

# Schlussbericht

zum Vorhaben

Verbundprojekt:

**Holzformteile als Multi-Materialsysteme für den Einsatz im Fahrzeug-Rohbau  
Akronym: HAMMER**

Teilprojekt:

**Integration von holzbasierten Multimaterialsystemen in Fahrzeugstrukturen durch geeignete Füge-technologien und in Rohbaufertigungen durch geeignete Prozessketten**

Zuwendungsempfänger:

**Universität Kassel, Fachgebiet Trennende und Fügende Fertigungsverfahren (tff)**

Förderkennzeichen:

**13N12039**

Laufzeit:

**01.04.2012 bis 30.04.2016**

Autoren:

**Dipl.-Wirtsch.-Ing. Dipl. Oec Daniel Kohl**

**Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Stefan Böhm**

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung**



**Technologiezentrum**

Verbundprojekt

im Rahmenprogramm „Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft - WING“  
des Bundesministeriums für Bildung und Forschung

Bekanntmachung „Multimaterialsysteme – Zukünftige Leichtbauweisen für ressourcensparende Mobilität“

### **Holzformteile als Multi-Materialsysteme für den Einsatz im Fahrzeug-Rohbau (HAMMER)**

Dieses Forschungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und vom Projektträger VDI Technologiezentrum (VDI TZ) betreut.

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	2
Abbildungsverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis.....	6
I. Ziele.....	7
I.1 Aufgabenstellung des Teilprojekts.....	7
I.2 Voraussetzungen.....	8
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	9
I.4 Stand der Technik.....	10
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	11
II. Ergebnisse.....	13
II.1 Erzielte Ergebnisse.....	13
II.1.1 Identifikation von Bauteilgeometrien und Demonstratorgeometrie.....	13
II.1.2 Kennwertermittlung und Klebstoffauswahl.....	14
II.1.3 Verstärktes Formholz/ holzbasierte MMS.....	18
II.1.4 Bauteilprüfung Schwellergeometrie/ $\Omega$ -Profil.....	25
II.1.5 Reparatur- und Recyclingkonzepte.....	28
II.1.6 KTL-Fähigkeit von Buchenholz.....	34
II.1.7 Kritische Prozesseinflüsse und Optimierungspotenzial.....	35
II.1.8 Untersuchungen Formtreue.....	40
II.1.9 Energetische & ökologische Bewertung.....	48
II.1.10 Finaler Demonstrator.....	50
II.1.11 Gesamtfazit.....	57
II.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	59
II.3 Verwertung.....	59
II.3.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten.....	59
II.3.2 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten.....	60
II.3.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit.....	60
II.4 Erkenntnisse von Dritten.....	61
II.5 Veröffentlichungen, Vorträge, öffentliche Darstellung, Pressespiegel.....	61
II.5.1 Vorträge und Veröffentlichungen.....	61
II.5.2 Präsentation auf Messen.....	62
II.5.3 Pressespiegel.....	63

Literaturverzeichnis .....64

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schweller-Geometrie eines Mittelklasse-PKW .....	13
Abbildung 2: Schematische Darstellung der für Holz angepassten Variante .....	13
Abbildung 3: Seitenaufprallträger eines Mittelklasse-PKW .....	14
Abbildung 4: Prüfaufbau .....	15
Abbildung 5: Im Rahmen des Projekts eingesetzte grundsätzliche Probengeometrien .....	16
Abbildung 6: Ergebnisse einer Zugprüfung eines 3-lagigen Furnierholzverbunds .....	16
Abbildung 7: Zugscherfestigkeit nach DIN EN 1465 .....	17
Abbildung 8: Zugscherfestigkeit nach DIN EN 1465 .....	18
Abbildung 9: Prinzipaufbau einfacher verstärkter Holzproben .....	19
Abbildung 10: Ergebnisse Festigkeitsuntersuchung Zug 1p-Aufbau .....	20
Abbildung 11: Ergebnisse Festigkeitsuntersuchung Zug 2p-Aufbau .....	20
Abbildung 12: Ergebnisse Festigkeitsuntersuchung 3-Punkt-Biegung 1p-Aufbau .....	21
Abbildung 13: Ergebnisse Festigkeitsuntersuchung 3-Punkt-Biegung 2p-Aufbau .....	21
Abbildung 14: Effekte bei MMS .....	22
Abbildung 15: Schematische Darstellung des Prüfkörpers .....	23
Abbildung 16: Durchschnittliche Bruchkraft .....	23
Abbildung 17: Bruchkraft bei zwei Lagen Verstärkungsmaterial .....	24
Abbildung 18: Gewichtsvergleich .....	25
Abbildung 19: Vorrichtung zur Deformationsmessung .....	26
Abbildung 20: Biegeprüfung längs .....	26
Abbildung 21: Torsionsprüfung .....	27
Abbildung 22: Aramidverstärkte Profile nach Torsionsbelastung .....	27
Abbildung 23: Schädigungsvariante Kerbung .....	29
Abbildung 24: Schädigungsvariante Punktierung .....	29
Abbildung 25: Schädigungsvariante definierter Anbruch .....	29
Abbildung 26: Reparatur durch einlagige Patches .....	30
Abbildung 27: Reparatur durch zweilagigen Patch .....	30
Abbildung 28: Reparatur durch Klebstofffüllung .....	30
Abbildung 29: Reparierte Proben nach der 3-Punkt-Biegeprüfung .....	30
Abbildung 30: Verfahren zum Recycling von holzbasierten MMS .....	33
Abbildung 31: Angepasste Schwimm-Sink-Vorrichtung .....	33
Abbildung 32: Ergebnisse der Zug- und Biegeprüfungen .....	34
Abbildung 33: Auswertungsergebnis hinsichtlich Holzfeuchte .....	37
Abbildung 34: Vermessungsvorrichtung .....	41
Abbildung 35: Definierte Messpunkte an der Probengeometrie .....	41
Abbildung 36: Temperatur- und rel. Feuchteverlauf .....	42
Abbildung 37: Auswertedarstellung der Formveränderung .....	43
Abbildung 38: Mittlere Abweichung der realen Bauteile vom theoretisch idealen Teil .....	44
Abbildung 39: Lageänderungen (Mittelwerte der Beträge) der Messpunkte .....	45
Abbildung 40: Lageänderungen (Mittelwerte der Beträge) der Messpunkte .....	45
Abbildung 41: Lageänderungen (Mittelwerte der Beträge) der Messpunkte .....	46
Abbildung 42: Mittlere Abweichung der realen Bauteile .....	46

Abbildung 43: Mittlere Abweichung der realen Bauteile .....	47
Abbildung 44: Einteilung des Systemraums.....	49
Abbildung 45: Formular zur Erstellung der Ökobilanzierung .....	50
Abbildung 46: Auswertungsergebnis Ökobilanzierung .....	50
Abbildung 47: Grundaufbau für den finalen Demonstrator .....	51
Abbildung 48: Beschnitt der Originalstrebe mittels Laser.....	52
Abbildung 49: Anbindungsstrategie .....	52
Abbildung 50: Explosionsdarstellung finales Demonstratorkonzepts .....	52
Abbildung 51: Prüfeinrichtung und Prüfaufbau quasi-statische 3-Punkt-Biegeprüfung.....	53
Abbildung 52: Reaktionskräfte.....	54
Abbildung 53: Eindrücke der Herstellung eines Demonstratorbauteils.....	54
Abbildung 54: Quasi-statische 3-Punkt-Biegeprüfung an Gesamtbauteilen .....	55
Abbildung 55: Holz- und Stahlstrebe .....	55
Abbildung 56: Drehmomentenverlauf der Holz- bzw. Stahlstrebe .....	56
Abbildung 57: Rohbautür mit Seitenaufprallträger .....	56
Abbildung 58: Beispiele Holz im Fahrzeugbau .....	61

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2: Tatsächlicher Arbeits- und Zeitplan.....	9
Tabelle 3: Bewertung und Reparaturempfehlungen.....	32
Tabelle 4: Versuchsreihe 1.1: n-1 „gute“ Parameter .....	36
Tabelle 5: Versuchsreihe 1.2: n-1 „schlechte“ Parameter .....	36
Tabelle 6: Parameter der Zugproben für die Versuchsphase 2.....	39
Tabelle 7: Probenplan und Probencharakteristika. ....	42

## I. Ziele

### I.1 Aufgabenstellung des Teilprojekts

Übergeordnetes Ziel des Gesamtverbund-Projekts Holzformteile als Multi-Materialsysteme für den Einsatz im Fahrzeug-Rohbau (HAMMER) war die Potenzialermittlung hinsichtlich des Einsatzes von Holzformteilen als alternative, innovative und nachhaltige Multimaterialsysteme (MMS) für strukturelle, ressourceneffiziente und nachhaltige Leichtbaukomponenten von Fahrzeugstrukturen. Es sollten geeignete Fahrzeugkomponenten identifiziert, ausgelegt und auf Basis von 3D-geformten Formhölzern gefertigt werden sowie mögliche Technologien zur Einbindung (Fügeverfahren) in Gesamtfahrzeugstrukturen erforscht werden. Prozessketten, die im Fahrzeugrohbau bisher eingesetzt werden, sollten durch die holzbasierten MMS möglichst wenig beeinflusst werden.

Die einzelnen wissenschaftlichen und technischen Zielsetzungen waren wie folgt:

- Identifikation, Auslegung und Fertigung geeigneter Fahrzeugkomponenten
- Weiterentwicklung von Holzformteilen zu alternativen, innovativen und nachhaltigen Multimaterialsystemen (MMS)
- Ermittlung von Werkstoff- und Bauteilkennwerten
- Erstellung von Konzepten, um Automobilhersteller und deren Zulieferer simulationsgeeignete Materialmodelle der holzbasierten MMS zur Verfügung stellen zu können
- Erforschung möglicher Technologien zur Einbindung (Fügeverfahren) in Gesamtfahrzeugstrukturen bei möglichst geringer Beeinflussung der Prozessketten
- Erarbeitung der Vorteile werkstoffgerechter Multimaterialsysteme auf Basis von Holzwerkstoffen
- Erstellung von Reparatur- und Recyclingkonzepten

Alle Arbeiten wurden eng verknüpft und kooperierend von allen Verbundpartnern sowie vom assoziierten Partner durchgeführt.

Im Rahmen des Teilvorhabens untersuchte das Fachgebiet Trennende und Fügende Fertigungsverfahren des Instituts für Produktionstechnik und Logistik der Universität Kassel die „Integration von holzbasierten Multimaterialsystemen in Fahrzeugstrukturen durch geeignete Fügeverfahren und geeignete Prozessketten“.

Es war Ziel, Innovationen im Themenfeld holzbasierte MMS zu generieren. Im Besonderen sollten Fügeverfahren für den „inneren“ und „äußeren“ Verbund der Materialsysteme erforscht sowie Prozessketten für holzbasierte MMS im Fahrzeugrohbau analysiert, angepasst und vorangetrieben werden. Des Weiteren war es Ziel des Teilvorhabens, gemeinsam mit den Projektpartnern und dem assoziierten Partner, System- und Baugruppeneigenschaften der holzbasierten MMS zu ermitteln. Darüber hinaus sollten Strategien und Konzepte für Reparatur und Recycling von holzbasierten MMS aufgestellt werden.



Die einzelnen wissenschaftlichen und technischen Zielsetzungen waren somit wie folgt:

- Identifikation, Auslegung und Fertigung geeigneter Baugruppen und Strukturen auf Basis von 3D-geformten Formhölzern in Multimaterialbauweise
- Definition und Umsetzung der Anforderungen an den „inneren Verbund“ der Materialsysteme
- Definition und Herstellung des „äußeren Verbundes“ von in Bauteilen umgesetzten Materialsystemen an Fahrzeugstrukturen
- Benennung möglicher 3D-Geometrien
- Ermittlung der Gebrauchseigenschaften von holzbasierten Multimaterialsystemen sowie der aus ihnen erarbeiteten komplexen (Bauteil-)Geometrien
- Erarbeitung von Reparatur- und Recyclingkonzepten
- Erarbeitung von Möglichkeiten einer Fertigungsintegration

## **1.2 Voraussetzungen**

Holz ist ein nachwachsender, nachhaltig bewirtschafteter Werkstoff mit sehr guten Leichtbaueigenschaften. Bei anwendungsspezifischem Einsatz können Qualitätsholzwerkstoffe durch die geringe Rohdichte bei gleichzeitig hoher Festigkeit auch Leichtmetallen und künstlich synthetisierten Faserverbundwerkstoffen überlegen sein. Durch gezielte Ausrichtung der einzelnen Furnierlagen, zusätzliche Lasteinleitungselemente sowie der Kombination der Hölzer mit verstärkenden Materialien können leichte und stabile Bauteile für den Einsatz in Fahrzeugkarosserien realisiert werden.

Der Einsatz von Holzwerkstoffen in Fahrzeugstrukturen besitzt eine ausgeprägte industrielle und gesellschaftliche Relevanz:

- es handelt sich um nachwachsende, preisgünstige und nicht-fossile Rohstoffe
- es wird ein geringer Energieaufwand bei der Produktion benötigt (besonders im Vergleich zu Kohlenstofffaser-verstärkten Kunststoffen (CFK) oder auch formpressgehärteten Stählen)
- die Transportwege im gesamten Bereich der Wertschöpfung bis zur Montage sind kurz
- es besteht eine Nachhaltigkeit durch Reststoffverwertung (geometrisch, stofflich, thermisch) und gute Recyclebarkeit

Unter der Voraussetzung des Vorliegens der positiven Eigenschaften des Grundwerkstoffs Holz, wurde mit Start des Projekts die Hypothese aufgestellt, dass es möglich ist, definierte moderne automobiler Bauteile zukünftig auch auf Basis von holzbasierten Materialsystemen zu erstellen. Hierfür sind jedoch grundlegende Untersuchungen und Charakterisierungen des Materials hinsichtlich seiner Einsetzbarkeit sowie seiner Schwächen durchzuführen. Entsprechende Lösungen müssen erarbeitet und untersucht werden.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes sollten daher für die Mischbauweise geeignete Holzpressformteile entwickelt, im Labormaßstab hergestellt und die Integration in Leichtbaustrukturen durch Fügeverbindungen untersucht werden.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Durch das Verbund-Projekt HAMMER wurde ein erster systematischer Ansatz verfolgt, um Holz in struktureller Bauweise in zukünftigen Fahrzeugprojekten einzusetzen.

Über Designstudien oder Conceptcars hinausgehend, wurde die Integration des Werkstoffs Holz im ganzheitlichen Sinne und mit Blick auf die industriellen Prozessketten verfolgt. Durch die Erarbeitung eines Demonstrators wurden neben der Darstellung der prinzipiellen Machbarkeit auch wesentliche Kenntnisse hinsichtlich Werkstoffkennwerten, Werkstoffverhalten sowie Einsatzpotenzial des Werkstoffs bereitgestellt.

Während des Projektverlaufs musste festgestellt werden, dass die durchgeführten Arbeiten einen, im Vergleich zum Ansatz im Forschungsantrag, erhöhten zeitlichen Einsatz benötigen. Gründe dafür sind im Wesentlichen die Neuheit der Themenstellung und das damit einhergehende Fehlen von Erfahrungen sowie die Komplexität und Strukturen innerhalb des Zielbereichs Automobilbaus. Insbesondere letzterer Punkt machte kurzfristige, pragmatische und praxisnahe Untersuchungen und Tests nur in speziellen Situationen möglich. So mussten Anforderungen an reale automobile Bauteile aufwendig anhand von direkten Bauteilvergleichen durchgeführt und anhand dieser die entsprechenden Werkstoffkennwerte im holztechnologischen Bereich ermittelt werden. Weiterhin war das Design und die Auslegung holzbasierter Bauteile ein iterativer Prozess, der nur durch die intensive Zusammenarbeit der interdisziplinären Partner möglich war. Dies erforderte einen hohen Abstimmungsbedarf und organisatorischen Arbeitsaufwand. Über dies hinaus sind automobilspezifische Anforderungen wie Dauerbeständigkeit und KTL-Fähigkeit nicht durch konventionelle Tests und Verfahren zu erfüllen. Hier mussten in enger Abstimmung mit dem assoziierten Partner spezielle Lösungsansätze gefunden werden. Weiterhin ist durch die zeitlich und in Bezug auf die Ressourcenbereitstellung sehr aufwendige Herstellung und Prüfung der Demonstratorprüfkörper ein weiterer zeitlicher Verzug im Projekt entstanden.

Vor dem Hintergrund der Verzögerungen wurde das Verbundprojekt um insgesamt 13 Monate auf insgesamt 49 Monate verlängert. Tabelle 1 zeigt den tatsächlichen Arbeits- und Zeitplan durch den das Projekt erfolgreich abgeschlossen werden konnte. Die Entsprechenden Meilensteine wurden erreicht.

**Tabelle 1: Tatsächlicher Arbeits- und Zeitplan**

	1. Projektjahr				2. Projektjahr				3. Projektjahr				4. Projektjahr				5. Projektjahr	
	I.Q.	II.Q.	III.Q.	IV.Q.	I.Q.	II.Q.	III.Q.	IV.Q.	I.Q.	II.Q.	III.Q.	IV.Q.	I.Q.	II.Q.	III.Q.	IV.Q.	I.Q.	
AP 1	Identifikation geeigneter Baugruppen																	
AP 2	Entwicklung geeigneter Holzhalbzeuge																	
AP 3	Auslegung und Konstruktion von MMS-Baugruppen																	
AP 4	Eigenschaftsermittlung der Baugruppen																	
AP 5	Anbindung der Baugruppen an die Fahrzeugstruktur																	
AP 6	Demonstratorherstellung																	
AP 7	Reparatur und Recyclingkonzepte																	
AP 8	Produktionsszenarien																	
AP 9	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen																	

#### **I.4 Stand der Technik**

Leichtbaukonstruktionen wurden schon lange vor deren technischer Umsetzung durch die Natur (Kieselalgen, Pflanzenstängel, biologische Zellstrukturen) hervorgebracht. Der am häufigsten verwendete natürliche Leichtbauwerkstoff ist Holz.

Holz ist ein natürlicher Faserverbundwerkstoff aus festigkeitsbildenden Tracheiden (Nadelholz) bzw. Libroformfasern (Laubholz) und einem Bindestoff (Lignin) mit sehr guten Leichtbaueigenschaften. Durch die geringe Rohdichte bei gleichzeitig hoher Festigkeit sind Qualitätsholzwerkstoffe auch Leichtmetallen und künstlich synthetisierten Faserverbundwerkstoffen bei situationsspezifischem Einsatz oft überlegen: Holz erträgt im Gegensatz zu Aluminium hohe Lastwechselzahlen ohne Ermüdungsbrüche. Holz ist zusätzlich stoßabsorbierend und schwingungsdämpfend. Für Formsperrholz werden unterschiedliche Holzarten (Ahorn, Birke, Buche, Kiefer, Pappel) eingesetzt. Durch die Kombination der Hölzer sowie insbesondere durch die gezielte Ausrichtung der einzelnen Furnierlagen können sehr leichte und stabile Bauteile realisiert werden.

Holz kann bezogen auf sein spezifisches Gewicht sehr hohe Lasten ertragen und ist als nachwachsender Rohstoff nahezu beliebig verfügbar. Aus diesen Gründen wird Holz oft im Bauwesen und in der Luftfahrt eingesetzt [Krö02].

Die CO<sub>2</sub>- und Energiebilanz von Holz und holzhaltigen Werkstoffen ist unübertroffen. Diese sind im Vergleich zu Metallen und Kunststoffen, deren Bilanzen extrem negativ sind, sehr gut. Für die Herstellung von Stahl wird zwanzigmal mehr Primärenergie (10.000 kWh/t), für die Herstellung von Aluminium sogar fünfzig- bis hundertmal mehr Energie benötigt als für die Herstellung von Sperrholz (500 kWh/t). [Die12, Nie06]

Der Fahrzeugleichtbau wird im Wesentlichen von wirtschaftlichen und ökologischen Rahmenbedingungen bestimmt. Im Gegensatz zum Flugzeug stellt der Leichtbau für Fahrzeuge einen Teilaspekt dar, der nur unter bestimmten wirtschaftlichen Randbedingungen Akzeptanz findet. Sind in der Luft- und Raumfahrt vorrangig das Nutzlastverhältnis und herrschende Gewichtsbeschränkungen der Grund für extreme Leichtbaukonstruktionen, so ist dies im Fahrzeugbau oft die durch Leichtbau erreichbare Ersparnis beim Treibstoffverbrauch. So wird der Leichtbau nicht primär aus technischen Vorteilen, sondern aus Kostengründen und Gründen der Nachhaltigkeit betrieben [See02].

Die Wahl des Werkstoffs wird maßgeblich durch die Konstruktionsweise bestimmt, so lässt sich die herkömmliche Schalenbauweise im Rohbau fast nur auf den Werkstoff Stahl anwenden. Die Space-Frame-Technologie wiederum ist für Aluminium am besten geeignet. Der modulare Aufbau von Karosserien bedingt durch die Handhabung der Module und der damit verbundenen Eigensteifigkeit den Einsatz von komplex geformten Guss- und Sandwichbauteilen. Die Mischbauweise als optimale Lösung funktioniert nur im Rahmen von Baugruppenstrukturen. Innerhalb einer Baugruppe ist aufgrund der Probleme hinsichtlich Wärmeausdehnung, Korrosion und Recycling eine Mischung der Materialien ungünstig [See02].

Die zunehmende Differenzierung und Individualisierung von neuen Fahrzeugkonzepten erfordert auch neue werkstoff- und fūgetechnische Lōsungen. Insbesondere die Mischbauweise,

die durch einen konsequenten Werkstoffmix in der Karosseriestruktur gekennzeichnet ist, stellt hohe Anforderungen an die Fügetechnik [Mes03, Goe05]. Außer den bekannten Werkstoffen wie Aluminium, Magnesium und faserverstärkten Werkstoffen werden in Zukunft Verbundwerkstoffe aufgrund ihres Leichtbaupotenzials und ihrer konstruktiven Vorteile verstärkt eingesetzt. In den vergangenen Jahren wurden speziell im Bereich der Verbunde aus Metallschaum und massivmetallischer Deckschicht erhebliche Entwicklungssprünge in Richtung Fertigungs- und Kosteneffizienz erzielt [See02]. Allerdings sind aktuelle Herstellungstechnologien nicht in der Lage, eine gleichmäßige Porengröße und Porenverteilung der Schaummittellagen zu gewährleisten.

Bisher kaum berücksichtigt wurden eine werkstoffgerechte Mischbauweise und entsprechende Werkstoffverbünde aus holzhaltigen und metallischen Werkstoffen. Holzbasierte MMS für eine Fahrzeugmischbauweise erfüllen in idealer Weise die Forderungen nach Leichtbau bei hoher Steifigkeit, guter Verfügbarkeit und niedrigen Herstellkosten sowie einer ausgeprägten Nachhaltigkeit.

An verschiedenen Stellen im Auto wurden und werden bereits Holz und Holzwerkstoffe eingesetzt. Bereits in den 30er Jahren des letzten Jahrhunderts stellte die Fa. Blomberger Holzindustrie Schichtholz für den Einsatz in Holzbau-Autobussen her. Aus dieser Zeit stammt auch der Markenname für das Schichtholzprodukt „Delignit“. Die Busse wurden unter anderem bei Henschel & Sohn in Kassel gefertigt. Einzelnen Anwendungen von Holzwerkstoffen stehen hierbei einer Vielzahl von Holzfaseranwendungen und Anwendungen von Holzpulver in Kaschierungen und als Füllstoffe für polymere Matrices gegenüber.

Ein weiterer aktueller Einsatz von Holz ist z.B. die Anwendung als Verbundwerkstoff in Ladeböden für Kraft- und Nutzfahrzeuge.

Trotz der hier aufgeführten Anwendungen von Holz(faser-)werkstoffen im Automobilbau, werden strukturelle Baugruppen in Fahrzeugen derzeit nicht als MMS aus Holz bzw. Holzwerkstoffen hergestellt.

### **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Das Verbundthema „Holzformteile als Multi-Materialsysteme für den Einsatz im Fahrzeug-Rohbau“ wurde auf Basis von 4 Teilprojekten interdisziplinär bearbeitet.

Das Konsortium setzte sich wie folgt zusammen:

- Universität Kassel, Fachgebiet Trennende und Fügende Fertigungsverfahren, Kassel  
Teilvorhaben: Integration von holzbasierten Multimaterialsystemen in Fahrzeugstrukturen durch geeignete Fügetechnologien und in Rohbaufertigungen durch geeignete Prozessketten
- Ingenieurbüro sachs engineering GmbH, Engen-Welschingen  
Teilvorhaben: Auslegung von Fahrzeugstrukturen mit holzbasierten Multimaterialsystemen

- Fraunhofer Institut für Holzforschung WKI, Braunschweig  
Teilvorhaben: Simulationsgeeignete Kennwertermittlung und Eigenschaftsbestimmung holzbasierter Multimaterialsysteme
- Fritz Becker KG, Brakel  
Teilvorhaben: Identifikation und Ausarbeitung einer Herstellungstechnologie für 3D-Bauteile aus holzbasierten Multimaterialsystemen
- Assoziierter Partner war die Fa. Volkswagen AG, Werk Kassel in Baunatal mit der Aufgabe der Beratung hinsichtlich der Fragen der industriellen Umsetzbarkeit

Daneben wurde ein intensiver Dialog mit externen Partnern geführt, welche sich aktiv in das Projekt eingebracht haben. Für das Teilprojekt der Universität Kassel waren dies insbesondere Partner aus der Klebstoffindustrie.

## II. Ergebnisse

### II.1 Erzielte Ergebnisse

#### II.1.1 Identifikation von Bauteilgeometrien und Demonstratorgeometrie

Eine der grundlegenden Aufgaben des Gesamtprojektes war die Identifikation und Auswahl von automobilen Bauteilen, bei denen eine Werkstoffsubstitution von Stahl hin zu Holz möglich und im Sinne der Werkstoff- und Gebrauchseigenschaften sinnvoll ist. Die zu benennenden Bauteile sollten weitergehend den Untersuchungen zu Grunde liegen und als Demonstratoren geeignet sein. Diese Auswahl war auf Basis fehlender Informationen für isolierte automobiler Bauteile, sowie nicht vorhandenem Wissen bezüglich der technischen Eignung von Formholz, nicht trivial zu treffen. Über verschiedene Iterationsschleifen konnten mittels ersten Werkstofffeinschätzungen und Expertenerfahrung aus den Bereichen Automobilbau, Formholzherstellung, Verbundmaterialforschung und Werkzeugbau zwei automobiler Geometrien benannt werden.

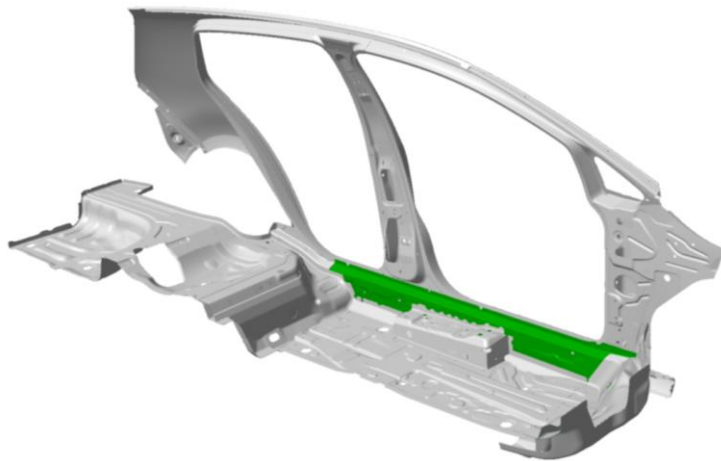


Abbildung 1: Schweller-Geometrie eines Mittelklasse-PKW [Quelle: Volkswagen AG].

Abbildung 1 zeigt die Schweller-Geometrie eines Mittelklasse-PKW. Aus dieser Geometrie konnte ein 400mm langer Abschnitt freigeschnitten werden, welcher annäherungsweise die Geometrie eines  $\Omega$ -Profils darstellt. Um eine Umsetzung des Bauteilabschnitts aus Formholz erreichen zu können, wurde die in Abbildung 2 dargestellte werkstoffgerecht angepasste Variante generiert. Hierbei wurden im Wesentlichen die Radien so angepasst, dass diese durch Furnierholzwerkstoffe abbildbar sind.

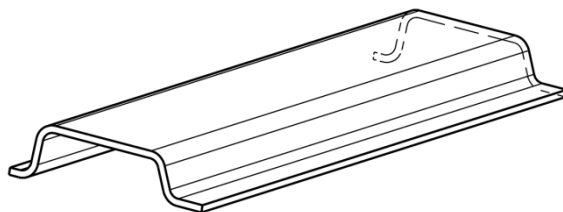


Abbildung 2: Schematische Darstellung der für Holz angepassten Variante des Schwellerabschnitts

Dieses Teilbauteil konnte im folgenden Projektverlauf als automobilnahes Bauteil auf Basis von Formholz substituiert werden und diente als Probegeometrie um komplexes Bauteilverhalten abzubilden und erste Kennwerte zu generieren.

Abbildung 3 zeigt den Seitenaufprallträger eines Mittelklasse-PKW innerhalb der Fahrer- bzw. Beifahrertür.



**Abbildung 3: Seitenaufprallträger eines Mittelklasse-PKW [Quelle: Volkswagen AG].**

Dieser wurde als Geometrie für den finalen Funktions-Demonstrator zu Grunde gelegt, um die Projektergebnisse abschließend in einem Bauteil zu konsolidieren.

Die beiden Geometrien/Bauteile wurden im Konsens aller Projektpartner als diejenigen Bauteile ausgewählt, welche sich mit den Projektzielen decken, den höchsten Grad an Umsetzbarkeit aufweisen und im weiteren Projektverlauf Gegenstand der Forschungsbemühungen sein sollten.

Durch die Benennung der Bauteile konnte das erste Arbeitspaket erfolgreich abgeschlossen werden.

Zusätzliche Ergebnisse/ Vorteile dieses Arbeitspaketes waren die Schärfung aller Beteiligten für die einzelnen technologischen Herausforderungen des Projektes sowie der Aufbau eines gegenseitigen Verständnisses in Bezug auf Branche, Technologie, Werkstoffe und Produktionsabläufe.

## ***II.1.2 Kennwertermittlung und Klebstoffauswahl***

### ***II.1.2.1 Kennwertermittlung***

Eine Auswahl von automobilen Bauteilen sowie die Erstellung von Materialmodellen (Teilprojekt sachs engineering GmbH) war nur auf Basis von weiteren Werkstoffinformationen möglich. Das Fehlen von relevanten/verwertbaren Formholzkennwerten machte somit bereits für die Identifikation geeigneter Baugruppen Kennwertermittlungen notwendig. Gemeinsam mit dem Fraunhofer WKI wurden unterschiedliche Versuchsserien zur Werkstoffcharakterisierung durchgeführt.

Somit wurde über den Projektverlauf hinweg eine Vielzahl an Versuchsserien geplant, hergestellt und geprüft. Grundlegende Prüfungen waren Zugprüfung, 3-Punkt-Biegeprüfung und Druckprüfung.



**Abbildung 4: Prüfaufbau; links: 3-Punkt-Biegeprüfung in Anlehnung an DIN EN 310; rechts: Zugprüfung in Anlehnung an DIN 52377**

Abbildung 4 zeigt die für das Projekt zentralen Prüfkfigurationen. Alle Prüfkörper, Prüfungen und Kennwertauswertungen in den verschiedenen Arbeitsbereichen wurden in Anlehnung an die Prüfungen DIN EN 310 (Biegung) bzw. DIN 52377 (Zug) erstellt und durchgeführt.

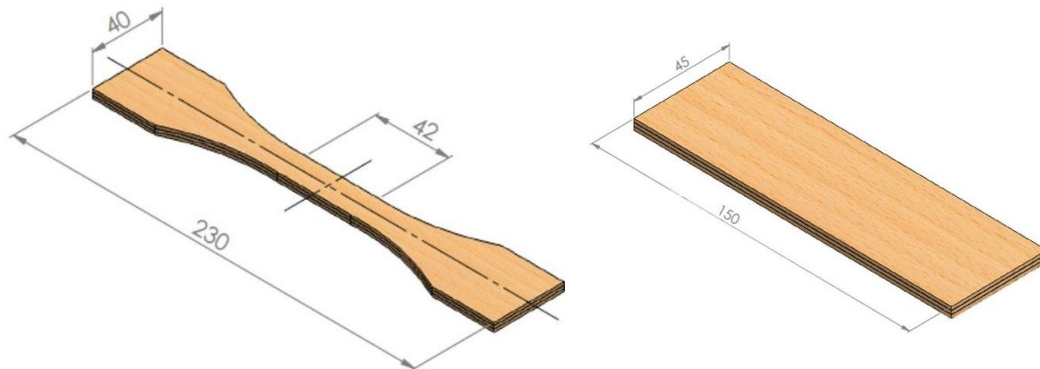
Das Verfahren zur Bestimmung des Zugelastizitätsmoduls sowie der Zugfestigkeit von Sperrhölzern wird innerhalb der DIN 52377 festgelegt. Der wesentliche Prüfablauf besteht hierbei aus der Belastung einer Probe durch eine Zugmaschine bis zum Bruch sowie der anschließenden Berechnung des Zugelastizitätsmoduls und der Zugfestigkeit auf Basis verschiedener Parameter bzw. Versuchsdaten. Hinsichtlich der verwendeten Zugproben ergeben sich einige normative Anforderungen. Zur Vermeidung eines Bruches innerhalb des Einspannbereiches, müssen die Proben im mittleren Probenbereich einen verminderten Querschnitt aufweisen. Der Übergang von der vollen Probenbreite auf den verminderten Querschnitt sollte weiterhin allmählich erfolgen, um eine potenzielle Spannungskonzentration zu vermeiden. Im Hinblick auf den zugelassenen Feuchtigkeitsgehalt des Sperrholzes sind die Proben vor der Prüfung unter dem nach DIN 50014 definierten Normklima (Temperatur:  $20 \pm 1$  °C; relative Luftfeuchtigkeit:  $65 \pm 3$  %) bis zur Gewichtskonstanz zu lagern. Die Gewichtskonstanz ist erreicht, wenn sich zwei, im Abstand von 24 Stunden, aufeinanderfolgende Messungen in ihrem Ergebnis nicht mehr als 0,1 % der Probenmasse voneinander unterscheiden [DIN52377].

Das Verfahren zur Ermittlung des Biegeelastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit von Holzwerkstoffen wird in der Norm DIN EN 310 definiert. Der wesentliche Prüfablauf besteht hierbei aus der mittigen Belastung eines auf zwei Punkten gelagerten Probenkörpers sowie der anschließenden Berechnung des Biegeelastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit auf Basis ver-



schiedener Parameter bzw. Versuchsdaten. Aufgrund der Kombination einer Scher- und Biegebelastung handelt es sich dabei allerdings nicht um den wahren, sondern um den scheinbaren Biegeelastizitätsmodul [DIN EN 310].

Abbildung 5 zeigt die im Rahmen des Projekts eingesetzten grundlegenden Prüfkörpergeometrien. Links die Geometrie für Zugprüfungen in Anlehnung an die DIN 52377 und rechts die Geometrie für 3-Punkt Biegeprüfungen in Anlehnung an DIN EN 310.

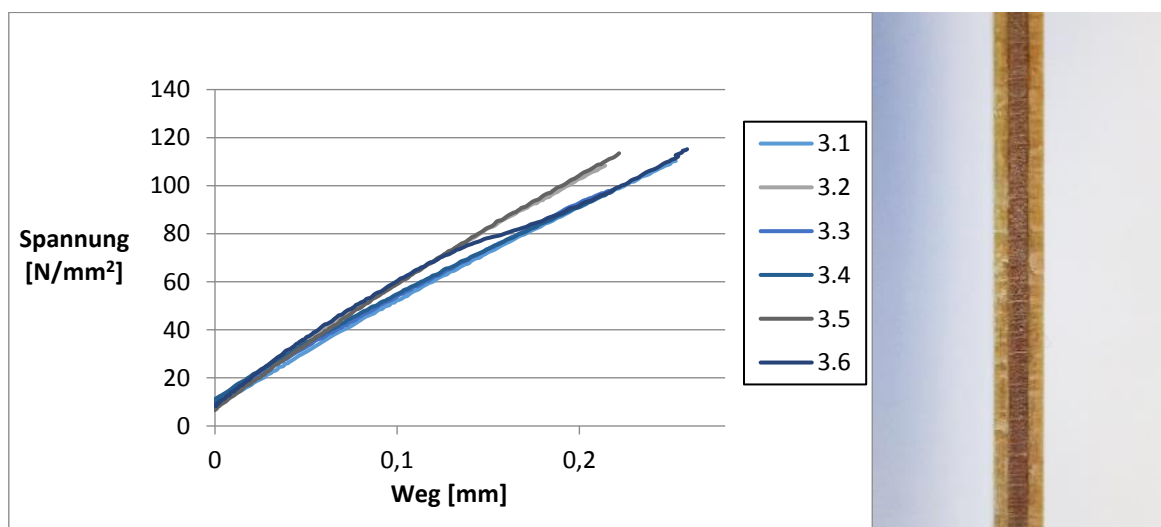


**Abbildung 5: Im Rahmen des Projekts eingesetzte grundsätzliche Probengeometrien**

Die Verbundaufbauten für grundlegende Charakterisierungen variierten in:

- Furnierlagen-Anzahl
- Furnierlagen-Stärke
- Furnierlagen-Orientierung
- Klebstoff
- Nicht-Holz-Verstärkungsschichten an unterschiedlichen Positionen

Abbildung 6 zeigt exemplarisch das Serienergebnis einer Zugprüfung in Anlehnung an DIN 52377 eines 3-lagigen Furnierholzverbunds. Die Furniere hatten eine Dicke von jeweils 1,5 mm, die beiden äußeren Furniere waren längs zur Zugrichtung und die mittlere Lage quer zur Zugrichtung orientiert. Gefügt wurde der Verbund durch ein Harnstoff-Formaldehyd Klebstoffsystem.



**Abbildung 6: Ergebnisse einer Zugprüfung eines 3-lagigen Furnierholzverbunds**

### II.1.2.2 Klebstoffauswahl

Wesentlicher Parameter der furnierholzbasierten Verbunde bzw. der holzbasierten Multimaterialsysteme ist der eingesetzte Klebstoff. Ebenso ist die Klebstoffauswahl für die Integration von Anbindungselementen, Lasteinleitungsstrukturen sowie Verstärkungslagen essentiell. Da mögliche Strukturelemente vorzugsweise metallbasiert sind, mussten Klebstoffe identifiziert werden, welche einen strukturellen Verbund von Holz und Metall realisieren können.

Angelehnt an die DIN EN 1465 wurden verschiedene Versuchsreihen mit traditionellen/konventionellen Holzklebstoffen sowie industriellen Klebstoffen aus dem Nicht-Holz-Bereich durchgeführt. Dazu wurden Zugscherproben aus Buchenholz-Schäl furnier sowie unlegiertem Stahl (DC04), Edelstahl (1.4404) sowie Aluminium (98%) hergestellt und deren Zugscherfestigkeiten ermittelt.

Bevor quantitative Untersuchungen begonnen wurden, musste zunächst geprüft werden, inwieweit in diesem Fall die bei Zugscherproben typische Substratverformung und die damit einhergehenden Schälbelastungseinflüsse auf Grund von Randspannungsspitzen auftreten. Hierfür wurden „Y-Proben“ mit einer zwischen zwei Holzsubstraten eingeklebten Stahlproben angefertigt. Die Ergebnisse der Vorversuche zeigten, dass die Scherzugfestigkeiten der einfachen und doppelten Proben, vor dem Hintergrund der üblichen Streuung, im gleichen Bereich liegen. Es war somit im vorliegenden Probenszenario nicht von einem Einfluss/ Festigkeitsverlust durch Randspannungsspitzen auszugehen. Für die weiteren Untersuchungen wurde daher der einfachere und reproduzierbarere Probenaufbau gewählt.

Die Prozessparameter zur Herstellung der Proben wurde entsprechend der Parameter für den späteren Formholzpressprozess gewählt (siehe Abschnitt II.1.3).

Abbildung 7 zeigt das Serienergebnis von geklebten Holz-Stahl Proben in Anlehnung an DIN EN 1465. Die Klebstoffeingrenzung erfolgte auf Basis von Herstellerberatung, Technischen Datenblättern und Erfahrungswissen.

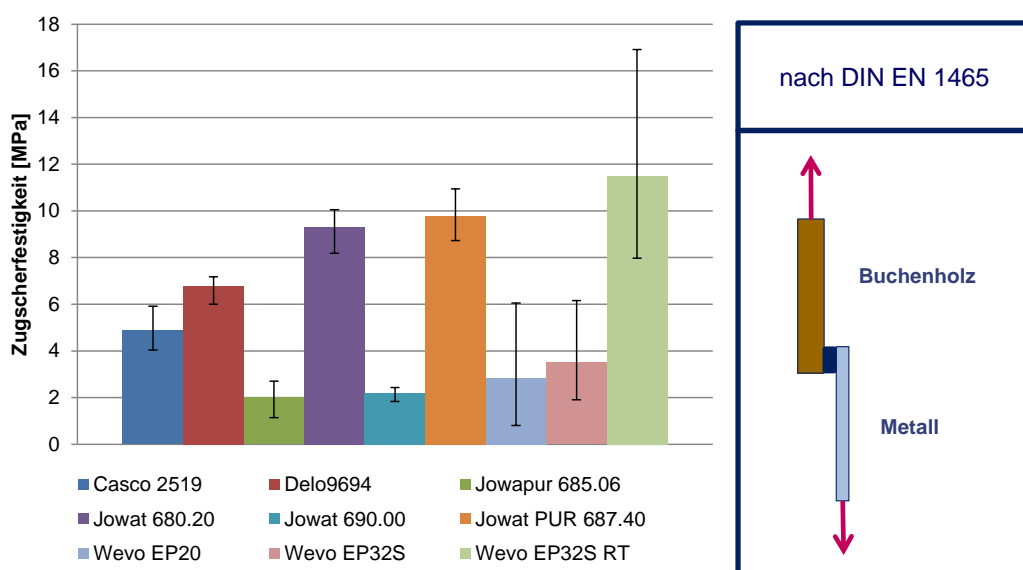
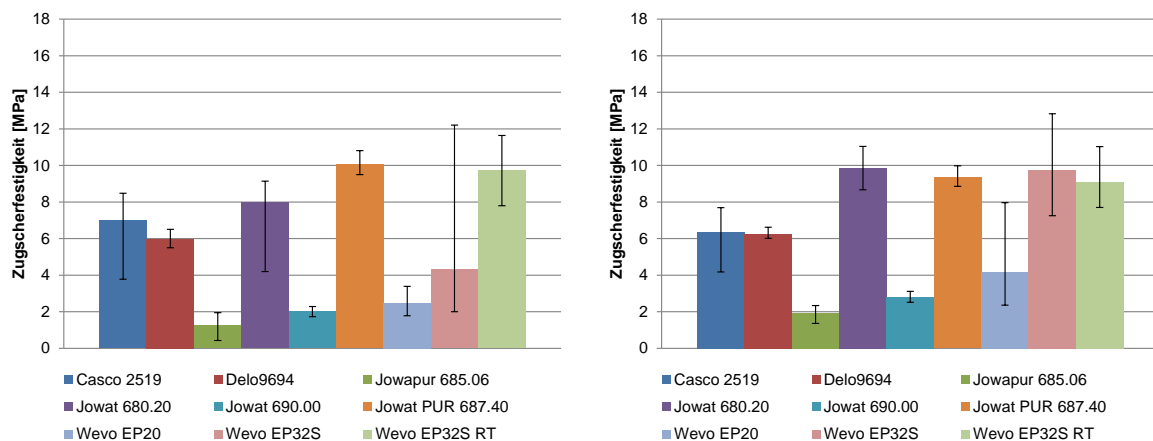


Abbildung 7: Zugscherfestigkeit nach DIN EN 1465 geklebter Holz-Stahl (DC04) Proben.

Abbildung 8 zeigt das Serienergebnis von geklebten Holz-Edelstahl und Holz-Aluminium Proben in Anlehnung an DIN EN 1465.



**Abbildung 8: Zugscherfestigkeit nach DIN EN 1465; links: Holz-Edelstahl (1.4404); rechts: Holz-Aluminium.**

Die Ergebnisse der Zugscherproben zeigen, dass klassische Klebstoffe aus dem Bereich der reinen Holzverklebungen für die Integration von Anbindungselementen aus Metall nicht zwangsläufig ideal sind. Klebstoffe auf Polyurethan- und Epoxidharzbasis hingegen sind für beide Fügepartner geeignet. So konnten Fügepartnebrüche in der Grenzschicht (einzelne Fasern) auf der Holzseite und Adhäsivbruchanteile auf der Metallseite erreicht werden.

Auf Basis dieser Ergebnisse und der Prämissen der Verarbeitbarkeit sowie der Heizpressprozesseignung wurden für den weiteren Projektverlauf schwerpunktmäßig die Klebstoffe Casco 2519 (Harnstoff-Formaldehyd), Delo 9694 (2K-Epoxidharz) sowie Jowapur 680.20 (1K-Polyurethan) gewählt. Systeme wie z.B. Wevo EP32S zeigten rein klebtechnisch gesehen eine sehr gute Eignung, waren aber für den Einsatz mit den angestrebten Pressprozessparametern nicht optimal geeignet, was der Vergleich des Systems bei Formpressprozessstemperaturhärtung und Raumtemperaturhärtung (RT) zeigt.

Einerseits konnte durch die Auswahl eine vertretbare Vielfalt an Klebstoffsystemen (chemische Basis) erreicht werden, andererseits wurde durch die Weiternutzung des beim Projektpartner Becker KG verwendeten Casco 2519 der für Standardprodukte eingesetzte Klebstoff weiter mitbetrachtet.

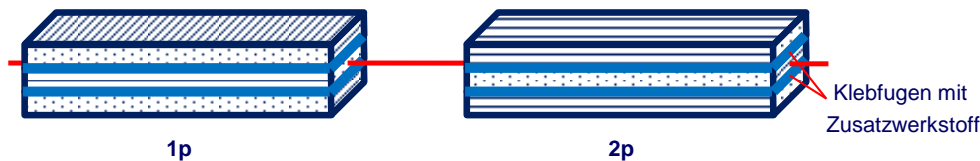
### **II.1.3 Verstärktes Formholz/ holzbasierte MMS**

Kern der materialtechnischen Forschung war die Erweiterung von klassischem Formholz zu holzbasierten Multimaterialsystemen. Wesentlicher Ansatz war dabei, zusätzliche Verstärkungsmaterialien zwischen den noch nicht verpressten Holzfurnierblättern zu platzieren und diesen Verbund im klassischen Formholzpressprozess zu verbinden und zu formen. Wissenschaftlich-technische Motivation war die Belastungsart- und anwendungsorientierte Ertüchtigung von Formholz, die Steigerung der absoluten Festigkeit und des E-Moduls, die Individualisierung hinsichtlich Art der Belastung sowie Richtung und Betrag der Kraft. Eine weitere Er-

tüchtigung hinsichtlich Energieaufnahme und Bruchverhalten sowie die Nutzung von Synergieeffekten bei der Kombination von Werkstoffen und eine erweiterte Kompensation der Orthotropie.

Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen des Projekts verschiedene Studien zum Themenkomplex holzbasierte Multimaterialsysteme durchgeführt. In diesem Bericht sind die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst.

Die grundlegenden Proben bestanden aus Buchenholz-Schäl furnier in verschiedenen Orientierungen ( $0/90^\circ$ ), pressprozessgeeigneten Klebstoffen sowie (technischen) Verstärkungsmaterialien. Der Prinzipaufbau erfolgte entsprechend Abbildung 9.



**Abbildung 9: Prinzipaufbau einfacher verstärkter Holzproben. Links: 1p-Variante = 1 Furnierlage faserparallel zur Probenlängsachse; 2p-Variante = 2 Furnierlagen faserparallel zur Probenlängsachse**

Über dieses Prinzip wurden, über die in Abschnitt II.1.2.1 beschriebenen Prüfungen, verschiedenste Materialkombinationen hergestellt und charakterisiert. Die wichtigsten Kombinationen waren Holz furnier kombiniert mit

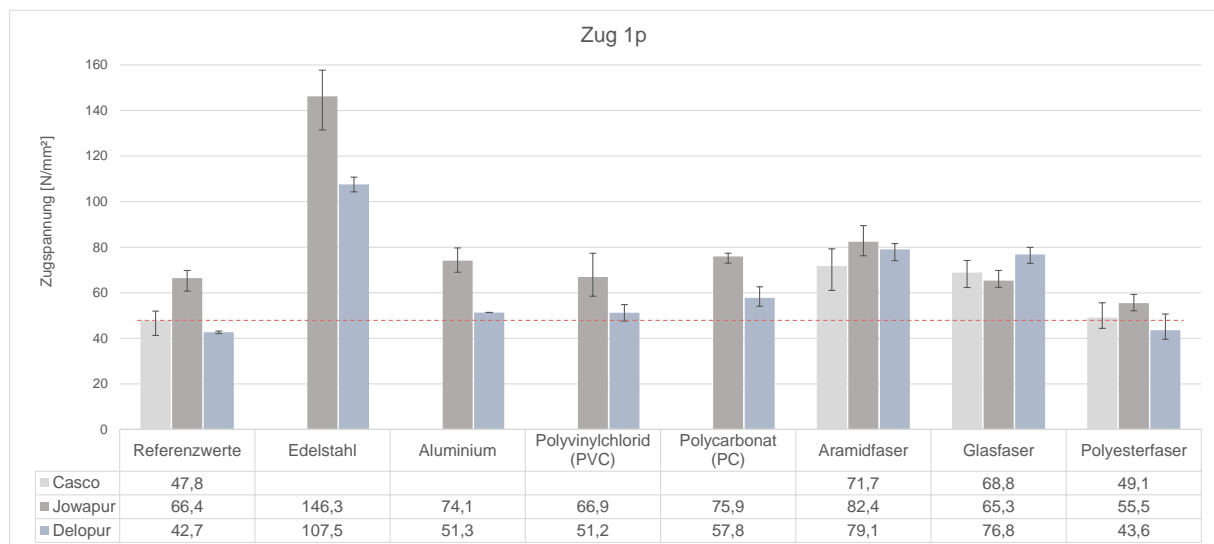
- Textilien:
  - Glasfasergewebe  
2/2 Körperbindung, 121 tex, 170 g/m<sup>2</sup>
  - Aramidfasergewebe  
2/2 Körperbindung, 68 tex, 194 g/m<sup>2</sup>
  - Polyesterfasergewebe  
1/1 Leinwandbindung, 110 tex, 190 g/m<sup>2</sup>
- Metallfolien:
  - Edelstahl  
Dicke 0,1 mm, Werkstoff 1.4404
  - Aluminium  
Dicke 0,3 mm, 98% Aluminiumanteil
- Polymerfolien:
  - PVC-Folie  
Dicke 0,3 mm, Dichte 1,29 g/cm<sup>2</sup>, Reißdehnung 270%, Reißfestigkeit 32N/mm<sup>2</sup>
  - PP  
Dicke 0,3 mm, Dichte 1,2 g/cm<sup>2</sup>, Reißdehnung 100%, Reißfestigkeit 66N/mm<sup>2</sup>

Das Verfahren zur Herstellung der holzbasierten Multimaterialsysteme stellte sich wie folgt dar: Das System besteht grundsätzlich aus drei 1,5 mm starken Buchen furnierholzblättern mit zwei zusätzlichen Lagen Verstärkungswerkstoff. Bei den entsprechenden Referenzproben entfielen die Verstärkungswerkstoffe. Die Verbundlagen wurden mit verschiedenen Klebstoffen gefügt. Hergestellt wurden Platten, aus denen jeweils 3 Probenkörper gefräst wurden. Die Prozessparameter für die Herstellung waren analog zur Prozessgestaltung der Fa. Becker KG:

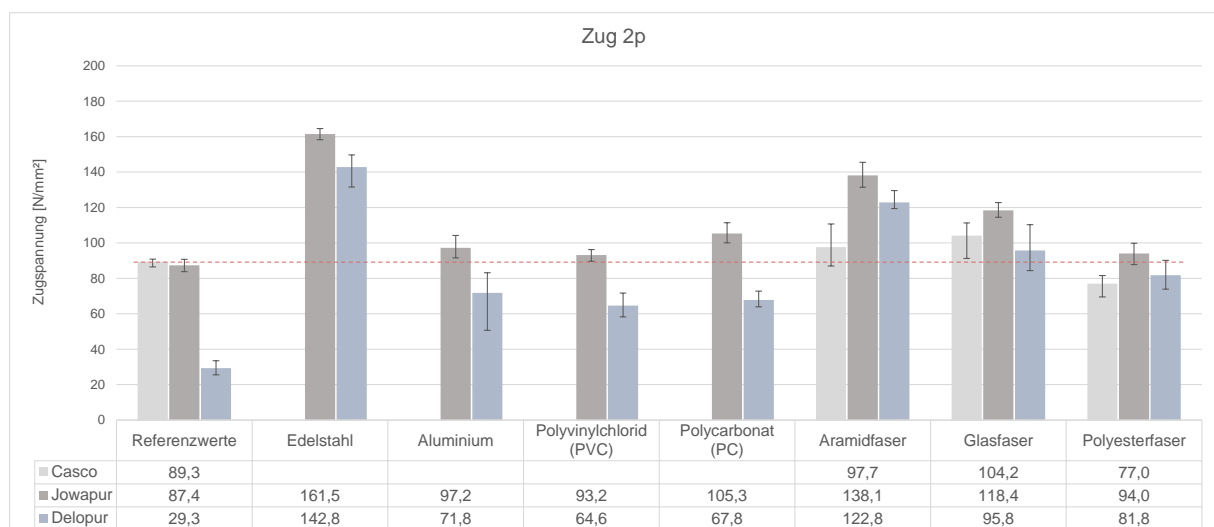
- Klebstoffmenge pro Klebfuge: 200 g/m<sup>2</sup> (einseitiger Handauftrag mittels Rakel)
- Presstemperatur: 100°C
- Pressdruck: 200 N/cm<sup>2</sup>
- Pressdauer: 10 Minuten

Die so erstellten Prüfkörper in 1p- und 2p-Orientierung wurden jeweils durch Zug- und 3-Punkt-Biegeprüfungen charakterisiert:

Abbildung 10 und Abbildung 11 zeigen die Gesamtübersichten zur Festigkeitsuntersuchung der wichtigsten holzbasierten Multimaterialsystem-Varianten für jeweils den 1p- und 2p-Aufbau unter Zugbelastung. Dargestellt sind die durchschnittlichen Festigkeitswerte je Serie sowie die Streuung in Form der Spannweite. Die Referenzwerte beziehen sich auf unverstärkte Probenkörper. Die durch den, von der Fa. Becker standardmäßig verwendeten, 2K-Harnstoff-Formaldehyd-Leim Casco 2519 gefügte Referenz diente im Projekt als grundlegende Referenz für ein ‚klassisches‘ Furniersperrholz.

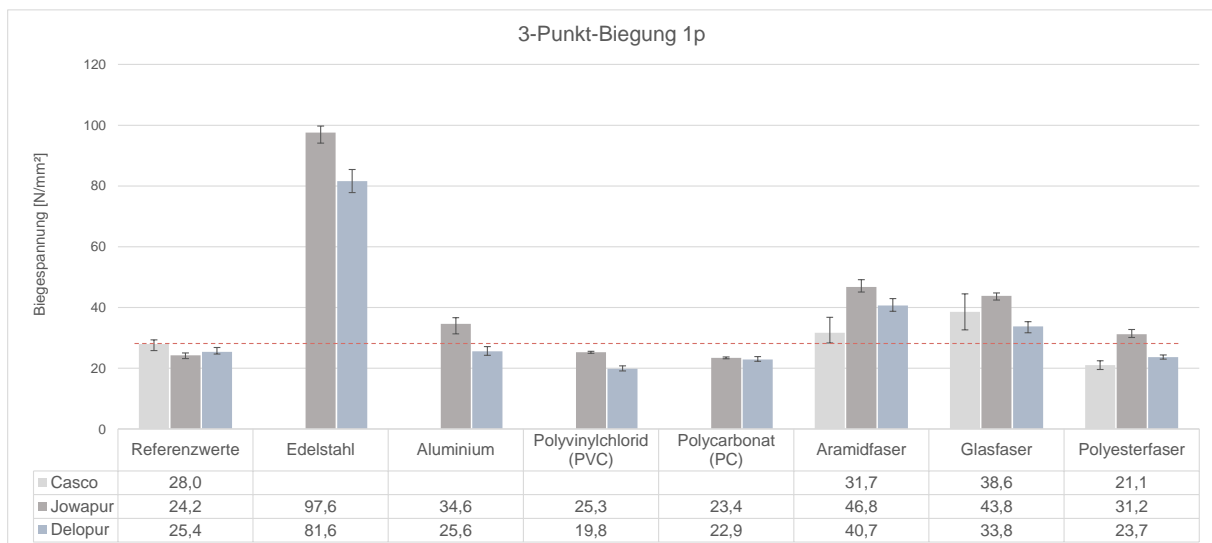


**Abbildung 10: Ergebnisse Festigkeitsuntersuchung Zug 1p-Aufbau**

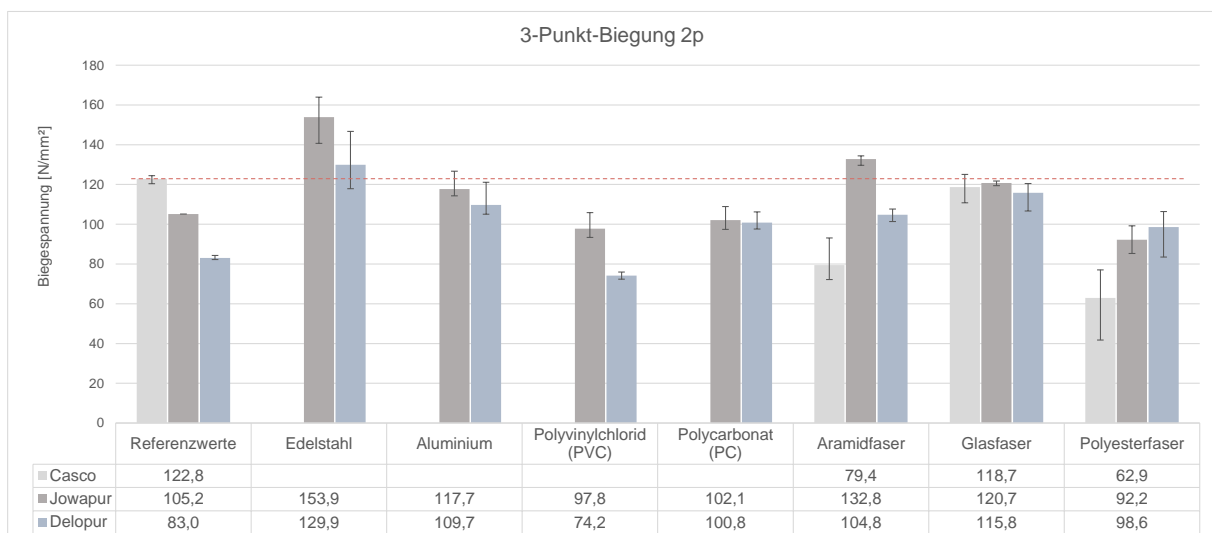


**Abbildung 11: Ergebnisse Festigkeitsuntersuchung Zug 2p-Aufbau**

Abbildung 12 und Abbildung 13 zeigen analog die Gesamtübersichten zur Festigkeitsuntersuchung der wichtigsten holzbasierten Multimaterialsystem-Varianten für jeweils den 1p- und 2p-Aufbau unter 3-Punkt-Biegebelastung.

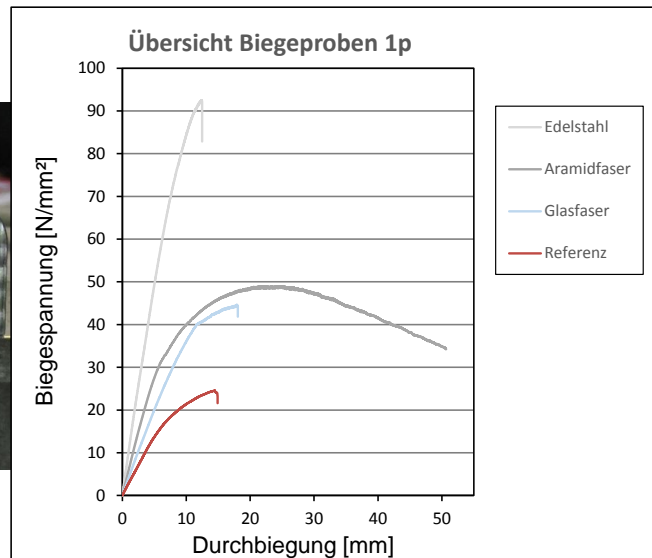
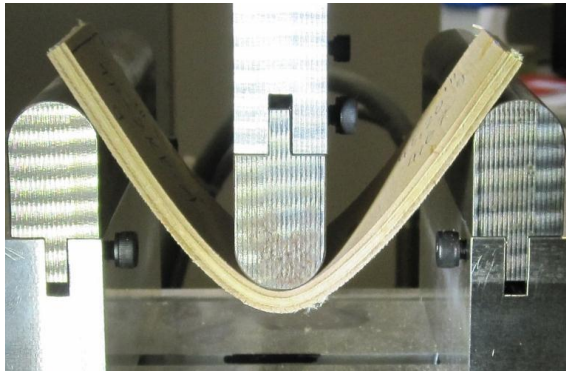


**Abbildung 12: Ergebnisse Festigkeitsuntersuchung 3-Punkt-Biegung 1p-Aufbau**



**Abbildung 13: Ergebnisse Festigkeitsuntersuchung 3-Punkt-Biegung 2p-Aufbau**

Die Ergebnisse hinsichtlich der Festigkeit der unterschiedlichen Systeme im Vergleich zu den Referenzproben ohne Verstärkungswerkstoff zeigen, dass der Untersuchungsansatz der verstärkten Formhölzer grundsätzlich sehr gut geeignet ist, um klassische Furnierholzwerkstoffe zu verstärken. Je nach Material- und Klebstofftyp kann mittels des gleichen Herstellprozesses ein signifikant verändertes Material erstellt werden. In Verbindung mit den exemplarisch dargestellten Erkenntnissen aus Abbildung 14, welche weitere Effekte einer Multimaterialverstärkung über eine 3-Punkt-Biegebelastung verdeutlicht, dass die Nutzung zusätzlicher technischer Materialien im Verbund, nicht nur Änderungen der Festigkeit zur Folge hat.



**Abbildung 14: Effekte bei MMS: Links: Aramidverstärkte Probe in einer 3-Punkt-Biegeprüfung. Rechts: Vergleich von verschiedenen 1p-Proben.**

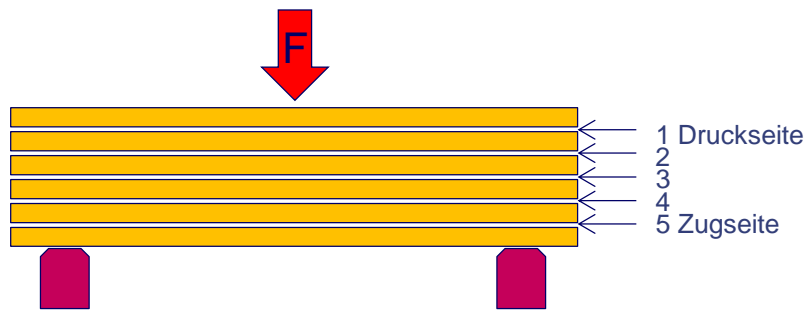
Neben der Änderung/Ertüchtigung der mechanischen Kennwerte (Festigkeit, E-Modul, Bruchverhalten), kann durch den Einsatz von zusätzlichen Werkstoffen eine anwendungsgerechte Beeinflussung der Bruchdynamik erfolgen. Dies wird beispielhaft durch den Biegespannungsverlauf der edelstahl- und aramidverstärkten Probe deutlich. Im Fall der edelstahlverstärkten Variante ist neben einer hohen Festigkeitssteigerung auch eine signifikante Erhöhung des E-Moduls möglich. Gleichzeitig verringert sich die Durchbiegefähigkeit; der Bruch erfolgt schlagartig. Hingegen zeigt die aramidverstärkte Probe neben der Erhöhung von Festigkeit und E-Modul (in geringerem Maße) eine hohe Durchbiegefähigkeit ohne finales Versagen und damit eine hohe Durchbruchssicherheit, welche insbesondere im Crashfall besonders wichtig ist

Zusätzlich konnte die Möglichkeit einer Kompensation bzw. bewussten Förderung des natürlichen anisotropen Verhaltens von Holzwerkstoffen gezeigt werden.

Die quantitativ und qualitativ besten Ergebnisse konnten mit Aramid, Glasfaser und Edelstahl erreicht werden. Darüber hinaus konnte jedoch auch das Potenzial von Verbunden mit Naturvliesen/ „Öko-Materialien“ nachgewiesen werden. Die Vorteilhaftigkeit der Verbundmodifikation richtet sich sehr stark nach Verstärkungsart und Belastungsart/-richtung sowie entsprechend der eingesetzten Klebstoffsysteme.

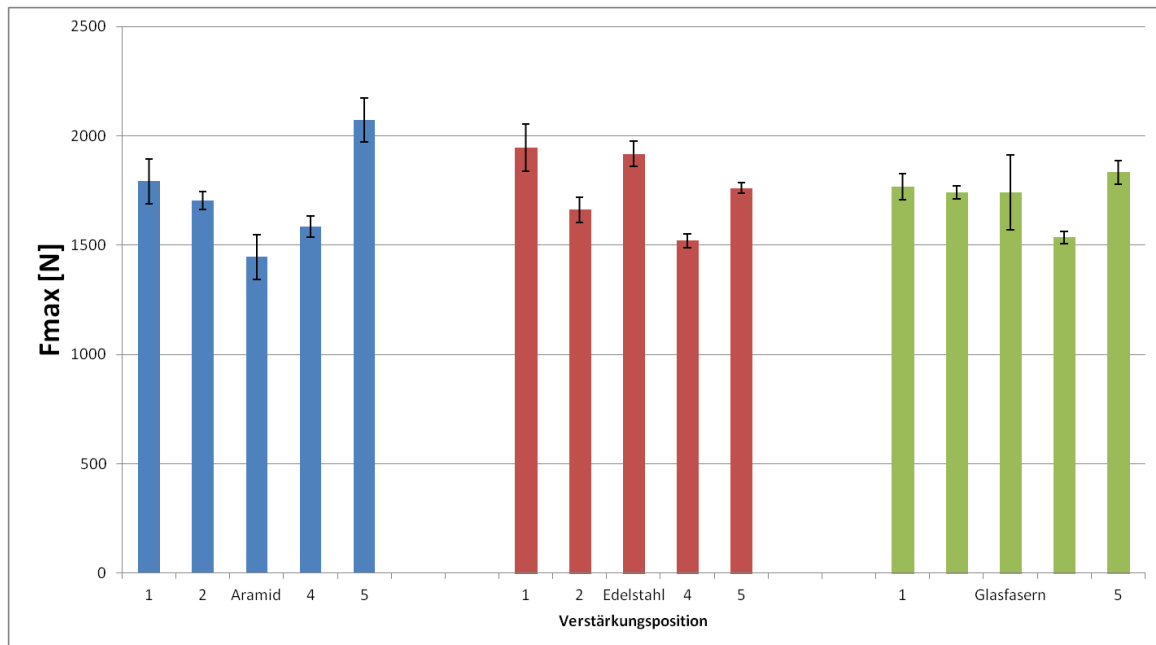
Basierend auf den dargestellten Untersuchungsergebnissen und mit Blick auf den Demonstrator „Seitenaufprallträger“, wurden weitere Untersuchungen durchgeführt, bei denen einerseits der Einsatz der Verstärkungsschichten an unterschiedlichen Positionen des Verbunds untersucht wurden und weiterhin verschiedene Verstärkungsmaterialien in einem Verbund kombiniert wurden. Der Fokus sollte dabei auf der gezielten Einstellbarkeit der Materialeigenschaften des Systems liegen. Durch die unterschiedlichen Eigenschaften verschiedener Verstärkungsmaterialien sollte das Holz-Verbundsystem spezialisiert werden, wodurch eine Individualisierbarkeit des Systems erreicht werden kann.

Bei analogem Herstellprozess, wurde das Verbundsystem auf sechs Schichten Buchenfurnier (entspricht 5 Klebfugen zur Zusatzmaterialeinbringung) und bis zu maximal fünf Verstärkungsschichten erweitert (siehe Abbildung 15) und über die 3-Punkt-Biegeprüfung charakterisiert.



**Abbildung 15: Schematische Darstellung des Prüfkörpers für die Untersuchungen zur belastungsabhängigen Verstärkung.**

Abbildung 16 zeigt die Ergebnisse von Probekörpern, die jeweils mit einer Verstärkungslage ertüchtigt wurden; die Position der Lage wurde über alle Möglichkeiten variiert. Auf der X-Achse ist die jeweilige Verstärkungsposition entsprechend Abbildung 15 aufgetragen; bei "1" handelt es sich um die Druckseite des Prüfkörpers, der mittlere Balken beschreibt die neutrale Faser und bei Position "5" handelt es sich um die Zugseite. Auf der Y-Achse wird die durchschnittliche maximale Bruchkraft dargestellt.

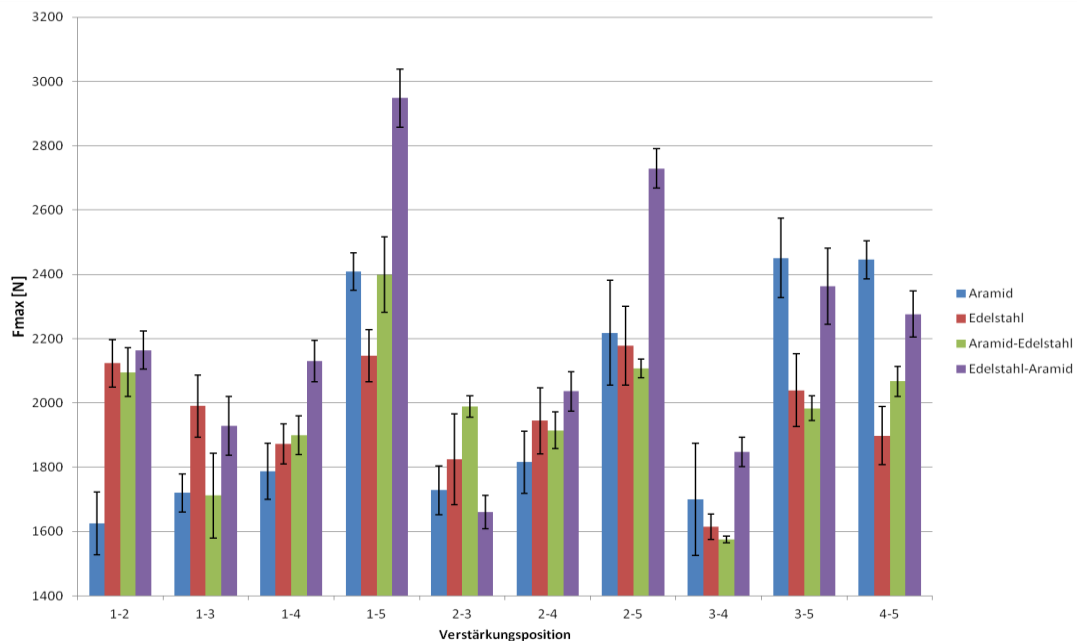


**Abbildung 16: Durchschnittliche Bruchkraft der Probenserien mit jeweils einer Verstärkungslage.**

Es ist ersichtlich, dass Aramid an Position fünf mit 2072 N die höchste Bruchkraft liefert. Für Edelstahl als Verstärkungswerkstoff liegt die höchste Bruchkraft, mit 1946 N, an Position eins. Die Bruchkraft an Position drei ist mit 1917 N nur minimal geringer. Bei den Prüfkörpern mit Glasfaserverstärkung wurde die höchste Kraft wiederum an Position 5 gemessen. Diese lag bei 1832 N. Die Ergebnisse zeigen, bestätigen die Hypothese, dass die Verortung unterschiedlicher Verstärkungswerkstoffe einen signifikanten Einfluss auf das Verbundverhalten hat und somit die Möglichkeit einer individuellen bzw. auf den Belastungsfall zielgerichteten Verstärkung besteht.



Ausgehend von diesen Ergebnissen, wurden in der nächsten Versuchsphase jeweils zwei Verstärkungslagen eingesetzt und deren Positionen variiert. Ebenso wurden die zuvor als vorteilhaft eingestuftene Werkstoffe Aramid und Edelstahl nun kombiniert. Abbildung 17 zeigt die Ergebnisse.



**Abbildung 17: Bruchkraft bei zwei Lagen Verstärkungsmaterial**

Bei den Prüfkörpern mit zwei Lagen wurden die höchsten Bruchkräfte erreicht, wenn die Verstärkungsposition fünf besetzt wurde. Sehr auffällig ist dies bei einer Verstärkung mit zwei Lagen Aramid (blau). Dort sind die vier Versuchsreihen mit Position fünf immer mindestens circa 400 N höher als die restlichen Versuchsreihen. Die insgesamt höchste gemessene Bruchkraft wurde von der Werkstoffkombination Edelstahl - Aramid (lila; Reihenfolge entscheidend) an der Verstärkungsposition eins - fünf erreicht. Die Messung ergab eine Bruchkraft von 2948 N. An dieser Position sind beide Lagen Verstärkungsmaterial an der äußersten Stelle und können somit die höchste Verstärkungsleistung erzielen. Gleichzeitig erfahren die beiden Werkstoffe jeweils die Belastung für die sie am besten verstärken. Die Edelstahlfolie befindet sich im Bereich der Druckbelastung und die Aramidfasern werden auf Zug belastet. Betrachtet man die Mittelwerte der vier verschiedenen Werkstoffkombinationen sticht Edelstahl - Aramid hervor. Diese Kombination erreichte im Mittel circa 220 N höhere Ergebnisse als die anderen Kombinationen. Somit sind die Ergebnisse von Edelstahl - Aramid mehr als 10% höher als die der anderen Verstärkungskombinationen. Betrachtet man die Übersicht aller Ergebnisse, ist zu sehen, dass die geringsten Werte an Position drei - vier erreicht worden sind. Die dort erreichte Bruchkraft war mit durchschnittlich 1684 N ungefähr 800 N geringer als die Bruchkraft an der besten Position eins - fünf.

Durch diese Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass bei einer Erhöhung der Anzahl der Schichten, von einer Lage Verstärkungsmaterial auf zwei, die Bruchkraft um 11% - 13% steigt. Kombiniert man allerdings die beiden Verstärkungswerkstoffe und positioniert die Werk-

stoffe an die Stellen wo sie eine maximale Verstärkungsleistung zeigen, steigen die Ergebnisse trotz gleicher Lagenanzahl im Mittel nochmals um circa 11%. Diese optimierte Kombination aus Edelstahlfolie auf der Druckseite des Prüfkörpers und Aramidfasern auf der Zugseite konnte mit Abstand die höchsten Bruchkräfte erreichen. Die Ergebnisse dieser Werkstoffkombination lagen im Maximum gut 20% über den Ergebnissen der anderen Werkstoffkombinationen mit zwei Lagen Verstärkungsmaterial.

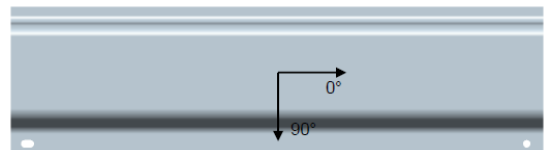
Diese Untersuchungen waren materialtechnischer Ausgangspunkt für die Erstellung des Demonstrators, welche in Abschnitt II.1.10 beschrieben ist

Abschließend sei erwähnt, dass sich durch die sehr große Parametervielfalt hinsichtlich Aufbau des Materialsystems zukünftig ein vielfältiges Forschungspotenzial ergibt, um weitere Anwendungen individualisiert umsetzen zu können.

### II.1.4 Bauteilprüfung Schwellergeometrie/ $\Omega$ -Profil

Zur Ermittlung erster Bauteilkennwerte sowie zur Charakterisierung der Multimaterialansätze in 3D-Geometrien, wurden Prüfungen an Proben im oben beschriebenen  $\Omega$ -Profil-Design durchgeführt. Hierzu wurden unterschiedliche Verbunde definiert und hergestellt:

- Variante A: 3 Lagen [0/90/0] $^{\circ}$
- Variante B: 6 Lagen [0/90/0/0/90/0] $^{\circ}$
- Variante C: 8 Lagen [90/0/0/90/90/0/0/90] $^{\circ}$
- Variante D: 9 Lagen [0/90/0/0/90/0/0/90/0] $^{\circ}$



Die Multimaterialansätze basierten auf der „Variante D“, welche in den entsprechenden Verbunden durch jeweils 2 zusätzliche Lagen, Aramid, Edelstahl (1.4404) oder Cottonit (Vulkanfiber) an jeweils dritter Position von außen ertüchtigt wurden. Parallel zu den holzbasierten Prüfkörpern wurden Abschnitte des Originalbauteils (Pressformgehärteter Stahl) geprüft, um einen Vergleich hinsichtlich der Leistungsfähigkeit im 1:1-Vergleich zu erlangen.

Prüfungen waren Biegeprüfungen längs zur Bauteillängsachse sowie Torsionsprüfungen.

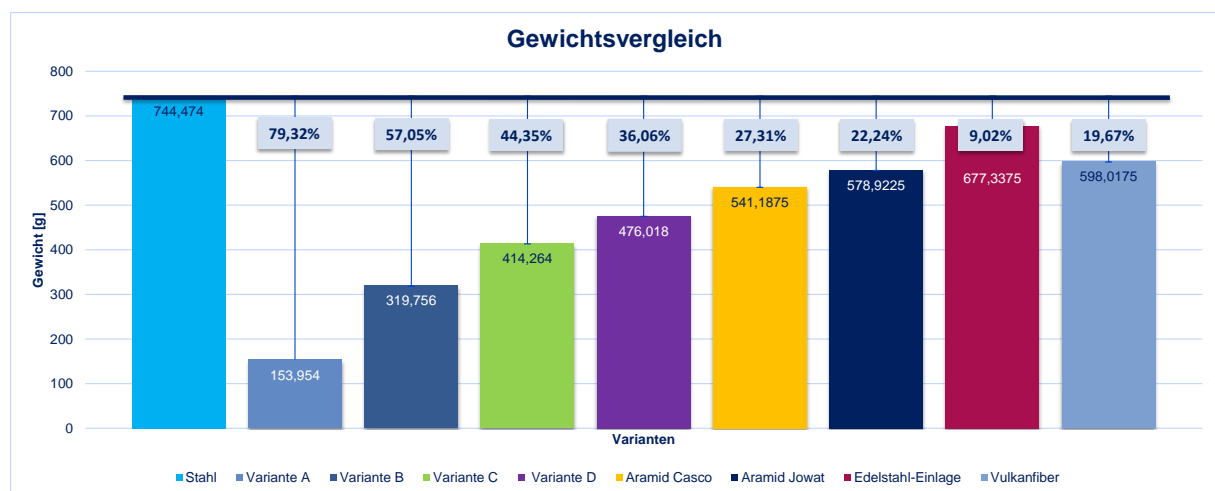


Abbildung 18: Gewichtvergleich der unterschiedlichen Verbunde in Referenz zum Stahlbauteil

Abbildung 18 zeigt den Gewichtsvergleich der unterschiedlichen Verbunde in Referenz zum Stahlbauteil. In der vorliegenden Versuchsserie konnten alle holzbasierten Varianten ein geringeres Gewicht aufweisen.

Die Biegeprüfung wurde mittels eines balkenförmigen Stempels mit Radius 10 mm an 130 mm langen Abschnitten des  $\Omega$ -Profils durchgeführt. Zusätzlich zur Aufnahme von Kraft und Weg in Krafrichtung, wurde mittels einer eigens konstruierten Vorrichtung (siehe Abbildung 19) die Deformation der Prüfkörper in y-Richtung gemessen.

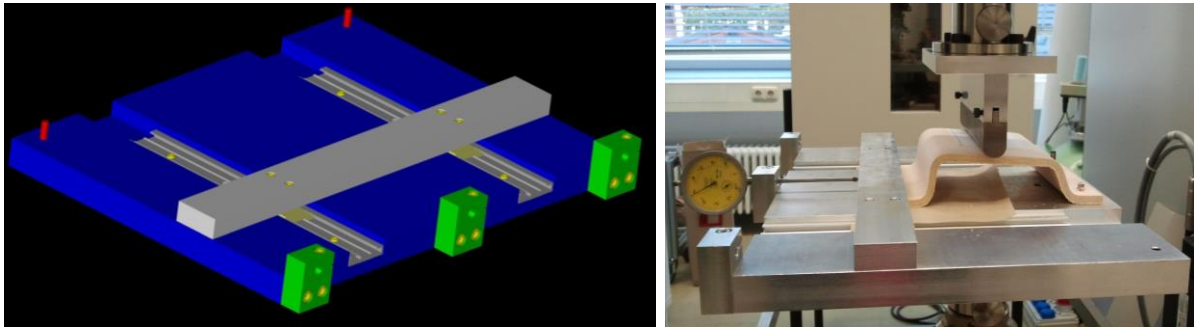


Abbildung 19: Vorrichtung zur Deformationsmessung während der Biegeprüfung

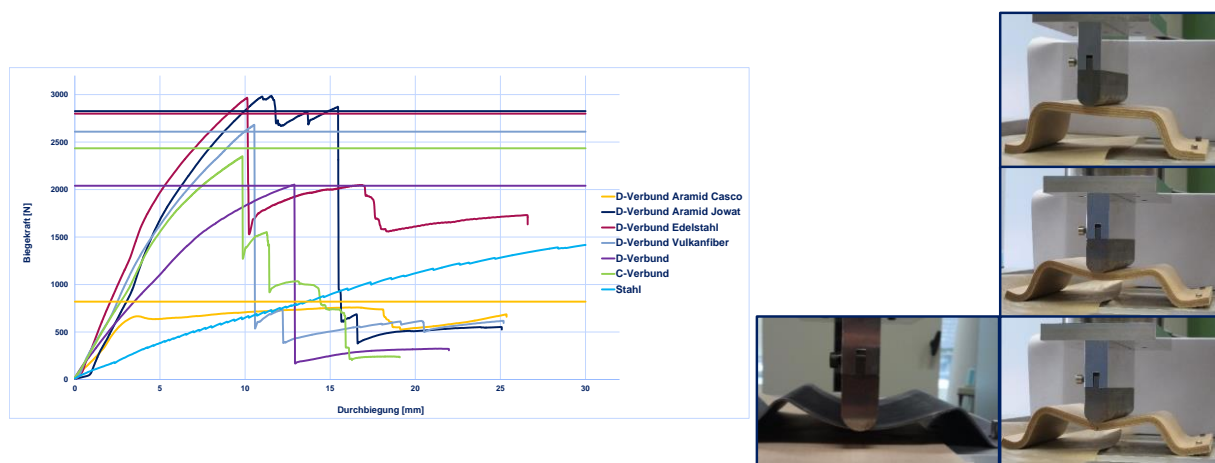
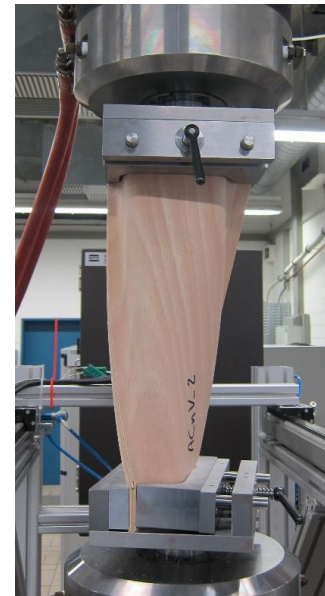
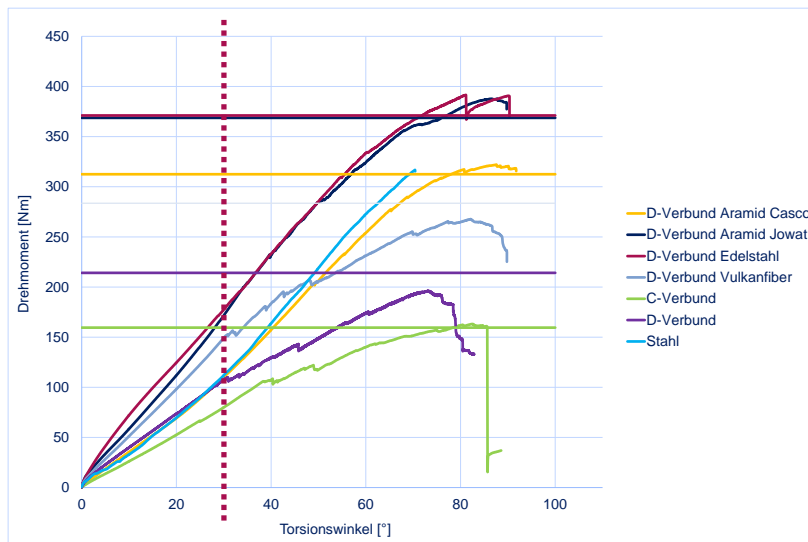


Abbildung 20: Biegeprüfung längs an 130 mm langen  $\Omega$ -Profil-Geometrien

Abbildung 20 zeigt das Bauteilverhalten von einzelnen repräsentativen Stahl- und Holzbauteilen während der Biegeprüfung. Erkenntnisse dieser Prüfung, neben der Ermittlung von Kennwerten für die FEM-Simulation, waren die Potenzialermittlung hinsichtlich Steigerung von Biege widerstand und E-Moduln durch MMS-Aufbau, die Verifikation über das grundlegend unterschiedliche Materialverhalten bei gleichen geometrischen Ansätzen (Bruch der Holzformteile, plastische Verformung und Deformation des Stahlprofils) sowie die Aussage, dass eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse möglich ist.

Weiterhin wurden die Bauteile (400 mm Abschnitte) unter Torsionsbelastung charakterisiert. Hierfür wurde eigens eine Spannvorrichtung konstruiert (siehe Abbildung 21 rechts), welche über die entsprechende Bauteilgeometrie die Kraft gleichmäßig in die Bauteile einleitet.



**Abbildung 21: Torsionsprüfung an 400 mm langen  $\Omega$ -Profil-Geometrien**

Abbildung 21 zeigt das Bauteilverhalten von einzelnen repräsentativen Stahl- und Holzbauteilen während der Torsionsprüfung. Erkenntnisse dieser Prüfung, neben der Ermittlung von Kennwerten für die FEM-Simulation, waren ebenfalls die Potenzialermittlung hinsichtlich Steigerung von Torsionssteifigkeit durch MMS-Aufbau, die Verifikation über das grundlegend unterschiedliche Materialverhalten bei gleichen geometrischen Ansätzen (Bruch der Holzformteile erst bei realitätsferner Verwindung, plastische Verformung und Deformation des Stahlprofils) sowie die Aussage, dass auch in dieser Belastungssituation eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse möglich ist.

Ziel dieser bewusst 1:1-vergleichenden Prüfung war das Aufzeigen einer grundsätzlichen Konkurrenzfähigkeit der Holzverbunde, die Erlangung von Erfahrungen hinsichtlich Werkzeug, Bauteil, Verformungsverhalten und Produktionsprozess sowie das Sammeln wesentlicher Kennwerte für das Simulationsmodell.



**Abbildung 22: Aramidverstärkte Profile nach Torsionsbelastung bis 90° Torsionswinkel**

Es kann weiterhin geschlussfolgert werden, dass die Umsetzung des Multimaterialansatzes in 3D-Geometrien, eine individualisierte Eigenschaftseinstellung bei Bauteilen ermöglicht. Neben einer Festigkeitssteigerung sowie der Erhöhung der Steifigkeit, ist durch gezielten Aufbau des

Verbunds das Bruch- sowie plastische und elastische Deformationsverhalten steuerbar. Insbesondere während der Torsionsbelastung zeigten die verstärkten Holzprofile neben einer hohen Steifigkeit (siehe Abbildung 21) eine bemerkenswerte Durchbruchsisicherheit auch bei hohen Torsionswinkeln sowie ein hohes plastisches Rückstellvermögen (siehe Abbildung 22).

### **II.1.5 Reparatur- und Recyclingkonzepte**

Um einen möglichst ganzheitlichen Ansatz für den Einsatz von holzbasierten Bauteilen im Automobil erstellen zu können, war es Ziel, dass auch erste Konzepte für Reparatur und Recycling vorgelegt werden.

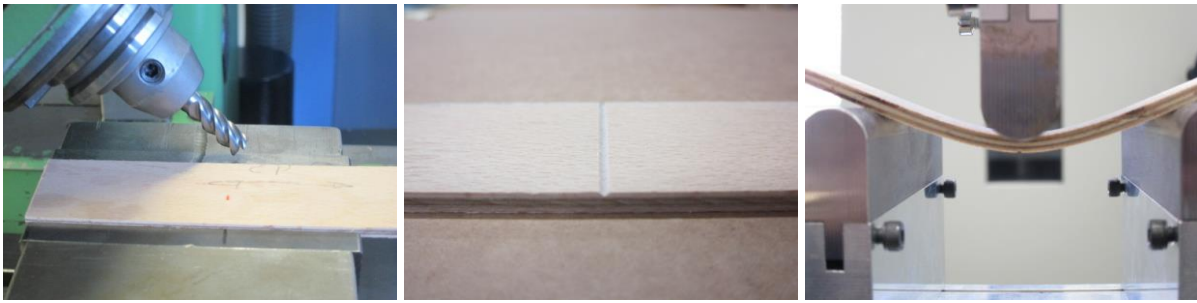
#### **II.1.5.1 Reparaturkonzepte**

Im Bereich der Reparaturlösungen konnten über Anlehnungen an Verfahren aus dem Bereich FVK erste praktikable Reparaturmethoden für verschiedene typische Schädigungsbilder erarbeitet werden.

Untersucht wurden 3+2-lagige holzbasierte Multimaterialaufbauten als 1p- und 2p-Varianten wie in Abschnitt II.1.3 beschrieben. Als Verstärkungsmaterialien wurden Edelstahl, Aramid- und Glasfasergewebe gewählt. Entsprechend der Versuchsmethodik wurden jeweils ein Teil der Verbundserien definiert geschädigt und die jeweils anderen Proben als Referenz unbeschädigt belassen. Die geschädigten Proben wurden anschließend mittels verschiedener Varianten repariert und abschließend analog zu den Referenzproben in einer 3-Punkt-Biegung geprüft und charakterisiert.

Die Schädigungen (siehe Abbildung 23 bis Abbildung 25) der MMS-Probekörper erfolgte definiert durch:

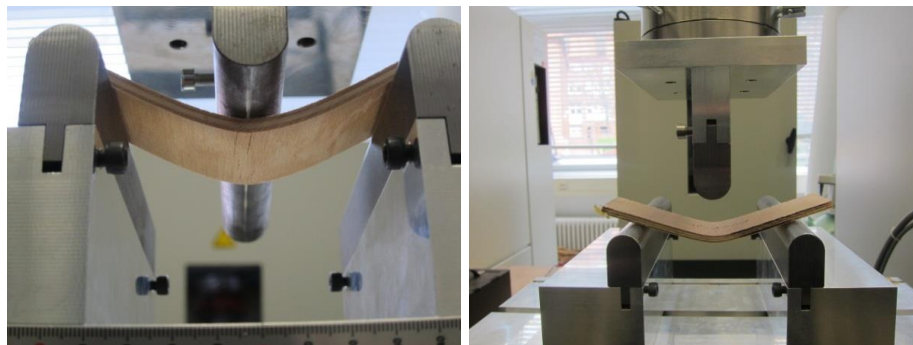
- Kerbung, Anlehnung an Charpy-Kerbschlagversuch nach DIN EN ISO 179-1
  - V-förmiger Kerbgrund für hohe Spannungsspitzen
  - Kerbtiefe 7/10 mm
- Durchstoß, Anlehnung an instrumentierten Schlagversuch nach ISO 6603-2 (‘Puncture impact test’)
  - Dorn-Durchmesser 5 mm
  - Bis zu 2,5% flächiger Schädigung der Proben und ca. 50% der Gesamtbreiten
- Anbrechen ohne Totalversagen
- Definierte Schwächung: Bestimmung des Durchbiege-Weges anhand der Referenzproben (1p/ 2p)
  - Metall: 11 mm/ 4,8 mm
  - Glasfaserfaser: 18 mm/ 5 mm
  - Aramidfaser: 20 mm/ 4,5 mm



**Abbildung 23: Schädigungsvariante Kerbung**



**Abbildung 24: Schädigungsvariante Punktierung**



**Abbildung 25: Schädigungsvariante definierter Anbruch**

Die Reparatur (siehe Abbildung 26 bis Abbildung 28) der geschädigten Proben erfolgte durch

- Einlagigen Patch
  - Nutzung der jeweiligen Verstärkungslagen und des jeweiligen Klebstoffs
  - Verpressen (Parameter der Verbundherstellung)
- Zweilagigen Patch
  - Nutzung der jeweiligen Verstärkungslagen sowie einer weiteren Furnierlage und des jeweiligen Klebstoffs
  - Verpressen (Parameter der Verbundherstellung)
- Verfüllung durch Klebstoff (Umsetzung nur bei Punktierung und Kerbung möglich)
  - Nutzung des jeweiligen Klebstoffs
  - Verpressen (Parameter der Verbundherstellung)



Abbildung 26: Reparatur durch einlagige Patches: Punktierung durch Glasfasergewebe (links), Kerbung durch Glasfasergewebe (Mitte) und Anbruch durch Edelstahlfolie (rechts)



Abbildung 27: Reparatur durch zweilagigen Patch, hier Anbruch durch Aramidgewebe und Zusatzfurnier

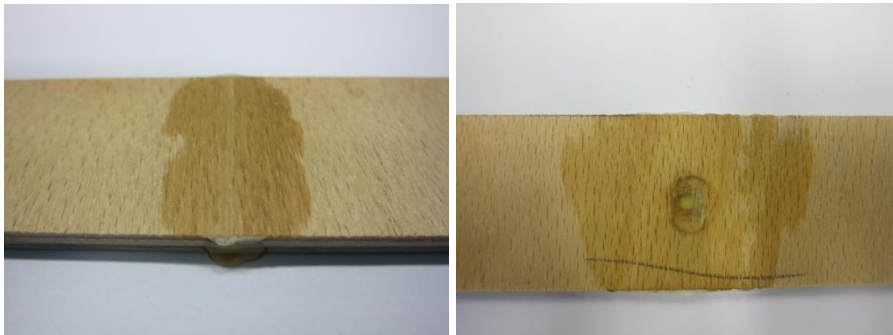


Abbildung 28: Reparatur durch Klebstofffüllung: Kerbung (links) und Punktierung (rechts)

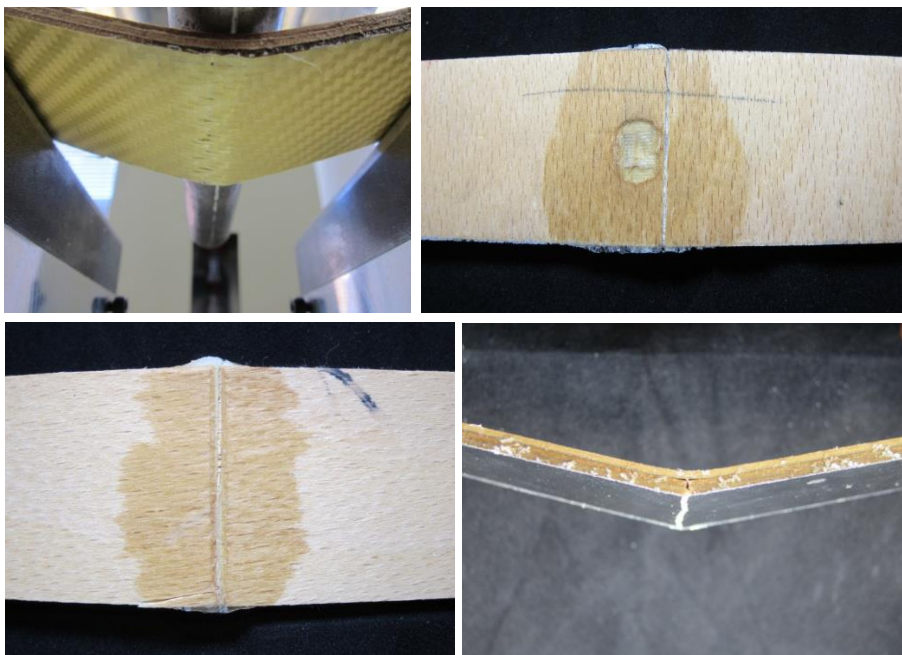


Abbildung 29: Reparierte Proben nach der 3-Punkt-Biegeprüfung

Abbildung 29 zeigt exemplarisch verschiedene Versagensbilder der reparierten Proben nach der abschließenden Prüfung. Qualitativ können insbesondere folgende Aussagen getroffen werden.

Hinsichtlich der Kerbung weist der einlagige Patch (EP) bei 1p-orientierten MMS die besten Ergebnisse auf, auch wenn bei den Edelstahl-MMS ein wesentlich schlechterer Wert zu sehen ist. Die Klebstoffverfüllung erweist sich als sehr gute Alternative; auch wenn sie keine deutlichen Steigerungen erzielt, so stellt sie die geforderte ursprüngliche Ausgangs-Performance wieder her. Auch der doppelte Patch (DP) bringt zufriedenstellende Ergebnisse im 1p-Bereich hervor. Im 2p-Bereich kann der DP durch seine Verstärkungseigenschaften hervorstechen. Der EP und die Verfüllung erzielen deutlich schlechtere Ergebnisse. Im 2p-Bereich können somit keine eindeutigen Aussagen über ein Allzweck-Reparaturverfahren getroffen werden. Hier muss eine Entscheidung nach dem Material getroffen werden. Im 1p-Bereich geht die Tendenz hin zum Verfüllen und der Verwendung des einlagigen Patches.

Bei der Reparatur der Punktierung wird ebenfalls deutlich, dass die Edelstahlfolie sehr schwer zu reparieren ist. Im 1p-Bereich weisen in Summe alle Varianten zufriedenstellende Ergebnisse auf, einzig der EP fällt bei den Edelstahl-MMS etwas zurück. Im 2p-Bereich kann, wie auch bei der Kerbung, keine allgemeingültige Aussage getroffen werden. Die Entscheidung für eine Reparaturvariante wird auch hier durch die Art des Verstärkungsmaterialies beeinflusst.

Eine Beurteilung der Performance-Wiederherstellung ist bei den durch definierte Biegung geschwächten MMS nur zwischen dem einfachen und doppelten Patch möglich. Auch wenn der DP bei beiden Orientierungen zufriedenstellende Ergebnisse vorweisen kann, ist bei dieser Schädigung der Fokus auf den einlagigen Patch zu legen, mit dem weitaus bessere Werte und ein ebenfalls geringerer Aufwand umgesetzt werden kann.

In Summe zeigen die Ergebnisse, dass geschädigte Proben nahezu vollständig aufbereitet werden können und dadurch analoge Festigkeitswerte zu den ungeschädigten Referenzmustern erreichen. Da die jeweils am besten geeignete Reparaturvariante signifikant von der Art der Schädigung und des Verbundaufbaus abhängt, gibt Tabelle 2 Bewertungsbeispiele und Reparaturempfehlungen für die in dieser Studie untersuchten Verbunde.



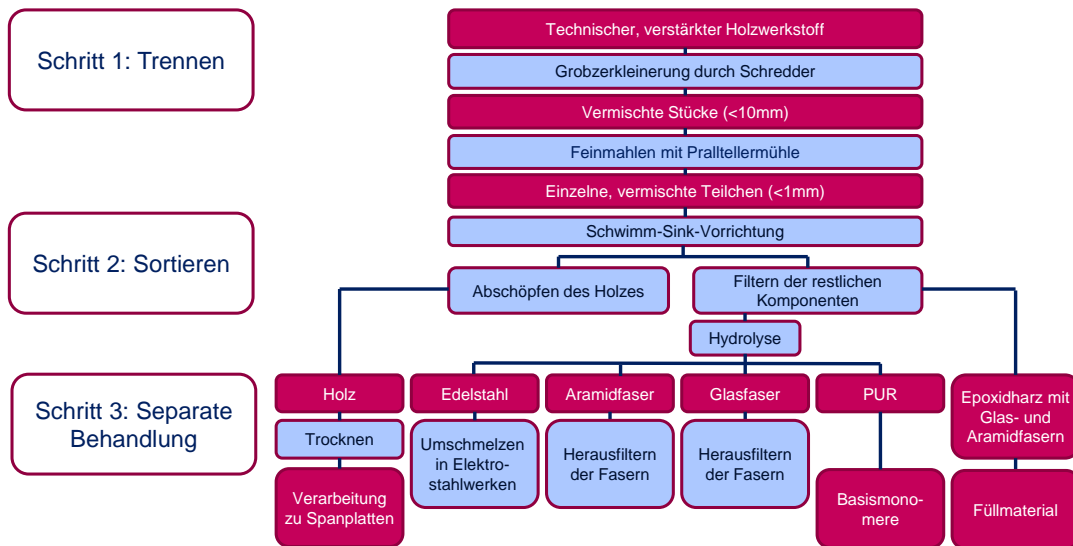
**Tabelle 2: Bewertung und Reparaturempfehlungen**

		Schädigung	Empfohlene Reparatur-Variante	Bewertung
Aramid-faser	1p	Kerbung	FS	Erhaltung der Geometrie, leichte Abweichung ggüb. Ursprungs-Performance, hohe Reproduzierbarkeit
		Punktierung	FS	Erhaltung der Geometrie, hohe Reproduzierbarkeit, positive Steigerung ggüb. UP, EP mit bestem Wert
		Def. Bruch	EP	Steigerung der P um 100%, 3-fach besser als DP
	2p	Kerbung	EP	Hohe Streuung bei Varianten, EP mit Steigerung von 15% ggüb. UP
		Punktierung	FS	Hohe Streuung bei Verfahren, FS leichter Abweichung ggüb. UP, jedoch geringerer Aufwand
		Def. Bruch	EP	Steigerung der P um 35%, 3-fach besser als DP
Glas-faser	1p	Kerbung	FS	Hohe Ergebnis-Streuung von 55%, leichte Abweichungen ggüb. UP, jedoch geringerer Aufwand als EP
		Punktierung	EP	Nur EP mit positivem Ergebnis (50%), hohe Streuung von 55% unter den Varianten
		Def. Bruch	EP	Nur EP mit positivem Ergebnis (35%), hohe Streuung von 50% unter den Varianten
	2p	Kerbung	DP	Nur negative Ergebnisse mit $\emptyset$ -28%, DP mit bestem Ergebnis
		Punktierung	FS	Nur negative Ergebnisse mit $\emptyset$ -20%, FS gleiche P wie EP, jedoch geringerer Aufwand, hohe Reprod.
		Def. Bruch	EP	Nur negative Ergebnisse mit $\emptyset$ -7%, EP mit bester Performance
Edel-stahl	1p	Kerbung	FS	Nur negative Ergebnisse mit $\emptyset$ -8%, FS nur mit leichten Abweichungen ggüb. UP*, hohe Reprod.
		Punktierung	DP	Nur geringe Abweichung ggüb. UP*, nur negative Ergebnisse mit $\emptyset$ -11%,
		Def. Bruch	EP	Signifikante Steigerung (75%) ggüb. UP*
	2p	Kerbung	DP	Einziges Verfahren mit positivem Wert und signifikanter Steigerung ggüb. UP*
		Punktierung	FS	Nur negative Werte mit $\emptyset$ -12%, FS etwas schlechter als DP, jedoch geringerer Aufwand, Hohe Reprod.
		Def. Bruch	EP	Signifikant besser als DP, geringerer Aufwand

Auf Basis dieser Ergebnisse können späteren Anwendern Konzepte bereitgestellt werden, die es in bestimmten Fällen ermöglichen, einen Komplettaustausch von holzbasierten Bauteilen zu vermeiden.

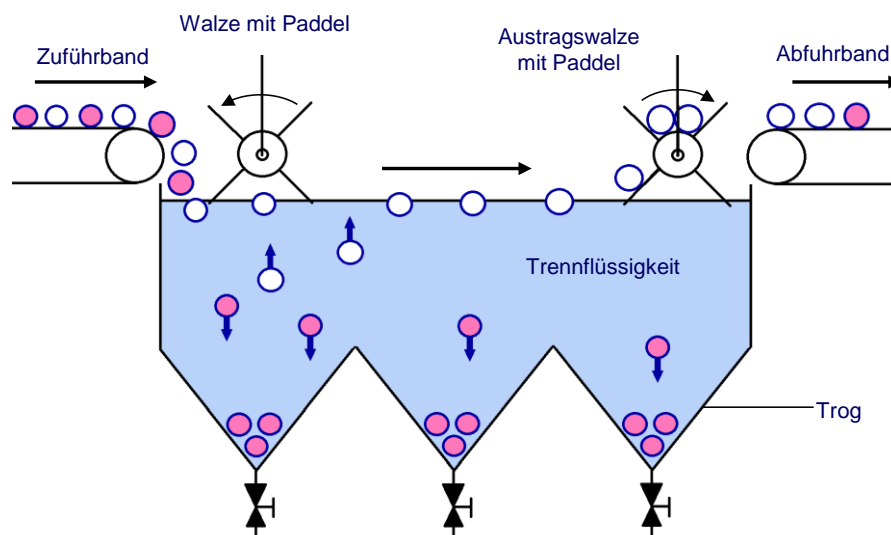
### II.1.5.2 Recyclingkonzept

Im Zuge der Erarbeitung eines Recyclingkonzepts wurde untersucht, inwieweit über eine thermische Verwertung holzbasierter MMS hinaus auch eine sortenreine Weiterverwendung umgesetzt werden kann. Erstes Ergebnis war, dass die bei technisch verstärkten Holzwerkstoffen bisher eingesetzten Materialien allesamt im Sinne der gesetzlichen und ökologischen Bedingungen recycelbar sind. Die einzelnen Werkstoffe unterscheiden sich zwar in ihren Eigenschaften und damit auch in ihren Potenzialen bei der Verwertung, jedoch kann eine Kombination aus mehreren Verfahren diese Potentiale ausschöpfen. Somit besteht das erarbeitete End of Life Konzept technisch verstärkter Holzwerkstoffe entsprechend Abbildung 30 aus drei Schritten.



**Abbildung 30: Verfahren zum Recycling von holzbasierten MMS**

Zunächst findet eine Zerkleinerung mittels Schreddern und Mühlen statt, bevor die zerkleinerten Teile in einer Schwimm-Sink-Vorrichtung sortiert werden (Abbildung 31).



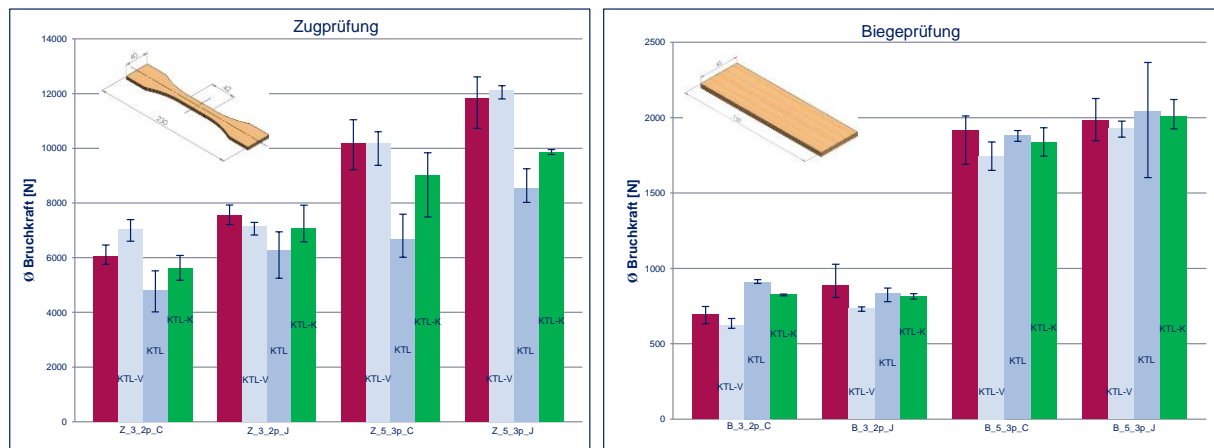
**Abbildung 31: Angepasste Schwimm-Sink-Vorrichtung zur Sortierung der im Projekt bisher eingesetzten Materialien**

Anschließend können die so getrennten Komponenten individuell behandelt werden. Für das Holz bietet sich die Verarbeitung zu Spanplatten an, Edelstahl kann zur Stahlherstellung verwendet werden, Aramid- und Glasfasern können neu verwoben und wiederverwendet werden und Polurethan kann durch Hydrolyse zur Herstellung neuer Polymere verwendet werden. Das Epoxidharz in Verbindung mit Faserresten wird aufgrund mangelnder Alternativen z.B. als Füllmaterial verwendet. Alternative Verfahren sind zum jetzigen Stand noch zu energie- und kostenintensiv.

Die Investitionskosten einer Anlage zur Umsetzung des Konzepts wären zwar verhältnismäßig hoch, bei entsprechenden Mengen amortisiert sich diese jedoch schnell durch die Rückgewinnung der Rohstoffe. Aus ökologischer Sicht bedeutet diese Kombination aus Verfahren eine geringe Belastung der Umwelt. Es wird auf thermische Prozesse verzichtet, so dass die Emissionen gering sind.

## II.1.6 KTL-Fähigkeit von Buchenholz

Ein weiterer Betrachtungsgegenstand war die Ermittlung der prinzipiellen KTL-Fähigkeit von Buchenholz bzw. buchenholzbasierenden Materialsystemen. Hierzu wurden erneut Zug- und Biegeproben zweier Verbundaufbauten (3-lagig und 5-lagig) mit jeweils zwei unterschiedlichen Klebstoffen jeweils als unbelastete Referenz, als über den KTL-Vorbehandlungsprozess belastete Variante, als über den KTL-Hauptprozess belastete Variante sowie als über den KTL-Gesamtprozess belastete Variante geprüft.



**Abbildung 32: Ergebnisse der Zug- und Biegeprüfungen an unterschiedlichen Proben innerhalb der Untersuchung zur KTL-Fähigkeit von Buchenholz**

Abbildung 32 zeigt die Ergebnisse aus Zug- und Biegeprüfungen. Die beiden linken Säulengruppen repräsentieren jeweils die 3-lagigen Verbunde mit einem Harnstoffformaldehyd-Leim und einem 1K-Polyurethan-Klebstoff. Die beiden rechten Säulengruppen repräsentieren jeweils die 5-lagigen Verbunde mit einem Harnstoffformaldehyd-Leim und einem 1K-Polyurethan-Klebstoff. Die magenta-farbenen Säulen repräsentieren jeweils die unbelasteten Referenzproben. Die hell-blauen Säulen repräsentieren jeweils die über den KTL-Vorbehandlungsprozess belasteten Proben. Die dunkel-blauen Säulen repräsentieren jeweils die über den KTL-Hauptprozess belasteten Proben. Die grünen Säulen repräsentieren jeweils die über den KTL-Gesamtprozess belasteten Proben.

Als Ergebnis hinsichtlich der Zugproben kann zusammengefasst werden, dass keine signifikanten KTL-bedingten Unterschiede hinsichtlich der verwendeten Klebstoffe bestehen. Weiterhin beeinflusst der KTL-Vorbehandlungsprozess die Zugfestigkeit des Verbundwerkstoffs nicht signifikant negativ. Der KTL-Hauptprozess hingegen beeinflusst die Zugfestigkeit des Verbundwerkstoffs negativ. Der KTL-Prozess im Gesamten, ist nicht grundsätzlich schädigend für buchenholzbasierende Furnierhölzer.

Als Ergebnis hinsichtlich der Biegeproben kann zusammengefasst werden, dass ebenfalls keine signifikanten KTL-bedingten Unterschiede hinsichtlich der verwendeten Klebstoffe bestehen. Weiterhin beeinflusst der KTL-Vorbehandlungsprozess die Zugfestigkeit des Verbundwerkstoffs nur bedingt negativ. Der KTL-Hauptprozess hingegen beeinflusst die Zugfestigkeit des Verbundwerkstoffs nicht signifikant negativ. Der KTL-Prozess im Gesamten, ist nicht schädigend für buchenholzbasierende Furnierhölzer.

Auf Basis dieser ersten systematischen Untersuchungen zum Thema KTL-Fähigkeit von Holz kann geschlussfolgert werden, dass Holz kein prinzipiell ungeeigneter Werkstoff zum Durchlauf eines KTL-Prozesses ist. Zukünftige Untersuchungen müssen aufbauend jedoch weitere Erkenntnisse sammeln.

### **II.1.7 Kritische Prozesseinflüsse und Optimierungspotenzial**

Vor dem Hintergrund der Neuheit des Ansatzes der holzbasierten Multimaterialsysteme sowie auf Basis der vorwiegend praktisch geprägten Erfahrungen zum Herstellprozess von Formholz, wurde im Rahmen des Teilprojekts eine systematische Studie zur Ermittlung von Einflüssen der Prozessparameter im Herstellungsprozess auf Furnierholz und holzbasierte Multimaterialsystems durchgeführt. Ziel dieser Untersuchung war es, die kritischen Prozessparameter zu identifizieren und zusätzlich das Prozessoptimierungspotential zu charakterisieren.

Grundlage des Versuchswesens waren die Probenvarianten sowie die Zug- und Biegeversuche, wie sie in Abschnitt II.1.3 beschrieben sind.

Zur Ermittlung der Haupteinflussgrößen wurde der Prozess analysiert und über eine Vorversuchsreihe die folgenden Parameter identifiziert:

- Holzfeuchte
- Verarbeitungsdauer (Zeit bis zum Verpressen)
- Welligkeit des Furniers
- Presstemperatur
- Pressdauer
- Pressdruck

Der Einfluss dieser Parameter auf die resultierenden Festigkeitswerte, die sich bei Veränderung der Parameterwerte einstellt wurde anschließend im ersten Teil der Studie empirisch untersucht. Dazu wurden die Parameter in ihren Werten variiert und zur Herstellung von Zug- und Biegeprüfkörpern eingesetzt, die anschließend geprüft wurden. Die Auswertung der Versuche und die Bewertung der Ergebnisse dienen der Beurteilung, ob ein Haupteinfluss vorliegt oder nicht. Die Untersuchung dient somit dazu, die prozessrelevanten Parameter von den weniger relevanten zu unterscheiden, um so den Prozess sicherer und stabiler zu gestalten. Das heißt, ein Faktor, der bei kleiner Veränderung eine starke Veränderung des Prozessergebnisses zufolge hat, ist sehr prozessrelevant und daher bei der Herstellung besonders zu berücksichtigen. Andere Faktoren wiederum besitzen kaum Einfluss auf den Prozess.

Gemäß dem von *KLEPPMANN* [Kle11] beschriebenen Vorgehen, wurden im ersten Studienteil zwei Versuchsreihen durchgeführt. Die beiden Versuchsreihen unterschieden sich in ihrer Stufenwahl der Parameter (siehe Tabelle 3 und Tabelle 4). Sie können als zwei komplementäre Reihen angesehen werden, da eine  $n-1$  „gute“ Faktoren besitzt, mit  $n$  als Gesamtfaktoranzahl, und die andere  $n-1$  „schlechte“ Faktoren. Dabei wurde jeder Faktor einmal in seiner Faktorstufe verändert. Der Versuch  $n$  „gute“ Faktoren und  $n$  „schlechte“ Faktoren (Referenzproben) wurde bereits im Vorversuch durchgeführt und wurde hier nicht wiederholt.

**Tabelle 3: Versuchsreihe 1.1: n-1 „gute“ Parameter**

Probennummer	Art	Welligkeit	Holzfeuchte	Zeit bis Pressen	Presszeit	Pressdruck	Temperatur
1.Z.G.1	Zugprobe	stark	ca. 8%	< 5min	10 min	200N/cm <sup>2</sup>	100°C
1.Z.G.2	Zugprobe	gering	> 8%	< 5min	10 min	200N/cm <sup>2</sup>	100°C
1.Z.G.3	Zugprobe	gering	ca. 8%	>15min	10 min	200N/cm <sup>2</sup>	100°C
1.Z.G.4	Zugprobe	gering	ca. 8%	< 5min	7 min	200N/cm <sup>2</sup>	100°C
1.Z.G.5	Zugprobe	gering	ca. 8%	< 5min	10 min	120N/cm <sup>2</sup>	100°C
1.Z.G.6	Zugprobe	gering	ca. 8%	< 5min	10 min	200N/cm <sup>2</sup>	80°C
1.B.G.1	Biegeprobe	stark	ca. 8%	< 5min	10 min	200N/cm <sup>2</sup>	100°C
1.B.G.2	Biegeprobe	gering	> 8%	< 5min	10 min	200N/cm <sup>2</sup>	100°C
1.B.G.3	Biegeprobe	gering	ca. 8%	>15min	10 min	200N/cm <sup>2</sup>	100°C
1.B.G.4	Biegeprobe	gering	ca. 8%	< 5min	7 min	200N/cm <sup>2</sup>	100°C
1.B.G.5	Biegeprobe	gering	ca. 8%	< 5min	10 min	120N/cm <sup>2</sup>	100°C
1.B.G.6	Biegeprobe	gering	ca. 8%	< 5min	10 min	200N/cm <sup>2</sup>	80°C

**Tabelle 4: Versuchsreihe 1.2: n-1 „schlechte“ Parameter**

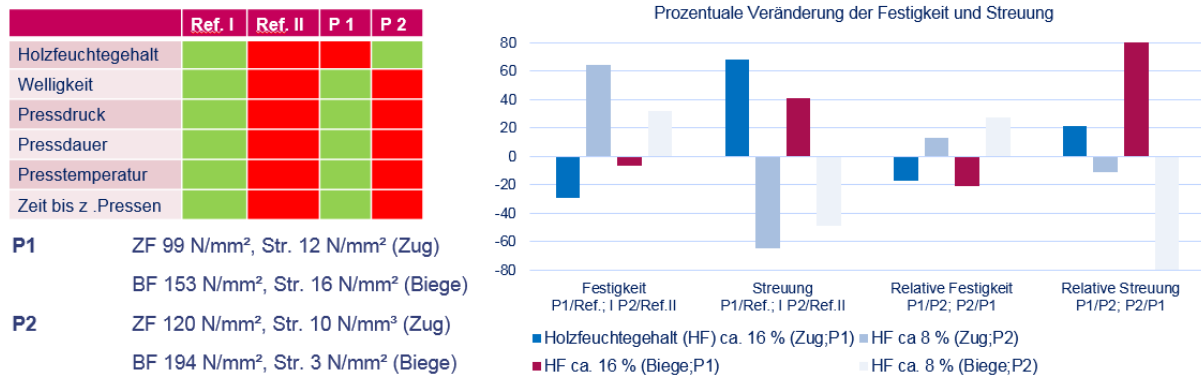
Probennummer	Art	Welligkeit	Holzfeuchte	Zeit bis Pressen	Presszeit	Pressdruck	Temperatur
1.Z.S.1	Zugprobe	gering	>8%	>15min	7min	120N/cm <sup>2</sup>	80°C
1.Z.S.2	Zugprobe	schwach	ca. 8%	>15min	7min	120N/cm <sup>2</sup>	80°C
1.Z.S.3	Zugprobe	schwach	>8%	<5min	7min	120N/cm <sup>2</sup>	80°C
1.Z.S.4	Zugprobe	schwach	>8%	>15min	10min	120N/cm <sup>2</sup>	80°C
1.Z.S.5	Zugprobe	schwach	>8%	>15min	7min	200N/cm <sup>2</sup>	80°C
1.Z.S.6	Zugprobe	schwach	>8%	>15min	7min	120N/cm <sup>2</sup>	100°C
1.B.S.1	Biegeprobe	gering	>8%	>15min	7min	120N/cm <sup>2</sup>	80°C
1.B.S.2	Biegeprobe	schwach	ca. 8%	>15min	7min	120N/cm <sup>2</sup>	80°C
1.B.S.3	Biegeprobe	schwach	>8%	<5min	7min	120N/cm <sup>2</sup>	80°C
1.B.S.4	Biegeprobe	schwach	>8%	>15min	10min	120N/cm <sup>2</sup>	80°C
1.B.S.5	Biegeprobe	schwach	>8%	>15min	7min	200N/cm <sup>2</sup>	80°C
1.B.S.6	Biegeprobe	schwach	>8%	>15min	7min	120N/cm <sup>2</sup>	100°C

Zur Auswertung der Ergebnisse der Studienphase 1 wurden die jeweiligen Versuchsergebnisse der einzelnen Faktoren mit der zugehörigen Referenzprobe verglichen. Dadurch konnte der relative Einfluss auf die Zielgröße direkt abgelesen werden. Ein Parameter gilt als wesentlicher Einflussfaktor für den Prozess, wenn durch ihn das Ergebnis maßgeblich beeinflusst wird. Diese Beurteilung fand auf Grundlage der Messergebnisse statt, indem betrachtet wurde, inwieweit sich das Gesamtergebnis mit der Variation eines einzelnen Faktors verändert.

Folgend werden die Ergebnisse für jeden Parameter in Kurzform angegeben. Hierbei wird auf die Betrachtung der Elastizitätsmoduln verzichtet, da diese zu der gleichen Schlussfolgerung wie die Prüfung der Biege- und Zugfestigkeit führen.

Der Holzfeuchtegehalt konnte durch die Versuche als Haupteinfluss identifiziert werden. Die Ergebnisse der Biege- und Zugprüfung (Abbildung 33) zeigten eine direkte Abhängigkeit des

Prozessergebnisses von dem Holzfeuchtegehalt. Ein geringerer Holzfeuchtegehalt führt demnach zu einer wesentlich besseren Festigkeit, als dies bei höherem Holzfeuchtegehalt der Fall ist. Die Zugfestigkeit fällt infolge des höheren Holzfeuchtegehalts (ca. 16%) auf 99 N/mm<sup>2</sup> ab. Bei Einstellung eines geringeren Holzfeuchtegehalts (ca. 8%) wurde im Mittel eine Festigkeit von 120 N/mm<sup>2</sup> gemessen. Für die Biegefestigkeit ergibt sich das gleiche Bild. Hier wurde bei der höheren Holzfeuchte eine Biegefestigkeit von 153 N/mm<sup>2</sup> ermittelt und bei geringerer Holzfeuchte 194 N/mm<sup>2</sup>.



**Abbildung 33: Auswertungsergebnis hinsichtlich Holzfeuchte. Links: In den Vergleich eingeflossene Probenvarianten mit unterschiedlichen Faktor-Wert-Kombinationen (grün „gut“, rot „schlecht“). Rechts: Prozentuale Veränderung der Festigkeit und Streuung der unterschiedlichen Proben-Quotienten.**

Die Furnierwelligkeit als weitere mögliche Störgröße auf den Prozess zeigte in den Ergebnissen keinen signifikanten Einfluss auf das Prozessergebnis. Daraus kann geschlossen werden, dass kein Haupteinfluss vorliegt. Die Zugfestigkeit nahm bei Verwendung von stark welligem Furnier um  $\Delta 8,8$  N/mm<sup>2</sup> im Mittel ab, was praktisch keine Veränderung der Festigkeit bedeutet. Das gleiche Ergebnis zeigt sich bei der Biegefestigkeit. Hier konnte eine Festigkeitsänderung um  $\Delta 2$  N/mm<sup>2</sup> festgestellt werden, die ebenfalls mit keiner Veränderung gleichzusetzen ist.

Die Untersuchung der Einstellgröße Pressdruck auf das Prozessergebnis zeigte ebenfalls keine ausreichende Signifikanz auf, um auf einen Haupteinfluss zu schließen. Für die Überprüfung wurde der Pressdruck auf 120 N/cm<sup>2</sup> und 200 N/cm<sup>2</sup> eingestellt. Die Ergebnisse zeigen gegenüber der Referenz eine erwartungstreue Veränderung der Zug- und Biegefestigkeit. Die Festigkeiten verringern sich mit dem geringeren Pressdruck und verbessern sich durch die Drucksteigerung, dennoch liegen die absoluten Festigkeitswerte des geringeren Drucks (Zug: 124 N/mm<sup>2</sup>, Biege: 173 N/mm<sup>2</sup>) über dem des erhöhten (Zug: 91 N/mm<sup>2</sup>, Biege: 155 N/mm<sup>2</sup>). Daraus folgt, dass kein Haupteinfluss vorliegt.

Die Variation der Presstemperatur im Herstellungsprozess führte ebenfalls zu dem Ergebnis, dass der auftretende Einfluss keinen Haupteinfluss darstellt. Die Zug- und Biegefestigkeiten weisen eine Veränderung auf, die aber unterhalb der Bewertungsgrenze für einen Haupteinfluss liegt. Die resultierenden Festigkeitswerte (Zug: 114 N/mm<sup>2</sup>, Biege: 158 N/mm<sup>2</sup>) bei Einstellung der geringeren Presstemperatur liegen bei der Zugfestigkeit weiterhin oberhalb der Festigkeitswerte bei höherer Temperatur (Zug: 94 N/mm<sup>2</sup>, Biege: 164 N/mm<sup>2</sup>). Bei der Biegefestigkeit weisen die Proben mit höherer Presstemperatur im Mittel höhere Werte auf, 164 N/mm<sup>2</sup> zu 158 N/mm<sup>2</sup>. Aufgrund der gleichzeitig höheren Streuung von 12,5 N/mm<sup>2</sup> zu

8,5 N/mm<sup>2</sup> liegt diese Abweichung in einem Bereich, in dem eher von einem Materialeinfluss auszugehen ist als von einem systematischen Prozessparametereinfluss.

Die Pressdauer als weitere Einstellgröße weist ebenfalls keinen Haupteinflusscharakter auf. Für den „optimalen“ Parameterwert wurde eine Dauer von 10 Minuten, wie im bisherigen Prozess, festgelegt und für die zweite „nicht optimale“ Stufe 7 Minuten. Auch hier zeigt sich eine erwartungsgemäße Veränderung der Zug- und Biegefestigkeiten gegenüber der Referenz, die den grundsätzlich positiven bzw. negativen Einfluss auf die resultierenden Festigkeitswerte belegt. Die Abnahme der Festigkeit bei Verkürzung der Pressdauer liegt ca. bei 5 bis 23 % und die Festigkeitszunahme beläuft sich auf ca. 25 bis 41 %, jeweils gegenüber der Referenz. Trotz dieser Tendenz bleiben die Festigkeitswerte bei kürzerer Pressdauer (Zug: 107 N/mm<sup>2</sup>, Biege: 167 N/mm<sup>2</sup>) oberhalb derer bei längere Pressdauer (Zug: 103 N/mm<sup>2</sup>, Biege: 91 N/mm<sup>2</sup>). Daraus resultiert, dass kein Haupteinfluss vorliegt.

Die Zeit bis zum Verpressen, d.h. die zeitliche Dauer zwischen Beginn des Klebstoffauftrags und dem Beginn des Pressvorgangs, wurde untersucht, indem einmal der gesamte Vorgang in weniger als 5 Minuten und einmal in ca. 15 Minuten durchgeführt wurde. Die Versuchsergebnisse zeigen auch hier einen Einfluss durch die Veränderung des Parameters auf, der erwartungsgemäß ist. Die Festigkeitsabnahme durch die längere Verweildauer beläuft sich auf ca. 5-14 % und die entsprechende Zunahme durch Verringerung der Dauer beträgt ca. 53-95 %, jeweils gegenüber der Referenz. Trotz der relativ starken Festigkeitszunahme bei einer kürzeren Zeit bis zum Verpressen bleiben die absoluten Festigkeitswerte (Zug 119 N/mm<sup>2</sup>, Biege: 167 N/mm<sup>2</sup>) unterhalb derer bei einer längeren Verweildauer.

Die Versuchsergebnisse haben gezeigt, dass es bei Verwendung von Holz als Grundwerkstoff und einem geringen Probenumfang nur möglich ist, Haupteinflüsse zu erkennen. Die Materialeigenschaften von Holz, die von Inhomogenität in vielerlei Hinsicht geprägt sind, sorgen für eine stets vorhandene Streuung der Festigkeitswerte. Aus diesem Grund konnten in dieser Studie auch nur die Haupteinflüsse ermittelt, aber keine weitergehende Aussage über die restlichen Parametereinflüsse getroffen werden.

Im zweiten Teil der Studie wurden die Einstellparameter in weiteren Stufen untersucht, um ein eventuelles Prozessoptimierungspotential zu ermitteln. Die Bewertung dieses Potentials erfolgte ebenfalls über die Ergebnisse aus Zug- und Biegeprüfungen.

Nachdem in der Studienphase 1 der bisherige Prozess mit seiner Veränderung bei einer Reduzierung der Parameter zu kleineren Werten untersucht wurde, wurde in der Studienphase 2 das Verhalten bei einer Erhöhung untersucht. Hierbei reduzierte sich die Anzahl der Parameter auf die Einstellgrößen, da die Einflussgrößen nur den Zustand „gut“ und „schlecht“ annehmen konnten. Die Einflussgrößen wurden auf „gut“ gehalten, da es sich dabei um den wahrscheinlicheren Fall handelt und zum anderen die Ergebnisse aus Phase 1 zeigten, dass sie zu einer Verbesserung der Zielgrößen führen.

Damit bleiben als Einstellgrößen:

- Pressdruck (280 N/cm<sup>2</sup>, 360 N/cm<sup>2</sup>)
- Presszeit (10 min, 15 min)
- Presstemperatur (150°C, 200°C)

Jede Einstellgröße wurde auf 2 Stufen eingestellt und in einem vollfaktoriellen Versuchsablauf hinsichtlich des Einflusses geprüft. Tabelle 5 zeigt die Faktor-Wert-Kombinationen der Serien für die Zugproben; der Versuchsplan für die Biegeproben war analog.

**Tabelle 5: Parameter der Zugproben für die Versuchsphase 2**

Probennummer	Temperatur [°C]	Druck [N/cm <sup>2</sup> ]	Zeit [min]
2.Z.1	150	280	15
2.Z.2	150	280	10
2.Z.3	150	360	15
2.Z.4	150	360	10
2.Z.5	200	280	15
2.Z.6	200	280	10
2.Z.7	200	360	15
2.Z.8	200	360	10

In der Auswertung der zweiten Versuchsphase wurde untersucht, ob eine Steigerung der Parameterwerte zu einer Optimierung der Zielgrößen, d.h. zu einer höheren Festigkeit bei gleichzeitig möglichst geringer Streuung, beiträgt. Die Ergebnisse für die Zielgrößen sind nachfolgend für jeden Versuchspunkt dargestellt und hinsichtlich eines möglichen Prozessoptimierungspotentials bewertet.

Die Ergebnisse der zweiten Studienphase lassen sich dahingehend zusammenfassen, dass es nicht möglich war, aus den gewonnenen Messwerten ein Prozessoptimierungspotential abzuleiten. Es stellten sich zwar Veränderungen der Zielgrößen ein, allerdings liegen diese entweder zu nah am Referenzwert oder sind widersprüchlich, so dass keine Aussage über den Parametereinfluss möglich ist. Da alle Werte im näheren Bereich um den Referenzwert lagen, wird von einer Einzeldarstellung der Ergebnisse abgesehen.

Als Weiterführung der vorliegenden Studie wäre eine genaue quantifizierende Untersuchung derjenigen Prozessparameter interessant, die in den durchgeführten Versuchen nicht eindeutig in ihrer Auswirkung auf das Prozessergebnis charakterisiert werden konnten. Dazu wäre es erforderlich, eine Versuchsreihe mit einem wesentlich höheren Probenumfang durchzuführen, als dies bei der vorliegenden Studie im Rahmen des Projekts möglich war. Auf Basis eines größeren Probenumfangs würde es möglich, die von den Materialeigenschaften ausgehenden Prozesseinflüsse von den Einflüssen der Parameter zu trennen. Dadurch könnte der tatsächliche Einfluss der einzelnen Parameter untersucht und quantifiziert werden.

Als Fazit der Studie kann gezogen werden, dass nur der Holzfeuchtegehalt einen signifikanten Einfluss auf die zu erreichenden Festigkeitswerte hat. Die Ergebnisse zeigten eine maßgebliche Abhängigkeit zwischen Holzfeuchtegehalt und Festigkeitswert. So führt ein höherer Holz-



feuchtegehalt zu sehr viel schlechteren Festigkeitswerten als ein geringerer Holzfeuchtegehalt. Die Analyse der Ergebnisse zu den Parametern Welligkeit, Pressdruck, Presstemperatur, Pressdauer und der Zeit zwischen Klebstoffauftrag und Pressvorgang führte dagegen zu keinen eindeutigen Aussagen über Höhe und Art des Einflusses auf das Prozessergebnis.

Die Ergebnisse der zweiten Phase lassen sich so zusammenfassen, dass kein Optimierungspotential ermittelt wurde, welches eine Veränderung des momentanen Prozesses notwendig machen würde.

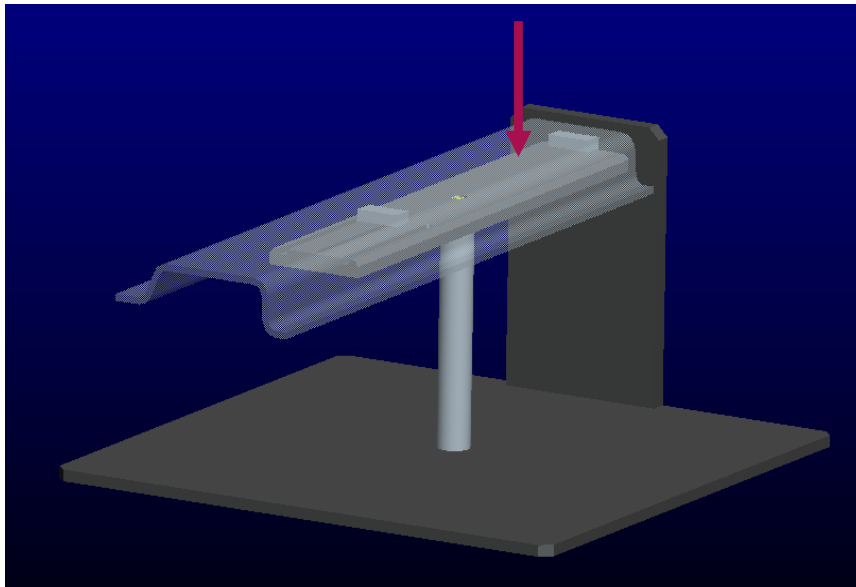
Somit wurde für den im Rahmen des Projekts angewandten Prozess der Formholzherstellung sowie der Herstellung der holzbasierten Multimaterialsysteme nachgewiesen, dass ein weitestgehend optimierter, wenig sensitiver und beherrschter Prozess vorliegt. Einzig der Faktor Furnierfeuchte ist ein stark signifikanter Faktor, der sensible Auswirkungen auf das Prozessergebnis hat.

### ***II.1.8 Untersuchungen Formtreue***

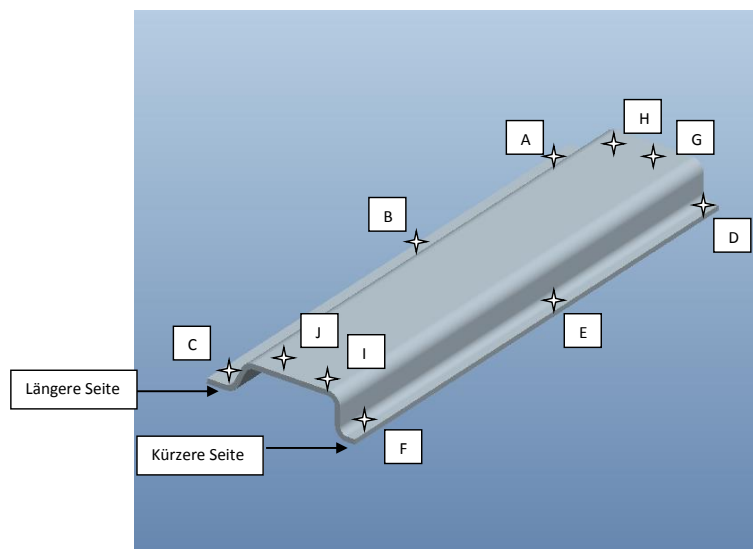
Schlechte Formtreue von dünnen Furnierwerkstoffen und 3D-Holzformteilen ist insbesondere dann problematisch, wenn, wie in diesem Projekt angestrebt wird, Bereiche zu bedienen, welche höchste Anforderungen an Reproduzierbarkeit und Präzision haben. Da die Maßhaltigkeit von Formholz ein bekanntes jedoch wenig systematisch charakterisiertes Problem ist, wurde im Rahmen des Teilprojekts eine Untersuchung zur Formtreue von Formholzteilen im Zeitverlauf bzw. unter Einfluss von Umweltbedingungen durchgeführt.

Untersuchungsgegenstand waren die in Abschnitt II.1.1 beschriebenen  $\Omega$ -Profile (siehe Abbildung 2). Diese wurden in verschiedenen Varianten hergestellt, unterschiedlich ausgelagert bzw. gealtert und zu unterschiedlichen Zeitpunkten vermessen.

Zur Vermessung wurde eine spezielle Vorrichtung konstruiert (siehe Abbildung 34), welche eine reproduzierbare Positionierung und Vermessung ermöglichte. Weiterhin wurde eine Messstrategie festgelegt, nach der alle Probenkörper einheitlich charakterisiert wurden (siehe Abbildung 35). An den definierten Messpunkten wurde jeweils die Höhenlage in Referenz zur Unterseite der oberen Fläche bestimmt. Somit waren einerseits Aussagen zur geometrischen Veränderung der Form und andererseits zur Änderung der Bauteildicke möglich.



**Abbildung 34: Vermessungsvorrichtung**



**Abbildung 35: Definierte Messpunkte an der Probengeometrie.**

Tabelle 6 zeigt die hergestellten und untersuchten Varianten. Grundlage war die in Abschnitt II.1.4 benannte „Variante D“ welche aus 9 Lagen 0,8 mm starkem Furnier mit der Schichtung  $[0/90/0/0/90/0/0/90/0]^\circ$ . Diese Basis wurde in vier Varianten hinsichtlich des Holzwerkstoffs erstellt:

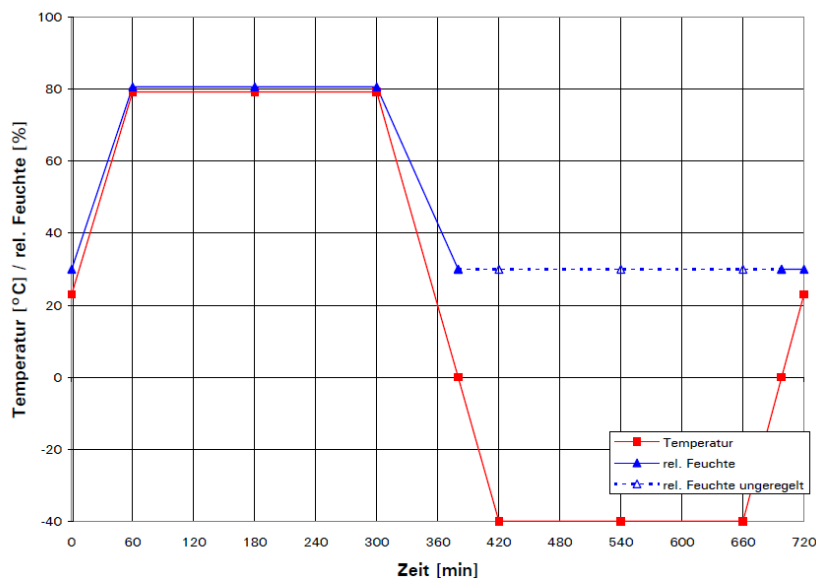
1. Furniere ohne spezielle Sortierung (Standardproduktionsortierung der Furniere der Fa. Becker)
2. Furniere individuell ausgewählt (Verwendung von Furnieren, bei denen durch Rissprüfung verifiziert nur "perfekte" Faserverläufe vorlagen)
3. Furniere ohne spezielle Sortierung + ein Furnierblatt mit schrägem Faserverlauf
4. acetylierte Furniere, normale Sortierung

Alle vier Varianten wurden jeweils mittels der Klebstoffe 2K Harnstoff-Formaldehyd-Harz Casco (HF) (Verbund 1-4) und 1K-PUR Jowapur 680.20 (1K-PU) (Verbund 5-8) gefügt. Zusätzlich wurden auf Basis der 1K-PU noch die MMS-Varianten mit jeweils 2 Lagen Edelstahlverstärkung (Verbund 9) sowie Aramidverstärkung (Verbund 10) betrachtet.

**Tabelle 6: Probenplan und Probencharakteristika.**

Verbund Nr.	Verbundcode	Anzahl Verstärkungslagen	Schichtung (Faserrichtung zur längeren Plattenkante)	Variante-Merkmal	Erläuterung
1	V1	0	p-o-p-p-o-p-p-o-p	normal HF	Furniere ohne spezielle Sortierung (Standardsortierung Produktion)
2	V2	0	p-o-p-p-o-p-p-o-p	sortiert HF	Furniere individuell ausgewählt (nur "perfekte" Faserverläufe)
3	V3	0	p-o-p-p-o-p-p-o-p	schlecht HF	eine ungeeignete (schräger Faserverlauf) Furnierplatte
4	V4	0	p-o-p-p-o-p-p-o-p	acetyliert HF	acetylierte Furniere
5	V5	0	p-o-p-p-o-p-p-o-p	normal 1K-PU	Furniere ohne spezielle Sortierung (Standardsortierung Produktion)
6	V6	0	p-o-p-p-o-p-p-o-p	sortiert 1K-PU	Furniere individuell ausgewählt (nur "perfekte" Faserverläufe)
7	V7	0	p-o-p-p-o-p-p-o-p	schlecht 1K-PU	eine ungeeignete (schräger Faserverlauf) Furnierplatte
8	V8	0	p-o-p-p-o-p-p-o-p	acetyliert 1K-PU	acetylierte Furniere
9	V9	2	p-o-V-p-p-o-p-p-V-o-p	Ed verstärkt 1K-PU	2 Lagen Edelstahl
10	V10	2	p-o-V-p-p-o-p-p-V-o-p	A verstärkt 1K-PU	2 Lagen Aramid

Zur Bestimmung der zeitlichen und alterungsbedingten Veränderung wurde jeweils die Hälfte der Proben einer Serie 50 Tage nach Produktion unter Normklima (20°C und 65 % relative Luftfeuchte), die andere Hälfte 100 Zyklen unter Wechselklimabelastung nach VW PV1200 gelagert.

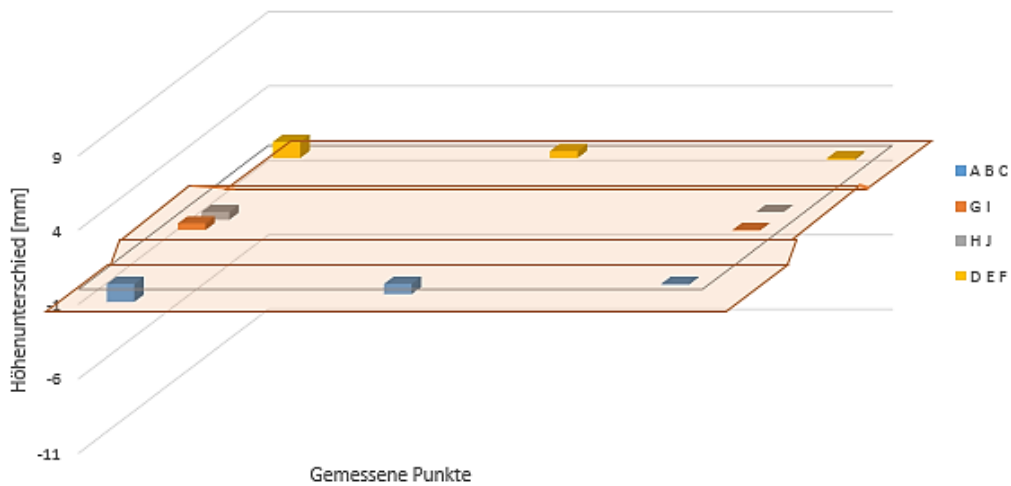


**Abbildung 36: Temperatur- und rel. Feuchteverlauf eines 12 Stunden Zyklusses der VW-Konzernnorm PV1200 [Quelle: Volkswagen AG].**

Abbildung 36 zeigt Temperatur- und rel. Feuchteverlauf eines 12 Stunden Zyklusses der VW-Konzernnorm PV1200. Diese Norm wird u.a. in der Automobilindustrie zur Bestimmung der Klimawechselfestigkeit herangezogen. In Bezug auf das Projekt wurden diese Anforderungen gewählt, da sie für den Zielbereich der Bauteile gelten.

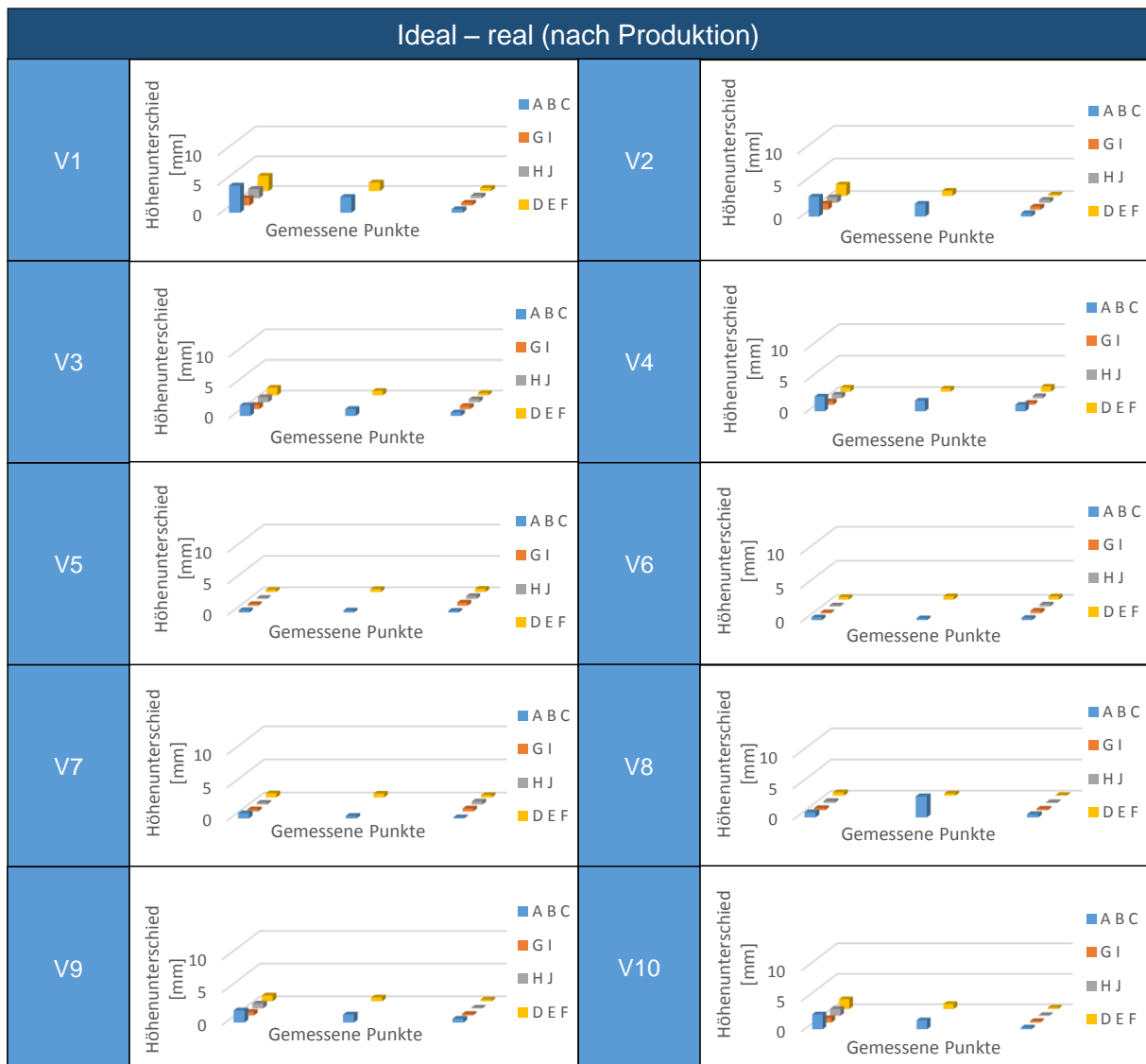
Die individuelle Vermessung aller Teile erfolgte jeweils direkt nach der Produktion, nach 25 Tagen Normklima bzw. PV1200 (50 Zyklen) sowie nach 50 Tagen Normklima bzw. PV1200 (100 Zyklen). Zusätzlich wurde über das CAD-Modell die in Bezug auf jeden Messpunkt ideale Lage ermittelt.

Somit war es in der Auswertung möglich, über Bildung von Differenzen, die Lageveränderung jedes Messpunktes durch zeitliche und/oder klimatechnische Zustandsänderung der Probenkörper zu ermitteln. Ebenso konnten die Abweichungen der neu produzierten Teile vom theoretisch idealen Teil bestimmt werden.



**Abbildung 37: Auswertedarstellung der Formveränderung.**

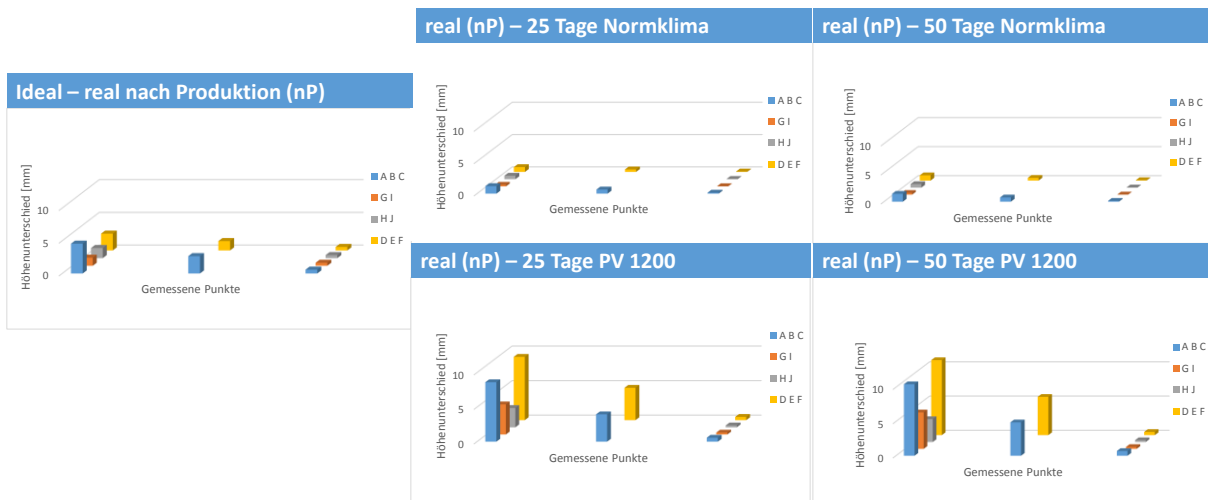
Abbildung 37 zeigt beispielhaft die Auswertedarstellung der Formveränderung. Dargestellt ist jeweils für alle Messpunkte der Mittelwert der Beträge der Abweichungen zwischen zwei Bauteilzuständen. Durch diese Darstellung kann eine Lageveränderung der Messpunkte zwischen zwei Bauteilzuständen grafisch-qualitativ dargestellt werden.



**Abbildung 38: Mittlere Abweichung der realen Bauteile vom theoretisch idealen Teil direkt nach Produktion**

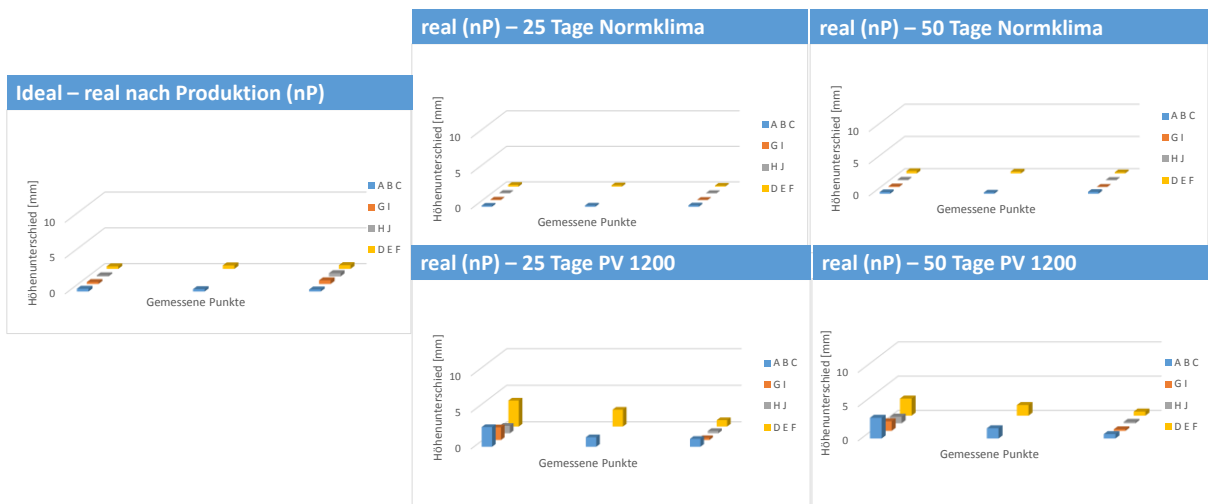
Entsprechend dieses Darstellungsschemas zeigt Abbildung 38 die mittleren Abweichungen der realen Bauteile der einzelnen Verbundaufbauten direkt nach Produktion vom theoretisch idealen Teil.

Abbildung 39 zeigt die Ergebnisse zum Verbund 1, Furniere ohne spezielle Sortierung (Standardproduktionsortierung der Furniere der Fa. Becker) gefügt mit 2K HF-Klebstoff und ohne zusätzliches Verstärkungsmaterial. Analog zu den anderen Abbildungen sind die gemittelten, betragsmäßigen Abweichungen der individuell miteinander verglichenen Probenkörper als Säulen dargestellt. Links die Lageänderung der einzelnen Messpunkte zwischen den theoretisch idealen Bauteil im Vergleich zum real produzierten Bauteil nach der Produktion und entsprechender Abkühlphase. In der Mitte wurden die messpunktbezogenen Unterschiede vom realen Bauteil nach Produktion zum Zustand nach 25 Tagen Normklimaauslagerung (Mitte oben) bzw. nach 25 Tagen VW PV1200 (Mitte unten) abgebildet. Analog dazu befinden sich auf der rechten Seite die Ergebnisse Ursprungsbauteil im Vergleich zur 50 Tage Auslagerung.



**Abbildung 39: Lageänderungen (Mittelwerte der Beträge) der Messpunkte zwischen verschiedenen Bauteilzuständen für Verbund 1**

Entsprechend der Abbildung 39 zeigen die Abbildung 40 und Abbildung 41 die Ergebnisse in gleicher Darstellung für die Verbunde 5 und 4. Dabei besteht der Verbund 5 analog zum Verbund 1 aus Furnieren ohne spezielle Sortierung (Standardproduktionsortierung der Furniere der Fa. Becker) jedoch mit 1K-PU Klebstoff als Fügemitel.



**Abbildung 40: Lageänderungen (Mittelwerte der Beträge) der Messpunkte zwischen verschiedenen Bauteilzuständen für Verbund 5**

Der Verbund 4 ist analog zum Verbund 1 ebenfalls mit dem 2K-HF verklebt, besteht jedoch aus acetylierten Furnieren, welche bewusst gewählt wurden, um einen Ansatz zur Dauerhaftigkeit aufzuzeigen.

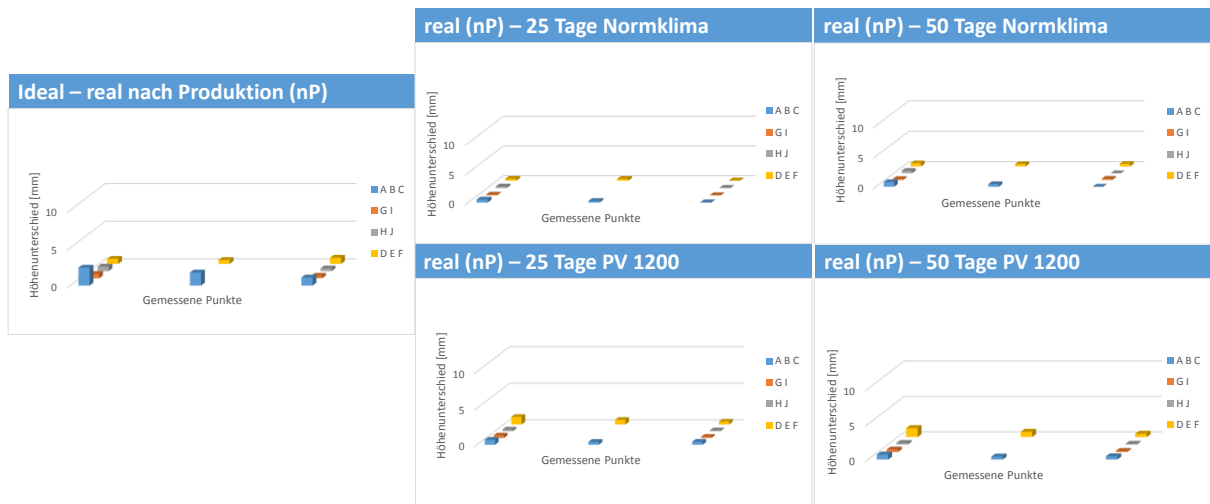


Abbildung 41: Lageänderungen (Mittelwerte der Beträge) der Messpunkte zwischen verschiedenen Bauteilzuständen für Verbund 4

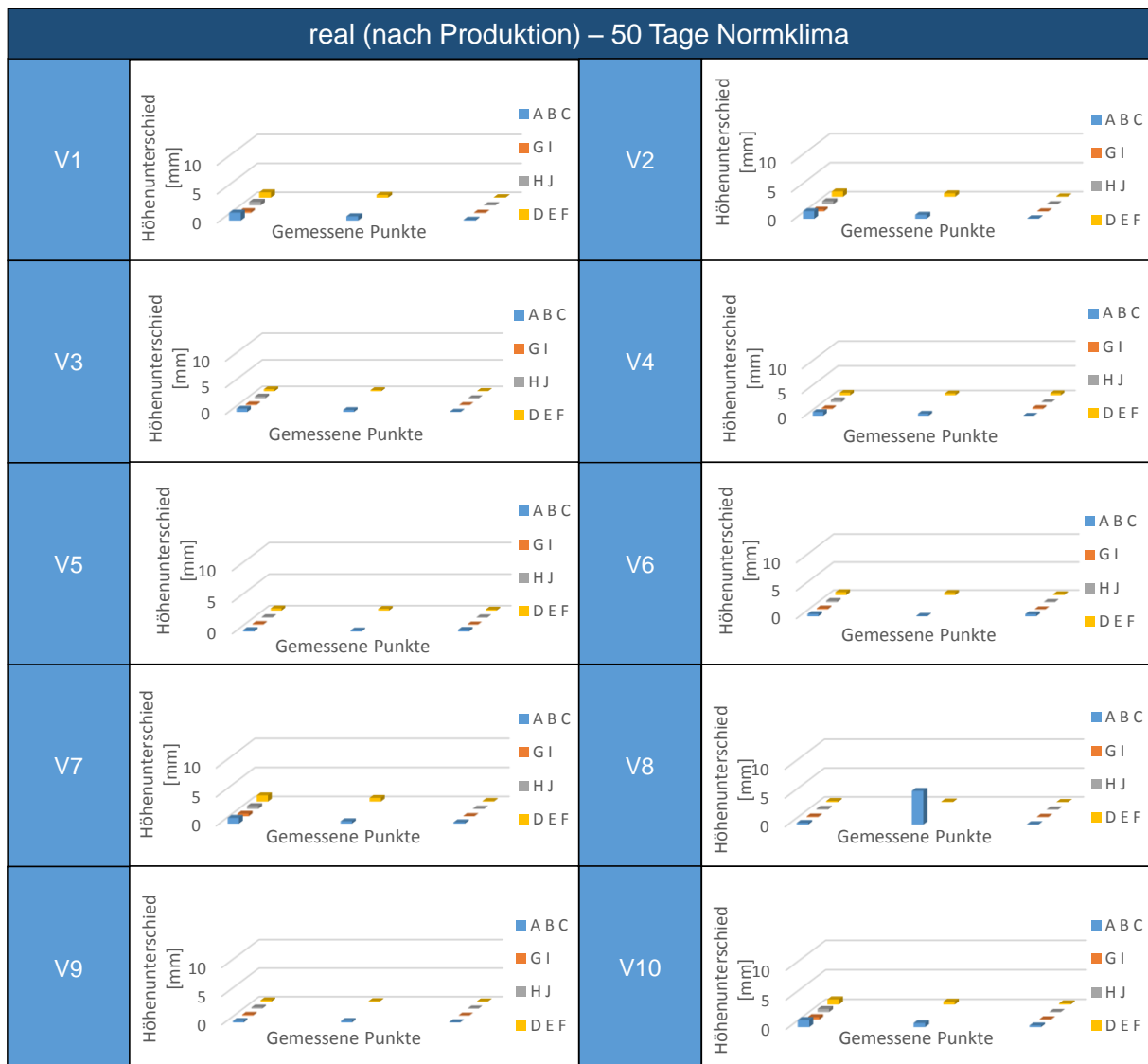
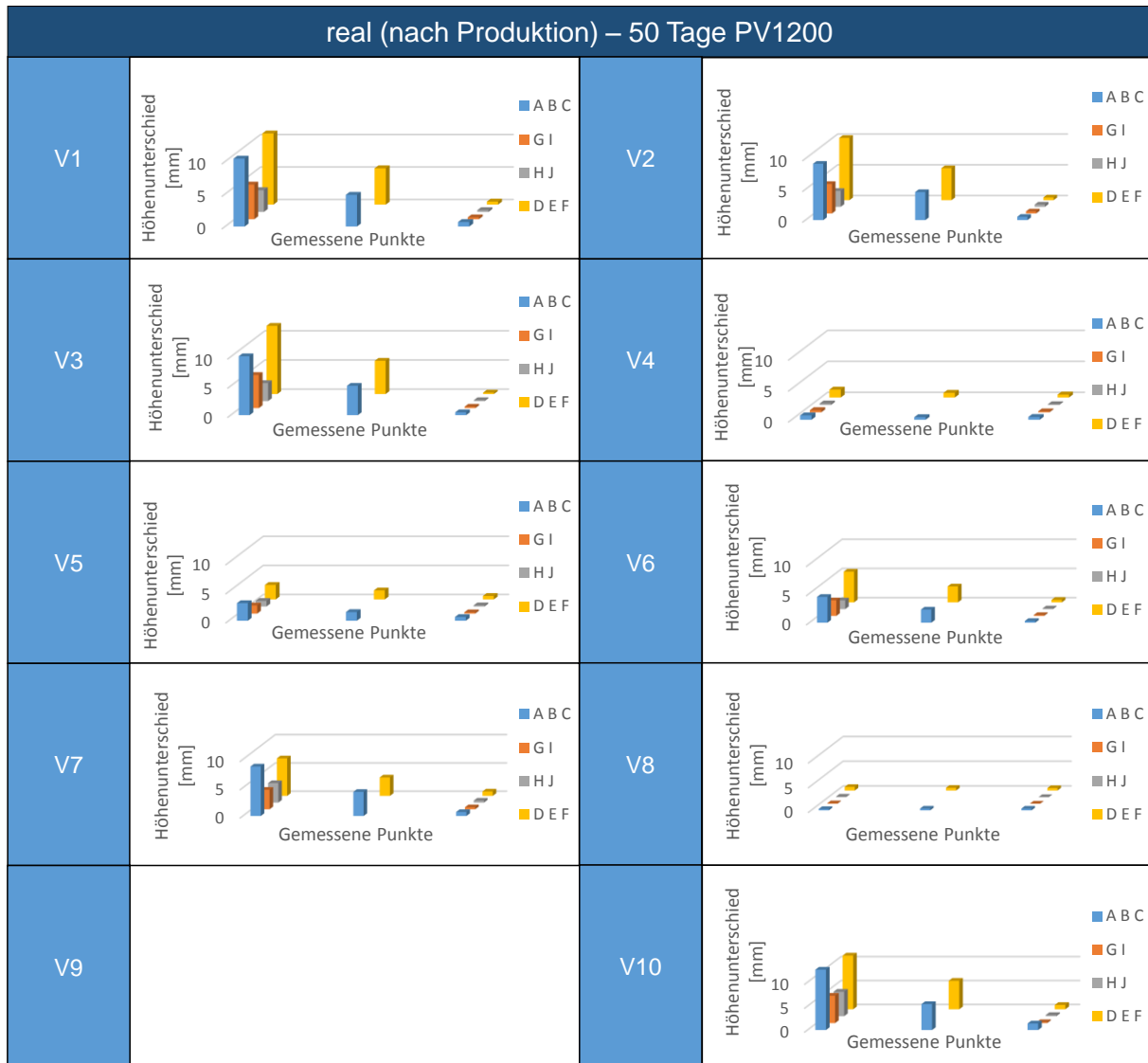


Abbildung 42: Mittlere Abweichung der realen Bauteile direkt nach Produktion zum Zustand nach 50 Tagen Normklimaauslagerung.

Abbildung 42 und Abbildung 43 zeigen die wesentlichen Übersichten zum Gesamtergebnis: In Abbildung 42 sind für alle Verbunde die mittleren Abweichungen der realen Bauteile direkt

nach Produktion zum Zustand nach 50 Tagen Normklimaauslagerung dargestellt. In Abbildung 43 sind für alle Verbunde die mittleren Abweichungen der realen Bauteile direkt nach Produktion zum Zustand nach 50 Tagen Klimawechseltest PV1200 dargestellt. Das Fehlen des Verbunds 9 liegt darin begründet, dass alle durch Stahlfolien verstärkten Bauteile zwischen den Zyklen 50 und 100 des PV1200 durch Delamination versagten.



**Abbildung 43: Mittlere Abweichung der realen Bauteile direkt nach Produktion zum Zustand nach 50 Tagen VW PV1200.**

Mit der hier aufgezeigten Untersuchung wurde eine erste systematische Studie zum Verformungsverhalten von komplexen Formholzbauteilen in Abhängigkeit von Zeit und Klimalagerung erstellt. Die Studie hat übergeordnet gezeigt, dass die gewählte Untersuchungsmethode für komplexe Teile grundsätzlich geeignet ist. Jedoch sind Messung und Auswertung sehr umfangreich, da neben der individuellen Produktion insbesondere die mehrmalige Vermessung aller Messpunkte an allen Bauteilen sehr aufwendig ist.

Hinsichtlich der Einflussfaktoren, welche auf die Formtreue von Holzformteilen einwirken, kann geschlussfolgert werden, dass die Klimatisierung/Lagerung der Bauteile und hier insbesondere die Luftfeuchtigkeit einen entscheidenden Einfluss hat. Dies wird im Vergleich von Abbildung 42 und Abbildung 43 bei allen Verbundvarianten deutlich. Weiterhin zeigt sich, dass der



gewählte Klebstoff, unabhängig der quasi-statischen Festigkeit (was andere Ergebnisse des Projekts zeigen) einen signifikanten Einfluss auf die Formstabilität hat. Im vorliegenden Fall konnte durch Wahl des 1K-PU eine deutlich geringere Verformung der Teile insbesondere im Klimawechselfestigkeitstest festgestellt werden. Zusätzlich ist der Einsatz von acetyliertem Holz sehr vorteilhaft. Durch das, hinsichtlich Wasseraufnahme bzw. Quellen und Schwinden unempfindlicher gestaltete, acetylierte Furnier können die Einflüsse eines Klimawechsels signifikant verringert werden. Dies zeigt z.B. der Vergleich von Verbund 5 und 8 in Abbildung 43 sehr deutlich. Bezüglich des Einflusses von Normklima konnte innerhalb der Untersuchungen keine signifikanten Formänderungen festgestellt werden.

Hinsichtlich des Einflusses einer speziellen Sortierung (nur faserparallele Furniere bzw. bewusst schräg verlaufende Furniere) konnten keine signifikant unterschiedlichen Ergebnisse festgestellt werden. Hier sollten weiterführende Untersuchungen die Frage beantworten, wie allgemeingültig von einem „parallelen“ bzw. „schrägen“ Faserverlauf ausgegangen werden kann. Es wird vermutet, dass es hinsichtlich der Faserlage nicht nur makroskopisch sichtbare sondern auch mikroskopisch relevante Detailunterschiede gibt. Ebenso kann im Rahmen diese Untersuchung eine Überlagerung von Effekten bei der Kombination von „guten“ und „schlechten“ Furnieren nicht ausgeschlossen werden. Eine Untersuchung dieses Umstands wäre z.B. mit Hilfe der zum Projektende bei der Fa. Becker installierten Anlage zur optischen Furnierdetektion möglich.

Die Einbindung von Verstärkungslagen konnte hinsichtlich einer Erhöhung des Widerstands gegen Verformung keine Vorteile generieren.

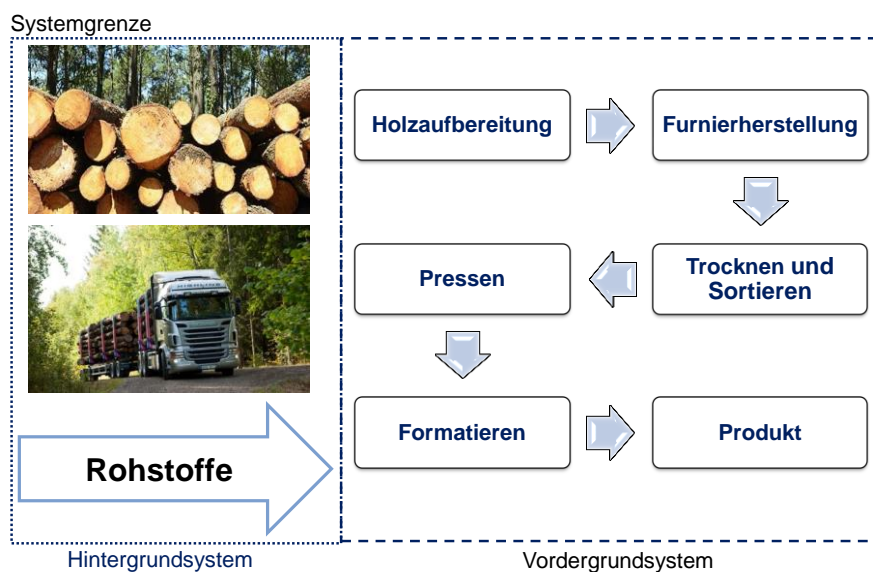
Abschließend konnte, auch durch Rücksprache mit Experten aus den verschiedenen Disziplinen, festgestellt werden, dass der angewandte Klimawechselfesttest, der bislang im Bereich von Holzwerkstoffen nicht angewandt wird, sehr gut geeignete ist, um in Untersuchungen zu diesem Themenbereich eingesetzt zu werden. Somit wird diese Art der Klimabelastung für zukünftige Untersuchungen empfohlen.

### ***II.1.9 Energetische & ökologische Bewertung***

Zur ökologischen Bewertung von Produkten wird die Methode der Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 bis 14044 als Werkzeug national und international seit vielen Jahren erfolgreich in Industrie und Forschung angewandt. Mit ihrer Hilfe lassen sich Produkte aus Sicht der Umwelt verlässlich über so genannte Indikatoren, d.h. die jeweiligen ökologischen Auswirkungen auf ausgewählte Umweltschutzziele (z.B. Treibhauseffekt, Sommersmog, Versauerung) einordnen. Im Rahmen des Projektes sollte vornehmlich eine Wirkungsabschätzung und Auswertung der ökologischen & energetischen Eigenschaften in Bezug auf holzbasierte Multimaterialsysteme sowie die „Konkurrenzmaterialien“ Stahlblech (klassischer Karosseriebauwerkstoff) und Aluminium-Mix (klassischer Leichtbauwerkstoff) erfolgen. Da die Analyse möglichst universell einsetzbar sein sollte, wurde festgelegt, die Systemgrenzen im Bereich „cradle to gate“ festzulegen, also von der Bereitstellung der Rohstoffe bis zum Werkstor (Ausgang) der Produktion.

Vor diesem Hintergrund wurde ein VBA-basiertes Ökobilanzierungstool erstellt, mit dem es möglich ist, produktbezogene Ökobilanzen zu erstellen. Mit dem Tool können verschiedene Materialvariationen bilanziert werden, die dann dem Benutzer ermöglichen festzustellen, mit welchen Parametern die Produktherstellung möglichst geringe Auswirkungen auf die Umwelt hat. Dabei können im Tool sowohl Rohstoff-, Produktions- und Energiedaten als auch Werte der Umweltwirkungen einfach aktualisiert werden. Auch die Bestimmung der festgelegten Wirkungskategorien in Abhängigkeit der neu gefertigten Produkte ist mit Hilfe der Erweiterung der Datenparameter möglich.

Hierzu wurde zunächst eine Einteilung in ein Vordergrund- und ein Hintergrundsystem vorgenommen (siehe Abbildung 44).



**Abbildung 44: Einteilung des Systemraums in ein Vordergrund- und ein Hintergrundsystem.**

Durch die Primärdatenerhebung wurden die wesentlichen Teile des Vordergrundsystems mit spezifischen Datensätzen einzelner Hersteller abgedeckt, während das Hintergrundsystem mit Durchschnittsdaten aus vorhandenen Veröffentlichungen oder Datenbanken unterbaut wurde.

Mit dem Ökobilanz-Tool ist eine Vergleichsmöglichkeit bezüglich der ökologischen Gesichtspunkte Treibhausgaspotenzial, Ozonabbaupotenzial, Versauerungspotenzial, Eutrophierungspotenzial, Primärenergie und Abfälle zwischen holzbasierten MMS und anderen Materialien erstellt worden. Die Ergebnisse der Ökobilanzierung können dabei einerseits als Grundlage für die Auswahl eines Produktes und andererseits als Optimierungsmaßnahme eines Produktionsprozesses dienen. Um eine möglichst gute und anschauliche Vergleichsanalyse zu erstellen, wurde die Dateneingabe im Tool für zwei Varianten dargestellt (siehe Abbildung 45).

Abbildung 45: Formular zur Erstellung der Ökobilanzierung

Diese beiden Varianten müssen vom Nutzer definiert werden, z.B. Bauteilvariante aus Stahl und Bauteilvariante aus verstärkten holzbasierten MMS. Die anschließende Berechnung der Umweltauswirkung der Produkte wird nach DIN EN ISO 14040/44 durchgeführt. Bei den für die Berechnung erforderlichen Kennzahlen der Sperrholz-, Stahl- und Aluminiumherstellung wurde auf Durchschnittswerte aus der Datenbank des Umweltbundesamtes (ProBas) zurückgegriffen.

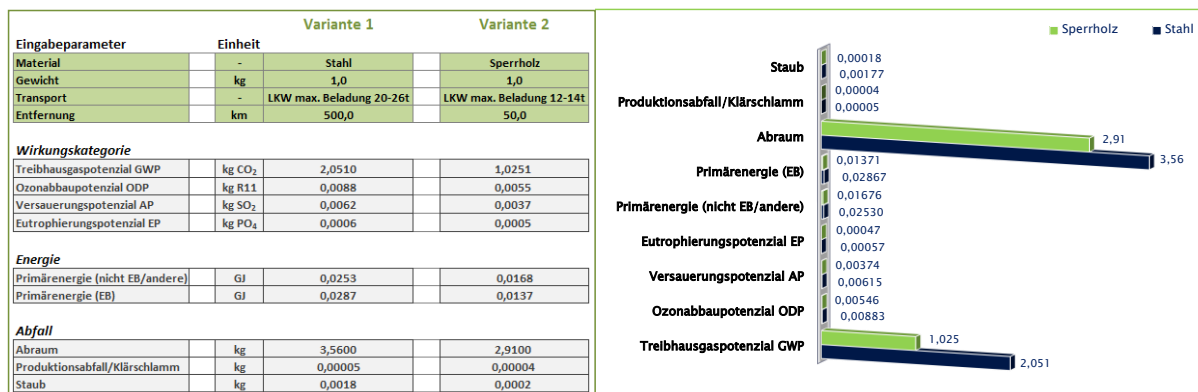


Abbildung 46: Auswertungsergebnis Ökobilanzierung: Übersichtstabelle (links) und detaillierte Diagrammauswertung (rechts)

Die Ergebnisse werden, wie in Abbildung 46 beispielhaft dargestellt, für beide Varianten in Form einer Übersichtstabelle sowie als detailliertes Balkendiagramm gegenübergestellt und ermöglichen somit die selbstständige Erstellung von Ökobilanzen speziell für holzbasierte MMS sowie verschiedene „Konkurrenz-Varianten“.

Für zukünftige Untersuchungen kann das Ökobilanz-Tool um weitere Schritte des Produktionsprozesses, wie z.B. Nutzung und Entsorgung, erweitert werden.

### II.1.10 Finaler Demonstrator

Die Konsolidierung aller wesentlichen Ergebnisse erfolgte im finalen Demonstratorbauteil. Basis des Demonstrators ist ein Seitenaufprallträger innerhalb der Fahrer- bzw. Beifahrertür eines aktuellen Mittelklasse-PKW (siehe Abbildung 3). Da eine 1:1-Substitution der Materialien

für die vorliegende Geometrie nicht zweckmäßig bzw. hinsichtlich der Umformgrade nicht möglich war, wurde in einem iterativen Prozess auf Basis von Materialkennwerten, Erfahrungen und ersten Simulationen, gemeinsam im Verbund, die Geometrie in Abbildung 47 erarbeitet.



**Abbildung 47: Grundaufbau für den finalen Demonstrator bestehend aus Welle und Deckel [Quelle: Fa. Becker].**

Die Strebe hat als Grundform eine umformtechnisch realisierbare Wellenform. Diese Welle wird von einem zweiten, separat gepressten „Deckel“ geschlossen. Somit wurde ein 3-stufiger Herstellprozess notwendig, bestehend aus Pressen der Welle, Pressen des Deckels und Fügen/Verpressen der beiden Teile miteinander. Die entsprechenden Werkzeuge wurden in Absprache mit den Projektpartnern von der Fa. Becker entwickelt (siehe Schlussbericht Fa. Becker)

#### II.1.10.1 Anbindungsgeometrien

Hinsichtlich der Anbindungsstrategie des Demonstrators an die Fahrzeugtür, war es das Ziel, zunächst keine Änderung der Fügestrategie in der automobilen Fertigungskette herbeizuführen um somit die starren Montageprozessketten nicht zu stören. Die Forderung, feste Strukturen im Automobilbau aufbrechen zu müssen, würde eine Einsatzbereitschaft innovativer Teile auf Basis neuer Rohstoffe deutlich verringern.

Vor diesem Hintergrund wurde die Strategie entwickelt, Metallanschlussflanschen, welche aus Abschnitten der originalen Metallstrebe hergestellt wurden, einzulaminieren (siehe Abbildung 48 und Abbildung 49). Hierdurch können die ursprünglichen Anbindungspunkte und die ursprünglichen Fügeverfahren von Metallstrebe und Türrahmen im Montageprozess beibehalten werden.



Abbildung 48: Beschnitt der Originalstrebe mittels Laser

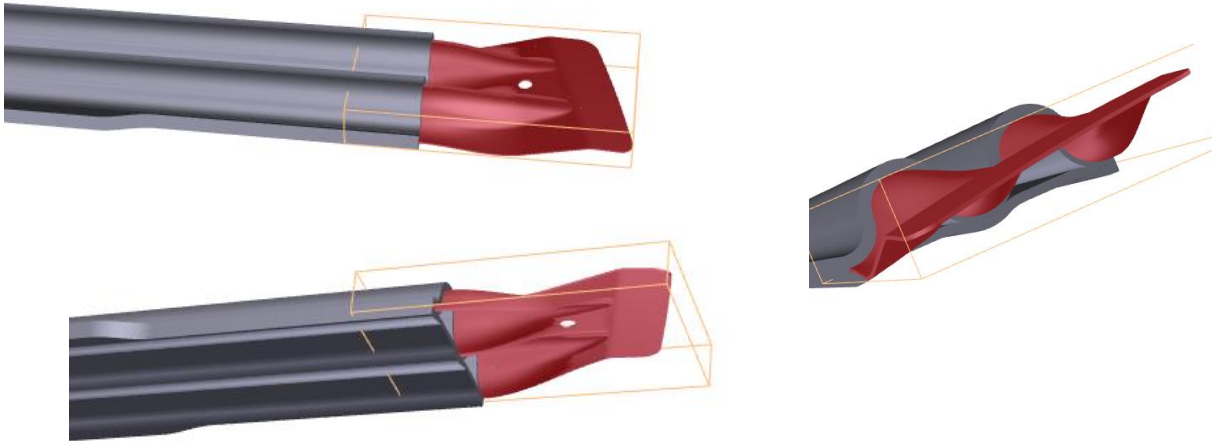


Abbildung 49: Anbindungsstrategie: Ein umgeformter Abschnitt des Originalbauteils als Inlay im Holzverbund [Quelle: Fa. Becker].

Dementsprechend zeigt Abbildung 49 einen auf den Holzquerschnitt umgeformten Abschnitt der originalen Metallstrebe, welcher als Inlay in den Holzverbund eingebracht wird. Ein entsprechendes Umformwerkzeug wurde gemeinsam mit dem Projektpartner Becker KG erarbeitet und hergestellt (siehe Schlussbericht Fa. Becker).

Abbildung 50 zeigt die einzelnen Komponenten des Demonstrators in der CAD-Explosionszeichnung.

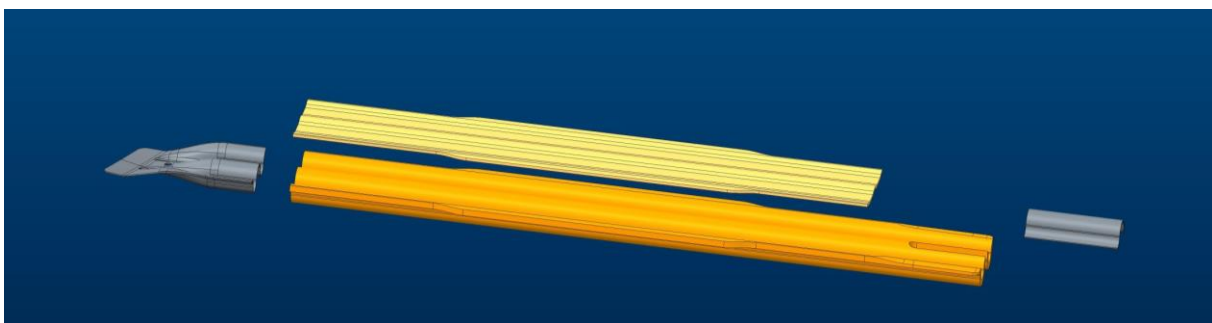


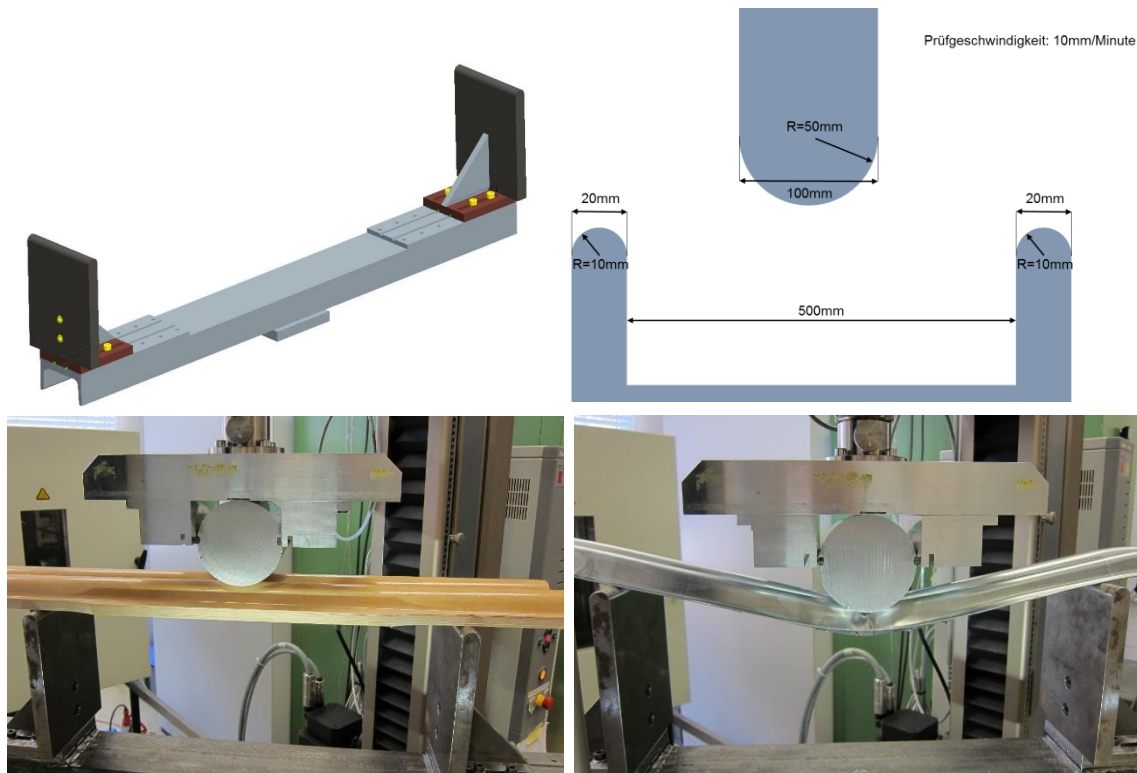
Abbildung 50: Explosionsdarstellung finales Demonstratorkonzepts [Quelle: Fa. Becker].

### II.1.10.2 Materialverbundgestaltung und Prüfung

Die Entwicklung, Herstellung und Prüfung des Demonstrators erfolgte iterativ über unterschiedliche Aufbauvarianten über insgesamt 6 übergeordnete Serien. Über die Serien hinweg erfolgte eine evolutarische Weiterentwicklung des Verbunds auf Basis von Prüfergebnissen, Produktionsprozessoptimierungen und Erkenntnissen aus dem simulatorischen Ansatz.

Basis der Überprüfung der einzelnen Verbundaufbauten war eine (mit der originalen Stahlgeometrie) vergleichende Ermittlung der quasi-statischen Reaktionskraft durch eine 3-Punkt-Biegeprüfung an 750mm langen Profilen, siehe Abbildung 51. Es wurde ein Auflagerabstand von 500 mm gewählt und mit einer Geschwindigkeit von 10 mm/Minute geprüft. Der obere Druckstempel wurde mit einem Radius von  $R=50$  bewusst hoch gewählt, da die spätere Belastungssituation des Bauteils im Automobil tendenziell großflächig ist.

Die Herstellung der Streben erfolgte gemeinschaftlich durch die Universität Kassel und Fa. Becker in den Produktionsräumen bzw. mittels der Anlagen der Fa. Becker. Die Materialbereitstellung erfolgte durch beide Partner.



**Abbildung 51: Prüfeinrichtung und Prüfaufbau quasi-statische 3-Punkt-Biegeprüfung. Oben: Die Vorrichtung inkl. Konfiguration. Unten: Vergleichende Prüfungen von Stahlstrebe und Holzprofil.**

Über die Versuchsserien hinweg konnten somit verschiedene Hypothesen überprüft sowie das Materialmodell weiterentwickelt werden. Insbesondere auch durch die zusätzliche Erarbeitung und Erstellung von reinen Holzaufbauten für Welle bzw. Deckel in Kombination mit verstärkten Varianten konnten die Erkenntnisse aus den Arbeiten zum verstärkten Formholz auf Bauteilebene übertragen bzw. überprüft werden.

Weiterhin wurden im Verlauf der Untersuchungen verschiedene Produktionseinflüsse identifiziert, welche signifikante Auswirkung auf die Qualität und damit auf die Performance der Bauteile haben.

Durch dieses iterative Vorgehen konnte ein Verbundaufbau entwickelt werden, der in der quasi-statischen Performance hinsichtlich der 750 mm-Abschnitte sehr gute Werte lieferte (siehe Abbildung 52). Dieser Entwicklungsweg, der dazu führte, ein Naturmaterial in einem ersten wissenschaftlichen Ansatz so zu ertüchtigen, dass ein derartiges Bauteil konkurrierende

Werte zu einem warmumgeformten Serienbauteil liefern kann, ist an dieser Stelle als sehr erfolgreich anzusehen.

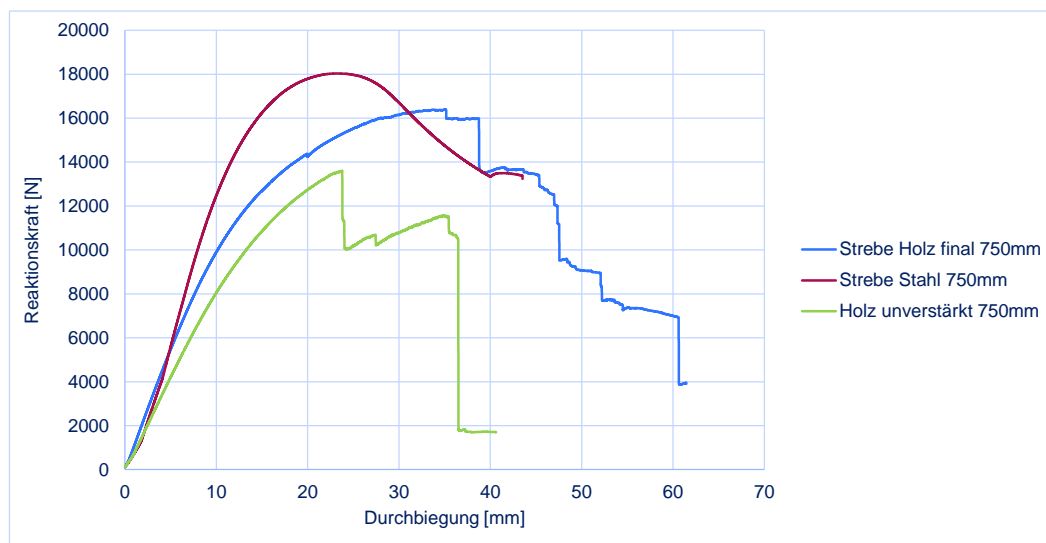


Abbildung 52: Reaktionskräfte in der quasi-statischen 3-Punkt-Biegeprüfung an 750mm-Abschnitten

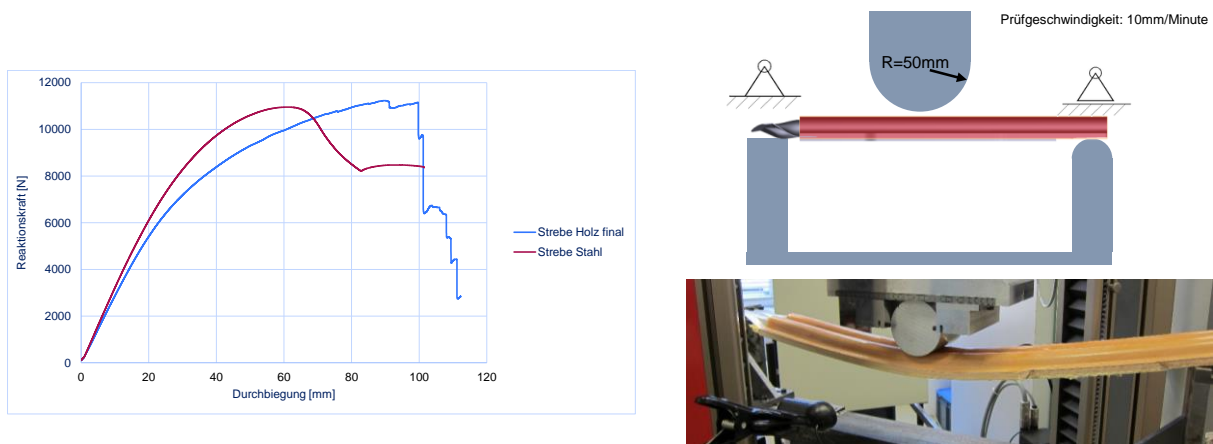
### II.1.10.3 Herstellung und Charakterisierung des finalen Bauteils

Nachdem der Verbund als solcher entwickelt und als geeignet eingestuft wurde, konnte im entsprechenden Verbund-Design der Demonstrator als Bauteil, inklusive Anbindungsflansche, hergestellt und geprüft werden.



Abbildung 53: Eindrücke der Herstellung eines Demonstratorbauteils.

Abbildung 53 gibt einen Einblick in die Herstellung eines Demonstratorbauteils. Neben der Vorbereitung der Verstärkungsmaterialien (nicht im Bild), mussten die Anbindungsflansche umgeformt, gereinigt und vorbehandelt werden. Der Aufbau des zu pressenden Stapels erfolgte je nach Lagenart unterschiedlich. So wurden die reinen Holzurniere über eine Rollenwalze beleimt, die Metalleinlagen von Hand gereinigt und geprimert sowie die Textileinlagen ebenfalls händisch mit unterschiedlichen Klebstoffen durchtränkt. Im anschließenden Pressprozess wurden die Anbindungsflansche nach einem Vorpress-Schritt eingelegt und somit die Bauteilkomponente Welle erzeugt.



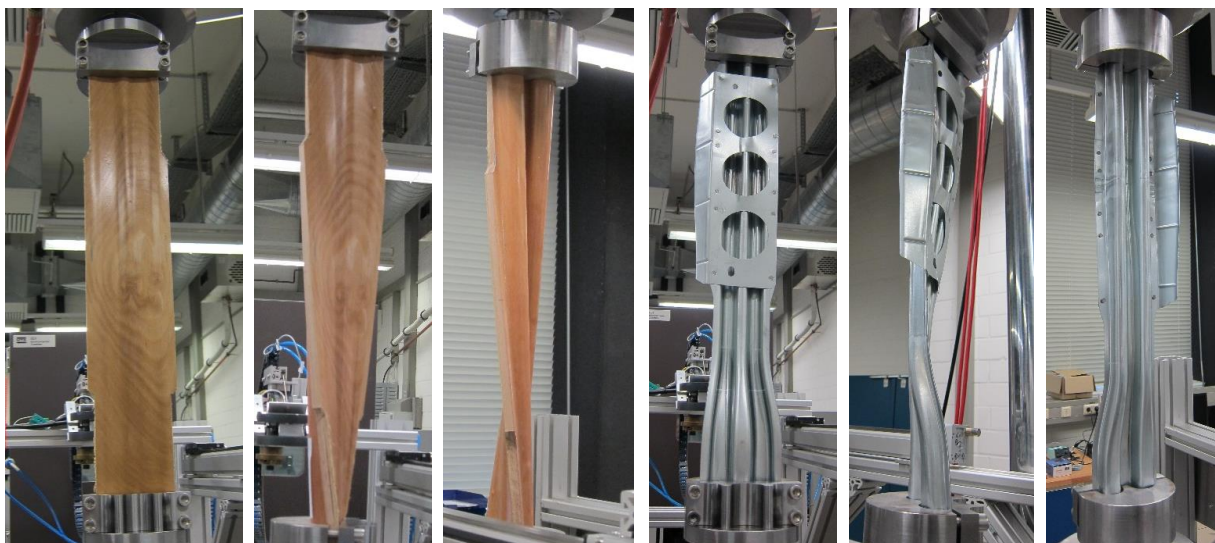
**Abbildung 54: Quasi-statische 3-Punkt-Biegeprüfung an Gesamtbauteilen: Links: Reaktionskräfte. Rechts: Konfiguration der Prüfung**

Abbildung 54 zeigt die Prüfung des Gesamtbauteils. Diese quasi-statische 3-Punkt-Biegeprüfung verlief analog zur Prüfung an den 750 mm-Abschnitten und entspricht der bei der Firma Volkswagen AG durchgeführten Qualifikationsprüfung für entsprechende Bauteile.

Ergebnis der Prüfung war, dass über die gesamte Bauteillänge, inkl. Flansch, die verstärkte Holzstrebe eine höhere maximale quasi-statische Last als die originale Serienstrebe erträgt (Stahl: 10.950N, Holz-MMS: 11.230N)!

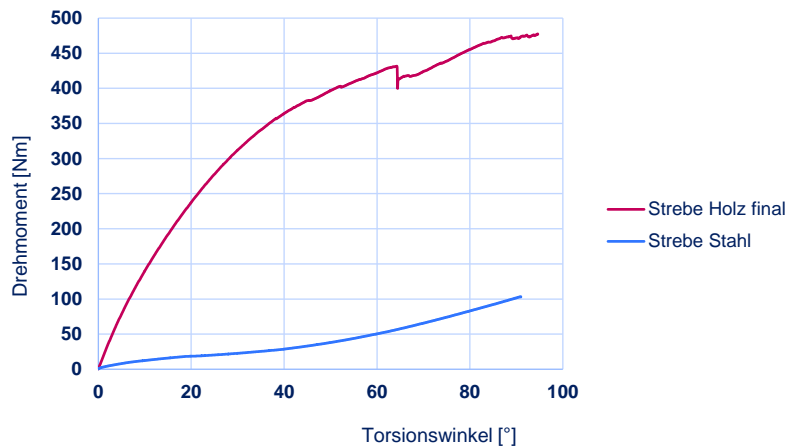
Somit konnte nach einem umfangreichen Entwicklungsprozess nicht nur der finale Verbundaufbau als grundsätzlich geeignet qualifiziert werden, sondern auch hinsichtlich der – aus Materialsicht nicht optimalen – Anbindungsstrategie, welche vor dem Hintergrund der Prozesskette bewusst gewählt wurde, ein positives Resümee gezogen werden.

Zusätzlich zur 3-Punkt-Biegeprüfung wurden flankierende Torsionsprüfungen (siehe Abbildung 55) durchgeführt. Diese sind auf Basis der Tatsache, dass das (originale) Bauteil nicht primär auf Torsion ausgelegt ist, als Ergänzung zu betrachten.



**Abbildung 55: Holz- und Stahlstrebe in Form von 750mm-Abschnitten jeweils in der Torsionsprüfung**



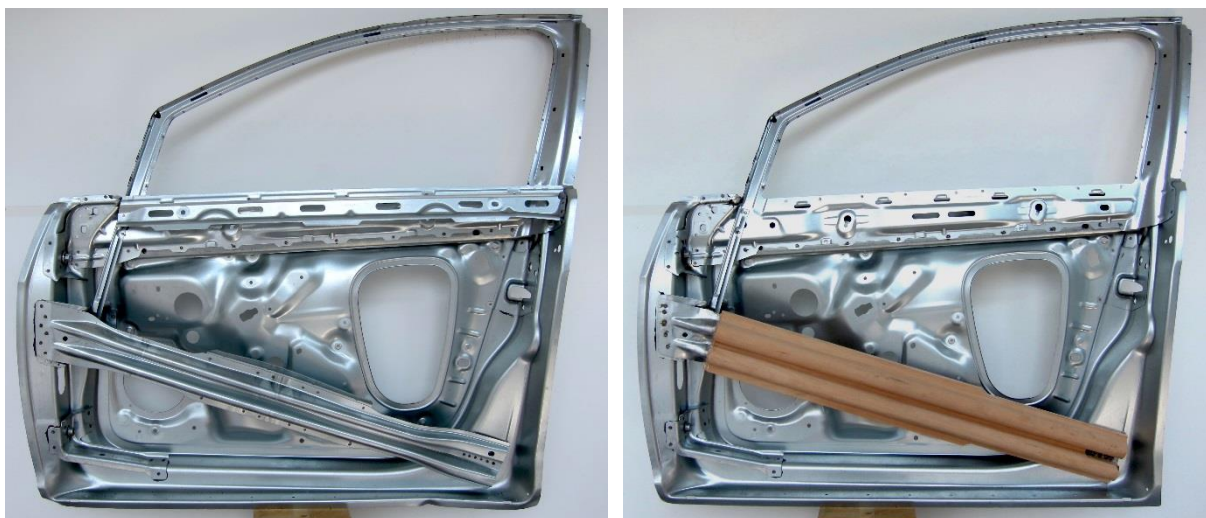


**Abbildung 56: Drehmomentenverlauf der Holz- bzw. Stahlstrebe bis zu einem Torsionswinkel von 90°**

Die Prüfungen zeigten eine plastische Deformation der Stahlbauteile. Die Holzbauteile wiesen ebenfalls eine plastische Deformation sowie vereinzelt „Delaminationen“ auf; ein Komplettbruch wurde auch bei einem Torsionswinkel von 90° nicht erreicht. Der deutlich bessere Torsionswiderstand der Holzvariante ist auf das deutlich größere Volumen (Flächenträgheit), zurückzuführen, zeigt jedoch perspektivisch signifikantes Potenzial von Holz für torsionsbelastete Bauteile!

#### II.1.10.4 Fazit der Demonstratorerstellung

Als Fazit der Demonstratorerstellung kann festgehalten werden, dass das Forschungs- und Entwicklungs-Vorgehen im Rahmen dieses ersten Ansatzes zum Thema ‚Holz als technischer Werkstoff‘ als grundsätzlich positiv einzustufen ist. Fokus der Entwicklung war primär die mechanische Ertüchtigung des Naturwerkstoffs Holz auf Basis einer Vergleichsuntersuchung mit einem Serienbauteil. Dabei zeigte sich, dass bei der relevanten quasi-statischen Bauteilprüfung die Holzstrebe eine bessere Performance als das originale Stahlbauteil liefern konnte. Trotz der nicht optimalen Anbindungsstrategie, war die Umsetzung des Konzepts erfolgreich, wenn gleich die Herstellung der Teile im Rahmen von Laborversuchen als sehr aufwändig zu bewerten ist.



**Abbildung 57: Rohbautür mit Seitenaufprallträger: original (links) und mit integriertem Seitenaufprallträger aus holzbasiertem Multimaterialsystem (rechts).**

Abbildung 57 zeigt eine direkte Gegenüberstellung des originalen Seitenaufprallträgers und des holzbasierten Demonstrators jeweils gefügt in einer Rohbautür.

Das Gewicht des Stahlbauteils (1,9kg) wurde zwar um knapp 400g übertroffen, jedoch waren erste Ansätze zur Gewichtsreduktion erfolgreich und es ist aus Sicht des Konsortiums noch ausreichend Optimierungspotenzial vorhanden, zukünftig auf mindestens gleiches Gewicht zu reduzieren. Darüber hinaus war es in diesem ersten Ansatz nicht das primäre Ziel, ein strukturelles Serienbauteil sowohl hinsichtlich Performance als auch Gewicht durch den Naturwerkstoff Holz zu optimieren.

### **II.1.11 Gesamtfazit**

Das Projekt HAMMER war das erste Forschungsprojekt, welches einen ersten systematischen Ansatz zur Integration von Holz in strukturellen technischen Anwendungen im Automobilbau betrachtete. Eine wichtige Grundlage war die ganzheitliche Betrachtung des Themenfelds, wodurch sich das Projekt von vielen Designstudien und Conceptcar-Projekten unterscheidet. Insbesondere der gewählte Ansatz, über eine pragmatische Betrachtung der verschiedenen relevanten Themenbereiche (auch Randbereiche), den wissenschaftlichen und technischen Stand hinsichtlich konkreter Anwendungen und allgemeiner Erkenntnisse zu erweitern, wird abschließend als erfolgreich angesehen. Vor diesem Hintergrund können folgende technische Ergebnisse zusammengefasst werden:

- Die erarbeiteten Holzbauteile/Werkstoffverbunde zeigten in bauteilvergleichenden Tests eine Konkurrenzfähigkeit gegenüber etablierten und technologisch hochentwickelten Metallbauteilen
- Es wurden Lösungen bzw. Lösungsansätze für wesentliche Schwerpunkte der Thematik erarbeitet und untersucht:
  - Anbindungsmöglichkeiten an die Gesamtstruktur
  - Möglichkeiten zur Erlangung einer Dauerbeständigkeit des Materials im Einsatzumfeld
- Entwicklung des Ansatzes holzbasierter MMS sowie Charakterisierung verschiedener Verbunde, welche als Grundsysteme für künftige Einsatzfelder dienen können
- Erarbeitung und Betrachtung von notwendigen Randthemen, u.a.
  - Reparaturkonzepte
  - Recyclingkonzept
  - KTL-Fähigkeit
  - Produktionsprozesstoleranzen
- Über den speziellen Einsatz hinaus, konnte eine Erweiterung des wissenschaftlichen Kenntnisstandes zum Thema Formholz erarbeitet werden. Insbesondere hinsichtlich des Verformungsverhaltens wurde der erfahrungsgeprägte Wissensstand erweitert. Hinsichtlich der Formtreue und Reproduzierbarkeit von Formholz wurden systematische Untersuchungen angestellt, welche den Stand der Technik erweitern.

In Bezug auf die übergeordneten Projektziele kann festgestellt werden:

Es wurden erfolgreich geeignete Fahrzeugkomponenten identifiziert, ausgelegt und gefertigt.

Die Weiterentwicklung von Holzformteilen zu alternativen, innovativen und nachhaltigen Multimaterialsystemen (MMS) wurde begonnen und auf einen ersten systematischen Stand gehoben. Die Charakterisierung unterschiedlicher Verbunde hat das vorhergesagte Potenzial aufgezeigt.

Über das gesamte Projekt hinweg wurden Werkstoff- und Bauteilkennwerten ermittelt und entsprechend eingesetzt.

Mögliche Technologien zur Einbindung von holzbasierten Bauteilen in Gesamtfahrzeugstrukturen bei möglichst geringer Beeinflussung der Prozessketten wurden erforscht.

Es konnten Reparaturkonzepte erarbeitet und erfolgreich verifiziert werden. Ebenso wurde ein realistisches Recyclingkonzept vorgelegt, welches Potenzial auch für große Stückzahlen besitzt.

Somit wurde das Projekt HAMMER erfolgreich im Sinne der Erfüllung aller ursprünglichen Ziele abgeschlossen.

## **II.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Als Fachgebiet einer öffentlichen Universität war der Fördermittelempfänger auf eine Finanzierung angewiesen, da von Universitätsseite keine ausreichenden Mittel für ein Forschungsvorhaben in dieser Größenordnung vorhanden war. Weiterhin gab es in Bezug auf die inhaltliche Ausrichtung des Projektes kein vergleichbares öffentliches oder industrielles Förderprogramm.

## **II.3 Verwertung**

### **II.3.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten**

Holz wird seit über 75 Jahren nicht mehr strukturell in Fahrzeugstrukturen eingesetzt. Somit sind hiermit Chancen und Risiken verbunden. Zum einen wurden Fahrzeugen bereits strukturell mit Holzstrukturen aufgebaut, hier vor allem im Bereich Nutzfahrzeug- und Busbau, zum anderen ist aber die Entwicklung von Fahrzeugstrukturen vor allem in den letzten dreißig Jahren äußerst intensiv vorangetrieben worden. So ist z.B. die fortschreitende Werkstoffpalette durch neue Stahl- und Aluminiumlegierungen und deren Verarbeitung in der Lage (Tailored Blanks, profilintensive Bauweisen, Space Frame, etc.) eigenschaftsoptimierte extrem leichte aber trotzdem auch äußerst sichere Strukturen zu bauen. Die Anforderungen an Fahrzeugstrukturen durch mögliche Fahrgeschwindigkeiten an die Steifigkeit im dynamischen und im hochdynamischen Bereich sind im Vergleich zur Ära der Holzstrukturen einen Quantensprung weiter. Auch hat sich die Technik der Herstellung von Holzverbundwerkstoffen in Form von Formholz (Schichtholz und Sperrholz) in den letzten Jahren nicht wesentlich geändert. Andererseits wird derzeit intensiv über den Einsatz von CFK und GFK (Langfaser, bzw. Textil verstärkte, Kurzfaser verstärkte Bauteile gibt es im Außenhautbereich bereits, sie haben aber nur geringe strukturelle Bedeutung) im Strukturbau nachgedacht. Hier sind die Produktionstechnologien noch deutlich nicht für mittlere und große Fahrzeugserien geeignet und die Herstellung der Werkstoffe ist weder ressourceneffizient noch nachhaltig. Die holzbasierten MMS basieren zwar auf den konventionellen Technologien zur Herstellung von Formholz, aber durch die Möglichkeit dort - wie bisher in der Regel noch nicht benötigt - auch Nicht-Holzwerkstoffe eigenschaftsoptimiert einzulaminieren, können Bauteile hergestellt werden, die GFK und CFK in den Eigenschaften ähneln, aber CO<sub>2</sub> neutral, nachhaltig und ressourceneffizient sind.

Die erzielten Projektergebnisse bieten eine erste systematische Potenzialabschätzung, welche notwendige Grundlage für zukünftige Einsatzmöglichkeiten von holzbasierten Materialsystemen in technischen Anwendungen ist. Weiterhin können die Erfahrungen des Projektes helfen, bestehende Produkte deutlich zu verbessern. Die im Projekt erforschten holzbasierten MMS ermöglichen gerade kleinen und mittelständigen Unternehmen aufgrund ihrer hohen Flexibilität, diese für neu entstehende Märkte zu nutzen

### ***II.3.2 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten***

Speziell die von der Universität Kassel durchgeführten Forschungsarbeiten im Bereich der Erarbeitung von holzbasierten MMS können richtungweisend für den zukünftigen Einsatz des Naturwerkstoffs Holz in weiteren Industriebereichen sein. Die angestrebten Ergebnisse ermöglichen den Einsatz von Holz bei strukturellen und sicherheitsrelevanten Bauteilen in verschiedensten Bereichen. Diese werden neben dem Automobilebereich, in dem weitere Anwendungen ermöglicht werden können, in den Bereichen Maschinenbau, Schienenfahrzeugbau und Luftfahrtindustrie liegen.

### ***II.3.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit***

Das Fachgebiet tff der Universität Kassel hat sich im Bereich Fahrzeugproduktion und Füge-technik für den Rohbau Kompetenz mit dem nachhaltigen Rohstoff Holz erarbeitet. Dieser Werkstoff kann als MMS durchaus auch für andere Leichtbauanwendungen im Bereich Flugzeugbau oder im Maschinenbau von Interesse sein. Weiterhin wird die Einbindung der Ergebnisse in die Lehrveranstaltungen des Fachgebiets zur Transferierung des Wissens in die nachfolgende Ingenieursgenerationen erfolgen.

Resultierend aus der Möglichkeit Holz verstärkt strukturell einsetzen zu können, werden sich neue wissenschaftliche und technische Fragestellungen in den Bereichen Ökologie sowie Wirtschaftlichkeit/ Energieeffizienz ergeben. Der Einsatz von holzbasierten MMS in Fahrzeugstrukturen ermöglicht die Nutzung nachwachsender, preisgünstiger und nicht-fossiler Rohstoffe, die sowohl in der Erzeugung (Carbon Footprint: positiv) als auch in den Produkten selbst (Leichtbau: ressourceneffiziente Strukturen, die weniger Kraftstoff verbrauchen) und einer anschließenden Verwertung (stofflich oder thermisch: Carbon Footprint: neutral) ökologisch und auch wirtschaftlich äußerst attraktiv sind.

Das BMBF-Projekt HAMMER wird Basis und Ausgangspunkt für ein Nachfolgeprojekt im Rahmen einer Förderung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie sein. Innerhalb der Förderbekanntmachung „Leichtbaukonzepte für Straßen- und Schienenfahrzeuge“ innerhalb des BMWi-Fachprogramms „Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien“ soll Anfang 2017 das Verbundprojekt „Strukturbaugruppen auf Basis nachhaltiger holzbasierter Materialsysteme zur Reduzierung von Masse und Umweltauswirkungen im Straßen- und Schienenfahrzeugbau (For(s)tschritt)“ starten. Durch dieses angestrebte Projekt sollen die Erkenntnisse des abgeschlossenen Projekts HAMMER um mindestens 2 TRL-Stufen erhöht und damit direkt wirtschaftlich nutzbar gemacht werden. Das Projektkonsortium für das BMWi-Projekt For(s)tschritt besteht aus folgenden Partnern: Volkswagen Aktiengesellschaft, ALSTOM Transport Deutschland GmbH, Gebr. Bode GmbH & Co. KG, Siebenwurst Werkzeugbau GmbH, Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH, Rohtech-DST GmbH, Fraunhofer Institut für Holzforschung (WKI), Universität Kassel, Fachgebiet Trennende und Fügende Fertigungsverfahren (FG tff) und Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Fahrzeugkonzepte, Leichtbau und Hybridbauweisen.

## **II.4 Erkenntnisse von Dritten**

Es sind keine Erkenntnisse von dritter Seite bekannt geworden, die das Vorhaben direkt betreffen. Allerdings sind Ergebnisse/ Darstellungen bekannt geworden, die die Intention und Erfolgsaussichten des Vorhabens stützen und somit die Berechtigung der Forschung an diesem Thema untermauern. So wurde z.B. im Rahmen eines Studentenprojekts der Universität Merseburg, der TU Chemnitz und der Hochschule für Kunst und Design Burg Halle ein Concept-Car eines Elektroholzautos mit Elementen aus Holzwerkstoffen entworfen (siehe Abbildung 58 links). Ein anderes Beispiel ist das Setsuna Concept von Toyota, welches mit Hilfe einer traditionellen japanischen Tischler-Technik per Hand aus Holz gefertigt wurde (siehe Abbildung 58 rechts).



**Abbildung 58: Beispiele Holz im Fahrzeugbau: Links: Studentenprojekt Concept-Car eines Elektroholzautos mit Elementen aus Holzwerkstoffen, Rechts: Toyota Setsuna Concept [Quellen: Uni Merseburg/TU Chemnitz/HS Halle; Toyota]**

## **II.5 Veröffentlichungen, Vorträge, öffentliche Darstellung, Pressespiegel**

### **II.5.1 Vorträge und Veröffentlichungen**

Veröffentlichung und Vortrag auf der Konferenz Adhesion Society 2013 in Daytona Beach, USA: Kohl, Daniel; Million, Maximilian; Böhm, Stefan: Adhesive bonded wood-textile-compounds as potentially new eco-friendly and sustainable high-tech materials. In: Annual Meeting of the Adhesion Society 2013, Red Hook, 2013. ISBN: 978-1-62748-137-3.

Vortrag auf dem 3. Doktorandenseminar der Klebtechnik 2012: Kohl, Daniel; Böhm, Stefan: „Holzbasierte Multimaterialsysteme für den Einsatz im automobilen Rohbau.“, 05.-06. November 2012, Kassel.

Vortrag auf Bayern Innovativ Kooperationsforum „Holz als neuer Werkstoff“: Kohl, Daniel; Wicke, Tim; Alsmann, Michael; Böhm, Stefan: „Holz in der automobilen Karosserie“. 06. November 2013, Regensburg.

Veröffentlichung und Vortrag auf der Konferenz Adhesion Society 2014 in San Diego, USA: Kohl, Daniel; Flohr, Timo und Böhm, Stefan: “Adhesively Bonded Wood-Based Multi-Material Systems as a Sustainable Material for Technical Applications”, in Proceedings of The Adhesion Society, 37th Annual Meeting of the Adhesion Society, Red Hook, USA, 2014.

Veröffentlichung in der Fachzeitschrift „Holztechnologie“: Kohl, Daniel; Wicke, Tim; Alsmann, Michael; Böhm, Stefan: Holz in der modernen automobilen Karosserie. In: Holztechnologie 55 (6/2014).

Veröffentlichung in DVS-Berichte: Kohl, Daniel; Böhm, Stefan: „Holzbasierte Multimaterialsysteme für den Einsatz im automobilen Rohbau.“ DVS-Berichte Band 303, ISBN 978-3-87155-575-6, DVS Media GmbH Düsseldorf, 2014.

Vortrag beim BMBF Technologiegespräch 2014: Böhm, Stefan; Kohl, Daniel: „Holz als technischer Werkstoff im strukturellen Fahrzeugbau.“ BMBF Technologiegespräch "Neue Werkstoffe und Multimaterialbauweisen für innovative Leichtbauanwendungen", November 2014, Dresden.

Vortrag auf 14. Kolloquium Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik: Schelper, Joachim; Kohl, Daniel; Böhm, Stefan: „Holzformteile als Multi-Materialsysteme für den Einsatz im Fahrzeug-Rohbau“, 18.-19. Februar 2014, Frankfurt.

Vortrag auf 15. Kolloquium Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik: Kohl, Daniel; Böhm, Stefan: „Holzformteile als Multi-Materialsysteme für den Einsatz im Fahrzeug-Rohbau“, 03.-04. März 2015, Köln.

Vortrag auf Tagung Strategien des Karosseriebaus 2015: Böhm, Stefan; Kohl, Daniel: „Wood as a Structural Technical Material in Automobile Manufacturing“, 17.-18. März 2015, Bad Nauheim.

Vortrag auf Tagung Automobil Industrie Leichtbaugipfel 2015: Kohl, Daniel; Böhm, Stefan: „Holz als technischer Werkstoff im strukturellen Fahrzeugbau“, 10. - 11. März 2015, Würzburg.

Vortrag auf Tagung Landesagentur für Leichtbau Baden-Württemberg „Sprechstunde Leichtbau.Holz“: Kohl, Daniel; Beeh, Elmar: „Nutzungsmöglichkeiten von Holzwerkstoffen im Fahrzeugbau“, 07. Juli 2015, Ostfildern.

Vortrag auf 5. VDI Leichtbaukongress: Kohl, Daniel; Böhm, Stefan: „Holz als Chance für den strukturellen Leichtbau“, 07.-08. Juli 2015, Wien.

Vortrag im Rahmen des interdisziplinären Workshops Safe and Reliable Structures: Kohl, Daniel; Böhm, Stefan: „Holz als Werkstoff für technische Anwendungen“ 03. März 2016, Dalheim.

Veröffentlichung und Vortrag auf Global Conference on Sustainable Manufacturing 2015, Ho Chi Minh City, Vietnam: Kohl, Daniel; Link, Philipp; Böhm, Stefan: „Wood as a Technical Material for Structural Vehicle Components“ In Procedia CIRP 40 (2016) 557 – 561.

### **II.5.2 Präsentation auf Messen**

Präsentation des Projekts durch einen projektbezogenen Messestand auf der Sonderschau „ObjektDesign DesignObjekt“ des Fachverbands Schreinerhandwerk Bayern auf der Messe Holzhandwerk 2014 in Nürnberg.

Präsentation der Projektergebnisse auf dem Messestand des FG tff auf der Automotive Engineering Expo 2015 in Nürnberg.

Präsentation der Projektergebnisse auf dem Messestand des FG tff auf der EUROBLECH 2016 in Hannover.

### **II.5.3 Pressespiegel**

An folgenden Stellen konnten Berichterstattungen zum Projekt gefunden werden, welche sich auf persönliche Interviews, Pressemitteilungen der Universität Kassel und/oder sonstige veröffentlichte Informationen stützen:

#### **Print-Medien**

- VDI-Nachrichten; Ausführlicher Bericht zum Themenfeld und zum Projekt auf Basis von persönlichen Informationen durch die Projektbearbeiter
- P.M. Magazin; Ausführlicher Bericht zum Themenfeld und zum Projekt auf Basis von persönlichen Informationen durch die Projektbearbeiter
- Deutsches Handwerksblatt; Ausführlicher Bericht zum Themenfeld und zum Projekt auf Basis von persönlichen Informationen durch die Projektbearbeiter
- Handwerkermagazin Krafthand; Ausführlicher Bericht zum Themenfeld und zum Projekt auf Basis von persönlichen Informationen durch die Projektbearbeiter
- Hessische Niedersächsische Allgemeine (HNA); Ausführlicher Bericht zum Themenfeld und zum Projekt auf Basis von persönlichen Informationen durch die Projektbearbeiter

#### **Online-Medien**

- Spiegel-online; Kurzberichterstattung auf Basis von Pressemitteilungen
- Focus-online; Kurzberichterstattung auf Basis von Pressemitteilungen
- Welt-online; Kurzberichterstattung auf Basis von Pressemitteilungen
- Hamburger Abendblatt; Kurzberichterstattung auf Basis von Pressemitteilungen
- U.a.

#### **TV**

- ARD - Wissen vor 8 Zukunft; Erwähnung des Projekts in Themensendung
- n-tv; Filmsequenz auf Basis einer Pressemitteilung

#### **Radio**

- hr4 – Live-Interview mit Projektleiter D. Kohl
- radioeins – Live-Interview mit Projektleiter D. Kohl



## Literaturverzeichnis

- [Die12] Diederichs S; Rüter S: Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz. In: Arbeitsbericht aus dem Institut für Holztechnologie und Holzbiologie, Universität Hamburg, Hamburg, 2012.
- [DIN310] Norm DIN EN 310 (1993): Holzwerkstoffe - Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit.
- [DIN52377] Norm DIN 52377 (1978): Prüfung von Sperrholz - Bestimmung des Zug- Elastizitätsmoduls und der Zugfestigkeit.
- [Fuh05] Fuhrmann, T.; Hahn, O.: Tragverhalten geklebter CFK-Metall-Verbindungen im Automobilbau. Support characteristics of adhesion bonded carbon fibre reinforced plastics-metal composites in automotive applications. In 15. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, Kassel, 2005. S. 335-340.
- [Goe05] Goede, M; Dröder, K.: Forschungsbedarf und Lösungskonzepte zur Mischbauweise im automobilen Leichtbau. In: Berichtskolloquium der DFG-Forschergruppe 505 Hochleistungsfügetechnik für Hybridstrukturen, Garbsen, 2005. S. 1-6.
- [Kle11] Kleppmann, W.: Taschenbuch Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren. 2011.
- [Krö02] Kröplin, B.; Rudolph, S.; Alber, R.; Brückner, S.: Ansätze zur Modellbildung im Leichtbau (Modeling approaches for lightweight constructions), VDI Tagung Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau 2002, Würzburg, 2002.
- [Mes03] Meschut, G.; Friedrich, H.: Zukünftige Fügekonzepte für Automobilstrukturen in Mischbauweise. Dresdner Leichtbausymposium, 2003. S. 1-6.
- [Nie06] Niemz P.: Holzphysik. Vorlesungsskript. Institut für Baustoffe, Eidgenössische technische Hochschule Zürich, 2006.
- [See02] Seeliger, H.W.: Leichtbau im Automobil. In: Fraunhofer Magazin 4, 2002, S. 13.