabenkernstruktur behält auf der Zugseite die Ausgangsgeometrie, wie in Abbildung 4.3 dargestellt, bei.

Für das analytische Modell werden folgende Rahmenbedingungen definiert:

- vollständiges Falten der Zellwände auf der Druckseite bei Eintreten des Versagens
- gleichmäßige Verteilung der gefalteten Zellwände auf der druckkraftbelasteten Seite
- keine Gestaltänderung der Zellstruktur auf der zugkraftbelasteten Seite
- Papier als Zellwandmaterial ist inkompressibel
- Umformung findet ausschließlich durch Gestaltänderung der Zellwände statt
- Klebstoff besitzt keinen Einfluss und wird nicht berücksichtigt
- geometrische Reglementierungen verursachen das Versagen

In Abbildung 4.3 ist ein Querschnitt durch die Einheitszelle einer Wellstegwabe bei maximaler Umformung dargestellt. Entscheidende Bewertungsgrößen für das Umformvermögen sind die theoretisch abbildbaren Innenradien r_i und Außenradien r_a . Für den maximalen Biegewinkel einer Einheitszelle wird die Bezeichnung α_c eingeführt. S_a stellt die unverformte Länge der Einheitszelle auf der Zugseite dar, wobei die vollkommen gefaltete Struktur der Druckseite durch S_i abgebildet ist. Bei senkrechter Orientierung der Wellenstege zum Biegestempel definiert die Wellenteilung die Kantenlänge S_a . Hingegen wird bei paralleler Ausrichtung S_a durch die Wellenhöhe beschrieben. Zur Ermittlung der Länge S_i , die sich aus der vollkommen gefalteten Struktur der Zellwände auf der Druckseite ergibt, ist es notwendig mit Gl. (4.1) die Oberfläche der gefalteten Einheitszelle A_c zu bestimmen.

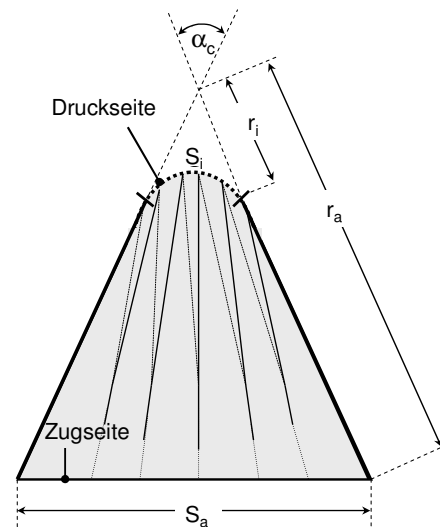


Abbildung 4.3: Modell einer umgeformten Einheitszelle

$$A_c = t_c \cdot (S_c + P_c) \quad (4.1)$$

Wie in Kapitel 3.2.4 beschrieben, lässt sich die Länge eines Wellenzuges durch folgende Gleichung berechnen.

$$S_c = \sqrt{\frac{22}{5} \cdot H_c \cdot P_c} \quad (4.2)$$

Im Folgenden wird die **senkrechte Ausrichtung** der Wabenstege zur Biegekante betrachtet. Die Längen von S_a und S_i sind durch folgende geometrische Abhängigkeiten definiert:

$$S_a = P_c \quad (4.3)$$

und

$$S_i = \frac{A_c}{H_c} \quad (4.4)$$

Unter Berücksichtigung der eingeführten Größen aus Abbildung 4.3 lässt sich die Länge der unverformten Zugseite ebenfalls durch folgende trigonometrische Abhängigkeit bestimmen.

$$S_a = 2 \sin\left(\frac{\alpha_c}{2}\right) \cdot (h_c + r_i) \quad (4.5)$$

Unter der vereinfachten Annahme eines Kreisbogens kann die vollkommen gefaltete Struktur mit Hilfe von Gl. (4.6) berechnet werden.

$$S_i = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot \alpha_c}{360^\circ} \quad (4.6)$$

Durch Gleichsetzen der Formeln (4.3) und (4.5) und Auflösen nach r_i resultiert:

$$r_i = \frac{P_c}{2 \sin(\alpha_c/2)} - h_c \quad (4.7)$$

Mittels Einsetzen von (4.7) in (4.6) und Gleichsetzen mit (4.4) lässt sich folgende Funktion darstellen:

$$f(\alpha_c) = \frac{2 \cdot \pi \cdot \alpha_c}{360^\circ} \cdot \left[\frac{P_c}{2 \sin(\alpha_c/2)} - h_c \right] - \left(\frac{A_c}{H_c} \right) = 0 \quad (4.8)$$

Der Umformwinkel α_c einer Einheitszelle lässt sich aus der Funktion (4.8) mittels einer algorithmisch unterstützten Zielwertsuche unter Berücksichtigung folgender Randbedingungen berechnen:

$$0 \leq \alpha_c \leq 180 \quad \text{und} \quad r_i \geq 0 \quad (4.9)$$

Die Bestimmung des Innenradius r_i erfolgt durch Einsetzen von α_c in Gl. (4.7). Gl. (4.10) ermöglicht die Berechnung des Außenradius in Abhängigkeit des Innenradius und der Wabendicke.

$$r_a = r_i + h_c \quad (4.10)$$

Bei **paralleler Ausrichtung** des Biegestempels zum Wabensteg gelten folgende Ausgangsbedingungen:

$$S_a = H_c \tag{4.11}$$

und

$$S_i = \frac{A_c}{P_c} \tag{4.12}$$

Bei analogem Vorgehen zur senkrechten Wabenausrichtung ergibt sich für den Umformwinkel bei paralleler Ausrichtung folgender Zusammenhang:

$$f(\alpha) = \frac{2 \cdot \pi \cdot \alpha_c}{360^\circ} \cdot \left[\frac{H_c}{2 \sin(\alpha_c/2)} - h_c \right] - \left(\frac{A_c}{P_c} \right) = 0 \tag{4.13}$$

Mit Hilfe von (4.9) und (4.10) lässt sich der theoretische Innen- und Außenradius bei paralleler Ausrichtung der Biegekante zum Wabensteg bestimmen.

4.1.2 Ergebnisdarstellung der theoretischen Umformanalyse

Auf Grundlage des vorgestellten Modells werden geometrische Einflussparameter auf das Umformverhalten untersucht, bei denen der theoretisch umformbare Innenradius die quantitative Vergleichsgröße darstellt. In Abbildung 4.4 wird der theoretische minimale Innenradius r_i und der maximale Biegewinkel in Abhängigkeit der Wabenhöhe für die geometrischen Abmaße einer A ~ TL-115 betrachtet.

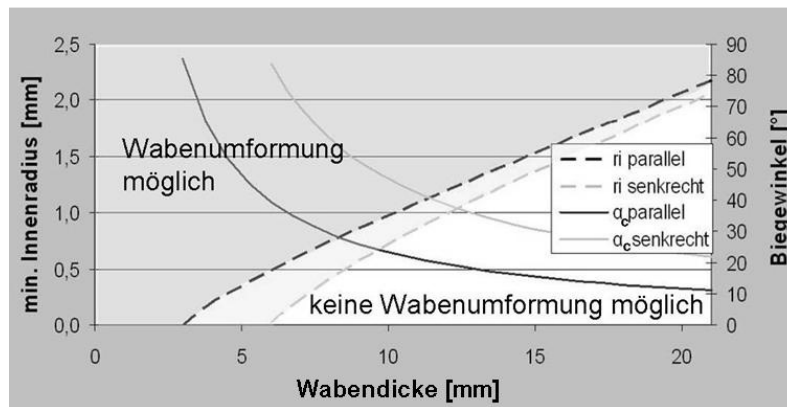


Abbildung 4.4: Theoretischer Innenradius und Biegewinkel in Abhängigkeit der Wabenhöhe

Die grau gefärbten Flächen repräsentieren die theoretisch umformbaren Innenradien. Unterschiede bezüglich des Umformpotenzials zwischen paralleler und senkrechter Ausrichtung sind auf Grundlage des Diagramms als gering einzustufen. Mit zunehmender Wabendicke ist eine notwendige Erhöhung des theoretischen Innenradius und somit eine Verschlechterung der Umformeigenschaften zu erkennen. Der maximale Biegewinkel einer Einheitszelle α_c verringert sich mit zunehmender Wabendicke. Bei senkrechter Ausrichtung ist der Biegewinkel der betrachteten Ein-

heitszelle aufgrund der Relation von Wellenteilung zu Wellenhöhe im Vergleich zur parallelen Ausrichtung größer, wobei sich diese mit zunehmender Kernhöhe annähern.

Abbildung 4.5 veranschaulicht die Zusammenhänge zwischen Papierdicken, Wabendicken und den theoretischen Innenradien.

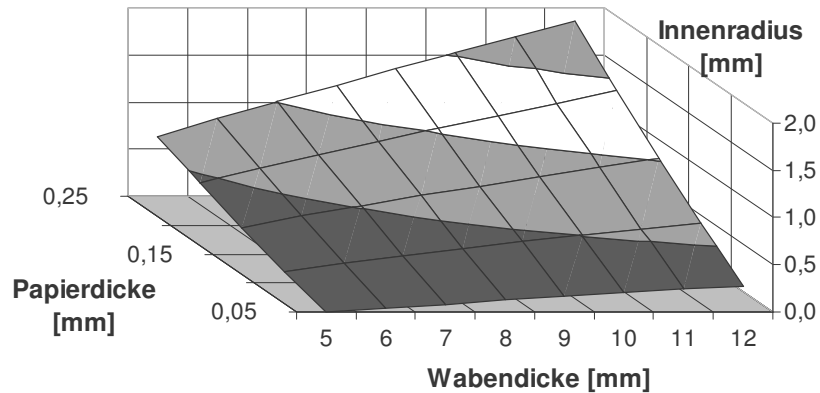


Abbildung 4.5: Abhängigkeit des Innenradius von Papier- und Wabendicke

Aus dem Flächendiagramm ist eine nahezu lineare Beziehung zwischen Wabendicke und minimalem Innenradius sowie zwischen Papierdicke und minimalem Innenradius zu erkennen. Bei Verwendung einer hohen Grammatur und einer hohen Wabendicke ist von einer deutlichen Einschränkung der Umformeigenschaft auszugehen.

Der Einfluss auf den theoretischen Innenradius verschiedener Zellgrößen mit identischer Papiergrammatur von 115 g/m^2 (entspr. $0,17 \text{ mm}$) ist in Abbildung 4.6 exemplarisch dargestellt.

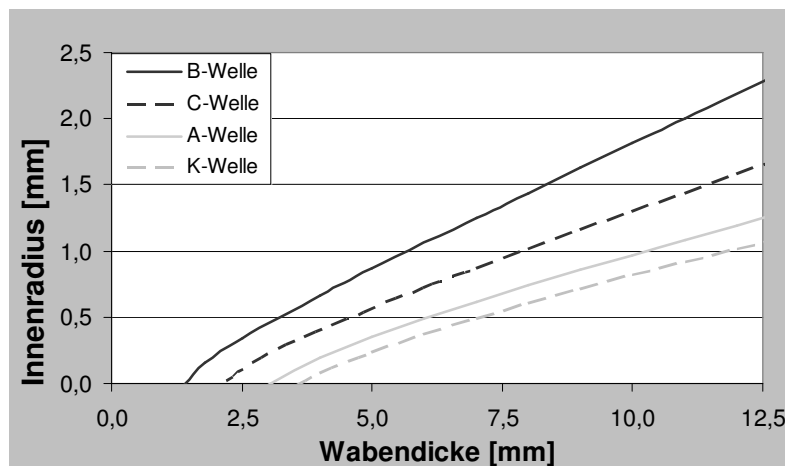


Abbildung 4.6: Einfluss der Zellgeometrie auf den theoretischen Innenradius

Im Diagramm ist eine nahezu lineare Abhängigkeit zwischen minimalem theoretischen Innenradius und der Wabendicke zu erkennen. Mit abnehmender Wabenzellgröße erhöht sich der theoretisch umformbare Innenradius, wodurch das höhere Umformpotenzial von Wabenkernen mit großen Zellen ersichtlich wird.

4.2 Experimentelle Untersuchung des Umformverhaltens

In folgendem Kapitel werden neben den geometrischen Einflussparametern materialspezifische und prozessbedingte Einflussgrößen auf das Umformverhalten der Papierwaben anhand von Sensitivitätsanalysen experimentell untersucht. Mit Hilfe zweier verschiedener Versuchsdurchführungen werden quantitative Bewertungszahlen ermittelt, die Rückschlüsse auf die Relevanz der Einflussparameter ermöglichen. Bei der Umformung in einem Werkzeug werden Fehlstellen an der umgeformten Papierwabe analysiert und eine Schädigungszahl als Bewertungsgröße bestimmt. Beim Biegeversuch wird hingegen der maximale Biegewinkel ohne Fehlstellen erfasst, der die zu vergleichende quantitative Größe darstellt. Bei den Versuchsdurchführungen wurden folgende Einflussgrößen betrachtet:

- Zellgeometrie
- Papierfeuchtigkeit
- Wabendicke
- Art des Klebstoffes
- Orientierung des Wabenkerns
- Umformgeschwindigkeit

Zu Beginn werden beide Versuche gesondert beschrieben, wobei die Versuchsergebnisse anschließend gleichzeitig vorgestellt werden. In Tabelle 4.1 sind die geprüften Papierwaben aufgelistet. Infolge fertigungsbedingter Einschränkungen konnten Papierwaben mit einer Höhe von drei Millimeter zum Teil nicht hergestellt werden. Wegen der geringen Biegekraft wurden die Papierwaben mit einer Dicke von 3 mm nicht berücksichtigt.

Tabelle 4.1: Untersuchte Papierwaben bei der Umformanalyse

Wabenbezeichnung	Wabenkernhöhe [mm]	
	Umformwerkzeug	Biegeversuch
A~ TL-90 WG	3; 6; 9	6; 9
A~ TL-90 WL	3; 6; 9	6; 9
A~ TL-115 WG	3; 6; 9	6; 9
C~ TL-115 WG	3; 6; 9	6; 9
K~ TL-115 WL	6; 9	6; 9
A~ KSP-50 WG	6; 9	6; 9
B~ KSP-70 WG	3; 6; 9	6; 9
Hex TL-150 WG	6; 9	6; 9

4.2.1 Feuchtigkeitskonditionierung

Die Einflussanalyse der Papierwabenfeuchtigkeit auf das Umformverhalten wurde mit Feuchtigkeiten von sechs, zwölf und zwanzig Massenprozent durchgeführt. Aufgrund deutlicher Stabilitätsbeeinträchtigung der Papierwaben ist ein höherer Feuchtigkeitsgehalt als zwanzig Prozent nicht untersucht worden. Wie in [GE03, PO09] beschrieben, zeigte die thermogravimetrische Analyse (siehe Kapitel 6.1.2), dass sich bei Raumklimalagerung (ca. 55 % Luftfeuchtigkeit und 20 °C) der Papierwaben eine Feuchtigkeit von etwa sechs Massenprozent einstellt. Mit Hilfe einer

Zweistoffdüse wurde die Feuchtigkeit auf zwölf und zwanzig Massenprozent gesteigert, wobei auf ein gleichmäßiges Sprühbild geachtet wurde. Anschließend fand eine gravimetrische Kontrolle des Feuchtigkeitsgehaltes statt. Wegen der manuell durchgeführten Befeuchtung sind Schwankungen des Feuchtigkeitsgehaltes von $\pm 2\%$ akzeptiert worden. Eine Alternative zur Konditionierung des Feuchtigkeitsgehaltes über die hygroskopische Papiereigenschaft wird in der Literatur [AL05, AL07] beschrieben, wobei das Papier über 24 Stunden in einer Klimakammer gelagert wird. Aufgrund der Lagerungsdauer, wurde diese Konditionierungsmethode nicht angewendet.

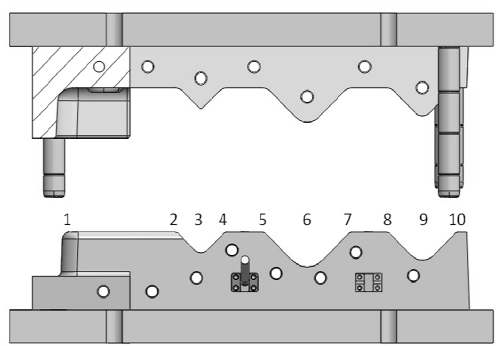
4.2.2 Umformanalyse mittels Werkzeug

Die Analyse des Umformverhaltens mit Hilfe eines Werkzeugs ermöglicht das Abprüfen verschiedener Radien und erlaubt eine Betrachtung und Klassifizierung der aufgetretenen Schadensbilder. Die Schädigungszahl, die aus den Schadensbildern generiert wird, stellt die quantitative Bewertungsgröße beim Vergleich der Einflussparameter dar.

4.2.2.1 Versuchsdurchführung

Mit Hilfe einer Schablone wurden die Papierwaben zugeschnitten (siehe Anhang Kapitel 4). Die Umformung der Waben erfolgte an einer hydraulischen Presse des Typs Wickert WKP 3000 S mit einer Werkzeugschließgeschwindigkeit von 7 mm/s. Bei der Umformung von trockenen Waben (6 % Feuchtigkeit) wurde eine Werkzeughaltezeit von fünf Sekunden und eine Oberflächentemperatur von 20 °C gewählt, wohingegen zur Umformung und zur Trocknung der befeuchteten Waben (12 % und 20 % Feuchtigkeit) eine Werkzeughaltezeit von 40 Sekunden und eine Werkzeugoberflächentemperatur von 150 °C verwendet wurde. Bei der Versuchsdurchführung fand eine Unterscheidung der Wabenorientierung analog zur Definition aus Abbildung 4.1 und Abbildung 4.7 statt. Jeder Versuch wurde mit drei Umformproben durchgeführt.

Tabelle 4.2: Versuchsparmeter der Umformung mit Werkzeug

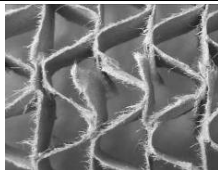
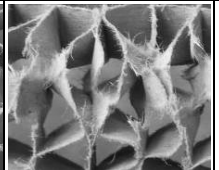
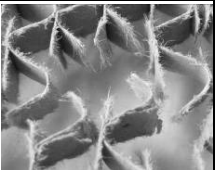
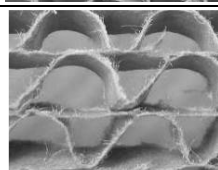
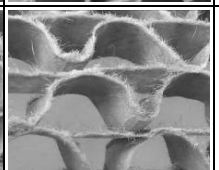
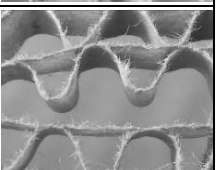
Schädigungsanalyse					
Umformvorgang	weggesteuert				
Werkzeugabmaße	Anhang Kapitel 4				
Probenmaterial	siehe Tabelle 4.1				
Temperatur	20; 150 °C				
Pressenvorschub	7 mm/s				
Werkzeughaltezeit	5; 40 s				
Probenfeuchtigkeit	6; 12; 20 %				
Radien der Werkzeugunterschale	Biegewinkel			<i>Umformwerkzeug</i>	
$R_1 = 6 \text{ mm}$	$\alpha = 88^\circ$				
$R_{2,4,5,7,8,10} = 6 \text{ mm}$	$\alpha = 45^\circ$				
$R_3 = 10 \text{ mm}$	$\alpha = 90^\circ$	$R_9 = 18 \text{ mm}$	$\alpha = 90^\circ$		

Das zweiteilige Stahlwerkzeug, bestehend aus Ober- und Unterschale, wurde zur Sicherstellung einer gleichmäßigen Oberflächenbeschaffenheit mit Polytetrafluorethylen (PTFE) beschichtet. Zur Prüfung der drei Wabendicken ist die Werkzeugoberschale in drei Varianten, jeweils mit dem Aufmaß der Wabendicke zur Oberfläche der Unterschale, gefertigt worden. In Tabelle 4.2 ist ein Querschnitt durch das Umformwerkzeug mit dessen Umformradien dargestellt. Die Bereiche lassen sich in biaxiale (Kantenverlauf 1) und axiale (Kantenverlauf 2-10) Umformzonen unterteilen. Zur Betrachtung des Einflusses lokaler Verprägungen wurde die Oberschale mit zwei verschiedenen Stempelformgeometrien versehen (siehe Anhang Kapitel 4). Bei den umgeformten und lokal geprägten Papierwaben konnte keine Unterscheidung zwischen den Beschädigungen, verursacht durch die verschiedenen Stempelformen, festgestellt werden, weshalb diese im Weiteren nicht betrachtet werden.

4.2.2.2 Auswertungsmethodik

Nach Entnahme der Papierwabe aus dem Werkzeug wurden die umgeformten Bereiche nach Beschädigungen in Form von Papierrissen oder Ablösungen an den Klebeflächen untersucht. In Tabelle 4.3 sind die Schadensbilder der umgeformten Papierwaben in senkrechter und paralleler Ausrichtung abgebildet. Der Schädigungsfaktor beschreibt die Tiefe der jeweiligen Fehlstellen. Bei einem Schädigungsfaktor von 0,3 dringen die Risse oder Ablösungen bis zu 30 % in die Tiefe der Wabe ein. Bei einem Schädigungsfaktor von 1,0 ist die Wabe über die gesamte Dicke beschädigt.

Tabelle 4.3: Schädigungsfaktoren der umgeformten Papierwaben

Schädigungsfaktor	0,3	0,5	1,0
Ausrichtung ⊥ zur Biegekante			
Ausrichtung ∥ zur Biegekante			

Mit Hilfe der beschädigten Kantenlänge l_i und den Schädigungsfaktoren lässt sich die Schädigungszahl R_{UZ} nach Gl. (4.14) bestimmen.

$$R_{UZ} = \frac{\sum l_i \cdot 0,3 + \sum l_i \cdot 0,5 + \sum l_i \cdot 1}{L_{UZ}} \quad (4.14)$$

Die Werkzeugkantenlänge L_{UZ} stellt die Summe aller Biegekanten im Werkzeug dar. Findet beispielsweise eine Beschädigung mit dem Schädigungsfaktor von 1,0 in allen Umformzonen statt, beträgt die Beschädigung 100 Prozent.

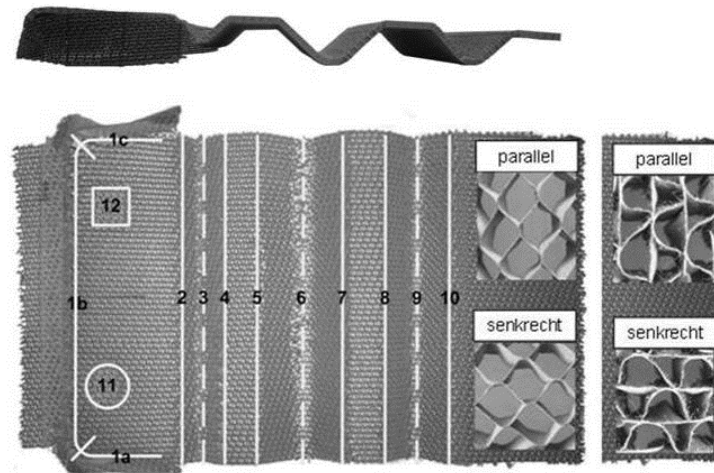


Abbildung 4.7: Umformzonen einer Papierwabe umgeformt mit Werkzeug

Die biaxialen Umformzonen mit den Kanten 1 / a,b,c werden getrennt von den Kanten 2 bis 10 ausgewertet welche rein axialen Beanspruchungen unterliegen (siehe Abbildung 4.7). Als Vergleichsgrößen wurden die Mittelwerte von drei Umformproben gebildet und in der Versuchsauswertung berücksichtigt.

4.2.3 Umformanalyse mittels Biegeversuch

Die Biegeprüfung dient der Ermittlung des Biegewinkels beim Auftreten erster Fehlstellen. Der Biegeversuch ist an [DIN EN ISO 7438] zur Bestimmung der plastischen Umformbarkeit metallischer Werkstoffe angelehnt. Der maximale Biegewinkel ohne Fehlstellen stellt die quantitative Vergleichsgröße der betrachteten Einflussparameter dar. Der durchgeführte Versuchsaufbau und dessen Ergebnisse sind ebenfalls in der Veröffentlichung [IW12] beschrieben.

4.2.3.1 Versuchsdurchführung

Die Proben wurden auf die Zielgröße zugeschnitten und gegebenenfalls mit einer Zweistoffdüse, wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben, befeuchtet. Die Bestimmung des Auflagerabstands erfolgte angelehnt an [DIN EN ISO 7438] durch Gl. (4.15) in Abhängigkeit der Wabendicke.

$$a_A = d_F + 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot d_A + 2 \cdot h_c + 2 \text{ mm} \quad (4.15)$$

Um den Stick-Slip-Effekt der rutschenden Waben zu minimieren, wurde zur Verringerung der Reibung das Auflager mit einem Ölfilm überzogen. Die Aufzeichnung des Kraft-Weg-Diagramms erfolgte bis zur Fehlstellendetektion oder einem Biegewinkel von maximal 145 Grad. Jede Probenkonfiguration wurde mindestens dreimal geprüft, woraus der Mittelwert als Vergleichsgröße bestimmt wurde. Die Versuchsparameter zur durchgeführten 3-Punkt-Biegeprüfung sind in Tabelle 4.4 angegeben.

Tabelle 4.4: Versuchsparameter der Biegeprüfung

3-Punkt-Biegeprüfung		
Prüfgeschwindigkeit	15; 100 mm/min	
Auflagerabstand	34; 40 mm (siehe Gl. (4.15))	
Prüfnorm	DIN EN ISO 7438 angelehnt	
Probengröße [mm]	B x H x T: 40 x 100 x (6; 9)	
Probenfeuchtigkeit	6; 12; 20 %	
Probenmaterial	siehe Tabelle 4.1	
Prüfklima	Normklima	
Durchmesser Auflager	10 mm	
Durchmesser Druckfinne	10 mm	

4.2.3.2 Auswertungsmethodik

Der Umformprozess wurde durchgehend optisch überwacht. Bei Auftreten eines Risses oder einer Ablösung ist der Verfahrensweg als Vergleichsgröße festgehalten und der Biegewinkel α_u bestimmt worden. Die Gleichung zur Berechnung des Biegewinkels in Abhängigkeit des Traversenwegs kann aus [DIN EN ISO 7438] entnommen werden. Bei Rissbildung der Wabenstege oder bei Lösen der Klebestellen konnte meist ein signifikanter Abfall des Kraftverlaufs festgestellt werden. Bei folgenden Darstellungen des Kraft-Biegewinkel-Verlaufs wird der repräsentative Funktionsverlauf der drei Umformproben abgebildet.

4.2.4 Ergebnisdarstellung der experimentellen Umformanalyse

Im Folgenden werden die Prüfergebnisse aus den experimentellen Umformversuchen vorgestellt. Es findet eine parallele Darstellung der Versuchsergebnisse mit dem Umformwerkzeug und des Biegeversuchs statt. Die links abgebildeten Diagramme veranschaulichen die Ergebnisse aus den Versuchen mittels Umformwerkzeug, wohingegen die Ergebnisse der Biegeprüfung auf der rechten Seite abgebildet sind. Eine positive Wirkung der untersuchten Einflussparameter auf das Umformverhalten äußert sich durch eine niedrige Schädigungszahl und einen hohen Biegewinkel. Die Spezifikation der untersuchten Papierwaben können entweder den entsprechenden Legenden oder Tabelle 4.1 entnommen werden.

- Einfluss der Papierfeuchtigkeit und der Wabendicke auf das Umformverhalten

In Abbildung 4.8 werden zur Veranschaulichung des Feuchtigkeitseinflusses die Mittelwerte aller untersuchten Wabenkerne aus Tabelle 4.1 in senkrechter und paralleler Ausrichtung betrachtet. Eine positive Beeinflussung der erhöhten Papierfeuchtigkeit auf das Umformverhalten ist in beiden Diagrammen zu erkennen. Durch die Erhöhung der Feuchtigkeit konnte eine Verringerung der gemittelten Schädigungszahl von bis zu 40 % erreicht werden. Aufgrund der Funktionsverläufe ist eine zunehmende Verbesserung der Umformeigenschaften bis zum maximal betrachteten Feuchtigkeitsgehalt von 20 % zu erkennen. Durch zunehmende Befeuchtung wird die Steifigkeit

des Papiers reduziert, wie Tenzer und Hesse in [TE88, HE61] anführen. Bei der Umformung der Papierwabe bewirkt die reduzierte Papiersteifigkeit während des Umformprozesses eine Verringerung der induzierten Spannungen innerhalb der Zellwände. Die Zellwandbereiche der Druckseite falten sich wegen der reduzierten Steifigkeit kompakter und erzeugen eine geringere Gegenkraft auf der Zugseite. Aus der Literatur [TE88] ist bekannt, dass das Feuchtigkeitsoptimum für das Tiefziehen von Papier im Bereich von 12 bis 18 % vorliegt. Des Weiteren wird die Steigerung der Umformeigenschaften von imprägnierten Wabekernen durch Wasserlagerung in der Patentschrift [P-HO02] offengelegt.

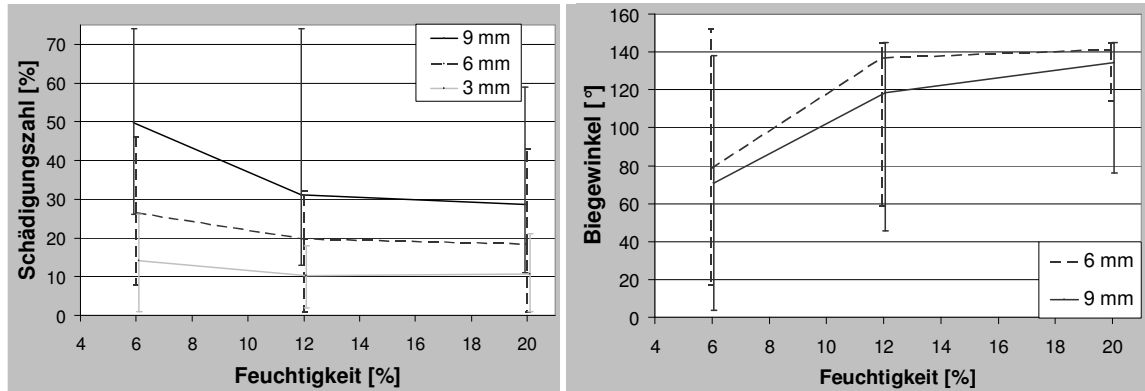


Abbildung 4.8: Einfluss der Papierfeuchtigkeit und der Wabendicke auf das Umformverhalten

Das Befeuchten von Papier bewirkt ein reversibles Auflösen der Wasserstoffbrückenbindungen. Während des Trocknungsprozesses nähern sich die Cellulosefasern durch die Oberflächenspannung aneinander an, wodurch die Wasserstoffbrückenbindungen wiederhergestellt werden [EI99]. Findet während oder nach der Umformung eine Trocknung der Papierwabenkerne in einer Kavität statt, bleibt die umgeformte Struktur nahezu formstabil (siehe Anhang Kapitel 4). Aufgrund der Formstabilität kann die umgeformte Papierwabe als Preform betrachtet werden.

Eine Verringerung des Umformpotenzials bei zunehmender Wabendicke ist durch den Abfall des Biegewinkels und Erhöhung der Schädigungszahl eindeutig zu erkennen. Mit zunehmender Wabendicke wird bei gleichem Biegewinkel eine höhere Dehnung und somit eine größere Spannung auf der Zugseite erzeugt. Das Versagen von dicken Waben wird somit frühzeitig bei kleinem Biegewinkel eingeleitet. Die gemittelte Schädigungszahl einer Papierwabe mit einer Dicke von 3 mm ist im Vergleich zur Wabendicke von 9 mm ca. 70 % niedriger.

- Einfluss der Wabenzellengeometrie und der Wabenausrichtung auf das Umformverhalten

Zur Betrachtung des Einflusses der Zellengeometrie und der Wabenausrichtung sind exemplarisch in Abbildung 4.9 die Umformergebnisse der trockenen Waben mit der Dicke von 9 mm bei paralleler Ausrichtung abgebildet. Die Ergebnisse der senkrechten Ausrichtung sind in Abbildung 4.10 dargestellt. Die in diesem Abschnitt betrachteten Papierwaben wurden aus Testliner gefertigt. Wegen der begrenzten Vielfalt am Markt konnten keine konstanten Papiergrammaturen betrachtet werden, was zu geringfügigen Beeinflussungen der Ergebnisse geführt haben kann.

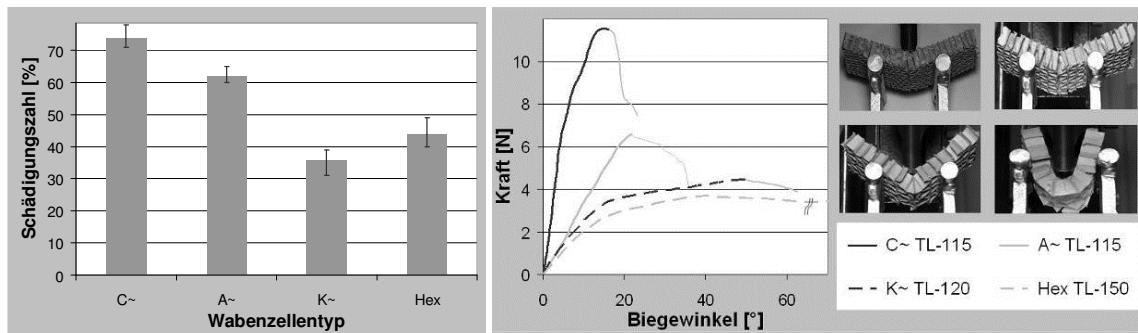


Abbildung 4.9: Einfluss der Zellgeometrie auf das Umformverhalten bei paralleler Ausrichtung

Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass sich mit steigender Zellgröße eine Verringerung der Schädigungszahl und eine Erhöhung des Biege-Winkels, sowohl in paralleler als auch in senkrechter Wabenausrichtung, einstellen. Die C-Welle besitzt im Vergleich zur K-Welle eine bis zu 60 % höhere Schädigungszahl. Aus dem Kraft-Biege-Winkel-Verlauf ist der Zusammenhang zwischen Biegesteifigkeit des Wabenkerns und der Zellgröße ersichtlich. Mit abnehmender Zellgröße erhöht sich das Flächenträgheitsmoment, wodurch die Struktursteifigkeit des Wabenkerns steigt. Die induzierten Spannungen während der Biegeumformung leiten hierdurch ein frühzeitiges Versagen der Wabenproben mit kleinen Zellgrößen ein.

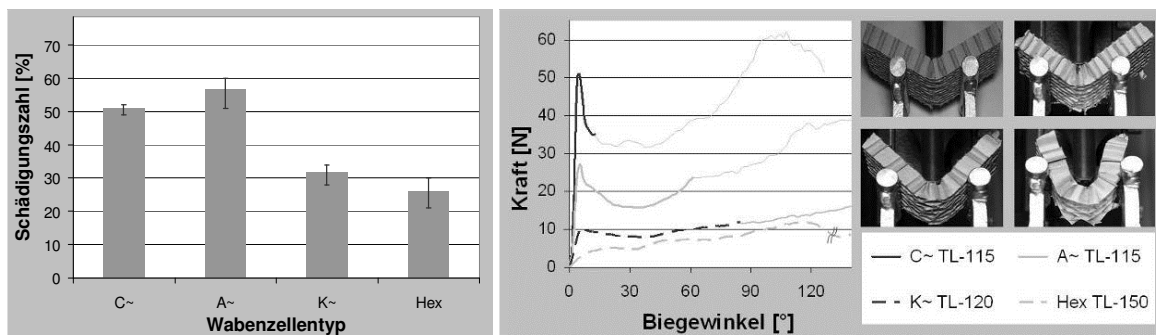


Abbildung 4.10: Einfluss der Zellgeometrie auf das Umformverhalten bei senkrechter Ausrichtung

Die Anordnung der Stege in einer Wellstegwabe bzw. der Doppelwandungen einer Hexagonalwabe bewirken bei senkrechter Ausrichtung, wie in den Kraft-Winkel-Verläufen zu erkennen, eine höhere Biegesteifigkeit im Vergleich zur parallelen Ausrichtung. Der durchschnittlich höhere darstellbare Biege-Winkel und die niedrigere Schädigungszahl veranschaulichen das höhere Umformpotenzial der betrachteten Papierwaben bei senkrechter Ausrichtung. Bei paralleler Ausrichtung lösen sich die Zellwände an den Klebeflächen meist abrupt voneinander, was zu einem unmittelbaren Kraftabfall durch das ausgeprägte Strukturversagen führt. Bei senkrechter Ausrichtung hingegen bilden sich Risse an den Stegen, die einen geringen Kraftabfall bewirken. Trotz Rissausbreitung ist eine weitere Umformung und Kraftaufnahme der Papierwabe möglich. Dies ist durch die fortlaufenden helleren Funktionsverläufe dargestellt.

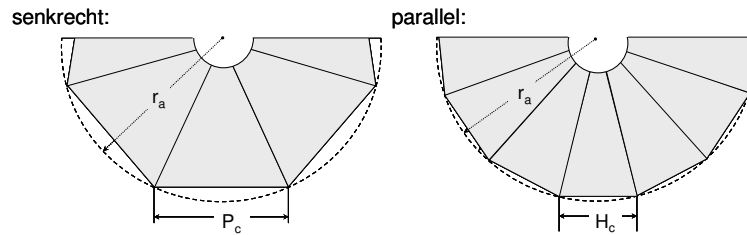


Abbildung 4.11: Anzahl der Einheitszellen bei senkrechter und paralleler Biegebeanspruchung

Um denselben Biegewinkel und denselben Radius darzustellen, bilden in paralleler Ausrichtung mehr Einheitszellen die gewölbte Außenkontur als in senkrechter Ausrichtung (siehe Abbildung 4.12), wodurch eine geschlossenerere Oberfläche bei paralleler Ausrichtung resultiert. Dieses Verhältnis lässt sich durch Gl. (4.16) beschreiben.

$$\text{Anzahl Einheitszellen}_{\perp} = \frac{H_c}{P_c} \text{Anzahl Einheitszellen}_{\parallel} \quad (4.16)$$

Bei senkrechter Ausrichtung fördern die großen Abstände der Stege, insbesondere bei der Verwendung von dünnen Deckschichten oder Dekorwaren, das Auftreten von Oberflächenabzeichnungen. Somit ist zur Vermeidung von Oberflächenfehlern eine parallele Ausrichtung zu bevorzugen. Die Ausprägung der Sattelform durch die gegenelastische Verformung der Expansionswabe (siehe Abbildung 4.9 und Abbildung 4.10) verfälschte die Messungen der Biegeprüfung geringfügig. Dennoch wird durch die Versuchsergebnisse das hohe Umformpotenzial der Expansionswabe deutlich. Beim Einsatz von dünnen Deckschichtmaterialien ist wegen den großen Zellwandabständen der Expansionswaben von Oberflächenabzeichnungen auszugehen.

- Einfluss der Umformgeschwindigkeit auf das Umformverhalten

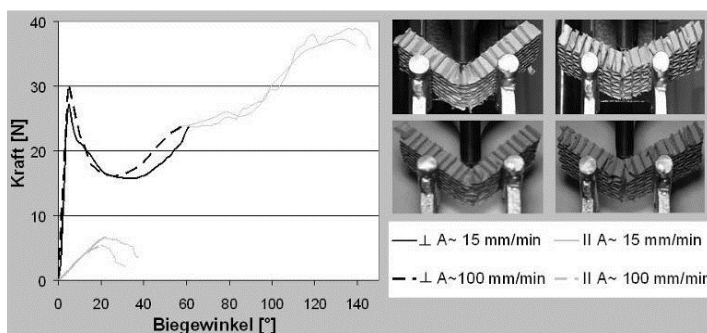


Abbildung 4.12: Einfluss der Geschwindigkeit auf das Umformverhalten

Die Einflussanalyse der Umformgeschwindigkeit beschränkt sich auf den Biegeversuch mit der Wellstegwabe A ~ TL-115 WG. Die Erhöhung der Umformgeschwindigkeit von 15 auf 100 mm/min zeigt sowohl bei senkrechter als auch bei paralleler Ausrichtung kaum Einfluss auf den maximalen Biegewinkel. Bei der Darstellung von komplexen Geometrien ist das Nachfließen des Wabenkerns in der Werkzeugkavität zu berücksichtigen, weshalb eine Anpassung der Schließgeschwindigkeit an die jeweilige Bauteilgeometrie stattfinden muss.

Bei der Darstellung von komplexen Geometrien ist das Nachfließen des Wabenkerns in der Werkzeugkavität zu berücksichtigen, weshalb eine Anpassung der Schließgeschwindigkeit an die jeweilige Bauteilgeometrie stattfinden muss.

- Einfluss der Papierstärke und der Papierart auf das Umformverhalten

Wie in Kapitel 3.1.2 angeführt, ist eine deutliche Erhöhung der Papiergrammatur nur durch einen Wechsel der Papiersorte möglich. Kraftsackpapiere werden üblicherweise mit geringeren Papiergrammaturen im Vergleich zum Testliner hergestellt. In Abbildung 4.13 sind die Schädigungszahlen der Wellstegwaben A ~ TL-90 WG und A ~ KSP-50 WG mit einer Wabendicke von 9 mm in senkrechter und paralleler Richtung abgebildet. Bei beiden Kernmaterialien ist eine Verbesserung der Umformeigenschaften durch Erhöhung der Wabenfeuchtigkeit zu erkennen. Das erhöhte Umformpotenzial bei senkrechter Wabenausrichtung ist durch die niedrigere Schädigungszahl im Vergleich zur parallelen Ausrichtung ersichtlich.

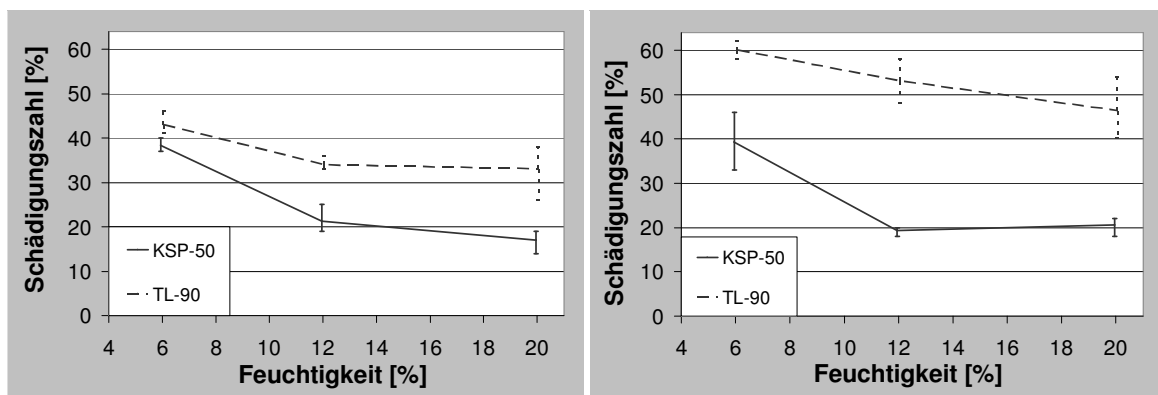


Abbildung 4.13: Einfluss der Papiersorte auf das Umformverhalten bei senkrechter (li.) und paralleler (re.) Ausrichtung

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass das Kraftsackpapier in beiden Ausrichtungen ein höheres Umformpotenzial im Vergleich zum Testliner besitzt. Die höheren Umformeigenschaften des Kraftsackpapiers sind vermutlich auf die längeren Fasern des Zellstoffs und deren höhere Flexibilität im Vergleich zum Holzschliff zurückzuführen. Ein direkter Vergleich der Umformeigenschaften zweier Papiersorten mit identischer Grammatur ist wegen der beschränkten Verfügbarkeit nicht durchgeführt worden.

- Einfluss der Klebstoffart auf das Umformverhalten

Wie in Kapitel 3.1.5 dargestellt, sind verleimte Papierwaben mit Weißleim und Wasserglasklebstoff untersucht worden. Abbildung 4.14 zeigt die Versuchsergebnisse der Wellstegwabe A ~ TL-90 mit einer Wabendicke von 9 mm bei paralleler Ausrichtung. Aus den Versuchsergebnissen ist ersichtlich, dass im trockenen Zustand nahezu kein Unterschied bzgl. des Umformpotenzials festzustellen ist. Mit zunehmender Feuchtigkeit zeigt sich sowohl bei der Schädigungszahl als auch beim Biegewinkel ein deutlich besseres Umformverhalten der mit Weißleim verklebten Wellstegwaben.

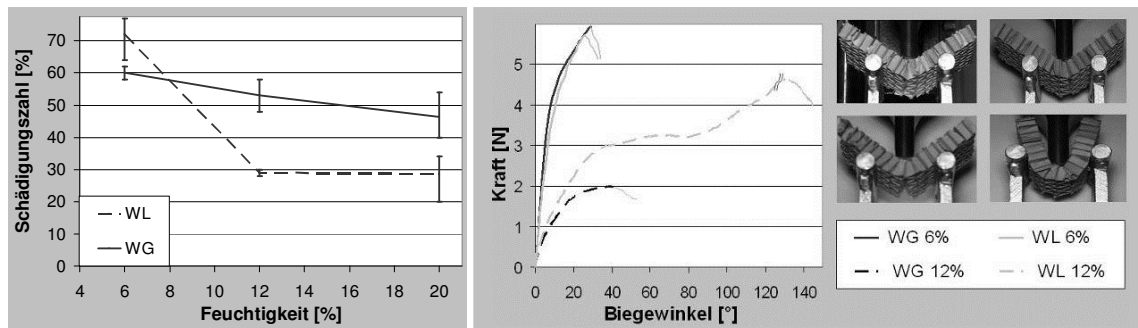


Abbildung 4.14: Einfluss der Klebstoffart auf das Umformverhalten

Das Verhalten der Klebstoffarten unter Feuchtigkeitsbeaufschlagung wurde im Rahmen der Arbeit nicht weiter untersucht. Dennoch konnte mit Hilfe der unabhängigen Versuchsaufbauten gezeigt werden, dass der eingesetzte Wasserglasklebstoff deutlich anfälliger bezüglich Feuchtigkeitseinwirkung gegenüber dem Weißleim ist.

4.3 Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse

Die Betrachtung der geometrischen Einflussparameter durch das analytische Modell zeigt dieselben Wirkungen auf das Umformverhalten wie die Ergebnisse aus der Sensitivitätsanalyse, weshalb das Modell zur qualitativen Abschätzung der geometrischen Einflussparameter zukünftig eingesetzt werden kann. Mit beiden Methoden konnte ein positiver Einfluss auf das Umformverhalten durch große Wabenzellen, niedrige Wabendicken und niedrige Papiergrammaturen nachgewiesen werden. Die Sensitivitätsanalysen bestätigten des Weiteren, dass eine erhöhte Papierfeuchtigkeit die Umformung positiv beeinflusst.

Anhand des Referenztyps A~ TL-90 WG mit 9 mm Wabendicke und 6 % Feuchtigkeit zeigt Tabelle 4.5 die Wirkung der untersuchten Einflussparameter. Die angeführten Anmerkungen fassen die Erkenntnisse aus den Versuchsreihen zusammen.

Umformung von Papierwaben

Tabelle 4.5: Bewertung der Einflussparameter auf das Umformverhalten anhand Referenztyp

Papierwabenspezifikation		Umform- werkzeug	Biege- versuch	Anmerkung
		Schädi- gungszahl	Biege- winkel	
A~ TL-90 WG 9 mm 6% II		60 %	42°	Referenztyp
Einflussparameter:				
Wabendicke	6 mm	33 %	41°	Höheres Umformpotenzial kleiner Wabendicken
	3 mm	12 %	-	
Papierfeuchtigkeit	12 %	53 %	76°	Erhöhte Umformung durch Feuchtigkeitsbeaufschlagung
	20 %	46 %	145°	
Orientierung	⊥	43 %	76°	Senkrechte Ausrichtung ist zu bevorzugen
Klebstoff	WL	6 %	47°	Im trockenen Zustand keine Präferenz
		20 % Ref.	29 %	
Grammatur	115 g/m ²	62 %	31°	Geringer Einfluss
Erweiterte Betrachtung:				
Wabenzellgröße	B~ KSP-70 WG	61 %	32°	Erhöhtes Umformpotenzial großer Wabenzellen
	C~ TL-115 WG	74 %	27°	
	K~ TL-115 WL	36 %	43°	
	Hex TL-140 WG	44 %	145°	

Die experimentell bestimmten axialen und biaxialen Radien aus den Versuchen mittels Umformwerkzeug sowie die Biegewinkel aus dem Biegeversuch sind im Anhang Kapitel 4 hinterlegt. Die angeführten Werte können als Richtgrößen zur konstruktiven Gestaltung von Sandwichbauteilen mit Papierwabenkernen herangezogen werden. Bei den Versuchsreihen mit Hilfe des Umformwerkzeugs und dem Biegeversuch wurden die minimal umformbaren Radien und maximalen Biegewinkel der Papierwaben ohne Deckschichten bestimmt. Eine Optimierung der geometrischen Konstruktionsrichtwerte kann durch Analysen des Umformverhaltens von gesamten Sandwichverbunden ermöglicht werden. Hierbei sollte zukünftig die Wirkung verschiedener Deckschichtparameter in der Bewertung berücksichtigt werden.

5 Mechanische Materialcharakterisierung des Sandwichverbundes

Im Folgenden wird das mechanische Verhalten des Sandwichverbundes mit Hilfe verschiedener Werkstoffprüfungen untersucht. Der Fokus liegt hierbei auf dem Sandwichverbund, bestehend aus Papierwabenkern und Hybrid-Nadelvliesdeckschichten. Für das Materialverständnis der Deckschichten werden zu Beginn die eingesetzten textilen Halbzeuge mit deren mechanischen Eigenschaften vorgestellt. Die Auswirkungen verschiedener Deckschicht- und Wabenparameter auf die mechanischen Eigenschaften der Sandwichverbunde werden durch unterschiedliche Werkstoffprüfungen untersucht. Durch die gewonnenen Ergebnisse können Auswirkungen der einzelnen Materialausprägungen analysiert werden, wodurch eine Optimierung der Sandwichverbundeigenschaften ermöglicht wird. Die Eignung von alternativen glasfaserverstärkten thermoplastischen Deckschichthalbzeugen bzw. die mechanischen Kennwerte dieser Sandwichverbundsysteme werden am Ende dieses Kapitels aufgezeigt. Mit Hilfe einer analytischen Berechnung und einer FEM-Simulation werden Methoden zur Berechnung der Sandwich- und Bauteilsteifigkeit vorgestellt.

5.1 Eigenschaften der Hybrid-Nadelvliesstoffe

Die industrielle Relevanz von Vliesstoffen wird durch das jährliche Produktionsvolumen Deutschlands von ca. 213 200 Tonnen ersichtlich (Stand: 1998) [AL00]. Die geringen Produktionsstufen und die damit verbundenen günstigen Herstellungskosten, die mögliche Verwendung von Recyclingmaterialien, die weitgehende Einstellbarkeit der Materialeigenschaften und die Verwendung verschiedener Fasersorten stellen im Vergleich zu Geweben, Gewirken und Gestriicken die Vorteile der Hybridvliesstoffe bei der Herstellung faserverstärkter Kunststoffe dar. Die niedrigeren mechanischen Eigenschaften, die nicht gezielt einstellbare Materialanisotropie und die lokalen Materialschwankungen sind die Nachteile des hybriden Flächentextils [LU82]. Trotz der Nachteile haben sich Hybridvliese als Halbzeuge zur Herstellung von Fahrzeuginnenraumverkleidungen etabliert. Bei der Herstellung von Tür- und Cockpitverkleidungen werden überwiegend Naturfasern mit thermoplastischen Matrices verwendet. Bei höherer mechanischer Bauteilbeanspruchung, wie zum Beispiel einer Hutablage, finden Glasfasern als Verstärkungsmaterial Anwendung.

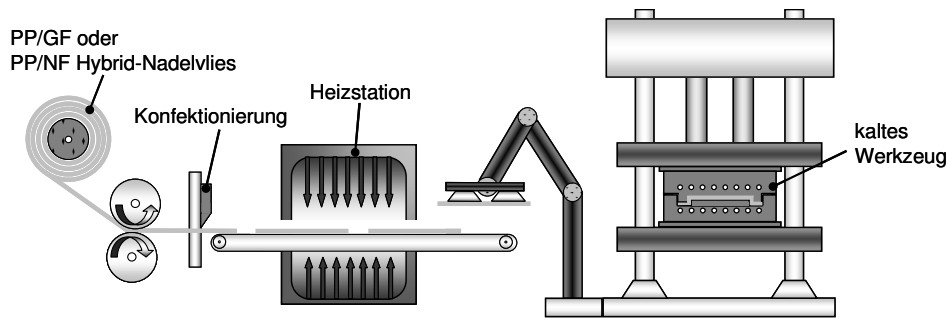


Abbildung 5.1: Formpressen von thermoplastischen Hybrid-Nadelvliesstoffen

Das Verfahren zur Bauteilherstellung aus Hybrid-Nadelvliesstoffen mit thermoplastischer Matrix wird in der Literatur als Formpressen bezeichnet [SM04]. Wie in Abbildung 5.1 ersichtlich, werden die Nadelvliese automatisiert von der Vliesstoffrolle konfektioniert. Über das Transportband erfolgt die Zuführung der konfektionierten Halbzeuge zur Vorheizstation. Durch die Temperaturbeaufschlagung findet die Plastifizierung der Thermoplastfasern statt. Die Vorheiztemperatur richtet sich nach dem eingesetzten Matrixpolymer. Um eine ausreichend niedrige Viskosität zu gewährleisten, ist bei Polypropylenfasern eine Temperatur von 200 bis 250 °C erforderlich [MU03]. Die Formgebung des aufgeheizten Nadelvlieses findet anschließend im kalten Formwerkzeug statt, wobei die Formmasse erstarrt. Für weitere Informationen hierfür sei beispielsweise auf [OD02] verwiesen.

5.1.1 Nadelvliesstoffherstellung

Zur Herstellung von Hybrid-Nadelvliesstoffen werden, wie in Abbildung 5.2 schematisch dargestellt, die Stapelfasern mit den gewünschten Massenanteilen gewogen und durchmischt.

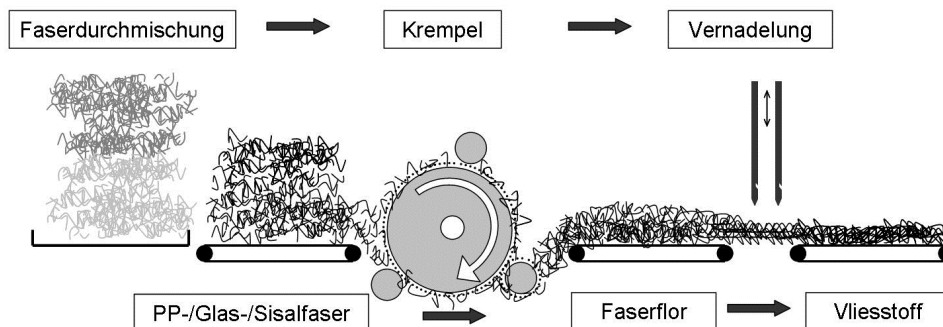


Abbildung 5.2: Nadelvliesherstellung, angelehnt an [KA04]

Mit Hilfe der Krempel werden die Faserbündel parallelisiert, gereinigt, aufgeschlossen und zu einem Faserflor geordnet. Anschließend findet die Vernadelung des mehrschichtigen Faserflors statt. Hierbei erfolgt mittels Widerhakennadeln eine mechanische Verfestigung zwischen den Fasern, wobei die Faserstruktur verdichtet und teilweise in Dickenrichtung umgelenkt wird. Die anisotropen mechanischen Eigenschaften des Nadelvlieses veranschaulichen die dominierende Faserorientierung innerhalb des Faserflors. Im Gegensatz zu Schnitt- oder Endlosfasermatten sind die Fasern eines Nadelvlieses in alle drei Raumrichtungen orientiert [KA04, AL00]. Durch das

Kardieren und das anschließende Vernadeln des Faserflors kann es zu Faserbrüchen kommen, wodurch die Faserlänge beeinflusst wird.

Die untersuchten Vliesstoffe wurden am STFI (Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V.) der Technischen Universität Chemnitz hergestellt.

5.1.2 Eingesetzte Fasersorten

Für die folgenden Versuchsreihen wurden zwei verschiedene Materialsysteme mit derselben Polypropylenmatrix betrachtet. Als Verstärkungsfasern sind Glas- und Sisalfasern untersucht worden. Die betrachteten Werkstoffe lassen sich somit in folgende drei Fasersorten unterteilen:

- Polypropylenfaser
- Glasfaser
- Sisalfaser

Polypropylenfasern (PP-Faser) stellen aufgrund ihrer Eigenschaften und ihres günstigen Preises neben Polyamid-, Polyethylenterephthalat- und Polyacrylnitril-Textilfasern die vierte Synthesefaserklasse dar und gewinnen seit 1980 zunehmend an Bedeutung [FO95]. Der teilkristalline Thermoplast gehört zu der Gruppe der Polyolefine und besitzt einen Schmelzpunkt von ca. 165 °C. Die Faserherstellung erfolgt über den Spinnprozess. Angesichts der hohen mechanischen Eigenschaften und der Chemikalien- und Wärmeformbeständigkeit wird lediglich das isotaktische Polypropylen in Faserverbundwerkstoffen eingesetzt [KA04].

Im Rahmen der Versuche sind isotaktische PP-Fasern der Beaulieu International Group mit der Produktbezeichnung D2302 mit einer Faserlänge von 90 mm verwendet worden.

Die anorganische **Glasfaser** (GF) zeichnet sich durch hohe Festigkeit, basierend auf den starken kovalenten Bindungen zwischen Silizium und Sauerstoff, aus. Das dominierende Herstellungsverfahren von Glasfasern ist das Schmelzspinnverfahren, wobei die Rohstoffe (Quarzmehl, Flussspat, Kalkstein, Colemanit) bei einer Temperatur von ca. 1 400 °C aufgeschmolzen und durch Spinndüsen geführt werden. Die Glasschmelze wird im zähflüssigen Zustand ausgezogen, wobei ein Durchmesser von 5 bis 24 µm eingestellt werden kann [IN10, SC07]. Die Bezeichnung der verwendeten E-Glasfaser - der meistverbreiteten Glasfaserart - bezieht sich auf die ursprünglichen Hauptanwendungen im elektronischen Bereich. Im Gegensatz zu Naturfasern besitzen Glasfasern ein isotropes Materialverhalten.

Zur Vliesherstellung wurden, aus Rovings EC 2400 der Firma P-D Glasseiden Oschatz GmbH, Stapelfasern mit der Länge 50 mm zugeschnitten. Zur Steigerung der Faser-Matrix-Anbindung sind die Glasfasern mit einer polypropylenkompatiblen Schlichte E35 (Produktbezeichnung der Glasseiden Oschatz GmbH) ausgerüstet.

Sisalfasern gehören neben Flachs-, Ananas-, Ramie-, Hanf-, Bananen- und Jutefasern zu den Naturfasern (NF), die für technische Anwendungen geeignet sind, insbesondere als Füllmaterial zur Herstellung von faserverstärkten Kunststoffen [FL95]. Das jährliche Herstellungsvolumen der

Sisalfasern beträgt ca. 4,5 Millionen Tonnen, wobei Brasilien und Tansania zu den größten produzierenden Ländern gehören [CH88]. Sisalfasern, die der Gruppe der Hartfasern zuzuordnen sind, werden aus der Agavepflanze (*Agave sisalana*) gewonnen. Die frisch geernteten Blätter werden mittels einer Entfaserungsmaschine gepresst. Die herausgelösten Fasern werden anschließend gewaschen, getrocknet, gebleicht und gebürstet [BU98]. Wegen ihres zellulären Aufbaus besitzen Naturfasern anisotrope Materialeigenschaften.

Die Sisalfasern zur Herstellung der Hybridnadelvliese mit einer Faserlänge von 50 mm wurden von der SachsenLeinen GmbH bezogen.

Abbildung 5.3 zeigt die hinterleuchteten, verfestigten Natur- und Glasfaserhybridvliesstoffe. In beiden Aufnahmen sind einzelne Verstärkungsfasern zu erkennen.

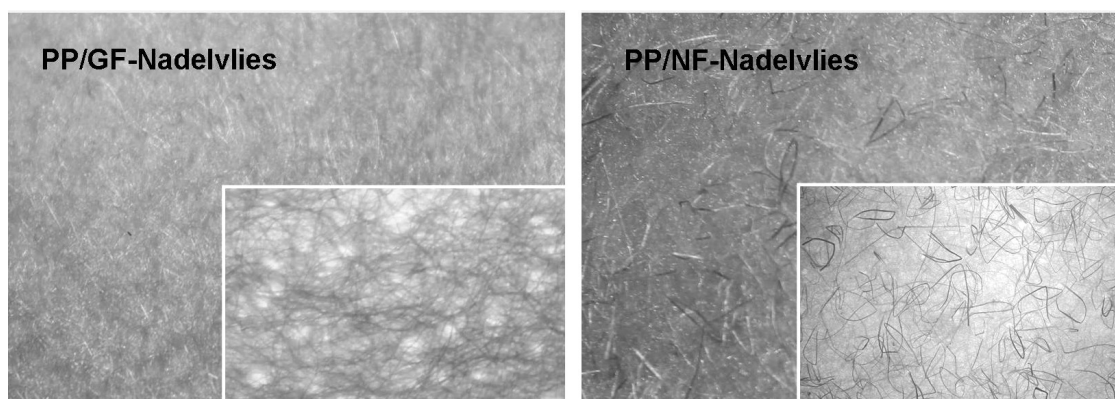


Abbildung 5.3: Aufnahme der PP/GF-Nadelvliese (li.) und PP/NF-Nadelvliese (re.)

In Tabelle 5.1 sind die mechanischen Eigenschaften der eingesetzten Fasern angeführt. Die deutlich höhere Dichte und die höheren mechanischen Eigenschaften der Glasfasern, im Vergleich zu den Sisalfasern, sind ersichtlich.

Tabelle 5.1: Materialkennwerte eingesetzter Fasern

Fasereigenschaften	Dichte [g/cm ³]	Zugfestigkeit [MPa]	Zugmodul [GPa]	Bruchdehnung [%]	Durchmesser [μm]	Faserlänge [mm]
Polypropylen	0,905 *	32 *	1,6 *	9 *	30,8 *	90 *
E-Glas [DO05, SC07]	2,54	2 400	72 - 73	3,5	17 *	50 *
Sisal [KL97, JO99]	1,41	400-700	9 - 20	5-14	100-300	50 *

* Herstellerangaben

Neben der Variation der Verstärkungsfaserart sind Nadelvliese mit unterschiedlichen Anteilen an Verstärkungsfasern und Flächengewichten hergestellt worden. Der Glasfaseranteil der PP/GF-Vliesstoffe wurde über Veraschung kontrolliert. Der Sisalfaseranteil ist hingegen über das Schwefelsäureverfahren, bei dem das Polypropylen aus dem PP/NF-Hybridvlies chemisch herausgelöst

wird, ermittelt worden. Unter Berücksichtigung des Herstellungsprozesses sind nachgewiesene Sollgrößenabweichungen des Fasermassenanteils von $\pm 3 \%$ und des Flächengewichtes $\pm 25 \text{ g/m}^2$ akzeptiert worden.

5.1.3 Materialcharakterisierung

Im Folgenden werden Einflüsse auf das mechanische Verhalten der Hybridvliese ohne Beeinträchtigung des Papierwabenkerns durch Versuchsreihen analysiert. Hierzu gehört die Betrachtung der richtungsabhängigen Materialeigenschaften, der Einfluss des Verstärkungsfaseranteils, sowie die Auswirkung von Lufteinschlüssen auf die mechanischen Eigenschaften der faserverstärkten Thermoplaste. Bei allen Untersuchungen ist die Länge der Stapelfasern konstant beibehalten worden. Die Auswirkungen der Faserlänge auf die mechanischen Eigenschaften können für PP/GF-Systeme beispielsweise in [TH95, TH96] und für PP/Sisal in [JO99] nachgelesen werden.

5.1.3.1 Versuchsbeschreibung

Die GMT- (glasfasermattenverstärkter Thermoplast) und NMT-Prüfkörperplatten (naturfasermattenverstärkter Thermoplast) sind mit Hilfe eines Tauchkantenwerkzeugs hergestellt worden. Die Hybridvliese wurden auf eine Größe, entsprechend der Prüfkörperplatte ($250 \times 100 \text{ mm}^2$), zugeschnitten und in das Werkzeug eingelegt. Bei einer Pressentemperatur von $230 \text{ }^\circ\text{C}$ und einer Aufheizdauer von sechs Minuten wurden die Polypropylenfasern aufgeschmolzen und die Verstärkungsfasern imprägniert. Auf die vollständig konsolidierten Prüfkörper wirkte während der Aufheizphase ein Druck von ca. $2,5 \text{ MPa}$. Bei den semi-konsolidierten Prüfkörpern wurde hingegen der Konsolidierungsgrad über den Werkzeugspalt weggesteuert eingestellt. Zur Abkühlung und zur Beaufschlagung des Nachdrucks ist das Tauchkantenwerkzeug mit den Prüfkörperplatten in eine zweite Presse eingelegt worden. Während der Solidifikationsphase wirkte auf die vollständig konsolidierten Prüfkörper ein Druck von ca. 6 MPa bei einer Pressentemperatur von $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Entsprechend der Aufheizphase erfolgte die Abkühlungsphase der semi-konsolidierten Prüfkörper bei konstantem Werkzeugspalt. Die Zugproben wurden anschließend aus den Prüfkörperplatten zugeschnitten. Die Parameter des Zugversuchs sind in Tabelle 5.2 dargelegt.

Tabelle 5.2: Versuchsparameter der Zugprüfung

Zugversuch	
Prüfnorm	[DIN EN ISO 527]
Prüfgeschwindigkeit [mm/min]	10
Einspannlänge [mm]	115
Probengröße [mm]	25 x 200
Probenanzahl	5
Vorkraft [N]	2
Prüfklima	Normklima

Im Gegensatz zu analytischen Berechnungsmethoden, bei denen der Faservolumenanteil φ_v die relevante Größe zur Materialbeschreibung darstellt, ist aufgrund des Herstellungsverfahrens der Nadelvliese die Materialspezifikation über den Fasermassenanteil φ_m üblich. Gl. (5.1) ermöglicht

die Umrechnung des Fasermassenanteils zum Faservolumenanteil mit Hilfe der Matrixdichte ρ_M und Faserdichte ρ_F .

$$\varphi_v = \frac{\varphi_m \cdot \rho_M}{\varphi_m \cdot \rho_M + (1 - \varphi_m) \cdot \rho_F} \quad (5.1)$$

Der Prozess der Luftverdrängung, der parallel zur Imprägnierung der Verstärkungsfasern stattfindet, wird als Konsolidierung bezeichnet. Die Wandstärke t_{\min} eines vollkommen konsolidierten FKV, bestehend aus einer Verstärkungsfasersart, lässt sich mittels des Flächengewichts Γ durch Gl. (5.2) berechnen.

$$t_{\min} = \frac{\Gamma}{\varphi_v \cdot \rho_F + (1 - \varphi_v) \cdot \rho_M} \quad (5.2)$$

Der Konsolidierungsgrad k wird im Folgenden als Bewertungsgröße für den vorhandenen Luftanteil innerhalb des FKV verwendet. Die Berechnung des Konsolidierungsgrades kann über das Verhältnis der Ist-Wandstärke t_w zur vollkommen konsolidierten Wandstärke t_{\min} erfolgen oder über den Luftvolumenanteil φ_L bestimmt werden.

$$k = \frac{t_{\min}}{t_w} = 1 - \varphi_L \quad (5.3)$$

Eine vollkommene Konsolidierung - eine Probe ohne Lufteinschlüsse - besitzt somit einen Konsolidierungsgrad von eins. Als vollkonsolidierte Materialproben (Abbildung 5.4 und Abbildung 5.5) werden im Folgenden Materialien bezeichnet, die einen Konsolidierungsgrad, berechnet aus der Probendicke und den Materialkennwerten aus Tabelle 5.1, zwischen 0,95 und 1,05 aufzeigten. Die Abweichungen zum Konsolidierungsgrad von eins resultieren aus unzureichendem Pressendruck, unzureichender Konsolidierungsdauer, Materialschwankungen oder durch Leckage des Tauchkanntenwerkzeugs.

5.1.3.2 Ergebnisdarstellung

Abbildung 5.4 zeigt die Ergebnisse der vollkonsolidierten GMT-Zugprüfkörper in Abhängigkeit des Fasermassenanteils in Maschinenrichtung (MD) und quer zur Maschinenrichtung (CD). Die Kennwerte der NMT-Prüfkörper sind in Abbildung 5.5 dargestellt. Analog hierzu sind die mechanischen Zugeigenschaften des eingesetzten unverstärkten Polypropylens, wie in Kapitel 5.1.3.1 beschrieben, experimentell durch Schmelzen der Polypropylenfasern bestimmt worden. Hierbei ist ein E-Modul von 1 630 MPa und eine Zugfestigkeit von 28,3 MPa des unverstärkten Polypropylens ermittelt worden. Bei Gegenüberstellung der mechanischen Eigenschaften beider Materialsysteme ist ersichtlich, dass sowohl Elastizitätsmoduln als auch Zugfestigkeiten der NMT-Proben, aufgrund der mäßigen mechanischen Eigenschaften der Sisalfasern, deutlich niedriger im Vergleich zu den GMT-Proben sind. Des Weiteren ist an beiden Materialsystemen ein Anstieg der Kennwerte mit zunehmender Faserverstärkung ersichtlich. Die Ergebnisse der Zugversuche zeigen, dass bei zunehmendem Faseranteil primär die Materialeigenschaften in CD-Richtung steigen. Der Einfluss des Faseranteils in MD-Richtung ist hingegen gering. Bei zunehmender Faserver-

stärkung ist bei beiden Materialsystemen der Anstieg des Elastizitätsmoduls deutlich stärker ausgeprägt als die Zunahme der Zugfestigkeit.

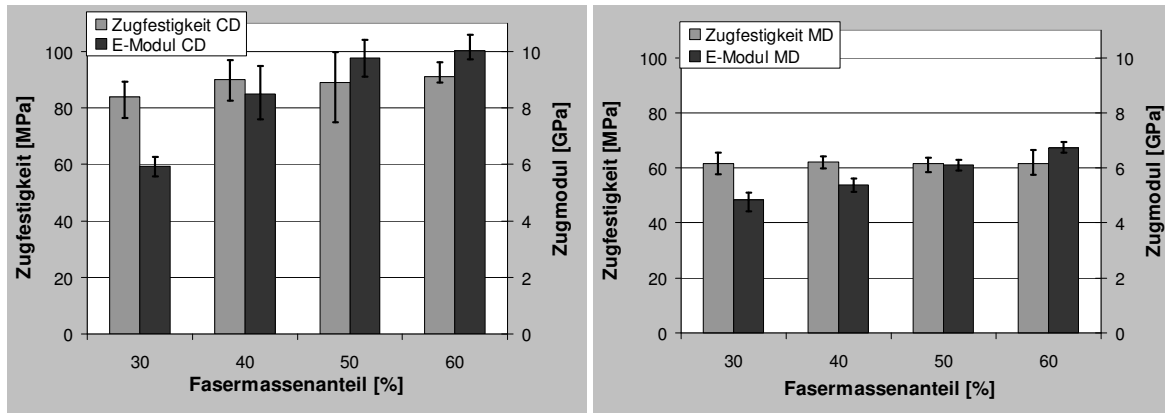


Abbildung 5.4: Mechanische Kennwerte in Abhängigkeit des Fasermassenanteils konsolidierter GMT-Proben quer zur Maschinenrichtung (li.) und in Maschinenrichtung (re.)

Das anisotrope Verhalten wird durch die ausgeprägten richtungsabhängigen Kennwerte deutlich. In Maschinenrichtung sind die E-Moduln und die Festigkeitskennwerte der GMT-Proben durchschnittlich ca. 30 % niedriger als quer zur Maschinenrichtung. Das anisotrope Verhalten der NMT-Proben ist durch ca. 20 % geringere Kennwerte in MD-Richtung ersichtlich.

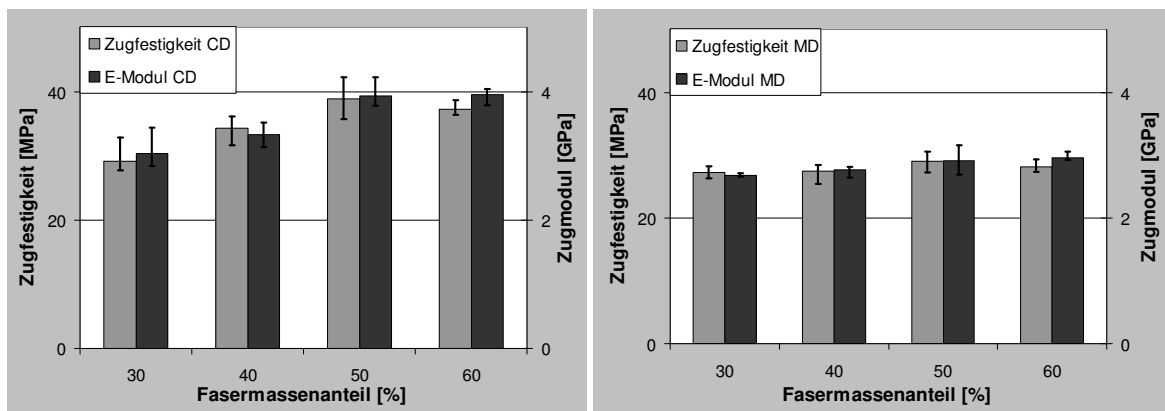


Abbildung 5.5: Mechanische Kennwerte in Abhängigkeit des Fasermassenanteils konsolidierter NMT-Proben quer zur Maschinenrichtung (li.) und in Maschinenrichtung (re.)

Durch das Kardieren des Faserflors findet eine vorzugsweise Faserorientierung parallel zur Abzugsrichtung statt. Das anschließende Doublieren und der senkrechte Abzug des Faserflors zur Nadelanlage bewirkt eine 90°-Drehung des Hybridvlieses, wodurch sich eine Vorzugsorientierung der Fasern quer zur Nadelmaschinenrichtung (entspr. senkrecht zur Abzugsrichtung der Vliesstoffrolle) einstellt [OD02].

Abbildung 5.6 zeigt die mechanischen Kennwerte eines PP/GF-Vliesstoffs mit 40 % Fasermassenanteil bei verschiedenen Konsolidierungsgraden. Bereits bei einem Konsolidierungsgrad von 0,92 (entspr. 8 % Luftvolumengehalt) ist ein deutlicher Abbau der mechanischen Eigenschaften des GMT-Prüfkörpers zu erkennen. Trotz des hohen Luftvolumenanteils ist das anisotrope Verhalten deutlich ausgeprägt.

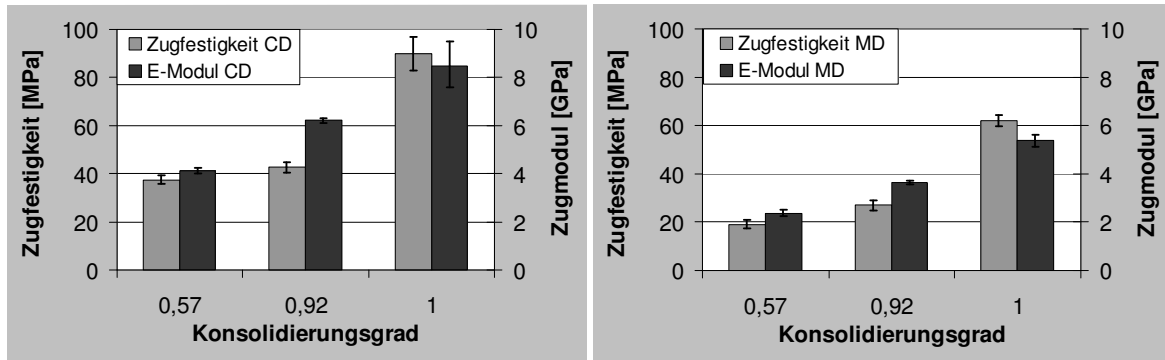


Abbildung 5.6: Mechanische Kennwerte in Abhängigkeit des Konsolidierungsgrades von GMT-Proben quer zur Maschinenrichtung (li.) und in Maschinenrichtung (re.)

Der fehlende Konsolidierungsdruck während des weggesteuerten Pressvorgangs verhindert die vollständige Imprägnierung der Verstärkungsfasern. Des Weiteren ist bei einem Luftvolumenanteil von 43 % von einer stark zerklüfteten Materialstruktur auszugehen, wodurch die ausgeprägte mechanische Degradation, verursacht durch mangelnde Faser-Matrix-Anbindung, erklärt werden kann.

5.2 Charakterisierung des Sandwichverbundes mit Nadelvliesdeckschichten

Das Verständnis für das Werkstoffverhalten des Sandwichverbundes, bestehend aus Papierwaben und Hybridvliesdeckschichten, soll mit Hilfe der gewonnenen Versuchsergebnisse gefördert werden. Bei der Interpretation der Ergebnisse wird der Einfluss der Deckschicht- und Wabenausprägung auf die mechanischen Eigenschaften des Sandwichverbundes gesondert vorgestellt. Zur Optimierung des Sandwichverbundsystems wird insbesondere die Erhöhung der Deckschichtanbindung durch verschiedene Maßnahmen untersucht.

5.2.1 Versuchsdurchführung

Im Folgenden wird die Herstellung der Probekörper, die verwendete Nomenklatur zur Bezeichnung der Sandwichproben und deren mechanischen Prüfungen vorgestellt.

5.2.1.1 Sandwichprobenherstellung

Abbildung 5.7 zeigt den Prozessablauf zur Herstellung der Sandwichproben. Die Konfektionierung der Halbzeuge erfolgte über einen Zuschnitt der Nadelvliesstoffe und Papierwaben auf eine Länge von 800 mm und eine Breite von 400 mm. Anschließend wurden die konfektionierten Halbzeuge zur Stabilisierung zwischen zwei 2 mm dicken, PTFE beschichteten, vorgeheizten Stahlblechen eingelegt. Während der Aufheizphase wurden die Halbzeuge mit einem geringen Druck in der hydraulischen Presse beaufschlagt. Durch die geringe, flächige Krafteinwirkung auf das Hybrid-Nadelvlies konnte eine Kontraktion, verursacht durch das Relaxationsverhalten der gereckten, teilaufgeschmolzenen Polypropylenfasern, deutlich reduziert werden. Die Oberflächentemperatur der beheizten Presse betrug 200 °C. Das Erreichen der Temperatur von ca. 180 °C zwischen Wabekern und Deckschicht definierte die Aufheizdauer. In Abhängigkeit der verwendeten Deckschichtmaterialien wurde hierfür eine Zeitspanne von 30 bis 80 Sekunden benötigt.

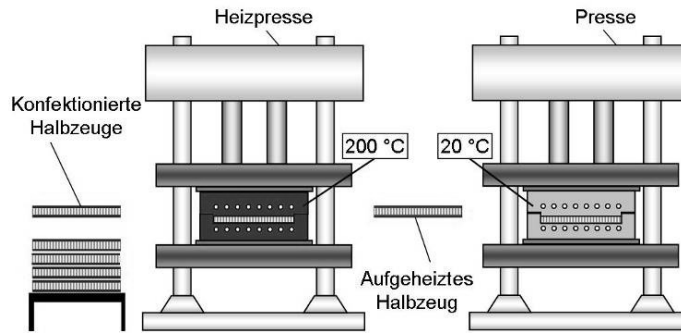


Abbildung 5.7: Probenherstellung des Sandwichverbundes

Die Abkühlung der aufgeheizten Halbzeuge erfolgte bei Raumtemperatur unter einem Druck von ca. 30 kPa zwischen den Stahlblechen. Der Nachdruck ist im Vergleich zu den Druckfestigkeiten des Wabekerns (siehe Kapitel 3.3.1.3) deutlich niedriger gewählt worden. Die kraftgesteuerte Druckbeaufschlagung ermöglicht eine reproduzierbare Probenherstellung unter konstanten Prozessbedingungen. Ein weggesteuerter Werkzeugspalt würde hingegen bei auftretenden Materialschwankungen der Wabendicke oder des Faservolumengehaltes oder des Deckschichtflächengewichtes zu unterschiedlichen Konsolidierungsgraden der Deckschichten oder sogar zur Stauchung des Wabekerns führen, wodurch der Vergleich zwischen den einzelnen Sandwichverbunden nicht möglich wäre. Die Materialproben wurden aus den hergestellten Sandwichplatten mit Hilfe von Schablonen zugeschnitten.

5.2.1.2 Nomenklatur der Sandwichverbunde

Die hergestellten Sandwichproben werden nach der in Abbildung 5.8 angegebenen Nomenklatur bezeichnet. Die Angabe der Vliesstoffausrichtung (V) und der Wabenausrichtung (W) im Sandwichverbund beziehen sich auf die Probenlängsrichtung. Die Faservorzugsrichtung der Hybridvliese (CD-Richtung) ist als Richtung-1 definiert. Die Wabenorientierungen entsprechen den Bezeichnungen aus Abbildung 3.7 und Abbildung 3.10. Die Richtung-1 der Wellstegwabe entspricht der Stegrichtung. Hingegen bezeichnet die Richtung-1 bei der Expansionswabe die Längsrichtung (Richtung der Doppelwandung).

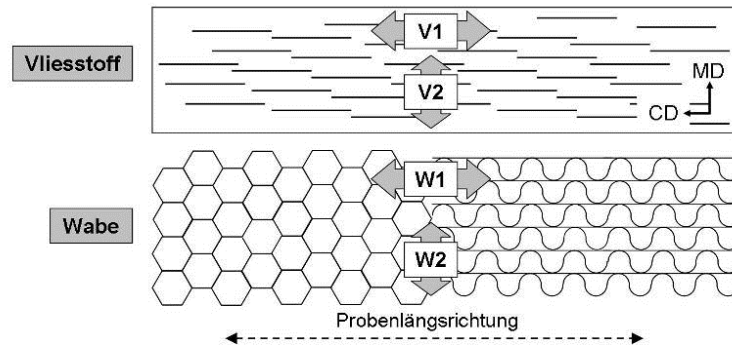


Abbildung 5.8: Nomenklatur der Sandwichprobenbezeichnung

In Abbildung 5.9 sind die vier ausgewählten Rechteckproben eines symmetrischen Sandwichaufbaus abgebildet.

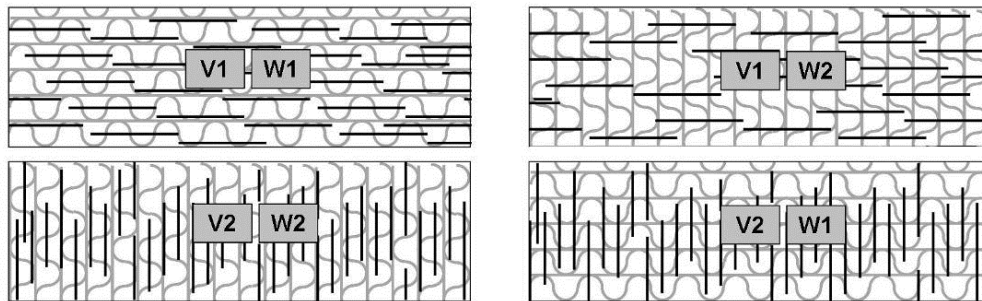


Abbildung 5.9: Sandwichprobenbezeichnungen

Stimmen Stegrichtung der Wellstegwabe und Faservorzugsrichtung der Vliesstoffe mit der Probenlängsrichtung überein, wird dieser Sandwichaufbau als V1W1 bezeichnet. Sind sowohl die Deckschichten als auch der Wabenkern um 90° gedreht, ist diese Ausrichtung der Halbzeuge als V2W2 definiert.

5.2.1.3 Versuchsbeschreibungen

Die Untersuchungen der Einflussgrößen auf die mechanischen Eigenschaften des Sandwichverbundes wurden durch folgende Werkstoffprüfungen durchgeführt:

- Vier-Punkt-Biegeversuch
- Trommel-Schälversuch
- Zugversuch

Mit Hilfe des **Vier-Punkt-Biegeversuchs** sind Einflussparameter auf die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften des Sandwichverbundes analysiert worden. Beim Biegeversuch erfährt die obere Deckschicht eine Druckbeanspruchung, hingegen wird die untere Seite auf Zug belastet. Der mittig liegende Wabenkern erfährt durch die entgegengesetzten Deckschichtverschiebungen eine Schubbeanspruchung. Im Folgenden werden neben den mechanischen Kennwerten auch die Versagensarten zur Optimierung des Sandwichverbundsystems berücksichtigt.

Tabelle 5.3: Versuchsparameter zum Vier-Punkt-Biegeversuch

Vier-Punkt-Biegeversuch	
Prüfvorschrift	angelehnt an [DIN 53293]
Prüfmaschine	Zwick 1464
Probengröße [mm]	45 x 180
Vorkraft	2 N
Auflagerabstand	140 mm
Abstand Biegestempel	70 mm
Prüfgeschwindigkeit	5 mm/min
Probenanzahl	3
Klima	Normklima

Die experimentell bestimmte breitennormierte Biegesteifigkeit D_{exp} des Sandwichverbundes, die nachfolgend als eine Vergleichsgröße betrachtet wird, wird durch das experimentell ermittelte Elastizitätsmodul E_{sw} und die Probendicke h_{sw} nach Gl. (5.4) berechnet:

$$D_{exp} = \frac{E_{sw} \cdot I}{b} = \frac{E_{sw} \cdot h_{sw}^3}{12} \quad (5.4)$$

Die ermittelten Kennwerte aus dem Vier-Punkt-Biegeversuch sind zur Auslegung von Sandwichbauteilen im Anhang Kapitel 5 angeführt.

Die Anbindung der Deckschicht an den Wabenkern wurde mittels **Trommel-Schälversuch** untersucht. Beim Versuchsaufbau ermöglicht die Schältrommel durch Rotation einen konstanten Abzugswinkel der Deckschicht. Anhand der beidseitigen 25 mm überstehenden Deckschicht erfolgte die Einspannung der Sandwichprobe in die Versuchsvorrichtung. Nach abgeschlossener Versuchsdurchführung wurde die nicht aufgerollte Deckschicht des Sandwichverbundes manuell vom Wabenkern gelöst und deren Aufrollkraft bestimmt, wodurch die Deckschichteigensteifigkeit und die wirkenden Widerstände des Prüfaufbaus auf den Probekörper erfasst wurden. Die Differenz der ermittelten Schäl- und Aufrollkräfte, die aus der Subtraktion der einzelnen Messpunkte ermittelt wurde, dient als quantitative Vergleichsgröße zur Beurteilung der Deckschichtanbindung. Eine Fotoaufnahme des Versuchsaufbaus ist im Anhang Kapitel 5 hinterlegt.

Tabelle 5.4: Versuchsparameter zum Trommel-Schälversuch

Trommel-Schälversuch	
Prüfvorschrift	angelehnt an [DIN 53295]
Probengröße [mm]	75 x 250
Trommelabmaße	$r_a = 62,5$ mm $r_i = 50,5$ mm
Prüfgeschwindigkeit	25 mm/min
Probenanzahl	3
Klima	Raumklima

Die mechanischen Eigenschaften der Deckschichten wurden durch **Zugversuche** analysiert. Die gewonnenen Kennwerte gestatten zum einen den quantitativen Vergleich verschiedener Einflussparameter, zum anderen wird durch die Deckschichtkennwerte eine analytische und numerische Berechnung des Sandwichverbundes ermöglicht. Die verwendeten Parameter des Zugversuchs entsprechen den bereits angeführten aus Tabelle 5.2.

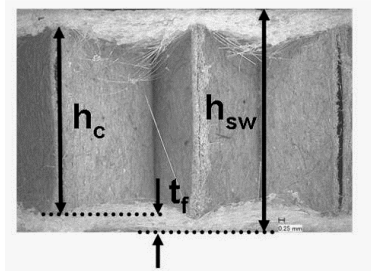


Abbildung 5.10: Bemaßungsgrößen des Sandwichverbundes

Wie in Abbildung 5.10 dargestellt, resultiert die Deckschichtdicke t_f aus der Differenz der Sandwichhöhe h_{sw} und der Wabendicke h_c . Die Wabendicke ist vor der Herstellung des Sandwichverbundes gemessen worden.

$$t_f = \frac{1}{n} \sum t_{f_i} = \frac{1}{n} \cdot \sum \frac{h_{sw_i} - h_{c_i}}{2} \quad (5.5)$$

Da es sich bei den Nadelvliesstoffen und den Papierwabenkernen um Halbzeuge handelt, die herstellungs- und lagerungsbedingt hohe Toleranzen bzw. Materialinhomogenitäten aufweisen, sind die Deckschichtdicken aus den Mittelwerten aller identischen Sandwichaufbauten nach Gl. (5.5) berechnet worden. Die Zugkennwerte der Deckschichten sind im Anhang Kapitel 5 angeführt.

5.2.2 Einfluss der Deckschichtanbindung auf den Sandwichverbund

Bei Sandwichverbunden übernehmen die Klebeflächen zwischen Deckschicht und Wabekern eine besondere mechanische Aufgabe. Über die geringe Anbindungsfläche werden bei Belastung des Sandwichverbundes Schub-, Zug- und Druckkräfte zwischen zwei unterschiedlichen Materialien übertragen. Neben den folgenden betrachteten quasi-statischen Belastungsfällen ist die Steigerung der Deckschichtanbindung bei dynamischer Bauteilbeanspruchung ebenfalls von großer Bedeutung. Des Weiteren kann nur bei ausreichender Deckschichtanbindung ein Fügen von Bauteilen an die Deckschicht (siehe Kapitel 6.4) ermöglicht werden.

Abbildung 5.11 zeigt den Unterschied zwischen einer duroplastischen Klebefläche und der Deckschichtanbindung bei Verwendung einer PP/GF-Vliesdeckschicht. Bei duroplastischen Matrices bildet sich die Kehlnaht durch Kapillarwirkung an den Zellwänden durch das niederviskose Harz aus. Über die entstandene flächige Anbindung werden beaufschlagte Kräfte von der Deckschicht zum Wabekern übertragen.

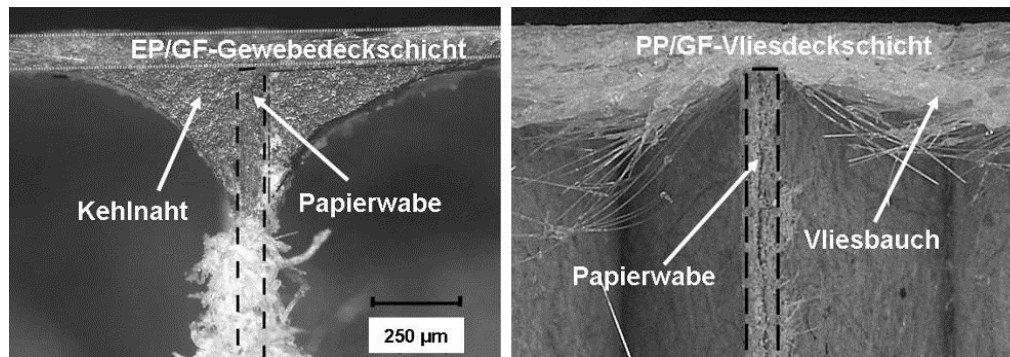


Abbildung 5.11: Mikroskopieaufnahme der Deckschichtanbindung mit duroplastischer (li.) und thermoplastischer Matrix (re.)

Im Gegensatz dazu zeigt die thermoplastische Matrix einen deutlichen Nachteil auf. Die Anbindungsfläche zwischen Papierwabenkern und glasfaserverstärkter Polypropylenmatrix ist im Vergleich zum duroplastischen System deutlich kleiner. In der Mikroskopieaufnahme ist keine Ausprägung von Kehl Nähten zu erkennen. Der niedrige Konsolidierungsdruck während der Sandwichplattenherstellung verhindert die Imprägnierung der Fasern, wodurch die hochviskose Matrix in der Vliesdeckschicht eingeschlossen ist und keine Kehl Nähte an den Anbindungsstellen ausgeformt werden können.

Zur Steigerung der Deckschichtanbindung werden folgende Ausprägungen der Deckschicht und des Wabenkerns untersucht:

- Auswirkung des Fasermassenanteils
- Auswirkung einer Schmelzfolie
- Auswirkung der Wabenkernausprägung

5.2.2.1 Auswirkung des Fasermassenanteils

Abbildung 5.12 zeigt den Einfluss des Fasergehaltes auf die Anbindung der Deckschicht zum Papierwabenkern. In beiden Diagrammen sind die mechanischen Eigenschaften eines Sandwichverbundes bestehend aus einer A ~ TL-90 WG mit einer Wabendicke von 7 mm und einem PP/GF-Hybridvlies mit einem Flächengewicht von 400 g/m² und einem Fasermassenanteil von 30 bis 60 % dargestellt. Die Orientierung der Halbzeuge entspricht exemplarisch der V1W1-Ausrichtung. Zur Beurteilung der Anbindungsqualität sind links die Schälkräfte und rechts die maximalen Biegekräfte abgebildet. Die Prüfergebnisse zeigen, dass mit steigendem Matrixanteil die Schälkraft zunimmt. Im Vergleich zum Fasermassenanteil von 60 % ist bei einem Fasermassenanteil von 30 % eine Verdopplung der Schälkraft zu erkennen.

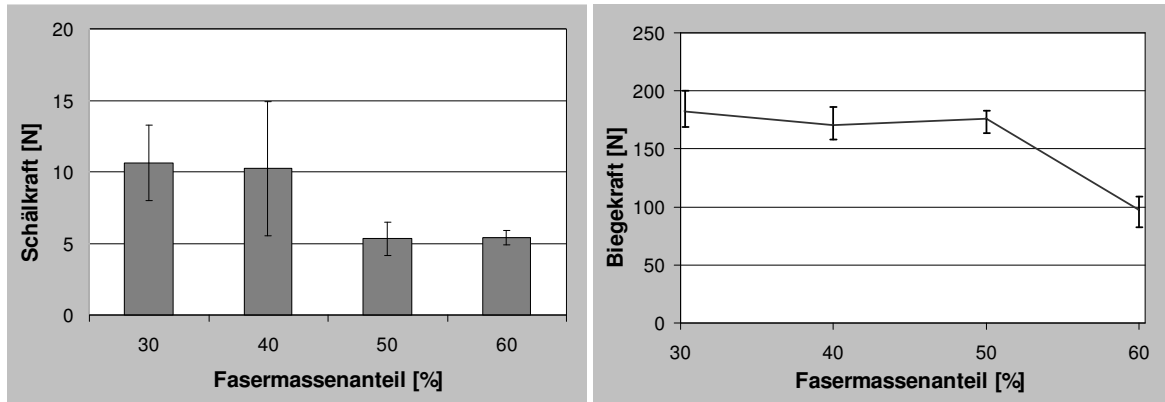


Abbildung 5.12: Auswirkungen des Fasermassenanteils auf die mechanischen Eigenschaften des Sandwichverbundes - Schälkraft (li.) und Biegekraft (re.)

Die Auswirkungen der höheren Anbindungskräfte bei niedrigem Faseranteil sind durch Zunahme der Biegekräfte in der rechten Abbildung zu erkennen. Mit Hilfe der Versuchsreihe konnte eine Steigerung der Biegekraft von ca. 80 Prozent festgestellt werden. Beim Biegeversuch wurden insbesondere bei hohem Faseranteil Deckschichtablösungen als Versagen festgestellt.

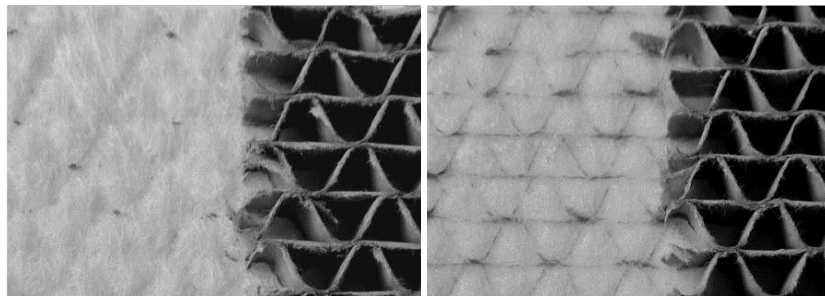


Abbildung 5.13: Papierpartikel an PP/GF-Deckschicht nach Schälversuch - $\varphi_M = 60\%$ (li.) und $\varphi_M = 30\%$ (re.)

Abbildung 5.13 zeigt die Oberfläche der geschälten PP/GF-Deckschichtinnenseiten mit 60 (links) und 30 Fasermassenprozent (rechts). Aufgrund der höheren Deckschichtanbindung sind in der rechten Abbildung vereinzelte Papierpartikel sowie Abzeichnungen des Wabenkerns auf der Deckschichtoberfläche zu erkennen, die auf eine gute Haftung des Wabenkerns hinweisen. Hingegen sind in der linken Abbildung nahezu keine Papierbestandteile zu sehen.

5.2.2.2 Auswirkung der Schmelzfolie

Zur Steigerung der Anbindung ist der Einfluss einer Schmelzfolie zwischen Wabenkern und Deckschicht untersucht worden. Zur Vermeidung des Folienschrumpfens wurde eine extrudierte, ungereckte Schmelzfolie verwendet. Zur Folienherstellung wurde ein Polypropylen der Firma DUCOR Petrochemicals mit der Produktbezeichnung Domolen[®] 2600 M eingesetzt. Im Folgenden werden Folienstärken mit 0,1 und 0,3 mm Dicke betrachtet.

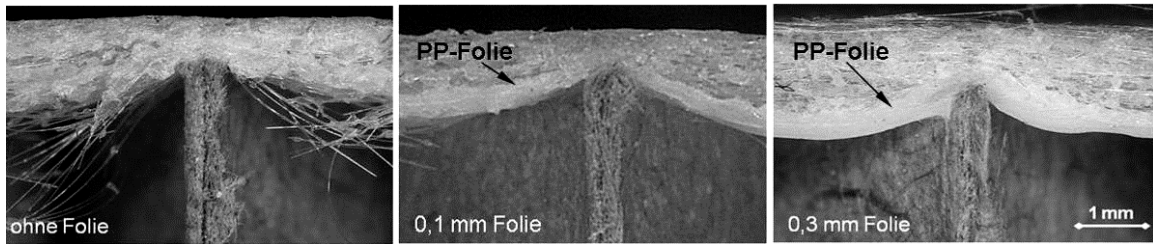


Abbildung 5.14: Mikroskopieaufnahme der Deckschichtanbindung mit und ohne Schmelzfolie

Abbildung 5.14 zeigt Mikroskopieaufnahmen der Anbindungsflächen der drei verschiedenen Sandwichsysteme. Im Gegensatz zu den Sandwichverbunden mit Schmelzfolie sind in der linken Abbildung die losen Glasfasern in den Zellwandzwischenräumen deutlich zu erkennen. Eine lokale Anhäufung der Polypropylenmatrix an der Kontaktfläche - zwischen Deckschicht und Wabenkern - ist ohne Schmelzfolie nicht festzustellen. Die beiden anderen Aufnahmen zeigen, dass die Polypropylenfolie an die Nadelvliesdeckschicht bündig anliegt. Begünstigt durch die Polypropylenfolie ist in der rechten Abbildung eine schwach ausgeprägte Kehlnaht zu erkennen.

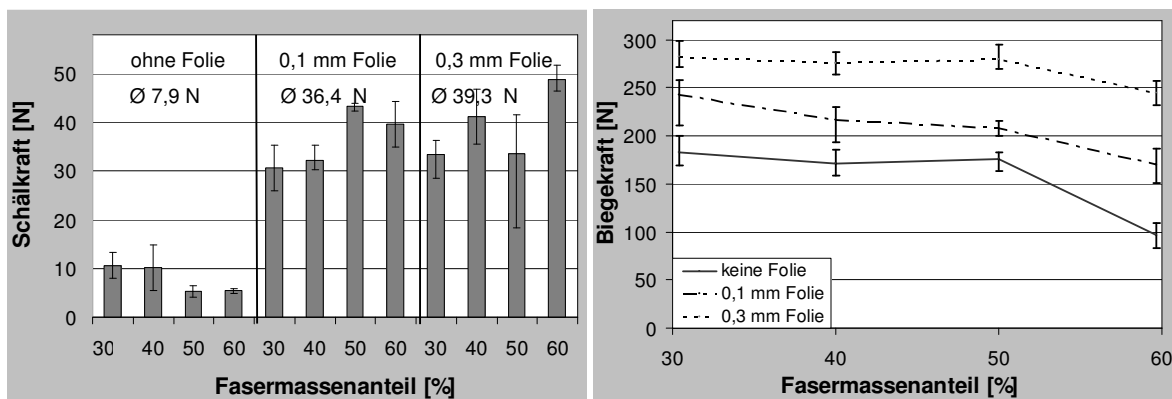


Abbildung 5.15: Auswirkungen der Schmelzfolie auf die mechanischen Eigenschaften des Sandwichverbundes für Schälkraft (li.) und Biegekraft (re.)

Entsprechend der Halbzeugausrichtung von Kapitel 5.2.2.1 ist im linken Diagramm der Abbildung 5.15 die Schälkraft in Abhängigkeit des Fasermassenanteils und der Foliendicken dargestellt. Eine deutliche Steigerung der Deckschichtanbindung mittels Schmelzfolie ist durch den Anstieg der Schälkraft von über 300 % ersichtlich. Die Streuungen der Messergebnisse sind auf Schwankungen der Anbindungsqualität, z. B. durch Foliensrisse, zurückzuführen. Bei Erhöhung der Foliendicke von 0,1 auf 0,3 mm ist nahezu keine Steigerung der Schälkraft zu erkennen. Ebenso ist bei Verwendung der Schmelzfolie der Einfluss des Fasermassenanteils auf die Schälkräfte nicht mehr nachzuweisen. Das konstante Schälkraftniveau zeigt, dass das Versagen nicht durch mangelnde Deckschichtanbindung eingeleitet wird, sondern durch unzureichende Papierfestigkeit. Die parallele Ausrichtung der Cellulosefasern zur Deckschicht bewirkt bei Schälbeanspruchung des Wellstegwabenkerns (siehe Kapitel 3.1.4) eine senkrechte Krafteinleitung zur Ausrichtung der Cellulosefasern. Durch die ungünstige Papierausrichtung (CD) findet ein frühzeitiges Versagen der Papierstruktur, wie in Tabelle 3.1 dargestellt, statt. Nähere Untersuchungen hierzu werden in Kapitel 5.2.2.3 vorgestellt.

Im rechten Diagramm der Abbildung 5.15 ist ein Anstieg der maximalen Biegekraft von ca. 50 N durch den Schmelzfolieneinsatz (Foliendicke 0,1 mm) zu erkennen. Alle untersuchten Proben mit Folie versagten durch lokale Intrusion der Kernstruktur unterhalb der Druckfalten, wie in Abbildung 5.16 dargestellt.

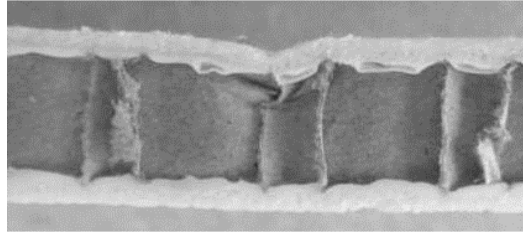


Abbildung 5.16: Sandwichversagen durch lokale Intrusion (PP/GF-Vlies, 400 g/m², 0,1 mm Folie)

Die Versagensart der lokalen Intrusion kann durch höhere Drucksteifigkeit des Wabenkerns (siehe hierzu Kapitel 3.3.1) vermieden werden. Ebenfalls bewirkt eine flächige Kraftverteilung durch Erhöhung der Deckschichtsteifigkeit oder der Deckschichtdicke eine verringerte lokale Beanspruchung der Kernstruktur. Aufgrund derselben Versagensart ist die höhere Biegekraft des Sandwichverbundes mit einer Foliendicke von 0,3 mm, im Vergleich zum Sandwichverbund mit einer Foliendicke von 0,1 mm, auf die versteifende Wirkung der Deckschicht zurückzuführen und nicht auf die Deckschichtanbindung. Der Sandwichaufbau mit der Schmelzfolie ist ebenfalls in der Offenlegungsschrift [P-ST12] beschrieben, die während der Durchführung der Arbeit entstanden ist.

5.2.2.3 Auswirkung der Wabenausprägung

Mit abnehmender Wabenzellgröße steigt die aufzubringende Schälkraft, verursacht durch die höhere Anbindungsfläche zwischen Wabenkern und Deckschicht. Die folgenden Versuchsergebnisse der Schälversuche zeigen den Einfluss des Wabenkerns (Wabentyp und Zellgröße) auf die Deckschichtanbindung.

Der Füllungsgrad ψ_{FG} beschreibt das Verhältnis zwischen der Oberfläche des Wabenkerns A_c zu der Grundfläche der Einheitszelle A_s . Der Füllungsgrad einer Wellstegwabe lässt sich mit Hilfe der geometrischen Abmaße aus Abbildung 3.7 und durch die Wellenzuglänge aus Gl. (3.4) berechnen.

$$\Psi_{FG} = \frac{A_c}{A_s} = \frac{P_c + S_c}{P_c \cdot H_c} \cdot t_c = \frac{P_c + \sqrt{\frac{22}{5} \cdot H_c \cdot P_c}}{P_c \cdot H_c} \cdot t_c \quad (5.6)$$

Gl. (5.7) beschreibt unter Verwendung der eingeführten Größen aus Abbildung 3.10 den Füllungsgrad einer Expansionswabe.

$$\Psi_{FG} = \frac{A_c}{A_s} = \frac{8}{3} \frac{t_c}{D_c} \quad (5.7)$$

Für die betrachteten Wabenzellen resultieren unter Berücksichtigung der linear extrapolierten Papierdicken, mit dem Ausgangswert des Testliner 115 g/m² aus Tabelle 3.1, die in Tabelle 5.5 angeführten Füllungsgrade.

Tabelle 5.5: Füllungsgrade der untersuchten Papierwaben

Wabenbezeichnung	Papierdicke [mm]	Füllungsgrad [%]
K ~ TL-120 WG	0,18	6,9
Hex TL-150 WL	0,22	7,4
A ~ TL-115 WG	0,17	8,8
C ~ TL-115 WG	0,17	11,3

Abbildung 5.17 zeigt die Versuchsergebnisse der Schälversuche unter Verwendung einer Deckschicht mit einem Flächengewicht von 450 g/m² und einem Fasermassenanteil von 40 Prozent. Bei den dargestellten Versuchsergebnissen im linken Diagramm ist zur Steigerung der Deckschichtanbindung eine Schmelzfolie mit einer Dicke von 0,1 mm eingesetzt worden. Ein nahezu lineares Verhältnis der Schälkraft in Abhängigkeit des Füllgrades der Wellstegwaben ist bei beiden Ausrichtungen des Wabenkerns ersichtlich. Die Hexagonalwabe zeigt im Vergleich zu den Wellstegwaben einen höheren Quotienten, gebildet aus Schälkraft und Füllungsgrad, wodurch die hohe spezifische Anbindungskraft der Hexagonalwabe ersichtlich wird.

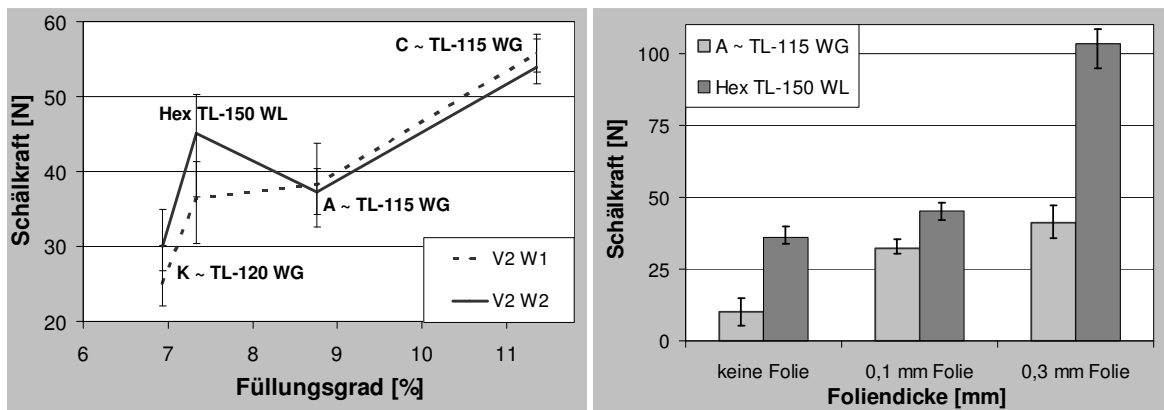


Abbildung 5.17: Auswirkung der Wabenkernausrüstung auf die Schälkraft

Im rechten Diagramm ist der Vergleich der Schälkräfte zwischen Wellstegwabe A ~ TL-115 und Expansionswabe Hex TL-150 dargestellt. Bei den drei betrachteten Varianten ist trotz des größeren Füllungsgrades der Wellstegwabe die Deckschichtanbindung an die Expansionswabe höher. Durch die Steigerung der Foliendicke von 0,1 auf 0,3 mm ist bei der Hexagonalwabe im Gegensatz zur Wellstegwaben eine Schälkrafteerhöhung von ca. 150 Prozent zu erkennen.

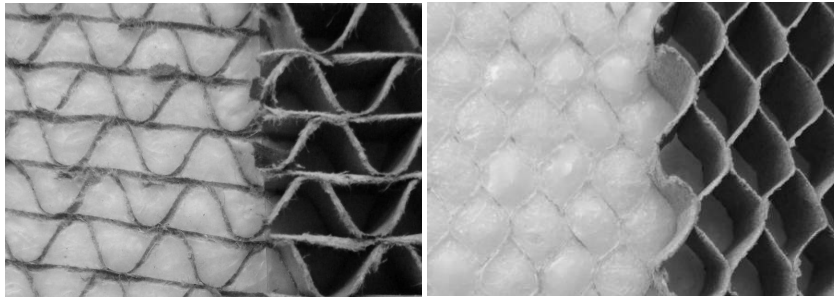


Abbildung 5.18: Deckschichtinnenseite nach Schälversuch mit 0,3 mm Schmelzfolie von A ~ TL-115 WG (li.) und Hex TL-150 WL (re.)

Abbildung 5.18 zeigt die geschälten Deckschichtinnenseiten mit 0,3 mm Folien. Bedingt durch die Wellstegwabenfertigung besitzen die Cellulosefasern eine Vorzugsrichtung parallel zur Deckschicht (siehe Kapitel 3.1.4). Die nahezu senkrecht eingeleitete Schälkraft zur Vorzugsrichtung der Cellulosefasern führt zum Aufbrechen der Faser-Faser-Bindung innerhalb des Cellulosefasernetzes, wodurch sich Papierpartikel bedingt durch die geringe Papierfestigkeit lösen. Die Krafteinleitung während des Deckschichtschälens findet bei der Expansionswabe fertigungsbedingt in Faservorzugsrichtung statt, wodurch die Papierstruktur deutlich höhere Zugkräfte (wie in Tabelle 3.1 gezeigt) aufnehmen kann. Die durch die Folie realisierten Anbindungskräfte sind im Vergleich zu den ertragbaren Zugkräften des Papiers in MD-Richtung kleiner, wodurch das Papier bei Schälbelastung aus der Polypropylenmatrix gezogen wird und sich keine Papierpartikel von der Hexagonalwabe lösen. Bei einer Wellstegwabe würde somit eine 90°-Drehung des Papiers nicht nur, wie in Kapitel 3.1.4 angeführt, zur Steigerung der mechanischen Eigenschaften des Wabenkerns führen, sondern auch zur Verbesserung der Deckschichtanbindung.

5.2.3 Einfluss der Deckschichtausprägung auf den Sandwichverbund

Wie in Kapitel 5.1.3 aufgezeigt, beeinflussen die Materialparameter der Hybridvliese die mechanischen Eigenschaften der voll- und semi-konsolidierten GMT- und NMT-Prüfkörper. Die folgenden Ergebnisdarstellungen und deren Interpretationen dienen dem Verständnis bezüglich des Einflusses der Deckschichtparameter auf die mechanischen Eigenschaften des Sandwichverbundes. Hierbei werden folgende Parameter der Hybridvliese untersucht:

- Auswirkung des Fasermassenanteils
- Auswirkung der strukturellen Deckschichtkonsolidierung
- Auswirkung der Verstärkungsfasertypen
- Auswirkung des Flächengewichtes

5.2.3.1 Auswirkung des Fasermassenanteils

In Abbildung 5.19 ist eine Mikroskopieaufnahme durch einen Zellquerschnitt einer Wellstegwabe A ~ TL-115 WG mit PP/GF-Nadelvliesdeckschichten (400 g/m^2) abgebildet. In der linken Aufnahme besitzt die Deckschicht einen Fasermassenanteil von 30 % und in der rechten 60 %. Zur Veranschaulichung der Deckschichtkonsolidierung sind die Materialproben mit einem gefärbten Epoxidharz bei Unterdruck eingebettet worden, wodurch die luftthaltigen Zwischenräume gefüllt wurden. Die dunklen Regionen zeigen die Bereiche, die mit Epoxidharz infiltriert wurden und somit vorhanden gewesene Lufteinschlüsse sichtbar machen. Eine deutlich höhere Konsolidierung der Deckschichten, insbesondere über den Wabenstegen, ist in der linken Hälfte der Abbildung anhand der hellen Bereiche festzustellen. Verursacht durch den fehlenden Gegendruck nimmt die Konsolidierung der Deckschicht in der Mitte der Wabenzellen ab. Bei einem Fasermassenanteil von 60 % ist ein deutlich höherer Anteil an Lufteinschlüssen festzustellen. Die Glasfasern bauen durch ihre Eigensteifigkeit einen Gegendruck auf, wodurch die Deckschichtdicke, gemessen zwischen Wabenzellwand und Sandwichaußenseite, mit zunehmendem Glasfaseranteil steigt. Aufgrund des hohen Widerstandes der Vliese und der geringen Faser-Matrix-Anbindung sind die Vliesbäuche bei hohem Fasermassenanteil stärker ausgeprägt.

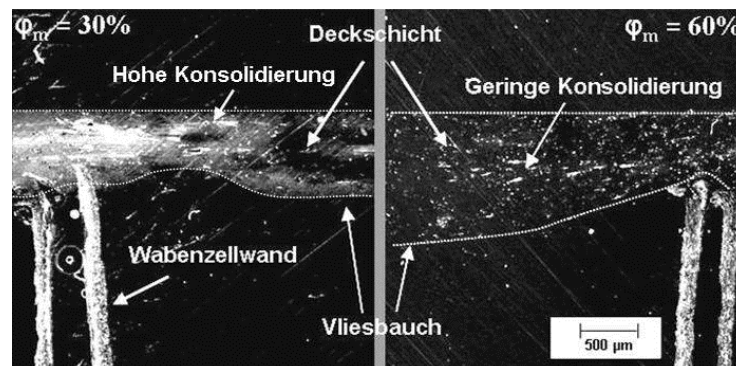


Abbildung 5.19: Mikroskopie durch Zellquerschnitt A ~ TL-115 WG mit 400 g/m^2 PP/GF-Nadelvliesdeckschicht bei 30 % Fasermassenanteil (li.) und 60 % Fasermassenanteil (re.)

Zur Bewertung des Einflusses des Faseranteils sind die mechanischen Eigenschaften der Deckschichten anhand des in Kapitel 5.2.1.3 beschriebenen Zugversuchs untersucht worden. Abbildung 5.20 zeigt die normierten mechanischen Kennwerte abgelöster Deckschichten (400 g/m^2) von einer Wellstegwabe A ~ TL-90 WG. Die betrachtete Orientierung der Halbzeuge entspricht der V1W1-Ausrichtung. Die prozentuale Ergebnisdarstellung erfolgt in Abhängigkeit der untersuchten Glasfasermassenanteile von 30 bis 60 Prozent.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass mit abnehmender Faserverstärkung eine Zunahme des Elastizitätsmoduls und der Zugfestigkeit der Deckschichten stattfindet. Die zunehmende Deckschichtkonsolidierung bei abnehmender Faserverstärkung bewirkt - im Gegensatz zu den Ergebnissen der vollkonsolidierten GMT-Proben aus Kapitel 5.1.3.2 - eine Erhöhung der flächenunabhängigen Kenngrößen. Bei Betrachtung der flächenabhängigen Kenngrößen ist ersichtlich, dass die Erhöhung des Fasermassenanteils zu einer Steigerung der Zugkraft und -steifigkeit führt. Die Gegenüberstellung der Deckschicht- und GMT-Kennwerte offenbart die mechanische Beeinträchtigung

der Deckschichten durch Lufteinschlüsse. Bei einem Fasermassenanteil von 30 % wurden mit Hilfe des Zugversuchs ein E-Modul von 3,1 GPa und eine Festigkeit von 46,0 MPa der Deckschichten ermittelt. Hingegen wurden bei den entsprechenden vollkonsolidierten GMT-Proben ein E-Modul von 5,9 GPa und eine Zugfestigkeit von 84,0 MPa bestimmt. Die Deckschichtkennwerte entsprechen in etwa denen der semi-konsolidierten GMT-Proben mit einem Konsolidierungsgrad von 0,57 (siehe Abbildung 5.6).

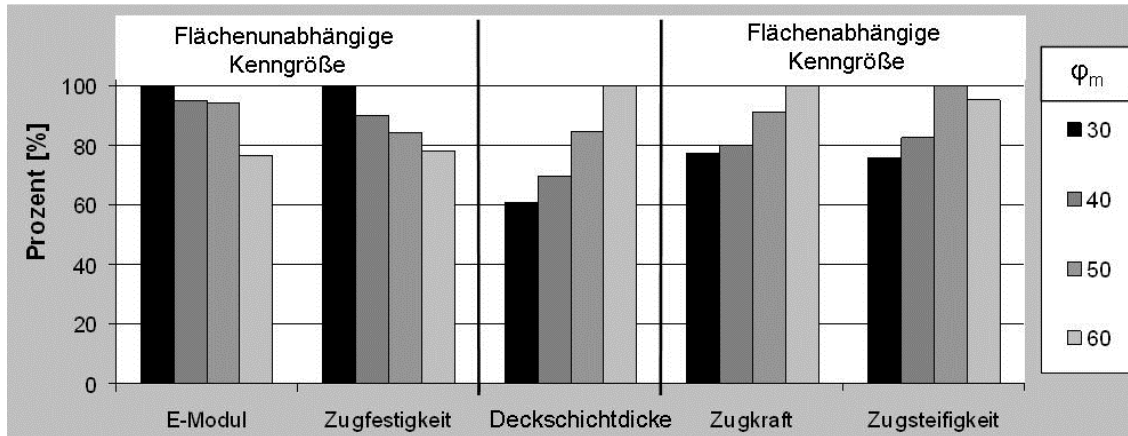


Abbildung 5.20: Einfluss des Fasermassenanteils auf die mechanischen Eigenschaften der Deckschichten

Die Auswirkung des Glasfaseranteils auf die maximale Biegekraft ist anhand des Sandwichverbundes mit konstantem Deckschichtflächengewicht von 400 g/m² und einer Wellstegwabe A ~ TL-90 WG mit einer Wabendicke von 7 mm in Abbildung 5.21 dargestellt. Alle betrachteten Proben versagten durch lokale Intrusion des Wabenkerns unterhalb der Druckfinnen.

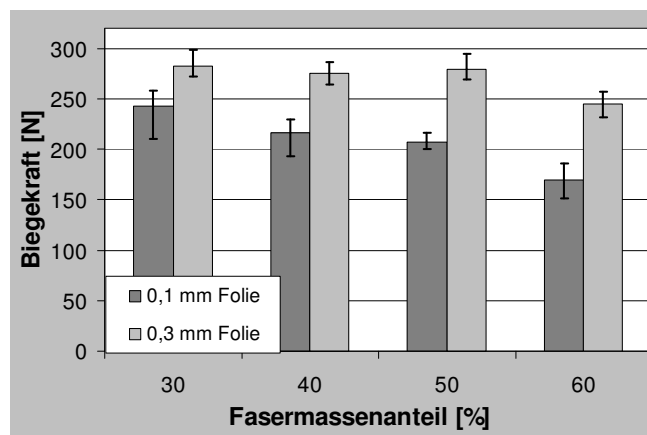


Abbildung 5.21: Einfluss des Glasfaseranteils auf die Biegekraft des Sandwichverbundes

Der Verlauf des Diagramms zeigt einen Abfall der maximalen Biegekraft mit zunehmendem Glasfasermassenanteil. Angesichts der Zugversuchsergebnisse aus Abbildung 5.20 ist nachzuvollziehen, dass ein ansteigender Glasfaseranteil zur Verringerung des Zugmoduls der Deckschichten führt, wodurch eine Verringerung des Druckmoduls in Dickenrichtung abgeleitet werden kann. Das reduzierte Druckmodul der Deckschicht führt zu einer lokalen Kräfteinleitung von der Druckfinne auf den Wabenkern, wodurch ein frühzeitiges Versagen durch lokale Intrusion begünstigt

wird. Zur Optimierung der Sandwichstruktur bzgl. der maximalen Biegekraft kann auf Grundlage der gewonnenen Ergebnisse die Verwendung eines Glasfaseranteils unterhalb von 60 Massenprozent empfohlen werden.

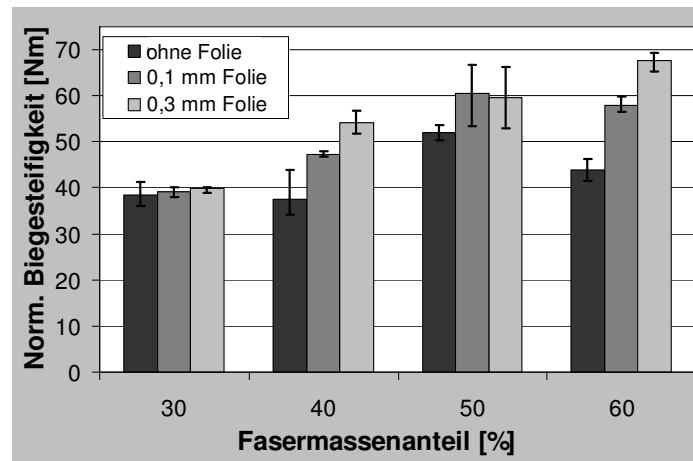


Abbildung 5.22: Einfluss des Glasfaseranteils auf die Biegesteifigkeit des Sandwichverbundes

In Abbildung 5.22 ist ein Anstieg der Biegesteifigkeit mit zunehmendem Glasfaseranteil der drei Systeme zu erkennen. Die zunehmende Deckschichtdicke, verursacht durch den steigenden Glasfaseranteil (siehe Abbildung 5.20), bewirkt eine Erhöhung des Flächenträgheitsmomentes des Sandwichverbundes und damit eine Erhöhung der normierten Biegesteifigkeit nach Gleichung (5.4). Die Sandwichsteifigkeit kann nicht als prägnanter Vorteil der Deckschichten mit hohem Fasermassenanteil angesehen werden, da eine Steigerung der Biegesteifigkeit ebenfalls durch einen geringfügig dickeren Wabenkern möglich ist.

5.2.3.2 Auswirkung der strukturellen Deckschichtkonsolidierung

Abbildung 5.23 zeigt eine dreidimensionale, topografische Aufnahme einer PP/GF-Deckschichtinnenseite mit einem Flächengewicht von 450 g/m², einem Fasermassenanteil von 40 % und einer Schmelzfolie von 0,1 mm Dicke. Die Aufnahme ist durch das D.F.D.-Verfahren (Depth from Defocus) mit Hilfe des Digital-Mikroskops VHX-600 der Firma Keyence Corporation aufgenommen worden.

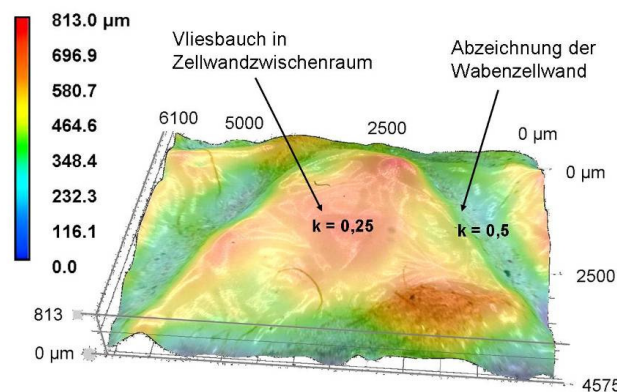


Abbildung 5.23: Topografische Aufnahme der Deckschichtinnenseite

In der Abbildung sind die Abzeichnungen der Wellstegwabe A ~ TL-115 deutlich zu sehen. Der Vliesbauch in der Wabenzellenmitte ist durch die Oberflächenerhebung von ca. 0,8 mm zu erkennen. Unter Berücksichtigung der Deckschichtdicke resultiert an den Anbindungsflächen zu den Zellwänden ein Konsolidierungsgrad von ca. 0,5, wohingegen der Vliesbauch einen deutlich niedrigeren Konsolidierungsgrad von 0,25 aufweist.

Anhand einer PP/GF-Vliesdeckschicht mit 450 g/m² und einem Fasermassenanteil von 40 % zeigt Abbildung 5.24 den Einfluss der Waben- und Vliesstoffausrichtung auf die mechanischen Eigenschaften der strukturell konsolidierten Deckschichten. In den Diagrammen sind die experimentell ermittelten Zugkennwerte in Abhängigkeit der Halbzeugausrichtung dargestellt. Zur Berücksichtigung des Einflusses der verschiedenen Wabenzellgrößen sind die gemittelten Kennwerte der Deckschichten, abgeschält von den Wabenkernen C ~ TL-115, A ~ TL-115 und K ~ TL-120, prozentual dargestellt. Da die Kennwerte der V1W1-Ausrichtung die höchsten mechanischen Eigenschaften aufweisen, sind diese mit 100 % gleichgesetzt.

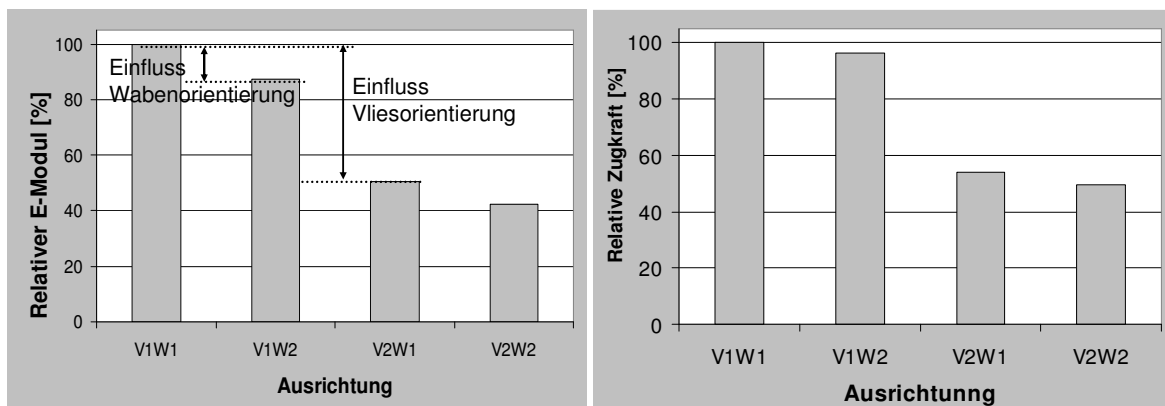


Abbildung 5.24: Einfluss der Waben- und Vliesausrichtung auf die mechanischen Deckschichteigenschaften E-Modul (li.) und Zugkraft (re.)

Die Vergleiche der V1W1- mit der V2W1-Ausrichtung sowie der V1W2- mit der V2W2-Ausrichtung zeigen den Einfluss der Vliesstoffausrichtung auf die Deckschichtkennwerte. Entsprechend den Zugversuchsergebnissen der vollkonsolidierten Deckschichten, siehe Kapitel 5.1.3, ist die Faservorzugsrichtung deutlich zu erkennen.

Der Einfluss der strukturellen Deckschichtkonsolidierung ist durch Gegenüberstellung der V1W1- mit V1W2-Ausrichtung sowie der V2W1- mit V2W2-Ausrichtung ersichtlich. Verursacht durch die Orientierung der Wabenstege (siehe Abbildung 5.23) sind die Deckschichtkennwerte in W1-Richtung im Vergleich zur W2-Richtung höher. Hierdurch bewirkt neben der Faservorzugsrichtung die strukturelle Konsolidierung, wie aus Abbildung 5.24 nachzuvollziehen, eine weitere Beeinflussung der richtungsabhängigen Deckschichteigenschaften. Bei Gegenüberstellung der Ergebnisse ist festzustellen, dass die Deckschichtkennwerte primär durch die Vliesstoff- und sekundär durch die Wabenausrichtung beeinflusst werden. Ebenso ist aus den Versuchsergebnissen ersichtlich, dass die strukturelle Konsolidierung den Elastizitätsmodul stärker beeinflusst als die Zugfestigkeit.

Abbildung 5.25 zeigt die relativen breitennormierten Biegesteifigkeiten der Sandwichverbunde, bestehend aus den zuvor betrachteten Deckschichten und Wellstegwaben mit einer Dicke von ca. 9 mm. Analog zu den Deckschichteigenschaften ist die erhöhte Steifigkeit des Vlieses in V1-Ausrichtung und des Wabenkerns in W1-Ausrichtung ersichtlich. Wie bei den Deckschichtelastizitätsmoduln dominiert der Einfluss der Vliesausrichtung und nicht der der Wabenausrichtung.

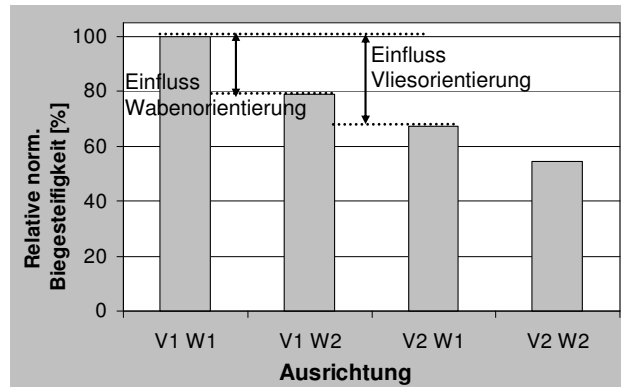


Abbildung 5.25: Normierte Biegesteifigkeit in Abhängigkeit der Halbzeugausrichtung

Es sei darauf hingewiesen, dass die richtungsabhängigen Biegesteifigkeiten (siehe Kapitel 4.2.3.1) und Schubsteifigkeiten (siehe Kapitel 3.3.2) des Wabenkerns das elastische Verhalten des Sandwichverbundes ebenfalls geringfügig beeinflussen, dies aber nicht betrachtet wurde.

5.2.3.3 Auswirkung der Verstärkungsfasertyp

Die Auswirkungen der untersuchten Sisal- und Glasfasern auf die mechanischen Eigenschaften des Sandwichverbundes sind in Abhängigkeit des Fasermassenanteils in Abbildung 5.26 dargestellt. Die Kennwerte sind aus Versuchsreihen an Sandwichverbunden mit identischem Deckschichtflächengewicht von 400 g/m² und einer Wellstegwabe A ~ TL-90 WG mit einer Wabendicke von 7 mm bestimmt worden. Analog zu den vorherigen Ergebnissen zeigt der Sandwichverbund mit PP/NF-Deckschichten bei zunehmendem Faseranteil eine Verringerung der maximalen Biegekraft. Bei naturfaserverstärkten Deckschichten ist durch den Einsatz einer Schmelzfolie ebenfalls von einer Steigerung der Biegekraft auszugehen, wie dies in Kapitel 5.2.2.2 für PP/GF-Deckschichten beschrieben ist.

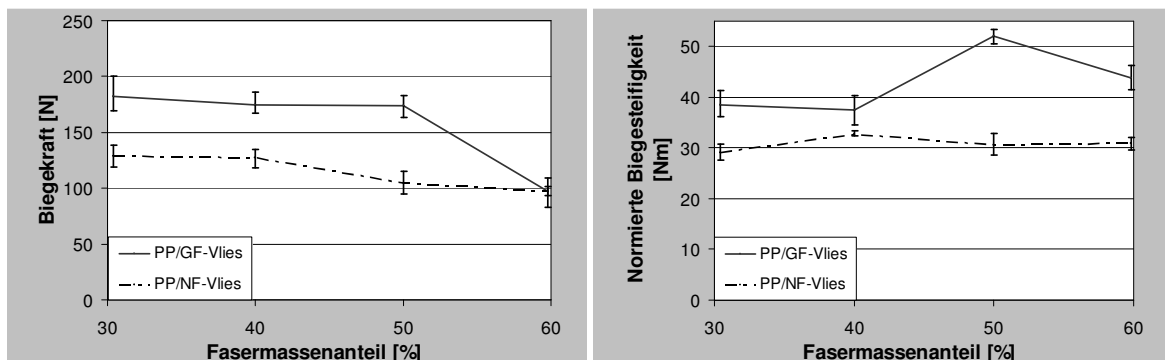


Abbildung 5.26: Einfluss der Verstärkungsfasertyp

Die deutlich niedrigeren Steifigkeitswerte der Sandwichverbunde mit PP/NF-Deckschichten sind auf den geringen Elastizitätsmodul der Sisalfasern (siehe Tabelle 5.1) zurückzuführen. Die Biegesteifigkeit der Sandwichverbundsysteme mit PP/GF-Deckschichten ist bei gleichem Flächengewicht ca. 35 % höher.

5.2.3.4 Auswirkung des Flächengewichtes

In Abbildung 5.27 sind die Kennwerte aus dem Vier-Punkt-Biegeversuch der Sandwichverbunde (V1W1-Ausrichtung) bestehend aus A ~ TL-90 WG und PP/GF-Deckschichten mit 40 % Fasermassenanteil und einem Flächengewichten von 200, 300 und 400 g/m² dargestellt. Anhand der Versuchsergebnisse ist eine Steigerung der mechanischen Eigenschaften bei zunehmendem Deckschichtflächengewicht festzustellen. Analog zu den Ergebnissen aus Kapitel 5.2.2.1 ist bei allen drei Systemen eine abfallende Biegekraft bei zunehmendem Fasermassenanteil ersichtlich. Verursacht durch die geringe Deckschichtanbindung, zeigen die drei betrachteten Systeme bei 60 Prozent nahezu dieselbe ertragbare Biegekraft.

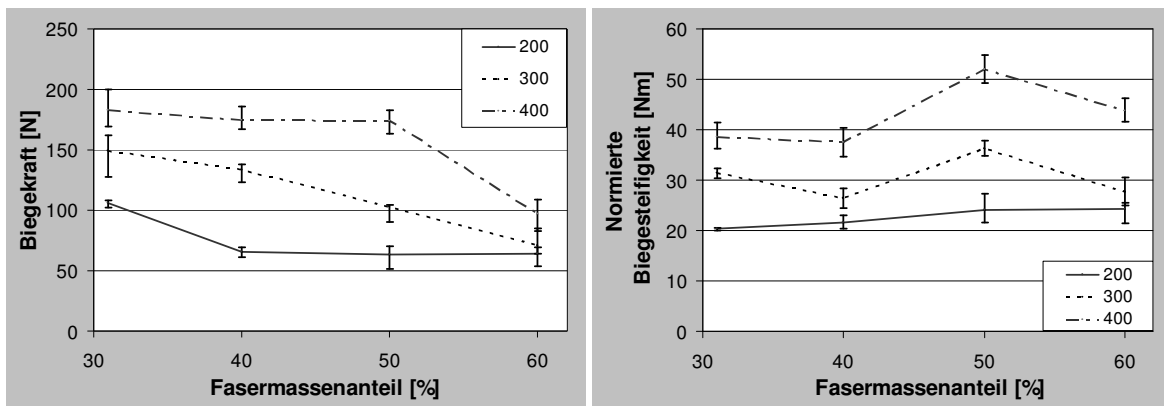


Abbildung 5.27: Einfluss des Deckschichtflächengewichtes auf Biegekraft (li.) und norm. Biegesteifigkeit (re.)

Im rechten Diagramm ist eine nahezu lineare Beziehung zwischen normierter Biegesteifigkeit und Deckschichtflächengewicht zu erkennen. In Kapitel 5.4.1 wird dieser mechanische Zusammenhang durch Gleichung (5.11) beschrieben.

5.2.4 Einfluss der Wabenzellengröße und -ausrichtung auf den Sandwichverbund

Abbildung 5.28 zeigt den Einfluss der Zellgrößen auf die mechanischen Eigenschaften des Sandwichverbundes. Der betrachtete Sandwichverbund besteht aus PP/GF-Deckschichten mit einem Flächengewicht von 450 g/m² und einem Fasermassenanteil von 40 %. Zur Verbesserung der Deckschichtanbindung sind auf die Wellstegwaben (C ~ TL-115, A ~ TL-115, K ~ TL-120) mit einer Kernhöhe von ca. 9 mm Schmelzfolien mit einer Dicke von 0,1 mm aufgebracht worden.

Das linke Diagramm weist auf eine steigende Biegekraft bei abnehmender Zellgröße hin. Die steigende Wabendruckfestigkeit (siehe Abbildung 3.14) ermöglicht eine höhere Kraftaufnahme der Kernstruktur unterhalb der Druckfinnen, wodurch das Versagen durch lokale Intrusion erst bei höherer Biegebeanspruchung eingeleitet wird. Die hohe Biegekraft in V1W1-Ausrichtung ist zum einen auf die höhere Steifigkeit der Deckschichten in V1-Richtung und zum anderen auf die Ausrichtung der Wabenstege zurückzuführen. Bei W1-Ausrichtung des Wabenkerns bewirkt die senk-

rechte Anordnung der Druckfalten zu den Wabenstegen eine höhere lokale Wabendruckfestigkeit im Vergleich zur W2-Ausrichtung. Die Prüfergebnisse zeigen, dass beim Versagensbild der lokalen Intrusion die maximale Biegekraft vorwiegend durch die Wellstegwabenorientierung und nicht durch die Ausrichtung des anisotropen Nadelvliesstoffes beeinflusst wird.

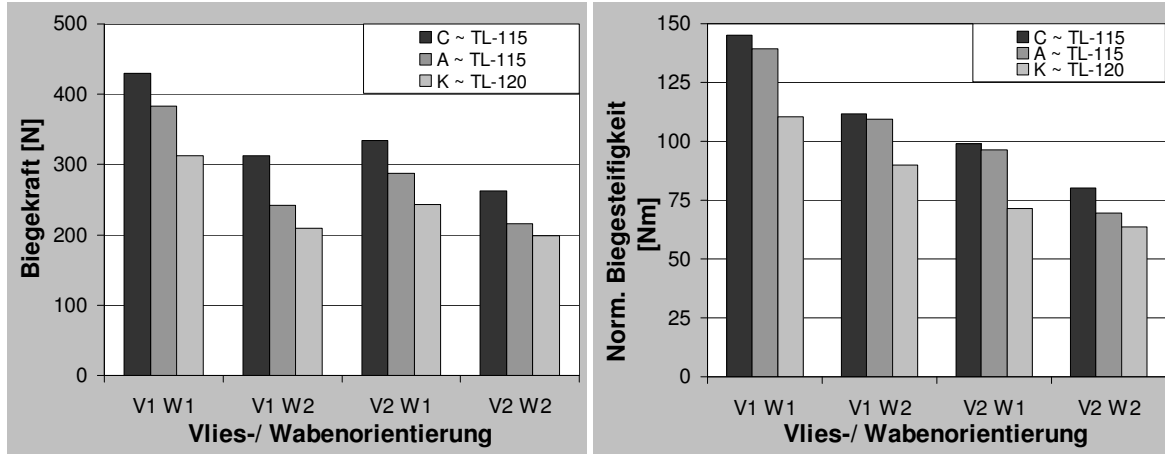


Abbildung 5.28: Einfluss der Wabenkernausrüstung auf Biegekraft (li.) und norm. Biegesteifigkeit (re.)

Das rechte Diagramm zeigt die normierte Biegesteifigkeit der Sandwichverbundsysteme. Wie in Kapitel 5.2.3.2 angeführt, ist das anisotrope Verhalten, verursacht durch die strukturelle Konsolidierung der Deckschichten und die Faservorzugsrichtung, zu erkennen. Die zunehmende Biegesteifigkeit bei abnehmender Zellgröße ist auf den höheren Flächenanteil der konsolidierten Deckschichtbereiche zurückzuführen.

5.3 Mechanische Eigenschaften des Sandwichverbundes mit alternativen Deckschichten

Neben den unkonsolidierten Nadelvliesstoffen sind die in Abbildung 5.29 dargestellten glasfaserverstärkten thermoplastischen Halbzeuge auf ihre Eignung als Deckschichtmaterial untersucht worden. Alle drei industriell hergestellten Halbzeuge besitzen eine Polypropylenmatrix und sind mit Glasfasern verstärkt.

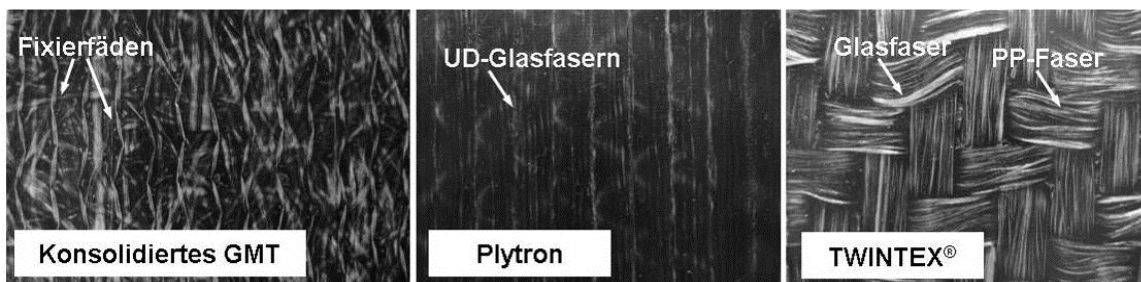


Abbildung 5.29: Oberflächenaufnahmen eines Sandwichverbundes mit verschiedenartigen PP/GF-Deckschichten

Die konsolidierte GMT-Folie, bestehend aus Langglasfaservlies und Polypropylenmatrix, ist mit einem Flächengewicht von 430 g/m² und einem Fasermassenanteil von 58 Prozent für die durchgeführte Versuchsreihe von der Firma Bond-Laminates bezogen worden. Die Glasfilamente zur Fixierung des Glasvlieses sind in der Oberflächenaufnahme des Sandwichverbundes zu erkennen. Bei dem betrachteten Plytron der Firma Elekon sind Glasfasern in der Polypropylenmatrix unidirektional angeordnet. Das Halbzeug besitzt laut Herstellerangabe eine Dicke von 0,28 mm (gemessenes Flächengewicht 390 g/m²) und einen Fasermassenanteil von 60 Prozent. Die eingebetteten Glasfasern des Plytrons sind aufgrund der schwarzen Polypropylenmatrix nur schwach zu erkennen. Hingegen sind Abzeichnungen der Wellstegwabe auf der Oberfläche sichtbar.

Das unkonsolidierte PP/GF-Hybridgewebe mit der Produktbezeichnung Twintex® T PP 60 745 AF 152 der Firma Owens Corning besitzt das höchste Flächengewicht der betrachteten Halbzeuge von 745 g/m² mit einem Fasermassenanteil von 60 Prozent (Herstellerangaben).

Um einen Vergleich zu den mechanischen Kennwerten der bisher betrachteten PP/GF-Deckschichten zu ermöglichen, ist in Abbildung 5.30 ein Nadelvlies mit 400 g/m² mit einem Fasermassenanteil von 40 % und einer Schmelzfolie (0,1 mm Dicke) als Referenzgröße angeführt. Analog zur beschriebenen Probenherstellung aus Kapitel 5.2.1.1 sind die Deckschichthalbzeuge auf die Wellstegwabe A ~ TL-90 WG mit einer Dicke von ca. 7 mm aufgebracht worden. Die mechanischen Kennwerte in Abbildung 5.30 zeigen die Ergebnisse aus dem Vier-Punkt-Biegeversuch.

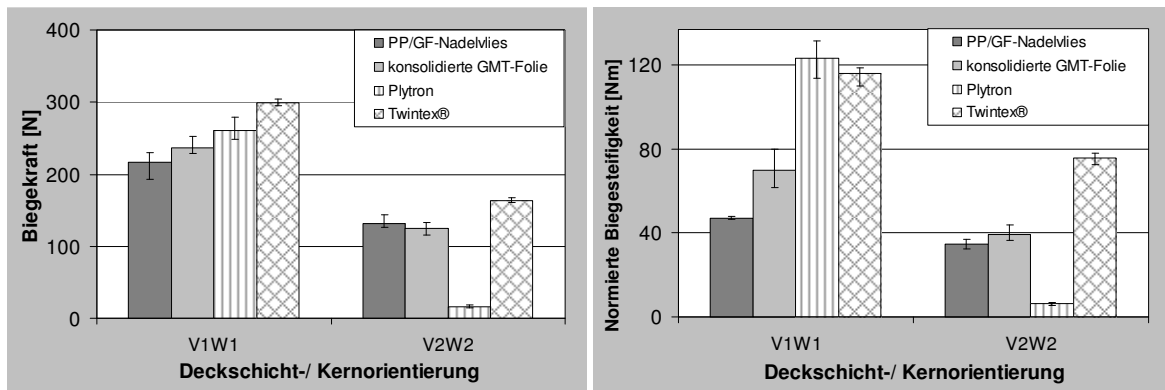


Abbildung 5.30: Mechanische Eigenschaften der Sandwichverbunde mit alternativen Deckschichten

Bei nahezu gleichem Flächengewicht zeigt der Sandwichverbund mit konsolidierter GMT-Folie eine vergleichbare maximale Biegekraft zum Sandwichverbund mit semi-konsolidiertem PP/GF-Nadelvlies. Begünstigt durch den höheren Elastizitätsmodul (siehe Abbildung 5.6) besitzt der Sandwichverbund mit konsolidierter GMT-Folie eine höhere Biegesteifigkeit im Vergleich zu den semi-konsolidierten Nadelvliesdeckschichten. Die ausgeprägte Biegesteifigkeit der konsolidierten GMT-Folie in V1W1-Ausrichtung ist auf die Orientierung der Fixierfäden zurückzuführen. Bei beiden Ausrichtungen versagten die Proben durch lokale Intrusion.

Die unidirektionale Ausrichtung der Glasfasern des Plytrons führen zu einem stark anisotropen Verhalten des Sandwichverbundes. Insbesondere in V1W1-Ausrichtung der Halbzeuge ist die breitennormierte Biegesteifigkeit im Vergleich zum Sandwichverbund mit PP/GF-Nadelvliesdeckschichten nahezu 200 % höher. Die deutlich niedrigeren Kennwerte in V2W2-

Ausrichtung sind vor allem auf die Krafteinleitung senkrecht zur Glasfaserorientierung zurückzuführen. Im Gegensatz zur V1W1-Ausrichtung versagten die Biegeproben in V2W2-Ausrichtung nicht durch lokale Intrusion des Wabenkerns, sondern durch Zwischenfaserbruch auf der Zugseite. An hochbeanspruchten Bereichen können die richtungsabhängigen Eigenschaften des Plytrons zur lokalen Bauteilverstärkung und somit zur gezielten Kraftaufnahme eingesetzt werden. Ausgehend von den niedrigen mechanischen Eigenschaften in V2W2-Ausrichtung ist der alleinige Einsatz des Plytrons als Deckschichtmaterial nicht zu empfehlen.

Die strukturelle Deckschichtkonsolidierung führt bei Twintex-Geweben[®], wie auch bei den Hybridvliesen (siehe Kapitel 5.2.3.2), zu divergenten Kennwerten der V1W1- und V2W2-Ausrichtung. Des Weiteren ist von einer Beeinflussung der richtungsabhängigen Gewebeeigenschaften durch die Ondulation der Kettfäden auszugehen. Aufgrund des höheren Flächengewichtes und der bidirektionalen Faserorientierung weist dieser Sandwichverbund höhere Kennwerte im Vergleich zum Sandwichverbund mit PP/GF-Nadelvliesdeckschichten auf.

5.4 Theoretische Betrachtung der Sandwichsteifigkeit

Folgend werden analytische und numerische Berechnungsmethoden zur Ermittlung der Sandwichbiegesteifigkeit auf ihre Anwendbarkeit untersucht.

5.4.1 Analytische Betrachtung der Sandwichsteifigkeit

Nachstehend werden die experimentellen Biegesteifigkeiten D_{exp} aus Kapitel 5.2.1.3 mit den theoretischen Biegesteifigkeiten D_{th} verglichen. Der analytische Ansatz von Zenkert [ZE97] ermöglicht die Vorhersage der theoretischen breitennormierten Sandwichbiegesteifigkeit durch die mechanischen Kennwerte der Einzelkomponenten.

Die Biegesteifigkeit eines symmetrischen Sandwichaufbaus mit identischen Deckschichten, siehe Abbildung 5.31, lässt sich in Abhängigkeit der Deckschichtelastizitätsmoduln E_f , der Deckschichtdicken t_f , des Wabenelastizitätsmoduls E_c und dessen Dicke h_c berechnen.

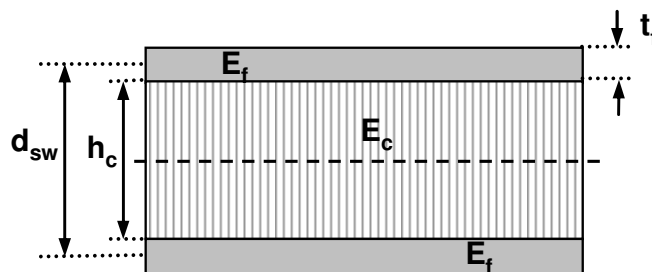


Abbildung 5.31: Parameter des symmetrischen Sandwichverbundes

Die normierte Biegesteifigkeit des Sandwichverbundes bildet sich aus der Summe folgender Steifigkeitskomponenten:

- D_f Biegesteifigkeit der einzelnen Deckschichten um deren Mittelachse
- D_o Biegesteifigkeit der Deckschichten um Symmetrieachse des Sandwichverbundes
- D_w Biegesteifigkeit des Wabenkerns

Mit Hilfe von Gl. (5.8) kann die theoretische breitennormierte Biegesteifigkeit durch die einzelnen Steifigkeitskomponenten berechnet werden. Hierbei beschreibt d_{sw} ($d_{sw} = h_c + t_f$) den Abstand der Mittelachsen beider Deckschichten.

$$D_{th} = \int E z^2 dz = \frac{E_f \cdot t_f^3}{6} + 2E_f \cdot t_f \left(\frac{d_{sw}}{2} \right)^2 + \frac{E_c \cdot h_c^3}{12} = 2D_f + D_o + D_w \quad (5.8)$$

Im Folgenden werden die einzelnen Steifigkeitskomponenten auf ihren Beitrag zur Gesamtbiegesteifigkeit des Sandwichverbundes untersucht. Hierbei werden die Kennwerte der fünf geprüften Sandwichverbunde aus Abbildung 5.32 betrachtet. Bei Gegenüberstellung der Steifigkeitskomponenten werden jeweils die Sandwichaufbauten miteinander verglichen, bei denen der Steiner Anteil der Deckschichten im Verhältnis zur Biegesteifigkeit des Wabenkerns oder der Deckschichten gering ist.

Der Quotient, gebildet aus $2 D_f$ und D_o , veranschaulicht die Relevanz der Biegesteifigkeit der Einzeldeckschichten. Bei Betrachtung eines Sandwichverbundes mit der Deckschichtdicke von 0,74 mm und einem minimalen Abstand der Deckschichtmittelachsen von $d_{sw} = 3,5$ mm resultiert aus Gl. (5.9) ein signifikantes Biegesteifigkeitsverhältnis von 0,015.

$$\frac{2D_f}{D_o} = \frac{t_f^2}{3 \cdot d_{sw}^2} \quad (5.9)$$

Das Verhältnis der Biegesteifigkeit des Wabenkerns zur Biegesteifigkeit der Deckschichten - unter Berücksichtigung des Steiner-Anteils - veranschaulicht den Einfluss der Wabenbiegesteifigkeit. Aus dem Drei-Punkt-Biegeversuch zur Umformanalyse (siehe Kapitel 4.2.3.1) resultiert ein Elastizitätsmodul des betrachteten Wabenkerns bei senkrechter Ausrichtung von 1,3 MPa. Bei einer Deckschichtdicke von 0,74 mm beträgt das gemessene Zugmodul der Deckschichten in V2W2-Ausrichtung 1 747 MPa. Bei maximal betrachteter Wabendicke von 11 mm resultiert aus Gl. (5.10) ein Biegesteifigkeitsquotient von 0,002.

$$\frac{D_w}{D_o} = \frac{E_c \cdot h_c^3}{6 \cdot E_f \cdot t_f \cdot d_{sw}^2} \quad (5.10)$$

Aus den durchgeführten Gegenüberstellungen der Steifigkeitskomponenten ist ersichtlich, dass zum einen die Biegesteifigkeit der einzelnen Deckschichten und zum anderen die Biegesteifigkeit

des Wabenkerns zu vernachlässigen sind und somit die normierte Biegesteifigkeit des Sandwichverbundes aus den Deckschichtkennwerten nach (5.11) berechnet werden kann.

$$D_{ih} \approx D_o = \frac{E_f \cdot t_f \cdot d_{sw}^2}{2} \quad (5.11)$$

Abbildung 5.32 zeigt die experimentell ermittelten und analytisch berechneten breitennormierten Biegesteifigkeiten in Abhängigkeit der Sandwichdicke. Der untersuchte Sandwichaufbau besteht aus der Wellstegwabe A ~ TL-115 WG mit unterschiedlichen Dicken und PP/GF-Deckschichten mit einem Flächengewicht von 450 g/m² und 40 % Fasermassenanteil. Die analytischen Funktionsverläufe resultieren aus Gl. (5.11), wobei in V1W1-Richtung ein experimentell ermittelter Zugelastizitätsmodul der Deckschichten von 3 283 MPa und in V2W2-Richtung von 1 747 MPa berücksichtigt wurde. Die Spannungs-Dehnungs-Verläufe der Deckschichten sind im Anhang Kapitel 5 hinterlegt. Entsprechend der gemessenen Deckschichtdicken, wurde diese mit 0,74 mm berücksichtigt.

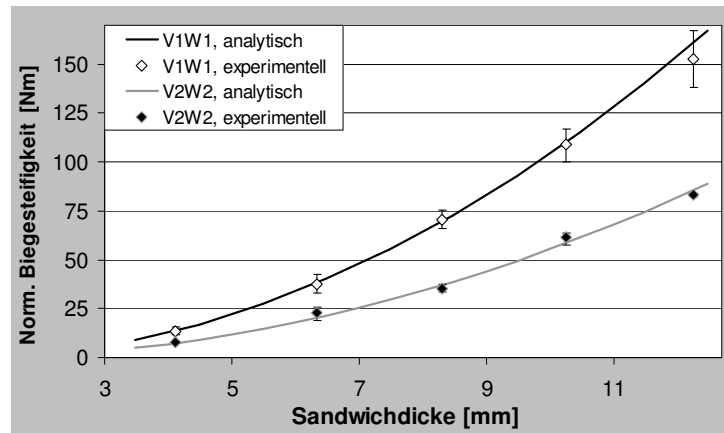


Abbildung 5.32: Analytische Biegesteifigkeit im Vergleich zur experimentell bestimmten

Abbildung 5.32 zeigt durch die geringen Ergebnisabweichungen, dass der vereinfachte analytische Ansatz zur Abschätzung der breitennormierten Biegesteifigkeit unter Zuhilfenahme der ermittelten Deckschichtzugkennwerte gut geeignet ist. Wie die Funktionsverläufe veranschaulichen, muss hierbei das anisotrope Verhalten der Deckschichten berücksichtigt werden.

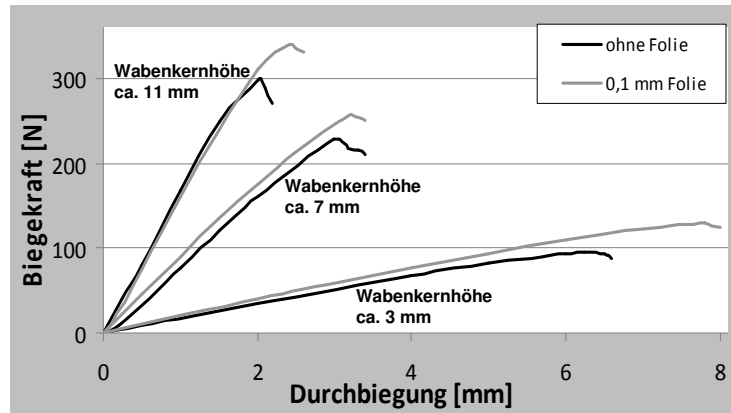


Abbildung 5.33: Einfluss der Schmelzfolie auf den Kraft-Weg-Verlauf der Sandwichverbunde

Abbildung 5.33 zeigt die Kraft-Weg-Verläufe aus den Vier-Punkt-Biegeversuchen von Sandwichverbunden bestehend aus einem Wabenkern A ~ TL-115 WG und PP/GF-Deckschichten mit 450 g/m^2 und 40 % Fasermassenanteil. Wie aus der Gegenüberstellung ersichtlich, bewirkt die erhöhte Deckschichtanbindung durch die Schmelzfolie (0,1 mm) eine Steigerung der maximal ertragbaren Biegekraft. Hingegen ist durch die nahezu identische Steigung, innerhalb des elastischen Bereichs, fast keine Beeinflussung der Steifigkeit durch die zusätzliche Schmelzfolie zu erkennen. Die geringe Foliendicke von 0,1 mm sowie der niedrige Elastizitätsmodul des Polypropylens führen zu einer vernachlässigbaren Erhöhung der Biegesteifigkeit. Somit kann anhand von Gleichung (5.11) die Biegesteifigkeit eines Sandwichverbundes mit einer 0,1 mm dicken Folie auch unter Verwendung der experimentell bestimmten Deckschichtelastizitätsmoduln ohne Folie berechnet werden.

5.4.2 Numerische Betrachtung der Sandwichbauteilsteifigkeit

Im Folgenden wird mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) die Bauteilsteifigkeit einer Sandwichhutablage durch die ermittelten Halbzeugkennwerte berechnet. Auf Basis der Erkenntnisse aus den Mikroskopieaufnahmen findet eine Vereinfachung des geometrischen Sandwichaufbaus statt, wodurch die Grundlage für das Finite-Elemente-Modell geschaffen wird. Die Validierung der aufgezeigten Methode erfolgt anhand des durchgeführten Vier-Punkt-Biegeversuchs.

5.4.2.1 Erzeugung des FEM-Modells

Abbildung 5.34 zeigt die Vereinfachungsschritte zur Modellierung des Sandwichverbundes. Das unparametrisierte geometrische **Modell A** basiert auf den Mikroskopieaufnahmen aus Abbildung 5.19. Der Sandwichverbund ist wegen der Materialheterogenität in die Regionen 1 bis n unterteilt. Die Region 1 entspricht dem eingesetzten Klebstoff bei der Wabenherstellung zwischen den Zellwänden, die durch den Bereich 2 definiert sind. Als 3. Region ist die Fläche der eingesetzten PP-Schmelzfolie angeführt. Aufgrund der lokal differenten Materialeigenschaften, verursacht durch die strukturelle Konsolidierung der Nadelvliesdeckschichten, ist die Deckschicht in die Regionen 4 bis n untergliedert. Da die experimentelle Ermittlung der notwendigen Materialkennwerte zur Abbildung der Deckschicht sehr aufwendig ist, ist diese Modellvorstellung aufgrund ihrer Komplexität in der Praxis nicht anwendbar.

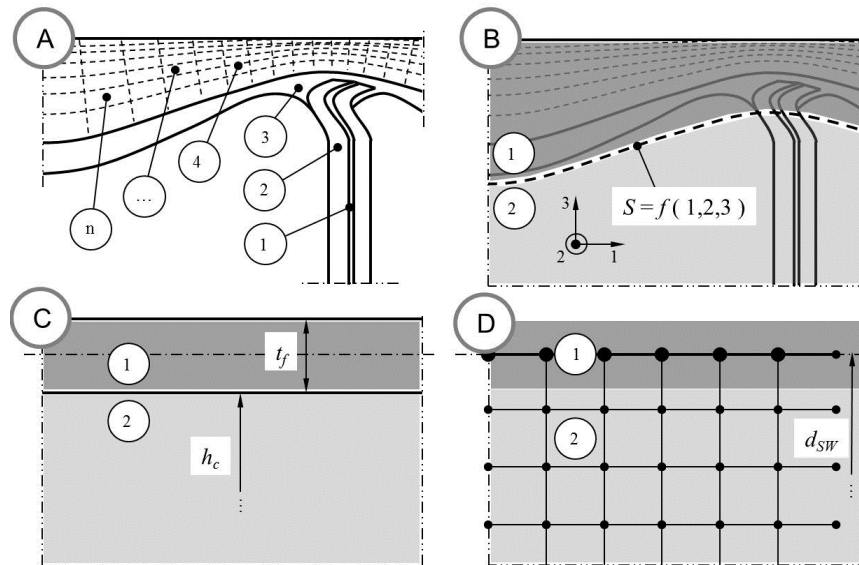


Abbildung 5.34: Modellvereinfachung des Sandwichverbundes

Im **Modell B** sind die Kern- und Deckschichten zur Vereinfachung mit homogenen Materialeigenschaften dargestellt. Die Grenzfläche S zwischen Deckschicht und Wabenkern ist, wie in Kapitel 5.2.3 beschrieben, sowohl von den Halbzeugmaterialien als auch vom Herstellungsprozess abhängig. Aufgrund der hohen Anzahl an Einflussparametern ist die Abbildung des dreidimensionalen Grenzflächenverlaufs ohne Zuhilfenahme von optischen Messmethoden (siehe Abbildung 5.23) nicht möglich.

In **Modell C** ist zur weiteren Vereinfachung eine konstante Deckschichtdicke t_f und Wabenkernhöhe h_c abgebildet. Analog zu den durchgeführten Zugversuchen (siehe Abbildung 5.10) ist die Dicke der Deckschicht als Abstand zwischen Sandwichoberfläche und des Wabenkerns definiert. Der Gebrauch der Zugkennwerte führt durch die konstant definierte Dicke zu einer Homogenisierung der strukturell konsolidierten Deckschicht.

Modell D zeigt den Einsatz der verwendeten Elementtypen. Aufgrund der geringen Deckschichtdicke, im Verhältnis zur Sandwichdicke, ist die Deckschicht durch Schalenelemente abgebildet. Der Abstand der zweidimensionalen Deckschichtnetze entspricht dem Abstand beider Deckschichtmittelebenen $d_{sw} = h_c + t_f$. Zur Berücksichtigung der Wabenkernverformung in Dickenrichtung ist dieser durch Volumenelemente idealisiert.

5.4.2.2 Validierung des FEM-Modells durch den Vier-Punkt-Biegeversuch

Die Validierung des numerischen Modells erfolgt durch Gegenüberstellung zum experimentell durchgeführten Vier-Punkt-Biegeversuch. Abbildung 5.35 zeigt aufgrund der Symmetrie ein Viertel der betrachteten Prüfkörpergeometrie. Zur virtuellen Analyse des Prüfkörpers wurde dieser in CATIA V5R19 der Firma Dassault Systèmes erstellt und in HyperWorks 10 von Altair importiert. Die Vernetzung erfolgte über den Preprozessor HyperMesh, die Lösung des linearen Gleichungssystems durch den Solver OptiStruct und die Auswertung mit Hilfe der Post-Processing-Software HyperView.

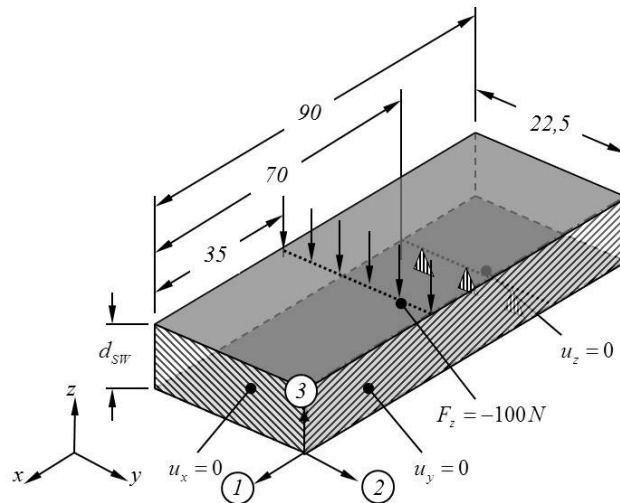


Abbildung 5.35: Modellaufbau des Vier-Punkt-Biegeversuchs

In der Simulation wird der Sandwichverbund aus Kapitel 5.4.1 mit PP/GF-Deckschichten mit einem Flächengewicht von 400 g/m² und einem Fasermassenanteil von 40 % sowie einer Wellstegwabe A ~ TL-115 WG untersucht. Die Höhe des Sandwichverbundes beträgt 8,1 mm mit einer Deckschichtdicke von 0,74 mm. Als Deckschichtkennwerte sind die experimentell bestimmten Zugelastizitätsmoduln berücksichtigt worden. Im Folgenden wird das Vlies, wegen seiner richtungsabhängigen Elastizitätseigenschaften, als orthotrop betrachtet, wobei der Elastizitätsmodul in V1W1-Ausrichtung E_1 und in V2W2-Ausrichtung E_2 entspricht. Die benötigte Querkontraktionszahl ν_{12} wurde mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen auf einem ebenen Probenkörper mit einem Konsolidierungsgrad $k = 0,32$ bestimmt. Zur Berechnung des Schubmoduls G_{12} ist der Elastizitätsmodul der Deckschicht unter $\theta = 45^\circ$ experimentell ermittelt worden.

$$\bar{S}_{11} = \frac{\cos^4 \theta}{E_1} + \frac{\sin^4 \theta}{E_2} + \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{1}{G_{12}} - 2 \frac{\nu_{21}}{E_1} \right) \cdot \sin^2 \cdot 2\theta, \quad \text{wobei} \quad \nu_{21} = \frac{E_2}{E_1} \cdot \nu_{12} \quad (5.12)$$

Durch Gleichsetzen des Koeffizienten der Nachgiebigkeitsmatrix aus Gl. (5.12) [SC07] mit Gl. (5.13) wird die Isolierung vom Schubmodul ermöglicht.

$$\bar{S}_{11} = \frac{1}{E_\theta} \quad (5.13)$$

Gl. (5.14) gestattet die Berechnung des Schubmoduls der Deckschicht mit Hilfe der experimentell bestimmten Kennwerte.

$$G_{12} = \frac{E_1 \cdot E_\theta \cdot E_2}{2 \cdot E_2 (2 \cdot E_1 + \nu_{21} \cdot E_\theta) - E_\theta (E_1 + E_2)} \quad (5.14)$$

Zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens des Wabenkerns wurden die experimentellen Kennwerte aus Anhang Kapitel 3 berücksichtigt. Die elastischen Kennwerte senkrecht zur Wabenenebene sind aufgrund ihrer niedrigen mechanischen Eigenschaften vernachlässigt worden. Die verwendeten Kennwerte, Elementtypen und die Nachgiebigkeitsmatrix der Deckschichten und des Wabenkerns zeigt Abbildung 5.36.

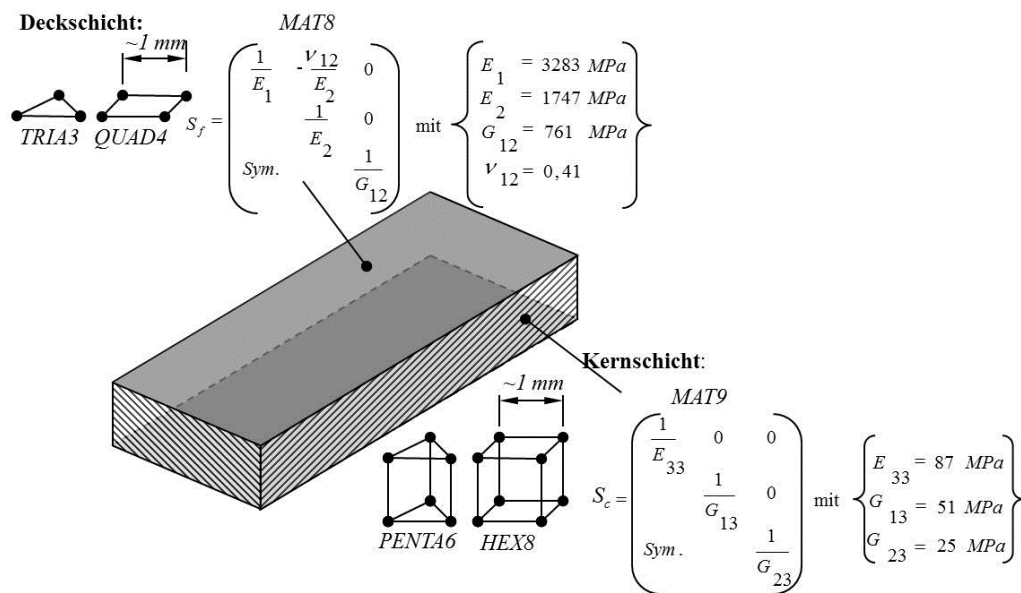


Abbildung 5.36: Kennwerte und Elementtypen bei der FEM

In der linken Seite von Abbildung 5.37 sind die Verformungen der Sandwichbalken in V1W1- und V2W2-Halbzeugausrichtung mit einem Skalierungsfaktor von 10 bei einer wirkenden Gesamtlinienlast von 100 N dargestellt. Die Messung der Verschiebung erfolgt in der Mitte der Sandwichbalken an der Stelle mit der höchsten Durchbiegung. Im rechten Teil der Abbildung sind die numerisch ermittelten Kraft-Weg-Verläufe den experimentell bestimmten gegenübergestellt. Durch die geringe Abweichung der Funktionsverläufe innerhalb des linear-elastischen Bereichs ist die realitätsnahe Abbildung des numerischen Modells durch die beschriebene Methode ersichtlich.

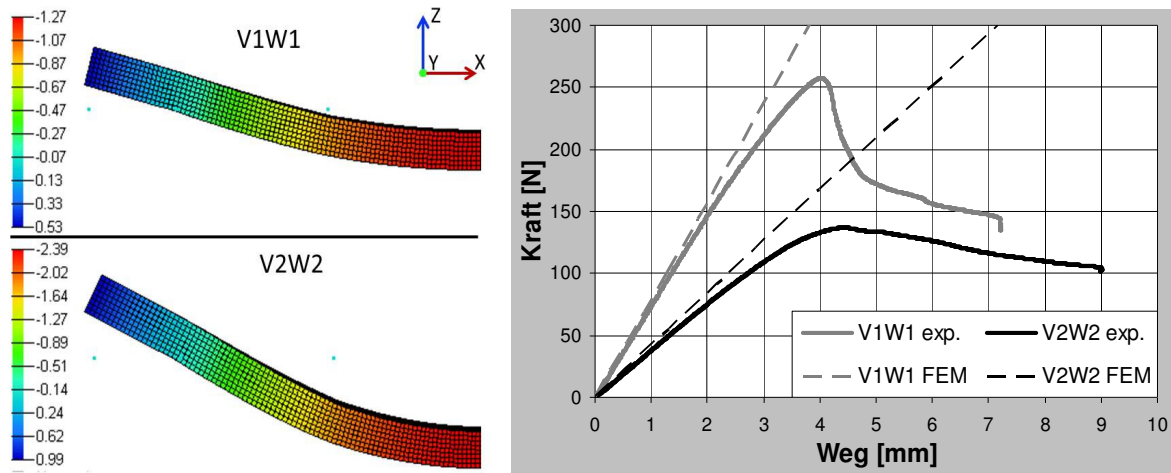


Abbildung 5.37: Gegenüberstellung des experimentellen und numerischen Kraft-Weg-Verlaufs

5.4.2.3 Simulation der Bauteilsteifigkeit am Beispiel Hutablage

Das Wissen über die Verformung bei Bauteilbelastung ist insbesondere zur Vermeidung von Bauteilkollisionen von Bedeutung. Im Folgenden wird die Bauteilsteifigkeitsanalyse durch die beschriebene numerische Berechnungsmethode am Beispiel einer Sandwichhutablage durchgeführt und mit deren realen Verformung verglichen. Abbildung 5.38 zeigt das CAD-Modell und die Vernetzung der untersuchten Sandwichhutablage. Die verwendeten Materialkennwerte entsprechen denen aus Abbildung 5.36. Die Sandwichhöhe der Hutablage beträgt 10,5 mm mit einer Deckschichtdicke von 0,74 mm. Bei der Vernetzung der zweidimensionalen Deckschichten wurden ca. 58 000 Elemente gebildet und beim dreidimensionalen Wabekern ca. 87 000 mit einer mittleren Größe von 2,5 mm.

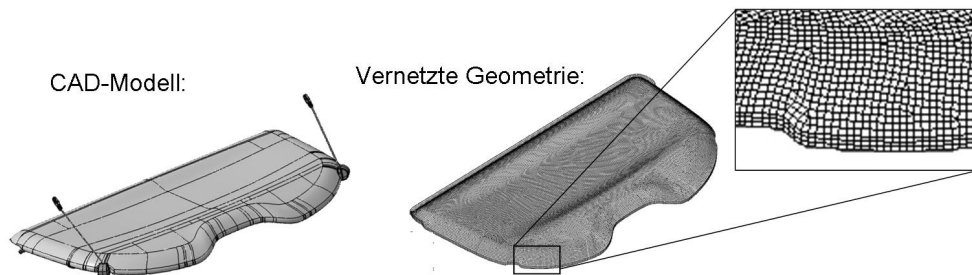


Abbildung 5.38: Vernetzte Sandwichhutablage

Abbildung 5.39 zeigt die Fixierungs- und Auflageelemente der Hutablage. Als Randbedingungen sind für die Elemente der Auflageflächen keine Verschiebungen in z-Richtung zulässig. Wegen der festen Einspannung des Fixierelementes ist die Verschiebung dessen Kontaktfläche zusätzlich in y-Richtung gesperrt.

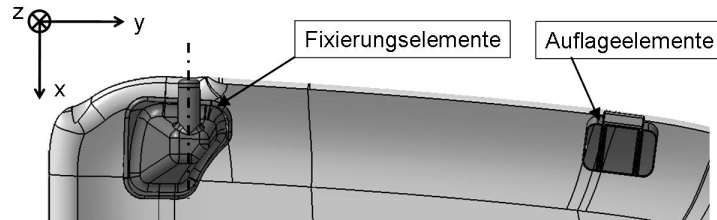


Abbildung 5.39: Fixierungs- und Auflageelemente der Sandwichhutablage

Auf der linken Seite der Abbildung 5.40 ist die Verschiebung in z-Richtung bei einer mittig aufgebrachtten Druckkraft von 160 N über eine Fläche von 260 x 260 mm abgebildet. Die rechte Seite der Abbildung zeigt die im Fahrzeug verbaute Hutablage. Mittels zweier Sandsäcke wurde die Hutablage mit 16 kg belastet. Der Messpunkt, an dem die Durchbiegung ermittelt wurde, ist in der Mitte der Hutablagenrückseite definiert.

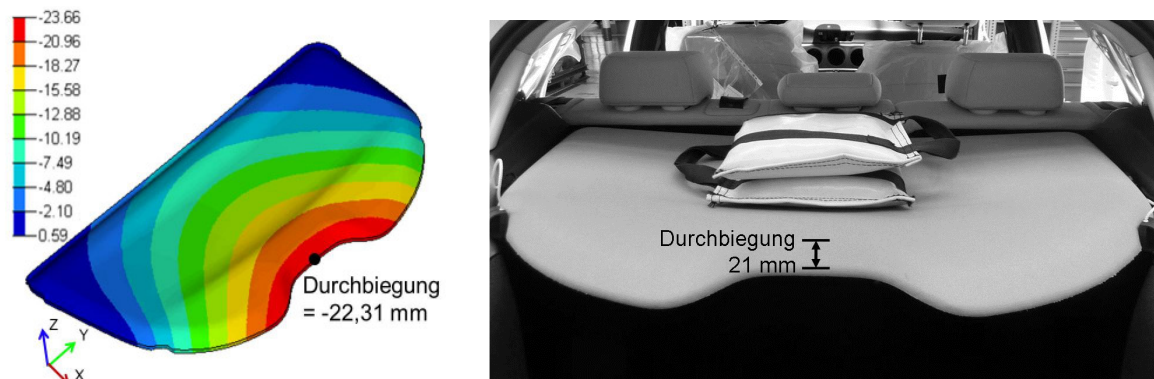


Abbildung 5.40: Gegenüberstellung der experimentellen und numerischen Hutablagensteifigkeit

Der Vergleich zwischen experimentell und numerisch ermittelter Bauteildurchbiegung zeigt eine Abweichung des Simulationsergebnisses von 6,2 Prozent. Die geringe Abweichung veranschaulicht, dass die dargestellte FEM-Methode und die experimentell ermittelten Materialkennwerte eine realitätsnahe Abbildung und somit eine gute Prognose der Sandwichbauteilsteifigkeit ermöglichen.

5.5 Zusammenfassung

Die durchgeführten Werkstoffprüfungen ermöglichten die Darstellung verschiedener Einflussparameter auf die mechanischen Eigenschaften des Sandwichverbundes, wodurch ein Verständnis für das mechanische Werkstoffverhalten geschaffen werden konnte. Eine deutliche Verbesserung der Deckschichtenanbindung durch Einbringen einer Schmelzfolie konnte mittels Schälversuchen nachgewiesen werden. Die stark ausgeprägte mechanische Beeinträchtigung durch die Lufteinschlüsse in den Deckschichten ist durch Gegenüberstellung der Kennwerte zum vollkonsolidierten GMT und NMT dargestellt worden. Des Weiteren konnte aufgezeigt werden, dass die strukturelle Konsolidierung der Deckschichten zu einer richtungsabhängigen Beeinflussung der Sandwichbiegesteifigkeit führt. Die Gegenüberstellung der Sandwichverbundsysteme, bestehend aus natur-

und glasfaserverstärkten Deckschichten, zeigte den deutlichen mechanischen Vorteil der PP/GF-Deckschichten. Mit Hilfe der durchgeführten Biegeversuche konnte nachgewiesen werden, dass eine Steigerung der maximalen Biegekraft insbesondere durch Erhöhung der Papierwabendruckfestigkeit möglich ist. Die Ergebnisse der Deckschichtzugversuche veranschaulichen, dass bei der gewählten kraftgesteuerten Solidifikationsphase des Sandwichverbundes ein ansteigender Faser-massenanteil zur Verringerung des Deckschichtelastizitätsmoduls führt, wodurch ein frühes Versagen durch lokale Wabenintrusion begünstigt wird. Der dargestellte analytische Ansatz ermöglicht die Abschätzung der Sandwichbiegesteifigkeit über die Abmaße des Sandwichverbundes und die experimentell bestimmten Deckschichtelastizitätsmoduln. Mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode wurde eine Vorgehensweise vorgestellt, die die Prognose der Bauteilsteifigkeit auf Basis der experimentell ermittelten Kennwerte ermöglicht.

6 Prozesscharakterisierung der Bauteilfertigung

In diesem Kapitel wird die technische Umsetzung der Sandwichbauteilfertigung aus Papierwaben und faserverstärkten Polypropylendeckschichten vorgestellt. Das thermische Prozessfenster zum Aufheizen der Halbzeuge wird anhand thermischer Analyseverfahren untersucht. Für die Bauteilherstellung werden zwei stückzahlabhängige Fertigungsvarianten angeführt und zwei Werkzeugkonzepte für unterschiedliche Bauteilanforderungen aufgezeigt. Des Weiteren ermöglichen die Grundlagenuntersuchungen zum Fügen durch Reibschweißen Rückschlüsse auf die Anwendbarkeit dieser stark verbreiteten Fügetechnik.

6.1 Thermisches Prozessfenster

Die geschmolzenen Polypropylenfasern bewirken beim alleinigen Aufheizen der Deckschichten eine deutliche Verringerung der Festigkeit der Nadelvliesstoffe, wodurch Handlingsarbeiten erschwert werden. Das simultane Aufheizen der Nadelvliesstoffe und der Papierwabe führt durch die Eigensteifigkeit des Wabenkerns zu einer Stabilisierung der Halbzeuge und trägt somit zur Prozessvereinfachung bei. Bei einer höheren Schmelztemperatur der eingesetzten Polymerfasern, im Vergleich zur Zersetzungstemperatur des Papiers, ist sowohl beim getrennten Aufheizen der Deckschichten als auch beim gemeinsamen Aufheizen der Halbzeuge von einer thermischen Degradation der Papierwabe auszugehen. Aus diesen Gründen ist bei der Prozessführung, insbesondere während der Aufheizphase, eine Temperatur zu wählen, die zum einen ein vollständiges Aufschmelzen der Polypropylenfasern sicherstellt und zum anderen nicht zur Schädigung des Papiers führt.

6.1.1 Versuchsbeschreibung

Zur Analyse des thermischen Prozessfensters wurden die Polypropylenfasern mit Hilfe der Differential Scanning Calorimetry (DSC) und der Testliner der Papierwabe durch die thermogravimetrische Analyse (TGA) untersucht. Die thermogravimetrische Analyse ist eine Methode zur Erfassung der Massenänderung in Abhängigkeit der Temperatur oder der Zeit, wodurch Informationen über Verdampfungs- oder Zersetzungsprozesse gewonnen werden [NE06]. Die Analyse bezüglich der thermischen Stabilität des Testliners ist unter Sauerstoff bei einer Aufheizrate von 20 K/min durchgeführt worden. Bei der Differential Scanning Calorimetry wird die Wärmekapazität der Probe mit einer Referenzsubstanz während eines definierten Temperaturverlaufs verglichen [SC07]. Durch exo- oder endotherme Reaktionen des untersuchten Polymers, können beispielsweise Rückschlüsse auf die Schmelz- und Rekristallisationstemperatur gezogen werden. Die Untersuchung der Polypropylenfasern erfolgte unter Sauerstoffatmosphäre bei einer Aufheiz- und Abkühlrate von 10 K/min.

6.1.2 Ergebnisdarstellung

Abbildung 6.1 zeigt die TGA- und DSC-Kurven der untersuchten Halbzeuge. Im linken Diagramm der Abbildung ist die Masse des Testliners in Abhängigkeit der beaufschlagten Temperatur dargestellt. Die TGA-Kurve lässt sich in vier Bereiche unterteilen. Die Massendifferenz des ersten Bereichs veranschaulicht die Massenabnahme durch Verdampfung des absorbierten Wassers aus der Umgebung. Bei einer Temperatur von 100 °C ist eine Verringerung der Probenmasse von ca. 5,5 % zu erkennen. Der zweite Bereich zeichnet sich durch einen schwach abfallenden Funktionsverlauf aus. Die geringe Massenabnahme ist zum einen auf die restliche Verdampfung des in der Probe enthaltenen Wassers zurückzuführen und zum anderen sind erste Zersetzungsercheinungen der Cellulose nicht auszuschließen. In der Promotionsschrift [OD02] wird der Massenabbau von Flachfasern bei isothermer Temperaturbeaufschlagung untersucht. Die Versuchsergebnisse an den Naturfasern zeigen, dass bei einer Versuchsdauer von 15 Minuten und einer konstanten Temperatur von 200 °C keine ausgeprägten Abbaureaktionen festzustellen sind. Analog zu den Naturfasern ist aufgrund des identischen Grundmaterials, der Cellulose, von keiner thermischen Schädigung innerhalb des zweiten Temperaturbereichs bei kurzer Aufheizdauer des Testliners auszugehen. Der dritte Bereich schildert durch den drastischen Abbau der Probenmasse die Zersetzung des Testliners bis zur Temperatur von 335 °C. Der vierte Bereich zeigt, dass die Rückstände in Form von Asche ca. 18 % betragen.

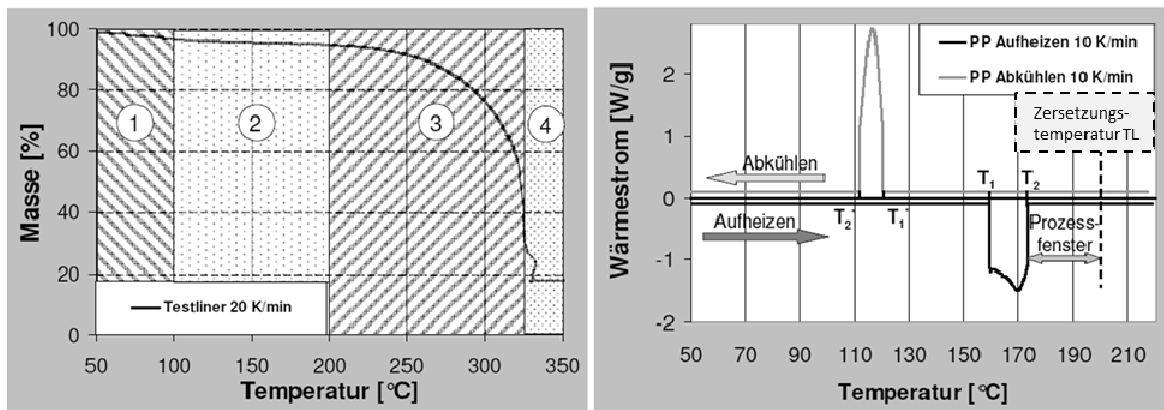


Abbildung 6.1: TGA-Kurve des Testliners (li.) und DSC-Kurven der PP-Fasern (re.)

Das rechte Diagramm der Abbildung 6.1 zeigt die DSC-Kurven der Aufheiz- und Abkühlphase der Polypropylenfasern. Die endotherme Reaktion zwischen T₁ und T₂ (159 und 175 °C) veranschaulicht den Schmelzbereich des Polypropylens. Das exotherme Temperaturfeld T₁* und T₂* (111 und 120 °C) zeigt hingegen den Rekristallisationsbereich der Polypropylenfasern. Die Zersetzungstemperatur des Testliners ist basierend auf den Erkenntnissen der TGA bei 200 °C eingezeichnet. Für die Aufheizphase resultiert hieraus ein Temperaturprozessfenster zwischen 175 und 200 °C, wodurch zum einen ein vollständiges Aufschmelzen der Polypropylenfasern gewährleistet ist und zum anderen thermische Beeinträchtigungen des Testliners vermieden werden. Der Rekristallisationsbereich des Polypropylens zeigt, dass zum Entformen des Sandwichbauteils eine Temperatur unterhalb von 111 °C zu wählen ist.

6.2 Fertigungsverfahren

Der Materialverbund, bestehend aus einem Papierwabenkern und thermoplastischen faserverstärkten Deckschichten, ermöglicht die Darstellung verschiedener Herstellungsvarianten. Im Folgenden werden unterschiedliche Prozessketten mit ihren Anforderungen und Eigenschaften aufgezeigt, wobei sich alle Varianten in folgende Prozessschritte gliedern lassen:

1. Konfektionieren der Halbzeuge
2. Überführung der thermoplastischen Matrix in den plastischen Zustand
3. Umformen der Deckschichten und des Wabenkerns in der Werkzeugkavität
4. Verbindungsherstellung zwischen Deckschicht und Papierwabe
5. Entformen des Sandwichbauteils aus der Werkzeugkavität

Das Aufheizen sowie das Abkühlen der hybriden Deckschichten ermöglicht eine Unterteilung in verschiedene Herstellungsvarianten, welche sich besonders in den Taktzeiten als auch in Anlagen- und Maschinenaufwänden unterscheiden. Beschreibungen der Herstellungsvarianten sind ebenfalls in der Patent-Offenlegungsschrift [P-ST11], die im Rahmen dieser Arbeit entstanden ist, angeführt.

6.2.1 Preformherstellung der Papierwabe

Ein erhöhtes Umformpotenzial befeuchteter Papierwaben wird durch die Versuchsergebnisse aus Kapitel 4.2 aufgezeigt. Durch Feuchtigkeitsbeaufschlagung konnte eine Verbesserung der Umformeigenschaften nachgewiesen werden, wodurch die Herstellung komplex geformter Bauteile möglich wird. Bei gemeinsamen Formpressen der aufgeheizten Deckschichten und der befeuchteten Papierwabe ist von einer Verschlechterung der Deckschichtenanbindung auszugehen. Des Weiteren kann durch die geschlossene Deckschicht das Wasser schlecht entweichen, wodurch die hydrophile Kernstruktur eine Degradation der mechanischen Eigenschaften des Sandwichverbundes verursacht (siehe Kapitel 7.1). Aus diesen Gründen muss zur Fertigung eines komplex geformten Sandwichbauteils die Umformung des Wabenkerns dem eigentlichen Herstellungsprozess vorgeschaltet werden.

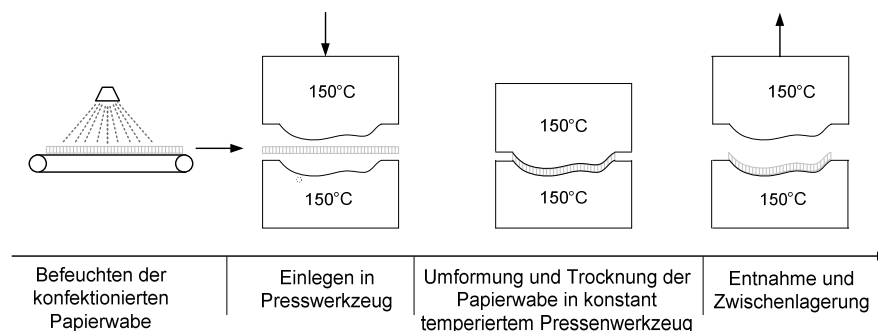


Abbildung 6.2: Herstellung der Papierwabenpreform

In Abbildung 6.2 sind die Prozessschritte der Wabenpreformherstellung abgebildet. Die Befeuchtung der konfektionierten Papierwabe findet beispielsweise durch eine Sprühvorrichtung, wie in Kapitel 4.2.2.1 ausgeführt, statt und kann gravimetrisch über die Gewichtszunahme überwacht und gesteuert werden. Die Analysen aus Kapitel 4.2 zeigen eine deutliche Verbesserung der Umformeigenschaften durch Befeuchtung der Papierwaben im Bereich von 20 Massenprozent. Der Papierwabenkern wurde bei den durchgeführten Versuchsreihen in der Werkzeugkavität mit einer Oberflächentemperatur von ca. 150 °C umgeformt. Über eine Haltezeit von 40 Sekunden (siehe Kapitel 4.2.2.1) findet die Stabilisierung durch die Trocknung der umgeformten Wabenstruktur statt. Während des Umformprozesses bewirkt die Feuchtigkeitsbeaufschlagung ein teilweises Auflösen der Wasserstoffbrücken und eine Reduzierung der induzierten Spannungen durch Verringerung der Papiersteifigkeit. Die darauffolgende Trocknung der befeuchteten Papierwabe in der geschlossenen Werkzeugkavität führt zur Ausbildung neuer Wasserstoffbrückenbindungen, die die umgeformte Geometrie fixieren (siehe Anhang Kapitel 4). Ein Beschnitt der umgeformten Wabe kann durch werkzeugintegrierte Pinch- oder Stanzkanten dargestellt werden. Die Formstabilität der umgeformten Papierwabe erlaubt eine entkoppelte Preformherstellung vor der Bauteilfertigung.

6.2.2 Zyklische Werkzeugtemperierung

Die dynamische Temperierung des Presswerkzeugs ermöglicht einen Fertigungsprozess, bei dem lediglich ein Formwerkzeug zum Aufheizen und zur Formgebung des Sandwichverbundes erforderlich ist.

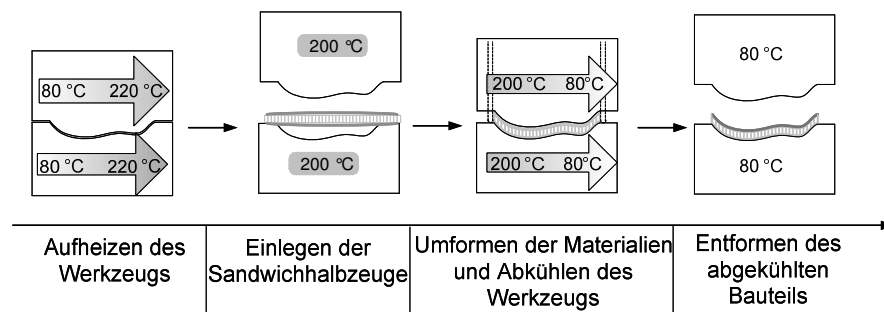


Abbildung 6.3: Zyklische Werkzeugtemperierung zur Sandwichbauteilherstellung

Wie in Abbildung 6.3 schematisch dargestellt, wird das Presswerkzeug aus energetischen Gründen im geschlossenen Zustand aufgeheizt. Hierbei wird die Werkzeugoberflächentemperatur von unterhalb der Rekristallisationstemperatur des verwendeten thermoplastischen Matrixsystems in eine Oberflächentemperatur oberhalb der Schmelztemperatur des eingesetzten Thermoplasts überführt. Bei den durchgeführten Versuchen mit Deckschichten aus glasfaserverstärktem Polypropylen wurde die Werkzeugoberfläche von ca. 80 auf 200 °C aufgeheizt. Anschließend werden die vorkonfektionierten Halbzeuge, bestehend aus Papierwaben und Deckschichtmaterialien, in die Kavität eingelegt und unter Temperatureinwirkung umgeformt. Durch anschließendes Abkühlen der thermoplastischen Matrix findet eine formschlüssige Verbindung zwischen Deckschichten und Wabenkern statt, wodurch die Entformung des abgekühlten Bauteils ermöglicht wird.

Die Vorteile der zyklischen Werkzeugtemperierung, im Vergleich zur konstanten Werkzeugtemperierung (siehe Kapitel 6.2.3), sind niedrige Investitionskosten sowie geringe Personalaufwendungen aufgrund der wenigen Handarbeitsschritte. Demgegenüber stehen hohe Zykluszeiten sowie ein hoher Energieeintrag, verursacht durch die dynamische Werkzeugtemperierung. Die in situ Kaschierung im temperierten Werkzeug kann bei temperaturempfindlichen Dekorwaren nicht durchgeführt werden, wodurch eine nachgeschaltete Bauteilkaschierung notwendig wird. Die Versuchsreihen zeigten, dass konsolidierte Deckschichten bei komplexen Bauteilgeometrien wegen des eingeschränkten Umformverhaltens nur begrenzt einsetzbar sind. Die langsame Materialabkühlung kann zur Beeinträchtigung der mechanischen Eigenschaften durch den Polymerkettenabbau und zur Geruchsbildung durch thermische Schädigung des Papiers führen. Die zyklische Werkzeugtemperierung eignet sich somit besonders für Kleinserien und Prototypen sowie für Deckschichten mit guten Drapiereigenschaften.

6.2.3 Konstante Werkzeugtemperierung

Im Gegensatz zur zyklischen findet bei der konstanten Werkzeugtemperierung die Erwärmung der Sandwichhalbzeuge gesondert vom Formgebungsprozess statt. Der Energieeintrag zur Erwärmung kann durch Wärmestrahlung (z. B. Infrarotofen), Konduktion (temperierte Pressen) oder über Konvektion (Umluftofen) erfolgen.

In Abbildung 6.4 ist die Herstellungsprozesskette mit konstanter Werkzeugtemperierung schematisch dargestellt. Die Erwärmung der Halbzeuge findet durch eine temperierte Presse statt, deren Oberflächentemperatur über der Schmelztemperatur der thermoplastischen Matrix liegt.

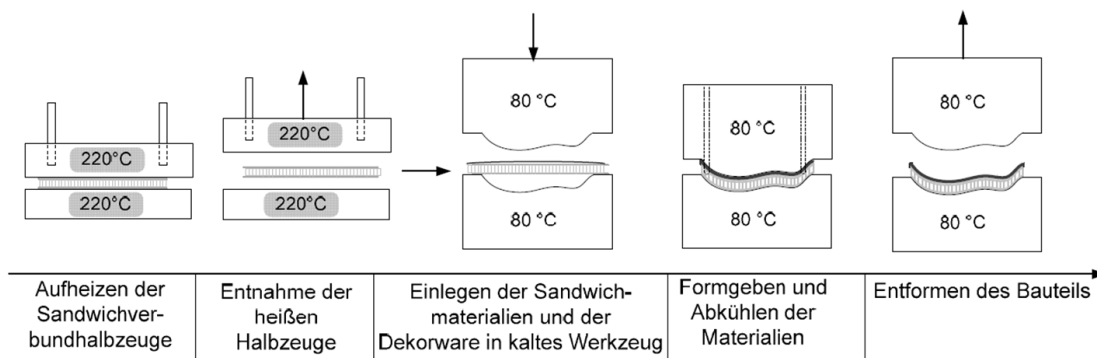


Abbildung 6.4: Sandwichbauteilherstellung mit konstanter Werkzeug- und Pressentemperierung

Nach der Aufheizphase werden die temperierten Halbzeuge zur Umformung und Abkühlung in die kalte Kavität eingelegt. Das Aufbringen von Dekorstoffen zur Durchführung einer in situ Kaschierung ist während der Beförderung der Halbzeuge von der Aufheizpresse in das Formwerkzeug, wie in Abbildung 6.4 dargestellt, möglich. Eine konstante Werkzeugtemperatur von 80 °C bewirkt eine retardierte Abkühlung der Deckschichten während des Umformprozesses, was insbesondere bei Deckschichten mit geringen Flächengewichten von Vorteil ist.

Bei den Versuchsreihen mit glasfaserverstärkten Polypropylendeckschichten wurde zum Aufheizen eine Pressentemperatur von 220 °C zur Realisierung einer kurzen Zykluszeit und zur Schonung der Papierwabe gewählt. Die Zeitspanne bis zum Erreichen einer Deckschichtoberflächentemperatur im Bereich von 180 bis 200 °C der zum Wabenkern gewandten Seite definierte die

Aufheizdauer in der temperierten Presse. Die Versuchsreihen mit dem dargestellten Prozess zeigten bei allen betrachteten Deckschichtmaterialien aus Kapitel 5 gute Ergebnisse bezüglich Deckschichtanbindung und Oberflächengüte.

Die Entkoppelung der Prozessschritte Aufheizen und Umformen der Sandwichmaterialien erlaubt eine simultane Durchführung beider Prozessschritte, wodurch eine deutliche Verkürzung der Taktzeiten, im Vergleich zur zyklischen Werkzeugtemperierung, ermöglicht wird. Des Weiteren ist durch die kontinuierliche Werkzeugtemperierung der spezifische Energiebedarf zur Bauteilherstellung deutlich niedriger. Aufgrund der zusätzlichen Maschinen und Anlagen und der höheren Anzahl an Handarbeitsschritten, verursacht durch die Beförderung der Sandwichmaterialien zwischen beiden Presseneinheiten, sind höhere Investitionen und Personalaufwendungen notwendig, wodurch sich die konstante Werkzeugtemperierung besonders für hohe Stückzahlen eignet.

Abbildung 6.5 zeigt die Herstellungsprozesskette eines komplex geformten Bauteils unter Verwendung einer Wabenpreform. Die Einlegevorrichtung (z.B. Blecheinleger) ermöglicht das Drapieren, Transportieren, Umformen und Entformen der Sandwichmaterialien. Im Gegensatz zum Aufheizen in der planen Presse werden die Sandwichmaterialien in einem Formwerkzeug umgeformt und aufgeheizt. Die Anbindung der Deckschicht an den Wabenkern wird durch Abkühlen und durch den Werkzeugnachdruck im kalten Formwerkzeug hergestellt.

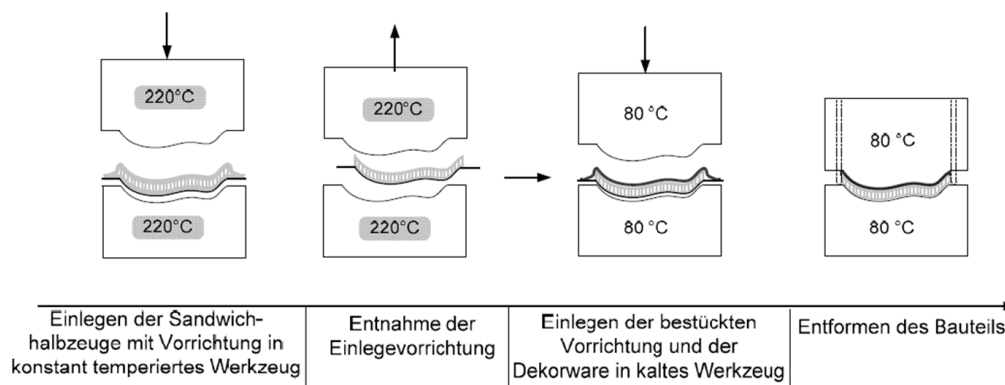


Abbildung 6.5: Sandwichbauteilherstellung mit konstanter Werkzeugtemperierung

6.2.4 Zusammenfassung

Tabelle 6.1 zeigt eine Gegenüberstellung der verschiedenen Herstellungsvarianten bezüglich Taktzeit und den damit verbundenen Stückzahlen. Die angegebenen Zykluszeiten setzen sich aus der Aufheizphase der Sandwichmaterialien und den Handlingzeiten zusammen. Die Dauer der Aufheizphase wurde aus Versuchsreihen mit den Sandwichmaterialien aus Kapitel 5 bestimmt. Die Handlingzeiten am Presswerkzeug sind mit jeweils 10 Sekunden für das Einlegen und Entnehmen der Sandwichmaterialien nach [AK00] berücksichtigt. Insbesondere bei der zyklischen Werkzeugtemperierung ist die Anordnung bzw. die Effektivität der verwendeten Kühl- und Heizsysteme bzw. die Wärmeleitung des verwendeten Werkzeugmaterials von hoher Relevanz, wodurch die angeführten Werte nur als Richt- und Vergleichsgrößen betrachtet werden können.

Tabelle 6.1: Gegenüberstellung der Herstellungsvarianten

Herstellungs-variante	Taktzeit [s]	max. Stückzahl*	Anzahl Arbeiter	Anmerkung
Preformherstellung	60	102 000	1	Vorgelagerter Prozessschritt für komplexe Bauteilgeometrien
Zyklische Temperierung	900	6 800	2	Hoher Energieaufwand, Kleinserien und Prototypen
Kontinuierliche Temperierung	70	87 429	4	Hohe Investitionskosten und Personalaufwendungen, hohe Stückzahlen

* Prämisse: Ein-Schichtbetrieb, 8 h, 250 Arbeitstage, 85 % Auslastung

Die kurzen Taktzeiten der kontinuierlichen im Vergleich zur zyklischen Temperierung ermöglichen die Fertigung hoher Stückzahlen, wodurch sich insbesondere die kontinuierliche Werkzeugtemperierung zur Großserienfertigung eignet. Die Anzahl der benötigten Arbeiter ist bei der kontinuierlichen Werkzeugtemperierung aufgrund der höheren Anzahl an Handarbeitsschritten und kürzeren Zykluszeiten im Vergleich zur zyklischen Temperierung höher abgeschätzt. Die besten Versuchsergebnisse bzgl. Oberflächengüte, Taktzeit und Deckschichtanbindung wurden durch konduktives Erwärmen der Sandwichverbundmaterialien erreicht.

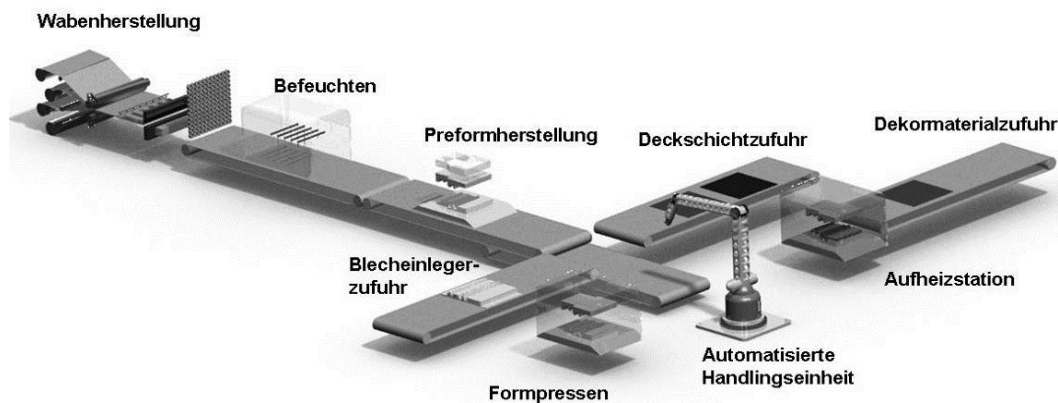


Abbildung 6.6: Schematische Darstellung eines teilautomatisierten Fertigungsprozesses

Abbildung 6.6 zeigt eine mögliche teilautomatisierte Fertigung mit Preformherstellung des Wabenkerns und automatisierter Bestückung der Blecheinleger unter Verwendung eines Industrieroboters.

6.3 Werkzeugkonzepte

Die werkzeugtechnische Lösung zur Herstellung eines dreidimensional geformten Sandwichverbundbauteils wird in der Patentschrift [P-BR10] durch sequentielle Umformung der Verbundmaterialien beschrieben. Hierbei werden einzelne Zonen durch Werkzeugschieber nacheinander umgeformt, wodurch zum einen das Nachfließen der Wabe ermöglicht wird und zum anderen die durch die Umformung entstandenen Deckschichtfalten an der Oberfläche komprimiert werden.

In diesem Kapitel werden zwei davon abweichende Werkzeugkonzepte zur Herstellung von Sandwichbauteilen mit PP/GF-Hybridvliesdeckschichten und Papierwabenkern exemplarisch an konturierten Fahrzeuginterieurbauteilen vorgestellt. Bei der Bauteilgestaltung wurden die ermittelten konstruktiven Richtgrößen zur Umformung von trockenen Papierwaben aus Kapitel 4.2 berücksichtigt. Beide Werkzeugvarianten ermöglichen eine in situ Bauteilfertigung durch Umformung der Sandwichverbundmaterialien, Konsolidierung der Deckschichten, Verbindungsherstellung zwischen Deckschicht und Kernstruktur sowie Beschnitt des Sandwichbauteils. Bei den zwei dargestellten Konzepten wird zwischen weggesteuertem und kraftgesteuertem Werkzeugschließvorgang unterschieden. Der weggesteuerte Werkzeugschließvorgang ermöglicht eine werkzeugintegrierte Kaschierung auch bei Verwendung von dünnen Dekormaterialien ohne Abzeichnungen der Wabenstruktur auf der Bauteiloberfläche. Bei der Auslegung des Presswerkzeugs mit kraftgesteuertem Werkzeugschließvorgang ist der Fokus auf eine hohe Konsolidierung der hybriden textilen Deckschichten gerichtet.

6.3.1 Werkzeugkonzept mit weggesteuertem Werkzeugschließvorgang

Das Werkzeugkonzept mit weggesteuertem Werkzeugschließvorgang gestattet auch bei Verwendung von dünnen Dekormaterialien - aufgrund des konstanten Abstands der Werkzeughälften - eine in situ Kaschierung im Formwerkzeug. Der konstante Werkzeugspalt ermöglicht eine gleichbleibend niedrige Konsolidierung der Deckschichten, wodurch Abzeichnungen der Papierwaben auf der textilen Dekorware vermieden werden.

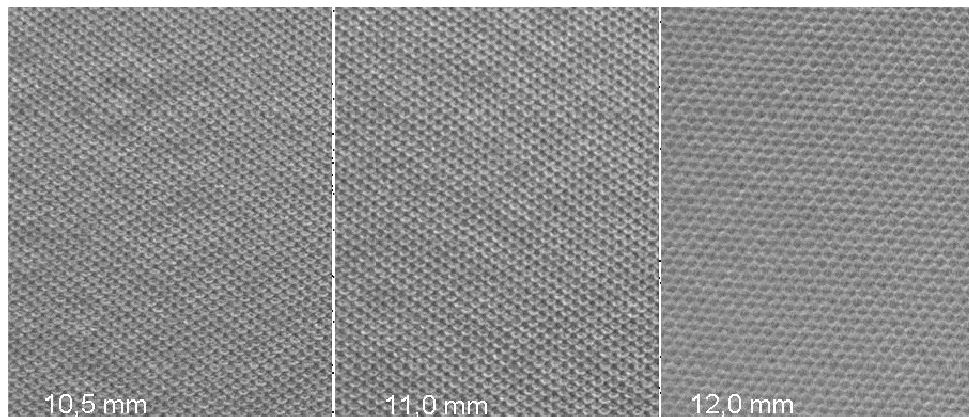


Abbildung 6.7: Oberflächengüte in Abhängigkeit des Werkzeugspaltes

Abbildung 6.7 zeigt den identischen Sandwichaufbau bestehend aus Wellstegwabenkern A ~ TL -115 WG mit einer Kernhöhe 9,5 mm und PP/GF-Nadelvliesdeckschichten mit einem Flächengewicht von 400 g/m² und einem Fasermassenanteil von 40 Prozent. Nach dem Aufheizen der Sandwichmaterialien wurde als Dekorware ein PES-Rundstrickttextil (140 g/m²) mit verklebten PES-Wasserstrahlvlies (100 g/m²) auf der oberliegenden Deckschicht aufgelegt und mit dem Sandwichverbund auf 10,5 mm, 11 mm und 12 mm verpresst. Die Oberflächenaufnahmen zeigen, dass bei geringem Werkzeugspalt Abzeichnungen des Wabenkerns auf der Dekorware zu erkennen sind. Mit zunehmendem Werkzeugspalt findet eine Verbesserung der Oberflächenqualität durch die abnehmende Konsolidierung der Deckschichten statt. Aufgrund der gering konsolidier-

ten, porösen Deckschichtstruktur verringert sich während des Pressvorgangs die Kraftübertragung von den Wabenstegen auf das Dekormaterial, wodurch Wabenstrukturabzeichnungen vermieden werden. Abbildung 6.8 zeigt einen schematischen Aufbau eines Werkzeugs zur Herstellung einer Hutablage mit weggesteuertem Werkzeugschließvorgang. Der Randabschluss des Bauteils wird über Pinchkanten hergestellt. Hierbei wird ein hoher Druck über werkzeugintegrierte Kanten lokal auf das Sandwichverbundmaterial eingebracht, wodurch die Materialtrennung und somit der Bauteilbeschnitt erfolgt.

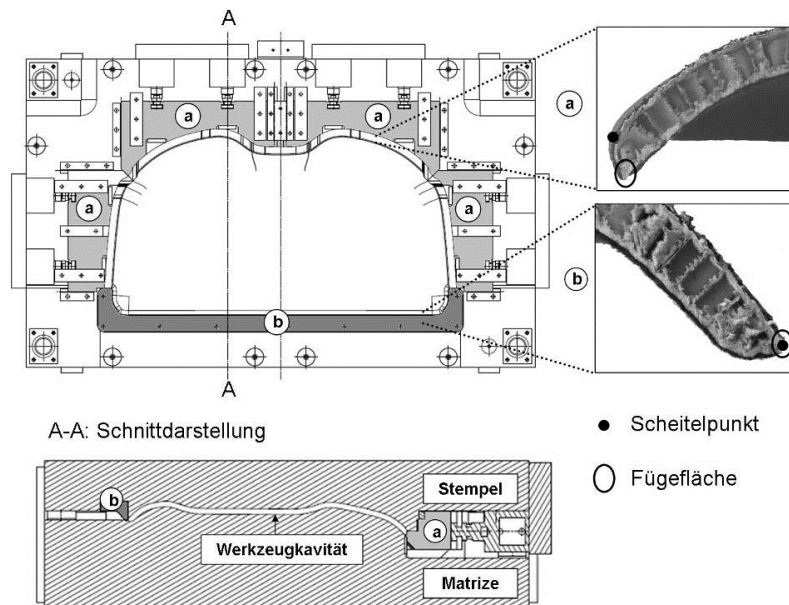


Abbildung 6.8: Schematischer Werkzeugaufbau mit weggesteuertem Werkzeugschließvorgang

Der Randabschluss des Sandwichbauteils dient zum einem als Feuchtigkeits- und Wassersperre, wodurch mechanische Beeinträchtigungen des Sandwichverbundes vermieden werden, und zum anderen schützt der Randabschluss beim Kantenaufprall vor Abschälung der Deckschichten. Die Pinchkanten (a) sind in horizontal geführten Werkzeugschiebern integriert. Die hydraulische Verstellung der Schieber ermöglicht ein Nachfließen des Papierwabenkerns während des Umformvorgangs. Nach abgeschlossener Materialumformung werden die Schieber geschlossen, sodass die Pinchkante die Deckschichten zusammenführt und unter Druckeinwirkung beschneidet. Die horizontale Bewegungsrichtung des Werkzeugschiebers erlaubt eine Verlagerung der Deckschichtfügefläche vom Scheitelpunkt der Bauteilkontur, wodurch die Fügeebene an einen optisch weniger relevanten Bereich versetzt werden kann. Hingegen zeigt die im Werkzeugstempel integrierte Pinchkante (b) aufgrund ihrer vertikalen Bewegungsrichtung eine Übereinstimmung zwischen Deckschichtfügefläche und Scheitelpunkt der Bauteilkontur auf. Weitere konstruktive Gestaltungsmöglichkeiten der Randabschlüsse von Sandwichplatten werden in [BI97, KM03] beschrieben.

6.3.2 Werkzeugkonzept mit kraftgesteuertem Werkzeugschließvorgang

Beim kraftgesteuerten Werkzeugkonzept wird im Gegensatz zum weggesteuerten die Konsolidierung der textilen Deckschichten nicht durch den konstanten Abstand der Werkzeughälften definiert, sondern durch den wirkenden Druck auf den Sandwichverbund. Die beaufschlagte Flächenlast bewirkt eine Steigerung der mechanischen Sandwichverbundeigenschaften durch eine erhöhte Deckschichtkonsolidierung. Des Weiteren werden Dickenschwankungen der Papierwaben und der Deckschichtmaterialien durch die druckgesteuerte Anpassung der Bauteilhöhe ausgeglichen. Bei einem Übermaß der Waben kann hierdurch Zellwandknittern ausgeschlossen werden. Abbildung 6.9 zeigt den Aufbau eines kraftgesteuerten Pressenwerkzeugs zur Herstellung einer Fahrzeuginterieurverkleidung.

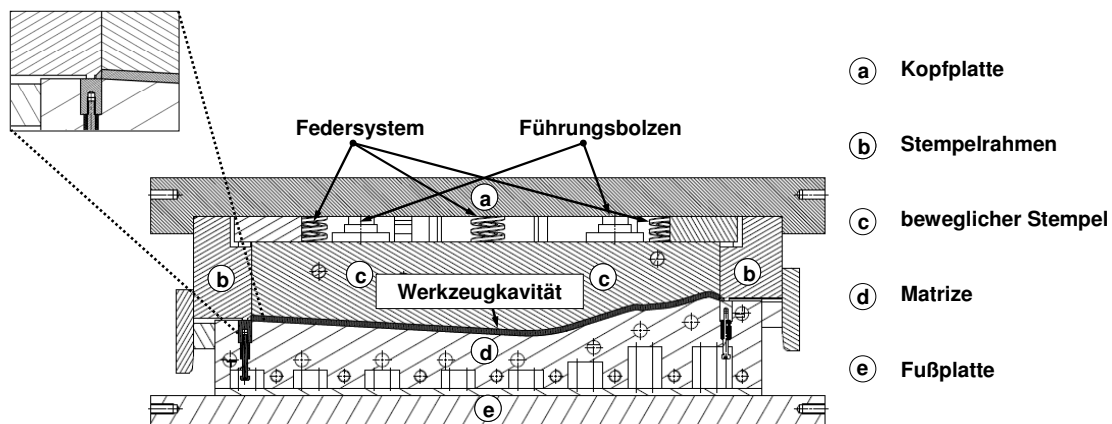


Abbildung 6.9: Schematischer Werkzeugaufbau mit kraftgesteuertem Werkzeugschließvorgang

Der bewegliche Stempel (c) liegt auf dem Stempelrahmen (b) auf, welcher mit der Kopfplatte (a) starr verbunden ist. Die Bolzen zwischen beweglichem Stempel und Kopfplatte ermöglichen die vertikale Führung der Stempereinheit. Der Stempelrahmen ist umlaufend mit einer Pinchkante versehen. Beim Auftreffen des beweglichen Stempels auf den Sandwichverbund wird durch das vorgespannte Federsystem die Druckkraft flächig auf das Verbundmaterial eingeleitet. Der fortschreitende Werkzeugschließvorgang bewirkt im Bereich des beweglichen Stempels einen Druckkraftanstieg durch die zunehmende Federstauchung. Im Bereich des Stempelrahmens knittern die Wabenzellen am Bauteilrand vollkommen zusammen, bis die Pinchkante durch den hohen Druck das verblockte Sandwichverbundmaterial beschneidet.

Bei Auslegung des Federsystems muss berücksichtigt werden, dass der wirkende Stempeldruck p_{ST} die Druckfestigkeit der Papierwabe nicht übersteigt. Die Wabendruckfestigkeit kann aus Näherungsgleichung (3.19) bestimmt oder für die untersuchten Wabenkerne aus Anhang Kapitel 3 entnommen werden.

$$p_{ST} \leq \sigma_{C_{33}} \quad (6.1)$$

Unter Berücksichtigung der projizierten Fläche A_{pr} des Sandwichbauteils und der Wabendruckfestigkeit lässt sich die Maximalkraft des beweglichen Stempels auf den Sandwichverbund durch nachstehende Gleichung bestimmen.

$$F_{ST_{max}} \leq A_{pr} \cdot \sigma_{C_{33}} \quad (6.2)$$

Die auf die Fläche wirkende Stempelkraft F_{ST} setzt sich aus Gewichtskraft des beweglichen Stempels G_{ST} und der Summe der einzelnen wirkenden Federkräfte F_F zusammen.

$$F_{ST} = G_{ST} + \sum F_F \quad (6.3)$$

Unter Annahme des proportionalen Verhaltens zwischen Federkraft und Federauslenkung ΔL_F kann die Anzahl der Federn, die Wahl der Federkonstante D_F sowie die erforderliche Federauslenkung berechnet werden.

$$\sum_{j=1}^n D_{F_j} \cdot \Delta L_{F_j} = F_{ST} - G_{ST} \quad (6.4)$$

Für die mechanische Beanspruchung des Wabenkerns kann der Quotient aus wirkendem Stempeldruck und Wabendruckfestigkeit als Bewertungsgröße der Wabekernbeanspruchung betrachtet werden (siehe Gl. (6.5)). Hierbei entspricht ein Druckverhältnis von eins der theoretisch maximalen Druckbeanspruchung des Wabenkerns, wobei eine Beanspruchung größer als eins zu einem Versagen der Kernstruktur führt.

$$\eta_D = \frac{p_{ST}}{\sigma_{C_{33}}} \quad (6.5)$$

6.3.3 Zusammenfassung

Die Eigenschaften beider betrachteten Werkzeugkonzepte sind in Tabelle 6.2 zusammengefasst. Hierbei wird insbesondere der Einsatz des kraftgesteuerten Werkzeugkonzeptes zur Herstellung von Bauteilen mit hohen mechanischen Anforderungen empfohlen. Das weggesteuerte Werkzeugkonzept zeichnet sich hingegen durch die in situ Kaschierung, ermöglicht durch die niedrige Deckschichtkonsolidierung, aus.

Tabelle 6.2: Gegenüberstellung der Werkzeugkonzepte

Weggesteuerter WZ-Schließvorgang	Kraftgesteuerter WZ-Schließvorgang
<ul style="list-style-type: none"> • Niedrige Werkzeugkomplexität 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Werkzeugkomplexität
<ul style="list-style-type: none"> • In situ Bauteilherstellung und -kaschierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhte Deckschichtanbindung
<ul style="list-style-type: none"> • Verlagerung der Deckschichtfügefläche vom Scheitelpunkt der Bauteilkontur möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Höhere Deckschichtkonsolidierung
<ul style="list-style-type: none"> • Werkzeugauslegung unabhängig von Druckfestigkeit der Papierwabe 	<ul style="list-style-type: none"> • Ausgleich von Materialschwankungen
<ul style="list-style-type: none"> • Werkzeugintegrierter Bauteilbeschnitt 	

6.4 Bauteilumsetzung

Abbildung 6.10 zeigt eine Hutablage hergestellt aus C ~ TL-90 WG mit 9 mm Wabendicke und PP/GF-Nadelvliesdeckschichten mit einem Flächengewicht von 400 g/m² und 40-prozentigem Glasfasermassenanteil. Zur Steigerung der Deckschichtanbindung wurde als Zwischenlage, wie in Kapitel 5.2.2.2 beschrieben, eine PP-Folie mit einer Stärke von 0,1 mm eingelegt. Die Bauteilherstellung erfolgte bei konstanter Werkzeug- und Pressentemperatur (siehe Abbildung 6.4) und einem Formwerkzeug mit weggesteuertem Werkzeugschließvorgang, wie in Abbildung 6.8 dargestellt. Auf den aufgeheizten Sandwichträger wurde auf der Bauteilvorderseite als Dekorware ein PES-Rundstrickt extil (140 g/m²) mit einem verklebten PES-Wasserstrahlvlies (100 g/m²) aufgebracht. Für die Bauteilrückseite wurde ein PES-Wasserstrahlvlies (100 g/m²) in das Formwerkzeug eingelegt.



Abbildung 6.10: Sandwichhutablage mit weggesteuertem Werkzeugschließvorgang

Wie in Abbildung 6.10 zu sehen, konnten Abzeichnungen des Wabenkerns auf der Bauteiloberfläche durch den weggesteuerten Werkzeugschließvorgang vermieden werden. Im Anhang Kapitel 6 ist ein Querschnitt einer weiteren hergestellten Sandwichhutablage mit einer A ~ TL-90 WG, einem Nadelvlies aus Recyclingfasern und einer Schaumzwischenlage hinterlegt. Das hergestellte Bauteil aus Sekundärfasern zeigte bei den mechanischen und optischen Untersuchungen nahezu dieselben Eigenschaften auf, wie die aus Primärfasern hergestellte Hutablage. Wie in Kapitel 8 vorgestellt, ermöglicht der Einsatz von Sekundärfasern neben ökonomischen auch ökologische Vorteile.



Abbildung 6.11: Verkleidungsteil mit kraftgesteuertem Werkzeugschließvorgang

Abbildung 6.11 zeigt ein Fahrzeuginterieurverkleidungsteil mit einem Sandwichträger bestehend aus Hexagonalwaben TL-150 WG mit einer Wabendicke von 6 mm und PP/GF-Hybridnadelvliesdeckschichten mit einem Flächengewicht von 400 g/m² (40 % Fasermassenanteil) sowie einer PP-Folie mit einer Dicke von 0,1 mm. Das Bauteil wurde, wie in Abbildung 6.3 dargestellt, mit einer zyklischen Werkzeugtemperierung und kraftgesteuertem Werkzeugschließvorgang hergestellt (siehe Abbildung 6.9). Die Bauteilherstellung erfolgte bei einer wirkenden Stempelkraft von 14 kN, was einem Druckverhältnis von $\eta_D = 0,12$ entspricht. Bei den Untersuchungen wurde kein Zellwandknittern durch die Druckbeanspruchung festgestellt. Durch die anschließende manuelle Kaschierung konnten Wabenabzeichnungen der Deckschichtoberfläche kaschiert werden.

6.5 Grundlagenuntersuchungen zum Fügen durch Reibschweißen

Untersuchungen bzw. Konstruktionsrichtlinien für das Fügen von Sandwichplatten durch Nieten, Schrauben und Kleben werden in verschiedenen Publikationen [ZE97, BI97] vorgestellt. Hingegen sind Veröffentlichungen über das Schweißverhalten von Sandwichbauteilen mit thermoplastischen faserverstärkten Deckschichten und Papierwabenkernen nicht bekannt.

Thermoplaste lassen sich durch Zuführung von Wärmeenergie in den plastischen Zustand überführen und können durch Beaufschlagung von Druck an den Kontaktflächen miteinander gefügt werden, was einen Vorteil gegenüber duroplastischen Matrices darstellt. In [DIN 1910] werden folgende Verfahren zum Schweißen von thermoplastischen Kunststoffen angeführt:

- Warmgasschweißen
- Heizelementschweißen
- Hochfrequenzschweißen
- Ultraschallschweißen
- Reibschweißen
- Lichtstrahlschweißen

Das Fügen durch Reibschweißen, von zum Beispiel Kunststoffretainern an faserverstärkten thermoplastischen Verkleidungsteilen, ist eine etablierte Schweißtechnologie in der Automobilindustrie. In [SC08] werden die kurze Zykluszeit, die Energieeffizienz, die hohe Reproduzierbarkeit und die Eignung für das Fügen von großen und zahlreichen Bauteilen als Vorteile des Reibschweißens aufgezählt.

Beim linearen Vibrationsschweißen werden durch oszillierende Relativbewegungen zwei Werkstücke unter definiertem Druck gegeneinander gerieben bis die Kontaktflächen in den plastischen Zustand überführt sind und das Abkühlen der Schmelze eine stoffschlüssige Verbindung herstellt [SC08]. Die beschränkte Druckfestigkeit des Papierwabenkerns sowie die dünne Deckschicht stellen die Herausforderung bezüglich der Eignung des Reibschweißens für den betrachteten Sandwichverbund dar.

6.5.1 Versuchsdurchführung

Die Herstellung der Versuchsmaterialien erfolgte wie in Kapitel 5.2.1.1 beschrieben. Der Wellstegwabenkern A ~ TL-115 WG mit einer Höhe von 9 mm wurde mit PP/GF-Nadelvliesen mit einem Flächengewicht von 300 g/m² und einem Fasermassenanteil von 40 Prozent verpresst. Zur Verbesserung der Anbindung zwischen Papierwabe und Deckschicht sind Polypropylenfolien mit Dicken von 0,1 mm als Zwischenlage eingelegt worden. Zur Bewertung des Einflusses des Matrixanteils wurden ebenfalls Sandwichaufbauten mit einer zusätzlichen Polypropylenfolie als Decklage untersucht. Die zwei dargestellten Varianten sind in Tabelle 6.3 angeführt. Die Sandwichproben wurden auf eine quadratische Fläche mit der Kantenlänge von 80 mm zugeschnitten und mit der Aufstandsfläche (B x H: 10 x 80 mm²) des unverstärkten Polypropylenfügeteils verschweißt (siehe Abbildung 6.12).

Tabelle 6.3: Sandwichkonfigurationen der Schweißproben

Deckschichtvarianten der Sandwichproben		
Variante	Deckschichtaufbau (von innen nach außen)	Vibrationszeit [s]
Typ 1	0,1 mm PP-Folie; PP/GF Nadelvlies	4
Typ 2	0,1 mm PP-Folie; PP/GF-Nadelvlies; 0,1 mm PP-Folie	6

Die Schweißversuche erfolgten an einer Vibrationsschweißmaschine K 3217 der Firma Bielomatik, wobei eine Amplitude von 1 mm und eine Schweißfrequenz von ca. 220 Hz bei den Versuchsdurchführungen verwendet wurden. Vorversuche zeigten, dass zur Vermeidung eines lokalen Eindrucks des Wabenkerns ein Schweißdruck deutlich unterhalb der Druckfestigkeit zu wählen ist. Grund hierfür ist die Überlagerung von induzierter Normal- und Schubkraft, verursacht durch die oszillierenden Relativbewegungen. Bei einem Schweißdruck von 0,375 MPa, bezogen auf die Schweißfläche, konnte ein lokaler Eindruck vermieden werden.

Bei den Probekörpern mit Polypropylendecklage wurde nach einer Vibrationszeit von sechs Sekunden eine Verbindung zwischen den zu fügenden Teilen hergestellt. Hingegen wurde durch die abrasive Oberfläche der Probekörper mit reiner PP/GF-Decklage bereits nach vier Sekunden Vibrationszeit eine Verschweißung festgestellt. Unter konstant bleibendem Druck und einer Haltezeit von acht Sekunden kühlten die Proben im Aufnahmewerkzeug ab.

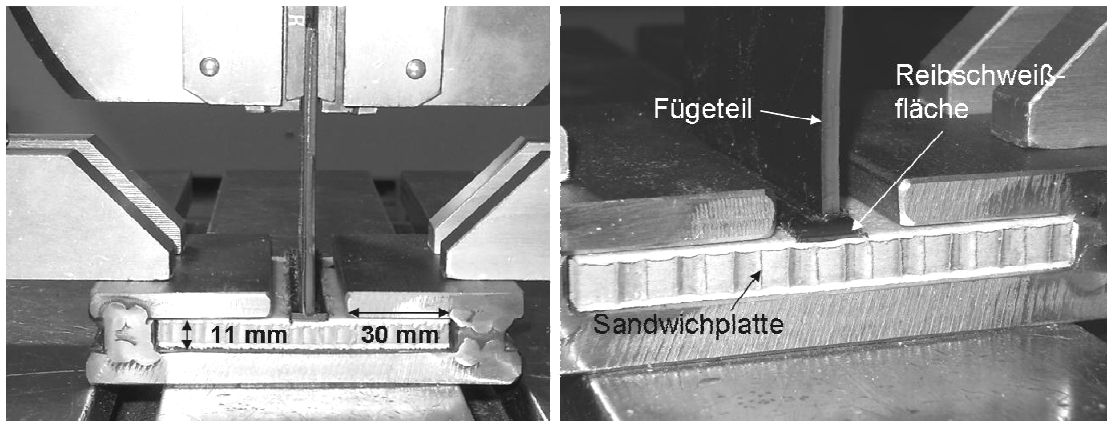


Abbildung 6.12: Einspannvorrichtung zur Bestimmung der Auszugskräfte

Der Versuchsaufbau zur Bestimmung der Auszugskräfte ist in Abbildung 6.12 dargestellt. Durch die Probenaufnahme wurde gewährleistet, dass die Zugkraft senkrecht zur Reibschweißfläche eingeleitet wird. In Tabelle 6.4 sind die Versuchsparameter der quasistatischen Auszugsversuche dargestellt.

Tabelle 6.4: Versuchsparameter der Auszugsversuche

Auszugsversuch	
Prüfmaschine	Zugprüfmaschine
Prüfvorrichtung	siehe Abbildung 6.12
Abmaße Prüfkörper L x B [mm]	80 x 80
Prüfgeschwindigkeit	25 mm/min
Vorspannkraft	0,5 N
Klima	Raumklima

6.5.2 Ergebnisdarstellung

Abbildung 6.13 zeigt Mikroskopieaufnahmen der zwei gefügten Sandwichvarianten eingebettet in Harz. Im Vergleich zur rechten Abbildung ist in der linken ein deutlich höherer Abtrag der Deckschicht an der Fügestelle zu erkennen. Die Vergrößerung des Typ 1 (nach Tabelle 6.3) zeigt durch die gräuliche Färbung der Schweißzone und der Glasfasern innerhalb des dunklen Bereichs eine Vermengung des Polypropylens aus der Deckschicht und dem Fügeteil. Das abrasive Verhalten der Glasfasern an der Oberfläche ist ebenso durch den Kantenabtrag des Fügeteils zu erkennen. Aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit von Typ 1 und der damit verbundenen höheren Schubbelastungen der Papierwabe ist ein geringes Knicken der Wabenzellwände unterhalb der Fügefläche festzustellen.

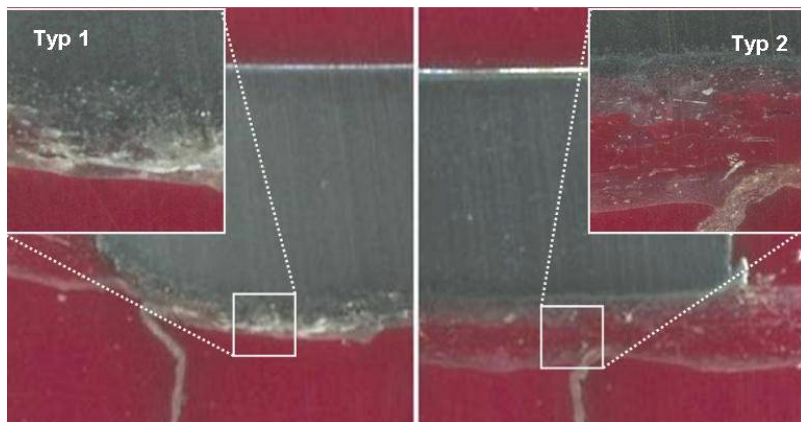


Abbildung 6.13: Mikroskopieaufnahme Reibschweißverbindung

Trotz längerer Vibrationszeit ist in der rechten Hälfte der Abbildung die Polypropylenfolie zur Erhöhung der Deckschichtanbindung, das semi-konsolidierte Nadelvlies, die Polypropylendecklage und ein deutlich geringerer Abtrag unterhalb des Fügeparts zu erkennen. Der Lagenaufbau der Deckschicht wurde durch die Schweißung nahezu nicht verändert. Aufgrund der glatten Polypropylenoberfläche ist der Schmelzbereich zwischen Deckschicht und Fügepart sowie der Schmelzaustritt in der Randzone im Vergleich zu Typ 1 deutlich geringer ausgeprägt. Beide Varianten zeigen keine Beschädigungen der Deckschichten in Form von Löchern auf.

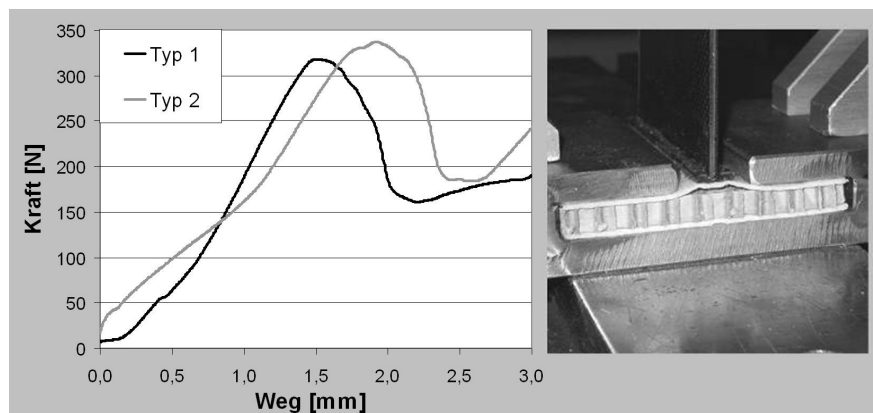


Abbildung 6.14: Kraft-Weg-Verlauf des Auszugsversuchs an vibrationsgeschweißten Proben

Abbildung 6.14 zeigt den Kraft-Weg-Verlauf der Auszugsversuche. Die Ergebnisse veranschaulichen, dass der Kraftfluss vom Fügepart zum Sandwich nicht durch mangelnde Schweißnahtqualität sondern durch Ablösung der Deckschicht vom Wabenkern unterbrochen wird. Wie im Diagramm zu sehen, liegt die maximale Abzugskraft beider untersuchten Proben bei ca. 330 N.

6.5.3 Zusammenfassung

Durch die Versuchsreihen konnte nachgewiesen werden, dass eine Vibrationsschweißverbindung von Polypropylenträgern mit Sandwichbauteilen aus Papierwabenkern und faserverstärkten Polypropylendeckschichten herstellbar ist. Wegen der begrenzten Druckfestigkeit des Wabenkerns sind niedrige Schweißdrücke zu wählen beziehungsweise Wabenkerne mit hoher Druck- und

Schubfestigkeit zu bevorzugen. Die Auszugsversuche zeigten, dass das Versagen durch Deckschichtablösung und nicht durch mangelnde Schweißqualität hervorgerufen wird. Die Vermengung des Polypropylens aus Deckschicht und Füge­teil des Typ 1 (siehe Abbildung 6.13) lässt auf eine höhere Schweißqualität im Vergleich zum Typ 2 schließen, was allerdings durch die Auszugsversuche aufgrund der Deckschichtablösung nicht bestätigt werden konnte. Untersuchungen zur Prozessoptimierung bezüglich Amplitudenweg, Anpressdruck und Einflussanalysen auf die Schweißqualität verschiedener Dekormaterialien sind im Rahmen der Versuche nicht durchgeführt worden.

7 Umgebungsbedingtes Werkstoffverhalten des Sandwichverbundes

In diesem Kapitel wird die Veränderung des Sandwichverbundes, wie die Degradation der mechanischen Kennwerte, verursacht durch Tropenklimalagerung, untersucht. Des Weiteren wird das Brennverhalten nach standardisierten Richtlinien bewertet, sowie die thermische Isolationseigenschaft des Sandwichverbundes analysiert.

7.1 Tropenklimasimulation

Die Umweltsimulation bei verschiedenen Bewitterungen ist eine Methode zur Absicherung der Werkstoffbeständigkeit. Aufgrund der hygroskopischen Eigenschaft des Papiers wird in diesem Kapitel die Wasseraufnahme und die damit verbundene Degradation der mechanischen Materialeigenschaften der Sandwichverbunde nach der Tropenklimalagerung untersucht.

Analysen des Verhaltens von Wellpappe unter Beaufschlagung von Feuchtigkeit wurden von Allaoui, Aboura und Benzeggagh in [AL05, AL07] vorgestellt. Der Abbau der mechanischen Materialeigenschaften des Papiers [HA05] sowie präventive Maßnahmen zum Schutz vor Feuchtigkeit, z. B. durch Imprägnierung der Papierwabe, werden in [PO09] vorgestellt. Untersuchungen bezüglich der Beeinträchtigung durch Feuchtigkeit eines Sandwichverbundes, bestehend aus Papierwabenkern und thermoplastischen faserverstärkten Deckschichten, sind hingegen nicht bekannt.

7.1.1 Versuchsdurchführung

Die Herstellung der Materialproben erfolgte, wie in 5.2.1.1 beschrieben, durch Aufheizen des Sandwichverbundes und anschließendes Formpressen in der kalten Kavität. Zum Schutz vor direkter Feuchtigkeitsaufnahme der Papierwabe wurden die Sandwichprüfplatten durch das Presswerkzeug mit einem Randverschluss, wie in

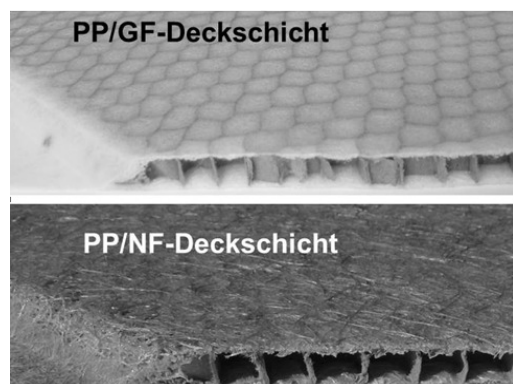


Abbildung 7.1: Klimasandwichplatten

Abbildung 7.1 ersichtlich, versehen. Betrachtet wurden Sandwichverbunde mit PP/GF-Deckschichten mit Flächengewichten von 200 bis 400 g/m² sowie PP/NF-Deckschichten mit 400 g/m². Die Hexagonalwabe Hex TL 150-WG mit einer Wabendicke von 9 mm bildete bei allen Sandwichverbunden das Kernmaterial. Die zu untersuchenden Proben besitzen eine quadratische Grundfläche mit einer Kantenlänge von 400 mm. Vor der Klimalagerung sind die Prüfplatten bei Normklima drei Tage

vorkonditioniert worden. Zur Bestimmung der zeitabhängigen Feuchtigkeitsaufnahme wurde je eine Probenplatte im Klimaprüfstand bei einer Temperatur von 40 °C und einer Luftfeuchtigkeit von 90 % gelagert und die Massenzunahme bis zum 21. Lagerungstag bestimmt. Zur Bewertung

der mechanischen Beeinträchtigung wurden aus den klimakonditionierten Prüfplatten Drei-Punkt-Biegeproben, angelehnt an [DIN EN ISO 178], präpariert. Beim Drei-Punkt-Biegeversuch findet im Vergleich zum Vier-Punkt-Biegeversuch, aufgrund der höheren Druckbeanspruchung der Sandwichproben, eine stärkere Beanspruchung des mit Feuchtigkeit beaufschlagten Papierwabenkerns statt. Die Versuchsparameter des Biegeversuchs sind in Tabelle 7.1 angegeben.

Tabelle 7.1: Versuchsparameter zur Bestimmung der Materialdegradation nach Tropenklimalagerung

3-Punkt-Biegeversuch	
Prüfvorschrift	angelehnt an DIN EN ISO 178
Abmaße Prüfkörper [mm]	L x B: 170 x 50
Prüfgeschwindigkeit	10 mm/min
Prüfklima	Normklima
Stützweite	130 mm
Vorkraft	0,5 N
Probenanzahl je Versuchsreihe	3
Durchmesser Druckfinne; Auflager	12,5 mm

Nahezu alle untersuchten Sandwichprüfkörper versagten mittig unter der Druckfinne durch lokalen Eindruck des Wabenkerns.

7.1.2 Ergebnisdarstellung

Die Massenzunahme der untersuchten Sandwichverbunde ist in Abhängigkeit der Zeit in Abbildung 7.2 dargestellt. Nach einer Lagerung von einem Tag ist eine deutliche Gewichtszunahme ersichtlich, wobei ein sättigungsähnlicher Zustand nach zwei Tagen zu erkennen ist. Optische Veränderungen bzw. Verzug der Sandwichplatten wurden nach der Klimalagerung nicht festgestellt. Aufgrund der geringen relativen Massenzunahme der Sandwichverbunde, die sich im Flächengewicht und im Faseranteil der Deckschichten unterscheiden, kann keine Beeinflussung durch die betrachteten Deckschichtparameter festgestellt werden. Sandwichverbunde mit PP/NF-Deckschichten zeigen wegen der hygroskopischen Eigenschaft der Sisalfasern deutlich höhere Massenzunahmen im Vergleich zu den PP/GF-Deckschichten. Die Schwankungen der Messergebnisse sind zum einen auf die Trocknung der Proben während der Wiegung zurückzuführen und zum anderen auf den Niederschlag des Kondenswassers auf der Probenoberfläche.

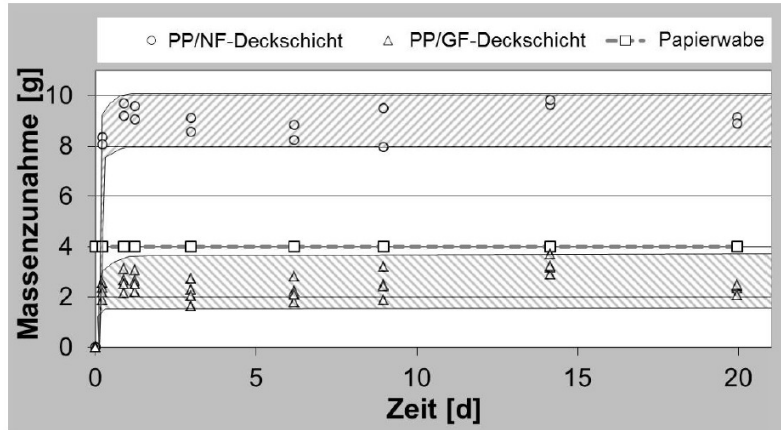
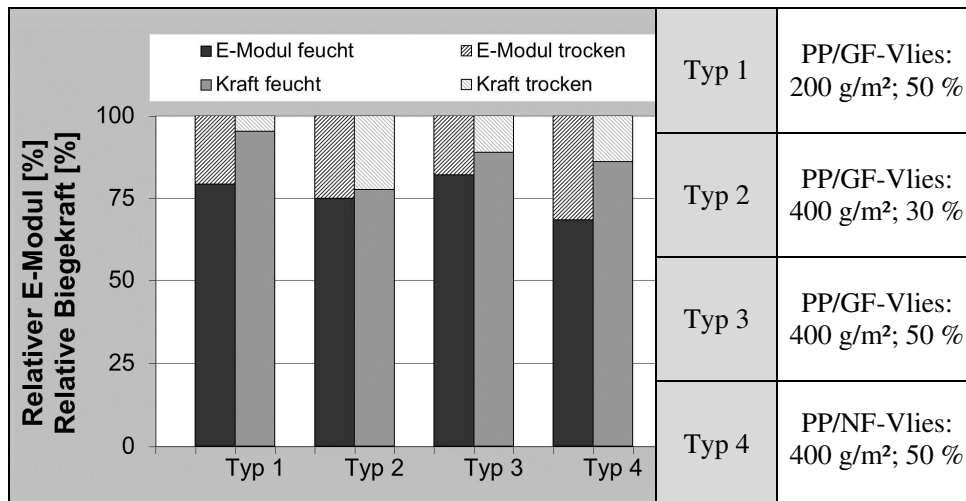


Abbildung 7.2: Massenzunahme in Abhängigkeit der Zeit während Tropenklimalagerung

Die Klimakonditionierung der reinen Papierwabe führte zu einer Erhöhung des Probengewichts von ca. 6,5 Prozent, was einer Massenzunahme bezogen auf die Fläche einer Probenplatte von 4 Gramm entspricht. Unter Berücksichtigung der Ausgangsfeuchtigkeit des Wabenkerns von ca. 5,5 % bei Normklimalagerung, wie in Kapitel 6.1 aufgezeigt, ist von einer absoluten Feuchtigkeit des Wabenkerns von ca. 12,5 %, durch Konditionierung bei 40 °C und 90 % Luftfeuchtigkeit, auszugehen. Ein Schutz der PP/GF-Deckschichten gegen die Feuchtigkeitsdurchdringung ist in Abbildung 7.2 anhand der geringeren Massenzunahme im Vergleich zur reinen Papierwabe zu erkennen. Im Gegensatz hierzu zeigen die untersuchten Sandwichplatten mit PP/NF-Deckschichten eine deutlich höhere Massenzunahme im Vergleich zur reinen Papierwabe, weshalb ein Schutz des Papierwabenkerns durch die PP/NF-Deckschichten nicht nachzuweisen ist. Tabelle 7.2 zeigt die prozentuale Beeinträchtigung der maximalen Biegekraft und des E-Moduls verursacht durch die Tropenklimalagerung. Die zugrundeliegenden Kennwerte sind im Anhang Kapitel 7 hinterlegt.

Tabelle 7.2: Mechanische Degradation der Sandwichverbunde nach Tropenklimalagerung



Die Ergebnisse zeigen, dass die Tropenklimalagerung zur Beeinträchtigung der Sandwichsteifigkeit und -festigkeit führt. Im Durchschnitt ist eine Degradation des Elastizitätsmoduls von 23 und

der maximalen Biegekraft von 17 Prozent zu erkennen. Die erhöhte Feuchtigkeit der Kernstruktur verringert, wie in [AL05] gezeigt, die mechanischen Eigenschaften des Papiers, wodurch niedrigere Schub- und Druckbelastungen während der Biegebeanspruchung aufgenommen werden können. Wie in [PO09] dargestellt, führt eine erhöhte Feuchtigkeit zu einer Reduzierung der maximalen Druckkraft der Papierwabe. Beim Drei-Punkt-Biegeversuch führte dies zum frühzeitigen Versagen durch lokale Intrusion des Wabenkerns unterhalb der Druckfinne. Die Beeinträchtigung des Elastizitätsmoduls des Sandwichverbundes ist auf die verringerte Papiersteifigkeit des Wabenkerns zurückzuführen. Aufgrund der hygroscopischen Eigenschaft der Naturfasern [WA05, DE10, SA90] ist bei den betrachteten PP/NF-Deckschichten ebenfalls von einer Minderung der Deckschichtsteifigkeit und -festigkeit auszugehen, wodurch die höhere Degradation des Typs 4 im Vergleich zum Typ 3 erklärt werden kann. Eine anschließende 4-tägige Trocknung des Typs 2 bei Normklima zeigt eine teilweise Erholung der mechanischen Kennwerte durch einen 6-prozentigen Anstieg des Elastizitätsmoduls und der maximalen Biegekraft. Im Rahmen der durchgeführten Versuchsreihe konnte keine vollkommene Regeneration der mechanischen Eigenschaften durch anschließende Lagerung im Normklima erzielt werden, was gegebenenfalls auf eine irreversible Beeinträchtigung des Papiers durch temporäres Auflösen der Wasserstoffbrücken zurückzuführen ist.

7.1.3 Zusammenfassung

Durch die Versuche konnte eine Feuchtigkeitsaufnahme der Sandwichverbunde bei einer Klimalagerung über 3 Wochen bei 40 °C und einer Luftfeuchtigkeit von 90 % nachgewiesen werden. Optische Veränderungen sowie Verzug der Proben wurden im Gegensatz zum Abbau der mechanischen Eigenschaften nicht festgestellt. Durch die Tropenklimalagerung konnte eine durchschnittliche Reduzierung des Elastizitätsmoduls von ca. 23 und der Biegekraft von ca. 17 Prozent festgestellt werden. Naturfaserverstärkte Kunststoffe finden beispielsweise trotz ihrer Neigung zur Wasseraufnahme und der damit verbundenen Quelleigenschaft Anwendung in der Automobilindustrie, wobei nach [SC09] eine Wasseraufnahme über drei Massenprozent nicht überstiegen werden darf. Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass bei allen Prüfplatten mit PP/GF-Deckschichten nach der Tropenklimalagerung die Massenzunahme unter diesen geforderten drei Prozent liegt.

7.2 Brennverhalten des Sandwichverbundes

Ein schnelles Abbrennen von Fahrzeuginterieurmaterialien ist zum Schutz der Insassen zu vermeiden und wird durch Richtlinien, wie zum Beispiel durch die „Federal Motor Vehicle Safety Standards and Regulations (FMVSS)“, vorgeschrieben. Das Brandverhalten von imprägnierten Papierwabenkernen wird in [PO09] untersucht. Hingegen sind Brenneigenschaften von Sandwichverbunden aus Papierwabenkern und thermoplastischen faserverstärkten Deckschichten nicht bekannt.

7.2.1 Versuchsdurchführung

Die Herstellung der Sandwichplatten erfolgte wie in Kapitel 5.2.1.1 beschrieben. Um Rückschlüsse auf das Brennverhalten der einzelnen Materialbestandteile zu ermöglichen, wurden die in Tabelle 7.3 angeführten Sandwichverbunde mit verschiedenen Fasermassenanteilen und Wabendicken untersucht.

Tabelle 7.3: Betrachtete Sandwichkonfigurationen bei der Bewertung des Brennverhaltens

Typ	Wabendicke [mm]	Nadelvliesdeckschicht	Folie (0,1 mm)
1	6	PP/GF-Vlies: 400 g/m ² ; 40 %	x
2	9		x
3			-
4		PP/GF-Vlies: 400 g/m ² ; 60 %	x

Die Sandwichplatten sind auf die Probengröße mit der Breite 100 und der Länge 355 mm zugeschnitten und über 48 Stunden bei Normklima vorkonditioniert worden. Die Längsrichtung der Proben entsprach der Expansionsrichtung der Hexagonalwabe. Die Versuchsdurchführung des Brennverhaltens erfolgte wie in [DIN 75200] und [FMVSS 302] beschrieben. Hierbei wurde die horizontal gelagerte Brandprobe einer 38 mm hohen Gasflamme 15 Sekunden lang ausgesetzt. Der zurückgelegte Weg der Flamme sowie deren Ausbreitungsgeschwindigkeit ermöglichten die Bewertung des Brennverhaltens der Sandwichverbunde nach den Beurteilungskriterien der [FMVSS 302].

7.2.2 Ergebnisdarstellung



Abbildung 7.3: Querschnitt durch Brandprobe

Bei allen durchgeführten Versuchen konnte ein selbsterlöschendes Verhalten nachgewiesen werden, weshalb keine Geschwindigkeitsermittlung der Flammausbreitung möglich war. Abbildung 7.3 zeigt eine Fotoaufnahme durch den Querschnitt des Typs 2 repräsentativ für alle Brandproben. Bei den Sandwichverbunden wurde eine rückstandslose Ver-

schung des Polypropylens und der Papierwabe innerhalb des zurückgelegten Brennwegs festgestellt. Die Glasfasern des Nadelvlieses blieben als Brandrückstand bestehen und bildeten die Aufnahme für die Papierasche. Während der Versuchsdurchführung konnten keine brennenden, herabfallenden Bestandteile erkannt werden. Die geschlossenen Zellwände der Papierwabe und die Glasfasern der Deckschichten erschweren eine Luftzirkulation innerhalb der brennenden Sandwichstruktur, wodurch eine reduzierte Sauerstoffzufuhr das frühzeitige Erlöschen des Sandwichverbundes einleitet. Bei der Verwendung eines zusätzlichen Kaschiermaterials kann das Brandverhalten des Sandwichverbundes verändert werden, was ein erneutes Abprüfen notwendig macht.

7.3 Wärmeisolationseigenschaften des Sandwichverbundes

Die Bedeutung eines energieeffizienten Wärmemanagements nimmt mit fortschreitender Entwicklung von elektrischen Fahrzeugen zu. Im Gegensatz zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren steht bei E-Fahrzeugen die energetische Leistung zur Temperierung der Fahrgastzelle nicht über Motorrestwärme zur Verfügung, sondern muss über Akkumulatoren bereitgestellt werden. Die Klimatisierung beeinflusst somit direkt Fahrzeugeffizienz und Fahrreichweite [GN10].

In diesem Kapitel werden sowohl theoretische Betrachtungen als auch experimentelle Untersuchungen der Wärmeisolationseigenschaften des Sandwichverbundes, bestehend aus Papierwabekern und thermoplastischen faserverstärkten Deckschichten, vorgestellt. Der zusammenfassende Vergleich mit konventionellen Trägermaterialien zeigt die Vorteile des Sandwichverbundmaterials auf.

7.3.1 Theoretische Betrachtung der Wärmeisolationseigenschaft

Im betrachteten System eines Sandwichverbundes mit Wabekern, wie in Abbildung 7.4 dargestellt, wirken alle drei Wärmeübertragungsarten. Der konduktive Wärmetransport (Wärmeleitung) findet innerhalb des betrachteten Systems von der Deckschicht mit höherem Wärmeenergieniveau über den Wabekern zur kälteren Deckschicht, durch kinetischen Energietransport benachbarter Atome, statt. Die Luftströmungen innerhalb der Zellwandzwischenräume bewirken den Wärmetransport zwischen den energetisch unterschiedlichen Deckschichten durch Konvektion. Die Wärmestrahlung beschreibt den Energietransport über elektromagnetische Wellen. Die senkrechte Anordnung der Wabenzellwände zu den Deckschichten ermöglicht den ungehinderten Energietransport zwischen den zueinander gekehrten Deckschichtinnenseiten und der Zellwände durch Wärmestrahlung.

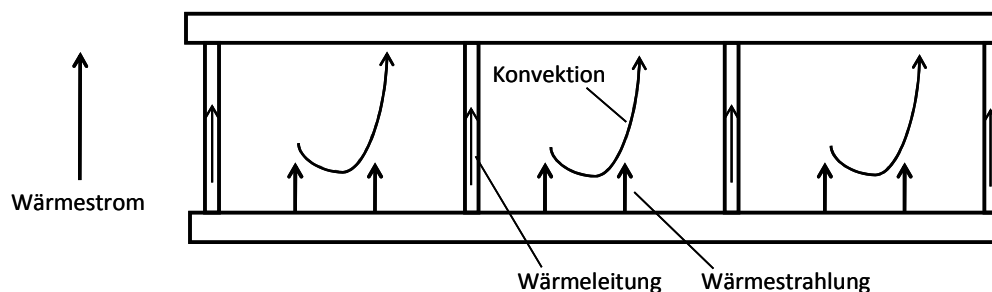


Abbildung 7.4: Wärmeübertragungsmechanismen im Sandwichverbund mit Wabekern [B197]

Im Sandwichverbund findet die Wärmeübertragung, wie Gl. (7.1) zeigt, durch Wärmeleitung μ_L der Zellwände und der Deckschichten, durch Konvektion μ_K in den Zellwandzwischenräumen und durch Wärmestrahlung μ_S an den Zellwänden und Deckschichten statt [PO09].

$$\lambda_C = \mu_L + \mu_K + \mu_S \quad (7.1)$$

Im Folgenden wird der Wärmedurchgangswiderstand des Sandwichverbundes, bestehend aus einem Wellstegwabekern A ~ TL-115 WG und PP/GF-Nadelvliesdeckschichten mit einem Flä-

chengewicht von 450 g/m² und einem Fasermassenanteil von 40 Prozent, durch analytische Gleichungen bestimmt. Der Wärmedurchgangswiderstand dient hierbei als Vergleichsgröße der wärmedämmenden Eigenschaft.

○ Wärmeübertragung durch Wärmeleitung des Papierwabenkerns

Die Wärmeleitfähigkeit der betrachteten Wellstegwabe setzt sich, wie in Gl. (7.2) dargestellt, aus der Summe der flächenbezogenen Wärmeleitkoeffizienten der orthogonal durchströmten Flächen der Papierwabenzellwände A_P , des Klebstoffs A_{Ks} und der Luft A_{Lu} zusammen [PO09].

$$\mu_L = \lambda_P \frac{A_P}{A_s} + \lambda_{Ks} \frac{A_{Ks}}{A_s} + \lambda_{Lu} \frac{A_{Lu}}{A_s} \quad (7.2)$$

In der Dissertationsschrift [PO09] von Pohl wird ein analytischer Ansatz zur Berechnung der richtungsabhängigen Wärmeleitfähigkeit des Testliners unter Berücksichtigung der Orientierung der Cellulosefasern und der Porosität des Papiers vorgestellt. Für den zu untersuchenden Testliner wird ein Wärmeleitkoeffizient in die zu betrachtende CD-Richtung von $\lambda_P = 0,186 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ angeführt. Mit Hilfe von Befragungen der Wellstegwabenhersteller wurde eine Gewichtszunahme durch Verleimung einer Wellstegwabe A ~ TL-115 WG von ca. 8 Massenprozent ermittelt. Unter Berücksichtigung der betrachteten Wabenkerndichte von $\rho_c = 83 \text{ kg/m}^3$ (siehe Anhang Kapitel 3), der experimentell bestimmten Testlinerndichte von 0,68 g/cm³ (siehe Tabelle 3.1) und der angenommenen Dichte des ausgehärteten Wasserglasklebstoffs von 2,40 g/cm³ resultiert ein Flächenanteil der Luft von 88,49 %, ein Papierflächenanteil von 11,23 % und ein Klebstoffflächenanteil von 0,28 %. Die Wärmeleitfähigkeit des Wasserglases wird nach [GH85] im Folgenden mit $\lambda_{Ks} = 0,557 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ angenommen. Für die Wärmeleitfähigkeit der Luft in den Zellwandzwischenräumen wird im Weiteren ein Wärmeleitkoeffizient aus [VD06] von $\lambda_{Lu} = 0,0259 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ (bei 20 °C) verwendet. Aus den angeführten Kennwerten resultiert nach Gl. (7.2) eine Wärmeleitfähigkeit des luftgefüllten Wellstegwabenkerns von $\mu_L = 0,045 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

○ Wärmeübertragung durch Wärmeleitung der Deckschichten

Zur Ermittlung des Wärmeleitkoeffizienten der Deckschichten λ_f wurde ein PP/GF-Nadelvlies mit einem Flächengewicht von 2 500 g/m² und einem Fasermassenanteil von 40 Prozent zu einer Prüfplatte mit einem Konsolidierungsgrad von $k = 0,32$, wie in Kapitel 5.1.3.1 beschrieben, hergestellt. Mit einem Wärmestrommessplatten-Gerät nach [DIN EN 12664] wurde ein Wärmeleitkoeffizient von 0,061 W/(m·K) ermittelt, welcher im Folgenden aufgrund der Materialähnlichkeit für die Deckschichten verwendet wird. Nähere Informationen zum Versuchsaufbau sind in Kapitel 7.3.2 angeführt.

○ Wärmeübertragung durch Konvektion

In der Dissertationsschrift [PO09] werden die theoretischen Grenzfälle von Edwards und Catton [ED69] zum Nachweis von Konvektion in einem vertikal stehenden und horizontal geschlossenen Zylinder auf eine Wellstegwabe A ~ TL-115 mit unterschiedlichen Wabenhöhen übertragen und theoretisch untersucht. Analog zum durchgeführten Versuchsaufbau (siehe Kapitel 7.3.2) wurde die Unterseite mit einem höheren Wärmeenergieniveau versehen. Über die dimensionsabhängigen Größen der Wellstegwabe, die Fluidkennzahlen und die Temperaturdifferenz werden die zu vergleichenden Rayleigh-Zahlen bestimmt, aus denen eine Nusselt-Zahl von eins für die betrachtete Wellstegwabengeometrie resultiert. Hierdurch kann Konvektion innerhalb der als adiabatisch betrachteten Zellwände ausgeschlossen werden, $\mu_K = 0$. Für nähere Informationen sei hierbei auf [PO09, HO65, ED69] verwiesen.

○ Wärmeübertragung durch Wärmestrahlung

Hergeleitet aus einem semiempirischen Ansatz führen Pittman und Swann in [SW61] zur Bestimmung der Wärmeübertragung durch Wärmestrahlung innerhalb eines Wabekerns Gl. (7.3) ein, bei der ε den Emissionsgrad der begrenzenden Zellwände, h_c die Wabekernhöhe, σ_B die Stefan-Boltzmann-Konstante ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$) und T_o sowie T_u die Temperaturen der Ober- und Unterseite beschreiben.

$$\mu_S = 0,664 \cdot (k_a + 0,3)^{-0,69} \cdot \varepsilon_{res}^{1,63 \cdot (k_a + 1)^{-0,89}} \cdot h_c \cdot \sigma_B \cdot (T_u + T_o) \cdot (T_u^2 + T_o^2) \quad (7.3)$$

Der Koeffizient k_a repräsentiert den Quotienten aus Wabekernhöhe und Wabendurchmesseräquivalent $d_{\ddot{a}q}$. Das Wabendurchmesseräquivalent transformiert die Kontur einer Wellstegwabeneinheit zelle auf einen Kreisdurchmesser und kann auf Basis von Gl. (3.4) durch Näherungsgleichung (7.4) berechnet werden.

$$d_{\ddot{a}q} = \frac{1}{\pi} \cdot P_c \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{22 \cdot H_c}{5 \cdot P_c}} \right) \quad (7.4)$$

Unter Berücksichtigung der Emissionsgradunterschiede der Zellwand- und Deckschichtmaterialien erweitert Daryabeigi in [DA01] das Modell von Pittman und Swann. Hierzu wird ein flächenanteilbezogener Emissionsgrad ε_{res} aus den materialspezifischen Emissionsgraden der Deckschichten und der Zellwand berechnet. Der Emissionsgrad für Papier wird im Folgenden mit $\varepsilon_p = 0,85$ nach [KA03] angenommen. Durch Messungen mit der Ulbricht-Kugel wurde im Wellenbereich von 0,25 bis 35 μm bei 20 °C ein normaler spektraler Emissionsgrad eines teilkonsolidierten Hybridnadelvlieses ($k = 0,32$) mit opaker Polypropylenmatrix von $\varepsilon_{pp/GF} = 0,95$ bestimmt. An einem Sandwichverbund mit einer Sandwichhöhe von $h_{sw} = 9,1 \text{ mm}$ und einer mittleren Deckschichtdicke von $t_f = 0,8 \text{ mm}$ resultiert aus Gl. (7.3), bei wirkenden Oberflächentemperaturen von $T_o = 15 \text{ °C}$ und $T_u = 25 \text{ °C}$, eine Wärmeübertragung durch Wärmestrahlung von

$\mu_s = 0,021 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Bei identischer Deckschichtdicke und einer Sandwichhöhe von $h_{sw} = 5,1 \text{ mm}$ beträgt die Wärmeübertragung durch Strahlung $\mu_s = 0,014 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

Aufbauend auf den eingeführten Materialkennwerten, lässt sich aus Gl. (7.5) der Wärmedurchgangswiderstand R_{sw} des Sandwichverbundes berechnen.

$$R_{sw} = 2 \cdot \frac{t_f}{\lambda_f} + \frac{h_c}{\lambda_c} = 2 \cdot \frac{t_f}{\lambda_f} + \frac{h_c}{\mu_L + \mu_s} \quad \text{mit} \quad t_f = \frac{h_{sw} - h_c}{2} \quad (7.5)$$

Für den betrachteten Sandwichaufbau mit einer Sandwichhöhe von 9,1 mm resultiert ein Wärmedurchgangswiderstand von 0,139 (K·m²)/W, für eine Sandwichhöhe von 5,1 mm beträgt dieser 0,085 (K·m²)/W.

7.3.2 Experimentelle Untersuchung der Wärmeisolationseigenschaft

Die Messung des Wärmedurchgangswiderstandes der ebenen Sandwichplatten wurde nach [DIN EN 12664] an einer Einplattenapparatur durchgeführt. Die Messungen erfolgten durch den in Abbildung 7.5 schematisch dargestellten Versuchsaufbau. Die bei Raumklima vorkonditionierten Sandwichverbundplatten wurden zwischen der elektrisch temperierten Heizplatte und der Kühlplatte eingelegt, wobei der isolierende Schutzring des Außenbereichs den vertikalen Wärmefluss über die Messfläche sicherstellt.

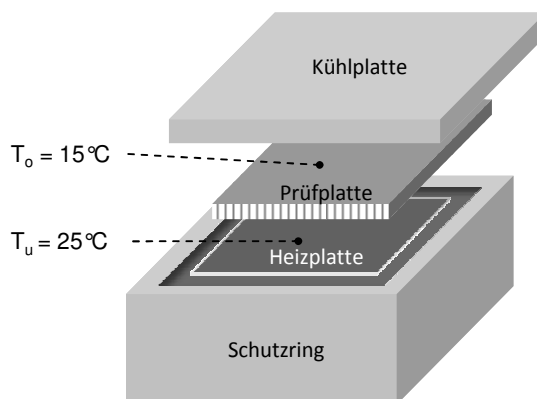


Abbildung 7.5: Aufbau der Einplattenapparatur zur Bestimmung des Wärmedurchgangswiderstands

In Abhängigkeit der zugeführten mittleren elektrischen Leistung wurde der Wärmedurchgangswiderstand über die Oberflächentemperaturdifferenz ($\Delta v = 10 \text{ K}$) bei stationärem Zustand nach Gl. (7.6) bestimmt.

$$R_{sw} = A \cdot \left(\frac{T_o - T_u}{P_{el}} \right) \quad (7.6)$$

Durch Messungen an der Sandwichverbundplatte mit einer Sandwichhöhe von $h_{sw} = 9,1 \text{ mm}$ wurde ein Wärmedurchgangswiderstand von $R_{sw} = 0,154 \text{ (K}\cdot\text{m}^2)/\text{W}$ bestimmt. Für die Sandwichhöhe $h_{sw} = 5,1 \text{ mm}$ wurde ein Durchgangswiderstand von $R_{sw} = 0,091 \text{ (K}\cdot\text{m}^2)/\text{W}$ nachgewiesen. Nach

[DIN EN 12664] liegt die Genauigkeit der Messergebnisse mit einem Wärmestrommessplattengerät innerhalb von $\pm 3\%$. Diese Messtoleranz ist in Abbildung 7.6. berücksichtigt.

7.3.3 Gegenüberstellung der theoretischen und experimentellen Ergebnisse

Die aus analytischen Gleichungen berechneten sowie experimentell bestimmten Wärmedurchgangswiderstände der untersuchten Sandwichplatten sind in Abbildung 7.6 dargestellt. Eine Erhöhung des Wärmedurchgangswiderstandes mit zunehmender Wabenkernhöhe ist sowohl bei den theoretischen, als auch bei den experimentellen Ergebnissen ersichtlich. Die Gegenüberstellung zeigt eine Unterschätzung des theoretischen Ansatzes, welche bei einer Sandwichhöhe von 5,1 mm 7 % und bei einer Höhe von 9,1 mm 10 % beträgt.

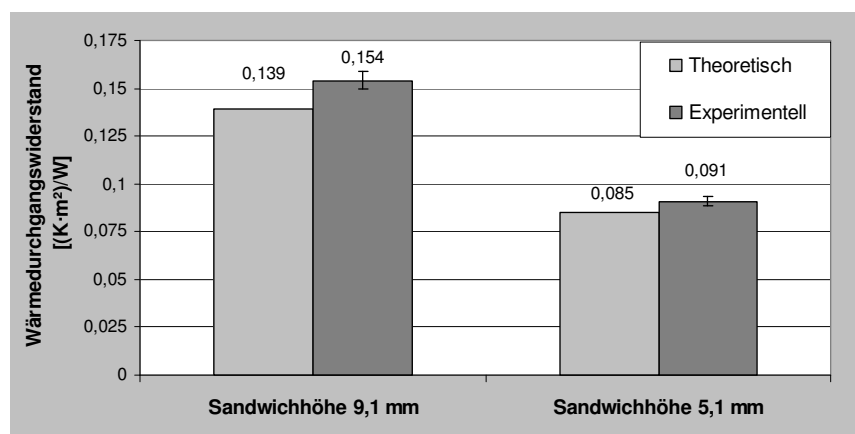


Abbildung 7.6: Vergleich zwischen experimentellen und theoretischen Wärmedurchgangswiderständen

Die mit zunehmender Kernhöhe steigende Abweichung der analytischen Berechnung kann zum einen auf die Idealisierung des geometrischen Sandwichaufbaus, wie zum Beispiel Vernachlässigung der Vliesbäuche und Zellwandbeulen, als auch auf Materialunregelmäßigkeiten der Vliesdeckschichten und des Papiers zurückgeführt werden. Des Weiteren wurden Einflüsse der lokal konsolidierten Deckschichtvliese und der Papierfeuchtigkeit auf die Wärmestrahlung und Wärmeleitung nicht näher betrachtet. Eine Optimierung der theoretischen Ergebnisse kann beispielsweise durch numerische Simulation erfolgen, wobei Materialunregelmäßigkeiten und fertigungsbedingte Erscheinungen (Zellwandbeulen und Vliesbauch) berücksichtigt werden können.

7.3.4 Gegenüberstellung mit herkömmlichen Interieurmaterialien

Zur Abschätzung des Wärmedurchgangswiderstandes des untersuchten Sandwichverbundes zeigen die angewendeten thermischen Materialkennwerte in Verbindung mit der vorgestellten semiempirischen Methode akzeptable Abweichungen zu den Versuchsergebnissen auf.

Materialdichten und Wärmeleitkoeffizienten von häufig verbauten Kunststoffen im Fahrzeuginterieur sind in Tabelle 7.4 dargestellt. Die expandierten Polypropylenschäume repräsentieren Energieabsorptions- und thermische Isolationsmaterialien. Hingegen werden die angeführten Spritzgussmaterialien (ABS, PP/GF 30) und die gepressten naturfaserverstärkten Kunststoffe (wie z. B. PES/NF) beispielsweise als Trägermaterialien von Verkleidungsteilen eingesetzt.

Tabelle 7.4: Wärmeleitkoeffizienten verschiedener Materialien

Werkstoff	Wärmeleitkoeffizient [W/(m·K)]	Dichte [g/cm ³]
EPP - Schaum [KA05]	0,035 - 0,04	0,03 - 0,045
PES/NF [ID06]	0,14	0,968
ABS [DO05]	0,18	1,06
PP/GF 30 [WO05]	0,27	1,14

Ein Vergleich der Wärmedurchgangswiderstände in Abhängigkeit des Flächengewichts ist in Abbildung 7.7 logarithmisch dargestellt. Hierbei ist das beschriebene Vorgehen zur Abschätzung des Wärmedurchgangswiderstandes von ebenen Sandwichbauteilen aus Kapitel 7.3.1 sowie die Materialien und deren Wärmeleitkoeffizienten aus Tabelle 7.4 berücksichtigt. Die betrachtete Sandwichplatte besitzt beim dargestellten Funktionsverlauf eine konstante Deckschicht mit einem Flächengewicht von 450 g/m² und einem Fasermassenanteil von 40 Prozent. Die Zunahme des Flächengewichtes des Sandwichverbundes findet durch Erhöhung der Wabenkerndicke der Wellstegwabe A ~ TL-115 WG statt.

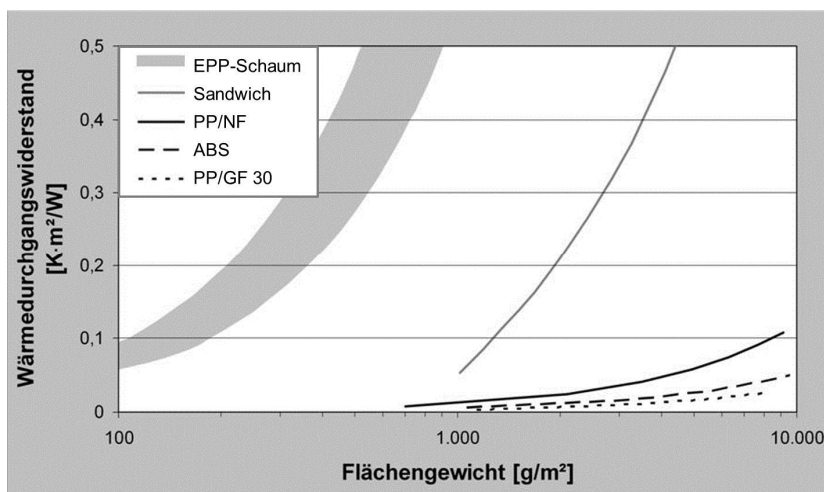


Abbildung 7.7: Wärmedurchgangswiderstand über Flächengewicht verschiedener Interieurmaterialien

Mit zunehmendem Flächengewicht sind, aufgrund der ansteigenden Materialdicken, bei allen betrachteten Materialien Erhöhungen der Wärmedurchgangswiderstände zu erkennen. Die hohen Luftanteile des Schaums und des Sandwichverbundes bewirken im Vergleich zu den klassischen Trägermaterialien eine deutlich höhere Wärmedämmung bei gleichem Flächengewicht. Bei Gegenüberstellung des Sandwichverbundes mit dem expandierten Polypropylenschaum ist der wärmeisolierende Vorteil des Partikelschaumstoffs zu erkennen. Allerdings ist zu beachten, dass EPP-Schäume als thermische Isolations- und Energieabsorptionsmaterialien eingesetzt werden und es sich gewöhnlicherweise um kein Trägermaterial, wie es beim Sandwichverbund der Fall ist, handelt.

Die Thermographieaufnahmen in Abbildung 7.8 zeigen einen Sandwichverbund bestehend aus Hexagonalwaben (Hex TL-150 WG) mit einer Kernhöhe von 9 mm und PP/GF-Nadelvliesdeckschichten mit einem Flächengewicht von 400 g/m² und einem Fasermassenanteil von 40 Prozent. Zur Darstellung der Wärmedämmeigenschaft wurde die Vorderseite einer Deckschicht mit einem Heizgewirk aus Kohlenstofffasern versehen und mit einer konstanten Leistung betrieben. Die dargestellten Thermographieaufnahmen der beheizten Vorder- und der Rückseite wurden bei einer Umgebungstemperatur von 0 °C und einer Aufheizdauer von 10 Minuten aufgenommen.

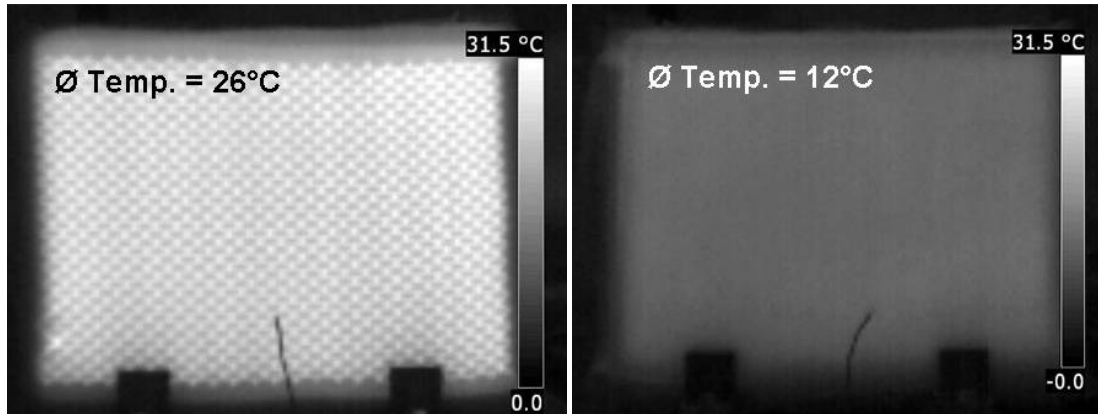


Abbildung 7.8: Temperierte Sandwichplatte - beheizte Vorderseite (li.) und Rückseite (re.)

Analog hierzu wurde, wie in Abbildung 7.9 dargestellt, ein konsolidiertes PP/NF-Nadelvlies mit einem Flächengewicht von 1 800 g/m² ebenfalls auf der Vorderseite mit einem Heizgewirk versehen. In beiden Abbildungen ist nahezu dieselbe Oberflächentemperatur der Vorderseiten ersichtlich.

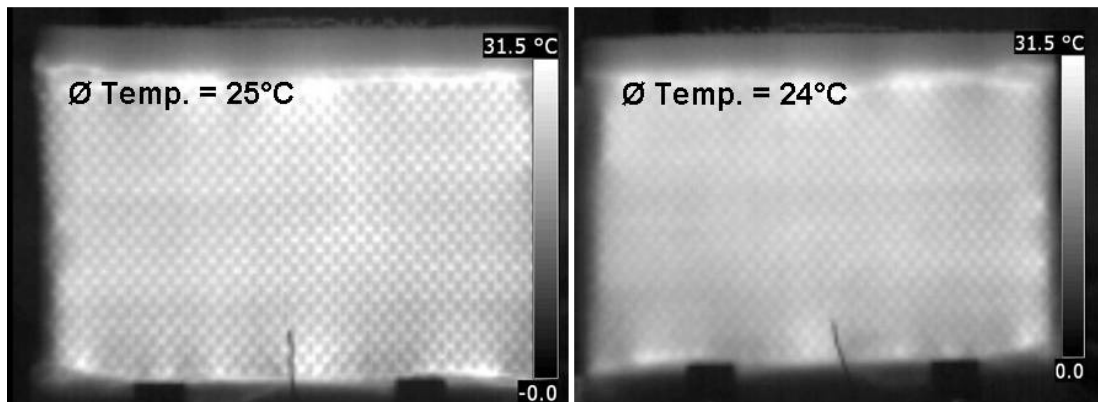


Abbildung 7.9: Temperierte NF-Platte - beheizte Vorderseite (li.) und Rückseite (re.)

Anhand der Temperaturdifferenz zwischen Vorder- und Rückseite ist eine eindeutig höhere Wärmedämmung des Sandwichverbundes im Vergleich zur PP/NF-Prüfplatte festzustellen. Hierdurch wird neben dem Leichtbaupotenzial die thermisch isolierende Eigenschaft des Sandwichverbundes ersichtlich, welche sich insbesondere bei flächigen Interieurverkleidungsteilen von elektrifizierten Fahrzeugen zukünftig auszeichnen kann.

8 Ökologische Bauteilbilanzierung

Das veränderte Umweltbewusstsein in Gesellschaft, Industrie und Politik führt zur Erweiterung der Entscheidungskriterien. Neben technischen und wirtschaftlichen Entscheidungskomponenten haben sich ökologische Aspekte etabliert. Der Umweltschutz ist inzwischen als ein Hauptziel der gesellschaftlichen Entwicklung anerkannt [EY96]. Wie in [CA99] angeführt, werden ca. 80 Prozent der Produkt-Umweltauswirkungen in der Entwicklungsphase determiniert. In der Automobilindustrie werden während der Entwicklungsphase vorrangig Umweltbelastungen in der Nutzungsphase (Treibstoffverbrauch) und der Fahrzeugverwertung berücksichtigt. Zur Optimierung des gesamten Fahrzeuglebenszyklus muss nach [SA99] eine Umweltrelevanzbetrachtung von der Herstellung der Ausgangsmaterialien bis zur Fahrzeugverwertung angestrebt werden.

Nach [DIN ISO 14040] analysiert eine Ökobilanz Umweltaspekte und ihre potentiellen Auswirkungen im Verlauf eines Produktlebens. Hierbei findet eine Produktbetrachtung und -beurteilung von der Rohstoffgewinnung über Produktion, Anwendung, Abfallbehandlung und Recycling bis zur endgültigen Beseitigung statt, wodurch ein Vergleich alternativen Produkten möglich wird [TI97].

8.1 Bauteilökobilanz am Beispiel Hutablage

Die Bauteilökobilanz wird am Beispiel einer Hutablage bestehend aus Papierwabenkern und PP/GF-Nadelvliesdeckschichten aufgestellt und mit einer PP/GF-Hutablage, gefertigt durch Formpressen, verglichen. Die Sachbilanzen innerhalb einer Ökobilanzierung ermöglichen die Aggregation aller Energien und Stoffe eines Produktes über den gesamten Lebenszyklus [KA96]. Nachstehend wird unter folgenden Produktlebensphasen der betrachteten Hutablage unterschieden:

- Produktionsphase
- Nutzungsphase
- Entsorgungsphase



Die Rohstoffgewinnung und die Aufbereitung der verwendeten Materialien werden im Rahmen der Produktionsphase berücksichtigt. Die Entwicklungsphase wird aufgrund gering anfallender CO₂-Emission und Energiemengen vernachlässigt. Die Vergleichsgrößen der Produktlebensphasen stellen hierbei die anfallenden Energiemengen sowie das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid dar.

8.1.1 Produktionsphase

Die Produktionsphase der Bauteilfertigung umfasst die Teilsysteme Ausgangsmaterialbereitstellung sowie Halbzeug- und Bauteilherstellung beider Bauteilvarianten. Der Material- und Energiefluss in der Produktionsphase wurde anhand der Software GaBi 4.0 abgebildet. Die zu betrachtende Produktmenge entspricht einer Hutablage. Wie in Abbildung 8.1 und Abbildung 8.2 darge-

stellt, sind die drei Teilsysteme der Produktionsphase in einzelne Prozessmodule untergliedert. Die benötigten Daten für die einzelnen Module wurden direkt von Herstellern oder Lieferanten bezogen, experimentell ermittelt, aus Veröffentlichungen gewonnen oder aus den hinterlegten Datenbanken der GaBi Software entnommen. Zur Ermittlung des Primärenergieaufwands wurden die ermittelten oder aus Befragungen definierten, elektrischen Energiemengen mit einem Primärenergiefaktor von 3,2 multipliziert. Mit Hilfe des Primärenergiefaktors kann der Primärenergieaufwand aus der zu bereitstellenden Bedarfsenergiemenge berechnet werden. Der Primärenergieaufwand berücksichtigt die Gewinnung des Energieträgers, die Energieumwandlung sowie den Energietransport zum Endabnehmer [MU09]. Die anfallenden Transportenergiemengen, verursacht beispielsweise durch den Materialtransport zwischen einzelnen Produktionsstätten, sind aus Gründen der Standortunsicherheit nicht berücksichtigt. Des Weiteren bleiben beispielsweise Betriebsstoffe für Produktionsanlagen und Ressourcen zur Werkzeugherstellung unbeachtet. Tabelle 8.1 zeigt die Basisparameter beider Hutablagenvarianten. Aufgrund der höheren Materialsteifigkeit ist zur Erfüllung der mechanischen Bauteilanforderung eine niedrigere Bauteilfläche der Sandwichhutablage (siehe hierzu Kapitel 5.4.2) im Vergleich zur Hutablage, hergestellt durch Formpressen, notwendig. Die höhere Anzahl an verwendeten Materialien sowie das niedrigere Bauteilgewicht der Sandwichhutablage ist im Vergleich zur Referenzhutablage ersichtlich. Das Kaschiermaterial wird im Folgenden wegen der möglichen Variantenvielfalt nicht berücksichtigt.

Tabelle 8.1: Hauptparameter der ökologisch bewerteten Hutablagenvarianten

Formpressen	Sandwichbauweise
	
Bauteilfläche [m ²]	
0,52	0,46
Materialien zur Bauteilherstellung	
<ul style="list-style-type: none"> • 2 200 g/m² PP/GF-Nadelvlies 	<ul style="list-style-type: none"> • 2 x 450 g/m² PP/GF-Nadelvlies • A ~ TL-90 WG; 9 mm Dicke • 2 x PP-Folie; 0,1 mm Stärke
Bauteilmasse [kg]	
1,14	0,75

8.1.1.1 Sachbilanz der formgepressten Hutablage

Abbildung 8.1 zeigt den Material- und Energiefluss innerhalb der Produktionsphase von der Ausgangsmaterialbereitstellung über die Vliesherstellung bis zur Hutablagenherstellung. In Anhang Kapitel 8 sind die Energie-, Massen- und CO₂-Flüsse von jedem Prozessschritt hinterlegt.

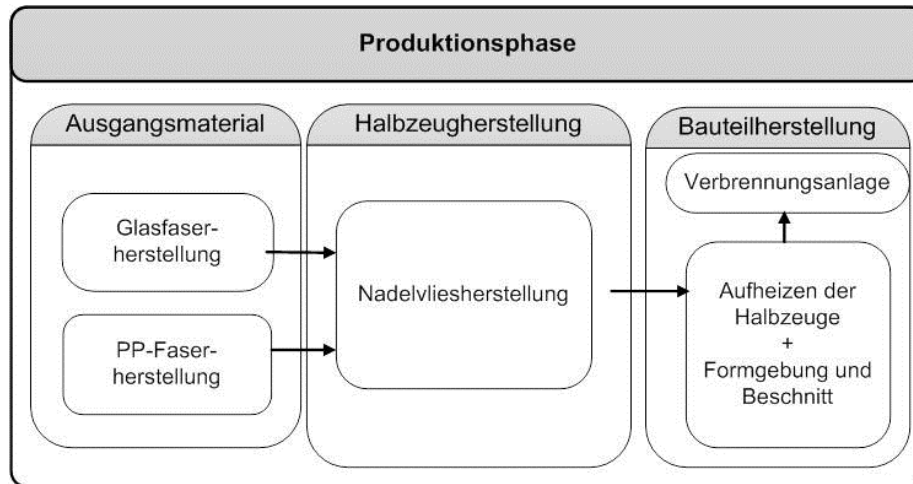


Abbildung 8.1: Flussdiagramm der Produktionsphase der formgepressten Hutablage

o Teilsystem Ausgangsmaterial

Die benötigten Energien und stofflichen Aufwendungen für die Glas- und Polypropylenfaserherstellung und deren Rohstoffmaterialien sind aus den hinterlegten Datenbanken der GaBi Software entnommen. Weitere gering abweichende Kennwerte für die Glas- und Polypropylenfaserherstellung sind in den Veröffentlichungen [JO04, CO01, DI99] angeführt. Wie bei der abgebildeten Sandwichhutablage im Anhang Kapitel 6, wurden bei der Bauteilökobilanz neben Primärfasern auch Sekundärfasern (Glas- und Polypropylenfasern) in Form von Stapelfasern betrachtet. Die Verwendung von Sekundärmaterialien bietet neben ökologischen auch ökonomische Vorteile, wie in Tabelle 8.2 dargestellt. Recycelte Polypropylenfasern fallen beispielsweise bei der Fertigung oder Wiederverwertung von Teppichen an. Hingegen werden die Glasstapelfasern meist aus Konfektionsabfällen aufbereitet. Die Aufwendungen zur Herstellung der Sekundärfasern wurden durch die Methode der Marktpreisallokation bestimmt. Durch das marktpreisbasierte Allokationsverfahren wird die Materialqualität in einem techno-ökonomischen System wiedergegeben und somit in Bezug zur qualitativen Materialdegradierung gebracht [WO07]. Durch diese Methode werden beispielsweise mechanische Beeinträchtigungen oder Materialschwankungen anhand des erzielbaren Marktpreises bewertet. Hierzu wird der Allokationsfaktor ermittelt, der dem Quotienten aus Sekundär- und Primärmaterialpreis entspricht. Bei Verwendung von Sekundärmaterial erfolgt die Berechnung der zu berücksichtigenden Energiemenge durch Multiplikation der Bedarfsenergiemenge mit dem Allokationsfaktor. Die Basiswerte zur Bestimmung des Allokationsfaktors sind aus durchgeführten Marktpreisrecherchen von Oktober 2010 ermittelt worden und in Tabelle 8.2 hinterlegt.

Tabelle 8.2: Basiswerte der veranschlagten Marktpreisallokation

Material	Materialpreis [€/kg]	Marktpreis - Allokationsfaktor
Primär PP-Faser	1,40	0,79
Sekundär PP-Faser	1,10	
Primär E-Glasfaser	1,30	0,31
Sekundär E-Glasfaser	0,40	

o Teilsystem Halbzeugherstellung

Das Teilsystem der Halbzeugherstellung beinhaltet die Nadelvliesfertigung aus Glas- und Polypropylenfasern zu einem Nadelvlies mit einem Flächengewicht von 2 200 g/m² und einem Glasfasermassenanteil von 55 Prozent. Wie von Diener in [DI99] angeführt, wird zur Vliesherstellung durch Vernadelung eine Energiemenge von 2,9 MJ/kg berücksichtigt. Ausschuss tritt während der Vernadelung des Hybridvlieses nicht auf.

o Teilsystem Bauteilherstellung

Die Bauteilherstellung beschreibt die energetischen Aufwendungen zur Produktherstellung aus den Halbzeugen. Die Fertigung mit konstanter Pressen- und Werkzeugtemperierung (siehe Kapitel 6.2.3) stellt die zugrundeliegende Produktionskette der Hutablage durch Formpressen dar. Die gemessenen Energiemengen zum Temperieren der Heizpresse und zum Betreiben des formgebenden Werkzeugs zeigten einen Energiebedarf von ca. 2,12 MJ zur Herstellung einer Hutablage auf. Es sei darauf hingewiesen, dass sowohl Werkzeuggeometrie, Werkzeugmaterial und Heizpressendimensionierung großen Einfluss auf den gemessenen Energiebedarfswert haben und dieser somit nur als Richtgröße betrachtet werden kann. Aufgrund des notwendigen Bauteilbeschnitts während der Herstellung wird der Materialverschnitt mit 20 Prozent der Bauteilfläche angenommen. Der anfallende Verschnitt wird als Abfall zum thermischen Recycling der Müllverbrennungsanlage zugeführt, wobei die gewonnenen Energiemengen der Bilanzierung nicht gutgeschrieben werden. Die Masse der Hutablage beträgt 1,144 kg und hat eine Fläche von 0,52 m².

8.1.1.2 Sachbilanz der Sandwichhutablage

Die Produktionsphase der Sandwichhutablage ist - wie die der Referenzhutablage - in die Produktherstellung, Halbzeugherstellung und Bauteilherstellung unterteilt. Der in Abbildung 8.2 dargestellte Material- und Energiefluss ist im Gegensatz zur Referenzhutablage aufgrund der verwendeten Materialvielfalt komplexer.

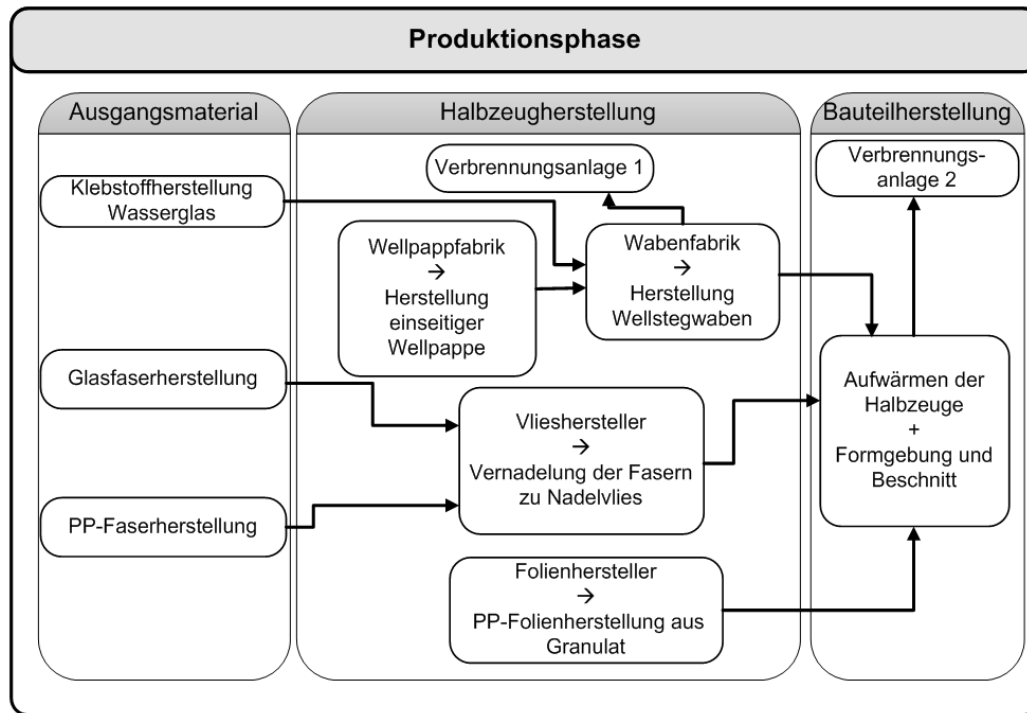


Abbildung 8.2: Flussdiagramm der Produktionsphase der Sandwichhutablage

○ Teilsystem Ausgangsmaterial

Zur Bestimmung der In- und Outputgrößen der Glas- und Polypropylenfaserherstellung wurde analog zu Kapitel 8.1.1.1 vorgegangen. Die Herstellung der einseitigen Wellpappe beinhaltet die Testlinerherstellung, weshalb diese nicht als Vorprodukt im Flussdiagramm aufgeführt ist. Die Sachbilanz der Testlinerherstellung kann beispielsweise in der ProBas-Datenbank [PR10] eingesehen werden. Die Sachbilanz von Natronwasserglas mit einem 37-prozentigen Wasseranteil wurde aus den hinterlegten Datenbanken der GaBi Software übernommen. Hierbei wurde nach Herstellerangaben (siehe Kapitel 7.3.1) ein Klebstoffmassenanteil von 11 Prozent zur Verleimung der einseitigen Wellpappe zu einem Wabenblock berücksichtigt.

○ Teilsystem Halbzeugherstellung

Die Wabenherstellung lässt sich in die Fertigung der einseitigen Wellpappe und die Verarbeitung dieser zu einer Wellstegwabe unterteilen (siehe hierzu Kapitel 3.1.3.1). Die notwendigen Daten zur Wellpappenherstellung wurden aus der Eco-Invent Datenbank [EC10] übernommen. Nähere Informationen zur Ökobilanzierung von Wellpappen sind aus [FE09] zu entnehmen.

Über Jahresenergiebedarf und -produktionsmenge einer Wabenproduktionsstätte konnte der Energiebedarf zur Herstellung der A ~ TL-90 WG bestimmt und die anfallende Ausschussmenge abgeschätzt werden. Die durchgeführte Stoffstromanalyse des betrachteten Betriebes zeigt, dass zur Herstellung der Wellstegwabe ($h_c = 9 \text{ mm}$) aus dem Grundmaterial der einseitigen Wellpappe ein Energieaufwand von ca. $0,55 \text{ MJ/m}^2$ einzubringen ist. Die Beleimungsanlage, Bandsäge und Absauganlagen sind beim Prozess der Wellstegwabenherstellung für den überwiegenden Anteil des

Energieverbrauchs verantwortlich (vgl. Kapitel 3.1.3.1). Der anfallende Wabenausschussanteil ist auf das Zusägen der Wabenblöcke sowie auf nicht verwendbare Reststücke zurückzuführen. Im Folgenden wird der Ausschussanteil auf Basis von Herstellerangaben mit 20 Prozent in der Sachbilanz berücksichtigt. Der Materialausschuss wird der Verbrennungsanlage zugeführt. Aus den zugrundeliegenden Datenbanken der GaBi Software wird der Energie- und Materialaufwand zur Herstellung der Polypropylenfolie (0,1 mm Foliendicke) aus PP-Granulat in die Sachbilanz der Halbzeugherstellung übernommen. Zur Herstellung der Deckschichten aus PP/GF-Nadelvliesen mit einem Flächengewicht von 450 g/m² und einem Glasfasermassenanteil von 40 Prozent wird entsprechend Kapitel 8.1.1.1 vorgegangen.

○ Teilsystem Bauteilherstellung

Die Fertigung der Sandwichhutablage mit konstanter Pressen- und Werkzeugtemperierung (siehe Abbildung 6.4) stellt, wie bei der durch Formpressen gefertigten Referenzhutablage (siehe Abbildung 5.1), die zugrundeliegende Produktionskette dar. Die Energiemenge zum Aufheizen und zum Pressen der Sandwichverbundmaterialien wird identisch zur Referenzhutablage mit 2,12 MJ berücksichtigt. Aufgrund des geringeren Deckschichtflächengewichtes kann im Vergleich zur Referenzhutablage von einer niedrigeren Aufheizenergiemenge ausgegangen werden. Dies wurde allerdings im Rahmen der durchgeführten Versuche nicht betrachtet. Identisch zur Referenzhutablage wird der anfallende Verschnittanteil bei der Bauteilherstellung mit 20 Prozent abgeschätzt und der Verbrennungsanlage zur thermischen Verwertung zugeführt.

8.1.1.3 Wirkungsabschätzung

Abbildung 8.3 zeigt den Primärenergiebedarf und die anfallenden CO₂-Emissionen der Produktionsphase beider Hutablagenvarianten. Trotz Verwendung von Sekundärfasern stellt die Faserherstellung die dominierende energetische Aufwendung dar. Die Sandwichhutablage zeigt durch eine Einsparung von ca. einem Drittel der CO₂-Emissionen und des Primärenergiebedarfs einen ökologischen Vorteil im Vergleich zur Referenzhutablage. Vor allem die Reduzierung der eingesetzten Polypropylen- und Glasfasern führt zur Verringerung der Primärenergie. Der niedrige Energiebedarf zur Herstellung der Wellstegwabe von ca. 7 MJ ist auf die Verwendung des Testliners (Recyclingpapier, siehe Kapitel 3.1.2) zurückzuführen. Die Primärenergie zur Bauteilherstellung von 6,8 MJ ist im Vergleich zur Herstellung des Ausgangsmaterials und der Halbzeuge als gering einzustufen. Durch die Verbrennung der Ausschüsse und der Bauteilverschnittmenge wird die CO₂-Bilanz durch den entstandenen Kohlenstoffdioxidaustritt negativ beaufschlagt. Eine Gutschrift durch das thermische Recycling und eine damit verbundene Rückgewinnung der eingesetzten Energiemenge wurde aufgrund des geringen Massenstroms nicht berücksichtigt.

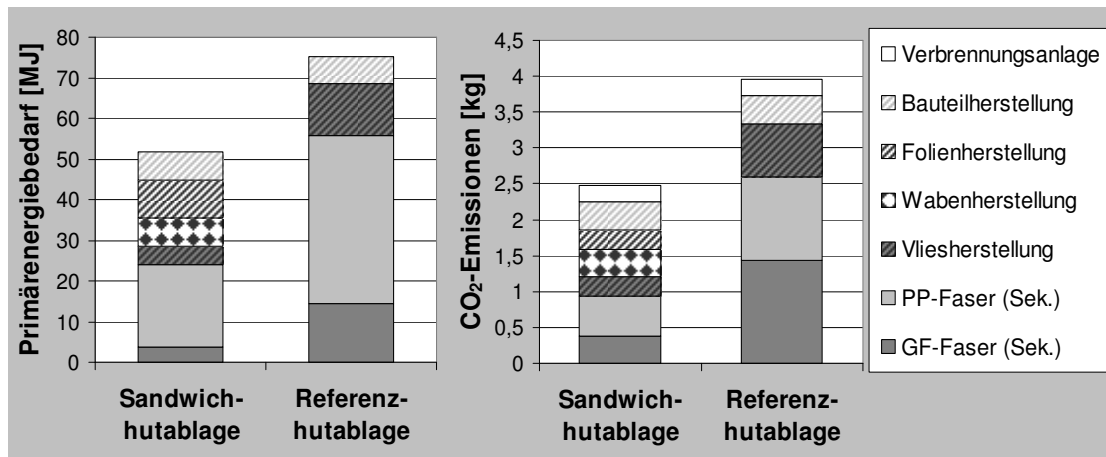


Abbildung 8.3: Primärenergienmengen und CO₂-Emissionen in Produktionsphase (Sekundärfasern)

Im Anhang Kapitel 8 sind die anfallenden Energiemengen und CO₂-Emissionen während der Produktionsphase bei Verwendung von Primärfasern dargestellt. Hierbei ist ein deutlich höherer Primärenergiebedarf durch Vernachlässigung des Marktpreisallokationsfaktors zu erkennen.

8.1.2 Nutzungsphase

Die überwiegende Umweltbelastung in der Nutzungsphase wird durch den Kraftstoffverbrauch während eines Fahrzeuglebens verursacht. Sowohl Roll-, Steigungs- als auch Beschleunigungswiderstände eines Fahrzeuges sind direkt von der zu bewegenden Fahrzeugmasse abhängig, wodurch Kraftstoffverbrauch und Kohlenstoffdioxidausstoß unmittelbar beeinflusst werden.

8.1.2.1 Sachbilanz

Im Folgenden wird in Anlehnung an [ST10] eine Berechnungsmöglichkeit zur Abschätzung der benötigten Energiemengen zum Transport beider Hutablagenvarianten aufgezeigt. Die Kraftstoffeinsparung K_E kann hierbei durch Reduzierung der Fahrzeugmasse m_F in Abhängigkeit des Luftwiderstandsanteils W_L und des Kraftstoffverbrauchs K_V durch folgenden Zusammenhang nach [BE07] abgeschätzt werden, wobei sich die Kraftstoffeinsparung auf eine Masseneinsparung von 100 kg und eine Fahrstrecke von 100 km bezieht. Für die Parameter der folgenden Gleichungen werden die physikalischen Einheiten aus Tabelle 8.3 verwendet.

$$K_E = K_V \cdot \frac{100}{m_F} \cdot (1 - W_L) \quad (8.1)$$

Die benötigte Energie zum Bauteiltransport E_N wird durch den Kraftstoff bereitgestellt. Unter Verwendung des volumenspezifischen Kraftstoffheizwertes H_s und Gl. (8.1) lässt sich der Energieverbrauch E_N in Abhängigkeit der Bauteilmasse m_B und der Fahrzeuglaufleistung F_L abschätzen.

$$E_N = \frac{m_B \cdot K_E \cdot H_s}{10\,000} \cdot F_L \quad (8.2)$$

Gl. (8.1) in Gl. (8.2) eingesetzt, ermöglicht die Abschätzung des Energieverbrauchs verursacht durch den Bauteiltransport in Abhängigkeit der Fahrzeugeigenschaften.

$$E_N = \frac{m_B \cdot K_v \cdot H_s}{100 \cdot m_F} \cdot F_L \cdot (1 - W_L) \quad (8.3)$$

Die Transportenergie eines Bauteils ist somit direkt abhängig von Bauteilmasse, Fahrzeugmasse, Luftwiderstandsanteil, Kraftstoffheizwert und Fahrzeuglaufleistung. Im Fahrzeugverbrauch werden indirekt die Einflüsse durch Fahrverhalten, Fahrzeugtyp und Motorisierung berücksichtigt. Die Berechnung des Transportenergiebedarfs erfolgt exemplarisch an einem Kleinfahrzeug unter Berücksichtigung der in Tabelle 8.3 angeführten Kennzahlen.

Tabelle 8.3: Fahrzeugkennzahlen in der Nutzungsphase

Parameter	Formelzeichen	Physik. Einheit	Wert
Bauteilmasse Referenzhutablage	m_B	kg	1,14
Bauteilmasse Sandwichhutablage	m_B	kg	0,75
Fahrzeugmasse [BE07]	m_F	kg	1 200
Luftwiderstandsanteil [BE07]	W_L	-	0,4
Kraftstoffheizwert Benzin [SM05]	H_S	MJ/l	32,45
Fahrzeuglaufleistung	F_L	km	160 000
Mittlerer Fahrzeugverbrauch [BE07]	K_V	l/100 km	6
Transportenergie Referenzhutablage	E_N	MJ	177,6
Transportenergie Sandwichhutablage	E_N	MJ	116,8

Aufgrund der linearen Abhängigkeit zwischen Transportenergiebedarf und Bauteilmasse (siehe Gl. (8.3)) weist die Sandwichhutablage einen niedrigeren Energiebedarf auf.

8.1.2.2 Wirkungsabschätzung

Abbildung 8.4 veranschaulicht die anfallende Energiemenge durch den Bauteiltransport und die hierdurch verursachten CO₂-Emissionen bei einer Fahrzeuglaufleistung von 160 000 km. Zur Berechnung der Kohlenstoffdioxidemissionen wurde ein CO₂-Äquivalent nach [UR10] von 2,33 kg CO₂ für einen Liter Benzin berücksichtigt. Die niedrigere Bauteilmasse der Sandwichhutablage ermöglicht im Vergleich zur Referenzhutablage einen um 34 Prozent geringeren Transportenergiebedarf.

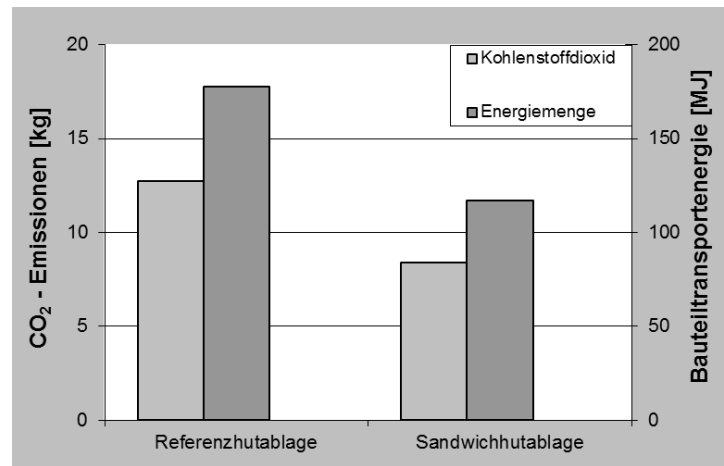


Abbildung 8.4: Primärenergien und CO₂-Emissionen in Nutzungsphase bei 160 000 km

Die Differenz der Bauteiltransportenergie und der CO₂-Emissionen beträgt ca. 61 MJ und 4,4 kg Kohlenstoffdioxid. Bezogen auf die Heizleistung von Benzin entspricht dies über die veranschlagte Nutzungsphase einer Kraftstoffeinsparung von ca. 1,9 Liter. Die theoretische Betrachtung einer Fahrzeugstückzahl von einer Million Fahrzeugen veranschaulicht das Potential der Materialsubstitution durch eine Ressourcenschonung von ca. 1,9 Millionen Liter Kraftstoff und 4 362 Tonnen Kohlenstoffdioxid.

8.1.3 Verwertungsphase

Die thermische Verwertung von thermoplastischen faserverstärkten Kunststoffen ist eine Alternative zum stofflichen Recycling, welches in Kapitel 9 vorgestellt wird. Die Energierückgewinnung und die emittierten CO₂-Mengen stellen die Vergleichsgrößen beider Hutablagenvarianten dar. Schadstoffe sowie stoffliche Rückstände gehen nicht in die Bilanz ein.

8.1.3.1 Sachbilanz

Die CO₂-Emissionen wurden mit Hilfe der hinterlegten Datenbanken der GaBi Software erfasst. Die rückgewonnene Energiemenge, durch Verbrennung der Verbundmaterialien, wird anhand der Summe der einzelnen materialspezifischen Heizwerte im Verhältnis ihrer Massenanteile nach Gl (8.4) bestimmt. Hierbei repräsentiert m_i die anteilige Masse und H_i den Heizwert der einzelnen Materialien.

$$H_v = \frac{\sum (m_i \cdot H_i)}{\sum m_i} \quad (8.4)$$

In [EY08] wird für unverstärktes Polypropylen ein stoffspezifischer Heizwert von 44 MJ/kg angegeben, wohingegen der Heizwert nach [DIN18230] für Wellpappe mit 15,2 MJ/kg deutlich niedriger liegt. Glas bleibt aufgrund der nichtenergetischen Verwertbarkeit unberücksichtigt. Der Nettowirkungsgrad einer Müllverbrennungsanlage wird nach [WU09] mit 15 Prozent einbezogen.

8.1.3.2 Wirkungsabschätzung

Abbildung 8.5 zeigt die anfallenden CO₂-Emissionen und die gewonnenen Energiemengen durch thermische Verwertung beider Hutablagenvarianten. Aufgrund der geringeren Bauteilmasse ist die emittierte Kohlenstoffdioxidmasse der Sandwichhutablage im Vergleich zur Referenzhutablage ca. 30 Prozent niedriger. Die rekuperierte Energie innerhalb des Betrachtungssystems ist bei Verbrennung der Referenzhutablage 0,64 MJ höher im Vergleich zur Sandwichhutablage. Die deutlich größere Energiedifferenz (ca. 24 MJ Primärenergie) während der Produktionsphase (siehe Abbildung 8.3) zugunsten der Sandwichhutablage zeigt, dass bei Betrachtung des Gesamtsystems der geringfügige Mehranteil an rückgewonnener Energie durch Verbrennung nicht als Vorteil der Referenzhutablage gesehen werden kann.

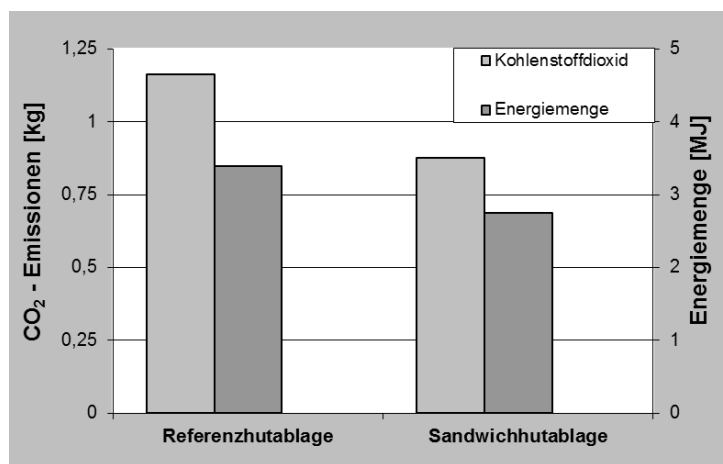


Abbildung 8.5: CO₂-Emissionen und Primärenergiemengen in Verwertungsphase

8.2 Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse

Die Energiebedarfsmengen und CO₂-Emissionen beider Hutablagenvarianten sind in Abbildung 8.6 unter Verwendung von Sekundärfasern zusammengefasst. Die entsprechenden Diagramme beim Gebrauch von Primärfasern sind in Anhang Kapitel 8 abgebildet.

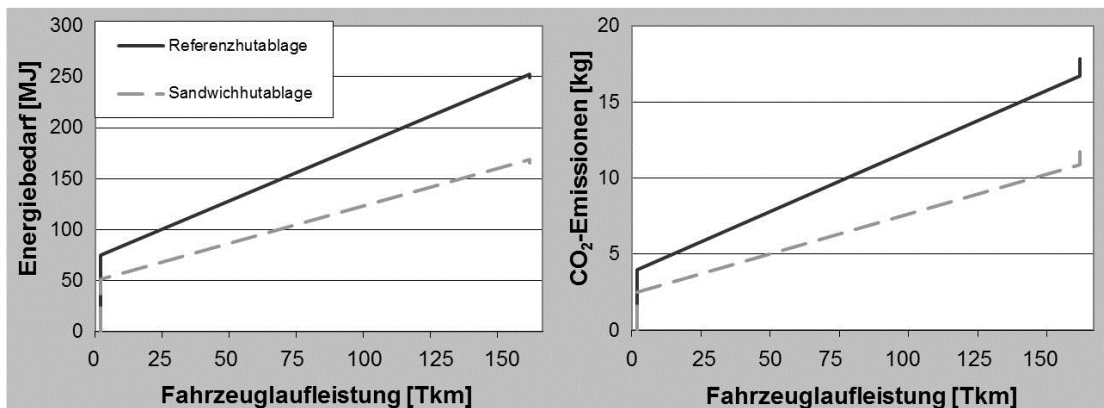


Abbildung 8.6: Energiebedarf und CO₂-Emissionen über Produktlebensdauer (Sekundärfasern)

Wie in [CA99] beschrieben, stellt bei aktiven Produkten - entsprechend der betrachteten Hutablagen - die Nutzungsphase die energetisch dominierende Phase innerhalb eines Produktlebens dar. Unter Berücksichtigung beider Vergleichsgrößen (CO₂-Emissionen und Energiebedarf) ist lediglich ein geringer Einfluss der Verwertungsphase auf die ökologische Gesamtbilanzierung festzustellen. Aufgrund des energetisch niedrigen Materialeinsatzes zeigt das Sandwichbauteil im Vergleich zum Referenzbauteil deutlich niedrigere Energiebedarfsmengen in der Produktionsphase auf. Während der Nutzungsphase führt der Gewichtsunterschied von ca. 0,4 kg zu einer Verringerung des Transportenergiebedarfs von ca. 34 Prozent, wodurch das Potential der Materialsubstitution zur Ressourcenschonung deutlich wird.

9 Stoffliche Wiederverwertung des Sandwichverbundes

Kunststoffe mit Cellulose als Verstärkungs- oder Füllmaterial finden beispielhaft durch Wood-Plastic-Compounds (WPC) zunehmend ihre Anwendung in spritzgegossenen Bauteilen. Die niedrige Werkstoffdichte sowie die Verwendung eines nachwachsenden Rohstoffs stellen die Haupttreiber naturfaserverstärkter Kunststoffe dar. Basierend auf diesem Grundgedanken wird in diesem Kapitel eine Alternative zum thermischen Recycling durch stoffliche Wiederverwertung des Sandwichverbundmaterials bestehend aus Recyclatpapier, Glasfasern und Polypropylen aufgezeigt. Durch die Compoundierung des gemahlenen Sandwichverbundes wird ein spritzgussfähiges Material erzeugt, bei dem sowohl die Glasfasern als auch das Papier eine Verstärkung des Polypropylens bewirken. Die experimentell bestimmten mechanischen Kennwerte ermöglichen eine Potenzialabschätzung zu bekannten natur- und glasfaserverstärkten Kunststoffen.

9.1 Herstellung der Recyclatprüfkörper

Die Herstellung des Granulats lässt sich, wie in Abbildung 9.1 dargestellt, in die Schüttgutherstellung und Granulaterzeugung durch Compoundierung unterteilen.

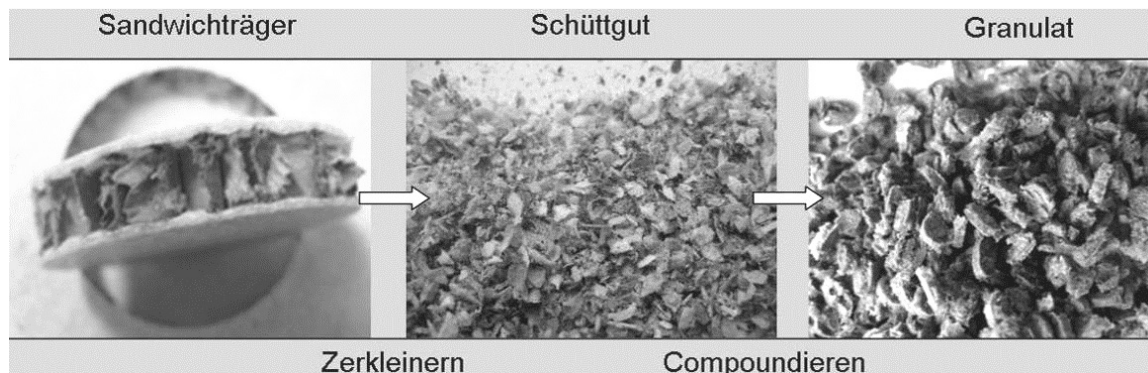


Abbildung 9.1: Herstellungsschritte des Spritzgussgranulats

Die Materialaufbereitung und die Granulatherstellung erfolgten am SLK (Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung) der Technischen Universität Chemnitz. Im Folgenden werden die einzelnen Prozessschritte mit ihren Merkmalen beschrieben.

9.1.1 Schüttgutherstellung

Als Ausgangsmaterial wurden Sandwichplatten mit einem PP/GF-Nadelvlies mit einem Faseranteile von 50 % und einem Flächengewicht von 400 g/m² sowie einer Papierwabe A ~ TL-90 WG mit einer Dicke von 7 mm, wie in Kapitel 5.2.1.1 beschrieben, hergestellt. Mit Hilfe der Schneidmühle ZERMA GSL 300/400 wurden die Sandwichplatten zerkleinert, wobei eine Sieblöschung von 5 mm eine Größenbegrenzung des entstandenen Schüttguts ermöglichte. Die Massenanteile des Schüttguts setzten sich jeweils aus etwa einem Drittel Polypropylen, Glasfasern und Papier zusammen.

9.1.2 Granulatherstellung

Die Aufbereitung des gemahlene Schüttguts zu einem Extrusionsstrang erfolgte durch einen Zweischnckenextruder des Typs Noris Plastic ZSC 25/40D. Zur Verbesserung der Extrusionseigenschaften wurde der Matrixanteil durch Zugabe von Polypropylen (Borealis 170 MO) auf 50 % erhöht. Im Folgenden wird dieses Granulat als „Recyclat I“ bezeichnet. Die Steigerung des Polypropylenanteils auf 60 % ermöglicht eine Betrachtung des Einflusses des Matrixanteils auf die mechanischen Eigenschaften und wird im Folgenden als „Recyclat II“ bezeichnet. Die Bestandteile beider Recyclatmischungen sowie des Schüttguts sind in Tabelle 9.1 angegeben.

Tabelle 9.1: Recyclatbestandteile des Compounds

Bestandteile	Massenanteil PP [%]	Massenanteil GF [%]	Massenanteil Papier [%]
Schüttgutanteile	33,3	33,3	33,3
Recyclat I	50	25	25
Recyclat II	60	20	20

9.1.3 Prüfkörperherstellung

Zur Verbesserung der Anbindung zwischen Polypropylenmatrix und Papierpartikeln, sowie zur Vermeidung von Blasen- oder Rissbildungen durch Feuchtigkeitsdiffusion [WO98, LA01], wurde analog zur Verarbeitung von NFK-Spritzgussmaterialien das Granulat bei einer Temperatur von 95 °C und einem Unterdruck von 0,8 bar für acht Stunden getrocknet. Die Probekörper des Typs 5 nach [DIN ISO EN 527-3] wurden mit einer Spritzgussmaschine ARBURG AII Drive 370 spritzgegossen, wobei eine Einspritztemperatur von 175 °C und ein Einspritzdruck von 2 300 bar gewählt wurde. Bei einem Nachdruck von 700 bar und einer Haltezeit von 10 Sekunden kühlten die Prüfkörper in der Kavität ab. Aus den Zugprüfkörpern wurden die Prüfkörper für die Kerbschlagzähigkeitsprüfungen präpariert. Abbildung 9.2 zeigt eine Mikroskopieaufnahme eines Prüfkörperquerschnitts.

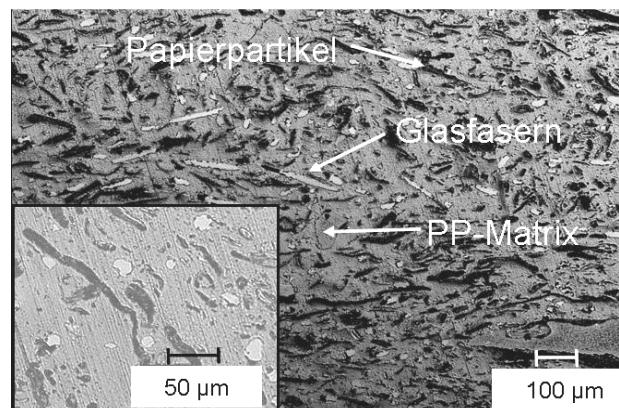


Abbildung 9.2: Mikroskopie des Spritzgussrecyclats I

In der Aufnahme ist eine gleichmäßige Verteilung der Glasfasern und Papierpartikel in der Polypropylenmatrix zu erkennen. Fehlstellen, wie Lufteinschlüsse oder fehlende Anbindungen zwischen Verstärkungsmaterialien und der Matrix, sind nicht festzustellen. Durch die Compoundierung fand eine deutliche Zerkleinerung des Papiers und der Glasfasern im Vergleich zur Schüttgutgröße statt.

9.2 Mechanische Materialeigenschaften des Recyclatcompounds

Materialkennwerte der Mischrecyclate wurden sowohl bei quasi-statischer Beanspruchung der Prüfkörper als auch bei dynamischer Belastung experimentell untersucht. Die ermittelten Kennwerte ermöglichen einen Vergleich der mechanischen Eigenschaften mit bekannten faserverstärkten Kunststoffen. Die Veröffentlichung von Jarukumjorn und Suppakarn [JA09] erlaubt die Gegenüberstellung der Kennwerte zu einem Compound bestehend aus Polypropylen, Glas- und Cellulosefasern, bei dem als Verstärkungsmaterial Glasfasern mit einem Massenanteil von 20 Prozent und Sisalfasern mit einem Anteil von 10 Prozent eingesetzt wurden. Ein glasfaserverstärktes Polypropylen [D-PO20] mit einem Kurzglasfaseranteil von 20 % dient als weiteres Vergleichsmaterial. Es sei darauf hingewiesen, dass die mechanischen Eigenschaften von glasfaserverstärkten Polypropylenen stark variieren und die angeführten Kennwerte lediglich ein Vergleichsmaterial repräsentieren. Die Materialdichte der spritzgegossenen Prüfkörper wurde gravimetrisch über das Auftriebsverfahren nach [DIN EN ISO 1183] bestimmt. Die ermittelten Materialkennwerte sind im Anhang Kapitel 9 hinterlegt.

9.2.1 Zugeigenschaften


Mit Hilfe des Zugversuchs wurden Steifigkeit und Festigkeit der Recyclate bei quasi-statischer Belastung untersucht und die ermittelten Kennwerte mit weiteren faserverstärkten Thermoplasten verglichen.

9.2.1.1 Versuchsdurchführung

Zugmoduln sowie -festigkeiten der Recyclate und des reinen Polypropylens sind anhand der [DIN ISO EN 527] für Kunststoffe bestimmt worden. Die Versuchsparameter sind in Tabelle 9.2 angeführt.

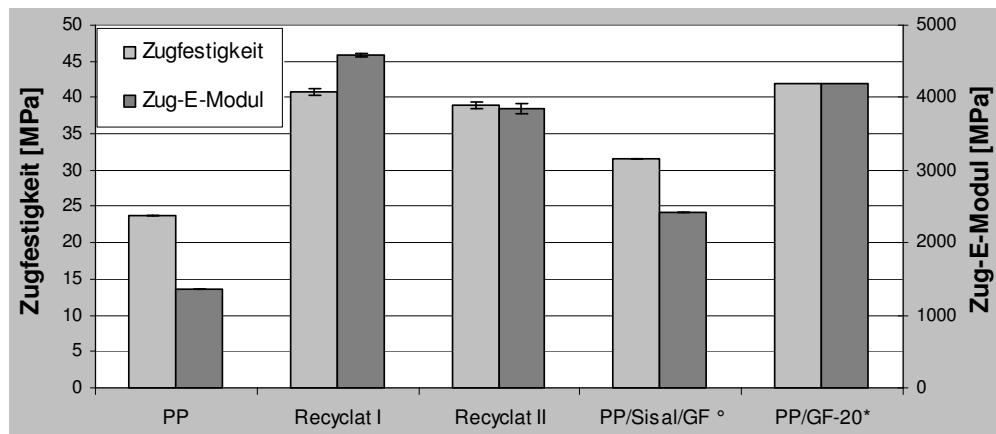
Tabelle 9.2: Versuchsparameter der Zugprüfung des Recyclats

Zugversuch		
Prüfvorschrift	DIN EN ISO 527	
Prüfmaschine	Zwick/Roell Z 250	
Prüfkörpertyp	5	
Abmaße Prüfkörper [mm]	L x B x H: 80,0 x 10,1 x 4,02	
Vorkraft	2 N	
Klima	Normklima	
Prüfgeschwindigkeit	Zugmodul: 2 mm/min bis Versagen: 10 mm/min	
Probenanzahl pro Material	5	



9.2.1.2 Ergebnisdarstellung

Das Zugmodul und die -festigkeit beider Recyclatmischungen und des zugefügten Polypropylens sowie die Eigenschaften der Vergleichsmaterialien sind in Abbildung 9.3 dargestellt. Die geringe Streuung der Versuchsergebnisse lässt auf eine homogene Verteilung der Glasfasern und der Papierpartikel in der Matrix schließen.



° aus [JA09]; * aus [D-PO20]

Abbildung 9.3: Materialkennwerte der Recyclate bei Zugbelastung

Der Vergleich des reinen Polypropylens (Borealis 170 MO) mit den Recyclatmischungen veranschaulicht die verstärkende Wirkung der Papierpartikel und Glasfasern durch die höheren Zugkennwerte. Wie in Tabelle 3.1 dargestellt, weist der Testliner der betrachteten Papierwabe in Maschinenrichtung ein Zugmodul von 5 104 MPa und eine -festigkeit von 37 MPa sowie senkrecht zur Maschinenrichtung ein Zugmodul von 2 016 MPa und eine -festigkeit von 18 MPa auf. Hingegen zeigen die Zugversuche des eingesetzten Polypropylens ein Modul von 1 370 MPa und eine Festigkeit von 23,8 MPa auf. Lediglich die Zugfestigkeit senkrecht zur Maschinenrichtung des Testliners ist im Vergleich zum betrachteten Polypropylen geringer. Wegen der deutlich höheren Steifigkeit des eingesetzten Testliners ist von einer Verstärkung der Polypropylenmatrix durch die Papierpartikel auszugehen. Auf Basis dieser Erkenntnis werden im Folgenden neben den Glasfa-

sern ebenfalls die Papierpartikel als Verstärkungsmaterial angesehen. Die mechanischen Zugkennwerte des Recyclats I sind aufgrund des größeren Anteils der Verstärkungsmaterialien im Vergleich zum Recyclat II höher.

Die Gegenüberstellung der Kennwerte mit dem PP/Sisal/GF-Compound veranschaulicht die höheren mechanischen Eigenschaften der Recyclatmischungen, welche auf die höheren Verstärkungsanteile der Sandwichrecyclate zurückzuführen sind. Sowohl Zugfestigkeit als auch -modul beider Recyclate sind vergleichbar zum angeführten PP/GF-20.

9.2.2 Charpy-Schlageigenschaften


Zur Bewertung des Werkstoffverhaltens bei dynamischer Belastung, wie sie beispielsweise durch einen Crash hervorgerufen wird, wird die Schlagzähigkeit von Kunststoffen durch den Kerbschlagversuch ermittelt.

9.2.2.1 Versuchsdurchführung

Das Energieabsorptionsvermögen bei schlagartiger Beanspruchung durch ein Pendel, bezogen auf den Probekörperquerschnitt, wird als Vergleichsgröße zur Beurteilung der Kerbschlagzähigkeit verschiedener Werkstofftypen herangezogen. Die Schlagzähigkeit gibt somit Auskunft über Sprödigkeit bzw. Zähigkeit bei dynamischer Beanspruchung der betrachteten Recyclate und ermöglicht eine Gegenüberstellung mit den Materialien aus Kapitel 9.2. Die verwendeten Versuchsparameter zur Bestimmung der Charpy-Schlageigenschaften sind in Tabelle 9.3 angegeben.

Tabelle 9.3: Versuchsparameter der Schlagzähigkeitsprüfung

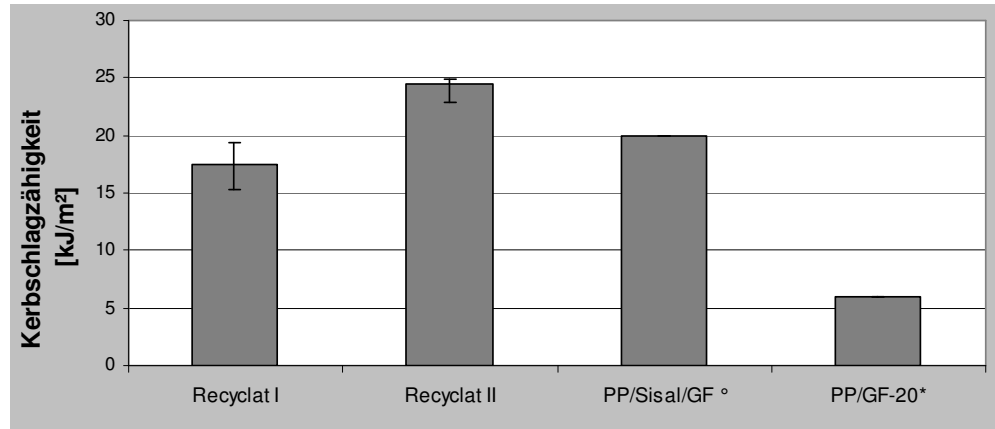
Schlagzähigkeitsprüfung	
Prüfvorschrift	DIN EN ISO 179
Prüfmaschine	Resil Impactor
Probekörpertyp	1
Abmaße Prüfkörper L x B x H: [mm]	80,0 x 10,1 x 4,02
Kerbart	A
Klima	Normklima
Schlagrichtung	Schmalseitig
Probenanzahl je Versuchsreihe	5



Bei beiden Recyclatmischungen wurde ein vollständiger Bruch des Typs C nach [DIN EN ISO 179-1] festgestellt. Im Gegensatz hierzu traten beim reinen Polypropylen Scharnierbrüche oder keine Brüche der Probekörper auf, weshalb das unverstärkte Polypropylen im Folgenden nicht weiter betrachtet wird.

9.2.2.2 Ergebnisdarstellung

In Abbildung 9.4 sind die ermittelten Charpy-Kerbschlagzähigkeiten der untersuchten Recyclate und der Vergleichsmaterialien gegenübergestellt.



° aus [JA09]; * aus [D-PO20]

Abbildung 9.4: Charpy-Schlageigenschaften der Recyclate

Der Vergleich der Schlagzähigkeiten beider Recyclatmischungen zeigt eine höhere Zähigkeit bei niedrigerem Recyclatanteil. Das Energieabsorptionsvermögen eines kurzglasfaserverstärkten Polypropylens in Abhängigkeit des Faseranteils wird in [SC10] untersucht. Hierbei bewirkt die Erhöhung des Glasfaseranteils eine positive Beeinflussung der Werkstoffzähigkeit. Die unterschiedlichen Erkenntnisse können gegebenenfalls auf verschiedene Ausführungen der Kerbe, auf Beeinflussung der Papierpartikel sowie auf die verschiedenen Verstärkungsmaterialanteile zurückgeführt werden, wobei dies im Rahmen der Arbeit nicht nachgewiesen wird.

Die Kerbschlagzähigkeit der Recyclatmischungen ist vergleichbar zum angeführten PP/Sisal/GF-Composite. Die deutlich höhere Energieabsorption der Recyclatmischungen - im Vergleich zum PP/GF-20 - ist möglicherweise auf den Einfluss der Papierpartikel zurückzuführen.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Vergleichbarkeit der Kennwerte nur beschränkt möglich ist, da die Versuche teilweise auf verschiedenen Normen und somit auf abweichenden Probengeometrien basieren.

9.3 Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse

Durch die Versuchsreihe konnte eine stoffliche Wiederverwertung der Sandwichverbundmaterialien bestehend aus Papierwaben und glasfaserverstärkten Polypropylendeckschichten durch Compoundierung aufgezeigt werden. Die Recyclatherstellung unterteilt sich in die Zerkleinerung der Sandwichbauteile, das anschließende Compoundieren des Granulats und das Kunststoffspritzgießen.

Die quasistatischen Zugversuche der Recyclate veranschaulichten, dass sowohl die Glasfasern als auch die Papierpartikel zur Materialverstärkung des Polypropylens beitragen. Beim Recyclat Compound ist ein maximales Zugmodul von 4 580 MPa sowie eine Zugfestigkeit von 40,8 MPa durch die Versuchsreihen nachgewiesen worden. Ein hohes Energieabsorptionsvermögen bei dy-

namischer Beanspruchung konnte durch Charpy-Schlagzähigkeitsversuche belegt werden, wobei der Einfluss der Papierpartikel nicht untersucht wurde.

Eine inhomogene Verteilung der Sandwichmaterialien während der Schüttgutherstellung und der anschließenden Compoundierung kann zu geringen Abweichungen der rechnerisch bestimmten Materialanteile geführt haben. Untersuchungen bezüglich der Beeinflussung von Temperatur und Feuchtigkeit wurden nicht durchgeführt. Ebenfalls kann keine Abschätzung bezüglich des Materialverhaltens, bei Beimengung von z. B. Dekormaterialien wie Polyester getroffen werden und bedarf weiterer Untersuchungen.

10 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde eine neue Sandwichtechnologie, basierend auf Papierwabenkernen und thermoplastischen faserverstärkten Deckschichten, zur Gewichtsreduzierung des Fahrzeuginterieurs erforscht. Die Erkenntnisse aus der gewonnenen Material- und die Prozesscharakterisierung sollen zukünftig einen Beitrag zur Erweiterung des industriellen Einsatzgebietes der betrachteten Sandwichtechnologie leisten.

Mit Hilfe experimenteller Untersuchungen wurden verschiedene Einflussparameter auf die mechanischen Eigenschaften der Papierwabenkerne untersucht. Die Versuchsergebnisse zeigten, dass insbesondere die Wabenkerndichte und nicht die Papiersorte oder der verwendete Klebstoff die Eigenschaften des Wabenkerns dominierend beeinflussen. Die entwickelten semi-empirischen Näherungsgleichungen ermöglichen eine Optimierung der Prognosen für die mechanischen Druck- und Schubkennwerte der Papierwaben.

Zur Darstellung geformter Sandwichbauteile wurde das Umformverhalten der Papierwaben anhand einer geometrischen Modellvorstellung beschrieben und durch zwei unterschiedliche Versuchsaufbauten untersucht. Sowohl die Modellvorstellung als auch die experimentellen Sensitivitätsanalysen zeigten, dass große Wabenzellen, niedrige Wabendicken und niedrige Papiergrammaturen das Umformverhalten positiv beeinflussen. Durch die Versuchsergebnisse konnte des Weiteren eine deutliche Verbesserung der Umformeigenschaften durch Erhöhung der Papierwabenfeuchtigkeit nachgewiesen werden.

Die durchgeführten Werkstoffprüfungen an den Sandwichverbunden ermöglichten die Analyse verschiedener Einflussparameter, wodurch ein Verständnis für das mechanische Werkstoffverhalten geschaffen wurde. Eine deutliche Steigerung der Deckschichtanbindung konnte durch Einbringen einer Schmelzfolie nachgewiesen werden. Die durchgeführten Untersuchungen an den Deckschichten verdeutlichten die mechanische Beeinträchtigung durch die geringe Konsolidierung der Nadelvliese. Des Weiteren wurde aufgezeigt, dass die strukturelle Deckschichtkonsolidierung zu einer richtungsabhängigen Beeinflussung der Sandwichbiegesteifigkeit führt. Die Gegenüberstellung der natur- und glasfaserverstärkten Deckschichten veranschaulichte die mechanischen Vorzüge der Glasfasern. Basierend auf den experimentell bestimmten Kennwerten ist zur Prognose der Sandwich- und Bauteilsteifigkeit eine analytische und numerische Vorgehensweise vorgestellt worden.

Zur industriellen Umsetzung der Bauteilfertigung sind zwei stückzahlabhängige Prozessvarianten für Klein- und Großserien aufgezeigt worden. Zur Fertigung eines Bauteils mit hohen mechanischen Anforderungen wurde das Werkzeugkonzept mit kraftgesteuertem Werkzeugschließvorgang vorgestellt. Beim Werkzeugkonzept mit weggesteuertem Werkzeugschließvorgang wurde hingegen der Fokus auf eine kostengünstige in situ Kaschierung des Sandwichbauteils gelegt. Die Untersuchungen zur Fügbarkeit des Sandwichverbundes zeigten, dass eine Reibschweißverbin-

dung zwischen Sandwichverbund und Polypropylenfügeteil unter Verwendung von niedrigen Schweißdrücken herstellbar ist.

Die Untersuchungen des Werkstoffverhaltens nach einer Klimalagerung über 3 Wochen bei 40 °C und einer Luftfeuchtigkeit von 90 % zeigten eine Reduzierung der mechanischen Sandwichkennwerte von maximal 25 Prozent. Ein selbsterlöschendes Brennverhalten des Sandwichverbundes ist durch eine genormte Versuchsreihe nachgewiesen worden. Mit Hilfe von Messungen und analytischen Berechnungsmethoden wurde ein Vergleich des Wärmedurchgangswiderstandes zwischen Sandwichverbund und konventionellen Interieurmaterialien durchgeführt. Hierbei konnte das thermische Isolationsverhalten als prägnanter Vorteil des Sandwichverbundes aufgezeigt werden, wodurch sich dessen Einsatz insbesondere bei Elektrofahrzeugen zur Steigerung der Fahrzeugeffizienz empfiehlt.

Zur ökologischen Bewertung der betrachteten Sandwichtechnologie wurde eine Bauteilökobilanz am Beispiel einer Hutablage durchgeführt. Im Vergleich zum konventionellen Materialsystem und dessen Herstellungstechnologie zeigt das Sandwichbauteil einen ökologischen Vorteil durch einen niedrigeren Energiebedarf während der Produktions- und Nutzungsphase auf, wodurch die ökologische Relevanz der Materialsubstitution dargestellt werden konnte.

Die stoffliche Wiederverwertung der Sandwichverbundmaterialien ist durch Compoundierung zum Spitzgussgranulat aufgezeigt worden. Hierbei konnten mit Hilfe der durchgeführten Werkstoffprüfungen mechanische Kennwerte der Recyclatmaterialien vergleichbar zu einem glasfaserverstärktem Polypropylen nachgewiesen werden.

Literaturverzeichnis

- [AK00] Akermo, M.; Aström, B.T.: „Modelling component cost in compression moulding of thermoplastic composite and sandwich components”. Composites Part A: Applied science and manufacturing, Vol. 31, 2000
- [AL00] Albrecht, W.; Fuchs, H.; Kittelmann, W.: „Vliesstoffe - Rohstoffe, Herstellung, Anwendung, Eigenschaften, Prüfung“. Weinheim: Willy-VCH Verlag GmbH, 2000
- [AL05] Allaoui, S.; Aboura, Z.; Benzeggagh, M.L.: „Study of the hygro-mechanical behaviour of corrugated cardboard“ in „Sandwichstructures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials”. Thomson O.T.; Bozhevolnaya E.; Lyckegaard A. Niederlande: Springer-Verlag, 2005
- [AL07] Allaoui, S.; Aboura, Z.; Benzeggagh, M.L.: „Effects of the environmental conditions on the mechanical behaviour of the corrugated cardboard“. Composites Science and Technology, 2007
- [BA03] N.N.: „Bayer Polymers focuses on profitability“ in „Reinforced Plastics“. Vol. 47, 2003
- [BE07] Bertram, M.; et al: „Improving sustainability in the transport sector through weight reduction and the application of aluminium“. International Aluminium Institute, 2007
- [BI97] Bitzer, T.: „Honeycomb Technologies – materials, design, manufacturing, applications and testing“. London (UK), Chapman and Hall, Vol. 1, 1997
- [BL10] Blechschmidt, J.: „Taschenbuch der Papiertechnik“. München: Carl Hanser Verlag, 2010
- [BO05] Borsellino, C.: „Study of Snowboard Sandwich structures“ in „Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and materials“. (NL), Springer, 2005
- [BR05] Braess, H.-H. (Hrsg.); Seiffert, U. (Hrsg.): „Handbuch Kraftfahrzeugtechnik“. 4. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2005
- [BR09] Britzke, M.: „Verbundplatten-Verfahren zur automatisierten Fertigung rahmenloser Sandwichplatten mit Papierwabenkern“. lightweight-design, 6. Ausgabe, 2009

- [BR98] Breuer, U.; Ostghate, M.; Neitzel, M.: „Manufacturing of all-thermoplastic sandwich systems by a one-step forming technique“. Polymer Composites, Vol. 19, 1998
- [BU09] Buchmayr, B.: „Umformtechnischer Leichtbau“ in „Leichtbau – Prinzipien, Werkstoffwahl und Fertigungsvarianten“. Hrsg.: Degischer, H. P.; Lüftl, S. Weinheim, Wiley-VCH Verlag, 2009
- [BU98] Wulfhorst, B.: „Textile Fertigungsverfahren – Eine Einführung“. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1998
- [CA06] Campbell, F.C.: „Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials“. Elsevier, 2006
- [CA61] Campbell, J.: „The in-plane elastic constants of paper“. Australian Journal of Applied Science, Vol. 12, 1961
- [CA99] Caduff, G.: „Integration ökologischer Aspekte in die Produktentwicklung - Ökobilanzen als Instrumente der Beurteilung“ in „Ökologische Produktgestaltung - Stromanalysen und Ökobilanzen als Instrumente der Beurteilung“. Hrsg.: Schimmelfeng L.; Lück, P.; Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag, 1999
- [CH04] Christ, A.: „Chemie und Eigenschaften von Wasserglas“ in „Zeitschrift für Kunststofftechnologie und Konservierung (ZKK)“. 1994
- [CH88] Chand, N.; Tiwary, R. K.; Rohatgi, P. K.: „Bibliography resource structure properties of natural cellulosic fibres - an annotated bibliography“. Journal of Material Science, Vol. 23, 1992
- [CO01] Corbiere-Nicolliere, T.; et al.: „Life cycle assessment of biofibres replacing glass fibres as reinforcement in plastics“. Resources, Conservation and Recycling, Vol. 33, 2001
- [CO80] Corte, H.: „Cellulose-water interaction“ in „Handbook of paper science: the raw materials and processing of papermaking“. Amsterdam, Oxford, New York: H.F. France (Ed.), Vol. 1, Ed.1, 1980
- [DA01] Daryabeigi, K.: „Heat Transfer in Adhesively Bonded Honeycomb Core Panels“. 35te AIAA Thermophysics Conference, 2001
- [DA77] Darwin, D.; Pecknold, D. A.: „Nonlinear biaxial stress-strain law for concrete“. Journal of the engineering mechanics division, Vol. 103, 1977
- [DE10] Deng, H.; et al.: „The water absorption behaviour of all-polypropylene composites and its effect on mechanical properties“. Composites: Part B: Engineering, Vol. 41, 2010

- [DI99] Diener, J.: „Ökologischer Vergleich von NMT- und GMT-Bauteilen“. 2nd International Wood and Natural Fibre Composites Symposium, Kassel, 1999
- [DO05] Domininghaus, H.: „Kunststoffe und ihre Eigenschaften“. Hrsg.: Eyerer, P.; Elsner, P.; Hirth T. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 6. Auflage, 2005
- [DO10] Doege, E. (Hrsg.); Behrens, B. A. (Hrsg.): „Handbuch Umformtechnik - Grundlagen, Technologien, Maschinen“. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2. Auflage, 2010
- [DU02] Dunky, M.; Niemz, P.: „Holzwerkstoffe und Leime – Technologie und Einflussfaktoren“. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2002
- [EC10] Ecoinvent. Onlinedatenbank: <http://ecoinvent.ch>, Oktober 2010
- [ED69] Edwards, D.K.; Catton, I.: „Prediction of heat Transfer by natural convection in closed Cylinders heated from below“. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 12, 1969
- [EI99] Eichinger, R.: „Faser-zu-Faser-Bindung“ in „Papier-Lexikon“. Götsching, L.; Katz, C. Gernsbach: Deutscher Betriebswirte-Verlag GmbH, Band 1, 1999
- [EK09] Gellerstedt, G.; Henriksson, G.; Ek, M.: „Pulp and Paper Chemistry and Technology - Paper Products Physics and Technology“. Berlin: Walter de Gruyter GmbH und Co. KG, Vol. 4, 2009
- [EY08] Eyerer, P.; Hirth, T.; Elsner, P.: „Polymer Engineering - Technologien und Praxis“. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008
- [EY96] Eyerer, P.: „Ganzheitliche Bilanzierung - Werkzeuge zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen“. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1996
- [FE09] FEFCO, Capi ContainerBoard: „European Database for Corrugated board, Life Cycle Studies“. Nov. 2009
- [FI09] Fischer, S.; et al.: „Sandwich Structures with folded Core: Manufacturing and mechanical Behaviour“. SAMPE Europe 30th International Conference, Paris (F), 2009
- [FI11] Fischer, S.; Drechsler, K.: „Aluminium Faltkerne für den Einsatz in Sandwichstrukturen“. 5te Landshuter Leichtbau-Colloquium – Leichtbau und nachhaltige Mobilität, Landshut, 2011
- [FL95] Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.: „Faserverbundbauweisen - Fasern und Matrices“. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1995

- [FL96] Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.: „Faserverbundbauweisen – Halbzeuge und Bauweisen“. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1996
- [FO06] Foo, C.C.; Chai, G.B.; Seah, L.K.: „Mechanical properties of Nomex material and Nomex honeycomb structure“. ScienceDirect-Composite Structures, Vol. 80, 2006
- [FO95] Fourme, F.: „Synthetische Fasern - Herstellung, Maschinen und Apparate, Eigenschaften; Handbuch für Anlagenplanung, Maschinenkonstruktion und Betrieb“. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1995
- [FU01] Funke, H.: „Systematische Entwicklung von Ultra-Leichtbaukonstruktionen in Faserverbund-Wabensandwichbauweise am Beispiel eines Kleinflugzeuges“. Dissertation, Universität Paderborn, 2001
- [GE03] Gendrona, G.; Danoa, M.L.; Cloutierb, A.: „A numerical study of the hygro-mechanical deformation of two cardboard layups“. Vol. 64, Composites Science and Technology, 2003
- [GH85] Ghoneim, N.A.; Halawa, M.M.: „Effect of boron oxide on the thermal conductivity of some sodium silicate glasses“. Thermochimica Acta, 1985
- [GI97] Gibson, L. J.; Ashby, M. F.: „Cellular solids – Structure and properties“. Cambridge (UK): Cambridge University Press, 1997
- [GN10] Gnann, T.; Kley, F.; Wietschel, M.: „Thermische Vorkonditionierung“. mobility 2.0, Januar 2010
- [GO09] Goede, M.: „Leichtbaupotenziale durch Mischbaustrukturen im Karosseriebau“. Vortrag in „Werkstoffsymposium Fahrzeugtechnik“. Stuttgart, 2009
- [GO99] Götsching, L.; Katz, C.: „Papier Lexikon“. Gernsbach: Deutscher Betriebswirte-Verlag, 1. Auflage, 1999
- [GR10] Grzeschik, M.; Drechsler, K.: „Experimental Studies on folded cores“. 9th International Conference on Sandwich Structures, California (USA), 2010
- [GR11] Gruber, E.: „Papier- und Polymerchemie“. Vorlesungsskriptum zum Lehrgang „Papiertechnik“ an der Berufsakademie Karlsruhe, 2011
- [HA05] Hauspurg, C.; Lützkendorf, R.: „Leichtbaustrukturen mit expandierbaren Wabenstrukturen – Einfluss der Wabengestaltung auf die Verbundeigenschaften“. Forschungsbericht, Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoffforschung, Projekt-Nr.:45/03
- [HA08] Hau, E.: „Windkraftanlagen - Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit“. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 4. Auflage, 2008

- [HE04] Henrichs, P.: „Ohne Verbundelemente bewegt sich heute nichts mehr – Leichter, besser, schneller - warum nicht auch im Möbelbau“. Vortrag, Jowat, Bayer Material Science, 2004
- [HE06] Heimbs, S.; Middendorf, P.; Maier, M.: „Sandwichstrukturen in der Flugzeugkabine: Materialmodellierung und dynamische Simulation“. Vortrag in „IVW-Kolloquium“. Kaiserslautern, 2006
- [HE08] Heimbs, S.: „Sandwichstrukturen mit Wabenkern: Experimentelle und numerische Analyse des Schädigungsverhaltens unter statischer und kurzzeitdynamischer Belastung“. Dissertationsschrift, Technische Universität Kaiserslautern, 2008
- [HE61] Hesse, F.; Tenzer, H.-J.: „Grundlagen der Papierverarbeitung“. Leipzig: VEB Verlag für Buch- und Bibliothekswesen, Band 2, 1961
- [HO65] Hollands, K.G.T.: „Honeycombs devices in flat-plate solar collectors“. Solar Energy, Conference Paper, Vol. 9, 1965
- [HR04] Herrlich, N.: „Kunststoffpraxis-Konstruktion“. WEKA MEDIA GmbH; 12. Aktualisierung, Kissing, 2004
- [ID06] Idicula, A.; et al.: „Thermophysical properties of natural fibre reinforced polyester composites“. Composites Science and Technology, Vol. 66, 2006
- [IN10] Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V.: „Handbuch Faserverbundkunststoffe - Grundlagen, Verarbeitung, Anwendung“. AVK-Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. (Hrsg.), Wiesbaden: Vieweg und Teubner-GWV Fachverlag GmbH, 3. Auflage, 2010
- [IW12] Iwan, S; Endig, A; Stamp, B.: „Anisotrope Eigenschaftscharakteristik von Wellstegwaben unter dem Einfluss von Feuchtigkeit“. 13te Chemnitzer Textiltechnik-Tagung, 2012
- [JA09] Jarukumjorn, K.; Suppakarn, N.: „Effect of glass fiber hybridization on properties of sisal fiber–polypropylene composites“. Composites, 2009
- [JA80] Casey, J. P.: „Pulp and Paper – Chemistry and Chemical Technology“. New York, Chichester, Brisbane, Toronto: John Wiley and Sons Inc., Vol. 2, 1980
- [JO04] Joshi, S.V.; Drzal, L.T.; Mohanty, A.K.; Arora, S.: „Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?“ Composites, Vol. 35, 2004
- [JO09] Josten, E.; Reiche, T.; Wittchen, B.: „Holzfachkunde - ein Lehr-, Lern- und Arbeitsbuch“. Wiesbaden, Vieweg + Teubner Verlag, 5. Auflage, 2009

- [JO99] Joseph, P.V.; Joseph, K.; Thomas, S.: „Effect of processing variables on the mechanical properties of sisal-fiber-reinforced polypropylene composites”. Composites Science and Technology, Vol. 59, 1999
- [KA03] Kazansky, S.; Dubovsky, V.; Ziskind G.; Letan R.: „Chimney-enhanced natural convection from a vertical plate: Experiments and numerical simulations”. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 46, 2003
- [KA04] Karger-Kocsis, J.: „Werkstoffe“ in „Handbuch Verbundwerkstoffe – Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung“. Hrsg.: Neitzel, M.; Mitschang, P.; München, Wien: Carl Hanser Verlag, 3. Auflage, 2004
- [KA05] Kaufmann, A.: „Schäumen“ in „Kunststoffe und ihre Eigenschaften“. Hrsg.: Eyerer, P.; Elsner, P.; Hirth T.; Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 6. Auflage, 2005
- [KA06] Kalweit, A.; et al.: „Handbuch für technisches Produktdesign - Material und Fertigung, Entscheidungsgrundlage für Designer und Ingenieure“. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2006
- [KA96] Kanuit, C.; Cetiner, H.; Franzeck, J.: „Ökologische Bilanzierung in der Automobilindustrie – dargestellt am Beispiel eines PKW-Bauteils aus verschiedenen Werkstoffen“. VDI-Bericht, 1996
- [KA97] Karlsson, K. F.; Astronm, T. B.: „Manufacturing and applications of structural sandwich components“. Composites Part A: applied science and manufacturing, Vol. 28, 1997
- [KE04] Kehrle, R.; Drechsler ,K.: „Manufacturing of folded core structures for technical Applications”. SAMPE Europe, 25th International Conference, Paris (F), 2004
- [KE09] Kehrle, R.: „Sandwichbauweisen in der Luftfahrt“. Tagung „Multi Material Design für Leichtbauanwendungen“. Hochschule Landshut, April 2009
- [KL09] Klein, B.: „Leichtbaukonstruktion – Berechnungsgrundlagen und Gestaltung“. Wiesbaden: Vieweg und Teubner GWV Fachverlag, 2009
- [KL97] Kalaprasad, G.; Joseph, K.; Thomas, S.: „Theoretical modelling of tensile properties of short sisal fibre-reinforced low density polyethylene composites“. Journal of Material Science, Vol. 32, 1997
- [KM03] Kammer, C.; et al.: „Kunststoffschweißen“. Taschenbuch „Aluminium: Weiterverarbeitung und Anwendung“. Düsseldorf: Aluminium-Verlag Marketing & Kommunikation GmbH, 16. Auflage, 2003

- [KO08] Kohn, T.: „Einsatz von Faserverbund-Sandwichplatten im Schiffbau - Rationelle Fertigung dank standardisiertem Design“. *lightweight-design*, 3. Ausgabe, 2008
- [KT09] Klett, Y.: „Cutting edge cores: Multifunctional Core Structures“. DGLR, Jahrestagung, Aachen, 2009
- [LA01] Lampke, T.: „Beitrag zur Charakterisierung naturfaserverstärkter Verbundwerkstoffe mit hochpolymerer Matrix“. Dissertationsschrift, Technische Universität Chemnitz, 2001
- [LA02] Lange, K. (Hrsg.): „Umformtechnik“. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2. Auflage, 2008
- [LE79] Lehmann, H.: „Werkstoffe der Papierverarbeitung“. Leipzig: VEB Fachbuchverlag, 1. Auflage, 1979
- [LU82] Lünenschloß, J.; Albrecht, W.: „Vliesstoffe“. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 1982
- [MA03] Mäkelä, P.; Östlund, S.: „Orthotropic elastic-plastic material model for paper materials“. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, 2003
- [MO09] Moro, J. L.: „Baukonstruktion vom Prinzip zum Detail“. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, Band 2, 2009
- [MU03] Müller, D. H.; Krobjilowski A.: „Optimierte Presstechnologie für naturfaserverstärkte Thermoplaste“. Fachvortrag in „Nachhaltige Mobilität - Naturfaserwerkstoffe für die Verkehrstechnik“. Hannover, 2003
- [MU09] Müller, E.; et al.: „Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben“. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009
- [NE06] Nentwig, J.: „Kunststoff-Folien - Herstellung-Eigenschaften-Anwendung“. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 3. Auflage, 2006
- [OD02] Odenwald, S.: „Eigenschaften und Umformverhalten naturfaserverstärkter Thermoplaste“. Dissertationsschrift, Technische Universität Chemnitz, 2002
- [PA75] Panc, V.: „Theories of elastic plates“. Prag (CZ): Academia Publishing House, 1975
- [PA99] Papier, G.: „Holzhaltige Papiere“ in „Papier Lexikon“. Götsching L.; Katz C. Gernsbach: Deutscher Betriebswirte-Verlag, Band 2, 1. Auflage, 1999
- [PF02] Pflug, J.: „Development of a sandwich material with polypropylene/natural fibre skins and paper honeycomb core“. Brügge, 10th European Conference on Composite Materials (ECCM-10), 2002

- [PF04] Pflug, J.; et al.: „Continuously Produced Paper Honeycomb Sandwich Panels for Furniture Applications“. 5th Global Wood and Natural Fibre Composites Symposium, Kassel, April 2004
- [PL02] Pflug, J.; et al.: „Sandwichmaterialien und –bauteile mit Papierwabenkern und naturfaserverstärkten Decklagen“. 10. Internationale Tagung „Stoffliche Verwertung nachwachsender Rohstoffe“. Chemnitz, Okt. 2002
- [PL11] Plate, P.: „Verbundwerkstoffe mit Polyurethanmatrix - Anwendungen, Möglichkeiten und Ausblick“. Fachvortrag in „SAMPE Symposium, Faserverbundwerkstoffe - Hochleistung und Großserie“. Aachen, 2011
- [PO05] Poppensieker, J.; Thömen, H.: „Wabenplatten für den Möbelbau - Arbeitsbericht“. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft und Universität Hamburg, Hamburg, 2005
- [PO09] Pohl, A.: „Strengthened corrugated Paper Honeycomb for application in structural elements“. Dissertationsschrift, ETH Zürich, 2009
- [PR10] ProBas: „Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente“. Onlinedatenbank: <http://www.probas.umweltbundesamt.de>, Oktober 2010
- [RO59] Romanowski, W. P.: „Handbuch der Stanzereitechnik“. Berlin: VEB Verlag Technik, 2. Auflage, 1959
- [SA90] Satyanarayana, K. G.; et al.: „Natural Fibre-Polymer Composites“. Cement & Concrete Composites, Vol. 12, 1990
- [SA99] Saur, K.: „Der Einfluss der Werkstoffauswahl auf die Umweltrelevanz von Produkten – Beispiele aus der Automobilindustrie“ in „Ökologische Produktgestaltung - Stromanalysen und Ökobilanzen als Instrumente der Beurteilung“. Hrsg.: Schimmelfeng, L.; Lück, P.; Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1999
- [SC05] Scherble, J; Jahn, T.: „New Rohacell Development for Resin infusion Process“ in „Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and materials“. NL, Springer, 2005
- [SC07] Schürmann, K.: „Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden“. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2. Auflage, 2007
- [SC08] Schüle, H.: „Kunststoffschweißen“ in „Polymer Engineering – Technologien in der Praxis“. Hrsg.: Eyerer, P.; Hirth T.; Elsner, P. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2008

- [SC09] Schäfer, D.F.J.: „Werkstoff- und Verfahrensentwicklung für Kunststoffbauteile aus naturfaserverstärkten Thermoplasten“. Dissertationsschrift, Universität Stuttgart, 2009
- [SC10] Schößig, K.: „Schädigungsmechanismen in faserverstärkten Kunststoffen – Quasistatische und dynamische Untersuchungen“. Wiesbaden: Vieweg und Teubner GWV Fachverlag GmbH, 1. Auflage, 2010
- [SC81] Schulgasser, K.: „On the in-plane elastic constants of paper“. Fibre Science and Technology, Vol. 15, 1981
- [SC83] Schulgasser, K.: „The In-Plane Poisson Ratio of Paper“. Fibre Science and Technology, Vol. 19, 1983
- [SC95] Scott, W. E.; Abbott, J. C.; Trosset, S.: „Properties of Paper - an Introduction“. Atlanta, Georgia: TAPPI Press, 2nd. Ed, 1995
- [SM04] Sommer, M; Edelmann, K.; Wöginger, A.: „Thermoplastische Prepregs und Halbzeuge“ in „Handbuch Verbundwerkstoffe - Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung“. Hrsg.: Neitzel, M.; Mitschang, P.: München, Wien: Carl Hanser Verlag, 3. Auflage, 2004
- [SM05] Schmitz, N.: „Innovationen bei der Bioethanolerzeugung und ihre Auswirkungen auf Energie- und Treibhausgasbilanzen“ in „Nachwachsende Rohstoffe“. Münster: Landwirtschaftsverlag, Band 26, 2005
- [SO04] Sommer, M; Edelmann, K.; Lahr, R.: „Pressverfahren“ in „Handbuch Verbundwerkstoffe - Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung“. Hrsg.: Neitzel, M.; Mitschang, P.: München, Wien: Carl Hanser Verlag, 3. Auflage, 2004
- [SR05] Schröter, W.: „Künstliche Silicate“ in „Taschenbuch der Chemie“. Hrsg.: Lautenschläger, K. H.; Schröter, W.; Wanninger, A. Frankfurt am Main: Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch GmbH, 20. Aufl., 2005
- [ST10] Stamp, B.; Pfahler, J.; Stritt P.: „Energiebilanzierung in frühen Phasen der Bauteilentwicklung“. Lightweight-design, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 6. Ausgabe, 2010
- [SW61] Swann, R.T.; Pittman, C.M.: „Analysis of effective thermal conductivities of honeycomb-core and corrugated-core - Sandwich Panels“. National Aeronautics and Space Administration, Washington, 1961
- [TE88] Tenzer, H.-J.: „Leitfaden der Papierverarbeitungstechnik“. Leipzig: VEB Fachbuchverlag, 1. Auflage, 1988

- [TH95] Thomason, J.L.; Vluga, M.A.: „Influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre-reinforced polypropylene: Part 1. Tensile and flexural modulus“. Composites Part A 27: Applied Science and Manufacturing, 1995
- [TH96] Thomason, J.L.; et al.: „Influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre-reinforced polypropylene: Part 3. Strength and strain at failure“. Composites Part A 27: Applied Science and Manufacturing, 1996
- [TI97] Tiedemann, A.: „Die Ökobilanzen als Umwelt-Bewertungsinstrument für Produkte und für Dienstleistungen“ in „Ökobilanzen: Seminar der Zentralen Informationsstelle Umweltberatung“. Hrsg.: Kohmanns, B.; Koller U.; GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Bayern, 1997
- [TU05] Türschmann, V.: „Leichtbau mit Sinuswaben - Chancen für Handwerk und Industrie“. HK Holz- und Kunststoffverarbeitung, Teil 1, 2005
- [UR10] Urban, A. I.; Halm G.: „Praktikable Klimaschutzpotenziale in der Abfallwirtschaft“. University press GmbH, Kassel, 2010
- [VD06] Verein Deutscher Ingenieure: „VDI-Wärmeatlas“. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 10. Auflage, 2006.
- [VE09] Verband Deutscher Papierfabriken e.V.: „Papier ABC“. Bonn, 2009
- [WA05] Wang, W.; Sain, M.; Cooper, P.A.: „Study of moisture absorption in natural fiber plastic composites“. Composites Science and Technology, Vol. 66, 2005
- [WE00] Werner, F.; Richter, K.: „Economic Allocation in LCA: A case study about aluminium window frames“. Int. Journal LCA 5, Landsberg: ecomed Publishers, 2000
- [WI07] Wiedemann, J.: „Leichtbau – Elemente und Konstruktion“. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 3. Auflage, 2007
- [WI99] Wiens, M.: „Längsrichtung“ in „Papier Lexikon“. Götsching L.; Katz C. Gernsbach: Deutscher Betriebswirte-Verlag, 2. Band, 1. Auflage, 1999
- [WO05] Woicke, N.: „Thermo-Mechanische Eigenschaften“ in „Kunststoffe und ihre Eigenschaften“. Hrsg.: Eyerer, P.; Elsner, P.; Hirth T. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 6. Auflage, 2005
- [WO07] Wötzel, K.: „Ökobilanzierung der Altfahrzeugverwertung am Fallbeispiel eines Mittelklassefahrzeuges und Entwicklung einer Allokationsmethodik“. Dissertationsschrift, Chemnitz, 2007

- [WO77] Wolfgang, O.: „Über das mechanisch-thermische Umformen von Papier bei der Wellpappenherstellung im Hinblick auf das Laufverhalten von Wellpapier“. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1977
- [WO98] Wöbcken, W.: „Trocknen“ in „Kunststoff-Lexikon“. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 9. Auflage, 1998
- [WU09] Wunsch, C.; Hoffmann G.; Bilitewski, B.: „Energieeffizienzsteigerungsmaßnahmen bei der Müllverbrennung – Kosten und Nutzen“ in „Thermische Abfallbehandlung“. Hrsg.: Urban, A. I.; Bilitewski, B. München: 14te Fachtagung, 2009
- [XU01] Xu, X. F.; Quiao, P.; Davalos, F.: „Transverse shear stiffness of composite honeycomb core with general configuration“. Journal of Engineering Mechanics, Vol. 127, 2001
- [ZE97] Zenkert, D.: „The Handbook of Sandwich Construction“. Engineering Materials Advisory Services Ltd., London (UK), 1997

Normenverzeichnis

- [DIN 18230] Norm. DIN 18230: Baulicher Brandschutz im Industriebau, Teil 3. Beuth Verlag Berlin, September 2008
- [DIN 1910] Norm. DIN 1910: Schweißen – Schweißen von Kunststoffen Verfahren, Teil 3. Beuth Verlag Berlin, September 1977
- [DIN 53293] Norm. DIN 53293: Prüfung von Kernverbunden, Biegeversuch. Beuth Verlag Berlin, 1982
- [DIN 53294] Norm. DIN 53294: Prüfung von Kernverbunden – Schubversuche. Beuth Verlag Berlin, Februar 1982
- [DIN 53295] Norm. DIN 53295: Prüfung von Kernverbunden, Trommel-Schälversuch. Beuth Verlag Berlin, Februar 1982
- [DIN 55468] Norm. DIN 55468-1: Packstoffe, Wellpappe, Teil 1: Anforderungen, Prüfung. Beuth Verlag Berlin, August 2004
- [DIN 75200] Norm. DIN 75200: Bestimmung des Brennverhaltens von Werkstoffen der Kraftfahrzeuginnenausstattung. Beuth Verlag Berlin, September 1980
- [DIN 8580] Norm. DIN 8580: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung. Beuth Verlag Berlin, September 2009
- [DIN EN 12664] Norm. DIN EN 12664: Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät - Trockene und feuchte Produkte mit mittleren und niedrigem Wärmedurchlasswiderstand. Beuth Verlag Berlin, Mai 2001
- [DIN EN ISO 1183] Norm. DIN EN ISO 1183-1: Kunststoffe - Verfahren zur Bestimmung der Dichte von nicht verschäumten Kunststoffen, Teil 1. Beuth Verlag Berlin, März 2011
- [DIN EN ISO 14040] Norm. DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement - Ökobilanzen - Grundsätze und Rahmenbedingungen. Beuth Verlag Berlin, November 2009
- [DIN EN ISO 178] Norm. DIN EN ISO 178: Kunststoffe - Bestimmung der Biegeeigenschaften, Teil 1. Beuth Verlag Berlin, Juli 2008
- [DIN EN ISO 179-1] Norm. DIN EN ISO 179-1: Kunststoffe - Bestimmung der Charpy-Schlageigenschaften, Teil 1. Beuth Verlag Berlin, November 2010

- [DIN EN ISO 1924-2] Norm. DIN EN ISO 1924-2: Papier und Pappe, Bestimmung von Eigenschaften bei Zugbeanspruchung, Teil 2: Verfahren mit konstanter Dehngeschwindigkeit. Beuth Verlag Berlin, Mai 2009
- [DIN EN ISO 527] Norm. DIN EN ISO 527: Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften. Beuth Verlag Berlin. April 1996
- [DIN EN ISO 7438] Norm. DIN EN ISO 7438: Metallische Werkstoffe – Biegeversuch. Beuth Verlag Berlin. Oktober 2005
- [FMVSS 302] Norm. FMVSS 302: Flammability of Interior Materials. U.S. Department of transportation, Oktober 1991

Datenblätter

- [D-PO20] Datenblatt „POLYFORT® FPP 20 GF - Fa. A. Schulman GmbH“. CAMPUS®-PLASTICS
- [D-WF11] Datenblatt „Allgemeine technische Daten - A-Welle, B-Welle, C-Welle, T-Welle“. Fa. Wabenfabrik - innovativer Leichtbau, Chemnitz, www.wabenfabrik.de, 2011
- [D-AL] Datenblatt „5056 Alloy Hexagonal Aluminium Honeycomb – Specification Grade“. HexWeb™ Honeycomb Attributes and Properties, Hexcel, 1999
- [D-GL] Datenblatt „HRP Fiberglass Reinforced Phenolic Honeycomb“. HexWeb™ Honeycomb Attributes and Properties, Hexcel, 1999
- [D-AR] Datenblatt „HRH-10 Aramid Fiber/Phenolic Resin Honeycomb“. HexWeb™ Honeycomb Attributes and Properties, Hexcel, 1999
- [D-PP] Datenblatt „DB-DE-PP8-80_PA7-01-D“ und „DB-DE-PP8-120_PA7-07-D“. Tubus Waben GmbH & CoKg, Rottenbach, 2008

Patent- und Offenlegungsschriften

- [P-BR10] Bracke, K.: „Process for the Production of a three dimensional shaped sandwich structure“. EP 1 993 808 B1, Pub. 2010
- [P-HO02] Hookham, N.; Lee A., Patentschrift: „Forming Process for cellulose paper based Honeycomb structures“. US 2002/0086912, Pub. 2002
- [P-SP05] Spengel, E. M., Patentschrift.: „Mehrlagiges Formteil und Verfahren zu seiner Herstellung“. DE 10 2004 015 472 B4, Pub. 2005
- [P-ST10] Stamp, B., Patentschrift: „Verbundbauteil mit einer Wabenstruktur“. DE 10 2008 062 678 A1, Pub. 2010
- [P-ST11] Stamp, B.; et al., Offenlegungsschrift: „Sandwich component and Method of the Production thereof“. WO 088871 A2, Pub. 2011
- [P-ST12] Stamp, B.; et al., Offenlegungsschrift: „Sandwich component and method producing same“ WO 062389 A1, Pub. 2012

Anhang

Anhang Kapitel 3

Wellenteilung und Wellenhöhe der untersuchten Wabenkerne

Wellenart	Wellenteilung P_C [mm]	Wellenhöhe H_C [mm]	Quotient P_C/H_C
B-Welle	5,69	2,02	2,81
C-Welle	7,92	3,62	2,18
A-Welle	8,97	4,97	1,80
K-Welle	14,1	6,2	2,27

aus [D-WF11]

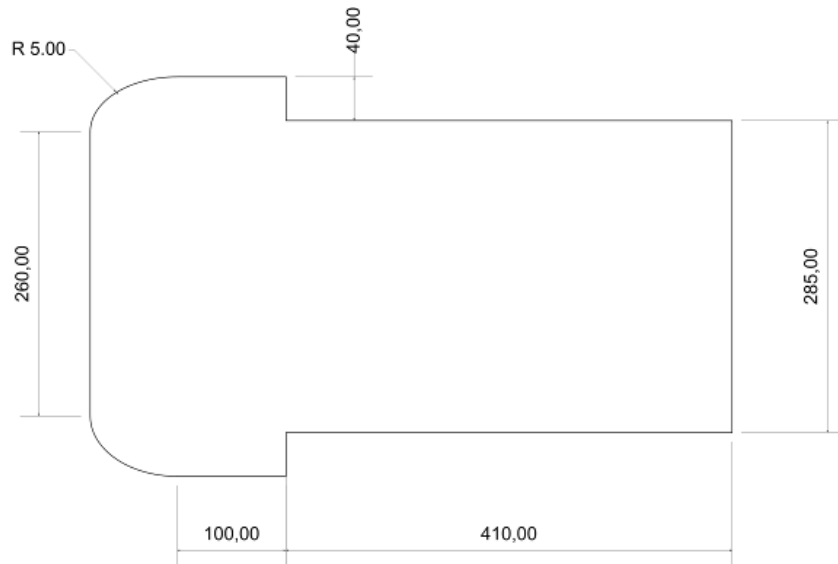
Versuchsparameter der Papier-Zugprüfung

Zugprüfung von Papier			
Prüfvorschrift	angelehnt an DIN EN ISO 1924-2		
Prüfmaschine	Hegewald & Peschke Universalprüfmaschine Inspekt 10		
Probengröße	180 mm x 25 mm		
Papierproben	TL 115, KSP 70; jeweils MD und CD		
Klima	Normklima		
Prüfgeschwindigkeit	15 mm/min		
Vorkraft	1 N		
Probenanzahl	4		
Probenpräparation	Vorkonditionierung bei RK papierverstärkt an Einspannstelle		

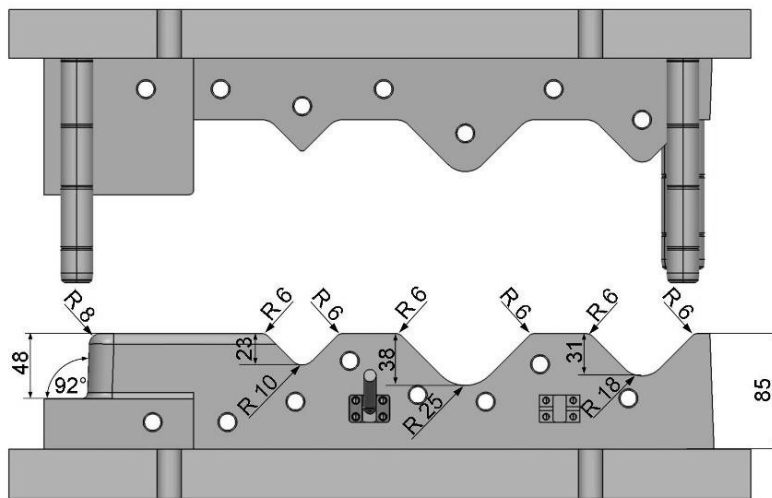
Mechanische Papierwabenkennwerte

Wabentyp	Waben- kerndichte [kg/m ³]	Waben- kernehöhe [mm]	Druckeigenschaften		Schubeigenschaften			
			E ₃₃ -Richtung		G ₃₁		G ₃₂	
			Festigkeit [kPa]	Modul [MPa]	Festigkeit [kPa]	Modul [MPa]	Festigkeit [kPa]	Modul [MPa]
A ~ TL-90 WG	62	10	1169	79	615	50	292	23
A ~ TL-90 WL	58	10	634	43	541	21	268	15
A ~ TL-115 WG	83	10	1268	87	682	51	371	25
A ~ TL-115 WL	74	10	892	57	836	31	463	20
A ~ KSP-50 WG	39	10	615	28	372	23	164	17
A ~ KSP-70 WG	54	10	675	33	519	34	179	13
A ~ KP-200 WG	113	10	1488	70	1403	87	637	34
A ~ WST-110 WG	73	10	976	48	647	42	311	15
B ~ KSP-70 WG	115	10	2383	84	1276	78	384	18
C ~ TL-115 WG	91	10	1399	52	1305	74	406	24
C ~ TL-115 WL	82	10	957	34	724	28	303	14
E ~ KSP-50 WG	174	10	6911	165	3293	295	1512	74
K ~ TL-120 WG	59	10	1364	71	926	58	436	26
HEX-WST 160	54	10	714	40	551	28	445	17
HEX-TL 150	48	10	808	56	654	35	473	20

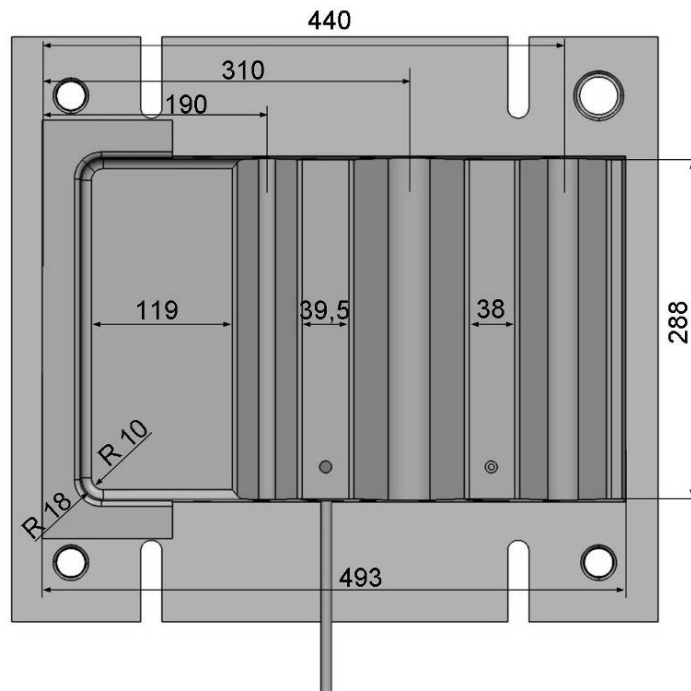
Anhang Kapitel 4



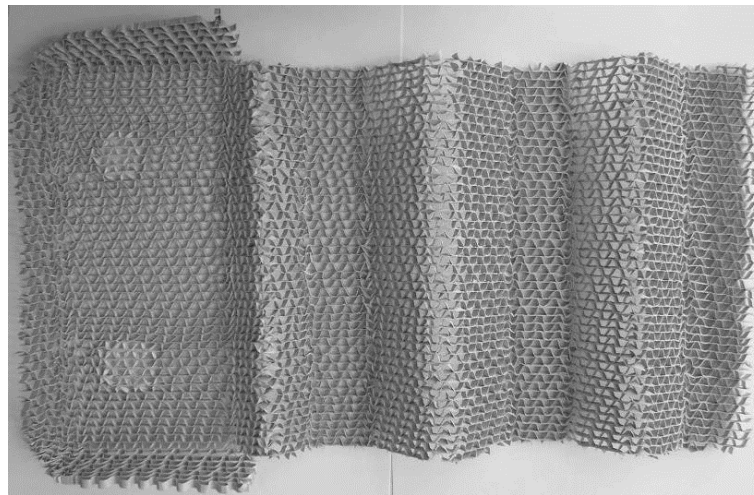
Abmessungen der Wabenzuschnittschablone für Umformwerkzeug



Seitenansicht Umformwerkzeug



Draufsicht Umformstammwerkzeug



Formstabile umgeformte Wellstegwabe

Umformgrößen der Papierwaben

Wabenparameter			Umformwerkzeug										Biegeversuch				
Kurzzeichen	Bezeichnung	Dicke [mm]	Orientierung		Schädigungszahl S [%]				Außenradien r_a [mm]				Biegewinkel α [°]				
			Wabenart	Variation	axialkanten 2-10	biaxialkanten 1a-c	gesamt	trocken	feucht	trocken	feucht	trocken	feucht	trocken	bei [%]		
W1		3	┴	A~ TL-90 WG	┴	trocken	14	13	20	12; 20	trocken	13,8	18	18	nicht geprüft		
						feucht	12	1	10,2		10						
						trocken	23	16	20		23,6	18	18	71		145	
						feucht	33	25	20		31,8	25	20	41		114	
						trocken	43	33	20		48,5	-	25	20		76	145
						feucht	60	46	-		60,6	-	18	-		42	20
W2	Wellsteg-Waben	3	┴	A~ TL-90 WL	┴	trocken	13	9	20	20	trocken	12,0	18	18	nicht geprüft		
						feucht	11	4	10,5		18						
						trocken	26	15	20		23,4	18	18	71		145	
						feucht	28	12	20		27,5	25	20	39		12; 20	
						trocken	50	25	20		53,0	-	18	20		145	145
						feucht	72	29	12; 20		70,6	-	18	20		47	12; 20
W3		3	┴	A~ TL-115 WG	┴	trocken	26	12	12	-	trocken	23,3	18	18	nicht geprüft		
						feucht	22	16	20		21,7	-	10	20			
						trocken	31	21	20		31,8	18	18	41		145	
						feucht	46	12	20		46,1	-	18	12; 20		106	12; 20
						trocken	57	23	12		57,3	-	18	20		56	145
						feucht	62	29	12		62,2	-	18	20		31	20

Umformgrößen der Papierwaben

Wabenparameter				Umformwerkzeug							Biegeversuch																	
Kurzzeichen	Bezeichnung	Wabenart	Variation	Dicke [mm]	Orientierung	Schädigungszahl S [%]				Außenradien r_a [mm]				Biegewinkel α [°]														
						axialkanten 2-10		biaxialkanten 1a-c		gesamt		trocken	feucht	bei [%]	trocken	feucht	bei [%]	trocken	feucht	bei [%]								
				trocken	feucht	bei [%]	möglich bei Feuchtigkeit [%]	trocken	trocken	feucht	bei [%]																	
W4			Q TL-115 WG	3	┴	19	10	20	-	23,7	18	18	12; 20	nicht geprüft														
						17	3	12		20,9	10	12																
						38	30	20		39,0	18	18	12; 20															
						32	23	12		37,1	-	25	16					145	12; 20									
						51	32	12		55,1	-	-	33					116	20									
						74	59	20		72,2	-	-	11					145	12; 20									
W5	Wellstegwaben		K TL-115 WL	3	┴	nicht herstellbar																						
																		30	18	12	20	28,5	18	18	12; 20	145	145	12; 20
																		24	2			22,6	10	10		120	20	
																		32	32	20		32,3	18	18	20	75	145	20
																		36	15	12		39,2	-	-		43	138	12
W6			A KSP-50 WG	3	┴	nicht herstellbar																						
																		8	7	20	-	8,6	-	18	12; 20	10	145	12; 20
																		24	20			20,9	-	-		145		
																		38	17	20		40,0	18	18	12; 20	145	145	12; 20
																		39	19	12		38,4	-	25	12	82	145	20

Umformgrößen der Papierwaben

Wabenparameter			Umformwerkzeug										Biegeversuch								
Kurzzeichen	Bezeichnung	Dicke [mm]	Schädigungszahl S [%]		Außenradien r_a [mm]		Biegewinkel α [°]		axialkanten 2-10		biaxialkanten 1a-c		gesamt		trocken	feucht	bei [%]				
			trocken	feucht	bei [%]	möglich bei Feuchtigkeit [%]	trocken	feucht	trocken	feucht	trocken	feucht	trocken	feucht				bei [%]			
W7	Wellsteg-Waben	3	┴	1	8	20									18	18	12; 20	nicht geprüft			
				6	4	12										10	12				
		6	┴	21	21	20										18	18	12; 20	69	145	12; 20
				28	12	12										-	-		64		
		9	┴	49	22	20										18	18	12; 20	145	145	12; 20
				61	24											-	20		32	123	12
nicht herstellbar																					
H1	Hexagonal-Waben	6	┴	23	19	20									18	10	12; 20	19	145	12; 20	
				10	1	12; 20										8,7			145		
		9	┴	26	16	20										18	18	12; 20	145	145	12; 20
				44	11											-			53,5		
		3	┴	nicht herstellbar																	
				nicht herstellbar																	
H2	Hex WS-160 WG	6	┴	27	25	20									18	10	20			nicht geprüft	
				31	5											-			28,5		
		9	┴	35	39	20										18	18	12; 20	145	145	12; 20
				50	7	12										-			51,2		
		nicht herstellbar																			
		nicht herstellbar																			

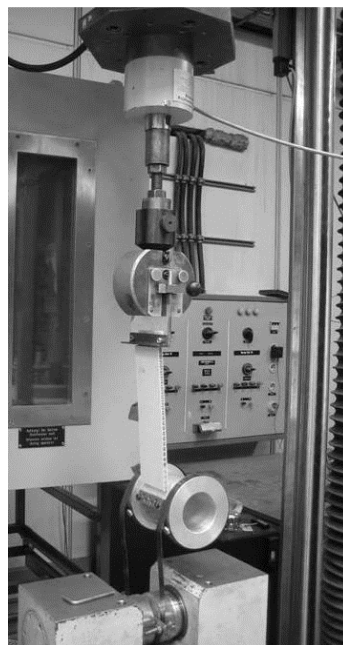
Anhang Kapitel 5

Ergebnisse 4-Punkt-Biegeversuch: Sandwichverbund

Bezeichnung					4-Punkt-Biegeversuch				
Wabenkern	Folie	Fasermassenanteil [%]	Grammatur [g/m ²]	Ausrichtung	Sandwichdicke [mm]	Biegekraft [N]	E-Modul [N/mm ²]		
A ~ TL-90 WG	-	30	400 PP/GF	V1W1	7,35	183	1164		
		40			7,21	175	1202		
		50			8,07	174	1188		
		60			8,01	97	1023		
	0,1	30			7,40	242	1161		
		40			7,50	217	1346		
		50			7,99	208	1425		
		60			8,17	170	1275		
	0,3	30			7,33	282	1212		
		40			7,50	275	1540		
		50			7,94	279	1432		
		60			8,15	245	1498		
	-	-	30		300 PP/GF	7,07	150	1063	
			40			6,87	133	978	
			50			7,15	103	1094	
			60			7,10	71	929	
		-	-		30	200 PP/GF	6,96	106	725
					40		7,00	66	760
					50		7,30	63	744
					60		6,83	64	915
A ~ TL-90 WG	-	30	400 PP/NF	8,11	129	654			
		40		8,03	128	760			
		50		8,15	104	676			
		60		8,23	97	665			
A ~ TL-115 WG	-	40	450 PP/GF	V1W1	10,62	383	1396		
				V1W2		241	1057		
				V2W1		287	953		
				V2W2		216	727		
C ~ TL-115 WG	-	40	450 PP/GF	V1W1	10,88	429	1336		
				V1W2		312	1035		
				V2W1		334	1050		
				V2W2		263	668		
K ~ TL-120 WG	-	40	450 PP/GF	V1W1	10,11	312	1242		
				V1W2		209	1043		
				V2W1		243	858		
				V2W2		199	743		

Ergebnisse Trommel-Schälversuch: Sandwichverbund

Bezeichnung					Trommel-Schälversuch	
Wabenkern	Folie	Fasermassenanteil [%]	Grammatur [g/m ²]	Ausrichtung	Schälkraft [N]	
A ~ TL-90 WG	-	30	400 PP/GF	V1W1	10,6	
		40			10,2	
		50			5,3	
		60			5,4	
	0,1	30			30,6	
		40			32,3	
		50			43,2	
		60			39,6	
	0,3	30			33,5	
		40			41,2	
		50			33,6	
		60			48,8	
Hex TL-150 WL	-	30	450 PP/GF	V2W1	36,1	
	0,1	40			36,4	
	0,3	50			135,6	
C ~ TL-115 WG	0,1	40			V2W2	55,7
K ~ TL-120 WG					V2W2	53,9
					V2W1	25,0
					V2W2	30,0

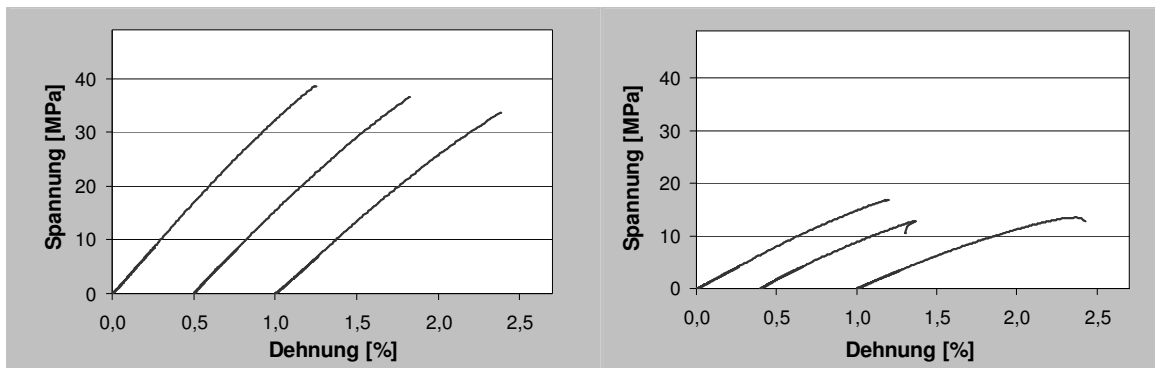


Aufbau Trommel-Schälversuch

Anhang

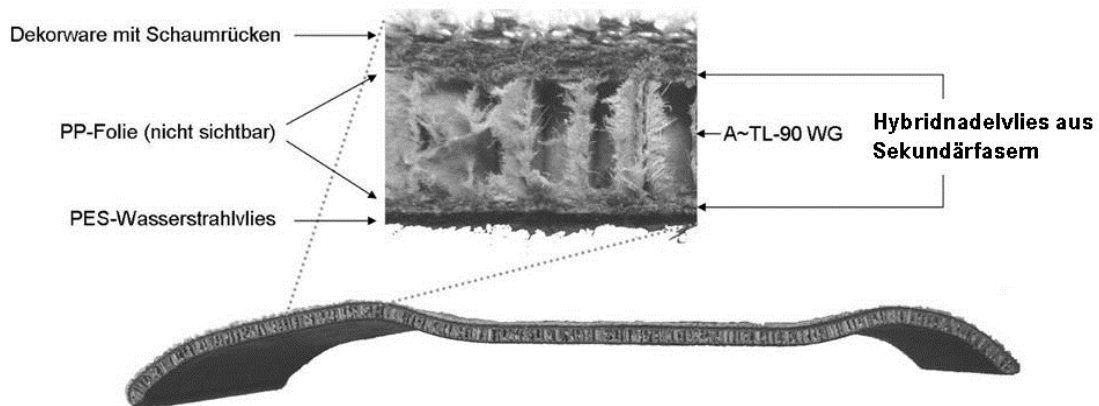
Ergebnisse Zugversuch: Deckschicht

Bezeichnung					Zugversuch	
Wabentyp	Faser- massenanteil [%]	Flächengewicht [g/m ²]	Ausrichtung	Deckschicht dicke [mm]	Zugfestigkeit [N/mm ²]	E- Modul [N/mm ²]
C ~ TL-115 WG	40	450 PP/GF	V1W1	0,78	24,3	2540
			V1W2		25,2	2350
			V2W1		18,2	2150
			V2W2		17,4	1917
A ~ TL-115 WG			V1W1	0,74	39,6	3283
			V1W2		36,1	3050
			V2W1		15,8	1040
			V2W2		15,3	1747
K ~ TL-120 WG			V1W1	0,62	43,6	4010
			V1W2		41,1	3070
			V2W1		20,6	1640
			V2W2		16,9	1590
Voll- konsolidiert	30	2 400 PP/GF	V1	-	84,1	5935
	40				89,6	8498
	50				89,3	9765
	60				90,6	10037
	30		61,7		4838	
	40		64,1		5382	
	50		61,5		6112	
	60		61,7		6725	
	30	2 400 PP/NF	V1		29,2	3030
	40				34,3	3325
	50				38,9	3930
	60				37,2	3953
	30		27,3		2680	
	40		27,4		2763	
	50		29,0		2910	
	60		28,2		2960	



Spannungs-Dehnungsverlauf PP/GF Deckschicht 450g/m²; 40 % Faser-massenanteil; A ~ TL-115 WG
links: V1W1; rechts: V2W2

Anhang Kapitel 6



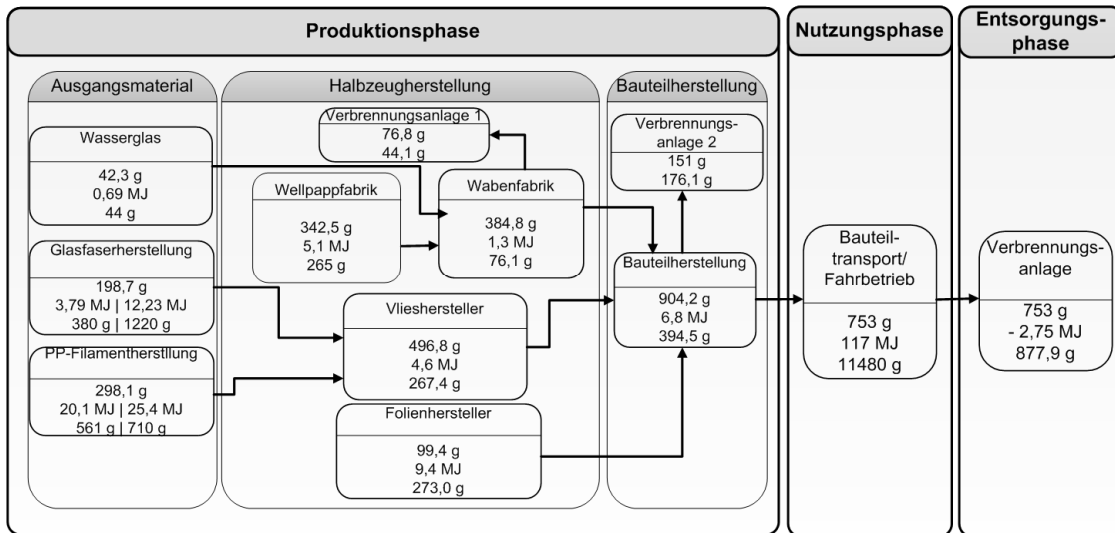
Querschnitt der Sandwichhutablage mit Sekundärfasern

Anhang Kapitel 7

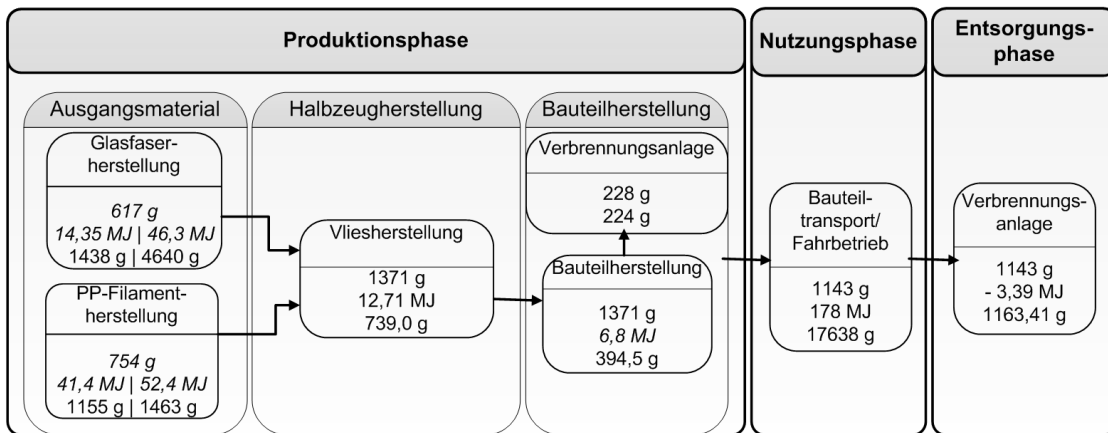
Degradation der mechanischen Eigenschaften des Sandwichverbundes durch Klimalagerung

Konditionierung:		E-Modul [MPa]			Maximale Biegekraft [N]		
		bei Norm- klima	nach Kli- malagerung	nach Trocknung	bei Norm- klima	nach Kli- malagerung	nach Trocknung
Typ 1	PP/GF-Vlies: 200 g/m ² ; 50%	515	409	-	24	22	-
Typ 2	PP/GF-Vlies: 400 g/m ² ; 30%	873	655	692	105	81	86
Typ 3	PP/GF-Vlies: 400 g/m ² ; 50%	898	738	-	75	66	-
Typ 4	PP/NF-Vlies: 400 g/m ² ; 50%	501	344	-	47	40	-

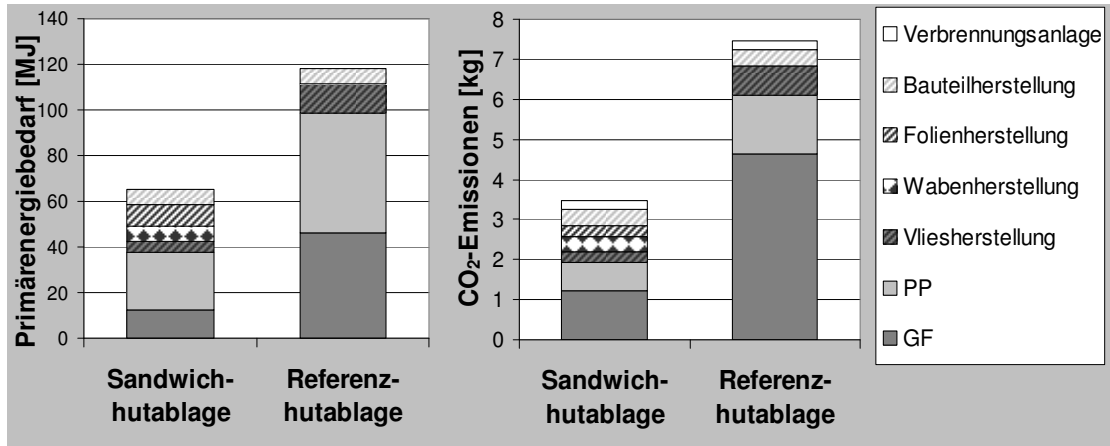
Anhang Kapitel 8



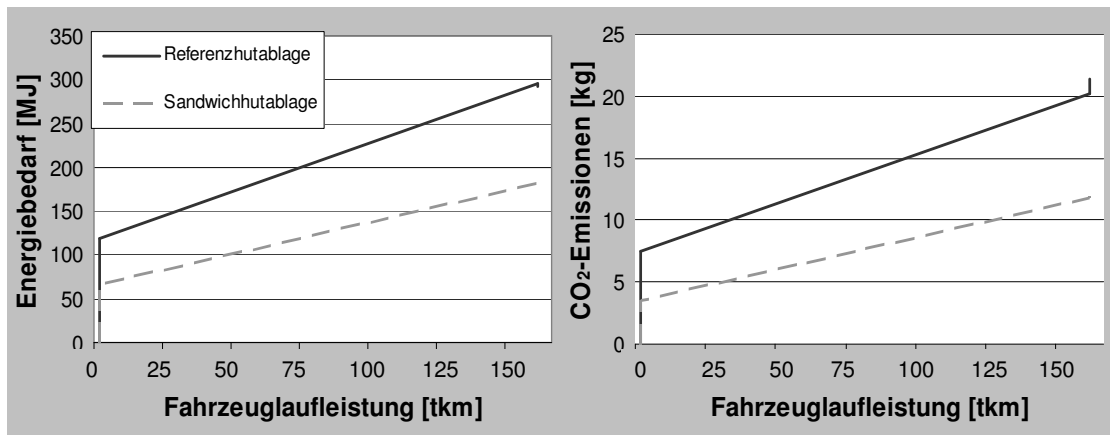
Lebenszyklus Sandwichhutablage



Lebenszyklus Referenzhutablage



Primärenergien und CO₂-Emissionen in Produktionsphase (Primärfasern)



Energiebedarf und CO₂-Emissionen über Produktlebensdauer (Primärfasern)

Anhang Kapitel 9

Materialeigenschaften der Spritzguss-Sandwich-Recyclate

Materialbezeichnung		PP	Recyclat I	Recyclat II	PP-Sisal/GF °	PP/GF- 20*
Dichte	[g/cm ³]	0,90	1,13	1,07	-	1,05
Zugfestigkeit	[MPa]	23,8	40,8	39	31,59	42
Zug-E-Modul	[MPa]	1370	4580	3840	2430	4200
Kerbschlagzähigkeit	[kJ/m ²]	-	17,53	24,4	20,01	6

° aus [JA09]; * aus [D-PO20]