

# Schlussbericht

der Forschungsstelle(n)

Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung e.V.

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur  
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie  
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **16177 BR**

***Automobile Bauteilentwicklung unter Verwendung moderner Naturfasersandwichsysteme***

(Bewilligungszeitraum: 01.08.2009 – 31.07.2011)

der AiF-Forschungsvereinigung

Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen e.V.

Rudolstadt, 30.11.2011

Ort, Datum

Dr. Ing. T. Reußmann

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)  
an der/den Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Zusammenfassung

### „Automobile Bauteilentwicklung unter Verwendung moderner Naturfasersandwichsysteme“

**Laufzeit:** 01.08.2009 – 31.07.2011

**Projektsumme:** 222.250,-€

In der Automobilindustrie ist im Zusammenhang mit der Forderung nach Leichtbaulösungen eine stetige Weiterentwicklung bei vielen Baugruppen des Fahrzeuges zu verzeichnen. Dabei wirken folgende Rahmenbedingungen als Triebfedern:

- Steigende Ansprüche der Kunden an Leistung, Komfort, Qualität und Sicherheit
- Gewichtsreduzierung zur Senkung von Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen
- Notwendigkeit der Verwertung von Altfahrzeugen
- Kosteneinsparung bei Werkstoffen und Fertigung

Gegenwärtig kommen im Fahrgastraum moderner PKW in verstärktem Maße Kunststoffe und Faser-verbundwerkstoffe zum Einsatz. Besonders hervorzuheben ist dabei die Verwendung naturfaserverstärkter Thermoplaste. Gesamtziel der geplanten Forschungsarbeiten war daher die Erarbeitung grundlegender Kenntnisse zu neuen Werkstoffkonzepten für kostengünstige, leichte Naturfasersandwichhalbzeuge mit PP-Matrix.

Im Rahmen des Projektes wurden mit verschiedenen Vliesbildungsverfahren (Krempeln und aerodynamische Vlieslegung) Naturfaserhalbzeuge unter Variation der Fasermischungen und Flächenmassen hergestellt. Aus diesen Halbzeugen wurden anschließend Sandwichverbunde gepresst und hinsichtlich der mechanischen und akustischen Eigenschaften geprüft und optimiert. Die erzielten Eigenschaften wurden mit den Kennwerten von Seriendachhimmeln verglichen und bewertet. Die mechanischen Eigenschaften der Naturfaserverbunde sind von den eingestellten Fasergehalten und den gewählten Schichtaufbauten abhängig. Durch die hochorientierten Deckschichten konnten allerdings nur bedingt richtungsabhängige Eigenschaften in den Verbunden erzielt werden. Es zeigte sich, dass bei allen Naturfaseraufbauten im Vergleich zu konventionellen glasfaserverstärkten Dachhimmeln die mechanischen Eigenschaften etwas niedriger sind. Das betrifft vor allen Dingen die Kennwerte bei erhöhter Umgebungsfeuchte. Hinsichtlich der erreichbaren Verbunddichten können konkurrenzfähige Werte im Bereich von 0,2 bis 0,4 g/cm<sup>3</sup> erreicht werden. Wesentlicher Vorteil der Naturfasermaterialien ist der einfachere Aufbau und die Fertigung in einem One-Step-Prozess.

Die akustischen Eigenschaften der Naturfaserverbunde hängen sehr stark von Verdichtungsgrad der Materialien und der Verbunddicke ab. Mit abnehmender Materialdichte (Verringerung der Flächenmasse, Erhöhung der Plattendicke) verbessert sich das Schallabsorptionsverhalten durch eine Vergrößerung des Porenvolumens. Die besten akustischen Eigenschaften konnten bei Verbunddichten in einem Bereich von 0,3 bis 0,4 g/cm<sup>3</sup> erreicht werden. Die im Labormaßstab hergestellten Verbundmaterialien wurden anschließend unter industriellen Bedingungen verarbeitet und zu Musterbauteilen verpresst. Dabei konnte die Umsetzbarkeit der Technologie nachgewiesen werden. Im Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften besteht bei den naturfaserverstärkten Dachhimmel-Materialien allerdings noch Optimierungsbedarf vor allem bei erhöhten Beanspruchungen unter klimatischen Bedingungen.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

## Gliederung

	Seite
1 Einleitung und Problemstellung	3
2 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele	4
3 Darstellung des Standes der Technik	6
3.1 Herstellung von Sandwichverbunden	6
3.2 Verfahrensvarianten für die Herstellung von Dachhimmeln	9
3.3 Anforderungsprofil für Dachhimmelmaterialien	11
4 Versuchsmaterialien	12
4.1 Eingesetzte Versuchsmaterialien	12
4.2 Vliesherstellung im TITK	12
4.3 Aufbau von Referenz-Dachhimmeln mit Naturfaserverstärkung	14
5 Herstellung von Sandwichverbunden im Pressverfahren	15
5.1 Verbundaufbauten und Pressbedingungen	15
5.2 Probenentnahme aus den Musterplatten	18
5.3 Probenentnahme aus den Referenz-Dachhimmeln	18
6 Werkstoffprüfung	20
6.1 Prüfungen an Fasern und Vliesen	20
6.2 Mechanische Verbundprüfungen	20
6.3 Foggingtest, Geruchsprüfung, Schimmeltest	21
6.4 Akustische Prüfungen	21
6.4.1 Impedanzmessung an Probekörpern	21
6.4.2 Akustikprüfung in der Alpha-Kabine	22
7 Eigenschaften der Ausgangsmaterialien	23
7.1 Kennwerte der eingesetzten Fasermaterialien	23
7.2 Eigenschaften der verwendeten Naturfaservliese	24
8 Verbundeigenschaften der Sandwichmaterialien	25
8.1 Mechanische Verbundeigenschaften	25
8.1.1 Biegeeigenschaften in Abhängigkeit des Schichtaufbaus	25
8.1.2 Biegewerte im Vergleich zu Referenz-Dachhimmeln	28
8.1.3 Biegeeigenschaften von geschäumten Verbunden	32
8.2 Beständigkeit gegen klimatische Einflüsse	35
8.3 Akustische Eigenschaften	38
8.3.1 Messungen im Impedanzmessrohr	38
8.3.2 Akustische Prüfungen in der Alpha-Kabine	40
8.4 Ergebnisse aus Fogging-, Geruchs- und Schimmeltests	44

9	Versuche zur Bauteilherstellung	46
10	Zusammenfassung und Ausblick	48
11	Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen des Antrages	50
12	Wissenschaftlich/technische und wirtschaftliche Bedeutung des Vorhabens für kleine und mittlere Unternehmen	52
13	Geplante Veröffentlichungen /Schutzrechte	53
14	Einschätzung zur Realisierbarkeit des aktualisierten Transferkonzeptes	54
15	Notwendigkeit und Angemessenheit der eingesetzten Mittel	55
16	Danksagung	56
17	Literaturverzeichnis	57

## 1 Einleitung und Problemstellung

In der Automobilindustrie ist im Zusammenhang mit der Forderung nach Leichtbaulösungen eine stetige Weiterentwicklung bei vielen Baugruppen des Fahrzeuges zu verzeichnen. Dabei wirken vor allem folgende Rahmenbedingungen als Triebfedern:

- Steigende Ansprüche der Kunden an Leistung, Komfort, Qualität und Sicherheit
- Gewichtsreduzierung zur Senkung von Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen
- Notwendigkeit der Verwertung von Altfahrzeugen
- Kosteneinsparung bei Werkstoffen und Fertigung

Ausgehend davon kommen im Fahrgastraum moderner PKW in verstärktem Maße Kunststoffe und immer häufiger auch Faserverbundwerkstoffe zum Einsatz. Besonders hervorzuheben ist dabei die Verwendung naturfaserverstärkter Thermoplaste für geeignete Produkte, die im Vergleich zu konventionellen glasfaserverstärkten Kunststoffen oder auch duroplastischen Verbunden unter anderem Vorteile bei Insassenschutz, Rohstoffpreis, Fertigungskosten, Gewicht sowie Wiederverwertbarkeit bieten und zur Schonung von Umwelt und Ressourcen beitragen.

Im Fahrzeuginnenraum beschränkt sich die Anwendung thermoplastischer Naturfaserverbundwerkstoffe bisher allerdings auf weniger groß dimensionierte, nicht selbsttragende Komponenten wie Teile der Tür-/Seitenverkleidung, Kofferraumauskleidungen sowie Hutablagen, da sie den speziellen Anforderungen großflächiger, freitragender Teile (z.B. Dachhimmel, Instrumententafel) wie ausreichende Biegesteifigkeit, sehr geringes Gewicht sowie hohe Schallabsorption, meist noch nicht genügen. Seitens der Hersteller ist eine Nutzung solcher Composites aber gerade auch für sehr große Pressteile wie Fahrzeughimmel überaus attraktiv, denn die derzeit hierfür in Serie eingesetzten Werkstoffe (meist glasfaserverstärktes Polyurethan, z.T. auch Polyester-Bikomponenten-Faserverstoffe) können die eingangs genannten Kriterien wie Recyclingfähigkeit, gefordertes Eigenschaftsprofil, niedrige Materialpreise, einfache Herstellung etc. in ihrer Gesamtheit nicht bzw. nicht zufriedenstellend erfüllen. Darüber hinaus können sich die Einsparpotenziale von Naturfaserverbunden aufgrund der niedrigeren Rohstoffkosten gerade bei großen Verkleidungsteilen auszahlen, was für die Hersteller ebenfalls von Interesse ist.

Folglich besteht seitens der Fahrzeugindustrie ein sehr großer Entwicklungsbedarf an für selbsttragende Interieurverkleidungen einsetzbaren Naturfaserverbundmaterialien. Durch eine gezielte Weiterentwicklung und Optimierung naturfaserverstärkter Mattenhalbzeuge für die Pressverarbeitung zeichnen sich daher konkrete Chancen ab, ihren Anwendungsbereich im Fahrzeug auszuweiten. Daraus können sich insbesondere für KMU der Naturfasererzeugung, der Textilindustrie (Mattenhersteller) und der Fahrzeugzulieferbranche positive wirtschaftliche Effekte ergeben.

Im Rahmen des Vorhabens wird deshalb die Entwicklung eines neuen Konzeptes für preiswerte, leichte und leistungsfähige Naturfasersandwichverbunde mit Thermoplastmatrix angestrebt, die später eine kostengünstige Herstellung z.B. recyclingfähiger Fahrzeughimmel im Pressverfahren erlauben. Der innovative Kern liegt dabei in der Realisierung von Sandwichstrukturen, die zur Erreichung des erforderlichen Eigenschaftsprofils über beanspruchungs- bzw. funktionsgerechte Faserorientierungen in den unterschiedlichen Verbundschichten verfügen und so den Einsatz zusätzlicher Verstärkungselemente verzichtbar machen. Grundlage der Herstellung dieser Verbundstrukturen sollen ausschließlich bekannte textile Vliesbildungsprozesse sein, um letztlich eine wirtschaftliche Fertigung realisieren zu können.

## **2 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele**

Gesamtziel der geplanten Forschungsarbeiten ist die Erarbeitung grundlegender Kenntnisse zur Realisierbarkeit eines neuen Werkstoffkonzeptes für kostengünstige, leichte Naturfaser-sandwichhalbzeuge mit Polypropylenmatrix, die über das erforderliche Potenzial verfügen, späterhin u.a. eine wirtschaftliche Fertigung wiederverwertbarer Fahrzeughimmel im Formpressverfahren zu ermöglichen.

Im Hinblick auf die Anforderungen an das angestrebte Produkt sollen sich die zu entwickelnden Sandwichwerkstoffe durch beanspruchungs- bzw. funktionsgerechte Faserorientierungen in den unterschiedlichen Verbundschichten auszeichnen. Mit Hilfe konventioneller Textiltechniken zur Herstellung von Fasermatten sollen dahingehend einerseits hochorientierte Decklagen mit ausreichender Biegesteifigkeit und andererseits Kernschichten mit einer Faserwirrlage, offener Struktur und geringer Dichte für hohe Schallabsorption und geringes Gewicht realisiert werden, die im Verbund die genannten Sandwichstrukturen bilden.

Zur Erreichung des Gesamtziels sind grundlegende Forschungsarbeiten zu den eingesetzten Rohstoffen, den Sandwichkonstruktionen, der technischen Umsetzbarkeit der Halbzeugfertigung und den Prozessparametern der Pressverarbeitung zu Verbundteilen erforderlich. Die sich hieraus ergebenden Kenntnisse sollen für die von der Entwicklung berührten Industriebereiche ein gesteigertes Know-how, eine Verbesserung des Innovationspotenzials und somit auch der Leistungsfähigkeit ermöglichen. Aus dem Projekt resultieren letztlich vor allem grundlegende Ergebnisse zur werkstofflichen sowie konstruktiven Auslegung anforderungsgerechter Sandwich-Mattenhalbzeuge für eine Fertigung selbsttragender Pressteile, die insbesondere klein- und mittelständischen Vliesherstellern als Ausgangspunkt für weitere firmeneigene bzw. kundenspezifische Entwicklungsarbeiten im industriellen Maßstab zur Verfügung gestellt werden sollen.

Mit dem Forschungsprojekt wird angestrebt, neuartige Naturfasersandwichsysteme mit thermoplastischer Matrix auf der Basis textiler Fertigungstechnologien zu entwickeln, welche das Potenzial für einen Einsatz als Halbzeug für große, selbsttragende Fahrzeuginterieurteile besitzen. Die im Rahmen des Projektes zu erarbeitenden Grundlagen zu Sandwichrezepturen und -aufbauten sollen insbesondere für Textilbetriebe eine Basis für eigene, anwendungsspezifische Entwicklungen darstellen, um später marktfähige Produkte realisieren zu können. Im wissenschaftlich-technischen Ergebnis sollen deshalb Verbundwerkstoffe mit den nachfolgend skizzierten Eigenschaften resultieren:

- Materialien mit Polypropylenmatrix und natürlichen Verstärkungsfasern wie Flachs, Hanf und anderen Naturfasern
- Sandwichaufbau (hoch orientierte Deckschichten für steife Trägersubstrate, Kern mit 3D-Faserwirrlage, an die Funktion angepasste Mischungsverhältnisse von Matrix- und Verstärkungsfasern in den Einzelschichten)
- Halbzeugherstellung ausschließlich durch Kombination von Krempel- und aerodynamischer Vlieslegetechnik zur Realisierung der gewünschten funktionsbezogenen Faserorientierungen
- Verarbeitbarkeit mit konventionellen Werkzeugen im Thermoformverfahren
- gute Abformung komplizierter Geometrien
- anforderungsgerechte Eigensteifigkeit, Form- und Alterungsbeständigkeit sowie Crashsicherheit ohne zusätzliche Verstärkungsstrukturen
- geringes Gewicht
- hohe Schallabsorption
- Einhaltung der Emissionsgrenzwerte
- konkurrenzfähiger Preis im Vergleich zu aktuellen Serienmaterialien sowie aufwändigeren Naturfaserkonzepten
- vollständige Wiederverwertbarkeit

Als wirtschaftliches Ergebnis wird bei erfolgreichem Projektabschluss beabsichtigt, die im Rahmen des geplanten Vorhabens erarbeiteten Erkenntnisse zur Realisierung neuartiger Naturfasersandwichwerkstoffe, deren Fertigungsstrategie und Verarbeitung zu interessierten Anwendern zu transferieren und auf dieser Grundlage in der Industrie Weiterentwicklungen zu konkreten, marktfähigen Produkten anzustoßen. Damit wird letztlich durch weiterführende industrielle Entwicklungsarbeiten eine Umsetzung der Naturfasersandwichwerkstoffe, u.a. in der Dachhimmelfertigung, angestrebt. Damit entstehen für die KMU im Bereich der Naturfaserverarbeitung positive wirtschaftliche Effekte durch eine verstärkte Nachfrage an geeigneten Naturfaserqualitäten, Sandwichhalbzeugen und den daraus gefertigten Interieurteilen.

### 3 Darstellung des Standes der Technik

#### 3.1 Herstellung von Sandwichverbunden

Als Sandwich-Bauweise bezeichnet man die Einbettung einer oder mehrerer Schichten verschiedener Eigenschaften in einen Werkstoff [1]. Sandwich-Bauteile bestehen meist aus dünnen, aber hochfesten kraftaufnehmenden Decklagen, die durch einen dicken Kernwerkstoff geringer Dichte auf Abstand gehalten werden (Bild 1). Diese Strukturen sind bei geringem Gewicht sehr biege- und beulsteif, da sie durch die hohen Festigkeiten der Decklagen ein hohes Flächenträgheitsmoment besitzen. Sandwichstrukturen kommen heute in den verschiedensten industriellen Anwendungen zum Einsatz. Angefangen von Hochleistungswerkstoffen in der Luft- und Raumfahrt über die Automobilindustrie bis hin zu Leichtbauteilen im Schiffbau, im Schienenfahrzeugbau, aber auch in der Bau- und Möbelindustrie [1–8].

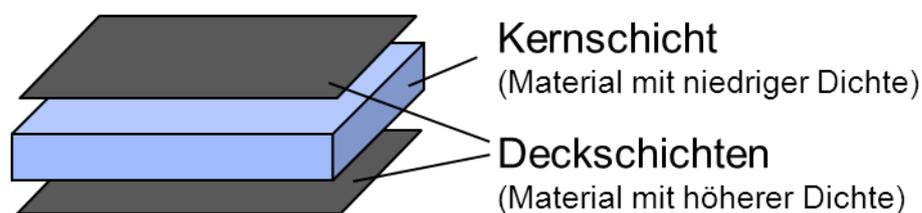


Bild 1: Klassischer Sandwichaufbau

Bedingt durch die Bauweise und die Eigenschaften der unterschiedlichen Schichten haben Sandwichbauteile gegenüber der Massivbauweise eine Reihe von Vorteilen:

- Geringes Bauteilgewicht
- Wärme- und Schallisolation
- Hohe Biegesteifigkeit
- Dauerfestigkeit bei Wechselbeanspruchungen
- Gute Crashesicherheit
- Funktionsintegration

Allerdings sind die Kosten von Sandwichmaterialien häufig deutlich höher als bei der Fertigung von Massivbauteilen. Das liegt an der aufwändigeren Herstellung. Meist werden die Deck- und Kernschichtmaterialien in separaten Prozessen gefertigt und nachfolgend verklebt oder verschweißt. Dabei können auch sehr unterschiedliche Materialien kombiniert werden.

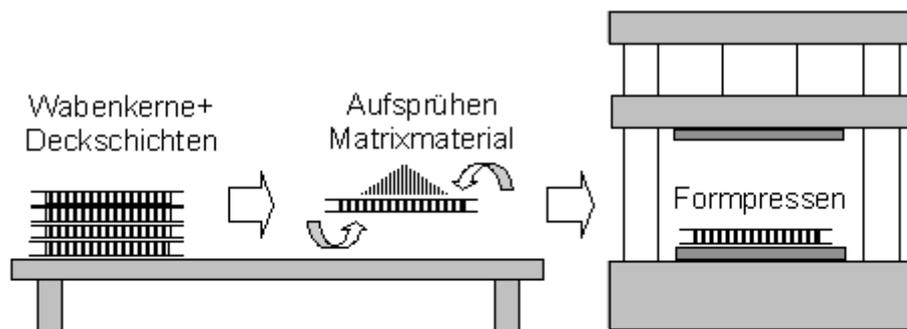
Als Kernmaterialien werden häufig Schäume mit geringer Dichte oder auch Wabenstrukturen eingesetzt, da diese Werkstoffe ein hohes Leichtbaupotenzial haben. In neuerer Zeit kommen ebenfalls textile Materialien, wie Geflechte aus Kunststoff-Fasern (z.B. 3D-TEX) oder auch Abstandsgewirke bei der Herstellung von Sandwichbauteilen zum Einsatz. Dazu werden die textilen Flächengebilde mit stabilisierenden Harzen imprägniert und durch Tiefziehen dreidimensional verformt. Derartige Strukturen eignen sich sehr gut zu Armierungszwecken oder auch direkt als Kernmaterial [9,10].

Als Deckschichtmaterialien für Sandwichelemente werden meist faserverstärkte thermoplastische oder duroplastische Kunststoffe, aber auch Metalle (z.B. Aluminiumfolien) verwendet. Als mögliche Faserarten kommen derzeit vorwiegend Glasfasern, sowie für spezielle Anwendungen Aramid- oder Kohlenstoff-Fasern zum Einsatz. Für eine Reihe von Anwendungen mit geringeren mechanischen Beanspruchungen ist aber auch der Einsatz von Naturfasern interessant.

Charakteristisch für viele technische Anwendungen von Sandwichkonstruktionen (z.B. im Automobilbau) ist, dass oft nur relativ geringe Anforderungen an das Kernmaterial gestellt werden. Die Kernschichten dienen in vielen Fällen hauptsächlich als „Abstandhalter“ und nur selten zur Übertragung von höheren Schubspannungen. Da viele Bauteile einen festen und steifen Randabschluss sowie relativ kleine Abmessungen haben, werden Schubspannungen über den Rand übertragen und nicht über den Kern. Der Kern muss lediglich den Fertigungsdrücken standhalten und eine möglichst geringe Dichte, gute Dämpfungswirkung und einen geringen Preis haben.

Aktuelle Beispiele für Sandwichanwendungen in der Automobilindustrie (z.B. mit Wabenkern) sind Ladeböden, Hutablagen und auch Dachhimmel. Die Herstellung erfolgt meist im Formpressverfahren. Dabei muss grundsätzlich zwischen duroplastischen und thermoplastischen Matrixmaterialien unterschieden werden (Bild 2).

### Formpressen von duroplastischen Sandwichbauteilen



### Formpressen von thermoplastischen Sandwichbauteilen

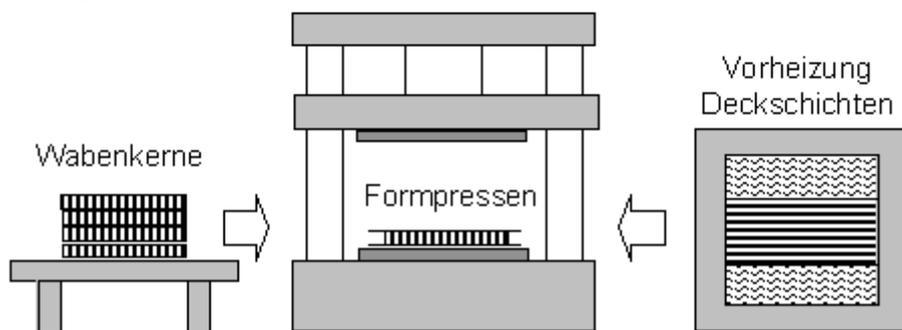


Bild 2: Herstellung von Sandwichbauteilen

Als Deckschichten werden meist wenig orientierte Verstärkungsfaservliese beidseitig auf Kernmaterialien wie Waben oder Schäume aufgebracht. Die Kernschicht wirkt dabei als stabilisierendes Element, während die Faserdeckschichten die Oberfläche des Verbundes ausbilden. Im Vergleich zu konventionellen, textil gefertigten Fasermattenhalbzeugen weisen diese Sandwichwerkstoffe folgende Vor- und Nachteile auf (Tabelle 1):

Tabelle 1: Vor- und Nachteile von Waben- und Schaumstrukturen

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Sehr hohe Formstabilität</li> <li>+ Geringes Gewicht</li> <li>+ Gute Schallabsorption</li> <li>+ Geeignet für große, selbsttragende Bauteile</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verwendung teurer Kernmaterialien</li> <li>- Aufwändigere Fertigung</li> <li>- Probleme bei der Anbindung zwischen Deckschicht und Kern</li> <li>- Ungünstiges Recyclingverhalten</li> </ul>

Ausgehend von diesem aktuellen Stand wird angestrebt, die Vorteile eines Schichtverbundes zu nutzen, diesen aber durch möglichst vereinfachten Aufbau, begrenzte Materialvielfalt und einfache Herstellbarkeit zu realisieren. Die vorgeschlagenen Forschungsarbeiten zielten daher auf die Entwicklung eines ausschließlich durch Kombination bekannter Vlieslegetechniken hergestellten „textilen Sandwichmaterials“ ab, bei dem die Stabilität durch hochorientierte äußere Deckschichten gewährleistet wird und im Inneren eine akustisch hoch wirksame, wirre Faserschicht vorliegt. Damit sollen folgende Innovationen bzw. Vorteile erreicht werden:

- sämtliche Komponenten des Verbundes liegen in Faserform vor
- alle Schichten weisen die gleichen Grundmaterialien (Polypropylenmatrix mit Naturfaserverstärkung) auf
- ausschließlich Nutzung etablierter Textiltechnologien (Krempeln, aerodynamische Vlieslegung) zur kostengünstigen Herstellung der Sandwichschichten
- Einsparung von Prozessschritten zur Erzeugung von Schichtverbunden, damit Verringerung der Kosten
- bessere Anbindung der Deckschichten an den Kern durch gleiches Bindematerial
- leichtere Abformung komplizierterer Geometrien
- höhere Schallabsorption durch die im Vergleich zu den regelmäßigen Waben bzw. dichteren Schaumstrukturen ungeordnetere, offenere Faserkernschicht
- leichteres Recycling aufgrund des einfacheren Halbzeugaufbaus

### 3.2 Verfahrensvarianten für die Herstellung von Dachhimmeln

In Anlehnung an die bekannten Verfahren zur Sandwichherstellung haben sich für die Fertigung von Dachhimmeln spezielle Herstellungsverfahren etabliert und werden je nach Geometrie und Aufbau des Dachhimmels in der Industrie angewendet. Die bekanntesten Verfahren sollen nachfolgend kurz beschrieben werden:

- Formpressen von Vliesen aus Bicofasern oder Fasermischungen (PES-Bicofasern, Glas/PP- oder Naturfaser/PP-Hybride)
- Formpressen von Schaumstoffen mit faserverstärkten Deckschichten (PUR Schaum+Glas/PUR-Deckschichten)
- Formpressen von Wabenverbunden mit faserverstärkten Deckschichten (PUR Schaum+Glas/PUR, Naturfaser/PP-Deckschichten)

Beim **Formpressen von Faservliesen** werden textile Halbzeuge aus Mischungen von Matrix- und Verstärkungsfasern oder auch Bikomponentenfasern verwendet. Die Vlieserzeugung kann über den klassischen Kardierprozess oder aerodynamische Verfahren erfolgen. Es ist auch die Herstellung von Bicovliesen im Schmelzspinnverfahren (Spinnvliestechnik) möglich. Die Fasermatten haben in der Regel keine gerichtete Faserorientierung, wobei es allerdings Unterschiede zwischen gekrempelten und aerodynamisch gelegten Faservliesen gibt. Bei den gekrempelten Vliesen sind die Fasern nur in der Ebene (x-y Richtung) verteilt, während bei aerodynamisch gelegten Matten auch Fasern in z-Richtung angeordnet sind. Dadurch sind diese Faservliese in der Regel voluminöser als gekrempelte Vliese. Bei der Bauteilherstellung werden die Faservliese zunächst in einer Vorheizstation aufgeheizt und nachfolgend in dem kalten Werkzeug verpresst. Dabei können sowohl Dekormaterialien als auch rückseitige Beschichtungen oder Abdeckfolien mit verpresst werden. Vorteilhaft beim Einsatz von Faservliesen sind der einfache Prozess (thermoplastisches Material) und die komplexen Formgebungsmöglichkeiten durch die sehr gute Umformbarkeit der Fasermatten. Auch ein Recycling der Verbunde ist bei diesen Materialien gut möglich. Die thermische Beständigkeit der Bauteile wird durch den Schmelzpunkt der Binfasern oder der Mantelkomponente der Bicofasern begrenzt. Das ist ein Nachteil gegenüber den thermisch höher beständigen Materialien mit duroplastischer Matrix.

Beim **Formpressen von Schaumstoffen** werden häufig duroplastische Materialien eingesetzt. Der auf eine definierte Dicke geschnittene Schaum wird auf beiden Seiten mit Reaktionsharz besprüht oder über einen Walzenauftrag flächig benetzt. Danach werden die Verstärkungsfasern (meist Glasfasern) auf die beharzte Oberfläche aufgestreut. Anschließend erfolgt die Aufbringung der Deckschichten auf das Kernmaterial (Dekorschicht, auf der Sichtseite, Abdeckvlies oder Folie auf der Rückseite). Dieses Verfahren wird gegenwärtig in verschiedenen Variationen bei der Herstellung der meisten Dachhimmel angewendet. Die Bauteile zeichnen sich durch eine sehr niedrige Dichte und hohe Biegesteifigkeit aus. Es können auch unterschiedliche Bauteildicken durch partiell stärkere Verdichtung des Schaumes realisiert werden.

Der Prozess ist aufwändig und die so hergestellten Dachhimmel sind durch den duroplastischen Binder werkstofflich nicht wieder recycelbar. Wenn thermoplastisch verformbare Schäume vorliegen kann dieses Verfahren auch mit thermoplastischen Deckschichten angewendet werden. Dabei wird meist der gesamte Aufbau in einer Vorheizstation aufgeheizt und nachfolgend in einem kalten Werkzeug verpresst. Vorteilhaft ist hier der einfache Prozess (keine reaktiven Systeme). Allerdings können in der Regel nicht so niedrige Dichten wie bei den Harzsystemen erreicht werden und der Schmelzpunkt des Schaumes und der Matrix in den Deckschichten begrenzen die thermische Stabilität des Gesamtsystems.

Das **Formpressen von Wabenverbunden** mit faserverstärkten Deckschichten kann sowohl mit thermoplastischen als auch mit duroplastischen Matrixmaterialien umgesetzt werden. Der Verfahrensablauf wurde bereits in Bild 2 schematisch dargestellt. Bei duroplastischer Matrix wird eine sehr gute Anbindung der Deckschichten an das Matrixmaterial erreicht, da das Harz teilweise in das Wabenmaterial eindringt. Im Vergleich zu den Schäumen ist die Randgestaltung mit Wabenverbunden allerdings schwieriger, da die Waben im Randbereich komprimiert werden und sich häufig raue Kanten bilden. Das kann nur durch einen höheren Harzauftrag an den Rändern kompensiert werden. Ein weiteres Problem ist die Recyclingfähigkeit des Gesamtsystems, welche bei Verwendung von Reaktionsharzen nicht gegeben ist. Bei Verwendung thermoplastischer Deckschichten wird die Verbindung zwischen Kern und Deckschichten nur über eine Verklebung hergestellt. Auch hier spielt der Rand des Bauteils eine große Rolle, da die Verklebung direkt auf den Waben durch die hohe Viskosität der Thermoplaste nur sehr begrenzt möglich ist. Durch eine höhere Verdichtung im Randbereich kann jedoch eine geschlossene Struktur erzielt werden. Das bringt auch Vorteile im Hinblick auf die Gesamtsteifigkeit des Aufbaus.

Vergleicht man die verschiedenen Verfahren zur Herstellung von Dachhimmeln, dann stehen Vorteilen bei der Bauteilherstellung (einfache thermoplastische Verfahren) meist Nachteile bei den mechanischen Eigenschaften der Bauteile gegenüber. Im Hinblick auf die erzielbaren mechanischen Eigenschaften werden mit den duroplastischen Systemen immer noch deutlich bessere Werte bei geringerem Gewicht erreicht als mit thermoplastischen Materialien. Aus diesem Grund werden gegenwärtig auch die meisten Dachhimmel als Schaumsandwich mit duroplastisch gebundenen Deckschichten ausgeführt. Es gibt einige thermoplastische Systeme in der praktischen Anwendung, die aber im direkten Kennwertvergleich (Prüfung von Verbundproben und nicht des Gesamtaufbaus in Einbausituation) meist etwas schlechter abschneiden. In der praktischen Anwendung spielt allerdings auch die Geometrie der Bauteile und die Befestigung des Himmels im Fahrzeug eine große Rolle. Große freie Stützweiten können meist nur mit duroplastischen Aufbauten realisiert werden. Bei kleineren Bauteilen oder zusätzlichen Befestigungen des Himmels lassen sich auch weniger biegesteife Materialien einsetzen. Hier ergeben sich für thermoplastische Materialien gute Einsatzmöglichkeiten.

### 3.3 Anforderungsprofil für Dachhimmelmaterialien

Die Erstellung eines allgemeinen Anforderungsprofils für Automobil-Dachhimmel ist schwierig, da seitens der Automobilhersteller (OEM) sehr unterschiedliche Anforderungen an die Materialien und Bauteile gestellt werden. Es sind zahlreiche Normen und Prüfverfahren bekannt, die sich aber häufig in wesentlichen Punkten unterscheiden. Einige Hersteller haben z.B. keine konkreten Vorgaben zu den akustischen Kennwerten (VW, Daimler). Bei anderen OEMs wie z.B. Ford und BMW sind diese Werte festgelegt. Sehr unterschiedliche Anforderungen bestehen auch bei den mechanischen Eigenschaften. Das zeigten Versuche mit unterschiedlichen Trägermaterialien. Ohne genaue Kennwerte zu nennen werden aber bei allen Herstellern folgende grundlegende Anforderungen an Dachhimmelsysteme gestellt [11]:

- Ausreichend hohe Biegesteifigkeit (kein Durchhang)
- Temperaturbeständigkeit im Innenraum bis zu 100°C
- Beständigkeit im Klimawechseltest (geringe Durchbiegung)
- Einhaltung der Maßtoleranzen (Längenausdehnung)
- Einhaltung der Fogging- und Emissionsgrenzwerte
- Beständigkeit gegen Schimmel
- Erfüllung des Geruchstests (gleich oder besser als Note 3)
- Gute akustische Eigenschaften (Test in der Alpha Kabine)
- Dichtheit des Materials gegen die Dachseite
- Lager-, Transport- und Montagefähigkeit
- Recyclingfähigkeit (möglichst stoffliche Wiederverwertbarkeit)

Ausgehend von diesen Anforderungen sind folgende Anforderungen im Hinblick auf die Entwicklung von thermoplastischen naturfaserverstärkten Sandwichsystemen als besondere Herausforderung anzusehen:

- Biegesteifigkeit (geringere mechanische Kennwerte im Vergleich zu Glasfasern)
- Beständigkeit im Klimawechseltest (Feuchteaufnahme der Naturfasern)
- Beständigkeit gegen Schimmel (Aufschlussgrad und Reinheit der Naturfasern)
- Erfüllung des Fogging- und Geruchstests (Begleitsubstanzen auf den Naturfasern)

Aus diesen Gründen wurden im Rahmen der durchgeführten Entwicklungen zu naturfaserverstärkten Dachhimmelsystemen gezielte Untersuchungen zu den besonders kritischen Punkten durchgeführt.

## 4 Versuchsmaterialien

### 4.1 Eingesetzte Ausgangsmaterialien

Zur Herstellung von Faservliesen für die Sandwichtaufbauten wurden folgende Fasermaterialien eingesetzt:

- Röstflachsfasern (Aufschlussgrad E) von Fa. Holstein Flachs
- Hanffasern von Fa. Bafa
- PP-Fasern 7 dtex, 60 mm von Fa. Asota
- Recyclingcarbonfasern

Diese Fasertypen kamen bei der Herstellung von Vliesen im TITK zu Einsatz. Eine Übersicht zu den im TITK hergestellten Vliesen ist unter Punkt 4.2 zu finden. Neben den Vliesvarianten, die auf der TITK-Laboranlage hergestellt wurden, kamen auch auf einer industriellen Vliesanlage hergestellte Materialien (aerodynamisch gelegte Naturfaservliese) zum Einsatz. Die Materialien hatten folgende Bezeichnung und Zusammensetzung:

- Flachs/PP-Vlies 1450  
(Mischung 50/50 Gew.-%, Flächenmasse 1450 g/m<sup>2</sup>)
- Flachs/PP-Vlies 1600 mit PES Deckvlies  
(Mischung 50/50 Gew.-%, Flächenmasse 1600 g/m<sup>2</sup>)
- Flachs/Kenaf/Recycling PP-Vlies 1400  
(Mischung 25/25/50 Gew.-%, Flächenmasse 1400 g/m<sup>2</sup>)

Als Abdeckfolie kam eine PA/PP-Verbundfolie von der Fa. Obermühle Polymertechnik (Colamin) mit einer Dicke von 160 µm zum Einsatz.

### 4.2 Vliesherstellung im TITK

Zur Vliesherstellung steht im TITK eine Laborvliesanlage mit einer Arbeitsbreite von 500 mm zur Verfügung. Die Anlage besteht aus einer Krempel mit nachfolgendem Steilarmleger und Nadelmaschine (Bild 3).



Bild 3: Laborkrempel mit Steilarmleger

Die Vliese für die Herstellung des Kerns von Sandwichmaterialien wurden mit Flächenmassen von 300 g/m<sup>2</sup> und 500 g/m<sup>2</sup> gefertigt und hatten eine Breite von 500 mm (Tabelle 2). Damit konnten unterschiedliche Flächenmassen der Verbundaufbauten durch einfaches Schichten mehrerer Vlieslagen eingestellt werden. Die Vernadelung der Vliese kann auf der Laboranlage variiert werden. Nach Durchführung von Vorversuchen wurden folgende Einstellungen gewählt:

#### Vernadelungsparameter für die Kernvliese

Einstichtiefe: 13 mm  
 Einstichdichte: 25/cm<sup>2</sup> und 50/cm<sup>2</sup>  
 Nadeltyp: 15x18x38x3M222 G 2017

#### Vernadelungsparameter für die Deckvliese

Einstichtiefe: 13 mm  
 Einstichdichte: ohne Vernadelung und 4/cm<sup>2</sup>  
 Nadeltyp: 15x18x38x3M222 G 2017

Tabelle 2: Vliesvarianten für Kernschichten

Bezeichnung	Fasermischung [Gew.-%]	Soll-Flächenmasse [g/m <sup>2</sup> ]
Kernvlies K1 (gekrepelt)	Hanf/PP 80/20	500
Kernvlies K2 (gekrepelt)	Flachs/PP 50/50	300

Für die Deckschichten wurden orientierte Faservliese über die Krepel hergestellt. Es kamen sowohl reine Naturfaser/PP Mischungen als auch Fasermischungen mit recycelten Carbonfasern zum Einsatz (Tabelle 3). Diese Mischungen wurden gewählt, um den Einfluss von hochfesten und steifen Fasern in den Deckschichten zu testen. Theoretisch müssten mit diesen Fasermischungen deutlich bessere mechanische Eigenschaften resultieren als bei Verwendung von Naturfasern. Die Faservliese für die Deckschichten hatten keine oder nur eine sehr geringe Vernadelung, um eine maximale Faserlängsorientierung zu erzielen. Bei der späteren Verbundherstellung konnte der Fasergehalt in den Deckschichten noch durch Zugabe von PP-Folien reduziert werden.

Tabelle 3: Vliesvarianten für Deckschichten

Bezeichnung	Fasermischung [Gew.-%]	Soll-Flächenmasse [g/m <sup>2</sup> ]
Deckvlies D1 gekrepelt	Flachs/PP 50/50	150
Deckvlies D2 gekrepelt	Flachs/Carbon/PP 25/25/50	150
Deckvlies D3 gekrepelt	Carbon/PP 50/50	150
Deckvlies D4 gekrepelt	Flachs/PP 50/50	100

### 4.3 Aufbau von Referenz-Dachhimmeln mit Naturfaserverstärkung

Zum Vergleich der in den Laborversuchen hergestellten Materialien mit den Eigenschaften von Serienmaterialien wurden zwei Automobil-Dachhimmel beschafft, die eine Naturfaserverstärkung haben. Das erste Material (Dachhimmel Opel Zafira) ist ein Sandwichaufbau mit Schaumkern und Naturfaser-Deckschichten (offensichtlich Sisalfasern) welche mit einem Harzsystem gebunden sind. Der Gesamtaufbau des Materials kann wie folgt beschrieben werden:

Schichtaufbau NF-Dachhimmel Opel Zafira

- Dekorstoff mit Schaumrücken
- mit Harz gebundenes Naturfaservlies
- Schaumkern
- mit Harz gebundenes Naturfaservlies
- Abdeckvlies

Kennwerte Gesamtaufbau NF-Dachhimmel Opel Zafira

- Gesamtgewicht des Bauteils: 2,7 kg
- Flächengewicht: 1000 g/m<sup>2</sup>
- Dicke des Gesamtaufbaus: 8-12 mm
- Dichte Gesamtaufbau: 0,11 g/cm<sup>3</sup>

Kennwerte Trägermaterial NF-Dachhimmel Opel Zafira

- Flächengewicht des Trägers 790 g/m<sup>2</sup>
- Dicke des Trägers: 5-9 mm
- Dichte des Trägers: 0,14 g/cm<sup>3</sup>

Das Flächengewicht des Gesamtsystems beträgt 1000 g/m<sup>2</sup> bei Bauteildicken in einem Bereich zwischen 8 und 12 mm (je nach Verdichtung des Materials). Das ergibt eine minimale Materialdichte im Bereich von 0,11 g/cm<sup>3</sup>. Das reine Trägermaterial ohne Dekor hat ein Flächengewicht von 790 g/m<sup>2</sup> bei Dicken in einem Bereich von 5-9 mm. Die Dichte des Trägermaterials liegt damit im Mittel bei ca. 0,14 g/cm<sup>3</sup>.

Das zweite Material (Dachhimmel Hyundai Accent) ist ein Naturfaser-Pressmaterial welches die Firma Symalit unter dem Namen „Nafcoform“ anbietet. Laut Herstellerbeschreibung [12] besteht das Vlies aus einer Fasermischung von Naturfasern (Flachs, Hanf, Kenaf) und PP-Fasern und wird in verschiedenen Flächengewichten angeboten. Das Material hat keinen Sandwichaufbau und keine ausgeprägten Faserorientierungen und soll sich vor allem durch niedrige Emissionen (VOC und FOG-Werte) auszeichnen. Der gesamte Aufbau hat folgende Zusammensetzung:

### Schichtaufbau NF-Dachhimmel Hyundai Accent

- Dekorstoff mit Schaumrücken
- Gepresster Naturfaserträger
- Deckvlies

### Kennwerte Gesamtaufbau NF-Dachhimmel Hyundai Accent

- Gesamtgewicht des Bauteils: 2,5 kg
- Flächengewicht: 1260 g/m<sup>2</sup>
- Dicke des Gesamtaufbaus: 5 mm
- Dichte Gesamtaufbau: 0,26 g/cm<sup>3</sup>

### Kennwerte Trägermaterial NF-Dachhimmel Hyundai Accent

- Flächengewicht des Trägers 980 g/m<sup>2</sup>
- Dicke des Trägers: 2,5 mm
- Dichte des Trägers: 0,4 g/cm<sup>3</sup>

Das Flächengewicht des Gesamtsystems ist höher als bei dem Opel-Dachhimmel und beträgt 1260 g/m<sup>2</sup> bei einer Dicke des Bauteils von ca. 5 mm. Damit liegt die Gesamtdichte des Aufbaus bei ca. 0,26 g/cm<sup>3</sup> und ist deutlich höher als bei dem Sandwichaufbau des Opel-Dachhimmels. Das reine Trägermaterial hat bei einer Dicke von ca. 2,5 mm ein Flächengewicht von 980 g/m<sup>2</sup>. Die Dichte des Trägers liegt somit bei ca. 0,4 g/cm<sup>3</sup>.

## 5 Herstellung von Sandwichverbunden im Pressverfahren

### 5.1 Verbundaufbauten und Pressbedingungen

Für die Verpressung von Verbundwerkstoffen stehen im TITK mehrere Laborpressen zur Verfügung. Bei den Versuchen zur Sandwichherstellung wurde eine kleine Laborpresse von der Firma Schwabenthan zur Vorheizung der Schichtaufbauten eingesetzt. Die Verpressung des Materials erfolgte anschließend in einer 2. Laborpresse von der Fa. Pinette. Die Verbundplatten (Probplatten 30 x 30 cm) wurden bei folgenden Prozessbedingungen hergestellt:

- Vorheizung TITK: Vorheiztemperatur 210 °C, Heizzeit 2 min
- Verpressung TITK: Plattentemperatur 30°C, Presszeit 2 min

Außer den kleinen Platten für die grundlegenden Versuche im TITK wurden auf größeren Pressen in der Industrie weitere Verbunde für die akustischen Prüfungen in der Alpha Kabine gefertigt. Die Platten hatten eine Größe von 100 x 100 cm und wurden unter folgenden Bedingungen abgepresst:

- Vorheizung Industrie: Vorheiztemperatur 210 °C, Heizzeit 1 min, 3 mm Distanz
- Verpressung Industrie: Plattentemperatur 30°C, Presszeit 1 min

Im Rahmen einer ersten Versuchsreihe wurden im TITK Kombinationen von Deckschichten mit unterschiedlichen Fasergehalten und Fasertypen sowie Kernschichten aus gekrempelten und aerodynamisch gelegten Vliesen realisiert (Deckschichtvarianten siehe Tabelle 4). Dabei wurden bei den Varianten V 1.4 bis V 1.6 die niedrigeren Fasergehalte durch die Zugabe von PP-Folien erreicht.

Tabelle 4: Versuchsmusterherstellung im TITK (Versuchsreihe 1)

Versuchsvariante	Flachsanteil [Ma.%]	C-Faseranteil [%]	PP-Anteil [%]
V 1.1 gekrempelt	50	-	50
V 1.2 gekrempelt	25	25	50
V 1.3 gekrempelt	-	50	50
V 1.4 gekrempelt	40	-	60
V 1.5 gekrempelt	20	20	60
V 1.6 gekrempelt	-	40	60

In einer nachfolgenden Versuchsreihe wurden größere Platten in der Industrie gepresst. Dabei kamen aerodynamisch gelegte Vliese, die bei einem Industriepartner des TITK gefertigt wurden, mit unterschiedlichen Flächenmassen zum Einsatz. Diese Materialien wurden aber auch im TITK zu kleinen Musterplatten für die mechanischen Prüfungen verpresst. Eine Zusammenstellung der dabei realisierten Varianten ist Tabelle 5 zu entnehmen.

Tabelle 5: Versuchsvarianten mit Serienmaterialien und TITK-Mustern (Versuchsreihe 2)

Material	Plattenherstellung in der Industrie 100 x 100 cm		Plattenherstellung im TITK 30 x 30 cm	
	Verbunddicke [g/cm <sup>3</sup> ]	Plattendicke [mm]	Verbunddicke [g/cm <sup>3</sup> ]	Plattendicke [mm]
V 2.1 aerodyn. Flachs/PP 1450 g/m <sup>2</sup>	0,71	1,87	0,58	2,21
	0,60	2,16	0,47	2,82
	0,55	2,26	0,39	3,43
V 2.2 aerodyn. Flachs/PP 1600 g/m <sup>2</sup>	0,73	2,16	0,60	2,59
	0,65	2,47	0,49	3,20
	0,60	2,59	0,40	4,21
V 2.3 aerodyn. Flachs/Kenaf/PP 1400 g/m <sup>2</sup>	0,67	1,98	0,53	2,64
	0,59	2,39	0,56	2,61
	0,52	2,63	0,43	3,36

Außer den Versuchsvarianten mit industriell hergestellten Vliesen wurden in einer nächsten Optimierungsschleife Musterplatten (30 x 30 cm) mit TITK-Materialien hergestellt. Dabei kam zur weiteren Reduzierung der Verbunddicke ein Treibmittel (Expancell) zum Einsatz.

Das Treibmittel wurde in einer Konzentration von 10% auf die Fasermatten aufgepulvert und beim nachfolgenden Verpressen durch die Verarbeitungstemperatur aktiviert. Dadurch konnte eine Expansion der Vlieshalbzeuge im Pressprozess erreicht werden, was zu einer weiteren Reduktion der Dichte führte. Die dabei hergestellten Verbundvarianten sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 6: Versuchsvarianten mit TITK-Mustern und Treibmittel (Versuchsreihe 3)

Material	Plattenherstellung im TITK 30 x 30 cm	
	Verbunddichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Plattendicke [mm]
Flachs/PP V 3.1 gekrempelt 1100 g/m <sup>2</sup> (4 Lagen K 2)	0,65	1,52
	0,64	1,57
	0,47	2,21
Flachs/PP V 3.2 gekrempelt 1100 g/m <sup>2</sup> (2 Lagen K 2+ 4 Lagen D4)	0,66	1,42
	0,53	1,75
	0,41	2,17
Flachs/PP V 3.2a gekrempelt 1100 g/m <sup>2</sup> (10 Lagen D4)	0,68	1,45
Flachs/PP V 3.4 gekrempelt 830 g/m <sup>2</sup> (3 Lagen K 2)	0,69	1,04
	0,64	1,32
	0,49	1,54
	0,42	1,91
Flachs/PP V 3.5 gekrempelt 10% Expancell 830 g/m <sup>2</sup> (3 Lagen K 2+ Expancell)	0,50	1,61
	0,41	2,01
	0,36	2,53
	0,23	3,95

Abschließend wurden zur Überprüfung der Umsetzbarkeit der optimierten Vliesvarianten in der Industrie Pressversuche zur Herstellung von Bauteilen durchgeführt (Versuchsreihe 4) Eine Zusammenstellung dieser Versuchsvarianten ist Tabelle 7 zu entnehmen.

Tabelle 7: Versuchsvarianten bei der Bauteilherstellung (Versuchsreihe 4)

Material	Treibmittelanteil [%]	Verbunddichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Plattendicke [mm]
Flachs/PP V 4.1 900 g/m <sup>2</sup> (4 Lagen K 2+ Dekorschäum)	10	0,25-0,31	3,87-3,91
Flachs/PP V 4.2 900 g/m <sup>2</sup> (3 Lagen K 2 ohne Dekor)	10	0,21-0,23	3,88-4,16
Flachs/PP V 4.3 900 g/m <sup>2</sup> (3 Lagen K 2+ Dekorvlies)	10	nicht geprüft	nicht geprüft
Flachs/PP V 4.4 900 g/m <sup>2</sup> (3 Lagen K 2 ohne Dekor)	5	0,24-0,25	3,28-3,46
Flachs/PP V 4.5 900 g/m <sup>2</sup> (3 Lagen K 2 ohne Dekor)	0	0,20-0,22	3,65-3,79

## 5.2 Probenentnahme aus den Musterplatten

Die Probenentnahme aus den in der Industrie hergestellten Musterplatten für die mechanischen und akustischen Prüfungen erfolgte nach dem in Bild 4 dargestellten Plan.

### Proben für Werkstoffprüfungen

Alpha Kabine:	1000 x 1000 mm
Biegung:	20xD x 15 mm x Dicke
Biegung bei Temp.:	220 x 50 mm x Dicke (IAC)
Luftdurchlässigkeit:	250 x 250 mm (LD)
Fogging:	80 mm Durchmesser (F)
Akustik:	100 mm Durchmesser (A) 30 mm Durchmesser (A)

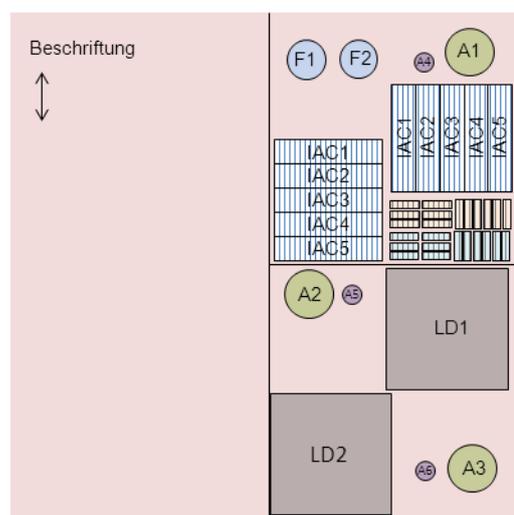


Bild 4: Probenentnahme aus den Musterplatten

Als erste Prüfungen wurden an den großen Musterplatten die Messungen in der Alpha Kabine vorgenommen, da hierfür eine Fläche von 1000 x 1000 mm erforderlich ist. Danach wurden die Platten zersägt, um die Proben für die weiteren Tests zu erhalten. Die Proben für die mechanischen Prüfungen wurden jeweils in Längs- und Querrichtung entnommen, um Richtungsabhängigkeiten in den Materialaufbauten erfassen zu können. Es wurden sowohl Biegeproben für die Prüfung bei Raumtemperatur nach Norm als auch für einen Test bei erhöhter Temperatur (IAC-Test) ausgesägt. Für die Bestimmung der Luftdurchlässigkeit wurden rechteckige Zuschnitte (250 mm x 250 mm) verwendet. Die Bestimmung von Foggingwerten erfolgte an Ronden mit 80 mm Durchmesser. Für weitere akustische Messungen im Impedanzmessrohr wurden ebenfalls kreisrunde Proben mit 30 und 100 mm Durchmesser ausgeschnitten.

## 5.3 Probenentnahme aus den Referenz-Dachhimmeln

Die Entnahme der Prüfkörper aus den Referenz-Dachhimmeln erfolgte nach dem gleichen Schema. Die Entnahmestellen für die einzelnen Proben sind in den Bildern 5 und 6 dargestellt.

Proben für Werkstoffprüfungen  
Entnahmeplan Dachhimmel Opel Zafira

Alpha Kabine:	1000 x 1000 mm
Biegung ISO 178:	20xD x 15 mm x Dicke
Biegung 100°C:	220 x 50 mm x Dicke (IAC)
Luftdurchlässigkeit:	250 x 250 mm (LD)
Fogging:	80 mm Durchmesser (F)
Akustik:	100 mm Durchmesser (A)
	30 mm Durchmesser (A)

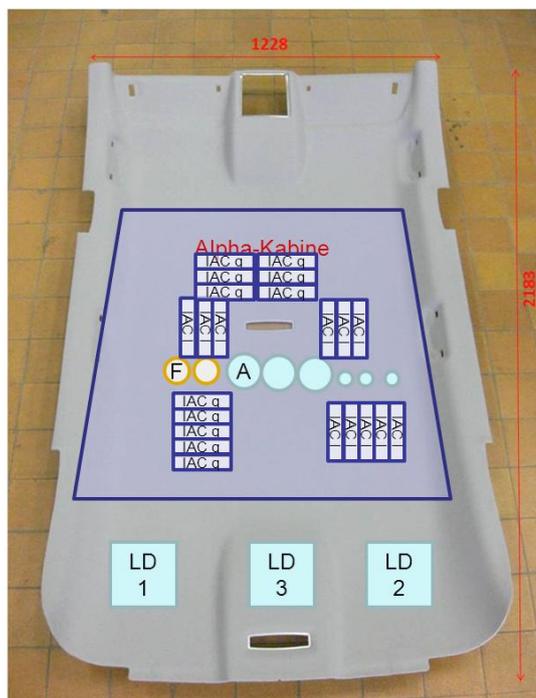


Bild 5: Probenentnahme aus dem Referenz-Dachhimmel Opel Zafira

Proben für Werkstoffprüfungen  
Entnahmeplan Dachhimmel Hyundai Accent

Alpha Kabine:	1000 x 1000 mm
Biegung ISO 178:	20xD x 15 mm x Dicke
Biegung 100°C:	220 x 50 mm x Dicke (IAC)
Luftdurchlässigkeit:	250 x 250 mm (LD)
Fogging:	80 mm Durchmesser (F)
Akustik:	100 mm Durchmesser (A)
	30 mm Durchmesser (A)

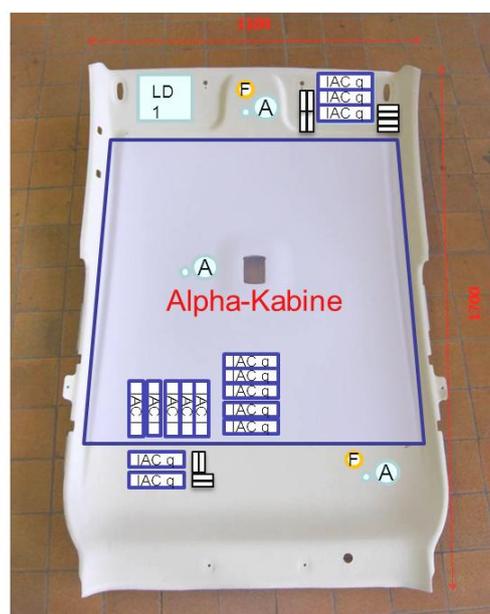


Bild 6: Probenentnahme aus dem Referenz-Dachhimmel Hyundai Accent

## 6 Werkstoffprüfung

### 6.1 Prüfungen an Fasern und Vliesen

Die Eigenschaften der eingesetzten Fasermaterialien wurden mit Hilfe folgender Prüfverfahren charakterisiert:

- Faserfeinheit: nach DIN EN ISO 1973
- Festigkeit/Reißdehnung: nach DIN EN ISO 5079
- E-Modul: in Anlehnung an DIN EN ISO 5079  
Prüfgerät: Fafegraf M
- mittlere Faserlänge: nach DIN 53808

Die Charakterisierung der Eigenschaften der hergestellten Faservliese erfolgte durch die nachstehend aufgeführten Prüfungen:

- Flächenmasse: nach DIN EN 29073-1  
A=576 cm<sup>2</sup> (Zuschnitte 240 mm x 240 mm)
- Vliesdicke und Rohdichte: nach DIN EN 29073-2  
A=25 cm<sup>2</sup>  
M=125 g (0,5 kPa)  
t=10 s
- Luftdurchlässigkeit: nach DIN EN ISO 9237  
A=20 cm<sup>2</sup>  
P=200 Pa

### 6.2 Mechanische Verbundprüfungen

- Biegeprüfung: nach DIN EN ISO 178 bei Raumtemperatur  
Prüfgerät: Universalprüfmaschine Instron 4466  
Probenmaße: 20xDicke mm x 15 mm x Dicke  
Prüfgeschwindigkeit: 1 mm/min  
Bestimmung der Durchbiegung, F<sub>max</sub> und E-Modul in Längs- und Querrichtung
- Biegeprüfung: 200 mm Auflagerabstand bei RT und 100 °C  
Prüfgerät: Universalprüfmaschine Instron 4466  
Probenmaße: 220 mm x 50 mm x Dicke  
Prüfgeschwindigkeit: 20 mm/min  
Bestimmung der Durchbiegung, F<sub>max</sub>, E-Modul und Durchbiegung bei F=2 N
- Biegeprüfung: 200 mm Auflagerabstand im Klimaschrank  
Prüfgerät: Prüfvorrichtung mit Wegmessung  
Probenmaße: 220 mm x 50 mm x Dicke  
Bestimmung der Durchbiegung in Abhängigkeit der Zeit und des Klimas

### 6.3 Foggingtest, Geruchsprüfung, Schimmeltest

- Fogging: nach DIN 75201-B  
 Prüfgerät: Haake Foggingtester  
 Probenmaße: Durchmesser 80 mm x Probendicke
- Geruch: nach VDA 270-B3  
 Prüftemperatur: 80°C  
 Prüfdauer : 2h
- Schimmeltest: nach GME 60287

### 6.4 Akustische Prüfungen

#### 6.4.1 Impedanzmessung an Probekörpern

Für erste orientierende Untersuchungen zur Prüfung der akustischen Eigenschaften der hergestellten Verbunde stand im TITK ein Impedanzmessrohr vom Typ SAB 105-100 zur Verfügung. Mit diesem Messsystem kann der Absorptionsgrad eines Materials schnell über einen weiten Frequenzbereich bestimmt werden. Die Apparatur besteht im Wesentlichen aus einem Rohr mit einem Probenbehälter an einem Ende und einer Schallquelle am anderen Ende (siehe Bild 7).

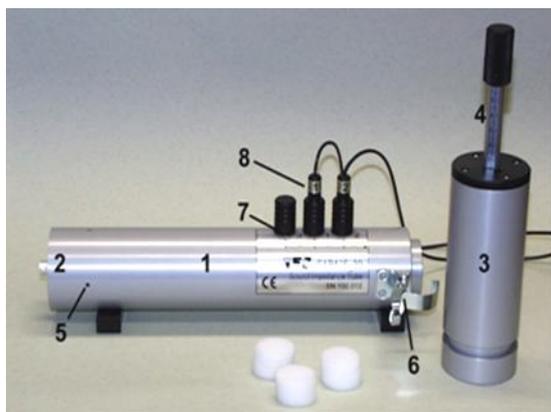


Bild 7: Impedanzmessrohr

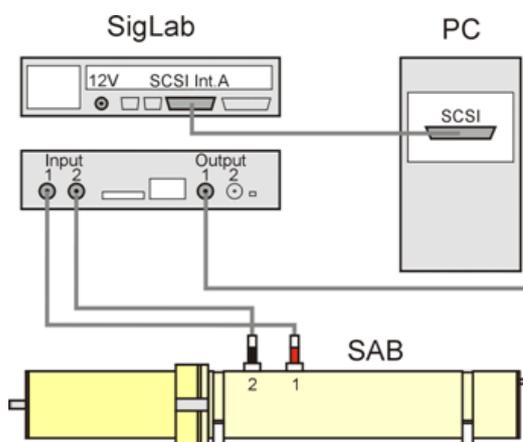


Bild 8: Schema des Messprinzips

Mit Hilfe einer Kolbenstange kann der im Inneren des Probenbehälters befindliche Kolben bewegt und so das Innenvolumen des Probenbehälters an die Materialprobe angepasst werden. Die Tiefe des Innenvolumens lässt sich hierbei an einer äußeren Skala der Kolbenstange ablesen. Durch die Mikrofonbuchse, rechtsseitig auf dem Rohr, werden die Messmikrofone in das Messrohr eingeführt. Im Impedanzrohr wird eine ebene Schallwelle gegen eine schall absorbierende Materialprobe vor einen schallharten Anschluss ausgesendet und der resultierende Schalldruck von zwei vor der Probe positionierten Mikrofonen gemessen (Prinzip siehe Bild 8).

Durch Auswertung der einfallenden und reflektierten Schallenergie lässt sich anschließend das Schallabsorptionsvermögen des Materials bestimmen. Im Gegensatz zum Hallraumverfahren (mit diffusem Schalleinfall) ist das Impedanzrohrverfahren auf parametrische Untersuchungen bei senkrechtem Schalleinfall begrenzt und erfordert kreis- oder zylinderförmige Prüflinge, welche die gleiche Größe wie der Querschnitt des Rohres besitzen. Das Verfahren für die Messung nach der Zwei-Mikrofon-Methode ist in den Richtlinien EN ISO 10534-2 sowie ASTM E 1050-98 genormt. Vorteilhaft bei dieser Messmethode ist vor allem der geringe Materialbedarf durch die kleine Probengröße, sowie die Mobilität des Messgerätes. Die Messungen im Rahmen des Projektes erfolgten an kreisrunden Proben mit Durchmessern von 30 und 100 mm. Zur Auswertung der akustischen Eigenschaften wurde der frequenzabhängige Verlauf der Absorptionsfunktion, Reflexionsfunktion und Impedanzfunktion betrachtet. Definitionsgemäß werden hierbei alle Kenngrößen zwischen 0 und 1 angegeben und ergänzen sich bei vergleichbaren Frequenzen zu 1.

#### 6.4.2 Akustikprüfung in der Alpha-Kabine

Die Alpha-Kabine ist eine Kammer (verkleinerter Hallraum, siehe Bild 9), in der zur Ermittlung des Schallabsorptionsverhaltens von Plattenmaterial oder Bauteilen ein diffuses Schallfeld erzeugt wird. Über der Probe bewegt sich das Mikrofon mit einem vorgegebenen Bewegungsablauf und nimmt die akustischen Messwerte auf (Bild 10).



Bild 9: Alpha Kabine



Bild 10: Probenaufspannung

Bei der Akustikprüfung der Materialien in der Alpha-Kabine werden mindestens 1 m große Zuschnitte benötigt. Die Materialzuschnitte wurden mit einem Holzrahmen aufgespannt und in die Alpha-Kabine eingelegt. Der Abstand der Probe zum Untergrund betrug 18 mm (Dicke des Holzrahmens). Anschließend wurden die Messungen über einen Frequenzbereich von ca. 400 bis 8000 Hz durchgeführt. Dadurch kann der Schallabsorptionsgrad unterschiedlicher Materialien und Schichtaufbauten unter definierten Bedingungen miteinander verglichen werden.

## 7 Eigenschaften der Ausgangsmaterialien

### 7.1 Kennwerte der eingesetzten Fasermaterialien

Die Fasereigenschaften der verschiedenen Verstärkungsfasern sind in Tabelle 8 gegenübergestellt.

Tabelle 8: Fasereigenschaften der eingesetzten Verstärkungsfasern

Fasertyp	Mittlere Feinheit [dtex]	Reißfestigkeit		Reißdehnung [%] korr.	E-Modul		Mittlere Faserlänge [mm]
		[cN/tex]	[N/mm <sup>2</sup> ]		[cN/tex]	[kN/mm <sup>2</sup> ]	
Röstflachs Mielsdorf E	54	48,5	717,8	1,36	3566	52,8	74,0
Hanf BAFA	111	55,1	826,4	1,20	4591	68,9	59,0
Recycling-C-Fasern	0,9	245,0	4410	2,52 (unkorr.)	9679	174,2	32,0

Die Festigkeiten der eingesetzten Naturfasern liegen auf einem Niveau von 50-55 cN/tex und sind damit recht hoch (Hanf hat leicht höhere Werte als Flachs). Deutliche Unterschiede bestehen allerdings bei der Faserfeinheit. Die Flachsfasern haben mit einer Feinheit von 54 dtex niedrigere Faserdurchmesser und eignen sich gut zur Herstellung von leichten und hoch orientierten Vliesen. Deutlich größer sind die Hanffasern mit Feinheiten über 100 dtex. Auch der E-Modul der Hanffasern ist höher als bei Flachs. Dieses Fasermaterial wurde zur Herstellung von voluminösen Kernschichten ohne ausgeprägte Faserorientierung eingesetzt.

Wesentlich höhere Faserfestigkeiten und Steifigkeiten wurden bei den Recyclingcarbonfasern gemessen. Dabei ist vor allem zu beachten, dass die Einzelfilamente viel feiner sind als die marktverfügbaren Naturfasern. Bedingt durch den hohen Faser-E-Modul sind die Carbonfasern allerdings sehr spröde und haben nach dem Recyclingprozess nur noch geringe Faserlängen. Aufgrund der Fasereigenschaften (hohe Festigkeit und E-Modul) sind sie jedoch sehr gut für die Verstärkung von Kunststoffen geeignet. Ausgehend von den Fasereigenschaften wurden die unterschiedlichen Fasermaterialien in Kombination mit den PP-Bindefasern in den Kern- und Deckschichten eingesetzt.

Für die Kernvliese wurden vorliegende Materialien verwendet

- Hanf BAFA (grobe Fasern)
- Röstflachs der Fa. Mielsdorf (feine Fasern)
- PP 7 dtex/60 mm (als Bindefasern)
- PP Recyclingfasern (als Bindefasern)

Als Materialien für das Deckvlies wurden folgende Materialien ausgewählt:

- Röstflachs der Fa. Mielsdorf (feine Fasern)
- Recyclingkarbonfasern
- PP 7 dtex/60 mm (als Bindefasern)

## 7.2 Eigenschaften der verwendeten Naturfaservliese

An den Vliesvarianten wurden folgende Eigenschaften bestimmt (Tabelle 9).

Tabelle 9: Ergebnisse der Vliesprüfungen

Bezeichnung	Flächenmasse [g/m <sup>2</sup> ]	Vliesdicke [mm]	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
Vliese für die Kernlagen von Sandwichmaterialien			
Kernvlies K1 Hanf/PP 80/20 TITK, gekrempelt	424	5,0	84,8
Kernvlies K2 Flachs/PP 50/50 TITK, gekrempelt	276	5,1	54,0
Kernvlies K3 Flachs/PP 50/50 Industrie, aerodynamisch	1244	9,1	136,7
Kernvlies K4 Flachs/PP 50/50 Industrie, aerodynamisch	1631	12,1	134,8
Kernvlies K5 Flachs/Kenaf/PP Industrie, aerodynamisch	1368	10,3	132,8
Vliese für die Decklagen von Sandwichmaterialien			
Deckvlies D1 Flachs/PP 50/50 TITK, gekrempelt	132	3,4	38,8
Deckvlies D2 Flachs/Carbon/PP 25/25/50 TITK, gekrempelt	140	4,1	24,1
Deckvlies D3 Carbon/PP 50/50 TITK, gekrempelt	106	2,9	35,3
Deckvlies D4 Flachs/PP 50/50 TITK, gekrempelt	127	3,0	42,0

## 8 Verbundeigenschaften der Sandwichmaterialien

### 8.1 Mechanische Verbundeigenschaften

#### 8.1.1 Biegeeigenschaften in Abhängigkeit des Schichtaufbaus

Die in dem ersten Versuchsblock hergestellten Verbundplatten hatten unterschiedliche Aufbauten hinsichtlich der Deckschichten und auch der Flächenmasse des Gesamtsystems. Untersucht werden sollte mit diesen Materialkombinationen der Einfluss unterschiedlicher Verstärkungsfasern und Mischungsanteile der Komponenten.

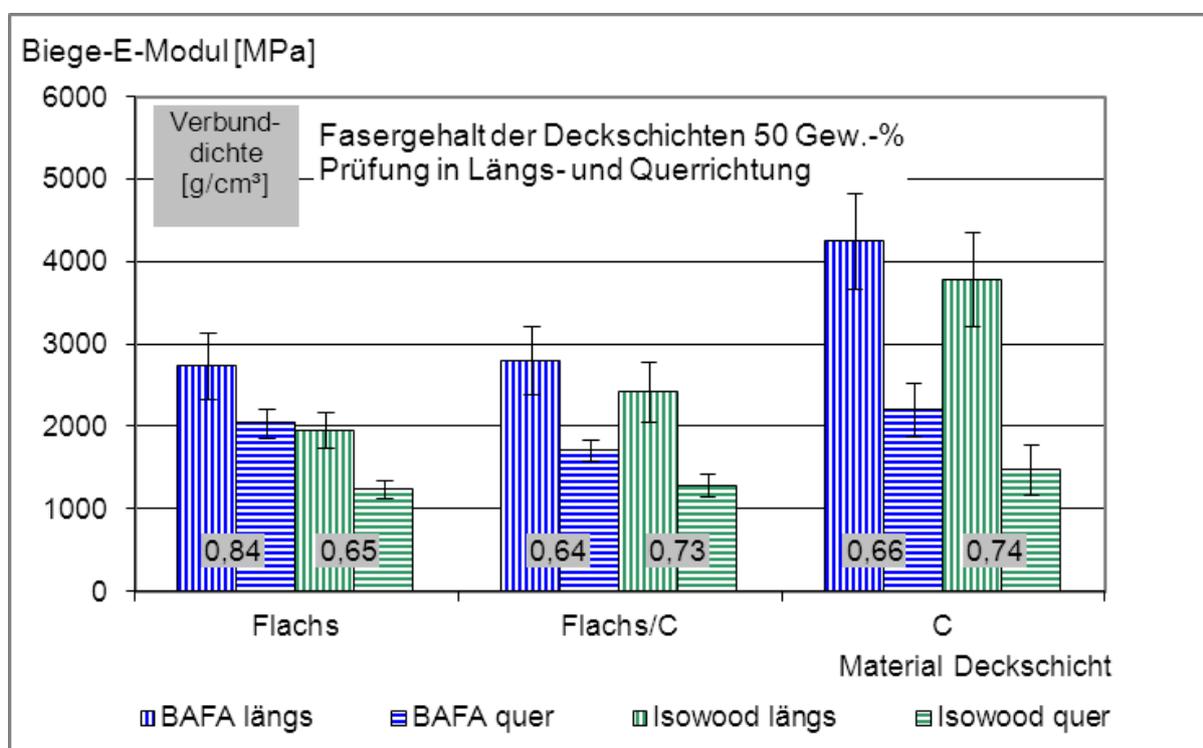
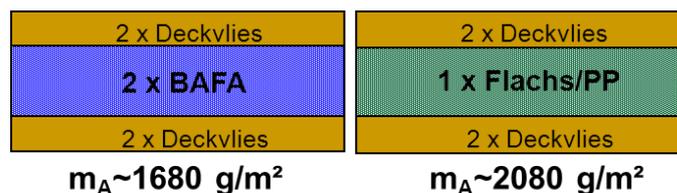


Bild 11: Biegemodul bei Einsatz unterschiedlicher Kern- und Deckschichten

Bei den ersten Versuchen wurden unterschiedliche Kernlagen (Hanf/PP 80/20 und Flachs/PP 50/50) mit verschiedenen Decklagen (Flachs/PP, Flachs/Carbon/PP und Carbon/PP) mit einem Verstärkungsfasergehalt von 50 % kombiniert. Anhand der Grafik zeigt sich, dass mit den Hanfvliesen in der Kernlage etwas höhere Biegesteifigkeiten erreicht werden konnten als bei Verwendung von aerodynamisch gelegten Flachsvliesen (Bild 11). Dabei verringert sich die Biegesteifigkeit mit abnehmender Verbunddichte. Deutlich ausgeprägt ist auch die Orientierung der Deckschichten, die sich in unterschiedlichen Längs- und Querwerten widerspiegelt.

Interessant ist der Einfluss der unterschiedlichen Verstärkungsfasern. Die Zumischung von 25% C-Fasern zu den Naturfasern in den Deckschichten bewirkte keine Steigerung der mechanischen Eigenschaften. Erst bei Einsatz von Deckvliesen die nur mit Carbonfasern hergestellt wurden, konnte eine Erhöhung der Biegesteifigkeit nachgewiesen werden. Dabei vergrößerte sich auch der Unterschied in den Eigenschaften längs/quer (Erhöhung der Anisotropie). Eigentlich wurde eine deutlichere Abstufung der Biegesteifigkeit erwartet, da die Carbonfasern wesentlich bessere mechanische Eigenschaften als die Naturfasern haben. Offenbar ist die Haftung zwischen den Carbonfasern und der PP-Matrix bei einer geringen Verdichtung der Vliese sehr schlecht, sodass die hohen Faserfestigkeiten und Steifigkeiten der Carbonfasern nicht ausgeschöpft werden können.

Eine wichtige Rolle spielt allerdings auch der Fasergehalt der Deckschichten und des Kernmaterials. Es war zu erwarten, dass bei einem niedrigeren Fasergehalt in den Deckschichten mehr Matrixmaterial für die Anbindung an die Kernschicht zur Verfügung steht. Dieser Einfluss lässt sich in Bild 12 erkennen.

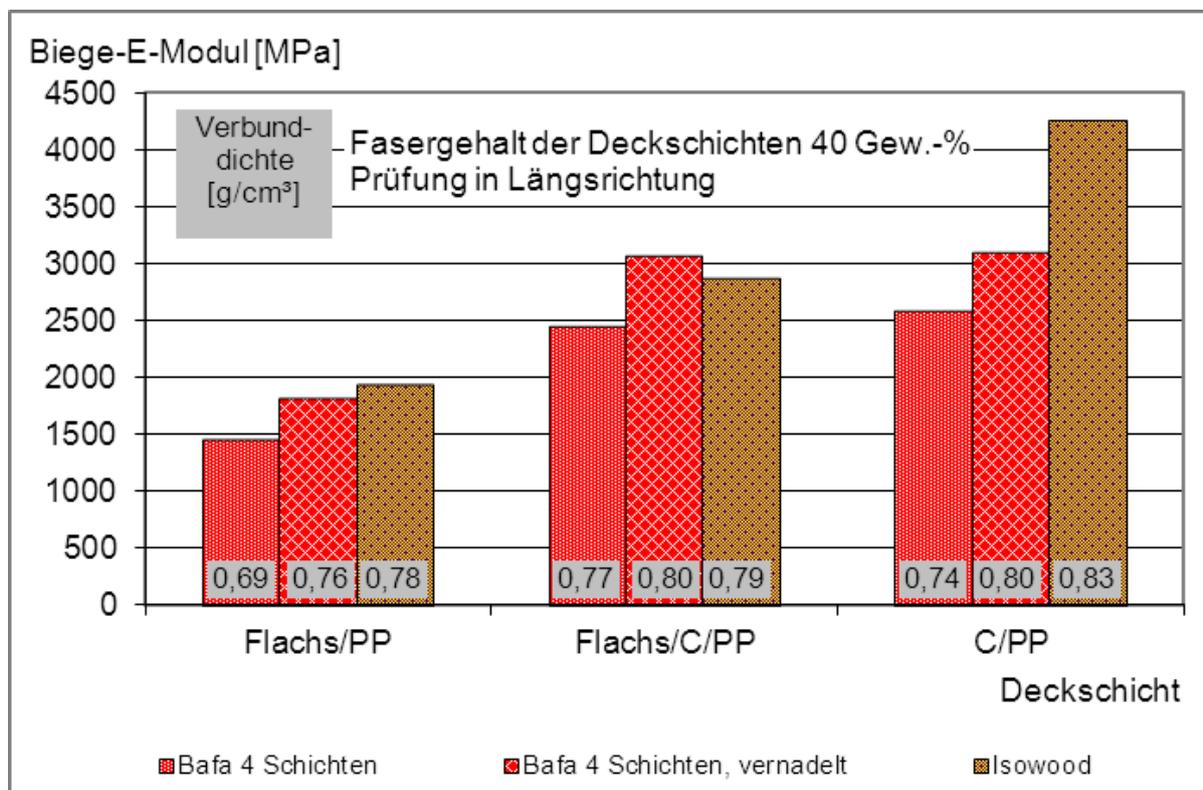


Bild 12: Biegemodul bei unterschiedlichen Schichtaufbauten

Bei einem niedrigeren Fasergehalt in den Deckschichten ergab sich eine deutlichere Abstufung zwischen den unterschiedlichen Fasermischungen als bei 50 Gew.-% Fasergehalt. Hier nimmt die Verbundsteifigkeit mit ansteigendem Carbonfaseranteil zu. Allerdings ist die Steifigkeit des Gesamtsystems etwas niedriger als bei einem Fasergehalt der Deckschichten von 50 Gew.-%. Deutlich zeigt sich auch wieder der Einfluss der Verbunddichte.

Mit abnehmender Verbunddichte werden niedrigere E-Modulwerte gemessen. Ähnliche Tendenzen sind auch bei Betrachtung der Normbiegespannung zu erkennen (Bild 13).

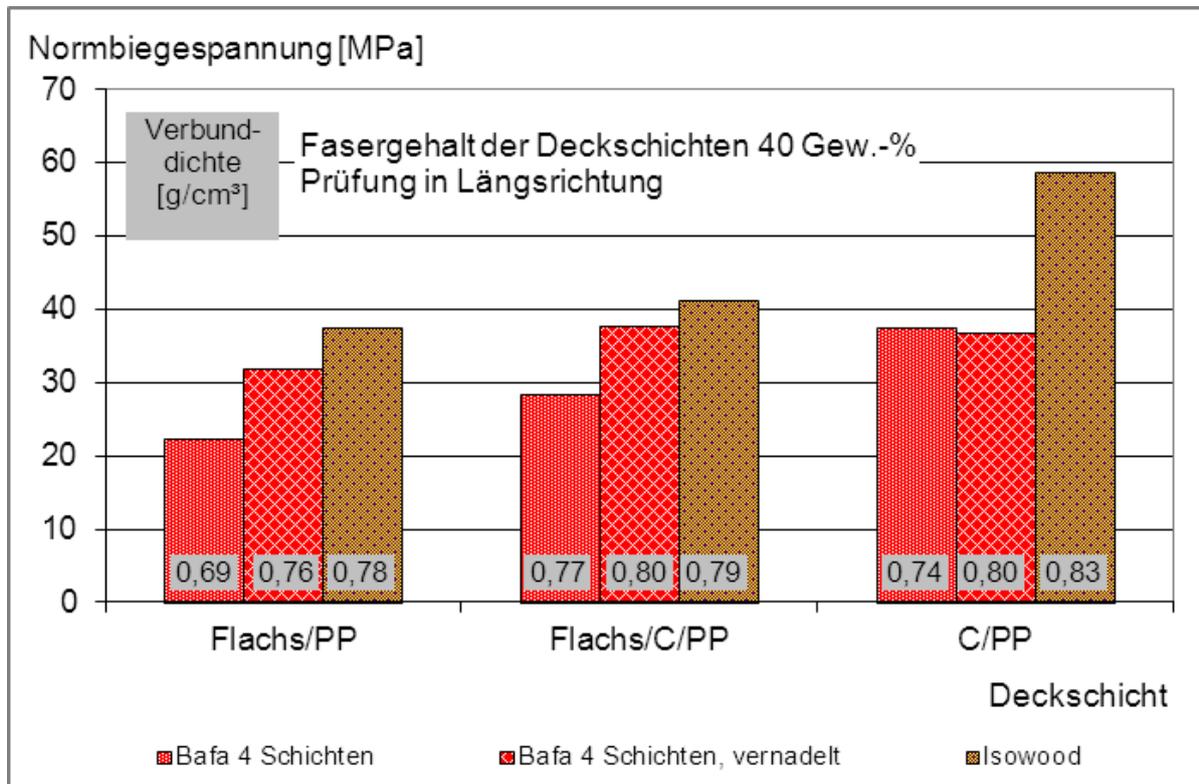


Bild 13: Normbiegespannung bei unterschiedlichen Schichtaufbauten

Ausgehend von den Ergebnissen dieser ersten Versuchsserie konnten folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Die Wechselwirkungen zwischen den gewählten Fasergehalten und Schichtaufbauten sind sehr komplex. Höhere Fasergehalte in den Deckschichten führen nicht zwangsläufig zu besseren mechanischen Eigenschaften.
- Bei hohen Fasergehalten in den Deckschichten und in der Kernschicht sind die Anbindung der Schichten und die Faser-Matrix-Haftung problematisch.
- Der Einsatz von hochfesten und steifen Recycling-Carbonfasern verbessert die mechanischen Eigenschaften der Verbunde nur geringfügig. Offenbar ist die Haftung zum PP extrem schlecht.
- Mit abnehmender Verbunddichte verringern sich auch die mechanischen Kennwerte der Verbunde.
- Die Kombination von hochorientierten Deckschichten und Kernschichten ohne eine gerichtete Faserorientierung ist möglich, bringt aber keine signifikanten Vorteile gegenüber homogen aufgebauten Naturfaserverbunden.
- Für konkurrenzfähige Dachhimmelsysteme muss die Verbunddichte bei geringen Flächenmassen der Träger auf möglichst niedrige Werte (kleiner 0,4 g/cm<sup>3</sup>) gebracht werden.

### 8.1.2 Biegewerte im Vergleich zu Referenz-Dachhimmeln

Nach den grundlegenden Versuchen mit unterschiedlichen Deckschichten und Kernmaterialien wurden weitere Tests (Versuchsreihe 2) mit in der Industrie hergestellten aerodynamisch gelegten Vliesen durchgeführt. Bei diesen Versuchen wurde zunächst auf die Verwendung von hochorientierten Deckschichten verzichtet, um die Variationsmöglichkeiten bei der Verbundherstellung einzugrenzen. Die Flächenmassen der eingesetzten Materialien lagen in einem Bereich von 1400 bis 1600 g/m<sup>2</sup> (vgl. Tabelle 5).

Zur besseren Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse mit den Kennwerten der beschafften Serienmaterialien wurden die Biegeprüfungen nicht nach DIN EN ISO 178 durchgeführt, sondern in Anlehnung an einen Biegetest in der Automobilzulieferindustrie. Bei dieser Methode erfolgt die Biegeprüfung bei einem festen Auflagerabstand von 200 mm. Die Durchbiegung wurde bei einer Last von 2 N (das entspricht ca. 200 g) bei Raumtemperatur und auch 100°C (geforderte Temperaturbeständigkeit im Innenraum) gemessen. Damit sollte eine reale Einbausituation mit einer bestimmten Last (z.B. Anbauteil) simuliert werden. Die Ergebnisse der Prüfungen bei Raumtemperatur und bei 100°C sind in den Bildern 14 bis 16 dargestellt.

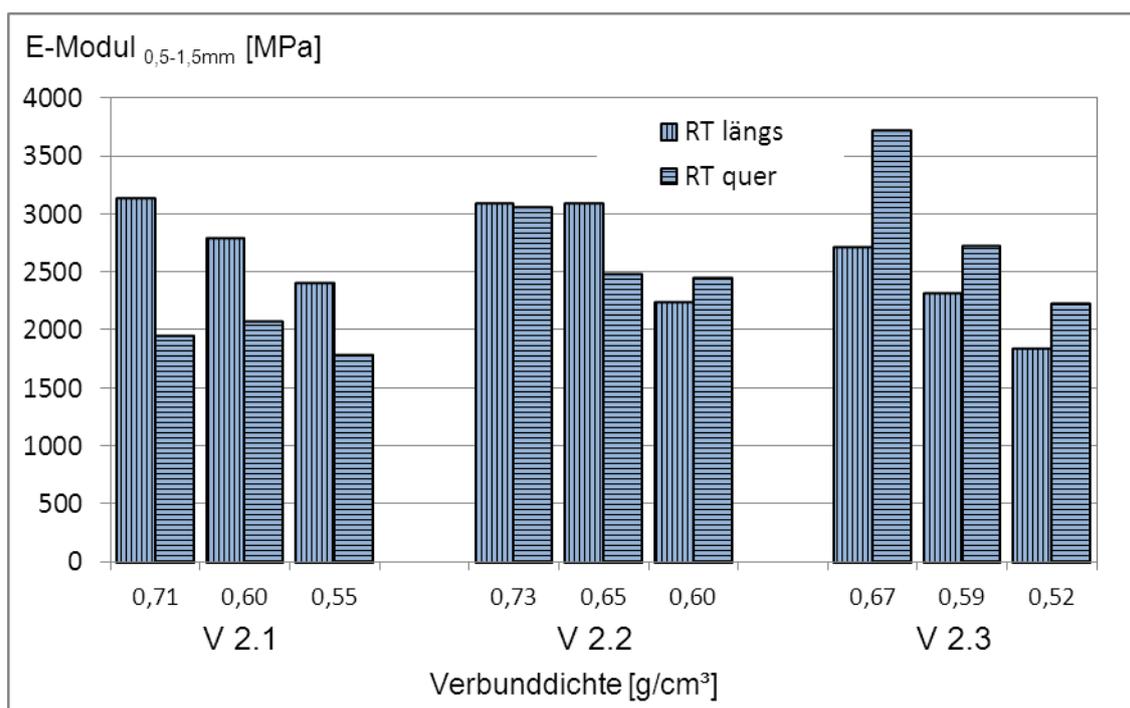


Bild 14: Biege-E-Modul von Naturfaser/PP-Verbunden bei RT

Die Biegesteifigkeit der in der zweiten Versuchsreihe hergestellten Naturfaserverbunde liegt in einem Bereich von ca. 2000 bis 3600 MPa. Teilweise gibt es große Unterschiede zwischen Längs- und Querrichtung. Mit abnehmender Verbunddicke ist eine Verringerung der Steifigkeit zu verzeichnen.

Die Durchbiegung bei einer Kraft von 2 N liegt bei den untersuchten Varianten in einem Bereich von 2 bis 7 mm. Die geringste Durchbiegung wurde bei Verbunden aus Material V 2.2 gemessen. Hier ist allerdings auch die Flächenmasse mit 1600 g/m<sup>2</sup> sehr hoch. Mit abnehmender Dichte ist aber auch eine Verringerung der Durchbiegung feststellbar. Betrachtet man zusätzlich die Durchbiegungswerte bei erhöhter Temperatur dann ergeben sich die in Bild 16 dargestellten Relationen.

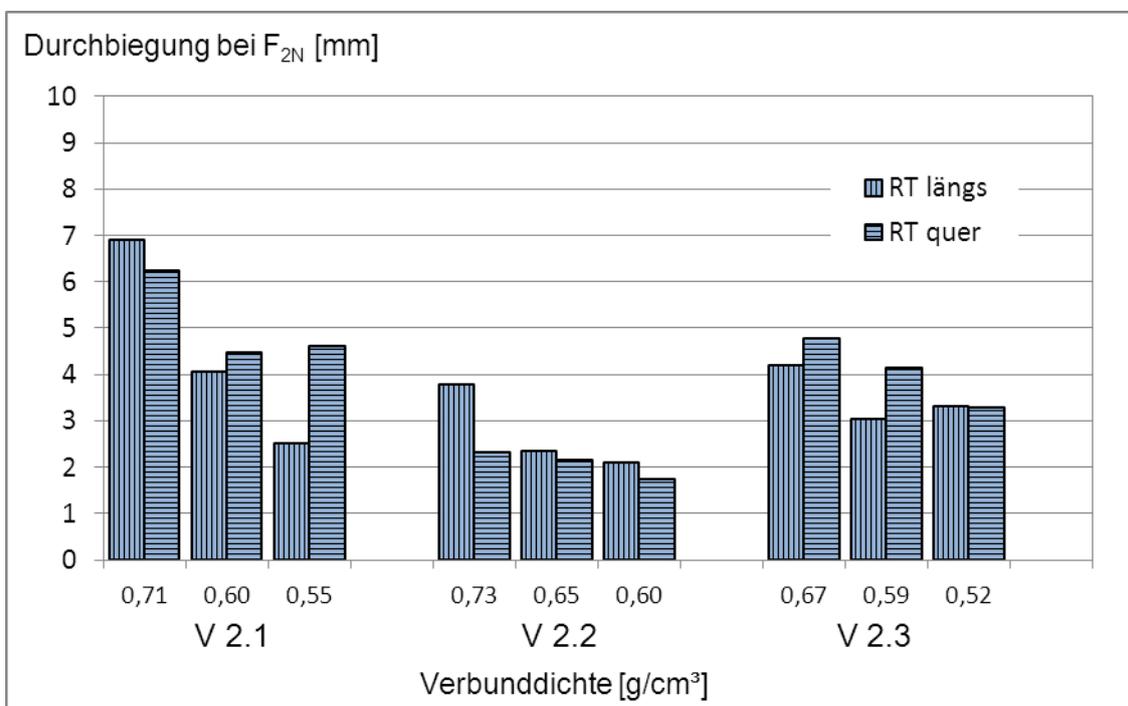


Bild 15: Durchbiegung von Naturfaser/PP-Verbunden bei RT und 2N Belastung

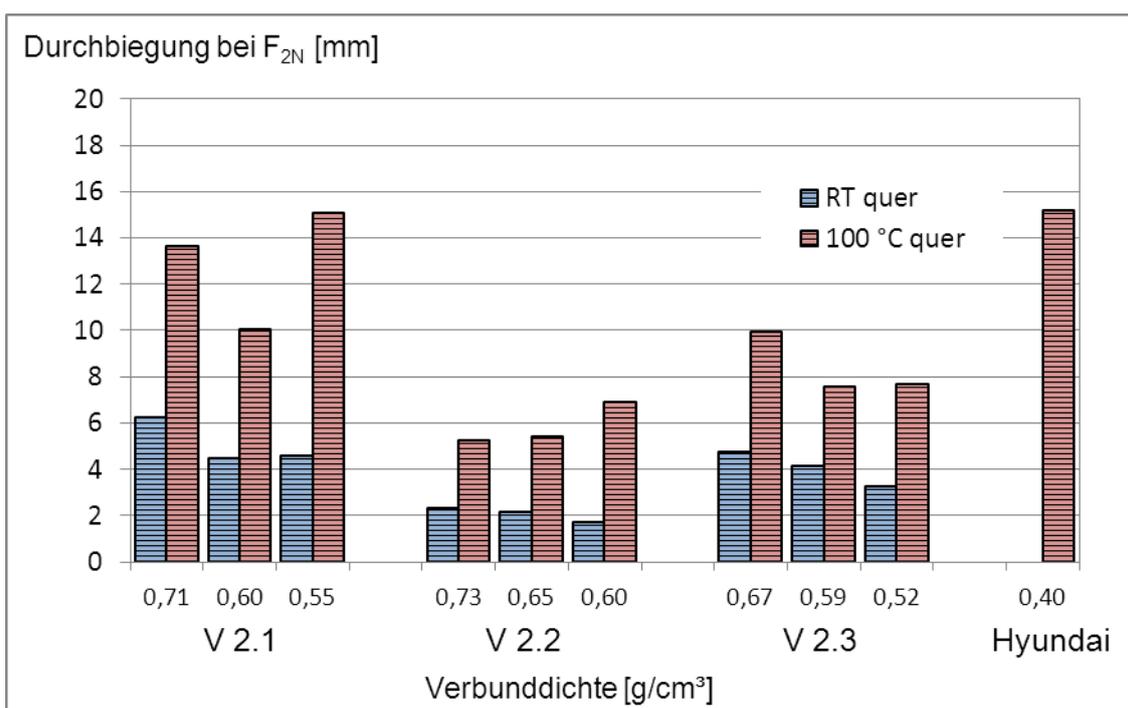


Bild 16: Durchbiegung bei unterschiedlichen Temperaturen

Die gemessene Durchbiegung steigt erwartungsgemäß mit zunehmender Temperatur an (teilweise mehr als Verdoppelung) und erreicht bei einigen Varianten (V 2.1) sehr hohe Werte (größer als 10 mm). Das trifft allerdings auch auf das Referenzmaterial (Hyundai Accent) zu. Die Varianten V 2.2 und V 2.3 haben eine deutlich geringere Durchbiegung bei 100°C als das Referenzmaterial. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass die Verbunddichten dieser Varianten mit 0,5 bis 0,7 g/cm<sup>3</sup> auch höher sind als bei dem Hyundai-Dachhimmel, der eine Verbunddichte des Trägermaterials von 0,4 g/cm<sup>3</sup> hat (siehe Bild 16). Geht man davon aus, dass mit dem Hyundai Dachhimmel in der Anwendung offenbar die geforderten mechanischen Kennwerte erfüllt werden, sollte noch eine weitere Verringerung der Dichte und auch Flächenmasse bei den Naturfasermaterialien möglich sein.

In einer anderen Darstellung der Kennwerte über der Verbunddichte können die im Rahmen der zweiten Versuchsreihe in der Industrie verpressten Platten wie folgt gegenübergestellt werden (Bild 17).

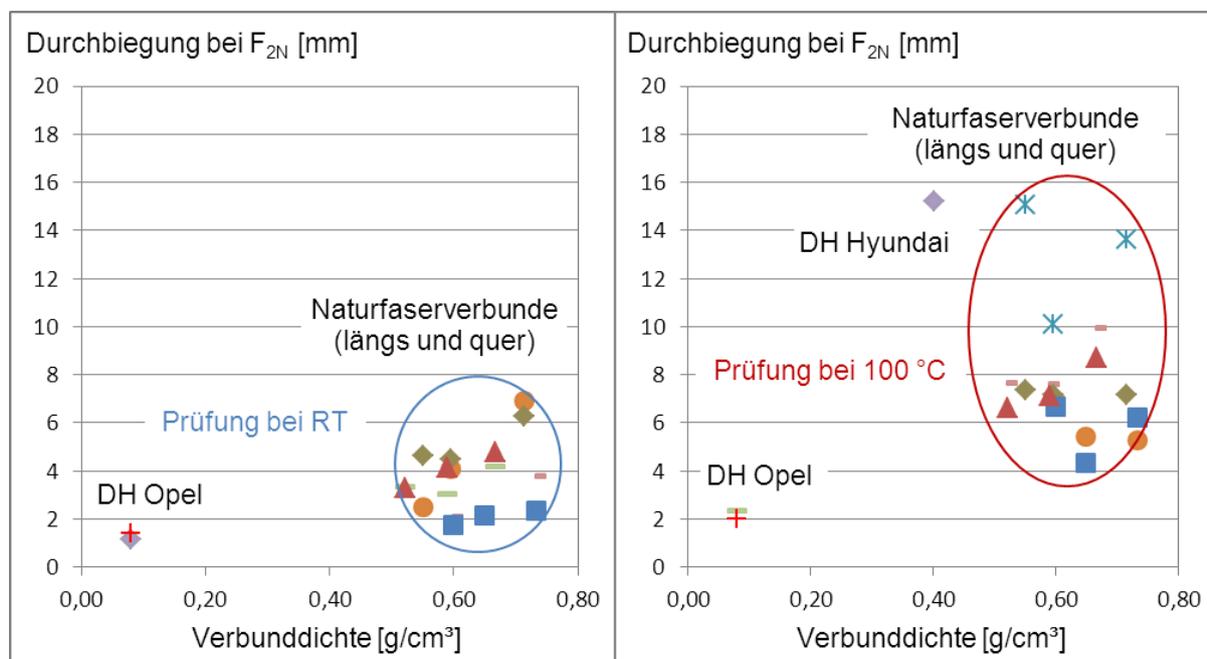


Bild 17: Durchbiegung in Abhängigkeit der Verbunddichte bei RT und 100°C (längs und quer)

Die Durchbiegung der Naturfasermaterialien ist bei Verbunddichten von 0,5 bis 0,7 g/cm<sup>3</sup> bei Raumtemperatur bei einigen Varianten relativ niedrig. Die Dichte dieser Verbunde ist aber im Vergleich zu den Serienmaterialien noch zu hoch.

Vergleicht man die Werte bei einer Prüftemperatur von 100°C mit dem Schaumverbund (Dachhimmel Opel Zafira), dann werden die Defizite der Varianten aus genadelten Vliesen deutlich. Während bei dem Schaumverbund die Durchbiegung auch bei 100°C nur geringfügig ansteigt, erhöht sich die Durchbiegung bei den Vliesverbunden deutlich. Das trifft allerdings auch auf das Referenzmaterial (Dachhimmel Hyundai Accent) zu.

Eine weitere Optimierung musste also in Richtung niedrigerer Bauteildichten gehen, um vor allem die Durchbiegungswerte zu verbessern. Aus diesem Grund wurden die Vliesvarianten nochmals im TITK unter Laborbedingungen mit geringeren Verbunddichten verpresst. Die Ergebnisse der Prüfungen bei Raumtemperatur sind in Bild 18 dargestellt.

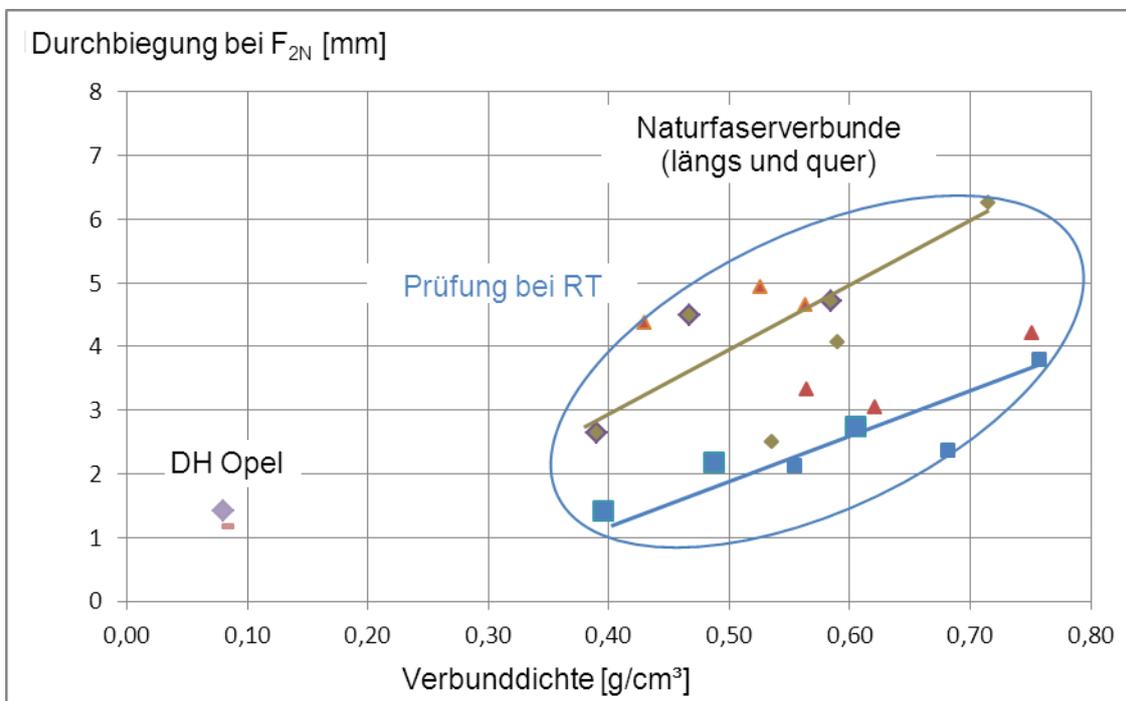


Bild 18: Durchbiegung in Abhängigkeit der Verbunddichte bei RT (längs)

Anhand der Grafik wird deutlich, dass bei einer weiteren Reduzierung der Verbunddichte die Durchbiegung der Naturfaserverbunde nochmals abnimmt. Allerdings wurde bei einer Verbunddichte von ca. 0,4 g/cm<sup>3</sup> eine Grenze erreicht. Eine noch geringere Verdichtung war nicht möglich, da das Naturfasermaterial beim Aufheizen in der Vorheizstation bei großen eingestellten Dicken (erforderlich für geringe Verbunddichten) bereits schrumpft. Die Naturfasermatte hat offenbar zu niedrige Rückstellkräfte, wodurch kein ausreichender Kontakt an der Vorheizstation zustande kommt. Das Schrumpfen führt zu einer Veränderung der Flächenmasse (Zunahme) und zur Faltenbildung bei der Plattenherstellung. Aus diesem Grund musste ein anderer Weg zur weiteren Verringerung der Dichte gesucht werden.

Im Hinblick auf die spätere Montage des Dachhimmels ist aber auch die erforderliche Kraft bei der Biegung des Materials von Bedeutung, da die Bauteile beim Einbau in das Fahrzeug verformt werden müssen. Um diese Werte bestimmen zu können wurden die Kraft-Weg-Kurven von unterschiedlichen Dachhimmelmaterialien aufgenommen. Eine Gegenüberstellung der Kurvenverläufe zeigt Bild 19.

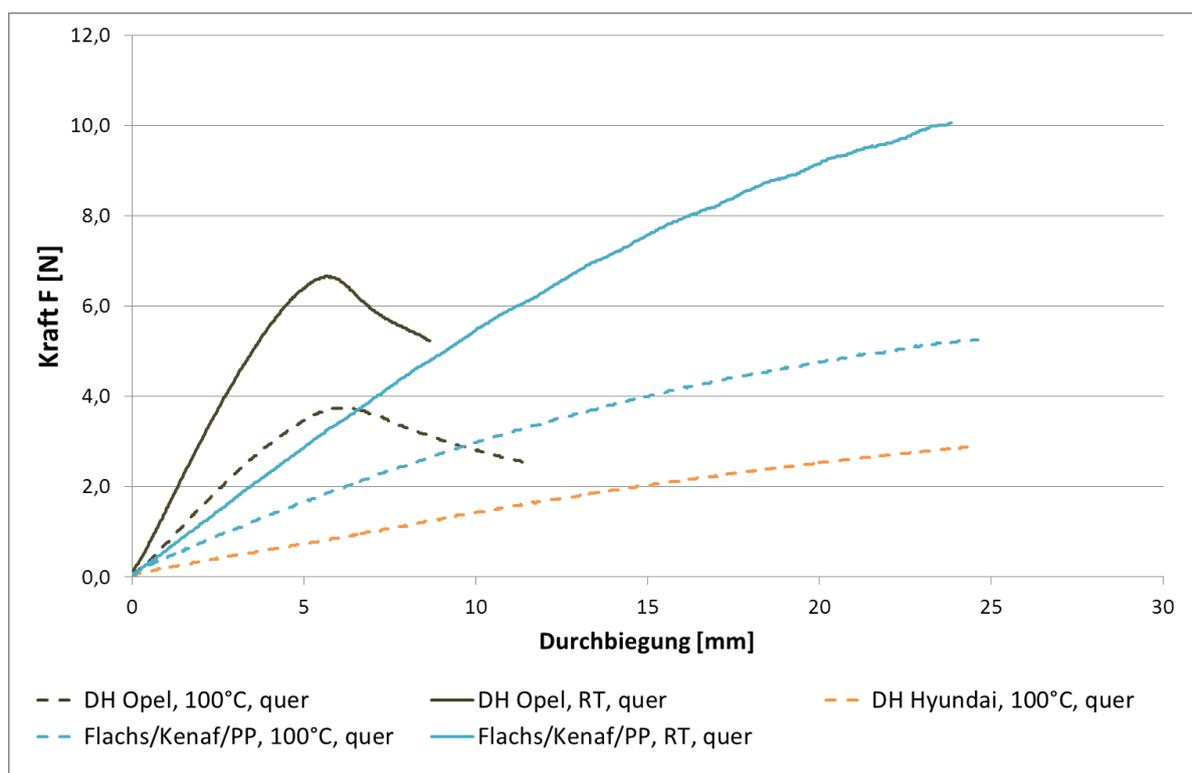


Bild 19: Kraft-Durchbiegungskurve unterschiedlicher Dachhimmelmaterialien

Die Kurvenverläufe der geprüften Trägermaterialien unterscheiden sich deutlich. Der Sandwichaufbau mit Schaumkern (Dachhimmel Opel) hat einen relativ steilen Kurvenverlauf, der nach Überschreiten eines Maximums abfällt. An diesem Punkt versagt die Deckschicht des Materials und die Probe knickt ein. Bei einer Erhöhung der Temperatur verschiebt sich diese Kurve nach unten. Es wurden maximale Kräfte von 4 bis 7 N gemessen.

Bei den anderen Naturfasermaterialien (vernadelte Vliese) steigt die Kraft kontinuierlich an und erreicht auch bei großen Durchbiegungen noch kein Maximum. Auch hier verschieben sich die Kurven bei höherer Temperatur nach unten. Im Hinblick auf die Montage scheinen diese Materialien besser geeignet, da relativ große Wege ohne ein Versagen des Verbundes möglich sind.

### 8.1.3 Biegeeigenschaften von geschäumten Verbunden

Aufgrund der Probleme mit der Vorheizung der Materialien bei einer angestrebten weiteren Verringerung der Dichte wurde in nachfolgenden Versuchen zunächst die Flächenmasse der Vliese nochmals reduziert (Varianten vgl. Tabelle 6). Die verschiedenen Ausgangsmaterialien wurden zu unterschiedlichen Dichten verpresst. Bei diesen Aufbauten wurde zusätzlich ein Treibmittel auf PP-Basis zur Expansion der Fasermatten eingesetzt. Das Treibmittel reagiert bei erhöhter Temperatur und führt zu einem Aufschäumen der Naturfaservliese.

Dadurch sollte eine weitere Verringerung der Verbunddichte erreicht werden. Die bei den Versuchen erzielten Ergebnisse sind in Bild 20 dargestellt.

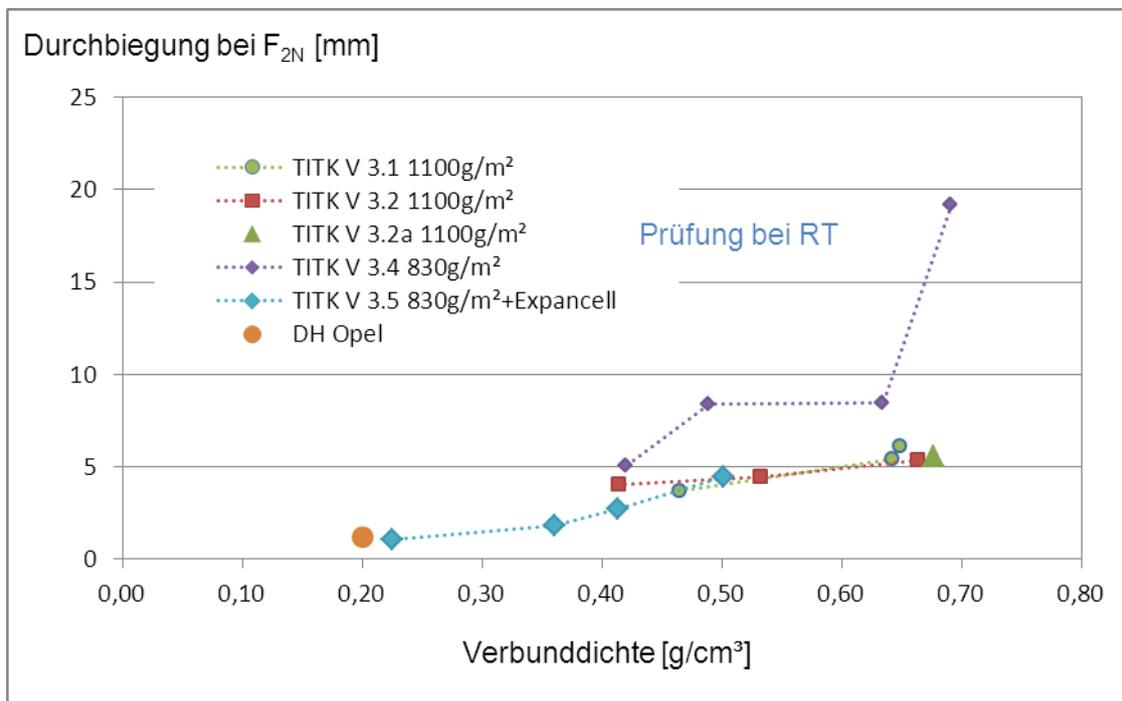


Bild 20: Durchbiegung in Abhängigkeit der Verbunddichte bei RT (längs)

Bei Flächenmassen der Vliese in einem Bereich von 1100 g/m² liegt die Durchbiegung bei Verbunddichten von 0,5 bis 0,7 g/cm³ in einer Größenordnung von ca. 5 mm. Dieses Wertenniveau kann auch durch die nochmalige Verringerung der Dichte bis auf 0,4 g/cm³ nicht wesentlich verändert werden. Bei einem Flächengewicht von 830 g/m² ist die Durchbiegung bei höheren Verbunddichten sogar noch höher.

Im Rahmen dieser Versuchsreihe wurde auch noch einmal der Einfluss der Faserorientierung untersucht. Die Varianten V 3.1, V 3.2 und V 3.3 haben unterschiedliche Anteile von orientierten Deckvliesen im Aufbau. Trotzdem liegen alle diese Materialien bei der Durchbiegung auf einem Niveau. Das heißt, nur durch eine höhere Orientierung der Naturfasern in den Deckschichten können bei geringer Verdichtung keine signifikanten Verbesserungen der Biegewerte erreicht werden.

Erst durch die Zugabe von 10% des Treibmittels Expancell ließ sich eine weitere Verringerung der Dichte und damit auch eine Verbesserung der Durchbiegungswerte umsetzen. Die niedrigsten darstellbaren Verbunddichten mit den vernadelten Naturfasermaterialien liegen bei Flächenmassen von 830 g/m² in einem Bereich von 0,2 bis 0,3 g/cm³. Verglichen mit den Dachhimmel Hyundai Accent (Flächenmasse 980 g/m²) konnte somit eine Gewichtseinsparung von ca. 15% realisiert werden. Die Durchbiegungswerte bei Raumtemperatur liegen nun etwa auf dem Niveau des Schaumsandwichs (Dachhimmel Opel Zafira).

Zur Verdeutlichung der geometrischen Gegebenheiten bei unterschiedlichen Materialsystemen wurde in einer anderen Darstellung die Durchbiegung über der Plattendicke aufgetragen (Bild 21).

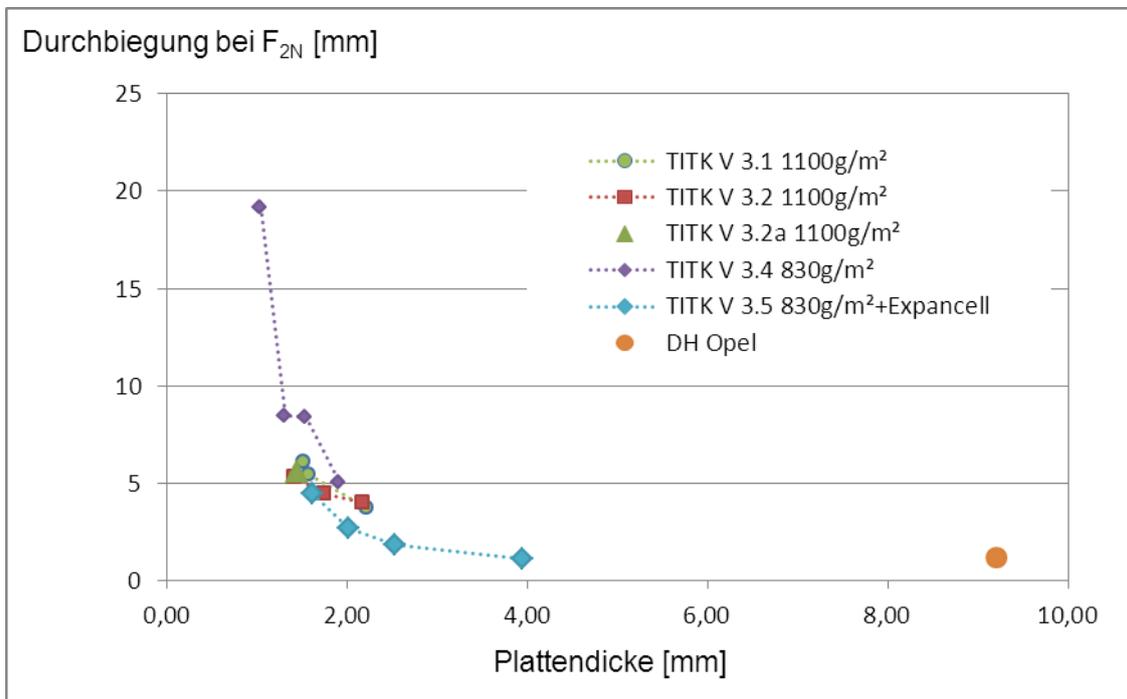


Bild 21: Durchbiegung in Abhängigkeit der Plattendicke

Bei Flächenmassen von 830 bis 1100 g/m<sup>2</sup> können Plattendicken von ca. 1 mm bis maximal 4 mm realisiert werden. Das ist deutlich niedriger als die Plattendicke von ca. 9 mm bei dem Aufbau des Schaumsandwiches (Dachhimmel Opel Zafira). Unter Berücksichtigung dieser Tatsache ist die erreichte geringe Durchbiegung bei den dünneren Naturfasermaterialien erstaunlich. Andererseits ist aber auch zu beachten, dass die Bauweisen nicht direkt vergleichbar sind. Die Ergebnisse der Optimierungsversuche können folgendermaßen zusammengefasst werden.

- Die Durchbiegung der thermoplastischen Naturfaserverbunde zeigt eine deutliche Temperaturabhängigkeit.
- Die Verbunddicke der Naturfasermaterialien kann durch Optimierung des Verbundaufbaus und des Pressregimes auf ca. 0,4 g/cm<sup>3</sup> abgesenkt werden.
- Eine weitere Reduzierung der Dichte auf 0,2 bis 0,3 g/cm<sup>3</sup> lässt sich nur durch Zugabe von Treibmittel realisieren. Dadurch konnten auch deutlich geringere Durchbiegungen erreicht werden.
- Mit Naturfaservliesen können bei niedrigen Flächenmassen der Halbzeuge im Bereich von 800 bis 1000 g/m<sup>2</sup> Bauteildicken zwischen 1 und max. 4 mm dargestellt werden.
- Im Vergleich zu Verbunden mit Schaumkern zeigen die Verbunde aus gepressten Naturfaservliesen eine andere Kraft-Weg-Charakteristik und ein anderes Versagen.

## 8.2 Beständigkeit gegen klimatische Einflüsse

Zur Prüfung der Beständigkeit der entwickelten Materialien gegenüber klimatischen Einflüssen wurde ein Prüfaufbau entwickelt, der die Messung der Durchbiegung in einer Klimakammer ermöglicht. Dazu wurden mehrere Probenaufleger mit einem Auflagerabstand von 200 mm auf eine Trägerplatte montiert. Die Messung der Durchbiegung kann durch einen über der Probe angebrachten Wegaufnehmer erfolgen (Online-Messung) und auch nach der Messung (im Endzustand). Der Versuchsaufbau ist in Bild 22 dargestellt.

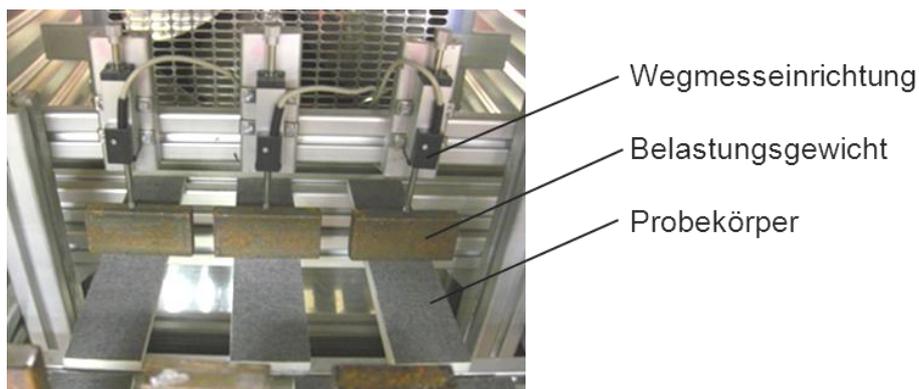


Bild 22: Prüfvorrichtung zur Messung der Durchbiegung im Klima

Bei der Prüfung im Klimaschrank lassen sich unterschiedliche Prüfabläufe einstellen. Erste Versuche wurden zunächst mit einem Einstufentest durchgeführt.

(2 Stunden 55°C, 50% Luftfeuchte, danach 10 Stunden 55°C, 95% Luftfeuchte)

Außerdem wurde zur Bestimmung der für die Naturfasermaterialien kritischen Feuchte auch ein Mehrstufentest mit schrittweise erhöhter Luftfeuchtigkeit gefahren.

(2 Stunden 55°C, 20% Luftfeuchte, danach 2 Stunden 55°C, 40% Luftfeuchte usw.)

Die über den gesamten Prüfablauf aufgezeichneten Temperatur- und Feuchtwerte sind in Bild 23 dargestellt.

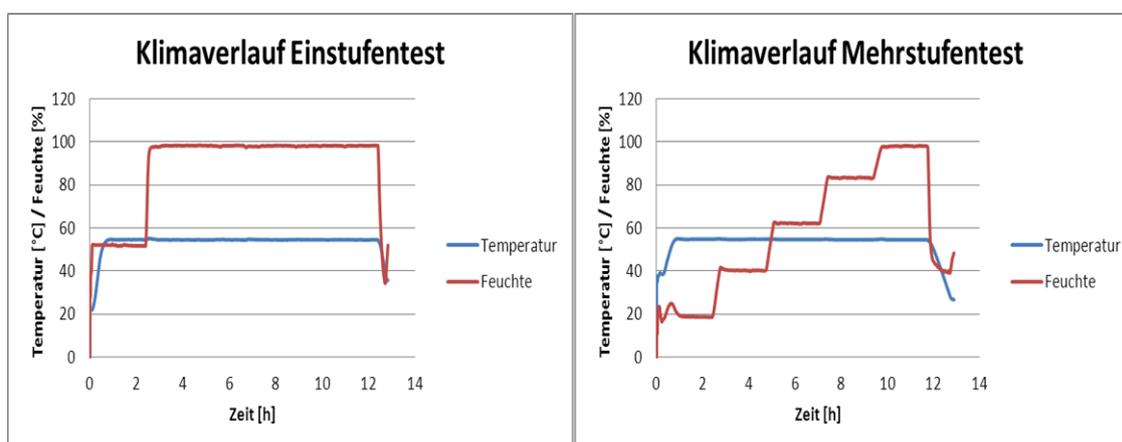


Bild 23: Klimaverlauf im Einstufen- und Mehrstufentest

Bei den Versuchen mit unterschiedlichen Naturfasermaterialien wurden die Schaumverbunde (auch mit Glasfaserverstärkung) als Referenzmaterial herangezogen, da hier bekanntermaßen die besten Beständigkeiten erreicht werden. Bild 24 zeigt exemplarisch die Durchbiegungskurven von 3 unterschiedlichen Schaumsandwichmaterialien welche von einem Industriepartner des TITK bereitgestellt wurden.

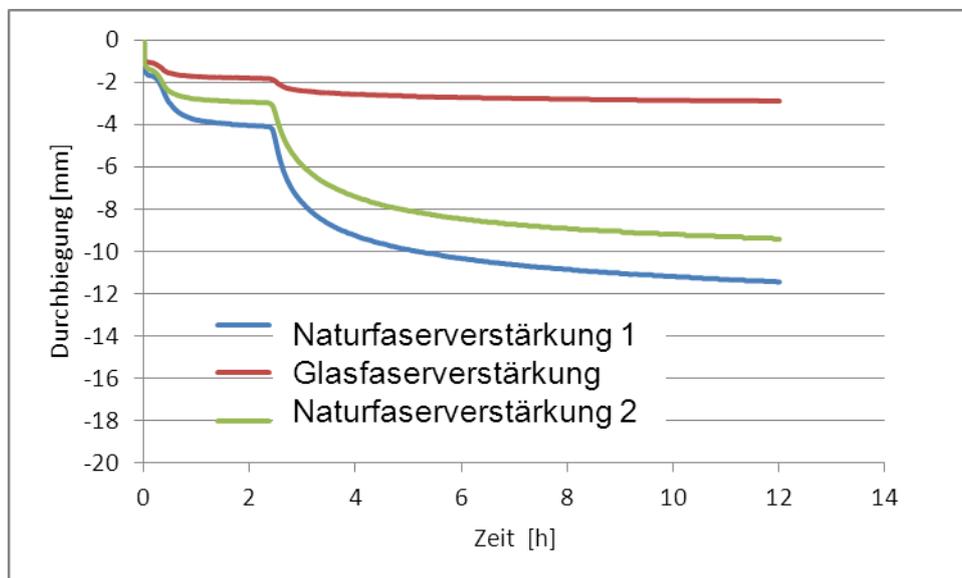


Bild 24: Durchbiegung von Naturfasermaterialien im Einstufentest

Die Durchbiegung der beiden Naturfasermaterialien ist bereits beim Start der Messung (Anfangseinstellung) deutlich größer als bei dem glasfaserverstärkten Sandwich. Ganz deutlich zeigt sich der Unterschied jedoch bei Erhöhung der Feuchtigkeit auf 95%. Unter diesen Bedingungen erhöht sich zwar auch die Durchbiegung des glasfaserverstärkten Materials etwas. Die Naturfaserverbunde dagegen biegen sich sehr stark durch und bestehen den Test nicht. Ein ähnliches Materialverhalten zeigt sich auch im Mehrstufentest (Bild 25)

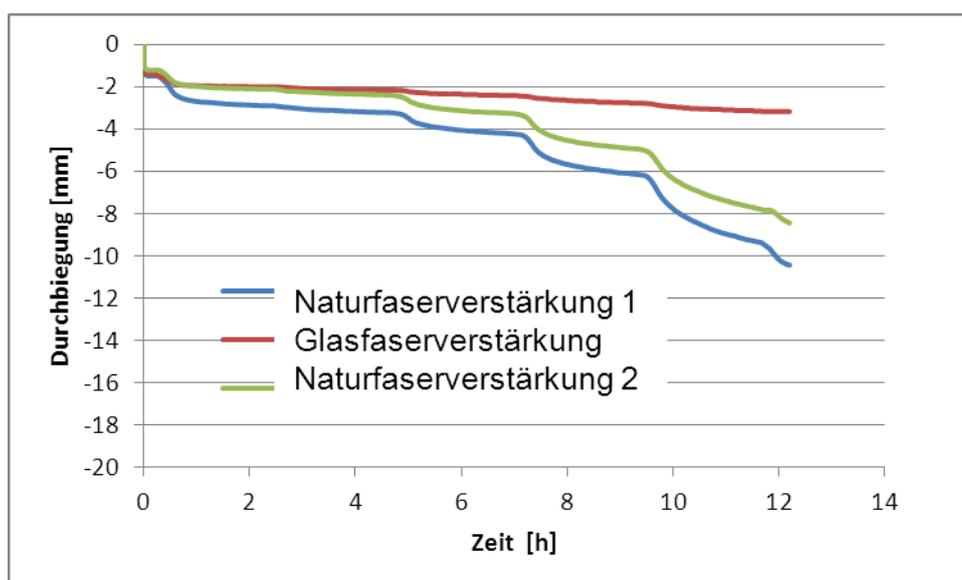


Bild 25: Durchbiegung von Naturfasermaterialien im Mehrstufentest

Noch deutlicher zeigte sich das Versagen bei dem Schaumaufbau von dem Referenz-Dachhimmel (Opel Zafira, Bild 26).

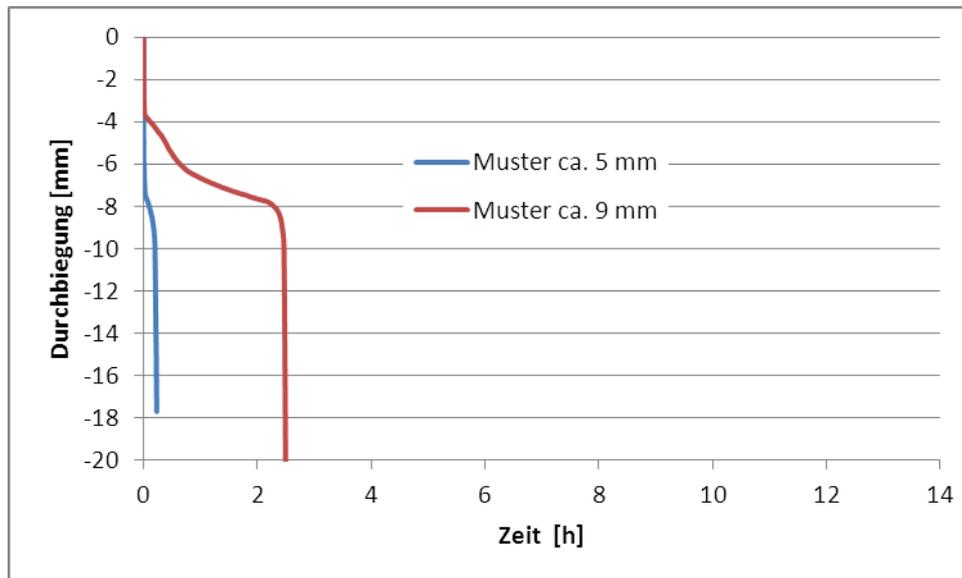


Bild 26: Durchbiegung des Referenzmaterials (Opel Zafira) im Mehrstufentest

Der Sandwichaufbau mit Naturfaserdeckschichten hat sich bereits beim Auflegen des Belastungsgewichtes stark durchgebogen und versagte nach kurzer Zeit im Klima. Die Probe ist dabei durch das Auflager gerutscht, sodass keine weitere Messung möglich war. Trotzdem ist das Material in der Serienanwendung und hat offenbar die geforderten Kennwerte für die Anwendung erfüllt. Allerdings muss hier berücksichtigt werden, dass in der Automobilindustrie die Dachhimmel meist in der realen Einbausituation geprüft werden. Dadurch haben die Größe des Dachhimmels, die Art der Befestigung und auch die Kontur des Bauteils einen großen Einfluss auf das Prüfergebnis. Aber auch die Anbauteile (Last) beeinflussen die Testergebnisse. In Auswertung der Versuche zur Klimabeständigkeit der Naturfasermaterialien muss konstatiert werden, dass an dieser Stelle noch ein erheblicher Entwicklungsbedarf besteht. Die Ergebnisse der Klimatests können wie folgt zusammengefasst werden.

- Die Durchbiegung aller geprüften Naturfasermaterialien war bei den gewählten Prüfbedingungen im Klima deutlich höher als bei glasfaserverstärkten Sandwichmaterialien.
- Die Ursache für das Problem liegt in der hohen Feuchtigkeitsaufnahme der Naturfasern und in der offenen Struktur der porösen Verbundaufbauten.
- Eine Verringerung der Feuchtigkeitsaufnahme der Naturfasern kann nur durch eine spezielle Faserbehandlung erreicht werden. Hierzu sind weitere Forschungsarbeiten nötig.
- Für die Prüfung der Klimabeständigkeit von Dachhimmelmaterialien sollte neben dem Bauteiltest noch ein mit Probekörpern durchführbarer Biegeversuch qualifiziert werden. Dadurch können unterschiedliche Materialsysteme besser verglichen werden.

## 8.3 Akustische Eigenschaften

### 8.3.1 Messungen im Impedanzmessrohr

Die ersten akustischen Prüfungen an den gefertigten Sandwichbauteilen erfolgten mit dem im TITK zur Verfügung stehenden Impedanzmessrohr. Aus den Mustermaterialien und Referenz-Dachhimmeln wurden kreisrunde Proben mit Durchmessern von 30 und 100 mm ausgesägt und hinsichtlich der Absorptions- und Reflexionseigenschaften vermessen. Mit den 30 mm Proben konnte ein Frequenzbereich von 320 bis 6250 Hz abgedeckt werden. Die 100 mm Proben erlauben eine Messung mit niedrigeren Frequenzen von 142 bis 1907 Hz.

Im Hinblick auf Messungen in der Alpha-Kabine (Frequenzbereich von 400 bis 8000 Hz) sind die Messungen mit dem kleinen Impedanzmessrohr (30 mm Durchmesser) aussagekräftiger als die Messungen bei niedrigeren Frequenzen (100 mm Durchmesser). Deshalb konzentrierten sich die vergleichenden Prüfungen auf diesen Frequenzbereich. Da für die Anwendung als schallabsorbierende Bauteile der Absorptionsgrad der Materialien interessiert, wird im Folgenden speziell auf diese Kennwerte eingegangen.

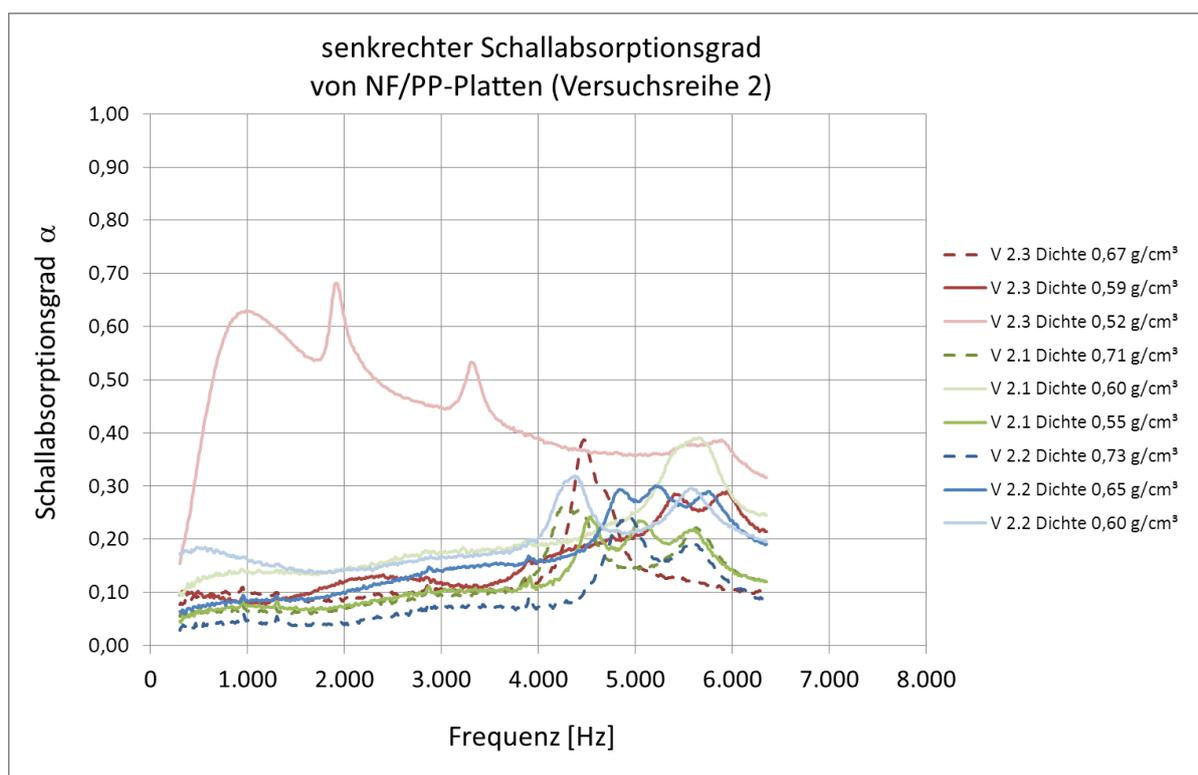


Bild 27: Schallabsorption verschiedener Naturfasermaterialien

Die Schallabsorption der in der Industrie verpressten Naturfasermaterialien (V 2.1 bis V 2.3) ist bei Frequenzen bis ca. 4000 Hz relativ niedrig. Es zeigt sich der Trend, dass mit einer Verringerung der Verbunddichte auch die Schallabsorption zunimmt (Bild 27).

Trotzdem unterscheiden sich die geprüften Varianten nur wenig mit Ausnahme der Variante 2.3 (Flachs/Kenaf/PP mit einer Dichte von  $0,52 \text{ g/cm}^3$ ). Bei diesem Material konnten deutlich höhere Absorptionswerte gemessen werden.

Vergleicht man dazu die an den Referenz-Dachhimmeln gemessenen Kennwerte (Bild 28), dann wird deutlich, dass die Absorptionswerte des Sandwiches mit Schaumkern (Dachhimmel Opel Zafira) am höchsten sind. Um zu überprüfen welchen Einfluss das Dekormaterial auf die Kennwerte hat, wurde sowohl mit als auch ohne Dekor gemessen.

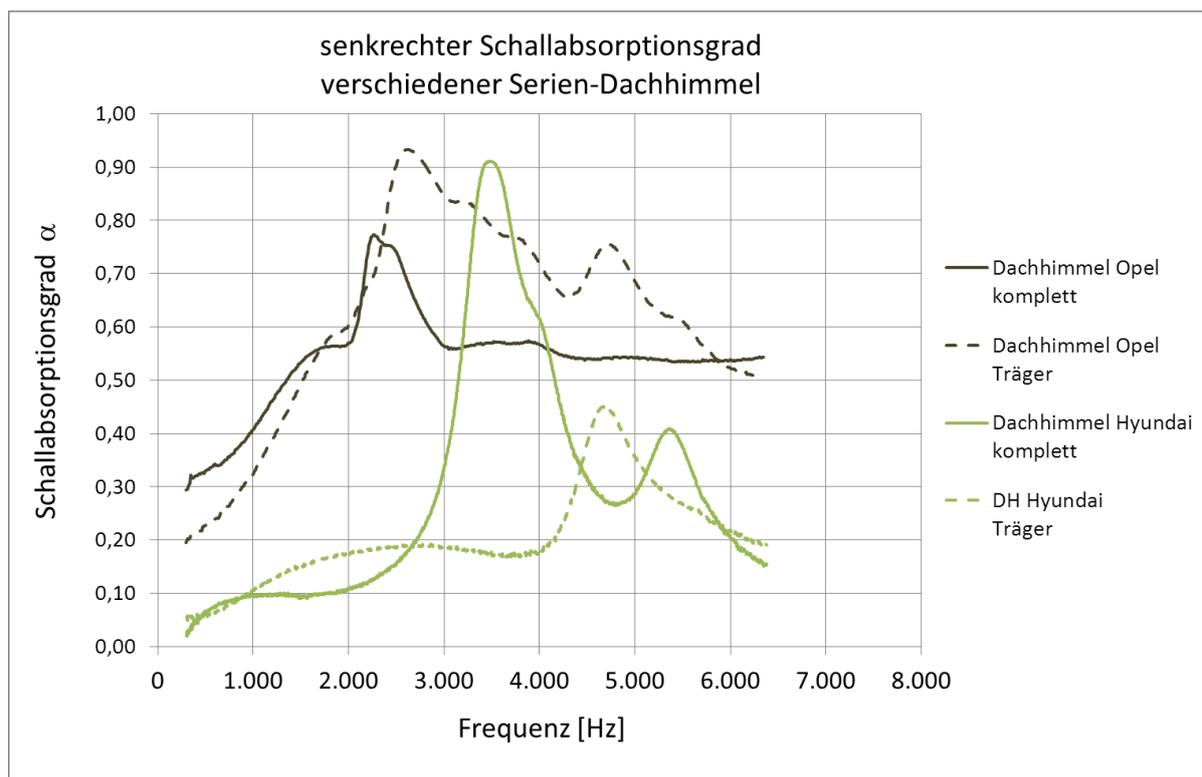


Bild 28: Schallabsorption der Referenzmaterialien

Interessanterweise war bei dem Sandwich mit Schaumkern die Absorption ohne Dekor besser als mit dem Schaumdekor. Offenbar wird durch das Dekor ein Teil der offenporigen Struktur des Schaumkerns verschlossen, sodass von dem kompletten Aufbau weniger Schall absorbiert werden kann.

Genau umgekehrt ist das akustische Verhalten des anderen Referenzmaterials (Dachhimmel Hyundai Accent). Hier wurden am reinen Trägermaterial bei Frequenzen bis 4000 Hz wesentlich niedrigere Absorptionswerte gemessen als bei dem Schaumsandwich. Der Kurvenverlauf stimmt hier ziemlich gut mit den in der Industrie verpressten Naturfasermaterialien überein. Hohe Absorptionswerte im Frequenzbereich von 3000 bis 4000 Hz können bei diesem Aufbau erst im Zusammenspiel mit dem Dekor erreicht werden.

Zur Optimierung der Verbundeigenschaften wurden die Materialien aus Versuchsreihe 2 auch im TITK verpresst, wobei niedrigere Dichten im Bereich von  $0,4 \text{ g/cm}^3$  erreicht werden konnten. Inwieweit sich das auf die akustischen Eigenschaften auswirkt zeigt Bild 29.

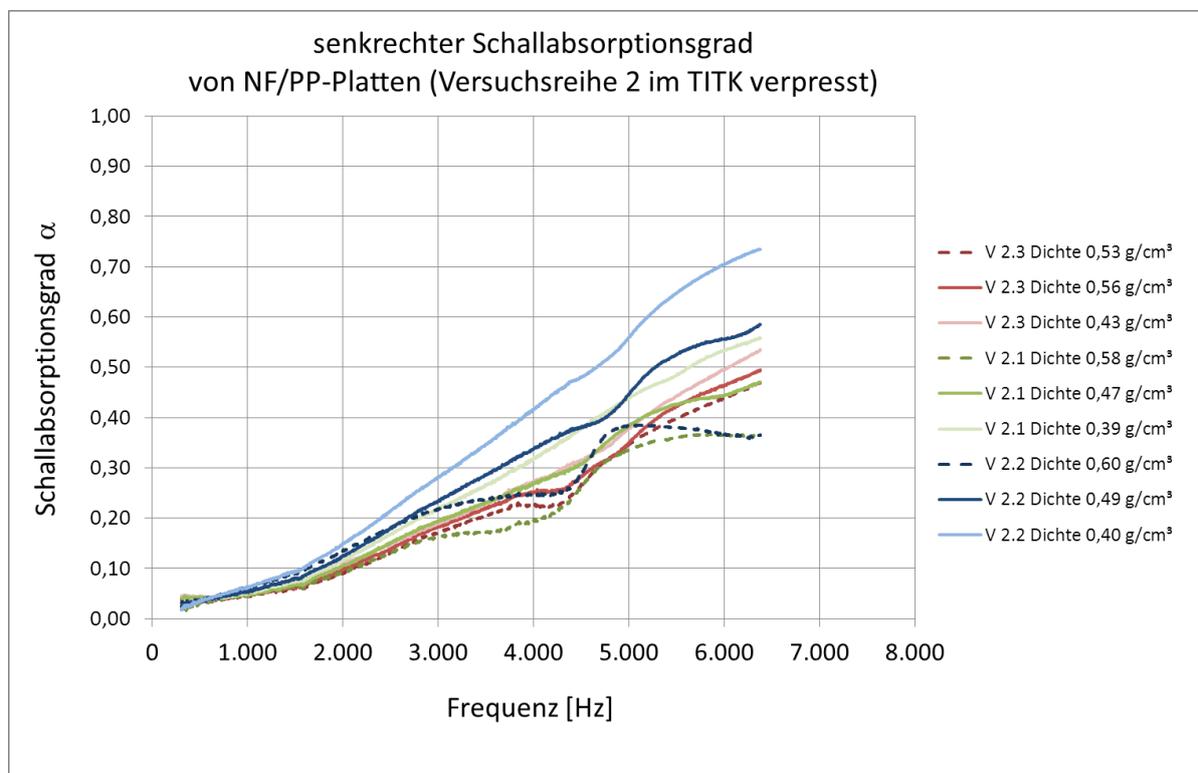


Bild 29: Schallabsorption verschiedener Naturfasermaterialien (im TITK verpresst)

Durch die Reduzierung der Verbunddichte konnte auch das Schallabsorptionsverhalten der Naturfaserverbunde noch verbessert werden. Das zeigt sich vor allem bei hohen Frequenzen. Trotzdem werden mit den verpressten Vliesverbunden die Kennwerte von Schaum-Sandwichmaterialien nicht ganz erreicht. Das lässt sich darauf zurückführen, dass die Porosität und auch die Dicke der Vliesverbunde deutlich niedriger sind als bei den Schaumverbunden. Eine weitere Verbesserung der akustischen Eigenschaften kann also nur durch eine Verringerung der Dichte (Erhöhung der Porosität) oder die Verwendung eines akustisch wirksamen Dekormaterials realisiert werden.

### 8.3.2 Akustische Prüfungen in der Alpha-Kabine

Ergänzend zu den akustischen Messungen des Schallabsorptionsverhaltens im Impedanzmessrohr wurden weiterführende Prüfungen auch in der Alpha Kabine durchgeführt. Wertet man die Ergebnisse aus den Messungen in der Alpha-Kabine aus, dann zeigen sich wieder deutliche Abhängigkeiten vom Materialaufbau und dem Verdichtungsgrad der hergestellten Verbunde (Bild 30).

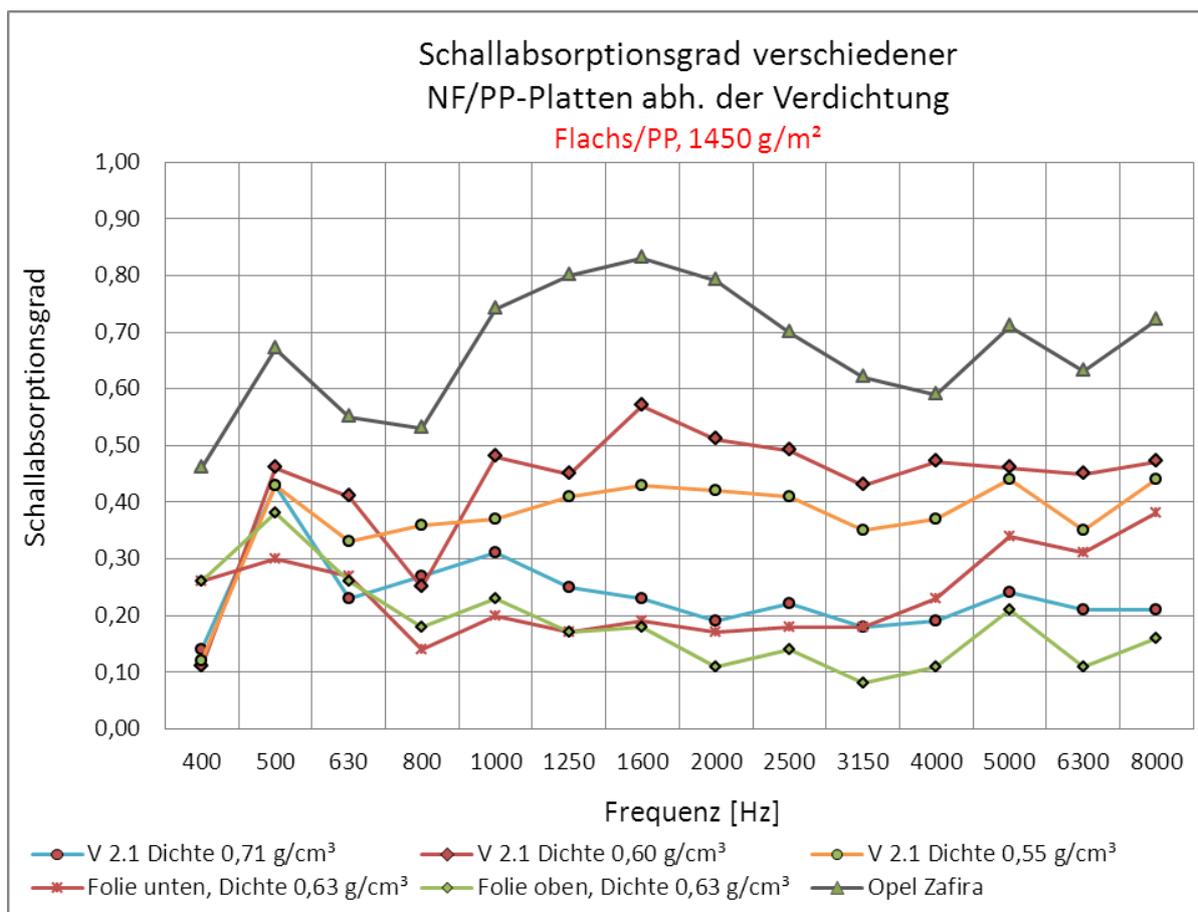


Bild 30: Ergebnisse der Messungen in der Alpha Kabine (Verbunde aus Material V 2.1)

Die obere Kurve in der Grafik ist der Referenzwert (Naturfasersandwich mit Schaumkern Opel Zafira). Bei Betrachtung der Kurven muss allerdings berücksichtigt werden, dass auf diesem Material bereits das Dekor aufgepresst war. Das hat bei Verwendung eines Schaumdekors einen Einfluss auf die akustischen Eigenschaften.

Im geprüften Frequenzbereich liegt der Schallabsorptionsgrad der naturfaserverstärkten Materialien unter der Referenzkurve. Die niedrigsten Absorptionswerte haben erwartungsgemäß die voll verdichteten Verbunde. Wenn man den Verdichtungsgrad reduziert (Erhöhung der Plattendicke) verbessert sich auch das Schallabsorptionsverhalten deutlich. Im Vergleich zu dem sehr dicken Naturfasersandwich (8-12 mm Dicke) des Referenzmaterials können mit den 2-3 mm dicken Aufbauten die Absorptionswerte des Komplettaufbaus allerdings nicht erreicht werden.

Interessant ist, wenn man die Dachhimmelmaterialien auf der Rückseite mit Folie kaschiert. Dann liegen durch die eingesetzte Deckfolie die Schallabsorptionswerte sehr niedrig. Das heißt, der Bauraum hinter dem Dachhimmel trägt nicht zu einer Verbesserung der akustischen Eigenschaften bei.

Mit einem schwereren Material (V 2.2) wurden bei vergleichbaren Verbunddichten noch etwas niedrigere Schallabsorptionswerte gemessen. Das heißt, eine Verbesserung der akustischen Eigenschaften kann nicht durch eine Erhöhung der Flächenmasse, sondern wie bereits bei den Messungen im Impedanzmessrohr nachgewiesen, nur durch eine weitere Verringerung der Verbunddicke erreicht werden. Damit geht auch eine Vergrößerung der Dicke und letztlich des Porenvolumens der Verbundaufbauten einher. Das zeigt sich auch anhand von Bild 31.

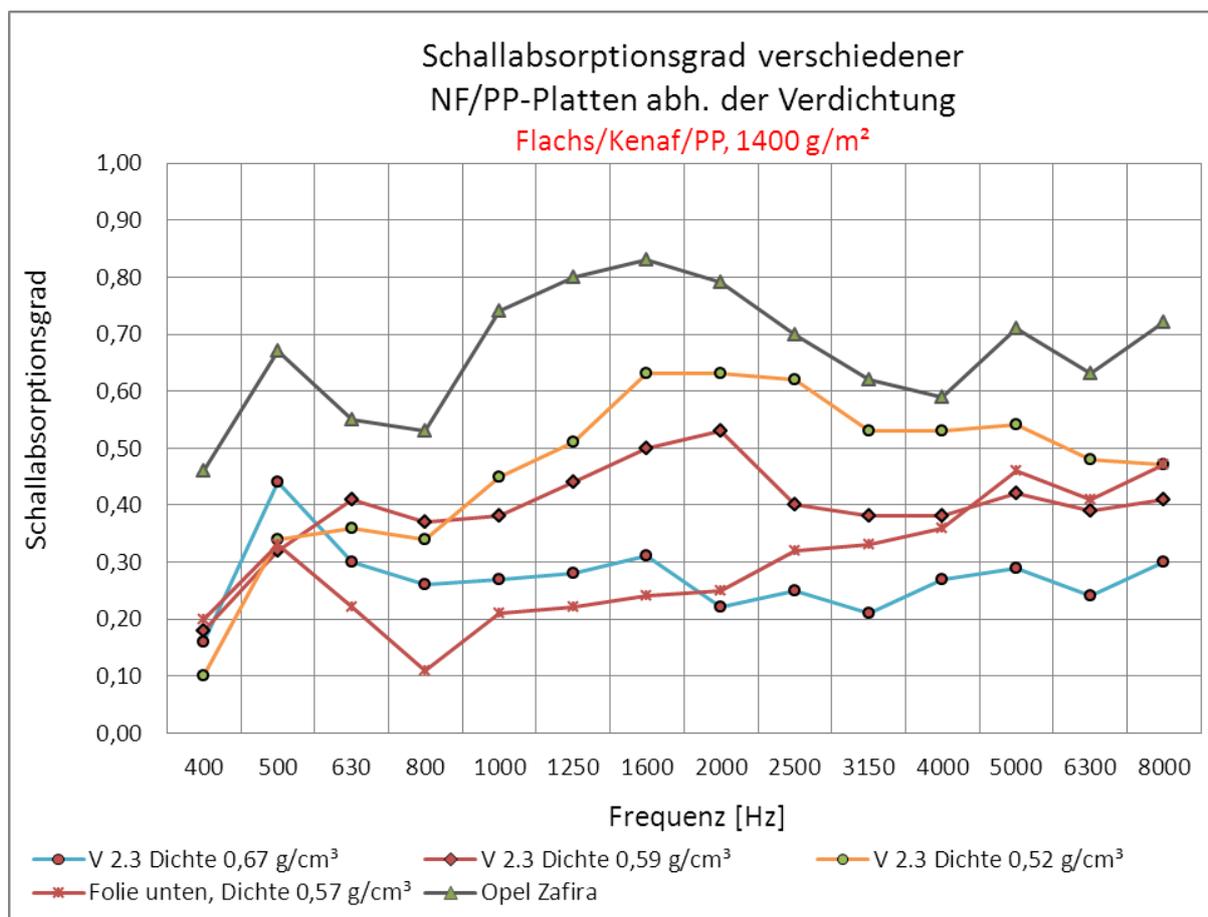


Bild 31: Ergebnisse der Messungen in der Alpha Kabine (Verbunde aus Material V 2.3)

Die Verringerung der Flächenmasse und der Einsatz von etwas größeren Kenaffasern bringt bei Beibehaltung der Verbunddicke von 0,5-0,6 g/cm<sup>3</sup> eine Verbesserung der akustischen Eigenschaften, sodass im oberen Frequenzbereich kein großer Unterschied zu dem Absorptionsverhalten des Referenzmaterials mit Schaumkern besteht.

Im Hinblick auf die Vorauswahl von Materialien war vor allen Dingen auch interessant, inwieweit die Messergebnisse aus den Prüfungen mit dem Impedanzmessrohr eine Voraussage für das Verhalten in der Alpha-Kabine geben können. Bild 32 zeigt einen Vergleich der Messergebnisse von unterschiedlichen Materialien.

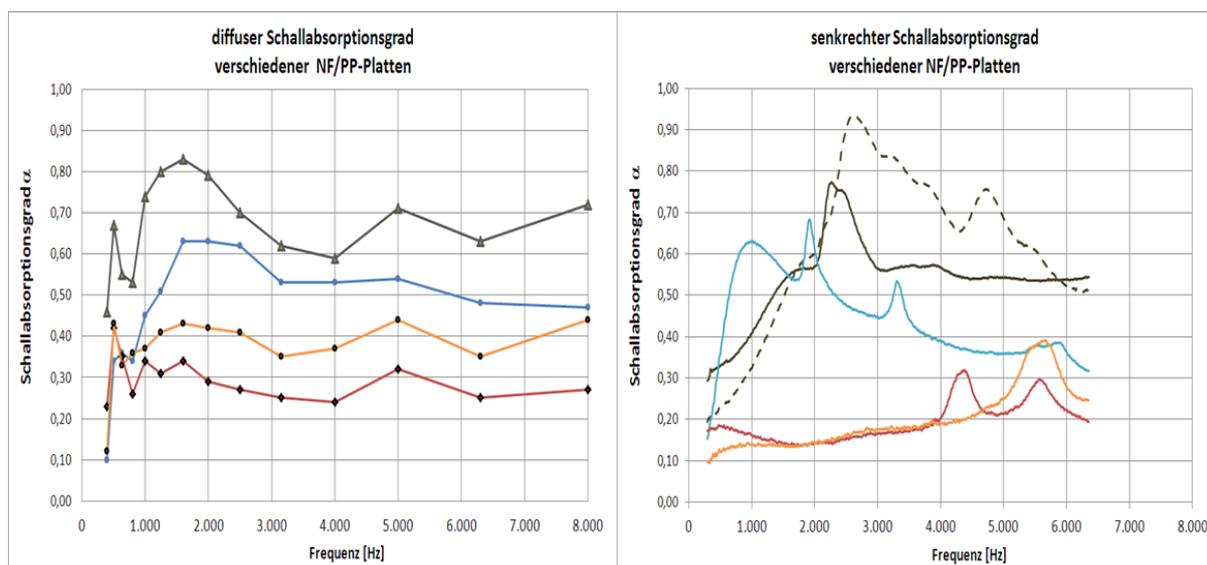


Bild 32: Ergebnisvergleich Alpha-Kabine/Impedanzmessrohr

- DH Opel
- - - DH Opel Träger
- FI/PP 1450 g/m<sup>2</sup>, Dichte 0,57 g/cm<sup>3</sup>
- FI/PP 1600 g/m<sup>2</sup>, Dichte 0,60 g/cm<sup>3</sup>
- FI/Ken/PP 1400 g/m<sup>2</sup>, Dichte 0,52 g/cm<sup>3</sup>

Anhand der Grafiken ist eine Abstufung der unterschiedlichen Materialien erkennbar. Der Kurvenverlauf und die Höhe des Schallabsorptionsgrades sind allerdings sehr unterschiedlich. Im Sinne einer Vorauswahl der Materialien kann man somit zunächst nur feststellen, dass ein Material welches einen hohen Schallabsorptionsgrad bei der Messung im Impedanzmessrohr hat, auch gute Werte in der Alpha-Kabine erreicht. Die Lage des Maximalen Absorptionsgrades und der Kurvenverlauf dagegen sind nicht vergleichbar. Dabei muss sicher auch berücksichtigt werden, dass bei der Messung im Impedanzmessrohr vor allem die Abdichtung der Verbundproben am Rand eine große Rolle spielen kann. Im Hinblick auf eine praxisnahe Bauteilentwicklung ist also in jedem Fall die Messung des Absorptionsverhaltens in der Alpha-Kabine vorzuziehen.

Die Ergebnisse der akustischen Prüfungen im Impedanzmessrohr und in der Alpha Kabine können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Schallabsorption der Naturfaserträger ist niedriger als bei dem Referenz-Dachhimmel mit Schaumkern (Opel Zafira) und dem Dachhimmel aus Naturfaservlies (Hyundai Accent).
- Bei den Referenzmaterialien werden die akustischen Eigenschaften durch unterschiedliche Bauweisen erreicht. Beim Schaumverbund werden die akustischen Eigenschaften maßgeblich von der Kernschicht dominiert. Bei dem Dachhimmel aus Naturfaservlies hat das Dekor einen großen Einfluss auf die Schallabsorption.

- Mit abnehmender Materialdichte (Verringerung der Flächenmasse, Erhöhung der Plattendicke) verbessert sich das Schallabsorptionsverhalten durch eine Vergrößerung des Porenvolumens.
- Bei den porösen Naturfaserverbunden trägt möglicherweise auch der Luftraum hinter der Probe mit zu einer Verbesserung des Absorptionsverhaltens bei.
- Bei einer einseitigen Abdichtung der Naturfaserverbunde durch eine Folie verringert sich das Schallabsorptionsvermögen deutlich.
- Die Schallabsorptionsmessungen mit dem Impedanzmessrohr zeigen bei unterschiedlichen Materialien gleiche Abstufungen wie bei der Messung in der Alpha-Kabine. Eine Materialvorauswahl ist mit dieser Methode möglich.
- Die Lage des maximalen Absorptionsgrades und der Kurvenverlauf sind nicht mit den Messergebnissen aus der Alpha-Kabine vergleichbar. Im Hinblick auf eine praxisnahe Bauteilentwicklung sollten stets Messungen in der Alpha-Kabine durchgeführt werden.

#### 8.4 Ergebnisse aus Fogging-, Geruchs- und Schimmeltests

Neben den mechanischen und akustischen Eigenschaften wird bei einer Anwendung von Naturfasermaterialien im Automobil-Innenraum auch großer Wert auf das Materialverhalten in Fogging-, Geruchs- und Emissionstests gelegt. Aus diesem Grund wurden an ausgewählten Materialien entsprechende Prüfungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Foggingprüfungen sind in den Tabellen 10 und 11 dargestellt.

Tabelle 10: Foggingwerte von industriell hergestellten Verbunden (Versuchsreihe 2)

	Plattenherstellung in der Industrie 100 x 100 cm	
Material	Verbunddicke [g/cm <sup>3</sup> ]	kondensierbare Bestandteile G [mg]
V 2.1 aerodynamisch Flachs/PP 1450 g/m <sup>2</sup>	0,71 0,60 0,55	2,11 2,50 2,49
V 2.2 aerodynamisch Flachs/PP 1600 g/m <sup>2</sup>	0,73 0,65 0,60	2,05 2,14 2,03
V 2.3 aerodynamisch Flachs/Kenaf/PP 1400 g/m <sup>2</sup>	0,67 0,59 0,52	2,17 2,07 2,42

Die geprüften Foggingwerte sind bei den unterschiedlichen Materialien mit 2 bis 2,5 mg ziemlich gleich und zeigen auch keine Abhängigkeit von der Verbunddicke und vom eingesetzten Fasermaterial. Demzufolge kamen bei den Industrierversuchen etwa gleichwertige Faserqualitäten zum Einsatz. Der zulässige Grenzwert bei der Foggingprüfung beträgt 2 mg. Die Messergebnisse der hier eingesetzten Materialien müssen also als grenzwertig eingeschätzt werden.

Bessere Ergebnisse wurden mit den im TITK hergestellten Verbundwerkstoffen erzielt (Tabelle 11)

Tabelle 11: Foggingwerte von TITK Verbunden (Versuchsreihe 3)

Material	Plattenherstellung im TITK 30 x 30 cm	
	Verbunddicke [g/cm <sup>3</sup> ]	kondensierbare Bestandteile G [mg]
Flachs/PP V 3.1 gekrempelt 1100 g/m <sup>2</sup>	0,65	1,26
Flachs/PP V 3.2 gekrempelt 1100 g/m <sup>2</sup>	0,66	1,17
Flachs/PP V 3.2a gekrempelt 1100 g/m <sup>2</sup>	0,68	1,23
Flachs/PP V 3.4 gekrempelt 830 g/m <sup>2</sup>	0,69	1,17
Flachs/PP V 3.5 gekrempelt 830 g/m <sup>2</sup> +10% Expancell	0,50	1,04
DH Opel Zafira	0,14	0,47
DH Hyundai Accent	0,26	0,63

Die Foggingwerte der im TITK hergestellten Materialien liegen alle zwischen 1 und 1,3 mg. Damit wird der geforderte Grenzwert klar unterschritten. Noch niedrigere Werte wurden an dem Referenzdachhimmel (Opel Zafira) gemessen. Allerdings ist der Naturfaseranteil bei dem Schaumverbund durch die sehr niedrige Flächenmasse der Deckvliese auch wesentlich geringer als bei den Vliesverbunden.

Weitere wichtige Tests sind die Geruchsprüfungen und auch der Schimmelttest. In früheren Forschungsarbeiten des TITK wurden hierzu bereits systematische Untersuchungen durchgeführt und festgestellt, dass insbesondere der Geruch der verpressten Naturfaserverbunde sehr stark von der Qualität der Naturfasern, den eingesetzten PP-Fasern aber auch von den Verarbeitungsbedingungen (vor allem die Prozesstemperatur und die Verweilzeit) abhängt [14]. Als Grenzwert für die Benotung des Geruchs wird die Note 3 angegeben. Bei einer Vielzahl von Prüfungen im TITK wurde festgestellt, dass mit Naturfaserverbunden ohne Modifikation bestenfalls Geruchsnoten von 2,5 bis 3 erreicht werden können. Das trifft auch auf die im Rahmen der hier hergestellten Dachhimmelmaterialien zu.

Auch beim Schimmelttest ist der Einsatz von Naturfasern kritisch zu sehen. Je nach eingesetzter Naturfaserqualität und den Prüfbedingungen kann es zur Ausbildung von Schimmel auf der Materialoberfläche kommen. Besonders problematisch sind gering verpresste Materialien, weil sich in den offenen Poren des Verbundes bei Zutritt von Feuchtigkeit ein idealer Nährboden ausbilden kann. Aus diesem Grund werden für die aktuell in der Serie eingesetzten Naturfasermaterialien spezielle Behandlungen an den Fasermaterialien vorgenommen. Das ist auch für die Dachhimmelmaterialien erforderlich.

## 9 Versuche zur Bauteilherstellung

Zur Überprüfung der praktischen Umsetzbarkeit der entwickelten Materialaufbauten wurden in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner des TITK Pressversuche unter seriennahen Bedingungen durchgeführt. Bei den Versuchen stand zur Vorheizung des Naturfasermaterials eine Vorheizstation (elektrisch beheizbare Platten) zur Verfügung (Bild 33). Als Versuchswerkzeug diente der Teilbereich eines Automobil-Dachhimmels. Die zur Verfügung stehende Bauteilkontur bildet den vorderen Bereich mit den Ausformungen für die Sonnenblenden und eines Teilbereiches vom Schiebedachrahmen ab und ist dadurch sehr gut für Versuche zur Darstellung von stärker ausgeformten Konturen geeignet (Bild 34).

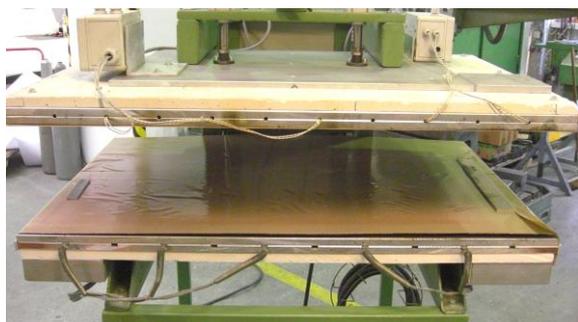


Bild 33: Plattenvorheizstation



Bild 34: Presswerkzeug Dachhimmel

In den Pressversuchen wurden unterschiedliche Materialaufbauten sowohl mit als auch ohne Zugabe von Treibmittel getestet (Versuchsreihe 4). Die Zuschnitte wurden 2 min bei 210 °C vorgeheizt und nachfolgend in der kalten Form abgepresst (Bild 35). Bei den Varianten mit Dekormaterial wurde das Dekor durch einen separaten Spannsrahmen gehalten, um ein faltenfreies Abformen zu ermöglichen (Bild 36).



Bild 35: Verpresster Zuschnitt



Bild 36: Aufspannung des Dekors

In dem Versuchswerkzeug konnte mit allen Materialien eine gute Ausformung der Kontur erreicht werden. Allerdings treten bei den Materialaufbauten ohne Zugabe von Treibmittel im Bereich des Übergangs von erhöhten Konturen Faltenbildung auf. Das kann auf eine zu geringe Reibung des Materials an der Werkzeugwand zurückgeführt werden.

Die Zuschnitte wurden schon bei der Vorheizung zu sehr verdichtet bzw. die Fasermatte hatte zu geringe Rückstellkräfte und füllte die Werkzeugkontur nicht mehr vollständig aus. Dieses Problem war aber bereits aus den Versuchen zur Herstellung von Platten im Labormaßstab bekannt.

Deutlich bessere Ergebnisse konnten mit dem Zusatz von Treibmittel erreicht werden. Das Material expandierte nach der Entnahme aus der Vorheizstation und legte sich dadurch besser an die Werkzeugwand an (siehe Bild 35). Hier war keine Faltenbildung zu beobachten. Die Konturausformung konnte ohne Probleme realisiert werden. Auch die Versuche mit dem Dekormaterial verliefen erfolgreich. Allerdings war für eine faltenfreie Ablage eine exakte Vorspannung des Dekors erforderlich. Die Bilder 37 und 38 und zeigen die hergestellten Musterbauteile jeweils ohne und mit Dekor.



Bild 37: Dachhimmelkontur ohne Dekor



Bild 38: Dachhimmelkontur mit Dekor

Die bei der Bauteilherstellung realisierten Verbunddichten liegen in einem Bereich von 0,2 bis 0,3 g/cm<sup>3</sup> und bestätigen damit die Kennwerte aus den Versuchen zur Herstellung von ebenen Platten. Damit konnte erfolgreich nachgewiesen werden, dass die entwickelten Materialien industriell hergestellt und verarbeitet werden können.

Durch die Zugabe von Treibmittel kann die Verbunddichte der Naturfasermaterialien weiter verringert werden, was die Herstellung von leichteren Bauteilen mit hoher Oberflächenqualität ermöglicht.

## 10 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung von leichten Naturfasersandwichhalbzeugen mit Polypropylenmatrix, die eine wirtschaftliche Fertigung von funktionellen und wiederverwertbaren Fahrzeughimmeln ermöglichen. Die Halbzeuge sollen dabei mit bekannten textilen Vliesbildungsverfahren (Krempeln, aerodynamische Vliesbildung) gefertigt und im Formpressverfahren zu Bauteilen mit geringer Dichte und guten akustischen Eigenschaften ausgeformt werden.

Im Rahmen des Projektes wurden zunächst mit verschiedenen Vliesbildungsverfahren (Krempeln und aerodynamische Vlieslegung) Naturfaserhalbzeuge mit unterschiedlichen Fasermischungen und Flächenmassen hergestellt. Die gekrempelten Vliese hatten eine ausgeprägte Faserorientierung und kamen vorrangig für die Deckschichten der Sandwichaufbauten zum Einsatz. Die aerodynamisch gelegten Vliese wurden für die Kernschichten der Verbunde verwendet. Eine Kombination der beiden Verfahren für eine kontinuierliche Halbzeugherstellung ist industriell möglich und ohne Probleme umsetzbar. Aus den Naturfaserhalbzeugen wurden anschließend Sandwichverbunde gepresst und hinsichtlich der mechanischen und akustischen Eigenschaften geprüft.

Die mechanischen Eigenschaften der Naturfaserverbunde sind von den eingestellten Fasergehalten und den gewählten Schichtaufbauten abhängig. Durch die hochorientierten Deckschichten konnten allerdings nur bedingt richtungsabhängige Eigenschaften in den Verbunden erzielt werden. Auch der Einsatz von hochfesten und steifen Recycling-Carbonfasern verbesserte die mechanischen Eigenschaften der Verbunde nur geringfügig. Offenbar ist die Haftung zum PP sehr niedrig. Mit abnehmender Verbunddicke verringern sich die mechanischen Kennwerte der Verbunde. Die Kombination von hochorientierten Deckschichten und Kernschichten ohne eine gerichtete Faserorientierung ist möglich, bringt aber bei der Verpressung zu geringen Verbunddichten keine signifikanten Vorteile gegenüber homogen aufgebauten Naturfaserverbunden.

Die erzielten mechanischen Eigenschaften wurden mit den Kennwerten von Seriendachhimmeln verglichen und bewertet. Im Vergleich zu konventionellen glasfaserverstärkten Dachhimmeln mit Schaumkern zeigte sich, dass bei den Naturfasermaterialien die mechanischen Eigenschaften niedriger sind. Das betrifft vor allen Dingen die Kennwerte bei erhöhter Umgebungsfeuchte. Hinsichtlich der erreichbaren Verbunddichten können aber konkurrenzfähige Werte im Bereich von 0,2 bis 0,4 g/cm<sup>3</sup> erreicht werden. Im Vergleich zu einem Seriendachhimmel aus gepresstem Naturfaservlies konnte bei optimierten Aufbauten und Einsatz von Treibmittel eine Verringerung der Dichte und Flächenmasse erzielt werden.

Die akustischen Eigenschaften der Naturfaserverbunde hängen sehr stark von Verdichtungsgrad der Materialien und der Verbunddicke ab. Mit abnehmender Materialdicke (Verringerung der Flächenmasse, Erhöhung der Plattendicke) verbessert sich das Schallabsorptionsverhalten durch eine Vergrößerung des Porenvolumens. Die besten akustischen Eigen-

schaften konnten bei Verbunddichten in einem Bereich von 0,3 bis 0,4 g/cm<sup>3</sup> erreicht werden. Die Schallabsorption der Naturfaserträger ist niedriger als bei dem Referenz-Dachhimmel mit Schaumkern (Opel Zafira) und dem Dachhimmel aus Naturfaservlies (Hyundai Accent). Bei den Referenzmaterialien werden die akustischen Eigenschaften durch unterschiedliche Bauweisen erreicht. Beim Schaumverbund werden die akustischen Eigenschaften maßgeblich von der Kernschicht dominiert. Bei dem Dachhimmel aus Naturfaservlies hat das Dekor einen großen Einfluss auf die Schallabsorption.

Die Schallabsorptionsmessungen mit dem Impedanzmessrohr zeigen bei unterschiedlichen Materialien gleiche Abstufungen wie bei der Messung in der Alpha-Kabine. Eine Materialvorauswahl ist somit möglich. Die Lage des maximalen Absorptionsgrades und der Kurvenverlauf sind nicht mit den Messergebnissen aus der Alpha-Kabine vergleichbar. Im Hinblick auf eine praxisnahe Bauteilentwicklung sollten stets Messungen in der Alpha-Kabine durchgeführt werden.

Die im Labormaßstab hergestellten Verbundmaterialien wurden anschließend unter industriellen Bedingungen verarbeitet und zu Musterbauteilen verpresst. Dabei konnte die Umsetzbarkeit der Technologie nachgewiesen werden. Im Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften besteht bei den naturfaserverstärkten Dachhimmel-Materialien allerdings noch Optimierungsbedarf vor allem bei erhöhten Beanspruchungen unter klimatischen Bedingungen. Wesentlicher Vorteil der Naturfasermaterialien ist der einfachere Aufbau und die Fertigung in einem One-Step-Prozess. Außerdem können durch den einfacheren Aufbau und die Verwendung von thermoplastischen Materialien Vorteile beim Recycling erzielt werden.

## 11 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen des Antrages

Im Rahmen des Forschungsprojektes waren zur Erreichung des Projektziels folgende Arbeitsetappen vorgesehen:

- Arbeitspaket 1: Erstellung eines Konzeptes für den Halbzeugaufbau
- Arbeitspaket 2: Marktsondierung, Beschaffung und Prüfung der Ausgangsmaterialien
- Arbeitspaket 3: Kernschichtentwicklung, Materialcharakterisierung und -optimierung
- Arbeitspaket 4: Deckschichtentwicklung, Materialcharakterisierung und -optimierung
- Arbeitspaket 5: Sandwichkonfektionierung im Versuchsmaßstab
- Arbeitspaket 6: Verbundherstellung
- Arbeitspaket 7: Verbundprüfung
- Arbeitspaket 8: Herstellung von Musterhalbzeugen und Demonstratorbauteilen
- Arbeitspaket 9: Vorversuche zur kontinuierlichen Sandwichfertigung
- Arbeitspaket 10: Erstellung des Abschlussberichtes

Bei der Bearbeitung der einzelnen Etappen konnten folgende Ergebnisse erzielt werden:

### **Arbeitspaket 1:**

Das Konzept für den Halbzeugaufbau sieht die Kombination von gekrempelten Vliesen für die Decklagen und aerodynamisch gelegte Vliese für die Kernschicht vor. Die verschiedenen Varianten wurden planmäßig gefertigt und getestet.

### **Arbeitspaket 2:**

Für die Kernvliese und Deckvliese wurden unterschiedliche Faserqualitäten ausgewählt und geprüft. Außerdem wurden Seriendachhimmel aus Naturfasermaterialien beschafft und hinsichtlich der Zusammensetzung und der Eigenschaften analysiert. Die Eigenschaften dienten als Referenzwerte.

### **Arbeitspaket 3:**

Aus den ausgewählten Materialien für die Kernschicht wurden Vliese mittels Krempeln und Vernadeln hergestellt. Dabei wurden das Mischungsverhältnis und die eingesetzten Fasermaterialien variiert. Außerdem wurden aerodynamisch gelegte Kernmaterialien bei einem Industriepartner des TITK hergestellt und im Rahmen der durchgeführten Pressversuche eingesetzt.

### **Arbeitspaket 4:**

Um der entstehenden Sandwichstruktur eine hohe Steifigkeit zu verleihen wurden als Deckschichten Krempelvliese hergestellt, deren feine Fasern längs in Vliesrichtung orientiert wurden. Dabei wurde jeweils ein Flächengewicht von ca. 100 - 160 g/m<sup>2</sup> eingestellt.

**Arbeitspaket 5:**

Um die Eignung der Kern- und Deckvliese für den angestrebten Sandwichaufbau zu untersuchen, wurden Sandwichstrukturen mittels Pressen hergestellt. So entstanden Platten in den Dimensionen von 300 x 300 mm. Es zeigte sich, dass durch die ausgewählten Vliese der gewünschte Sandwichaufbau dargestellt werden kann. Im weiteren Projektverlauf wurden optimalen Herstellungsbedingungen für die Halbzeugherstellung ermittelt.

**Arbeitspaket 6:**

Zur Bestimmung der mechanischen und akustischen Eigenschaften wurden ebene Platten mit unterschiedlichen Materialzusammensetzungen gepresst. Bei der Herstellung der Platten wurde auch der Verdichtungsgrad variiert, um den Einfluss der Verbunddicke auf die mechanischen und akustischen Eigenschaften bestimmen zu können. Die Versuche erfolgten zum Teil im Technikum des TITK als auch bei einem Industriepartner auf größeren Pressen, um ausreichend große Platten (1 x 1m) für die Prüfung der akustischen Eigenschaften in der Alpha Kabine herstellen zu können.

**Arbeitspaket 7:**

Aus den im Labormaßstab hergestellten Plattenmaterialien wurden Probekörper für die mechanischen und akustischen Prüfungen ausgesägt. Im Hinblick auf die Anwendung als Dachhimmelmaterial wurden an den Verbunden vor allem Biegeprüfungen und Schallabsorptionsprüfungen durchgeführt. Die mechanischen und akustischen Eigenschaften wurden mit den Kennwerten von einem Seriendachhimmel (Referenzmuster) verglichen. Im Anschluss an die Werkstoffprüfungen folgten Optimierungen des Materialaufbaus und der Pressbedingungen.

**Arbeitspaket 8:**

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde die Herstellung von Musterhalbzeugen und Demonstratorbauteilen realisiert. Die Versuche fanden bei einem Industriepartner des TITK statt. Es konnten erfolgreich Dachhimmelmuster gepresst werden.

**Arbeitspaket 9:**

Vorversuche zur kontinuierlichen Sandwichfertigung konnten im TITK bereits während der Herstellung der Versuchsmaterialien durchgeführt werden. Außerdem wurde die Kombination der aerodynamischen Vliesbildung und des Krempelverfahrens bei der Firma Mailinger realisiert.

**Arbeitspaket 10:**

Im Arbeitspaket 10 wurden die Ergebnisse zusammengestellt und der Abschlussbericht geschrieben. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen des Antrags zeigt, dass alle Arbeitsetappen plangemäß umgesetzt und das Forschungsvorhaben erfolgreich abgeschlossen werden konnte.

## **12 Wissenschaftlich/technische und wirtschaftliche Bedeutung des Vorhabens für kleine und mittlere Unternehmen**

Zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen muss die Automobilindustrie energieeffizientere Fahrzeuge entwickeln. Dazu können auch neue Leichtbaukonzepte und die Nutzung nachwachsender Rohstoffe entscheidend beitragen. Vor allem beim Fahrzeuginterieur ist aktuell wieder großes Interesse der Bauteilhersteller an Naturfaserverbundwerkstoffen zur Fertigung großer Verkleidungen erkennbar. Es ist allerdings bekannt, dass der Entwicklungsaufwand zur Herstellung neuer Materialien meist sehr groß ist und von den vorwiegend kleinen und mittelständischen Halbzeugherstellern nicht allein getragen werden kann, da dort kaum Kapazitäten für die Forschung und Entwicklung neuer Naturfaserverbunde vorhanden sind. Das wurde auch bei den Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses von den teilnehmenden KMU mehrfach deutlich gemacht.

Für Betriebe der Textilindustrie, die bisher meist nur Teilkomponenten wie Faservliese und Dekorstoffe in die Automobilfertigung liefern, kann durch die Umsetzung der Entwicklung ein erheblicher Zugewinn bei der Leistungsfähigkeit und Produktpalette resultieren. Konventionelle Textiltechniken können genutzt werden, um komplette Verbundhalbzeuge für die Fertigung von Interieurteilen herzustellen. So wird ohne zusätzliche Investitionen eine viel höhere Wertschöpfung erreicht. Auch ist davon auszugehen, dass die neuen Naturfasersandwichwerkstoffe aus Gründen der möglichen Gewichtseinsparung in Zukunft verstärkt nachgefragt werden, was zusätzlich zu einem Ansteigen des Produktionsvolumens und des Umsatzes führt. Neben der Ausweitung des Produktsortiments ergibt sich aber auch ein Zuwachs an Fertigungs-Know-how dieser Unternehmen, was letztlich ebenfalls zu einem Ausbau und der Festigung der Marktposition sowie zur Steigerung ihres Innovationspotenzials beiträgt.

Aus der Entwicklung kann sich so eine Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit insbesondere auch von KMU der Textilindustrie, der Naturfasernerzeugung und der Fahrzeugbranche ergeben.

Für eine industrielle Fertigung großflächiger Verkleidungsteile ist die ausreichende Verfügbarkeit geeigneter einheimischer Naturfaserqualitäten Voraussetzung. Damit resultiert auf der Basis der Forschungsergebnisse späterhin auch für Naturfasernerzeuger eine Chance zur Erweiterung ihrer Aktivitäten auf dem Gebiet der technischen Fasern für Verbundwerkstoffe. Damit können sich diese Betriebe neben dem Hauptanwendungsfeld der Bekleidungs- und Heimtextilien ein weiteres Unternehmensstandbein erschließen bzw. dieses ausbauen und so ihre Position am Markt verbessern.

Auch für Unternehmen der Fahrzeugzulieferbranche kann sich aus den Forschungsarbeiten ein direkter Nutzen ergeben. Die auf der Grundlage des Projektes angestrebte Markteinführung der neuen Materialien soll bei kleinen und mittelständischen Betrieben erfolgen, da diese ihre Fertigung im Vergleich zu Großunternehmen deutlich flexibler gestalten können.

Sie stellen meist Kleinserien bzw. individuelle Produkte für den Sonderfahrzeugbau her, was eine Umstellung der eingesetzten Werkstoffe erleichtert. Aber gerade bei diesen Betrieben ist das Preis-Leistungs-Verhältnis der eingesetzten Materialien aufgrund der geringeren Stückzahlen von großer Bedeutung. Da es sich bei den angestrebten Naturfasersandwichwerkstoffen um preislich attraktive, im kostengünstigen Thermoformprozess verarbeitbare Halbzeuge handelt, wird ein großes Einsatzpotenzial bei solchen KMU gesehen. Diese Firmen können so preisgünstige, leistungsfähige Verkleidungsteile mit verbessertem Recyclingpotenzial anbieten. Damit ergibt sich gegenüber anderen Unternehmen, die konventionelle Materialien und aufwändigere Techniken einsetzen, einen Wettbewerbsvorteil. Die darüber hinaus erworbenen Erfahrungen im Bereich der Verarbeitung von Naturfaserverbundwerkstoffen tragen ebenfalls zur Steigerung ihrer Leistungs- und Innovationsfähigkeit bei. Auf der Basis der Umsetzung der neuen Naturfasersandwichwerkstoffe im kleinindustriellen Maßstab soll letztlich auch deren Anwendung zur Herstellung großer Stückzahlen von Interieurteilen bei Großunternehmen erschlossen werden.

- Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten werden als sehr gut eingeschätzt, da sowohl die Halbzeugherstellung als auch die Verpressung der Verbunde auf in der Industrie vorhandenen Anlagen realisierbar sind.
- Die Finanzierbarkeit der wirtschaftlichen Umsetzung ist unproblematisch, da die Herstellung der Sandwichmatten im Wesentlichen mit großtechnisch verfügbarer textiler Anlagentechnik realisiert werden kann. Bei der Verbundherstellung ergeben sich auch keine höheren Kosten, da die Verpressung (wenn entsprechende Vorheizstationen verfügbar sind) auf konventionellen Formpressanlagen erfolgen kann. Es werden keine Investitionen für neue Verarbeitungsanlagen benötigt.

### **13 Geplante Veröffentlichungen/Schutzrechte**

Schutzrechte wurden im Rahmen des Projektes keine angemeldet oder erworben.

Folgende Veröffentlichungen sind im Zusammenhang mit der Bearbeitung des Forschungsvorhabens geplant:

- Fachkolloquium im TITK
- Veröffentlichung in „Technische Textilien“ oder „Gummi Fasern Kunststoffe“
- Präsentation der Entwicklung auf der TITK Website
- Fachvortrag zur Narotech 2012

## 14 Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzeptes

Der Transfer der Forschungsergebnisse in die Wirtschaft erfolgte über die nachfolgend aufgeführten Aktivitäten (in der Tabelle 12 grau hinterlegt).

Tabelle 12: Maßnahmen zum Ergebnistransfer

Maßnahme	Ziel	Zeitraum
Information der Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschusses	Auswertung der Ergebnisse, Abstimmung der Arbeiten	Dezember 2009
Vorstellung der Ergebnisse bei Kundenbesuchen	Informationen zu Projektergebnissen, Einbeziehung von Kundenwünschen in die aktuellen Forschungsarbeiten	Januar-Oktober 2010
Vorstellung der Ergebnisse im Rahmen von Kolloquien und Führungen im TITK	Diskussion der Ergebnisse mit Fachkollegen, Präsentation der Verarbeitungstechnologie für Sandwichmaterialien im TITK	während der gesamten Projektlaufzeit
Teilnahme an Fachausstellungen und Messen (JEC, Materialica, Mtex, Zulieferer Innovativ...)	Vorstellung der entwickelten Materialien und Technologien,	April-Oktober 2010
Information der Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschusses	Auswertung der Ergebnisse, Abstimmung der Arbeiten	Mai 2010
Erstellung von Flyern und Materialmustern für Kundenbemusterungen	Zusammenstellung wesentlicher Ergebnisse, Bereitstellung von Anschauungsmustern	Dezember 2010
Beratung von interessierten Firmen	Vermittlung von Know-How zur Verarbeitung der Materialien	während der gesamten Projektlaufzeit
Information der Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschusses	Auswertung der Ergebnisse, Abstimmung der Arbeiten	Mai 2011
Durchführung von gemeinsamen Versuchen mit Industriepartnern	Herstellung von Musterbauteilen	1. Quartal 2011
Publikation der Ergebnisse im Internet und in der Fachpresse	Überregionale Verbreitung der Forschungsergebnisse	nach Projektabschluss
Weitergabe des Forschungsberichtes an interessierte Firmen	Umfassende Information zu den erreichten Ergebnissen	nach Projektabschluss
Präsentation der Ergebnisse auf dem Internationalen Symposium „Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen“	Vorstellung der Ergebnisse vor einem Fachpublikum auf dem Gebiet der nachwachsenden Rohstoffe	September 2012

Die noch ausstehenden Aktivitäten werden weiter planmäßig durchgeführt. Das betrifft insbesondere die Veröffentlichung der Ergebnisse in der Fachpresse und durch wissenschaftliche Vorträge auf internationalen Tagungen.

Die dargestellten Aktivitäten zur Umsetzung der Forschungsergebnisse und die sehr enge Zusammenarbeit des TITK mit Industriepartnern im Bereich der Vliesstoffindustrie und Verbundherstellung lassen einen erfolgreichen Ergebnistransfer in die Wirtschaft erwarten.

## **15 Notwendigkeit und Angemessenheit der eingesetzten Mittel**

Die Projektergebnisse zeigen, dass mit den im Rahmen des Forschungsvorhabens bearbeiteten Arbeitsschritten die Zielstellung des Projektes, leichte Sandwichmaterialien auf der Basis von naturfaserverstärkten Kunststoffen zu entwickeln, erreicht werden konnte.

Ein wesentlicher Schwerpunkt der Arbeiten bestand in der Entwicklung von Naturfaservliesen für die Kern- und Deckschichten von Sandwichmaterialien. Dabei wurden wie geplant, sowohl das Krempelverfahren für die Herstellung hochorientierter Deckschichten als auch die aerodynamische Vliesbildung für die Herstellung von porösen Kernmaterialien eingesetzt. Die Aerodynamische Vliesbildung erfolgte in der Industrie. Dazu wurden die im Projektantrag geplanten Mittel für Leistungen Dritter verwendet. Die Vliese wurden anschließend im TITK zu Verbundplatten mit unterschiedlichen Dichten verpresst und hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften geprüft. In weiteren Versuchen wurden zur Fertigung von größeren Platten für die akustischen Prüfungen in der Alpha-Kabine Pressversuche bei einem Industriepartner des TITK durchgeführt. Die Bereitstellung der Versuchsanlagen und die Unterstützung bei der Probenherstellung wurde mit den dafür vorgesehenen Mitteln (Leistung Dritter) finanziert.

Ein weiterer wichtiger Arbeitsschritt konzentrierte sich auf die Bestimmung der akustischen Eigenschaften in der Alpha-Kabine. Dazu wurde eine Vielzahl von Proben in Zusammenarbeit mit der Firma Belltec ausgemessen. Diese Arbeiten Dritter wurden mit den dafür geplanten Leistungen durchgeführt. Nach Auswertung der Versuchsergebnisse der akustischen Messungen und Vergleich mit den im TITK im Impedanzmessrohr bestimmten Kennwerten wurden optimale Varianten für die weiteren Versuche zur Herstellung von Bauteilen ausgewählt. Die Herstellung von Bauteilen erfolgte wie im Projektantrag vorgesehen bei einem Werkzeugbaubetrieb. Die für die Pressversuche bereitgestellten Versuchsanlagen und die Unterstützung bei der Herstellung von Demonstrationsbauteilen konnten durch die vorgesehenen Leistungen Dritter finanziert werden.

Die Projektergebnisse wurden innerhalb des vorgesehenen Zeitplans erarbeitet. Die Finanzmittel für die Personalausgaben und Leistungen Dritter wurden in der beantragten Höhe verbraucht. Das zur Bearbeitung des Forschungsvorhabens eingesetzte Personal war angemessen und notwendig. Bei der Bearbeitung des Projektes wurde wirtschaftlich und sparsam verfahren.

## **16 Danksagung**

Das IGF-Vorhaben Nr. 16177 BR der Forschungsvereinigung Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (WNR e.V.) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Wir danken für die Bereitstellung der Fördermittel.

Dank gilt auch den Firmen Mailinger GmbH, Phönix GmbH, Isowood GmbH und Dixi Comcontec GmbH und IAC Group GmbH für die Unterstützung durch die Bereitstellung von Versuchsmaterialien und Durchführung von Verarbeitungsversuchen.

## 16 Literaturverzeichnis

- [1] Stamm, Witte  
Sandwich-Konstruktionen  
Springerverlag Wien, New York 1974
- [2] N.N.  
Leichtbau Werkstoffe  
Daimler Benz High Tech Report (1994) 4, S. 26-31
- [3] Caprioli, D.  
Sandwich-Elemente mit Wabenkern für Karosserieanwendungen  
Lightweightdesign 1(2009), 2. 54-58
- [4] N.N.  
Fiberglas – Sandwich – Konstruktion für Australiens Hochgeschwindigkeitszüge  
Eisenbahningenieur 37 (1986) 12, S. 584
- [5] Lehmann, W.:  
Kunststoffe – Moderne Baustoffe  
Swiss Materials 1 (1989) 1, S. 15-23
- [6] v. Gellhorn, E.:  
Bauteile aus Sandwichelementen herstellen  
Kunststoffe 81 (1991) 11, S. 1009-1013
- [7] v. Gellhorn, E.:  
GMT-Sandwichbauteile mit Kernmaterialien aus Schaumstoffen  
Plastverarbeiter 42 (1991) 5, S. 30-34
- [8] Brinken, F.; Reif, G.; v. Gellhorn, E.:  
Sandwichbauteile – Verbundwerkstoffe einmal anders  
Kunststoffe 80 (1990) 5, S. 612-619
- [9] N.N.  
Leichtbau Werkstoffe  
Daimler Benz High Tech Report (1994) 4, S. 26-31
- [10] 3D-TEX  
Firmenprospekt Fa. Mayser
- [11] Eisele, D.:  
Auto-Fertighimmel  
Sonderdruck aus Textil Praxis International, 1989
- [12] NN.:  
Leichter hochfester Verbundwerkstoff von Quadrant Plastic Composite etabliert sich als All-round-Material für KFZ-Interieur  
Firmenschrift von Quadrant Plastic Composites AG, 2007
- [13] NN.:  
Produkteübersicht Sandwichvliese und Vliese  
Firmenschrift von Quadrant Plastic Composites AG, 2009
- [14] Knobelsdorf, C.:  
Emissionsverhalten von Naturfaserverbunden  
Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 33/02, TITK 2004