

Schlussbericht

zum Vorhaben



Verbundprojekt:

Strukturbaugruppen auf Basis nachhaltiger holzbasierter Materialsysteme zur Reduzierung von Masse und Umweltauswirkungen im Straßen- und Schienenfahrzeugbau - Synonym: For(s)tschritt

Teilprojekt:

Entwicklung, Prüfung und Ertüchtigung holzbasierter Lagenwerkstoffe für Multi-Material-Systeme (MMS)

Zuwendungsempfänger:

Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut, WKI

Förderkennzeichen:

19116013I

Laufzeit:

01.03.2017 – 31.08.2020

Autoren:

Claudia Burgold, Dr. Dirk Berthold

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Verbundprojekt

Innerhalb der Förderbekanntmachung „Leichtbaukonzepte für Straßen- und Schienenfahrzeuge“ innerhalb des BMWi-Fachprogramms „Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien“

Strukturbaugruppen auf Basis nachhaltiger holzbasierter Materialsysteme zur Reduzierung von Masse und Umweltauswirkungen im Straßen- und Schienenfahrzeugbau (For(s)tschritt)

Dieses Forschungsprojekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert und vom Projektträger TÜV Rheinland Consulting GmbH betreut.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	VI
I. Aufgabenstellung	1
II. Voraussetzungen	5
III. Planung und Ablauf des Vorhabens.....	6
IV. Stand der Wissenschaft und Technik.....	10
V. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	14
VI. Erzielte Ergebnisse.....	15
VI.1 Holzlagenwerkstoffe mit metallischen Werkstoffen (AP4, AP7)	16
VI.2 Autoklavversuche als Machbarkeitsstudie für die Herstellung des Mock-Ups im Autoklav und Mock-Up Herstellung (AP6).....	22
VI.3 Emissionsuntersuchungen von unbehandelten und vorbehandelten Furnieren (AP6) 24	
VI.4 Fertigung von Hutprofilen (AP5, AP6, AP8, AP11)	33
VI.5 Pultrusion mit Holzfurnieren (AP6)	39
VI.6 Herstellung von Probelplatten zur Untersuchung akustischer Dämpfungseigenschaften sowie zur Erstellung einer Materialkarte (AP4).....	43
VI.7 Fertigungsuntersuchungen L-Träger (AP6, AP8, AP9)	44
VI.8 Herstellung von Trägern für 3-Punkt Biegeprüfung als Vorversuche für generisches Bauteil PKW (AP6, AP11).....	51
VI.9 Brandtechnische Untersuchungen (AP6).....	55
VI.9.1 Orientierende brandtechnische Prüfungen	55
VI.9.2 Brandtechnische Prüfungen nach DIN EN 45545-2 – Baugruppe „Schiene“ ...	66
VI.9.3 Brandtechnische Prüfungen nach DIN EN 45545-2 – Baugruppe Schiene „Tür“ 69	
VI.10 Zusammenfassung der Projektergebnisse	72
VII. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	74
VIII. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	74
IX. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	75

IX.1	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten	75
IX.2	Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten	75
IX.3	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	75
IX.4	Technologiereifegrade (Technology Readiness Level (TRL))	76
X.	Bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen	77
XI.	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	78
	Literaturverzeichnis	81

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Synergien in der Entwicklungskette für eine PKW-Dachstruktur (oben) und eine Schienenfahrzeugstruktur (unten).....	2
Abbildung 2:	Geplantes methodisches Vorgehen	7
Abbildung 3:	Splinter, entwickelt an der North Carolina State University, der nahezu vollständig in Holz gebaut wurde (links), 1981er Opel im Mix mit einem sedan/convertible hybrid, der von einem ukrainischen Privatmann zu einem „Holzfahrzeug“ umgebaut wurde (Mitte), 1952 Ariel Wood Car (rechts).....	11
Abbildung 4:	Erster Demonstrator Projekt HAMMER: Seitenverstärkungsstrebe eines Serien-PKW	12
Abbildung 5:	Ergebnis der bauteilvergleichenden Prüfung des HAMMER-Demonstrators mit dem äquivalenten Serienbauteil aus pressformgehärtetem Stahl.....	13
Abbildung 6:	Buchenschäl furniere	17
Abbildung 7:	Blech für Mittellage.....	17
Abbildung 8:	Lagenwerkstoff mit Blech als Mittellage.....	17
Abbildung 9:	3-lagiger Prüfkörper mit feuerverzinktem Blech als Mittellage	18
Abbildung 10:	3-lagiger Prüfkörper mit feuerverzinktem Blech als Mittellage, mikroskopische Aufnahme	18
Abbildung 11:	5-lagiger Prüfkörper mit feuerverzinktem Blech als Mittellage	19
Abbildung 12:	5-lagiger Prüfkörper mit feuerverzinktem Blech als Mittellage, mikroskopische Aufnahme	19
Abbildung 13:	Querzugfestigkeit von Lagenwerkstoffen vor und nach Zyklustest	20
Abbildung 14:	Prüfkörper mit feuerverzinktem Blech: alle Prüfkörper haben sich nach drei Tagen Kaltwasserlagerung vom Blech gelöst.....	20
Abbildung 15:	5-lagiges, unidirektionales LVL ohne Vorbehandlung: Verklebung versagt zum Joch.....	21
Abbildung 16:	5-lagiges, unidirektionales LVL nach Vorbehandlung: Verklebung versagt zum Joch.....	21
Abbildung 17:	Bombiertes Bauteil aus 11-lagigem Buchensperrholz sowie zwei metallischen Deckschichten, hergestellt im Autoklav (Foto: VOLKSWAGEN)	22

Abbildung 18:	Bombiertes Bauteil aus 11-lagigem Buchensperrholz sowie zwei metallischen Deckschichten, hergestellt im Autoklav, Nahaufnahme (Foto: VOLKSWAGEN)	22
Abbildung 19:	Bombiertes Bauteil aus 10-lagigem Buchensperrholz mit einer 0,2 mm starken metallischen Mittellage sowie zwei metallischen Deckschichten, hergestellt im Autoklav, Nahaufnahme (Foto: VOLKSWAGEN).....	23
Abbildung 20:	Buchenfurniere für die Emissionsprüfung, von links nach rechts: unbehandelt, acetyliert, thermisch modifiziert, KTL-behandelt.....	25
Abbildung 21:	Neunteilige Skala der hedonischen Wirkung	30
Abbildung 22:	Herstellungsprozess des Hutprofil-Holzkerns. A: Einlegen der mit Klebstoff bestrichenen Furnierlagen in das Werkzeug. B: Seitenansicht des Hutprofil-Werkzeugs beim Zusammenfahren während des Pressvorgangs. C: An den Längsseiten besäumter Holzkern.....	34
Abbildung 23:	Herstellung der Holz-Blech-Verklebung für das fertige Hutprofil. A: Klebstoffauftrag auf vorgeformte Bleche. B: In Werkzeug eingelegter Holz-Metall-Sandwich-Aufbau. C: Verpresstes Bauteil, unbesäumt. D: Fertiges Hutprofil mit metallischen Decklagen, besäumt.	35
Abbildung 24:	Nahaufnahme des Stringers; Furnierbasiertes Multimaterialformteil bestehend aus einem Holzkern und zwei Blechen als Außenlagen (Foto: Manuela Lingnau, Fraunhofer WKI)	36
Abbildung 25:	Fehlerfreies Stringer-Profil, fünf Lagen 1,5 mm Pappelfurnier gesperrt	37
Abbildung 26:	Stringer-Profil mit fünf Lagen 1,5 mm Buchenfurnier unidirektional gesperrt, an den Radien gebrochen	37
Abbildung 27:	Stringer-Profil mit vier Lagen 2,0 mm Hainbuchenfurnier unidirektional in Längsrichtung, weist Risse auf	38
Abbildung 28:	Pultrusionsanlage (Foto: David Löpitz, Fraunhofer IWU).....	40
Abbildung 29:	Blendenbereiche des Hohlprofils (David Löpitz, Fraunhofer IWU).....	41
Abbildung 30:	A: Einführung der mit UP-Harz getränkten Glasfasern und des getränkten Furnierbands in das Pultrusionswerkzeug. B: Pultrudiertes Hohlprofil am Werkzeugauslauf (Fotos: David Löpitz, Fraunhofer IWU)	42
Abbildung 31:	L-Profil mit gerissenen Furnierlagen nach Überverdichtung	44
Abbildung 32:	Unterwerkzeug mit modifiziertem Anschlag und Einleger für Verdichtung	45

Abbildung 33:	Pressvorgang des L-Profils. (A) Eingelegter Furnierstapel liegt auf den Schenkeln des Unterwerkzeugs auf und ohne Versatz am Anschlag an, (B) - (D) Zusammenfahren des Werkzeugs.....	46
Abbildung 34:	L-Profil mit Verdichtungszone. (A) gesamtes Bauteil, (B) verdichteter Bereich, (C) Innenradius mit intakten Furnierlagen, (D) und (E) gebrochene Furnierlagen im Übergangsbereich von Verdichtungszone zu nicht verdichtetem Bereich	47
Abbildung 35:	A - D: Fotos der L-Profile in den Varianten 1 - 4.....	50
Abbildung 36:	Profilgeometrie für den Zuschnitt der Träger zur 3-Punkt-Biegeprüfung (DLR)	52
Abbildung 37:	Trapezprofile für 3-Punkt-Biegeprüfung. A und B: Materialkonfiguration VW 4. B: Materialkonfiguration VW 4, der symmetrische Aufbau sowie Komplettteil und Halbzeug sind deutlich erkennbar. C: Materialkonfiguration VW 5. D: Materialkonfiguration VW 4 und VW 5 im Vergleich. E: Zu verklebende Seite der Blechstreifen mit zwei verschiedenen Lackierungen. F: Finales generisches Bauteil PKW; Trapezprofil Materialkonfiguration VW 4 mit Blech verklebt.....	53
Abbildung 38:	Abmessungen eines Probekörpers und Darstellung des Beflammungspunkts sowie der 150 mm-Markierung bei Flächenbeflammung.....	56
Abbildung 40:	A - J: Fotos der Probekörper nach dem Einzelflammentest.....	60
Abbildung 41:	A - F: Versagensbilder der Querdzugprüfung nach thermischer Belastung	64
Abbildung 42:	Probekörper nach 3 Minuten Beflammen mit Bunsenbrennerflamme	65
Abbildung 43:	Prüfkörper für die brandtechnischen Untersuchungen nach DIN EN 45545-2. A: Einzelne Komponenten (Rahmen, Hutprofile, Außenbleche) für die Herstellung der Prüfkörper zur Bestimmung der seitlichen Flammenausbreitung sowie Wärmefreisetzungsrates. B: Einzelne Komponenten der Prüfkörper zur Bestimmung der seitlichen Flammenausbreitung. C: Klebstoff 8 (Klebeband) und Klebstoff 10 (2K SE) aufgebracht. D: Klebstoff 8 (Klebeband) und Klebstoff 10 (2K SE) auf Probekörpern zur Bestimmung der Wärmefreisetzungsrates. E: Alle Probekörper zur Bestimmung der seitlichen Flammenausbreitung, Wärmefreisetzungsrates sowie Rauchgastoxizität und Rauchdichte, unlackiert. F: Alle Probekörper, lackiert. G: Probe zur Bestimmung der Wärmefreisetzungsrates im Querschnitt. (Fotos: J. Enge, Fa. Bode)	70

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht der Teilvorhaben	5
Tabelle 2:	Projektplan "For(s)tschritt.....	8
Tabelle 3:	Technischer & wirtschaftlicher Werkstoffvergleich [vgl. KLEIN, 2011 UND NIEMZ, 2006]	10
Tabelle 4:	Plattenparameter Lagenwerkstoffe mit metallischen Werkstoffen.....	16
Tabelle 5:	Ergebnisse der Emissionsprüfung von Probe "Buche unbehandelt"	26
Tabelle 6:	Ergebnisse der Emissionsprüfung von Probe "Buche thermisch modifiziert"	27
Tabelle 7:	Ergebnisse der Emissionsprüfung von Probe "Buche acetyliert"	27
Tabelle 8:	Ergebnisse der Emissionsprüfung von Probe "Buche unbehandelt gelüftet"	28
Tabelle 9:	Ergebnisse der Emissionsprüfung von Probe "Buche KTL-behandelt"	28
Tabelle 10:	Ergebnisse der leichtflüchtigen Aldehyde von unbehandeltem, thermisch modifiziertem und acetyliertem Buchenfurnier.....	29
Tabelle 11:	Ergebnisse der leichtflüchtigen Aldehyde von unbehandeltem gelüfteten sowie KTL-behandeltem Buchenfurnier.....	29
Tabelle 12:	Ergebnisse der Geruchsbewertung nach 48 h von unbehandeltem, thermisch modifiziertem und acetyliertem Buchenfurnier.....	31
Tabelle 13:	Ergebnisse der Geruchsbewertung nach 48 h von unbehandeltem gelüfteten sowie KTL-behandeltem Buchenfurnier	32
Tabelle 14:	Rovinganzahl für die drei Blendenbereiche in Abhängigkeit vom FVG (nach David Löpitz, Fraunhofer IWU)	41
Tabelle 15:	Versuchsplan zur Untersuchung der frequenzabhängigen Dämpfung (ud = unidirektional)	43
Tabelle 16:	Aufbau und Eigenschaften der hergestellten L-Profile.....	49
Tabelle 17:	Materialaufbauten Träger VW (B = Buchenfurnier).....	54
Tabelle 18:	Versuchsplan für orientierende brandtechnische Untersuchungen am WKI.....	57
Tabelle 19:	Ergebnisse des Einzelflammentest in Anlehnung an die DIN EN ISO 11925-2.....	58
Tabelle 20:	Ergebnisse der Querkzugfestigkeit nach thermischer Belastung.....	62

Tabelle 21:	Grenzwerte gemäß DIN EN 45545-2 für die Anforderungssätze R1 und R7 die Gefährdungsstufen HL1 – HL3.....	68
-------------	--	----

I. Aufgabenstellung

Ziel des Verbundprojekts For(s)tschritt war der Einsatz von holzbasierten Multimaterialsystemen als alternative, innovative und nachhaltige Leichtbaulösungen für flächige Strukturen, aber auch für lokale Verstärkungsbereiche und Tragstrukturen mit Holzlichtseite in Straßen- und Schienenfahrzeugen. Die ausgewählten Strukturbereiche sollten konzipiert, ausgelegt und im Rahmen von Prototypen gefertigt und erprobt werden. Durch die Kombination von Holzwerkstoffen mit technischen Materialien und der Herstellung eines Sandwichverbunds ist neben der mechanisch-technologischen Ertüchtigung auch ein Einsatz im Außenbereich möglich. Durch einen möglichst Ein-Schritt Press-/Umformprozess sollten die Verbunde gefügt und geformt werden und gleichzeitig mit einer endlackierten Metallbeplankung zu einem einsatzfähigen Bauteilmodul gefügt werden. Um solche Module vom Konzept zum Prototypen zu bringen sind neben der Bauteilauslegung, der Füge- und Modifikationsstrategieentwicklung, der Prüfung bauteilähnlicher Prüfkörper auch die Werkzeugentwicklung entscheidende Schritte. Parallel dazu sollten die simulativen Auslegungsmöglichkeiten von Holzstrukturen weiterentwickelt werden um eine spätere Übertragbarkeit der Projektergebnisse auf andere Branchen/Bauteile/Bereiche gewährleisten zu können. Anschließend an die statische, dynamische und hochdynamische Bauteilprüfung, -charakterisierung und -erprobung sollte das Technologie- und Produktionskonzept validiert, analysiert und bilanziert werden.

Tragstrukturen von Straßenfahrzeugen, Seitenstrukturen oder Dachstrukturen von Schienenfahrzeugen, sowie Schienenfahrzeugtüren, eignen sich aufgrund ihrer flächigen, wenig gekrümmten Ausgestaltung besonders, um die Vorteile einer neuen holzbasierten Sandwichbauweise zur Anwendung zu bringen. Hierbei werden dünne Stahlbleche als Außenhaut genutzt, und auf der Innenseite mit Holz-Schichtverbunden verstärkt.

Die parallele Bearbeitung von PKW-Bauteilen und Teilstrukturen eines Wagenkastens erlaubte die Nutzung von Synergieeffekten bei der Entwicklung. Dazu zählen z. B. die Bauteilsimulation und weiterführender Arbeiten im Bereich der Herstellprozessroute.

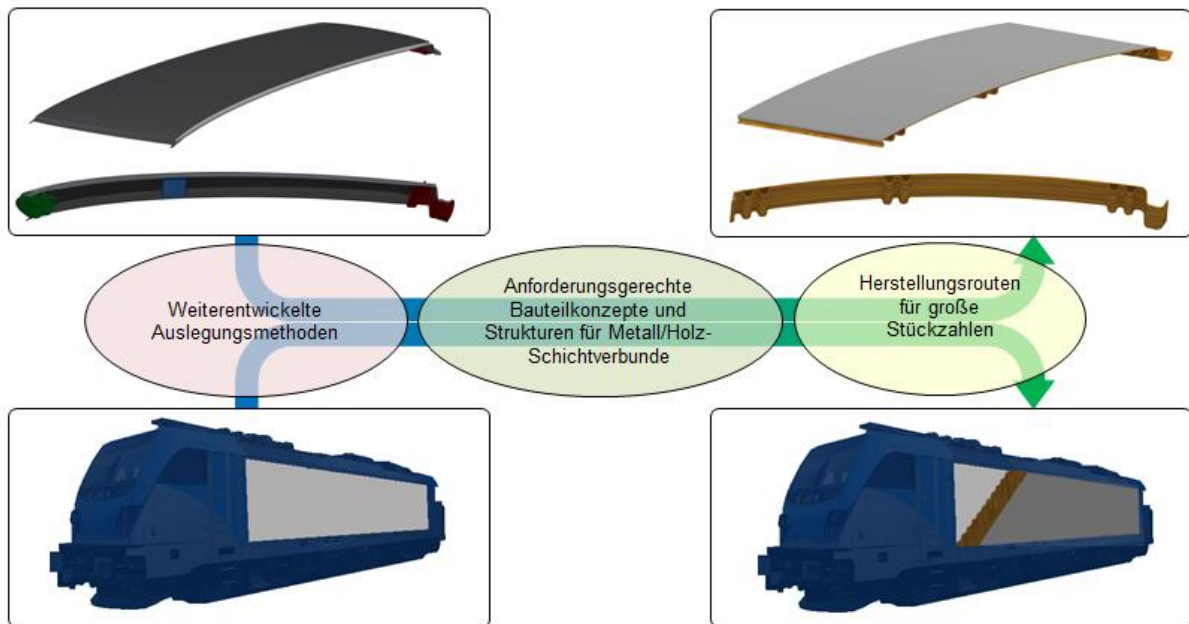


Abbildung 1: Synergien in der Entwicklungskette für eine PKW-Dachstruktur (oben) und eine Schienenfahrzeugstruktur (unten)

Abbildung 1 symbolisiert das prinzipielle Vorgehen, um Lösungsansätze für unterschiedliche Fahrzeugstrukturbereiche zu generieren. Im Rahmen des Projekts „For(s)tschritt“ sollte durch die Nutzung der Vorteile von Metall/Holzschichtverbunden in großflächigen strukturellen Baugruppen, eine signifikante Massenreduktion bei gleichzeitig sehr geringen Umweltauswirkungen in Fahrzeuganwendungen gebracht werden.

Die technologischen Arbeitsziele des Projekts lassen sich unter den nachfolgenden Stichpunkten zusammenfassen:

- Holzbasierte Multimaterialsysteme als Alternativlösung zu konventionellen Leichtbauwerkstoffen
- Gezielte Nutzung in großflächigen strukturellen Baugruppen und Anwendung als lokale Verstärkung
- Erarbeitung von Simulationsmethoden für Holzverbundwerkstoffe
- Ertüchtigung holzbasierter Multimaterialsysteme zur Erfüllung industrieller Standards
- Fertigung von Bauteilen und gesamten Baugruppen sowie Prüfung und Charakterisierung
- Integration von Funktionen (z. B. Dämmung/Oberfläche)
- Angestrebte Masseneinsparung durch Nutzung des Leichtbaupotentials
 - Schienenfahrzeug: mehrere 100 kg
 - Schienenfahrzeugtür: 8-12 kg pro Tür
 - Fahrzeugstruktur (z. B. Schweller ca. 20 %)

Über die technischen Aspekte hinaus, kann ein Beitrag zu den folgenden gesellschafts-, wirtschafts- und umweltpolitischen Zielen geleistet werden:

- Beitrag zur Ressourcenschonung und zum Klimaschutz
- Förderung der Wirtschaftlichkeit von Leichtbautechnologien
- Unterstützung der Innovationskraft der deutschen Fahrzeugbauer und deren Zulieferer durch die Förderung von Spitzentechnologien
- Setzen von gezielten Impulsen für kleine und mittlere Unternehmen

Die übergeordneten Projektschwerpunkte/Projektziele können dementsprechend wie folgt dargestellt werden:

- **Werkstoffgerechte Auslegung flächiger Bauteilmodule**

Da eine reine Werkstoffsubstitution bzw. der Austausch einzelner Bauteile kein Gesamtoptimum generieren kann, wurde der Ansatz, einzelne Bauteile in Holzbauweise darzustellen, auf komplette Module (z. B. flächige PKW-Strukturen, relevante Teilstrukturen Schienenfahrzeug) erweitert. Vor dem Hintergrund der globalen Baugruppenanforderungen sowie der Schnittstellen der gewählten Baugruppe zur restlichen Fahrzeugstruktur sollte somit ein von der konventionellen Bauweise (Geometrie, Bauraum, baugruppeninterne Anbindungselemente) losgelöstes werkstoffgerechtes neues Design ermöglicht werden. Wichtiger Baustein war die Weiterentwicklung der Simulationsmethoden für holzbasierte Multimaterialsysteme. Die Baugruppen mussten auf die wesentlichen Anforderungen für einen Einsatz in einem Fahrzeug ausgelegt werden. Dazu zählen, neben einer ausreichenden Steifigkeit und Festigkeit, vor allem die Eigenschaften im Crashfall. Auch der Brandschutz sowie die Witterungsbeständigkeit der Baugruppe mussten die Anforderungen des Automobilbaus und der Schienenfahrzeugindustrie erfüllen. Zusätzlich mussten die Anforderungen an die Wärme- und Schallisolation des Bauteils erfüllt werden, da der Einsatz von Dämmmaterialien vermieden werden soll.

- **Ertüchtigung einer konventionellen werkstattbasierten Holzformteilmontage zur prototypischen Fertigung von automobilfähigen holzbasierten automobilen Baugruppen**

Neben der Weiterentwicklung der Materialsysteme selbst, war die Weiterentwicklung der Fertigungstechnologie von hoher Relevanz. Aspekte die hierbei betrachtet und weiterentwickelt wurden, sind Pressenstruktur und Werkzeugbau sowie Prozessabläufe und Qualitätssicherung.

- **Ertüchtigung holzbasierter Multimaterialsysteme zur Erfüllung relevanter Standards**

Durch das Vorgänger-Verbundprojekt HAMMER konnte eine umfangreiche grundsätzliche Materialentwicklung und Charakterisierung holzbasierter Multimaterialsysteme durchgeführt werden. Hinsichtlich mechanischen Verhaltens, ökologischen und nachhaltigen Eigenschaften sowie produktionstechnischer Eignung konnten für diese Systeme große Potenziale nachgewiesen werden. Ebenfalls wurde deutlich, dass ein großes Leichtbaupotenzial besteht. Im The-

menkomplex „Holz im Automobil“ wurden wichtige Grundlagen erarbeitet, welche nun anwendungsnah weiterentwickelt werden sollen. So waren insbesondere weitere Erkenntnisse zum Verhalten unter crashartiger Belastung, hinsichtlich Dauerbeständigkeit und Formtreue sowie Modifikationsmöglichkeiten (z. B. Brandschutz) notwendig.

- **Konzeptionierung einer Wertschöpfungskette „Holz im strukturellen Fahrzeugbau“**

Die Fertigungsstrukturen innerhalb der klassischen Holzform-Produktion sind typischerweise werkstattbasiert und von einer hohen Fertigungstiefe geprägt. Demgegenüber stehen die zu lieferorientierten und automatisierten Strukturen der automobilen Serienfertigung. Um eine konsistente Wertschöpfungskette für den späteren Einsatz holzbasierter Elemente in der Serienfertigung realisieren zu können, musste eine Synchronisation und Harmonisierung der Strukturen bzw. eine Neukonzeptionierung einer bisher nicht vorhandenen Supply Chain erfolgen.

- **Fertigung, Prüfung und Charakterisierung von Bauteilen und gesamten Baugruppen**

Zur Überprüfung der Projektergebnisse im Realmaßstab, wurden die gefertigten Baugruppen relevanten Tests unterzogen und anschließend charakterisiert. Dabei wurde zunächst die prinzipielle Eignung der Werkstoffe und Werkstoffverbunde an vereinfachten Bauteilen untersucht. Wesentliche mechanische Eigenschaften sind dabei die Festigkeit und Steifigkeit der Bauteile, sowie das Deformationsverhalten im Crashfall. Im Vergleich zu einer rein metallischen Struktur ist hier ein komplexes Verhalten des Metall-Holz-Verbundes zu erwarten, welches durch Versuche untersucht werden musste. Durch einen Abgleich von Versuch und Berechnung wurden Materialmodelle entwickelt, die eine Simulation der statischen Eigenschaften, sowie des Crashverhaltens solcher Bauteile ermöglichen. Zur Validierung der Konzepte werden daher statische und dynamische Deformationsversuche zunächst an generischen Bauteilen durchgeführt. Daraufhin wurden vereinfachte Baugruppen aufgebaut und ebenfalls statisch und dynamisch getestet.

Die Projektschwerpunkte des Fraunhofer-Instituts für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut WKI lagen dabei insbesondere in der Entwicklung, Prüfung und Ertüchtigung holzbasierter Lagenwerkstoffe für Multimaterialsysteme (MMS) in Straßen- und Schienenfahrzeugen.

II. Voraussetzungen

Das Verbundprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Fachprogramm „Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien“ innerhalb der Förderbekanntmachung „Leichtbaukonzepte für Straßen- und Schienenfahrzeuge“ aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert und vom TÜV Rheinland Consulting GmbH betreut.

Neben dem Fraunhofer-Institut für Holzforschung (WKI) (FKZ: 19I16013I; Teilvorhaben: Entwicklung, Prüfung und Ertüchtigung holzbasierter Lagenwerkstoffe für Multi-Material-Systeme (MMS)) haben folgende Partner am Projekt mitgewirkt:

Tabelle 1: Übersicht der Teilvorhaben

<i>Förderkennzeichen</i>	<i>Zuwendungsempfänger</i>	<i>Teilvorhaben</i>
19I16013A	VOLKSWAGEN AKTIENGESELLSCHAFT	Projektleitung, Konstruktion, Auslegung und Entwicklung eines Bauteils für automobiler Serienanwendung
19I16013B	RohTech - DST GmbH	Produktionsprozess des Prototyps
19I16013C	ALSTOM Transport Deutschland GmbH	Demonstrator für ein Schienenfahrzeug
19I16013D	Gebr. Bode GmbH & Co. KG	Konzeptionierung und Entwicklung der Prototypen (Schienenfahrzeugtüren)
19I16013E	Siebenwurst Werkzeugbau GmbH	Entwicklung, Fertigung und Erprobung von Versuchs- und Prototypenwerkzeugen
19I16013F	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.	Bauteilkonzeption und -Auslegung, Entwicklung Simulationsmethode, Versuche an Teilstrukturen und Prototypen
19I16013G	Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH	Untersuchung des Korrosionsschutzes metallischer Verbundmaterialien
19I16013H	Universität Kassel	Qualifizierung holzbasierter Multimaterialsysteme für den Einsatz im Straßen- und Schienenfahrzeugbau

III. Planung und Ablauf des Vorhabens

Methodisches Vorgehen

Das methodische Vorgehen zur Erreichung der im Projekt vorgesehenen Ziele ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt. Nachfolgend wird die Vorgehensweise grob skizziert. Der das Gesamtprojekt organisatorisch umfassende Teil „AP0 Projektleitung“ wird hierbei ausgeklammert.

Übergeordnet gliederte sich das Vorgehen in die folgenden fünf Bereiche:

- Konzeptionierung branchenspezifischer Baugruppen (AP1.1, AP2.1, AP3.1)
- Entwicklung generischer Teilstrukturen (branchenunabhängig) (AP4, AP5, AP6, AP7)
- Prüfung, Herstellung und Charakterisierung (AP9, AP11, AP12) - kontinuierlich
- Entwicklung branchenspezifischer Prototypen (AP1.2/1.3, AP2.2/2.3, AP3.2/3.3)
- Aufbereitung und Bewertung der Ergebnisse für die industrielle Anwendung (AP10, AP13, AP14).

Dabei waren die beteiligten Unternehmen des Automobil- und Schienenfahrzeugbaus (VW, Alstom, Bode) maßgeblich in den Bereichen Konzeptionierung und Entwicklung der Prototypen beteiligt, um sicherzustellen, dass die getätigten Forschungsarbeiten mit den Anforderungen konform und in wirtschaftliche Produkte umsetzbar waren.

Die beteiligten Forschungseinrichtungen (Uni Kassel, DLR, WKI) stellten das Bindeglied zur Übertragung bisheriger und neuer Erkenntnisse auf dem Gebiet der holzbasierten Multimaterialsysteme zur Erreichung der Anforderungen (u. a. Festigkeit, Brandschutz und Korrosionsschutz) der Schienen- und Automobilhersteller dar. Daraus folgt, dass die Schwerpunkte im Bereich der Entwicklung und Optimierung des Materialsystems und dessen Prüfung lagen. Unterstützung, speziell für den Korrosionsschutz metallischer Verbundmaterialien, war durch die Beteiligung der Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH (SZMF) gesichert. Ferner war die Fa. Siebenwurst Werkzeugbau mit der Herstellung der erforderlichen Presswerkzeuge beauftragt.

Die Aufbereitung und Bewertung der Ergebnisse für die industrielle Anwendung wurde durch den Partner RohTech-DST GmbH durchgeführt und durch die beteiligten OEMs begleitet. Hierzu gehörte insbesondere die Bewertung der Technologie „holzbasierte Multimaterialsysteme“, wie sie am Ende des Projekts vorliegt, in Hinblick auf Technik und Umwelt. Außerdem sollte ein zukünftiger Produktionsprozess exemplarisch gestaltet werden.

Grundsätzlich gilt, dass die Annäherung des holzbasierten Materialsystems an das Baugruppenkonzept und dessen Anforderungen ein wechselseitiger und iterativer Prozess ist, der einen ständigen Austausch und Kooperation zwischen den beteiligten Industriepartnern und den

Forschungsstellen bedurfte. Die Beteiligung der Unternehmen beschränkte sich somit nicht nur auf das oben Beschriebene, sondern war in vielen sekundären Arbeitspaketen erforderlich. Tätigkeiten, die sich mit der Prüfung, Herstellung und Charakterisierung (AP9, AP11, AP12) von Werkstoffen befassten, liefen kontinuierlich über die Projektlaufzeit und wurden innerhalb der unterschiedlichen Arbeitspakete benötigt.

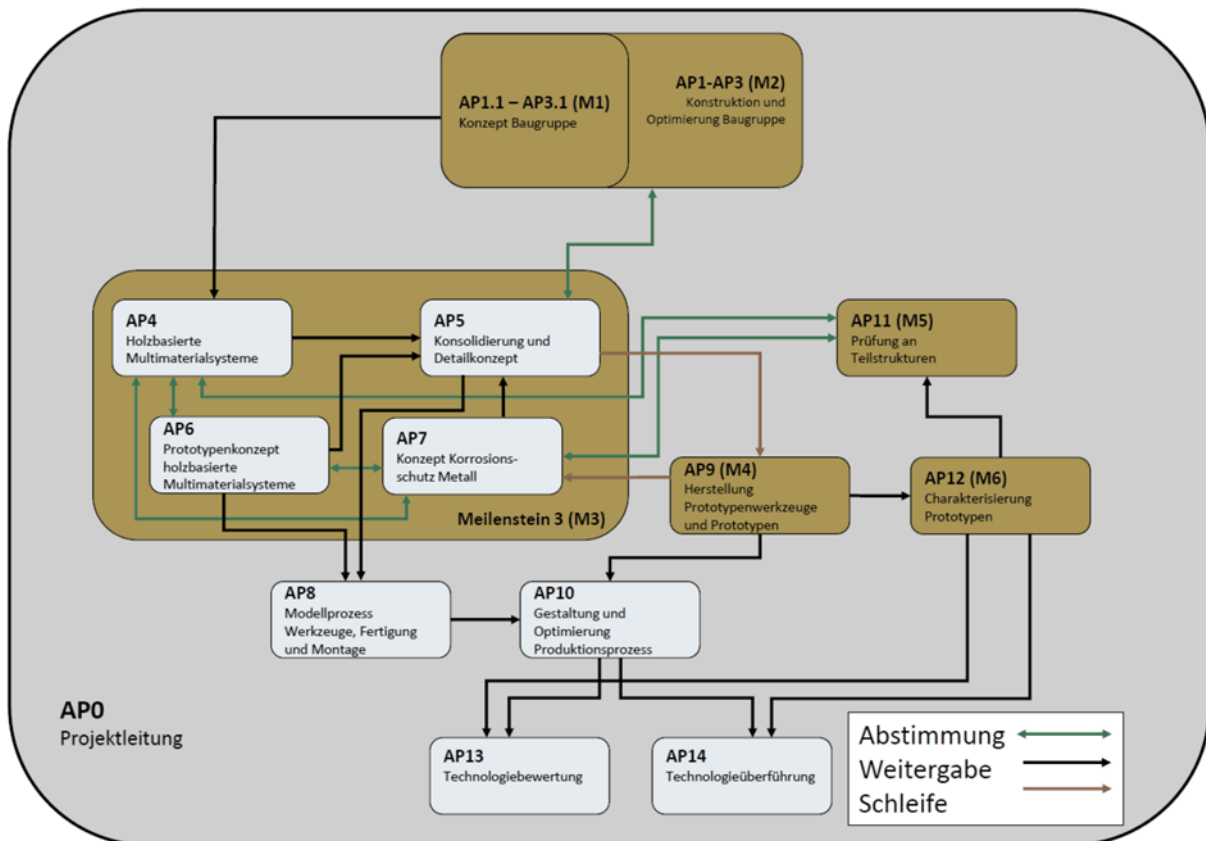


Abbildung 2: Geplantes methodisches Vorgehen

Projektplan

Der geplante zeitliche und organisatorische Ablauf des Vorhabens sowie die Beiträge der einzelnen Partner werden in Tabelle 2 dargestellt.

Der Ablauf des Vorhabens folgte im Wesentlichen dieser Planung. Gegenüber der ursprünglichen Planung wurde der Projektzeitraum zweimal um jeweils drei Monate verlängert (Gesamtprojektlaufzeit 42 Monate).

Die erste Verlängerung war dem Umstand geschuldet, dass die Auslegung und Konstruktion der branchenspezifischen Demonstratorbauteile mehr Zeit in Anspruch genommen hat und die darauf aufbauende Gestaltung der seriennahen Prozessketten ebenfalls noch mit gegebener Tiefe und Gewissenhaftigkeit erfolgen sollte.

Die zweite Verlängerung war den Folgen der Corona/SARS-Cov19-Pandemie geschuldet, wodurch experimentelle Arbeiten bei den Projektpartnern nicht mehr wie geplant durchgeführt werden konnten und sich Verzögerungen in der Abarbeitung der Versuche ergaben.

Tabelle 2: Projektplan "For(s)tschritt"

Projektplan "For(s)tschritt"		R-A-S-I											FJ1				FJ2				FJ3			
		Volkswagen	Aistom	Gebr. Bode	Salzgitter	SWZ	RohTech-DST	Universität Kassel	DLR - FK	Fraunhofer WKI	Jovyt SE	01	02	03	04	01	02	03	04	01	02	03	04	
AP 0	Projektleitung	R	S	S	S	S	S	S	S	S	S													
	Projektmanagement	R																						
	Publikationen, Tagungen, Öffentlichkeitsarbeit	S	S	S	S	S	S	R	S	S														
	Rechtsfragen, Patente	R	S	S				S	S															
AP1	Konzept, Konstruktion und Optimierung einer Baugruppe eines PKW	R			S	S		S	S	S	S		M1		M2									
	AP1.1 Entwicklung Gesamtkonzept Demonstrator Baugruppe PKW	R			S	S		S	S	S	S													
	AP1.2 Konstruktion Demonstrator Baugruppe PKW	R					I		S															
	AP1.3 Optimierung der Struktur für statische und für Crashlastfälle	S						S	R															
AP2	Konzept, Konstruktion und Optimierung einer Baugruppe eines Schienenfahrzeuges	R	I	S	S		S	S	S	S		M1		M2										
	AP2.1 Entwicklung Gesamtkonzept Demonstrator Baugruppe Schienenfahrzeug	R	I	S	S		S	S	S	S														
	AP2.2 Konstruktion Demonstrator Demonstrator Baugruppe Schienenfahrzeug	R	I				I		S															
	AP2.3 Optimierung der Struktur für statische Lastfälle	R	I					S	S															
AP3	Konzept, Konstruktion und Optimierung Baugruppe Schiene "Tür"		I	R	S	S		S	S	S	S	M1		M2										
	AP3.1 Entwicklung Gesamtkonzept Demonstrator Schiene "Tür"		I	R	S	S		S	S	S	S													
	AP3.2 Konstruktion Demonstrator Schiene "Tür"		I	R			I		S															
	AP3.3 Optimierung der Struktur für statische Lastfälle		I	R				S	S															
AP4	Holzbasierende Multimaterialsysteme	I	I	I	I	I	I	R	S	S									M3					
	AP4.1 Entwicklung von individualisierten holzbasierenden Multimaterialsystemen	I	I	I	I	I	I	R	I	S	S													
	AP4.2 Ermittlung fehlender Kennwerte für die Nutzung in der numerischen Simulation	I	I	I				S	S	R														
AP5	Konsolidierung der Entwicklungsphase und Ableitung von Detailkonzepten	S	S	S		S	S	S	R	S									M3					
	AP5.1 Ableitung und Konstruktion generischer Teilstrukturen für die Funktionsabsicherung	S	S	S		S	I		R															
	AP5.2 Implementierung der Erkenntnisse aus Bauteilprüfung und Herstellverfahren in die finalen Bauteilkonzepte	S	S	S		S	S	S	R	S														
	AP5.3 Fertigungsgerechte Detaillierung der Einzellösungen	I	I	I		S	S	S	R															
AP6	Prototypenkonzept holzbasierende Multimaterialsysteme	S	S	S	S	S	I	R	S	S	S								M3					
	AP6.1 Herstellung einfacher Teilstrukturen aus holzbasierenden Multimaterialsystemen	I	I	I		I		R	S	S														
	AP6.2 Herstellung komplexer Teilstrukturen aus holzbasierenden Multimaterialsystemen	I	I	I	S	S		R	S	S	S													
	AP6.3 Entwicklung eines geeigneten Holzschutz-I-modifikationskonzeptes	S	S	S	I			I		R	S													
	AP6.4 Brandschutzkonzept	S	S	S				I	I	R	S													
AP7	Konzept Korrosionsschutz Metall	S	S	S	R	I		S	I	S	S								M3					
	AP7.1 Entwicklung eines geeigneten Korrosionsschutzkonzeptes und Ausgestaltung der Grenzflächen	S	S	S	R	I		S	I	S	S													
	AP7.2 Korrosionsuntersuchungen an Teilstrukturen	S	I	I	R			I	I	I	I													

Projektplan "For(s)tschritt"		R = Responsible (Steuert, Koordiniert) A = Approval (gibt frei) S = Support (gibt eigeninitiativ, aktiven Support) I = Information (wird informiert)																						
		Volkswagen	Alstom	Gebr. Bode	Salzgitter	SWZ	RohTech-DST	Universität Kassel	DLR - FK	Fraunhofer WKI	Jovrat SE	01	02	03	04	01	02	03	04	01	02	03	04	
AP8	Modellprozess Werkzeuge, Fertigung und Montage	S	S	S	S	R	I	S	I	S	S													
AP8.1	Ermittlung optimaler Herstellparameter an Versuchswerkzeugen	S	I	I	S	R	I	S	I	S														
AP8.2	Ermittlung und Bewertung von Bauteilqualität und Werkzeugverschleiß	S	S	S	S	R	I	I	I	I														
AP8.3	Entwicklung von geeigneten Fügeprozessen (innere + äußere Struktur)	S	S	S	I	S	I	R	I	S	S													
AP9	Herstellung Prototypenwerkzeuge und Prototypen	S	S	S	I	R		S	S	S	I													
AP9.1	Herstellung Werkzeuge Teilstrukturen				I	R		S	S	S														
AP9.2	Konstruktion und Herstellung Prototypenwerkzeug Baugruppe PKW	S			I	R																		
AP9.3	Konstruktion und Herstellung Prototypenwerkzeug Baugruppe Schienenfahrzeug		S		I	R																		
AP9.4	Konstruktion und Herstellung Prototypenwerkzeug Schiene "Tür"			S	I	R																		
AP9.5	Herstellung der Prototypenbauteile	S	I	I	I	R		I	I	I	I													
AP10	Gestaltung und Optimierung Produktionsprozess Prototyp	S	S	S	S	S	R	S	S															
AP10.1	Maßnahmen Effizienzsteigerung Produktionsprozess	S	S	S	S	S	R	S	S															
AP10.2	Konzeption und Harmonisierung Prozessketten	S	S	S	S	S	R	S	S															
AP11	Prüfung an Teilstrukturen	S	S	S				S	R	S														
AP11.1	Statische Bauteilprüfungen an Proben und Teilstrukturen	S	S	S				S	R	S														
AP11.2	Dynamische Bauteilprüfungen an Proben und Teilstrukturen	S		S				S	R	S														
AP11.3	Verbesserung der numerischen Simulationsmöglichkeiten von Holzstrukturen	S	S	S				R																
AP12	Charakterisierung Prototypen	S	S	S	I	I	I	I	R	I														
AP12.1	Statische Bauteilprüfungen Prototyp Baugruppe PKW	S			I	I		I	R	I														
AP12.2	Crashtests Prototyp Baugruppe PKW	S			I	I		I	R	I														
AP12.3	Bauteilprüfungen Prototyp Schiene "Tür"			S	I	I		I	R	I														
AP12.4	Bearbeitung und Montage Prototyp Baugruppe Schienenfahrzeug		R		I	I	I	I	I	I														
AP12.5	Bearbeitung und Montage Prototyp Schiene "Tür"			R	I	I	I	I	I	I														
AP13	Technologiebewertung	R	S	S			S	S	S	S														
AP13.1	Bauteilbezogene Lebenszyklusanalyse (LCA)	R	S	S			S	S	S															
AP13.2	Bauteilbezogene Ökobilanzierung	S	I	I			R	S	S															
AP13.3	Ermittlung des Leichtbaupotentials und zukünftiger Weiterentwicklungspotentiale	R	S	S			S	S																
AP13.4	Kostenanalyse Baugruppe PKW	R					S	S	S															
AP13.5	Kostenanalyse Baugruppe Schienenfahrzeug		R				S	S	S															
AP13.6	Kostenanalyse Schiene "Tür"			R			S	S	S															
AP14	Technologieüberführung	S	S	S	S	S	R	S		S	S													
AP14.1	Konzeption von Serienfertigungsanlagen für die entwickelten Bauteile	S	S	S	S	S	R																	
AP14.2	Konzeption einer Wertschöpfungskette "Holz im Fahrzeugbau"	S	S	S	S	S	R	S		S														

IV. Stand der Wissenschaft und Technik

Aufgrund steigender Energiekosten und strenger Emissionsrichtlinien gewinnt der Leichtbau bei der Entwicklung von Fahrzeugen zunehmend an Bedeutung. Bei Schienenfahrzeugen entstehen Leichtbauanforderungen zudem durch maximal zulässige Radsatzlasten.

Die reine Substitution durch leichtere Werkstoffe ist dabei nicht zielführend. Die individuellen Eigenschaften der Werkstoffe müssen berücksichtigt werden, wodurch Gesamtstrukturen und deren Einbindung in Baugruppen angepasst und optimiert werden müssen. Es ergibt sich somit für den Fahrzeugleichtbau unter wirtschaftlichen und ökologischen Randbedingungen eine Notwendigkeit zur stetigen Steigerung der Ressourceneffizienz mit Hilfe ganzheitlicher und nachhaltiger Lösungen.

Einer dieser Ansätze kann der Einsatz neuer Werkstoffgruppen sein, die in der bisherigen Entwicklung von Fahrzeugstrukturen nicht relevant waren. Insbesondere durch nachwachsende Rohstoffe können die gestiegenen Anforderungen erfüllt werden. Holz bietet hier durch seine besonderen mechanischen, ökologischen und wirtschaftlichen Eigenschaften nicht nur ein außerordentliches Leichtbaupotenzial, sondern erfüllt auch höchste Anforderungen an Nachhaltigkeit und Kosten (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Technischer & wirtschaftlicher Werkstoffvergleich [vgl. KLEIN, 2011 UND NIEMZ, 2006]

Werkstoff	Dichte [g/cm ³]	Zugfestigkeit [N/mm ²]	Zugfestigkeit [N/mm ²] / Dichte [g/cm ³]	Preis/Tonne
Buchenholz	0,54 - 0,91	~ 135 (längs)	~ 187	300 - 500€
Stahl	7,85 - 7,87	340 - 1.250	~ 44 - 160	1.000 - 1.300 €
Aluminium	2,3 - 2,8	45 - 500	~ 20 - 217	2.000 - 3.000 €
Magnesium	1,74	100 - 250	~ 58 - 144	3.000 - 5.000 €
CFK	1,75	~ 1.700 (längs)	~ 970	50.000 - 100.000 €
GFK	2,5	800 - 1.100 (längs)	~ 320 - 440	5.000 - 10.000 €

Obwohl Holz einer der ältesten Bauwerkstoffe des Menschen ist, wird er in technisch-strukturellen Anwendungen im Fahrzeugbau trotz seines hohen Potenzials aufgrund fehlender Erfahrungen nicht eingesetzt.

In mobilen Serienanwendungen wurden und werden aktuell zwar an verschiedenen Stellen Holz und Holzwerkstoffe eingesetzt. Einzelnen, nicht-strukturellen Anwendungen von Holzwerkstoffen, stehen hierbei eine Vielzahl von Holzfaseranwendungen und Anwendungen von Holzpulver in z. B. Kaschierungen und als Füllstoffe für polymere Matrices gegenüber. Die Einsatzgebiete von Holz – im Sinne eines Werkstoffs mit bestehender natürlicher Struktur – beschränken sich auf einfache wenige Anwendungen wie z. B. Ladeböden in Kraft- und Nutzfahrzeugen. Ein Serieneinsatz von Holz in strukturellen/crashrelevanten Anwendungen existiert bisher nicht.

Einzelne aktuelle Beispiele und frühere Fahrzeugkonzepte zeigen, dass der grundsätzliche Einsatz von Holz in mobilen Anwendungen auch in struktureller Form möglich ist.



Abbildung 3: Splinter, entwickelt an der North Carolina State University, der nahezu vollständig in Holz gebaut wurde (links), 1981er Opel im Mix mit einem sedan/convertible hybrid, der von einem ukrainischen Privatmann zu einem „Holzfahrzeug“ umgebaut wurde (Mitte), 1952 Ariel Wood Car (rechts)

Diese Anwendungen beschränken sich jedoch auf sehr spezielle Technologieträger und lassen ihre Ansätze nicht auf Großserien, welche für ressourcen- und klimaorientierte Skaleneffekte notwendig sind, übertragen.

Auch im Bereich der Wissenschaft gab es verschiedene Ansätze Holz im Zuge von Design-Studien oder Concept-Cars zu verwenden. Diese Ansätze erfolgten meist über studentische Projekte wie z. B. ein Studentenprojekt der Uni Merseburg, der TU Chemnitz und der Hochschule für Kunst und Design Burg Halle [HS MERSEBURG, 2020].

Ein erster grundlegender Ansatz, das Potenzial des Werkstoffs Holz für den strukturellen Einsatz für die automobilen Serienfertigung zu untersuchen, ist das BMBF-Verbundprojekt „Holzformteile als Multimaterialsysteme für den Einsatz im Fahrzeug-Rohbau – HAMMER“, welches im April 2016 abgeschlossen wurde. Ziel des Forschungsprojekts war der Einsatz von Holzformteilen als alternatives, innovatives und nachhaltiges Multimaterialsystem (MMS) für strukturelle, ressourceneffiziente und nachhaltige Komponenten von Fahrzeugstrukturen.

Durch das Projekt HAMMER wurde ein erster systematischer Ansatz verfolgt, um Holz in struktureller Bauweise in zukünftigen Fahrzeugprojekten einzusetzen. Über die angesprochenen Designstudien oder Concept-Cars hinausgehend, wurde die Integration des Werkstoffs im ganzheitlichen Sinne und mit Blick auf die industriellen Prozessketten verfolgt. Durch die Erarbeitung eines einsatztauglichen Demonstrators wurden neben der Darstellung der prinzipiellen Machbarkeit auch wesentliche Kenntnisse hinsichtlich Werkstoffkennwerten, Werkstoffverhalten sowie Einsatzpotenzial des Werkstoffs bereitgestellt. [KOHL, ET AL., 2013; KOHL, ET AL., 2014; KOHL, ET AL., 2014]

Grundlegend basiert die Herstellung von Formholz auf der Verklebung und gleichzeitigen Verformung von dünnen Holzfurnierschichten. Bei holzbasierten Materialsystemen mit nicht-Holz-Materialien (Metall, Textilien) müssen spezielle Klebstoffsysteme verwendet werden. Die mit Klebstoff benetzten Verbundlagen werden individuell ausgerichtet, in einem Heißpressprozess verbunden und dabei in dreidimensionale Form gebracht. Dabei entsteht, wie bei der Herstellung anderer Sandwichstrukturen, ein stabiles Verbundbauteil. Wichtiges Kriterium für die Funktion einer derartigen Bauweise ist die Formtreue der Holzstruktur. Diese wird über eine automatisierte Klassifizierung der Holzfurniergüten und durch genaue Einhaltung der Fertigungsparameter möglich. Bei wenig gekrümmten Bauteilen ist auch das Einlegen dünner metallischer Bleche als Zwischenschicht zwischen Holzlagen möglich. Dadurch kann beispielsweise eine zweite, innenliegende und durch eine Furnierschicht verdeckte Metallschicht in ein Bauteil eingebracht werden. Alternativ können hier aber auch weitere funktionale Schichten, wie z. B. eine dünne Lage aus technischen Fasern, eingebaut werden, um z. B. eine Splitterbildung im Crashfall zu verhindern.



Abbildung 4: Erster Demonstrator Projekt HAMMER: Seitenverstärkungsstrebe eines Serien-PKW

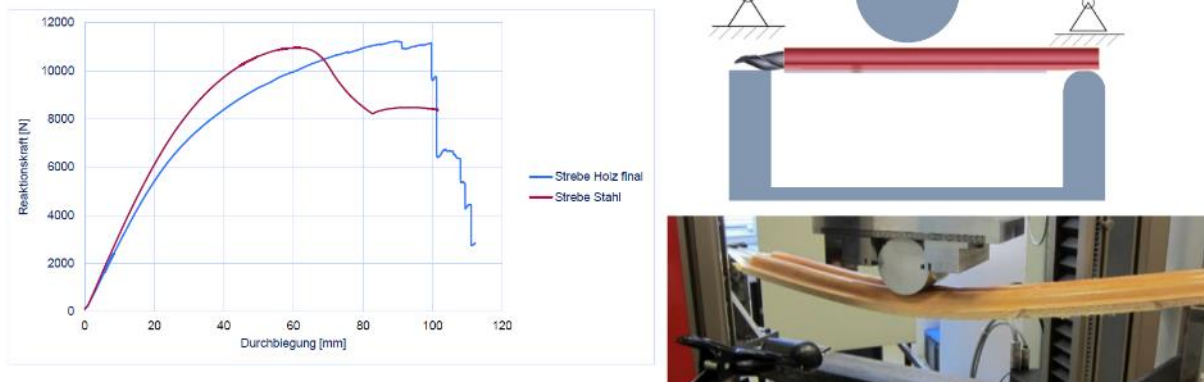


Abbildung 5: Ergebnis der bauteilvergleichenden Prüfung des HAMMER-Demonstrators mit dem äquivalenten Serienbauteil aus pressformgehärtetem Stahl

Eines der wichtigsten Ergebnisse des Projekts HAMMER war die bauteilvergleichende Prüfung des finalen Demonstrators auf Basis eines holzbasierten Multimaterialverbunds. Abbildung 5 zeigt exemplarisch die Leistungsfähigkeiten des Demonstrators (Abbildung 4) im Vergleich zum äquivalenten Serienbauteil aus Stahl unter quasi-statischer Belastung (Originaltest VW). Hieraus ergibt sich eine Festigkeit des Holzteils, welche in gleicher, tendenziell höherer, Größenordnung (bei in dem Fall nur leicht erhöhtem Gewicht) im Vergleich zum Stahlbauteil liegt. Hierdurch konnte gezeigt werden, dass selbst eine – für den Werkstoff Holz nicht optimale – Substitutionsbauweise aus holzbasierten Multimaterialsystemen sehr gute Ergebnisse liefern kann. Vor diesem Hintergrund wird umso deutlicher, dass eine werkstoffgerechte Bauteilauslegung in Verbindung mit einer bauteilübergreifenden Integration des Werkstoffs, die exklusiven Vorteile des Werkstoffs Holz in technischen Anwendungen nutzbar machen kann.

Durch die Erfahrungen in Entwicklung und Optimierung holzbasierter Werkstoffe trägt das Fraunhofer-Institut für Holzforschung Wilhelm-Klauditz-Institut WKI maßgeblich dazu bei, wesentliche Fragestellungen der Holzwerkstofftechnologie zu bearbeiten. Eingeschlossen sind dabei insbesondere Material- und Werkstoffprüfung sowie Charakterisierungen der Materialeigenschaften hinsichtlich ihrer Dämmeigenschaften sowie des Brand- und Emissionsverhaltens.

V. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Firma Jowat SE aus Detmold als Hersteller für Klebstoffe, insbesondere für die Holzverklebung, wurde als assoziierter Partner in das Projekt integriert. Durch Jowat erfolgte die Bereitstellung zahlreicher Klebstoffe für die Untersuchungen und die Herstellung von Demonstratoren und Prototypen sowie die fachliche Beratung hinsichtlich der Produktauswahl und -verarbeitung. Die Integration von Jowat auf juristischer Ebene wurde über einen Zusatz vom Kooperationsvertrag abgesichert, in welchem alle anderen Partner der Aufnahme zustimmten und sich Jowat zur Einhaltung der im Kooperationsvertrag vereinbarten Regelungen verpflichtet.

Ferner wurden in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner VW Pultrusionsversuche mit Holz furnier auf einer Anlage des Fraunhofer-Instituts für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU in Chemnitz durchgeführt und dafür die Expertise der IWU-Mitarbeiter genutzt.

Die brandtechnischen Prüfungen nach DIN EN 45545-2 für Alstom und die Fa. Bode wurden vom WKI an die DMT GmbH & Co. KG in Dortmund in Auftrag gegeben.

VI. Erzielte Ergebnisse

Im Rahmen des Projektmanagements wurden die halbjährlich stattfindenden Projekttreffen bei verschiedenen Partnern geplant und realisiert. Folgende Projekttreffen fanden statt:

- 31.03.2017 in Wolfsburg (Kickoff)
- 16.11.2017 in Stuttgart
- 19.04.2018 in Salzgitter
- 08.11.2018 in Kassel
- 10.04.2019 in Detmold
- 26.11.2019 in Salzgitter
- 15.09.2020 als Skype-Konferenz (Abschlusstreffen)

In den Arbeitsgruppen fanden zudem separate Treffen der an den Themen beteiligten Partner statt, wobei stets allen Partnern die Möglichkeit zur Teilnahme eingeräumt wurde. Zusätzlich wurden im Rahmen des Projektmanagements verschiedene Termine für Firmenbesuche mit dem Gesamtkonsortium organisiert, bei denen beispielsweise Firmen aus der Holzverarbeitenden Industrie Einblicke in die Produktion gewährten.

Die durchgeführten Tätigkeiten werden nachfolgend chronologisch dargestellt und den entsprechenden Arbeitspaketen zugeordnet.

Neben den im Folgenden beschriebenen Tätigkeiten, hat das Fraunhofer WKI über die gesamte Projektlaufzeit Schäl furnier auf der Instituts-eigenen Schälmaschine hergestellt. Diese Schäl furniere dienten zum einen dem WKI für alle im Rahmen des Projekts gefertigten Probekörper. Zum anderen wurden die Projektpartner, v. a. die Uni Kassel sowie VW, zur Herstellung ihrer Versuchskörper und Bauteile durch das WKI mit Schäl furnieren versorgt.

VI.1 Holzlagenwerkstoffe mit metallischen Werkstoffen (AP4, AP7)

In einer ersten Versuchsreihe wurden im Technikum des WKI Lagenwerkstoffe mit Mittellagen aus metallischen Werkstoffen hergestellt. Die Ausgangsparameter waren dabei Folgende:

- Material: Buchenfurniere
- Gekocht bei 60 °C für 72 h
- Geschält in Furnierdicke von 0,5 mm
- Getrocknet bei 75 °C auf $u \leq 5 \%$

Für die Verklebung der Lagen wurde Klebstoff 1 (1K PU) verwendet. Der Auftrag erfolgte einseitig auf einer Furnieroberfläche und wurde anschließend mit einem Zahnpachtel über die komplette Oberfläche gleichmäßig verteilt (200 g/m² bei einer Holzfeuchte u von 10 %). Es wurden insgesamt acht Platten mit jeweils drei bzw. fünf Lagen angefertigt. Die eingelegten Bleche wurden von der Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH zur Verfügung gestellt und waren elektrolytisch- bzw. feuerverzinkt. Die Platten wurden bei Raumtemperatur über einen Zeitraum von etwa zwölf Stunden mit Schraubzwingen gepresst. In Tabelle 4 sind die genauen Parameter der hergestellten Lagenwerkstoffe dargestellt. Es wurden jeweils vier Platten mit und vier Platten ohne Bleche als Mittellagen gefertigt.

Tabelle 4: Plattenparameter Lagenwerkstoffe mit metallischen Werkstoffen

Lagen inkl. Blech	Ausrichtung	Blechprobe	Lage Blech
3 Lagen	Unidirektional als 2D Formteil	Elektrolytisch verzinktes Feinblech (0,65 mm)	Mittellage
5 Lagen			
3 Lagen		Feuerverzinktes Feinblech (0,53 mm)	
5 Lagen			
3 Lagen	Unidirektional LVL		
5 Lagen			
3 Lagen	Sperrholz (jede 2. Lage um 90° gedreht)		
5 Lagen			

In den nachfolgenden Abbildung 6 bis Abbildung 8 sind die Ausgangs- und Endprodukte der Plattenherstellung zu sehen. Abbildung 6 zeigt die verwendeten Buchenfurniere – Faserrichtung längs zur Produktionsrichtung (links) und Sperrlage (rechts). Ein Blech, wie es für die

Mittellagen verwendet wurde, ist in Abbildung 7 zu sehen. In Abbildung 8 ist eine der dreilagigen, fertig gepressten Platten dargestellt.



Abbildung 6: Buchenschäl furniere



Abbildung 7: Blech für Mittellage



Abbildung 8: Lagenwerkstoff mit Blech als Mittellage

In Abbildung 9 und Abbildung 10 ist ein Querschnitt der 3-lagigen, unidirektionalen Platte mit einem 0,53 mm dicken, feuerverzinktem Feinblech als Mittellage dargestellt.

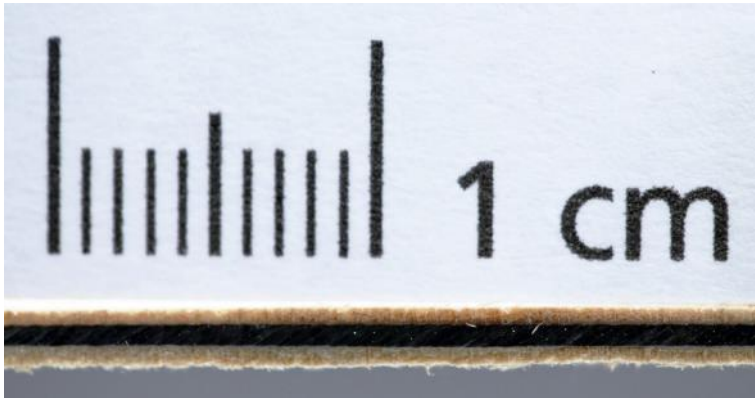


Abbildung 9: 3-lagiger Prüfkörper mit feuerverzinktem Blech als Mittellage

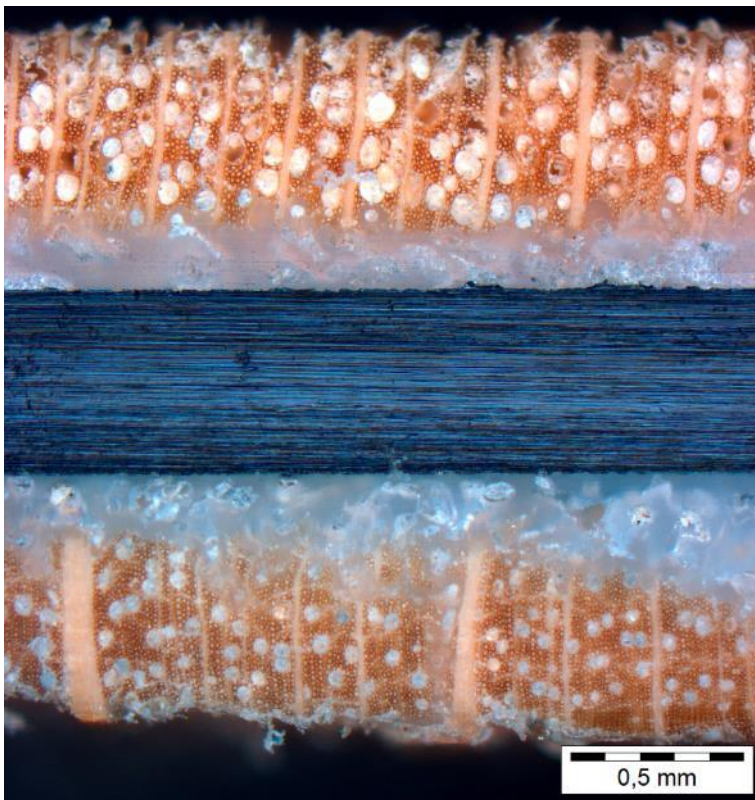


Abbildung 10: 3-lagiger Prüfkörper mit feuerverzinktem Blech als Mittellage, mikroskopische Aufnahme

Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen den Querschnitt der 5-lagigen, unidirektionalen Platte mit einem 0,53 mm starkem und feuerverzinktem Feinblech als Mittellage.

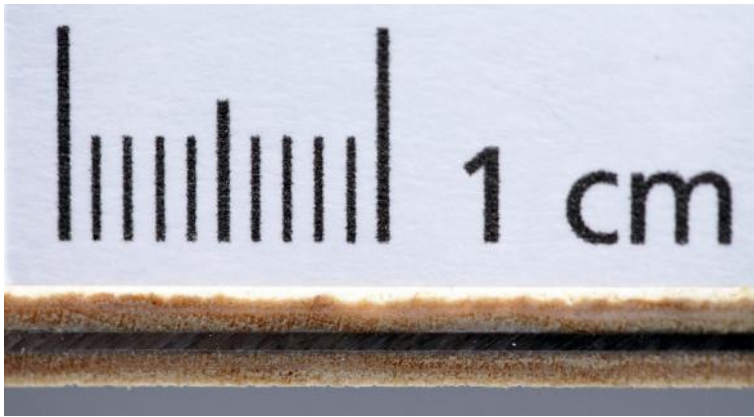


Abbildung 11: 5-lagiger Prüfkörper mit feuerverzinktem Blech als Mittellage



Abbildung 12: 5-lagiger Prüfkörper mit feuerverzinktem Blech als Mittellage, mikroskopische Aufnahme

Bei den Proben wurde die Querkzugfestigkeit nach EN 321 vor und nach einem Zyklustest bestimmt. Der Zyklustest besteht aus drei Zyklen á drei Tage Kaltwasserlagerung, 24 Stunden bei -20 °C, drei Tage bei 70 °C und vier Stunden bei 20 °C.

In der nachfolgenden Abbildung 13 sind die Querkzugfestigkeiten der einzelnen Proben sowohl mit als auch Vorbehandlung grafisch dargestellt.

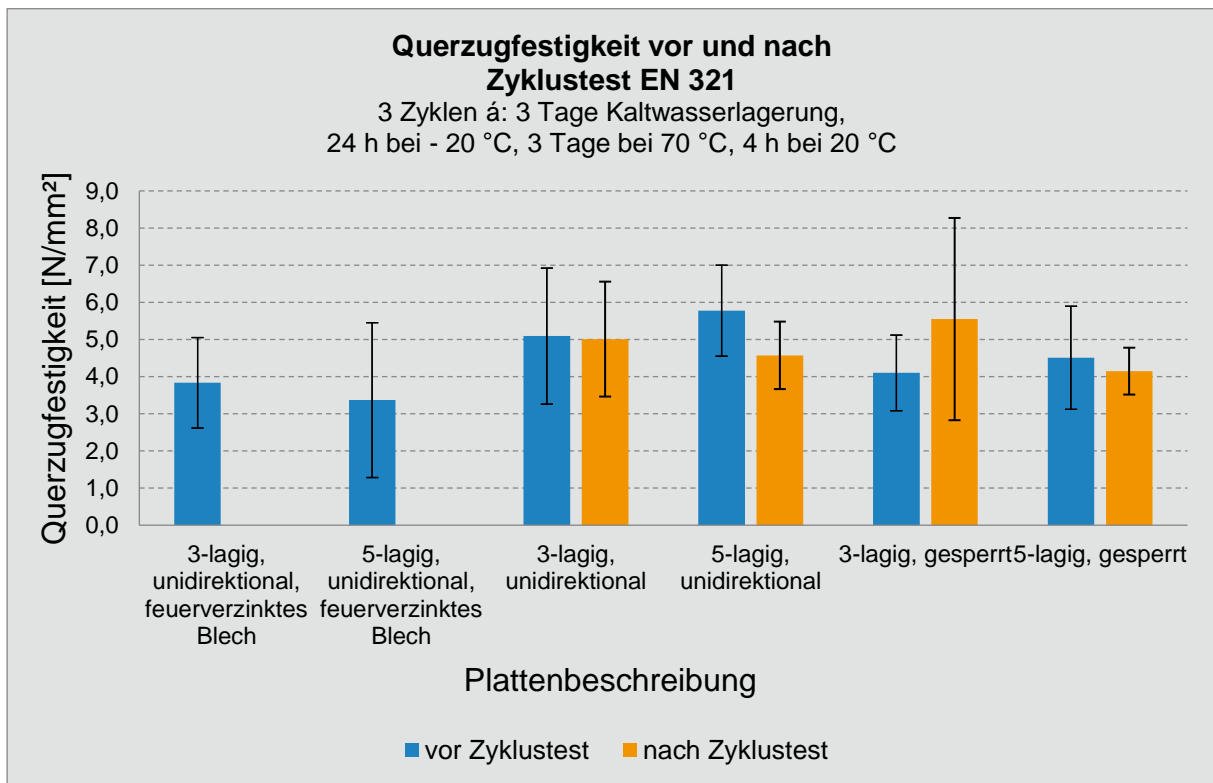


Abbildung 13: Querkzugfestigkeit von Lagenwerkstoffen vor und nach Zyklustest

Die Proben mit dem elektrolytisch verzinkten Feinblech als Mittellage sind bereits beim Zugschnitt zerfallen. Dies deutet darauf hin, dass keine Haftung zwischen Klebstoff und Blech existiert. Die beiden Platten mit feuerverzinktem Feinblech zeigten teilweise sehr hohe Querkzugfestigkeiten. Bei diesen Prüfkörpern löste sich das Holz allerdings nach drei Tagen Kaltwasserlagerung vom Blech (siehe Abbildung 14).



Abbildung 14: Prüfkörper mit feuerverzinktem Blech: alle Prüfkörper haben sich nach drei Tagen Kaltwasserlagerung vom Blech gelöst

Bei den Proben ohne metallische Mittellage sind die einzelnen Furnierlagen untrennbar miteinander verbunden und es versagte stets die schwächere Verklebung zum Joch (siehe Abbildung 15 und Abbildung 16).



Abbildung 15: 5-lagiges, unidirektionales LVL ohne Vorbehandlung: Verklebung versagt zum Joch



Abbildung 16: 5-lagiges, unidirektionales LVL nach Vorbehandlung: Verklebung versagt zum Joch

VI.2 Autoklavversuche als Machbarkeitsstudie für die Herstellung des Mock-Ups im Autoklav und Mock-Up Herstellung (AP6)

Für die Vorversuche der Plattenherstellung im Autoklav wurden am WKI im Vorfeld Buchenfurniere verschiedener Dicken geschält und zugeschnitten. An den beiden Versuchstagen bei VW fand die Herstellung ebener und bombierter Platten mit und ohne metallische Außenlagen sowie mit und ohne metallische Mittellagen statt. Als Bindemittel wurde Klebstoff 2 (1K PU) genutzt. Variiert wurden dabei Furnierdicke, Lagenanzahl, Lagenaufbau, Blechstärke und die Verwendung des konvexen oder konkaven Werkzeugs. Abbildung 17, Abbildung 18 und Abbildung 19 zeigen zwei der bereits besäumten, bombierten Platten mit metallischen Außenlagen.

Die Vorversuche zeigten, dass die Herstellung von ebenen sowie umgeformten Furnierschichtholz in der Größe 300 mm x 300 mm im Autoklavverfahren möglich ist. Lediglich bei der Verwendung von 2,0 mm dicken Furnieren zeichneten sich leichte Unebenheiten auf den metallischen Deckschichten ab.

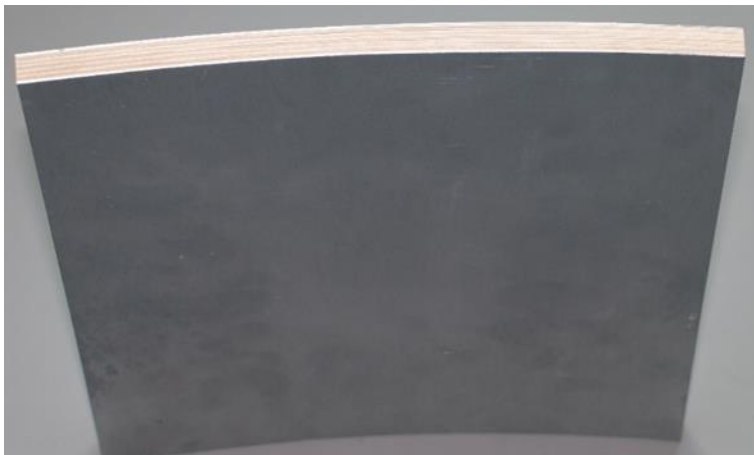


Abbildung 17: Bombiertes Bauteil aus 11-lagigem Buchensperrholz sowie zwei metallischen Deckschichten, hergestellt im Autoklav (Foto: VOLKSWAGEN)



Abbildung 18: Bombiertes Bauteil aus 11-lagigem Buchensperrholz sowie zwei metallischen Deckschichten, hergestellt im Autoklav, Nahaufnahme (Foto: VOLKSWAGEN)

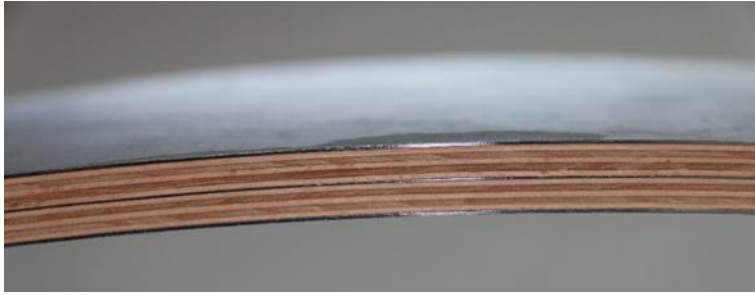


Abbildung 19: Bombiertes Bauteil aus 10-lagigem Buchensperrholz mit einer 0,2 mm starken metallischen Mittellage sowie zwei metallischen Deckschichten, hergestellt im Autoklav, Nahaufnahme (Foto: VOLKSWAGEN)

Aufbauend auf den Vorversuchen und nach einer intensiven Vorbereitung der Projektpartner, sollten die Mock-Up Bauteile „Schiene Seitenwandpaneel“ und „Schiene Tür“ im Autoklav bei VW produziert werden. Im WKI erfolgte dafür wieder die Herstellung sowie der Zuschnitt der Schäl furniere. Gefertigt wurden zunächst zwei Seitenwand-Holzkerne, bestehend aus fünf Lagen 1,5 mm dickem Furnier, verklebt mit einer PVAc Dispersion. In einem zweiten Arbeitsschritt wurde ein Stahlblech, ebenfalls im Autoklavverfahren, auf einen der Holzkerne mit Klebstoff 2 (1K PU) aufgebracht.

Zudem wurde jeweils eine „Holzbeplankung außen“ und eine „Holzbeplankung innen“ der Tür im Autoklav hergestellt. Beide Seiten der Tür bestehen aus drei Lagen 1,0 mm dickem Furnier sowie einem dünnen Aluminiumblech. Die Verklebung der einzelnen Lagen erfolgte mittels Klebstoff 2 (1K PU).

Während des Pressvorgangs im Autoklav kam es zu Furnierverschiebungen und daraus folgenden Überlappungen bzw. Lücken im Furnieraufbau. Diese zeichneten sich vor allem in Form von „Wellen“ und „Knicken“ auf dem Aluminium der inneren Holzbeplankung ab, da das Aluminiumblech, im Gegensatz zur äußeren Holzbeplankung, konstruktionsbedingt nicht werkzeugseitig verpresst wurde. Das Stückeln bzw. Zusammenlegen von Furnieren innerhalb einer Lage war erforderlich, da die Größe der einzelnen Furnierblätter, bedingt durch die Herstellung dieser, begrenzt ist. Im Rahmen des Mock-Up-Zusammenbaus ist daher eine umfangreiche Nachbearbeitung der hergestellten Bauteile notwendig.

Genauere Ergebnisse und Fotos sind im Gesamtabschlussbericht sowie in den Abschlussberichten der Projektpartner ALSTOM Transport Deutschland GmbH (19I16013C) und Gebr. Bode GmbH & Co. KG (19I16013D) zu finden.

VI.3 Emissionsuntersuchungen von unbehandelten und vorbehandelten Furnieren (AP6)

Im Rahmen der Untersuchungen zu möglichen Holzmodifikationen wurden in Kooperation mit Volkswagen Emissionsmessungen an verschiedenen Furnierproben durchgeführt. Als Untersuchungsmaterial wurden die vorbehandelten Proben thermisch modifiziertes Furnier, acetyliertes Furnier und KTL-behandeltes Furnier sowie unbehandeltes und unbehandeltes, gelüftetes Furnier gewählt. Sowohl thermische Modifizierung als auch Acetylierung wurden als mögliche Modifikationen in Betracht gezogen, da sie die Dauerhaftigkeit von Holz erhöhen. In Abbildung 20 sind die einzelnen Furniere und deren durch die Vorbehandlung bedingten Farbabstufungen dargestellt.

Für die Furnierherstellung wurden die Stämme zunächst drei Tage bei 70 °C gekocht, anschließend entrindet und geschält. Die erzeugten Furniere wurden anschließend bei 60 °C für zwei Tage getrocknet. Nach der Herstellung wurde das unbehandelte Furnier sofort luftdicht in Folie verschlossen. Für die unbehandelten, gelüfteten Furniere wurde das Furnier nach der Trocknung sechs Tage in einem möglichst geruchsneutralen Raum „gelüftet“. Bei der thermischen Behandlung der Furniere gab es drei verschiedene Behandlungsvarianten, welche auch eine unterschiedlich starke Verfärbung der Furniere bewirken:

- 185 °C 33 h Gesamtprozesszeit, 3 h bei 185 °C
- 200 °C 35 h Gesamtprozesszeit, 3 h bei 185 °C
- 215 °C 37 h Gesamtprozesszeit, 3 h bei 185 °C.

Für die Emissionsmessung wurden Furniere der drei verschiedenen Prozesse gewählt. Bei der Acetylierung wurden die Furniere mit Essigsäureanhydridlösung imprägniert. Sowohl thermische Modifizierung, als auch Acetylierung wurden vom WKI bei der Universität Göttingen in Auftrag gegeben.

Die Phosphatierung und kathodische Tauchlackierung (KTL) der Furniere wurde bei dem Projektpartner der Salzgitter Mannesmann Forschung durchgeführt. Die Furniere haben dabei zunächst den kompletten Prozess der automobiltypischen Phosphatierung durchlaufen, welche die folgenden Prozessschritte beinhaltet:

- Alkalische Entfettung
- Spülen mit vollentsalztem Wasser
- Aktivierungsbehandlung (auf die Blechoberflächen werden dabei die Kristallisationskeime für die Phosphatierung etabliert)
- Phosphatierung mit Tri-Kationen-Phosphatierung
- Spülen mit vollentsalztem Wasser

- Trocknung.

Im Anschluss wurden die Furniere, analog zum Automobilprozess, in das KTL-Bad eingetaucht, mit destilliertem Wasser gespült und abschließend im Ofen bei 180 °C für 25 Minuten ausgelagert. Nach der Behandlung wurden auch diese Furniere dicht verschlossen in PE-Folie verpackt.



Abbildung 20: Buchenfurniere für die Emissionsprüfung, von links nach rechts: unbehandelt, acetyliert, thermisch modifiziert, KTL-behandelt

Emissionsprüfung:

Das Probenmaterial wurde in einer Prüfkammer ohne vorherige Konditionierung geprüft. Die klimatischen Parameter der Kammeruntersuchung sind wie folgt:

- Kammertyp: 1 m³ - Glaskammer A
- Klima: 23 °C, 50 % rel. Luftfeuchte
- Luftwechselrate: 1 h⁻¹
- Beladung: 1 m²/m³.

Nach definierten Zeiten wurden Luftproben auf Tenax-gefüllten Probenröhrchen entnommen, thermisch desorbiert und gaschromatographisch analysiert. Freigesetzte organische Verbindungen wurden mittels Massenspektrometrie identifiziert und gegen reine Referenzsubstanzen quantifiziert. Das beschriebene Verfahren erfasst die flüchtigen organischen Verbindungen von C5 bis C22 und hat eine Nachweisgrenze (NWG) von ca. 1 µg/m³. Bei den nachfolgenden Ergebnissen werden die Substanzen von C6 bis C16 als volatile organic compounds (flüchtige organische Verbindungen, VOC), die vorher eluierenden als very volatile organic

compounds (VVOC) und die nach C16 detektierten Verbindungen als semi volatile organic compounds (SVOC) angegeben. Die Messungen wurden gemäß DIN EN ISO 16000 Teil 6, 9 und 11 durchgeführt. Bei dem Nachweis der Emissionen wird zwischen den verschiedenen Levels „Spuren“, „leicht“, „mäßig“, „stark“ und „sehr stark“ differenziert.

Die flüchtigen Aldehyde werden auf DNPH-Kartuschen gesammelt und nach Elution mit Acetonitril mittels HPLC/UV gemäß DIN ISO 16000 Teil 3 analysiert. In den nachfolgenden Tabellen sind die Ergebnisse der Emissionsprüfungen aufgezeigt.

Das Probenmaterial „Buche unbehandelt“ war eine sehr starke Quelle von flüchtigen organischen Komponenten (VOC). Die geruchsrelevanten Verbindungen Essigsäure, n-Butanol, 1-Hydroxy-2-propanon, Propionsäure, Isobuttersäure, n-Hexanal, Buttersäure, Pentansäure und Hexansäure wurden in niedrigen bis sehr hohen Konzentrationen nachgewiesen (Tabelle 5).

Tabelle 5: Ergebnisse der Emissionsprüfung von Probe "Buche unbehandelt"

Substanz	Konzentration in µg/m ³ nach		
	5 h	24 h	48 h
Ethanol	76	3	< 1
Aceton	4	4	4
n-Propanol	4	1	< 1
Essigsäure	1824	1071	777
n-Butanol	3	1	< 1
1-Hydroxy-2-propanon	8	3	2
Propionsäure	2366	1293	908
Isobuttersäure	88	48	34
n-Hexanal	5	2	1
Buttersäure	275	147	108
Pentansäure	15	9	6
Hexansäure	14	4	2
Summe VVOC (< C6):	84	8	5
Summe VOC (C6-C16):	4598	2578	1838
Summe SVOC (> C16):	< 1	< 1	< 1

Das thermisch modifizierte Buchenfurnier war eine starke Quelle von flüchtigen organischen Komponenten (VOC). Die geruchsrelevanten Verbindungen Essigsäure, 1-Hydroxy-2-propanon, Propionsäure, Furfural und 5-Methylfurfural wurden in niedrigen bis hohen Konzentrationen nachgewiesen (Tabelle 6). Die giftige Substanz Furfural wurde in mäßigen Konzentrationen nachgewiesen.

Tabelle 6: Ergebnisse der Emissionsprüfung von Probe "Buche thermisch modifiziert"

Substanz	Konzentration in µg/m ³ nach		
	5 h	24 h	48 h
Aceton	4	4	3
Methylacetat	7	4	4
Essigsäure	3143	1574	1134
1-Hydroxy-2-propanon	18	7	4
Propionsäure	18	16	10
Furfural	183	81	55
5-Methylfurfural (Furfural)	8	1	< 1
Summe VVOC (< C6):	11	8	7
Summe VOC (C6-C16):	3370	1679	1203
Summe SVOC (> C16):	< 1	< 1	< 1

Das acetylierte Buchenfurnier war eine sehr starke Quelle von flüchtigen organischen Komponenten (VOC). Die geruchsrelevanten Verbindungen Essigsäure und Furfural wurden in niedrigen bis sehr hohen Konzentrationen nachgewiesen. Die giftige Substanz Furfural wurde in Spuren-Konzentrationen nachgewiesen (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: Ergebnisse der Emissionsprüfung von Probe "Buche acetyliert"

Substanz	Konzentration in µg/m ³ nach		
	5 h	24 h	48 h
Aceton	7	3	3
Methylacetat	8	< 1	< 1
Essigsäure	7536	4207	2785
Furfural	17	8	5
Methylendiacetat (Toluen)	12	7	5
Ethanol, 1,1'-oxybis-, diacetate (Toluen)	12	5	3
Summe VVOC (< C6):	15	4	4
Summe VOC (C6-C16):	7577	4227	2798
Summe SVOC (> C16):	< 1	< 1	< 1

Das Probenmaterial des unbehandelten, aber gelüfteten Buchenfurniers war eine starke Quelle von flüchtigen organischen Komponenten (VOC). Die geruchsrelevanten Verbindungen

Essigsäure, Propansäure, iso-Butansäure, n-Butansäure, Pentansäure, Hexansäure und Phenol wurde in niedrigen bis hohen Konzentrationen nachgewiesen. Die giftige Substanz Phenol wurde in Spuren-Konzentrationen nach 5 und 24 Stunden nachgewiesen (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8: Ergebnisse der Emissionsprüfung von Probe "Buche unbehandelt gelüftet"

Substanz	Konzentration in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ nach		
	5 h	24 h	48 h
Ameisensäure	9	6	6
Essigsäure	498	337	275
Propansäure	773	639	530
iso-Butansäure	25	21	16
n-Butansäure	102	90	76
Pentansäure	8	7	6
Hexansäure	3	3	3
Phenol	1	1	< 1
Summe VVOC (< C6):	9	6	6
Summe VOC (C6-C16):	1410	1098	906
Summe SVOC (> C16):	< 1	< 1	< 1

Das KTL-behandelte Furnier war eine schwache Quelle von flüchtigen organischen Komponenten (VOC). Die geruchsrelevanten Verbindungen Essigsäure, n-Butylacetat und Furfural wurden in niedrigen Konzentrationen nachgewiesen. Die giftige Substanz Furfural wurde in Spuren-Konzentrationen über die gesamte Messdauer nachgewiesen.

Tabelle 9: Ergebnisse der Emissionsprüfung von Probe "Buche KTL-behandelt"

Substanz	Konzentration in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ nach		
	5 h	24 h	48 h
Aceton	4	4	2
Ameisensäure	11	12	10
Essigsäure	83	101	66
n-Butylacetat	2	< 1	< 1
Furfural	7	6	3
1-Butoxy-2-propanol	2	6	3
Summe VVOC (< C6):	15	16	12
Summe VOC (C6-C16):	94	113	72
Summe SVOC (> C16):	< 1	< 1	< 1

Furfural, wie es bei thermisch modifiziertem, acetyliertem und KTL-behandeltem Furnieren nachgewiesen wurde, entsteht bei der thermischen Behandlung von Holz. Aus den Hemicellulosen des Holzes entstehen dabei u. a. Essigsäure und Ameisensäure sowie bei höheren Temperaturen das besagte Furfural. Da bei allen drei Vorbehandlungen verhältnismäßig hohe Temperaturen eingesetzt wurden, ist der Nachweis des Furfural nicht überraschend.

In Tabelle 10 und Tabelle 11 sind die Ergebnisse der leichtflüchtigen Aldehyde aller unbehandelten und behandelten Furnierproben zu sehen. Bis auf die beiden Proben „thermisch modifiziert“ und „KTL-behandelt“, bei welchen Formaldehyd nachgewiesen werden konnte, liegen die Konzentrationen leichtflüchtiger Aldehyde bei den anderen Furnierproben unterhalb der Bestimmungsgrenze.

Tabelle 10: Ergebnisse der leichtflüchtigen Aldehyde von unbehandeltem, thermisch modifiziertem und acetyliertem Buchenfurnier

Substanz	Konzentration in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ nach						Bestimmungsgrenze [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
	24 h			48 h			
	unbehandelt	thermisch	acetyliert	unbehandelt	thermisch	acetyliert	
Formaldehyd	< 2	9	< 2	< 2	7	< 2	2
Acetaldehyd	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	3
Propanal	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	3
Butanal	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	4
Aceton	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2

Tabelle 11: Ergebnisse der leichtflüchtigen Aldehyde von unbehandeltem gelüfteten sowie KTL-behandeltem Buchenfurnier

Substanz	Konzentration in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ nach				Bestimmungsgrenze [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
	24 h		48 h		
	unbehandelt gelüftet	KTL-behandelt	unbehandelt gelüftet	KTL-behandelt	
Formaldehyd	3	16	< 2	10	2
Acetaldehyd	< 3	< 3	< 3	< 3	3
Propanal	< 3	< 3	< 3	< 3	3
Butanal	< 4	< 4	< 4	< 4	4
Aceton	2	3	< 2	2	2

Geruchsintensitätsbewertung mit einem Vergleichsmaßstab gemäß ISO 16000-28 – indirekte Bewertung:

Die Luftproben werden in NALOPHAN-Beutel gefüllt und sobald wie möglich durch eine trainierte Probandengruppe bewertet. Die Probandengruppe besteht aus mindestens 8 trainierten Personen gemäß ISO 16000-28. Die zu untersuchende Luftprobe wird den einzelnen Testpersonen mithilfe eines Probendarbietungsgeräts zur Bewertung angeboten. Die Testpersonen bewerten unter Zuhilfenahme eines Aceton-Vergleichsmaßstabs die empfundene Intensität des Materials. Die Einheit der empfundenen Intensität Π ist pi. Der Vergleichsmaßstab für die Intensität ist durch folgende Punkte festgelegt:

- 0 pi entsprechen 20 mg/m³ (Geruchsschwelle von Aceton)
- 15 pi entsprechen 320 mg/m³.

Eine Erhöhung von 1 pi entspricht einer Erhöhung von 20 mg/m³.

Hedonische Wirkung

Die hedonische Wirkung der Probe wird im Anschluss an die Bestimmung der empfundenen Intensität durch die Probanden bewertet. Sie gibt Auskunft über die Lästigkeit eines Geruchs. In Abhängigkeit vom Geruchsstoff bzw. der Geruchsstoffkonzentration und dem individuellen Erfahrungshintergrund des jeweiligen Probanden werden dessen Empfindungen auf einer neunteiligen Skala von „äußerst angenehm“ (4) bis „äußerst unangenehm“ (-4) beschrieben (siehe Abbildung 21). In Tabelle 12 und Tabelle 13 sind Geruchsintensität und hedonische Wirkung der einzelnen Proben gegenübergestellt.

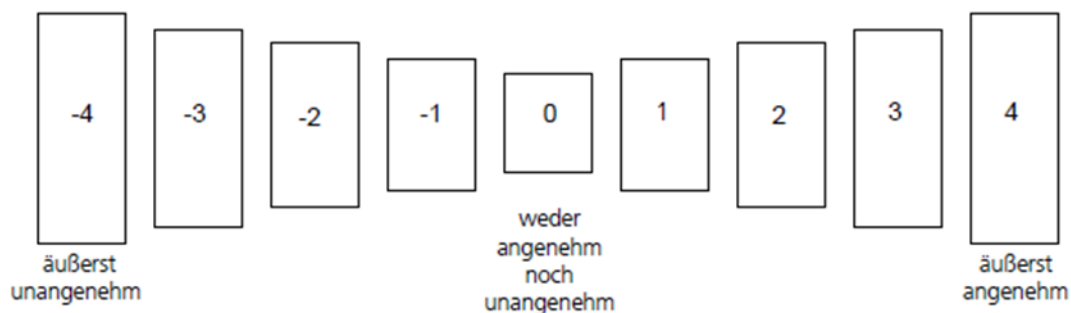


Abbildung 21: Neunteilige Skala der hedonischen Wirkung

Die empfundene Intensität der Probe „Buchenfurnier unbehandelt“ wurde durch die Probanden mit 11,0 pi als sehr starke Geruchsquelle eingestuft. Die hedonische Wirkung der Probe wurde als unangenehm bis äußerst unangenehm (-3,3) wahrgenommen.

Ursächlich für die sehr hohe Intensität sowie den unangenehmen Geruchseindruck der Probe sind sehr wahrscheinlich die durch das Material freigesetzten Carbonsäuren Essigsäure, Propionsäure, iso-Butansäure und Butansäure. Gerade die Carbonsäuren Propionsäure, iso-Butansäure sowie Butansäure haben sehr niedrige Geruchsschwellen und sind somit von der menschlichen Nase bereits in geringen Konzentrationen wahrnehmbar. Darüber hinaus besitzen Verbindungen wie Propionsäure, iso-Butansäure und Butansäure unangenehme Geruchseindrücke wie stechend, säuerlich, ranzig und käseartig.

Die empfundene Intensität der Probe „Buchenfurnier thermisch modifiziert“ wurde durch die Probanden mit 9,3 pi als starke Geruchsquelle eingestuft. Die hedonische Wirkung der Probe wurde als unangenehm (-1,4) wahrgenommen.

Ursächlich für die hohe Intensität sowie den unangenehmen Geruchseindruck der Probe sind hier ebenfalls sehr wahrscheinlich die durch das Material freigesetzten Carbonsäuren Essigsäure und Propionsäure sowie das Aldehyd Furfural. Der Geruchseindruck wird u. a. als säuerlich, holzig sowie rauchig wahrgenommen, was sich durch die thermische Vorbehandlung des Holzes erklären lässt.

Die empfundene Intensität der Probe „Buchenfurnier acetyliert“ wurde durch die Probanden mit 7,4 pi als deutliche bis starke Geruchsquelle eingestuft. Die hedonische Wirkung der Probe wurde als unangenehm (-1,3) wahrgenommen.

Ursächlich für die deutlich bis starke Intensität sowie den unangenehmen Geruchseindruck der Probe ist sehr wahrscheinlich die durch das Material freigesetzte Carbonsäure Essigsäure, welche prozessbedingt in großen Mengen nachgewiesen werden konnte und der Probe einen säuerlichen Geruchseindruck verschafft.

Tabelle 12: Ergebnisse der Geruchsbewertung nach 48 h von unbehandeltem, thermisch modifiziertem und acetyliertem Buchenfurnier

	Intensität			Hedonik		
	unbehandelt	thermisch	acetyliert	unbehandelt	thermisch	acetyliert
Mittelwert	11,0	9,3	7,4	-3,3	-1,4	-1,3
Standardabweichung	3,0	4,4	2,7	0,5	1,0	1,2

Die empfundene Intensität der Probe „Buchenfurnier unbehandelt gelüftet“ wurde durch die Probanden mit 9,8 pi als sehr starke Geruchsquelle eingestuft. Somit fällt die Geruchsintensität der gelüfteten Probe nur geringfügig kleiner aus als jene der unbehandelten, nicht gelüfteten Furnierprobe. Die hedonische Wirkung der Probe wurde als unangenehm bis äußerst unangenehm (-3,2) wahrgenommen.

Ursächlich für die sehr hohe Intensität sowie den unangenehmen Geruchseindruck der Probe sind auch bei dieser Probe sehr wahrscheinlich die durch das Material freigesetzten Carbon-säuren Essigsäure, Propansäure, iso-Butansäure und n-Butansäure. Gerade die Carbonsäu-ren Propionsäure, iso-Butansäure sowie n-Butansäure haben sehr niedrige Geruchsschwellen und werden somit von der menschlichen Nase bereits in geringen Konzentrationen wahrge-nommen.

Die empfundene Intensität der Probe „Buchenfurnier KTL-behandelt“ wurde durch die Proban-den mit 5,0 pi als schwache Geruchsquelle eingestuft. Die hedonische Wirkung der Probe wurde als leicht unangenehm (-0,8) wahrgenommen. Der Geruchseindruck wurde u. a. mit holzig, süßlich und säuerlich beschrieben.

Tabelle 13: Ergebnisse der Geruchsbewertung nach 48 h von unbehandeltem gelüfteten sowie KTL-behandeltem Buchenfurnier

	Intensität		Hedonik	
	unbehandelt gelüftet	KTL-behandelt	unbehandelt gelüftet	KTL-behandelt
Mittelwert	9,8	5,0	-3,2	-0,8
Standardab-weichung	3,9	3,0	0,9	1,0

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Holzmodifikationen keinen negativen Einfluss auf die Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen darstellen und sich sowohl Intensi-tät als auch empfundene Lästigkeit des Geruchs durch die Modifikationen verbessern. Die besten Ergebnisse bei der Geruchsintensitätsbewertung zeigten die Proben, welche den KTL-Prozess durchlaufen haben. Dies weist drauf hin, dass der automobiltypische KTL-Prozess, welchen das spätere Bauteil im Produktionsprozess durchläuft, weder die Werte der Emissi-onsuntersuchungen, noch der Geruchsintensitätsbewertung von Holz negativ beeinflusst. Eine weitere Verringerung wäre durch Lagerung bzw. Auslüften nach der Furniertrocknung und/o-der nach dem KTL-Prozess denkbar. Das finale holzbasierte MMS wird aufgrund weiterer Ver-arbeitungsschritte, wie dem Pressvorgang zur Verklebung und Hybridisierung unter Tempera-tureinwirkung oder auch einer abschließenden Beschichtung, abweichende Messergebnisse aufweisen.

VI.4 Fertigung von Hutprofilen (AP5, AP6, AP8, AP11)

In Absprache mit dem DLR wurden am WKI Holzkerne mit verschiedenen Lagenaufbauten gefertigt. Variiert wurden dabei Furnieranzahl und -dicke sowie die Orientierung der einzelnen Lagen. Die Herstellung der verwendeten Buchen-Schäl furniere erfolgte ebenfalls am WKI.

Zunächst wurde der Holz kern in einem Werkzeug der Siebenwurst Werkzeugbau GmbH (SWZ) bei Raumtemperatur für eine Stunde auf eine Zieldicke von 8,0 mm verpresst. Für die Holz-Holz-Verklebung diente Klebstoff 1 (1K PU). Um im nächsten Schritt den Holz kern mit den bereits bei der SWZ vorgeformten Blechen zu verkleben, mussten die Längsseiten des Holz kerns bis zu einer Bauteilbreite von 157 mm besäumt werden. In Abbildung 22 sind die einzelnen Schritte der Holz kern-Herstellung zu sehen.

In einem weiteren Werkzeug wurde dann der Holz kern mit den beiden Blechen als Außenlagen für eine Stunde bei Raumtemperatur verpresst. Für die Holz-Blech-Verklebung fand ebenfalls Klebstoff 1 (1K PU) Anwendung. Abschließend wurden alle Bauteile auf eine Größe von 400 mm x 187,4 mm besäumt und entgratet. Die einzelnen Arbeitsschritte der Holz-Blech-Verklebung bis zum fertigen Stringer sind in Abbildung 23 dargestellt.

Bei der Herstellung weiterer Verstärkungsteile wurde für die Holz-Holz-Verklebung im Einverständnis mit den Projektpartnern, wie auch bei weiteren Bauteilen, aufgrund der höheren offenen Zeit auf Klebstoff 2 (1K PU) umgestiegen und die Presszeit entsprechend angepasst. Für die Holz-Blech-Verklebung diente im weiteren Verlauf der Bauteil-Herstellung Klebstoff 4 (2K EP). Dieser Klebstoff zeigte bei den Untersuchungen der Salzgitter Mannesmann Forschung die höchsten Festigkeiten bei der Holz-Blech-Verklebung.

Bei der Herstellung der unterschiedlichen Hutprofile traten verschiedene Herausforderungen auf. Zum einen wies der Holz kern – wie zu erwarten war – mit seinem unidirektionalen Lagenaufbau einen starken Verzug auf. Erklärt werden kann dieser Verzug durch die Anisotropie des Holzes, wodurch das Holz durch Wasseraufnahme und -abgabe in den verschiedenen Richtungen unterschiedlich stark quillt und schwindet. Diesem Problem könnte aber durch das Einbringen von zwei dünnen Sperrlagen (wichtig ist ein symmetrischer Aufbau) relativ einfach entgegengewirkt werden. Zum anderen ist auch der gesamte Holz-Blech-Verbund nicht ganz plan. Ursache ist hier ebenfalls die Anisotropie des Holzes, wodurch der Holz kern weiterhin „arbeitet“.

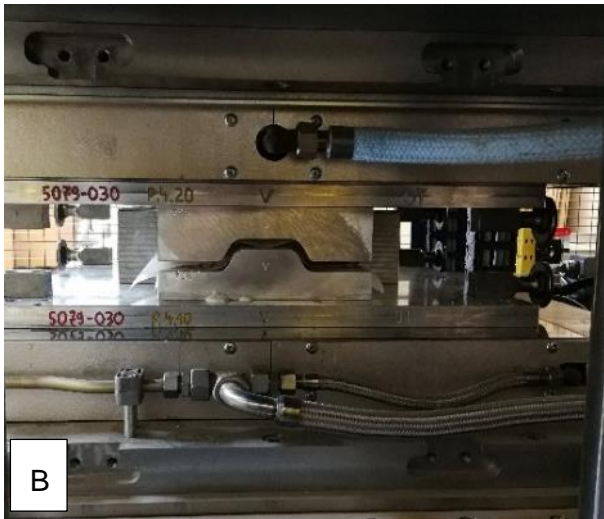


Abbildung 22: Herstellungsprozess des Hutprofil-Holzkerns. A: Einlegen der mit Klebstoff bestrichenen Furnierlagen in das Werkzeug. B: Seitenansicht des Hutprofil-Werkzeugs beim Zusammenfahren während des Pressvorgangs. C: An den Längsseiten besäumter Holzkern.

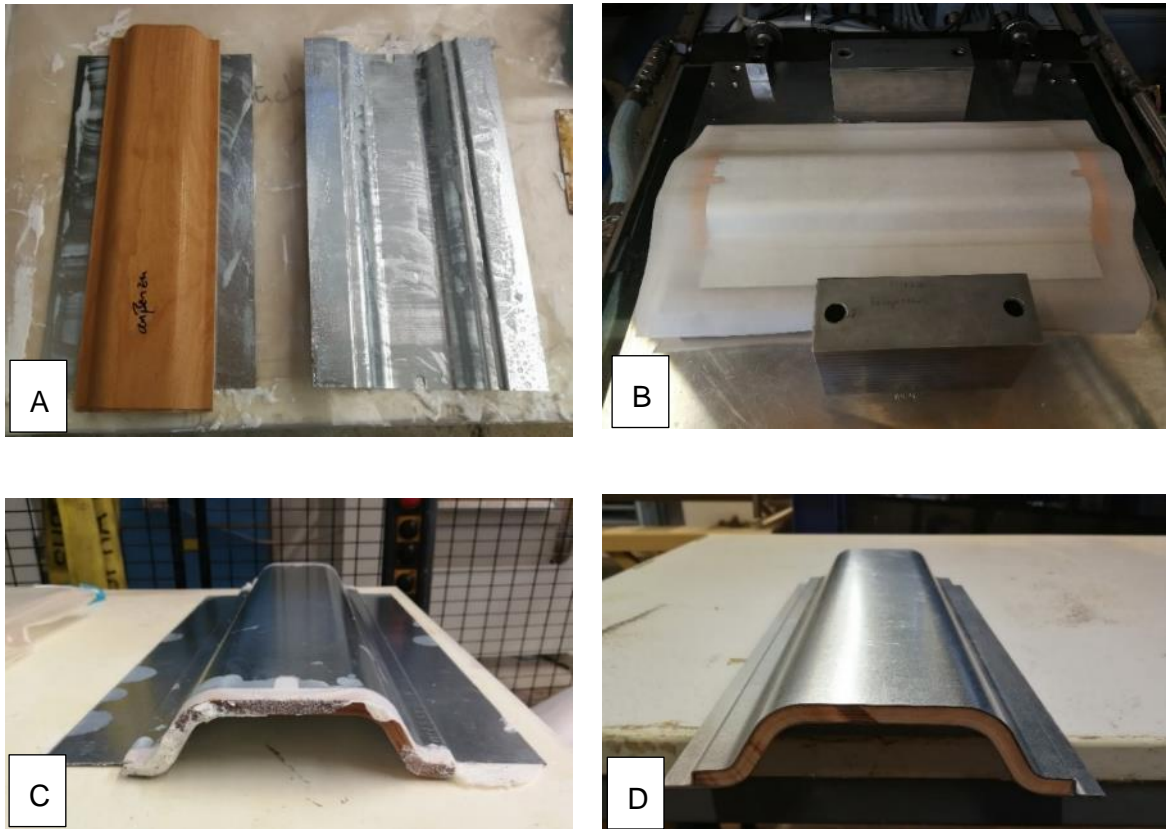


Abbildung 23: Herstellung der Holz-Blech-Verklebung für das fertige Hutprofil. A: Klebstoffauftrag auf vorgeformte Bleche. B: In Werkzeug eingelegter Holz-Metall-Sandwich-Aufbau. C: Verpresstes Bauteil, unbesäumt. D: Fertiges Hutprofil mit metallischen Decklagen, besäumt.

Im gleichen Verfahren erfolgte die Herstellung von Holzkernen mit verschiedenen Lagenaufbauten für Druckversuche beim DLR. Folgende Lagenaufbauten wurden hergestellt:

- 5 x 1,5 mm unidirektional (ud) längs orientiert
- 5 x 1,5 mm, 2. und 4. Lage gesperrt
- 4 x 2,0 mm, ud längs orientiert
- 8 x 1,0 mm, ud längs orientiert
- 9 x 1,0 mm, ud längs orientiert
- 4 x 2,0 mm, ud längs orientiert; Furniere beidseitig befeuchtet (zur Überprüfung einer evtl. besseren Klebstoffreaktion)
- Holzkern 5 x 1,5 mm, mit Blechen verklebt.

In Abbildung 24 ist eine Nahaufnahme des Multimaterialsystems, bestehend aus fünf Lagen 1,5 mm dickem Buchenfurnier und zwei Lagen je 0,7 mm starkem Stahl, zu sehen.



Abbildung 24: Nahaufnahme des Stringers; Furnierbasiertes Multimaterialformteil bestehend aus einem Holzkern und zwei Blechen als Außenlagen (Foto: Manuela Lingnau, Fraunhofer WKI)

Das Werkzeug für den Holzkern ist normalerweise nicht für größere Bauteildicken ausgelegt. Dennoch wurden in Absprache mit dem DLR nachfolgende Holzkerne hergestellt, um die Performance von dickeren Bauteilen zu überprüfen:

- 8 x 1,5 mm, ud längs orientiert; Dicke: 11,5 mm/10,0 mm
- 10 x 1,5 mm, ud längs orientiert; Dicke: 15,0 mm/11,9 mm
- 7 x 1,5 mm, ud längs orientiert; Dicke: 9,6 mm/8,7 mm.

Wie zu erwarten, wurden die Holzkerne an den schrägen Seiten weiter verdichtet und besitzen somit an diesen Stellen eine geringere Dicke (kleinere Zahl bei der Dickenangabe).

Die Ergebnisse der Druckversuche sind im Abschlussbericht des DLR zu finden (19I16013F).

Neben der Herstellung von Hutprofilen für mechanische Prüfungen, wurden am WKI Hutprofile für das Mock-UP „Schiene“ gefertigt.

Zudem wurden im Rahmen des Unterauftrags von der Siebenwurst Werkzeug GmbH (SWZ) am WKI weitere Stringer bzw. Hutprofile hergestellt. Ziel der Kooperation zwischen dem WKI und der SWZ war es, das vorhandene Know-how in Bezug auf die Herstellung holzbasierter Mehrlagen-Werkstoffe (Multimaterialsysteme) dem Industriepartner durch gemeinsame Versuchsreihen an den Technikumsanlagen des WKI zu vermitteln.

Die Entwürfe sowie die Erprobung der neuen Werkzeuge erfolgt(e) in enger Zusammenarbeit mit dem WKI. Dafür konnte auf alle technischen Einrichtungen des WKI sowie auf personenbezogene Kompetenz zurückgegriffen werden. Basierend auf den Ergebnissen wurden die im Rahmen des Projekts „For(s)tschritt“ zu entwickelten Werkzeuge konzipiert und umgesetzt. Zu Beginn der Untersuchungen wurden vom WKI dafür u. a. verschiedene Probekörper hergestellt, welche SWZ für anschließende Schneidversuche zur Verfügung gestellt wurden. Ziel

war es dabei, die Möglichkeit einer ins Werkzeug integrierten Schneidvorrichtung zu untersuchen.

Die Herstellung der Stringer stellte sich aufgrund der relativ geringen Umformgrade und der Umformung in lediglich einer Dimension größtenteils problemlos dar (Abbildung 25). Zu Rissen im Furnier kam es nur bei Verwendung von dickeren Furnierlagen. Ein Beispiel ist in Abbildung 26 dargestellt. Ein Bauteil, deren Lagen (5 x 1,5 mm) alle gesperrt, also senkrecht zur Bauteil-Längsrichtung orientiert, sind. Wie in Abbildung 27 zu sehen, weisen aber auch rein längs orientierte Lagenaufbauten mit vier 2,0 mm dicken Furnieren Risse auf.

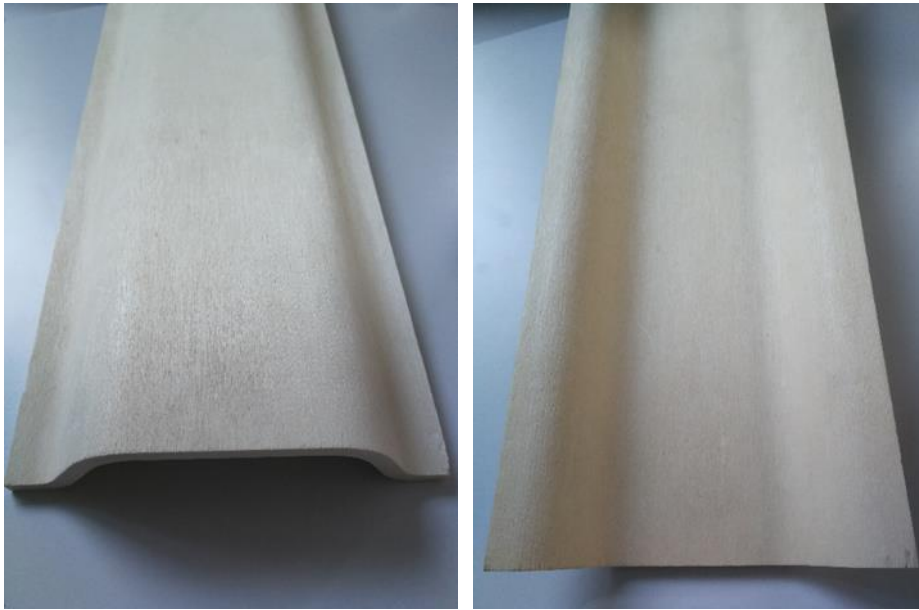


Abbildung 25: Fehlerfreies Stringer-Profil, fünf Lagen 1,5 mm Pappelfurnier gesperrt



Abbildung 26: Stringer-Profil mit fünf Lagen 1,5 mm Buchenfurnier unidirektional gesperrt, an den Radien gebrochen



Abbildung 27: Stringer-Profil mit vier Lagen 2,0 mm Hainbuchenfurnier unidirektional in Längsrichtung, weist Risse auf

VI.5 Pultrusion mit Holzfurnieren (AP6)

Neben der Herstellung von Bauteilen in Holz-Metall-Verbundbauweise wurde im Rahmen des Projekts die Hybridisierung von Holz mit faserverstärkten Kunststoffen untersucht. Dabei erwies sich Pultrusion (Strangziehverfahren zur Herstellung faserverstärkter Kunststoffe) als mögliches Fertigungsverfahren zur Herstellung gerader Profile. Die Idee besteht darin, Holzfurnierstreifen als Endlosmaterial einem Standard-Pultrusionsprozess zuzuführen, um so ein Sandwich-Profil zu erhalten. Auf diese Weise lassen sich die positiven Eigenschaften von Holz und faserverstärkten Kunststoffen kombinieren. Einerseits ist das Holz im Sandwichverbund vor Umgebungseinflüssen geschützt, andererseits kann sowohl die Menge an synthetischen Fasern als auch an Matrixpolymer reduziert werden, wobei der Werkstoff immer noch über gute mechanische Eigenschaften verfügt.

Die Pultrusionsversuche erfolgten in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner VW an einer Anlage des Fraunhofer-Instituts für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU in Chemnitz.

Für die kontinuierliche Pultrusion (siehe Abbildung 28) mit Holzfurnieren war es erforderlich, Furnierstreifen miteinander zu verbinden. Einzelne 1,0 mm dicke Furnierblätter wurden zunächst mit Wasser angefeuchtet und gepresst, um möglichst ebene, rissfreie Furniere zu erhalten. Im nächsten Schritt erfolgte der Zuschnitt der Furniere auf eine Breite von 45 mm und das Entfernen der rissigen Enden mit einer Schlagschere. Anschließend wurden mittels einer Furnierstanze Zinken in die Enden der einzelnen Furnierstreifen gestanzt und die jeweiligen Furniere - in Faserrichtung - zusammengelegt. Streifen von Schmelzklebeband, welche auf die Verbindungsstelle gelegt und mit einem Bügeleisen aufgeschmolzen wurden, verbinden die einzelnen Furnierstreifen. Nach diesem Verfahren wurden ca. 300 m Furnierband hergestellt, welches auf eine Vorrichtung aufgerollt wurde.

Im ersten Schritt wurde ein 50 mm breites und 2,0 mm dickes Tape bzw. Streifenprofil mit Holzfurnier als Mittellage pultrudiert, um die grundlegende Machbarkeit zu untersuchen. Bei einem 1,0 mm starkem Holzfurnier bleiben somit auf der Ober- und Unterseite des Tapes jeweils noch 0,5 mm Glasfaserkunststoff (GFK). Variiert wurden die Abzugsgeschwindigkeit (300 mm/min – 375 mm/min – 450 mm/min – 525 mm/min – 600 mm/min), der Faservolumengehalt (FVG) (55 % – 60 % – 65 % – 70 % – 75 %) sowie das Harzsystem. Zum einen fand ein ungesättigtes Polyesterharz (UP) Anwendung, zum anderen wurde ein Epoxidharz (EP) getestet, da dieses im Gegensatz zum UP im Hinblick auf die Emissionen (Styrol) als unbedenklich gilt. Denkbar wäre auch ein Polyurethan (PU), welches aufgrund einer anderen Art der Harztränkung (Injektion) jedoch ein weiteres Werkzeug erfordern würde.

Das UP hat sich als gutes Harz für die Pultrusion mit Holzfurnieren bewiesen, EP hingegen zeigt sich eher als ungeeignet. Bei der Verwendung von EP lösen sich Harz und Glasfaser vom Holz. Eine mögliche Ursache dafür ist die Feuchtigkeit des Holzes. Das EP reagiert bereits mit dem Wasser, weshalb das Harz nicht vollständig aushärtet. Eine Art Grenzschicht wird ausgebildet, welche dazu führt, dass keine Bindung zum Holz aufgebaut werden kann.



Abbildung 28: Pultrusionsanlage (Foto: David Löpitz, Fraunhofer IWU)

Um die Verformbarkeit der Holzfurniere für die Anwendung in einem Profil zu optimieren, wurde die Pultrusion auch mit - kurz vor der Pultrusion - Wasser angefeuchteten Furnieren im UP-Harzsystem untersucht. Dies stellte sich jedoch als nicht praktikabel heraus, da sich auch hier Harz und Glasfaser vom Holz trennen.

Zudem wurde mit Holzfurnieren pultrudiert, welche bei einem Pressdruck von 2 N/mm² bzw. 5 N/mm² zwischen zwei Flexopansieben gepresst wurden. Dadurch zeichnet sich eine feine Siebstruktur auf beiden Seiten der Furniere ab. Ursprünglich war eine Perforation der Furniere angedacht, wodurch das Harz möglicherweise besser und weiter in das Furnier eindringt. Zum Zeitpunkt der Pultrusionsversuche war dies technisch allerdings noch nicht umsetzbar.

In einem weiteren Schritt wurde ein Hohlprofil mit drei verschiedenen Radien (1 mm – 10 mm – 20 mm) pultrudiert (siehe Abbildung 29). Das Profil hat einen Durchmesser von 40 x 40 mm² und eine Wandstärke von 3,0 mm.

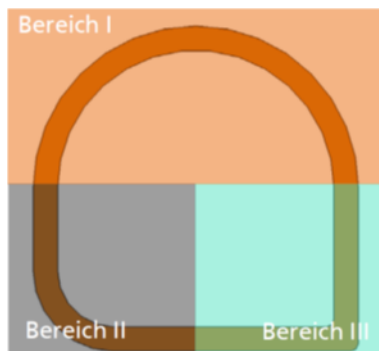


Abbildung 29: Blendenbereiche des Hohlprofils (David Löpitz, Fraunhofer IWU)

Die einzelnen Furnierstreifen (Breite 30 mm) wurden, ebenso wie in den Vorversuchen, zu einem Furnierband verbunden. Die Verklebung wurde jedoch optimiert und erfolgte hier mit einem handelsüblichen Weißleim. Dafür wurden die Schmalflächen der einzelnen Zinken mit dem Leim bepinselt und die Trocknung mithilfe eines Bügeleisens beschleunigt.

Als Harzsystem diente, wie in den Vorversuchen, ein UP. Um die optimalen Prozessparameter zu bestimmen und zum Einstellen der Kernpositionierung, wurde das Hohlprofil zunächst ohne Holzfurnier mit einem FVG von 65 % hergestellt. Dabei wies die Abzugsgeschwindigkeit von 300 mm/min das beste Oberflächenergebnis auf. In weiteren Schritten wurden der Bereich, also der Radius, in welchen das Furnier integriert werden soll, der Faservolumengehalt (55 % – 60 % – 65 % – 70 % – 75 %) sowie die Furnierdicke (0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm) variiert. Durch Abschneiden von Rovings musste zudem der lokale FVG in Abhängigkeit der Furnierdicke in den entsprechenden Radien angepasst werden (siehe Tabelle 14).

Tabelle 14: Rovinganzahl für die drei Blendenbereiche in Abhängigkeit vom FVG (nach David Löpitz, Fraunhofer IWU)

Bereich/ Rovinganzahl	100 % GFK					Inkl. Holzfurnier (30 x 0,5 mm ²)					Inkl. Holzfurnier (30 x 1,0 mm ²)					Inkl. Holzfurnier (30 x 1,5 mm ²)				
	55	60	65	70	75	55	60	65	70	75	55	60	65	70	75	55	60	65	70	75
I (174 mm ²)	53	58	63	68	72	48	53	57	62	66	44	48	52	56	60	39	43	47	50	54
II (100 mm ²)	30	33	36	39	42	26	28	31	33	35	21	23	25	27	29	17	18	20	21	23
III (111 mm ²)	34	37	40	43	46	29	32	35	37	40	25	27	29	31	34	20	22	24	26	27

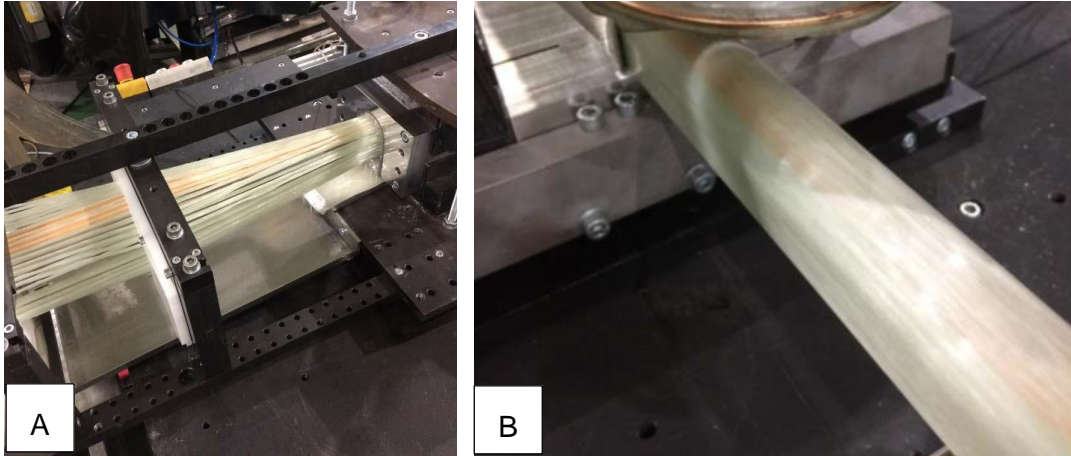


Abbildung 30: A: Einführung der mit UP-Harz getränkten Glasfasern und des getränkten Furnierbands in das Pultrusionswerkzeug. B: Pultrudiertes Hohlprofil am Werkzeugauslauf (Fotos: David Löpitz, Fraunhofer IWU)

Die Zugprüfung der pultrudierten Tapes wurde am WKI durchgeführt, deren Auswertung sowie die Biegeprüfung, Druckprüfung und Herstellung von Schlißbildern der Tapes und Hohlprofile erfolgte beim Projektpartner VW. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind sowohl im Gesamtabschlussbericht als auch im Abschlussbericht der VOLKSWAGEN AKTIENGESELLSCHAFT dargestellt (19I16013A).

VI.6 Herstellung von Probepplatten zur Untersuchung akustischer Dämpfungseigenschaften sowie zur Erstellung einer Materialkarte (AP4)

Eine wesentliche Funktion der holzbasierten Baugruppe PKW stellt die Substitution der Dämpfungsmatten dar, welche in der Fahrzeugmontage auf die Innenseiten der Türaußenbleche geklebt werden. Zur Untersuchung der Einflüsse von Furnierstärke und -orientierung auf die Dämpfungseigenschaften wurden am Fraunhofer WKI Probekörper entsprechend des Versuchsplans in Tabelle 15 für den Projektpartner VW gefertigt. Als Klebstoff wurde Klebstoff 2 (1K PU) eingesetzt.

Tabelle 15: Versuchsplan zur Untersuchung der frequenzabhängigen Dämpfung (ud = unidirektional)

Nr.	Holzart	Plattenlänge [mm]	Plattenbreite [mm]	Plattenstärke [mm]	Furnierstärke [mm]	Lagenanzahl	Lagenaufbau	Bemerkung
1	Buche	500	150	4	4	1	0°	
2	Buche	500	150	4	4	1	0°	
3	Buche	500	150	4	2	2	0° ud	
4	Buche	500	150	4	2	2	0° ud	
5	Buche	500	150	4	1	4	0° ud	
6	Buche	500	150	4	1	4	0° ud	
7	Buche	500	150	4	1	4	0/90/90/0	symmetrisch 0° außen
8	Buche	500	150	4	1	4	0/90/90/0	symmetrisch 0° außen
9	Buche	500	150	4	1	4	90/0/0/90	symmetrisch 90° außen
10	Buche	500	150	4	1	4	90/0/0/90	symmetrisch 90° außen
11	Buche	500	150	4	0,5	8	0° ud	
12	Buche	500	150	4	0,5	8	0° ud	
13	Buche	500	150	4	0,5	8	0/90/0/90/90/0/90/0	symmetrisch 0° außen
14	Buche	500	150	4	0,5	8	0/90/0/90/90/0/90/0	symmetrisch 0° außen
15	Buche	500	150	4	0,5	8	90/0/90/0/0/90/0/90	symmetrisch 90° außen
16	Buche	500	150	4	0,5	8	90/0/90/0/0/90/0/90	symmetrisch 90° außen

Ferner wurden für den Projektpartner VW unidirektionale Furnierschichthölzer hergestellt, welche der Fa. MATFEM zur Erstellung einer Materialkarte dienten.

Die Ergebnisse der Untersuchungen können sowohl im Gesamtabschlussbericht als auch im Abschlussbericht der VOLKSWAGEN AKTIENGESELLSCHAFT nachgelesen werden (19I16013A).

VI.7 Fertigungsuntersuchungen L-Träger (AP6, AP8, AP9)

Gemeinsam mit SWZ wurden im WKI Versuche an dem Werkzeug für einen „L-Träger“ durchgeführt, welcher ebenfalls als generisches Bauteil für die Baugruppe PKW dienen soll. Ziel dieser Untersuchungen war es, das Verhalten des Furnierstapels während des Pressvorgangs zu beobachten und daraus Optimierungsmöglichkeiten für das Werkzeug abzuleiten. Bei allen Vorversuchen wurde aufgrund der kurzen Presszeit ein einfacher PVAc-Leim verwendet.

In einem ersten Schritt wurde das Werkzeug dahingehend optimiert, dass die beleimten Furnierstapel einfacher eingelegt werden können. Im ersten Versuch hat sich gezeigt, dass eine Überverdichtung des Radius Brechen bzw. Reißen der Furnierlagen zur Folge hat (Abbildung 31). Ursache dafür ist die Tatsache, dass der Furnierlagenstapel an den beiden Schenkeln schon fest zwischen Ober- und Unterwerkzeug klemmt. Wenn das Oberwerkzeug weiter zu fährt, kann das Furnier nicht nachrutschen, im Radius fehlt Material und die Furnierlagen reißen.



Abbildung 31: L-Profil mit gerissenen Furnierlagen nach Überverdichtung

Bei weiteren Pressvorgängen hat sich herausgestellt, dass sich das Werkzeug aufgrund großer Schubkräfte, welche durch die sehr unterschiedlich langen Schenkel bedingt sind, in der Presse verschiebt. Bei einer Zieldicke des Bauteils von 24 mm (oberer Radius 20, unterer Radius 44) hatte der lange Schenkel eine Dicke von 26 mm, der kurze Schenkel hingegen nur 22 mm. Das Werkzeug konnte zunächst durch eine zusätzliche Schraube fixiert werden. In folgenden Versuchen hergestellte Bauteile wiesen jedoch weiterhin unterschiedlich dicke Schenkel auf. Da der Abstand des Ober- und Unterwerkzeugs zueinander hier jedoch weiterhin korrekt war, kann davon ausgegangen werden, dass es während des Pressvorgangs zu Verschiebungen der Presse gekommen ist.

In Anlehnung an das finale PKW-Bauteil wurden nachfolgend weitere Verdichtungsversuche am WKI durchgeführt. Bei jenem Bauteil sollte am kurzen Schenkel ein stark verdichteter Bereich erzielt werden. Zu diesem Zweck wurde - wie in Abbildung 32 gezeigt - im Unterwerkzeug

eine Zulage befestigt. Ebenfalls in Abbildung 32 zu sehen, sind die modifizierten und jetzt als Anschlag für die beleimten Furnierstapel dienenden Metallplättchen.

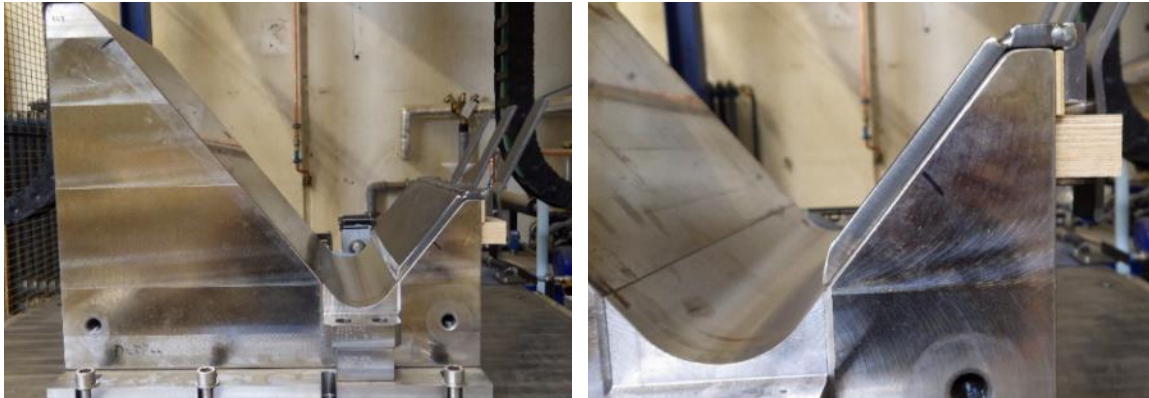


Abbildung 32: Unterwerkzeug mit modifiziertem Anschlag und Einleger für Verdichtung

Besonderes Augenmerk wurde auf die Verdichtungszone, den Radius bzw. Bogenbereich des Bauteils sowie die Werkzeugverschiebung aufgrund von Schub gelegt. Der Pressvorgang ist in Abbildung 33 dargestellt. Sehr gut zu sehen ist hier auch, wie der Furnierstapel auf den beiden Schenkeln des Unterwerkzeugs auf- und am Anschlag anliegt.

Am fertigen Bauteil, Abbildung 34 A, ist die Verdichtung sehr gut zu erkennen. Allerdings wurden auch dieses Mal die Sollmaße nicht erreicht und die beiden Schenkel weisen unterschiedliche Bauteildicken auf. Auffällig ist bei diesem Versuch, dass - im Gegensatz zu den vorhergehenden Bauteilen – der lange Schenkel mit 21 mm dünner ist als das Sollmaß von 24 mm. Ursache dafür sind auch hier die großen Querkräfte, welche in diesem Fall durch die erforderliche Verdichtung am kurzen Schenkel jedoch in die andere Richtung wirken und erneut eine Verschiebung des Werkzeugs zur Folge haben. Der Bogenbereich weist 25 mm statt der gewünschten 24 mm auf. In dem Bereich der Verdichtung sollte eine Dicke von 14 mm erzielt werden, an dieser Stelle misst das Bauteil 19 mm. Im Übergang von Verdichtung zu Bogenbereich ist das Bauteil nicht vollständig verpresst und die obere Furnierlage ist in diesem Bereich am Außenradius gebrochen (Abbildung 34 D und E). Grund dafür ist mit hoher Wahrscheinlichkeit, dass der Einleger keinen fließenden Übergang zum Werkzeug besitzt (Abbildung 32), Ober- und Unterwerkzeug an dieser Stelle nicht zueinander passen (Abbildung 33 D) und daher in diesem Bereich nicht der vollständige Druck vom Oberwerkzeug aufgebracht werden kann.

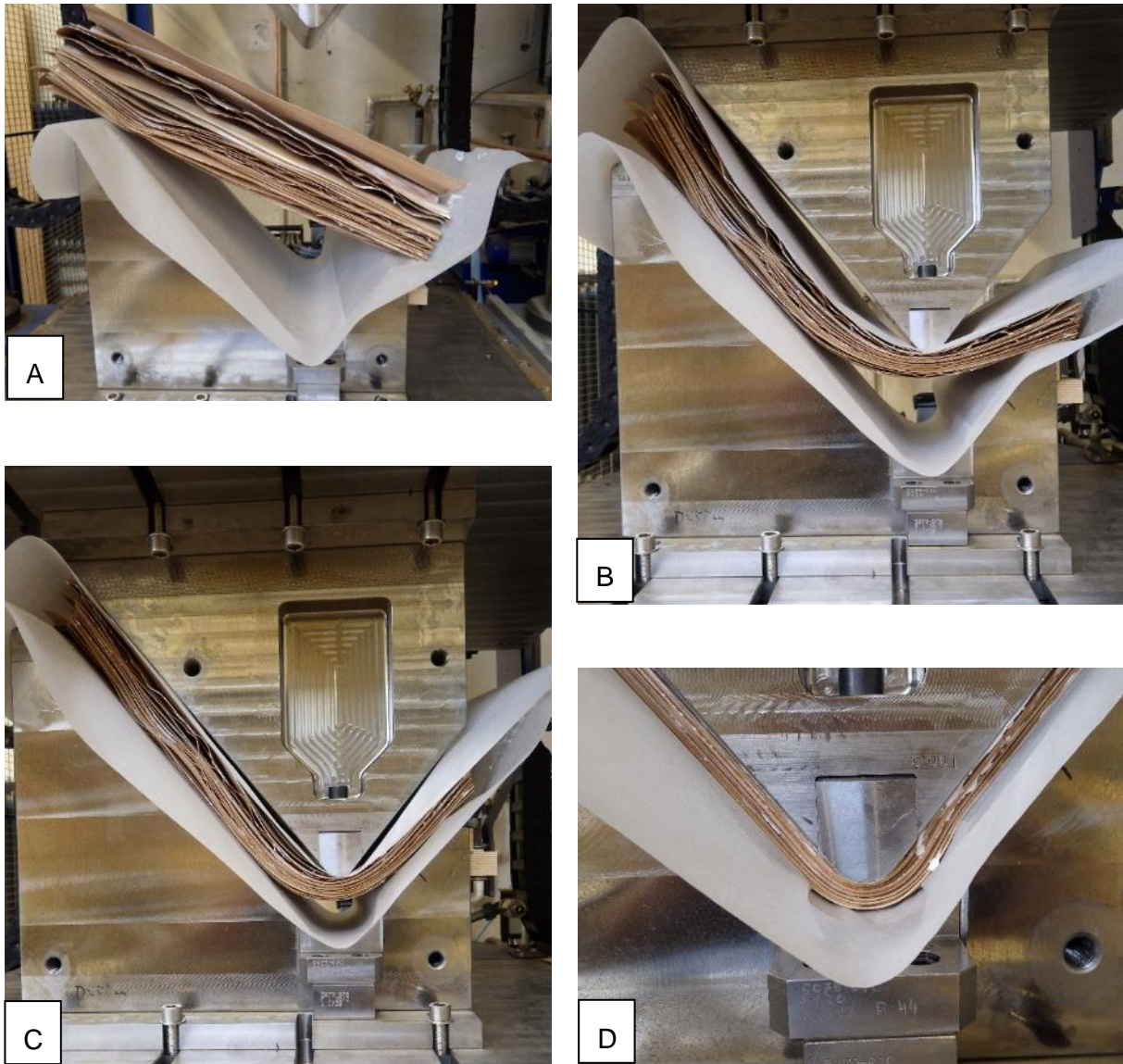


Abbildung 33: Pressvorgang des L-Profiles. (A) Eingelegter Furnierstapel liegt auf den Schenkeln des Unterwerkzeugs auf und ohne Versatz am Anschlag an, (B) - (D) Zusammenfahren des Werkzeugs



Abbildung 34: L-Profil mit Verdichtungszone. (A) gesamtes Bauteil, (B) verdichteter Bereich, (C) Innenradius mit intakten Furnierlagen, (D) und (E) gebrochene Furnierlagen im Übergangsbereich von Verdichtungszone zu nicht verdichtetem Bereich

Zusammen mit SWZ wurden Überlegungen angestellt, wie das Reißen der Furnierlagen aufgrund eines vorzeitigen Klemmens der Furnierlagen an den Schenkeln verhindert werden kann. Eine aussichtsreiche Option stellte hier die Teilung des Oberwerkzeugs dar. Angedacht war dabei eine Art Niederhalter, welcher den Furnierlagenstapel zunächst in den Radius führt und dort vorverdichtet. Anschließend werden die restlichen Teile des Oberwerkzeugs zugefahren und das Furnier kann ungehindert nachrutschen.

Für die weitere Werkzeugkonfiguration sollten zudem die hohen Schubkräfte im Werkzeug beachtet werden, welche durch die sehr unterschiedlich großen Schenkel bedingt sind und zusätzlich auf die Presse wirken. Ferner muss eine ausreichende Befestigung des Werkzeugs an der Presse sichergestellt sein.

Aufbauend auf diesen gemeinsamen Vorversuchen mit SWZ zur Untersuchung des Furnierstapels im Werkzeug sowie zur Modifizierung des Werkzeugs wurden am WKI weitere L-Profile hergestellt.

Die Verklebung der einzelnen Buchenfurniere erfolgte mit dem Klebstoff 2 (1K PU). Entsprechend des technischen Datenblatts betrug die Auftragsmenge des Klebstoffs 200 g/m² und die Presszeit des Formteils fünf Stunden bei Raumtemperatur. Bei der Herstellung der L-Profile wurden sowohl Furnieranzahl, -dicke und Vorbehandlung der inneren Decklagen als auch die Größe der Innen- und Außenradien variiert (siehe Tabelle 16). Die einzelnen Furnierlagen wurden bei allen vier Varianten gesperrt angeordnet, wobei die Decklagen längs gerichtet waren.

Wie auch schon bei den Vorversuchen konnte bei keinem der hergestellten Probekörper die durch die Radien vorgegebene Zieldicke erreicht werden. Beide Schenkel besitzen unterschiedliche Dicken, wobei der lange Schenkel stets die größere Dicke aufweist. Ursache dafür sind die großen Querkräfte, welche durch die sehr unterschiedlich langen Schenkel bedingt sind und eine Verschiebung innerhalb der Presse zur Folge haben.

Erst durch ein starkes Anfeuchten der inneren Decklage mit Wasser konnte das Brechen der obersten Furnierlage verringert bzw. verhindert werden (Abbildung 35 C und D). Da die Feuchtigkeit allerdings mit dem Werkzeug reagiert, führte dies – wie in Abbildung 35 C zu sehen – zu einer starken Verfärbung der Furnieroberfläche.

Die Herstellung der L-Träger diente der Fertigungsuntersuchung, es fanden keine mechanischen Prüfungen an den Probeteilen statt.

Tabelle 16: Aufbau und Eigenschaften der hergestellten L-Profile

Variante	Furnierdicke [mm]	Lagenanzahl	Rinnen [mm]	Raußen [mm]	Dicke _{Soll} [mm]	Dicke _{Ist} langer Schenkel [mm]	Dicke _{Ist} kurzer Schenkel [mm]	Vorbehandlung	Beobachtungen
1	1,0	25	44	20	24	25	22	-	Innere Decklage gebrochen
2	1,0	33	52	20	32	33	29	Innere Decklage angefeuchtet	Innere Decklage gebrochen, leichte Verfärbungen der Oberfläche durch Feuchtigkeit
3	1,0	33	44	12	32	32,5	30,4	Innere Decklage stark angefeuchtet	Decklagen nicht gebrochen, aber Oberfläche durch Feuchtigkeit und Werkzeug verfärbt
4	0,5	51	44	20	24	26,5	22,5	-	Beleimter „Kuchen“ unverdichtet 22 cm hoch, Innere Decklage nur leicht gebrochen

A: Variante 1



B: Variante 2



C: Variante 3



D: Variante 4



Abbildung 35: A - D: Fotos der L-Profile in den Varianten 1 - 4

VI.8 Herstellung von Trägern für 3-Punkt Biegeprüfung als Vorversuche für generisches Bauteil PKW (AP6, AP11)

In Absprache mit dem DLR wurden am WKI Träger für die Drei-Punkt-Biegeprüfung als Voruntersuchung für das generische Bauteil VW hergestellt. Die Verklebung der einzelnen Buchenfurniere erfolgte mit Klebstoff 2 (1K PU) bei einer Presstemperatur von 60 °C und einer Presszeit von zwei Stunden. Zunächst wurden zwei verschiedene Materialkonfigurationen aus Holz, ohne Blechlage und Stahlband, gefertigt (Tabelle 17 VW 1 und VW 2). Materialkonfiguration VW 1 wurde auf eine Dicke von 32 mm gepresst. Dabei zeigte sich jedoch, dass einzelne Furnierlagen der Platten am Rand tlw. nicht vollständig verklebt waren. Materialkonfiguration VW 2 wurde daher nach Rücksprache mit dem DLR auf eine Plattenstärke von 30 mm verdichtet, wodurch eine gute Plattenqualität erzielt werden konnte. Die Platten wurden anschließend zu Trägern mit einer Größe von 100 mm x 900 mm zugeschnitten und beim Projektpartner DLR einer 3-Punkt-Biegeprüfung unterzogen.

Im Anschluss wurden erneut Träger für die 3-Punkt-Biegeprüfung gefertigt. Dafür wurden zunächst zwei Platten mit einem nahezu vollständigen Sperrlagenaufbau hergestellt (Tabelle 17 VW 3). Der Aufbau resultierte aus den bisherigen Ergebnissen des DLR. Bei diesen zeigte sich ein blockweises Versagen des Bauteils, welches nun durch den Sperrlagenaufbau verhindert werden sollte. Als Klebstoff für die Holz-Holz-Verklebung wurde, wie zuvor für die Träger, Klebstoff 2 verwendet. Der Aufbau besteht aus 17 Lagen 2,0 mm dickem Buchenfurnier. Entsprechend der Erfahrungen bei der Herstellung der vorhergehenden Platten, wurden die Platten auf eine Dicke von 32 mm verdichtet. Die beiden Platten wurden anschließend zu Trägern gemäß der in Abbildung 36 dargestellten Profilgeometrie und einer Länge von 900 mm zugeschnitten.

Um das abrupte Versagen der Bauteile, welches sich bei den vorherigen Materialkonfigurationen gezeigt hat, zu verhindern, wurde in einem weiteren Schritt ein Stahlband auf der schmalen Seite des Trägers aufgebracht. Die Bleche wurden mittels Klebstoff 4 (2K EP) bei einer Presstemperatur von 70 °C und einer Presszeit von einer Stunde mit dem Träger verklebt und verpresst. Die Stahlbleche wurden von dem Projektpartner Salzgitter Mannesmann Forschung gefertigt. Die Stahldicke wurde dabei gemäß der Simulation mit 1,2 mm gewählt. Die Bleche waren 50 mm breit und standen in zwei verschiedenen Längen zur Verfügung: 900 mm und 1000 mm. Die langen Bleche hatten somit einen Überstand von jeweils 50 mm an den beiden Stirnseiten eines Trägers.

Für die abschließenden schlagdynamischen Versuche wurden von der Salzgitter Mannesmann Forschung für das Stahlband zwei spezielle Beschichtungssysteme ausgewählt. Die Verklebung der 1,2 mm dicken und 1000 mm langen Stahlbänder mit den Holzträgern erfolgte

erneut mit Klebstoff 4 (2K EP). Da die Auswahl eines geeigneten Beschichtungssystems parallel zur Durchführung erster Versuche an generischen Bauteilen erfolgte, konnten die optimierten Beschichtungssysteme nicht bereits zu Beginn der Untersuchungen eingesetzt werden. Aufbauend auf den bis dahin generierten Ergebnissen der verschiedenen Träger, hat das DLR den Lagenaufbau nochmals modifiziert und zwei weitere Materialkonfigurationen erstellt, welche am WKI erneut in Form von Trägern umgesetzt wurden. Bei den Varianten VW 4 und VW 5 wurden bereits fertigungstechnische Restriktionen bei den jeweiligen Furnierdicken berücksichtigt. Daher sind die äußeren Lagen, die später das komplexe Schalenbauteil bilden, aus 0,5 mm dicken Furnieren und die inneren Lagen aus 2,0 mm dicken Furnieren (flächiges Halbzeug) gefertigt.

Hinsichtlich der Lagenaufbauten des Holzträgers wurden somit insgesamt fünf verschiedene Varianten betrachtet. Dabei wurden ebenfalls die Ergebnisse aus den Simulationen berücksichtigt. Tabelle 17 können die verschiedenen Lagenaufbauten entnommen werden. Dabei wurden die Varianten VW 1-3 im Rahmen der quasistatischen Versuche betrachtet und die Varianten VW 4-5 für die schlagdynamischen Versuche herangezogen. Alle Probekörper wurden beim Projektpartner DLR geprüft, die Ergebnisse sind sowohl im Gesamtabschlussbericht als auch im Abschlussbericht des DLR (19I16013F) zu finden.

In Abbildung 37 A-F sind Träger der beiden Materialkonfigurationen, beide lackierten Blechvarianten sowie ein finales generisches Bauteil PKW, also ein mit einem Blech verklebter Holzträger, dargestellt.

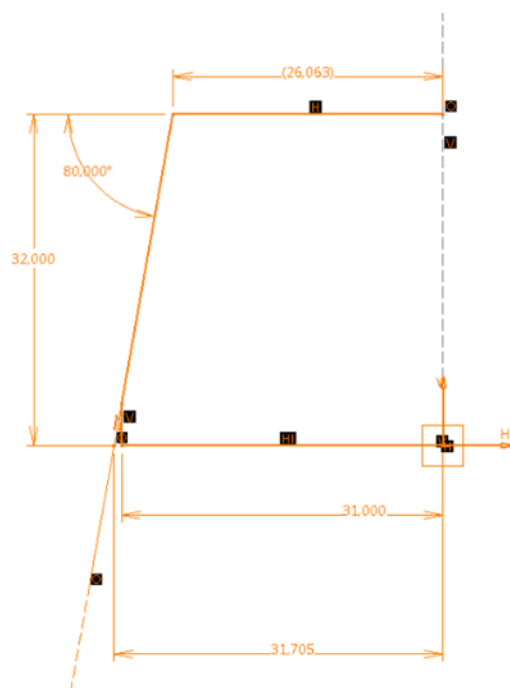


Abbildung 36: Profilgeometrie für den Zugschnitt der Träger zur 3-Punkt-Biegeprüfung (DLR)

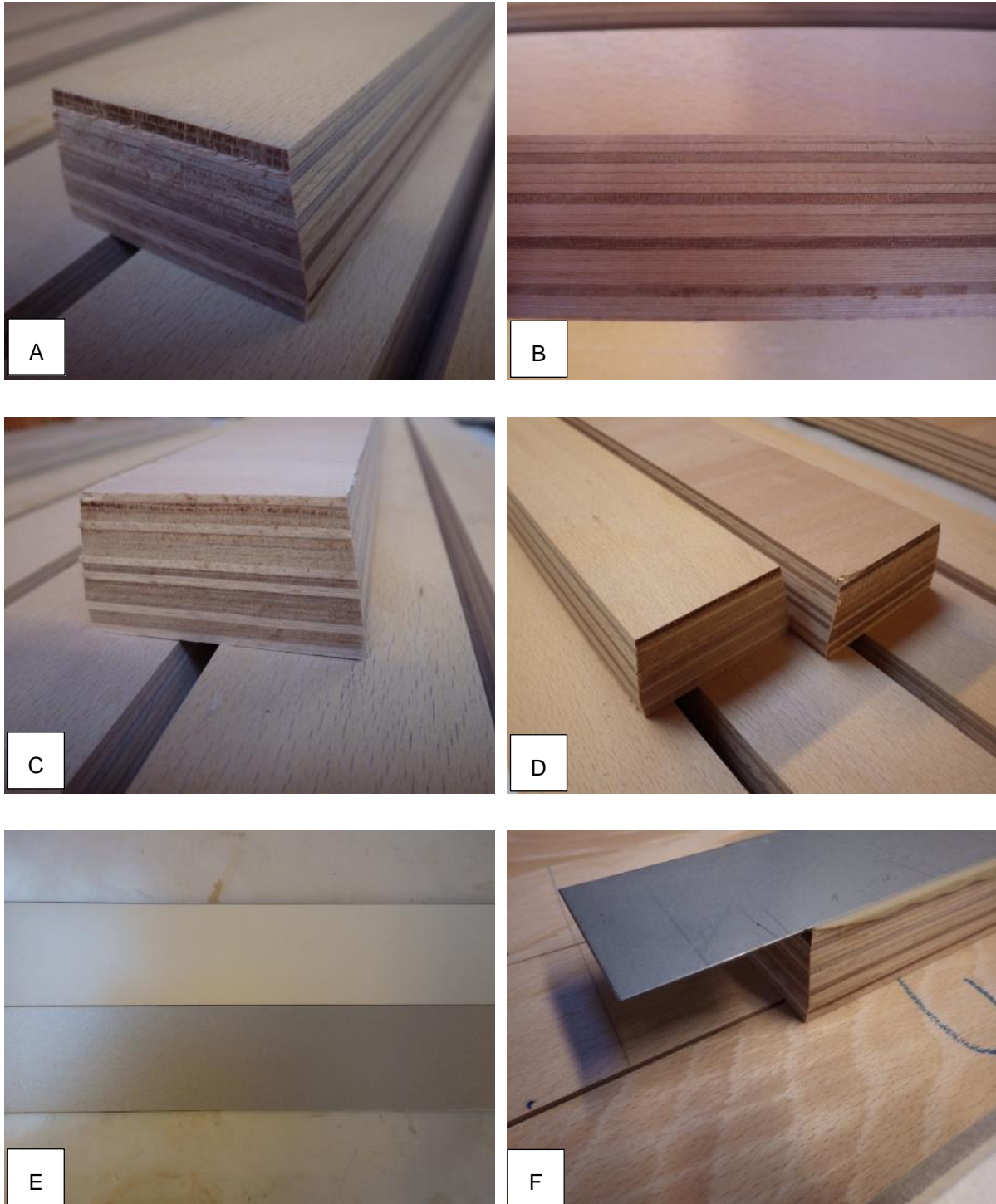


Abbildung 37: Trapezprofile für 3-Punkt-Biegeprüfung. A und B: Materialkonfiguration VW 4. B: Materialkonfiguration VW 4, der symmetrische Aufbau sowie Komplettteil und Halbzeug sind deutlich erkennbar. C: Materialkonfiguration VW 5. D: Materialkonfiguration VW 4 und VW 5 im Vergleich. E: Zu verklebende Seite der Blechstreifen mit zwei verschiedenen Lackierungen. F: Finales generisches Bauteil PKW; Trapezprofil Materialkonfiguration VW 4 mit Blech verklebt.

Tabelle 17: Materialaufbauten Träger VW (B = Buchenfurnier)

	Lage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Σ	
VW 1	Material	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	-	
	Materialstärke [mm]	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	-	32
	Orientierung [°]	0	0	0	0	90	90	90	90	90	90	90	90	0	0	0	0	0	-	
VW 2	Material	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	-	
	Materialstärke [mm]	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	-	verdichtet auf 30
	Orientierung [°]	0	0	0	0	0	0	90	90	90	90	0	0	0	0	0	0	0	-	
VW 3	Material	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	
	Materialstärke [mm]	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	verdichtet auf 32
	Orientierung [°]	90	0	90	0	0	90	0	90	0	90	0	90	0	0	90	0	90		
VW 4	Material	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	
	Materialstärke [mm]	4 x 0,5	4 x 0,5	4 x 0,5	4 x 0,5	4 x 0,5	4 x 0,5	4 x 0,5	4 x 0,5	4 x 0,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	verdichtet auf 32
	Orientierung [°]	0	0	90	0	0	0	90	0	0	0	90	0	0	0	90	0	0		
VW 5	Material	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	
	Materialstärke [mm]	4 x 0,5	4 x 0,5	4 x 0,5	4 x 0,5	4 x 0,5	4 x 0,5	4 x 0,5	4 x 0,5	4 x 0,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	verdichtet auf 32
	Orientierung [°]	90	0	0	90	0	0	0	90	0	90	0	0	0	90	0	0	90		

VI.9 Brandtechnische Untersuchungen (AP6)

VI.9.1 Orientierende brandtechnische Prüfungen

Die im Projekt For(s)tschritt zu entwickelnden holzbasierten Multimaterialsysteme für die spätere Verwendung in Schienenfahrzeugen müssen die Anforderungen gemäß der strengen Brandschutznorm DIN EN 45545 Bahnanwendungen – Brandschutz in Schienenfahrzeugen erfüllen. Die orientierenden Prüfungen sollen dabei einen ersten Überblick über das Verhalten der potentiellen Klebstoffe sowie der holzbasierten Multimaterialsysteme bei Flammeneinwirkung geben und zudem bei der Klebstoffauswahl der finalen Bauteile unterstützen.

Gemeinsam mit den Projektpartnern Alstom Transport Deutschland GmbH, Gebr. Bode GmbH & Co. KG, Uni Kassel und Jowat SE wurde intensiv an der Aufstellung eines Versuchsplans (Tabelle 18) für die brandtechnischen Prüfungen sowie an der Auswahl der geeigneten Klebstoffe gearbeitet. Im ersten Schritt wurden orientierende brandtechnischen Prüfungen am WKI durchgeführt, um das Verhalten des Klebstoffs für die Holz-Aluminium-Verbindung sowie der Lackierung unter Temperatureinwirkung zu untersuchen. Die Probekörper dafür wurden von Alstom produziert, für den Holz-Teil wurde industrielles Sperrholz verwendet. Lediglich die 3 mm dünnen Probekörper wurden von der Uni Kassel hergestellt. Anschließend an diese Untersuchungen erfolgten die normkonformen brandtechnischen Prüfungen nach DIN EN 45545-2 bei der DMT GmbH & Co. KG.

Die orientierenden Prüfungen wurde zunächst in Anlehnung an die DIN EN ISO 11925-2:2011-02 „Prüfungen zum Brandverhalten – Entzündbarkeit von Produkten bei direkter Flammeneinwirkung – Teil 2: Einzelflammentest“ durchgeführt. „Dieses Brandprüfverfahren wurde entwickelt, um das Brandverhalten von Produkten zu bestimmen. Das Prüfverfahren legt eine Prüfung zur Bestimmung der Entzündbarkeit von Produkten bei einer direkt einwirkenden kleinen Flamme ohne zusätzliche Wärmebestrahlung fest, wobei die Probekörper in vertikaler Anordnung geprüft werden. Die Entzündbarkeit von Produkten wird bestimmt, indem die Ausbreitung einer kleinen Flamme an der vertikalen Oberfläche eines Probekörpers ermittelt wird, nachdem eine kleine Flamme (in Streichholzgröße) entweder an die Oberfläche oder an die Kante des Probekörpers für 15 s bzw. 30 s gehalten wurde. Das Auftreten von brennendem Abtropfen wird bestimmt, indem beobachtet wird, ob sich das unter dem Probekörper angeordnete Filterpapier entzündet oder nicht.“ [DIN EN ISO 11925-2-2011-02, 2011]

Für die orientierenden Prüfungen am WKI wurde eine Beflammungszeit von 30 s gewählt. Die Gesamtprüfdauer ab dem ersten Aufbringen der Flamme beträgt 60 s, da im Anschluss an die Beflammung noch 30 s gewartet wird, um das weitere Brandverhalten (z. B. Erlöschen der Flamme, Voranschreiten der Flammenausbreitung) zu beurteilen. Der Brenner, dessen Brenn-

gas aus handelsüblichem Propangas besteht, wird in einem Winkel von 45° gegen die vertikale Achse der Probe geneigt, bis die Flamme den festgesetzten Kontaktpunkt der Probe erreicht. Die Höhe der Flamme beträgt dabei 20 mm. Die Probekörper weisen eine Länge von 250 mm und eine Breite von 90 mm auf. Bei der Prüfung wird untersucht, ob eine Entzündung der Probe erfolgt, ob und in welcher Zeit die Flammenspitze eine Höhe von 150 mm oberhalb des Beflammungspunkts (siehe Abbildung 38) erreicht sowie ob ein brennendes Abtropfen vorhanden ist. Je Index wurden 5 Probekörper geprüft. An einzelnen Proben wurde die Flamme – nach Abkühlen der Probe – erneut an die Probe geführt und über einen längeren Zeitraum beobachtet, ob die 150 mm-Marke erreicht wird.

Diese Prüfung könnte bspw. Vandalismus widerspiegeln, bei dem mit einer kleinen Flamme (z. B. einem Feuerzeug) das Schienenfahrzeug beschädigt werden soll.

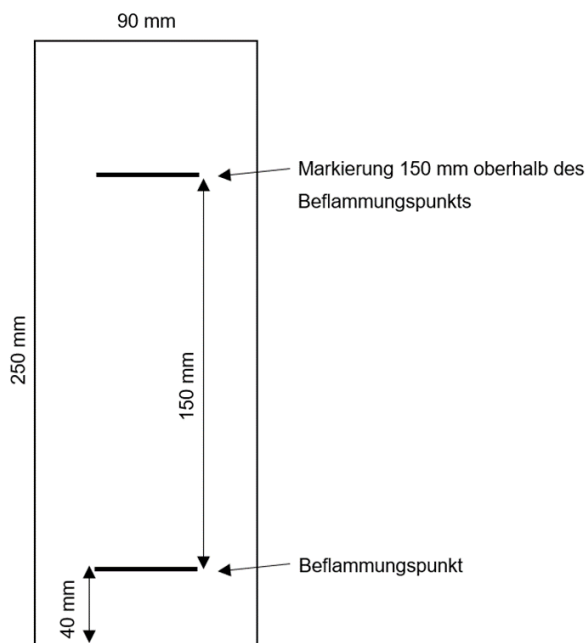


Abbildung 38: Abmessungen eines Probekörpers und Darstellung des Beflammungspunkts sowie der 150 mm-Markierung bei Flächenbeflammung

Tabelle 18: Versuchsplan für orientierende brandtechnische Untersuchungen am WKI

Index	Anzahl Probekörper			Abmessungen [mm]			Holz [mm]		Aluminium [mm]		Konfiguration				Oberfläche			Klebstoff		
	Beflammen und Querzug	Querzug	Kleinbrenner-test	200 * 100	50 * 50	250 * 90	3	30	0,8	1,5	Alu-Holz	Alu-Holz-Alu	Alu	Holz	grundiert	lackiert	blank	Klebstoff 3 (1K PU)	Klebstoff 7 (PVAc Dispersion)	Klebstoff 9 (2K SE)
01	4			x				x		x					x			x		
02	4			x				x		x						x		x		
03	13			x				x		x							x	x		
04	4			x				x			x						x	x		
05	4			x				x			x						x		x	
06	4			x				x			x						x			x
07	4			x			x		x		x						x	x		
08		3			x			x		x				x			x	x		
09		3			x			x		x					x		x	x		
10		6			x			x		x							x	x		
11		3			x			x			x						x	x		
12		3			x			x			x						x		x	
13		3			x			x			x						x			x
14		3			x		x		x		x						x	x		
15			7			x		x		x				x			x	x		
16			7			x		x		x					x		x	x		
17			14			x		x		x							x	x		
18			7			x						x					x	x		
19			7			x						x					x		x	
20			7			x						x					x			x
21			7			x		x									x	x		
22			7			x		x									x		x	
23			7			x		x									x			x
24			14			x	x		x		x						x	x		

Die Ergebnisse des Einzelflammentests sind in Tabelle 19, Fotos in Abbildung 39 dargestellt.

Tabelle 19: Ergebnisse des Einzelflammentest in Anlehnung an die DIN EN ISO 11925-2

Bezeichnung/ Index	Entzündung	Mittlere Flammenausbreitung nach 60 s Gesamtprüfdauer [mm]	Bemerkungen und Beobachtungen
15	nein	/	<ul style="list-style-type: none"> • Flächenbeflammung <ul style="list-style-type: none"> ○ Keine Verfärbung ○ Keine Zerstörung der Probe ○ Keine Veränderung (Verfärben oder Entzünden) nach 15 Minuten
16	nein	/	<ul style="list-style-type: none"> • Flächenbeflammung <ul style="list-style-type: none"> ○ Keine Verfärbung ○ Keine Zerstörung der Probe ○ Keine Veränderung (Verfärben oder Entzünden) nach 15 Minuten
17 Alu-Seite	nein	/	<ul style="list-style-type: none"> • Kantenbeflammung <ul style="list-style-type: none"> ○ Keine Verfärbung ○ Kein Ablösen des Aluminiums nach 15 Minuten Kantenbeflammung • Zusätzlich Flächenbeflammung <ul style="list-style-type: none"> ○ Keine Veränderung nach 30 Sekunden ○ Keine Veränderung nach 15 Minuten
17 Holz-Seite	ja	45	<ul style="list-style-type: none"> • Kantenbeflammung <ul style="list-style-type: none"> ○ Verkohlung/Zersetzung des Holzes ○ Erreichen der 150 mm-Marke nach 6 Minuten ○ Keine oder kleine Flamme, welche aber schnell von selbst erlöscht • Zusätzlich Flächenbeflammung <ul style="list-style-type: none"> ○ Erreichen der 150 mm-Marke nach 6 Minuten
18	Nein	/	<ul style="list-style-type: none"> • Kantenbeflammung <ul style="list-style-type: none"> ○ Ganz leichte Verfärbung des Klebstoffs ○ Nach 10 Minuten etwas mehr Verfärbung
19	Nein	/	<ul style="list-style-type: none"> • Kantenbeflammung <ul style="list-style-type: none"> ○ Leichte Verfärbung des Klebstoffs ○ Ganz leichte Bläschenbildung ○ Nach 10 Minuten etwas mehr Verfärbung
20	nein	/	<ul style="list-style-type: none"> • Flächenbeflammung <ul style="list-style-type: none"> ○ Keine Verfärbung ○ Keine Zerstörung der Probe ○ Leichte Verfärbung nach 15 Minuten

Bezeichnung/ Index	Entzündung	Mittlere Flammenausbreitung nach 60 s Gesamtprüfdauer [mm]	Bemerkungen und Beobachtungen
21	ja	76	<ul style="list-style-type: none"> • Kantenbeflammung <ul style="list-style-type: none"> ○ Karamellartige Verfärbung ○ Verkohlungs/Zersetzung des Holzes ○ Leicht aufgeschäumt (Intumeszierend) ○ drei der fünf Probekörper zeigten ein anhaltendes Brandverhalten nach 30 Sekunden Beflammung, beim Öffnen des Brandkastens ist die Flamme erloschen ○ Erreichen der 150 mm – Marke nach 1:45 Minuten
22	ja	73	<ul style="list-style-type: none"> • Kantenbeflammung <ul style="list-style-type: none"> ○ Verkohlungs/Zersetzung des Holzes ○ vier der fünf Probekörper sind nach Wegnehmen der Flamme von selbst erloschen, der andere Probekörper ist beim Öffnen des Brandkastens erloschen
23	Leichte Brandbildung	60	<ul style="list-style-type: none"> • Flächenbeflammung <ul style="list-style-type: none"> ○ Leichte Verfärbung ○ 10 cm Verkohlung nach 15 Minuten
24 Alu-Seite	Tlw. wurde die Holz- Seite ange- kokelt	32 (auf der Holz- Seite)	<ul style="list-style-type: none"> • Kantenbeflammung <ul style="list-style-type: none"> ○ Bei drei der fünf Probekörper hat sich die Flamme auf der Holz-Seite des Probekörpers ausgebreitet, Flamme ist selbst erloschen
24 Holz-Seite	ja	125	<ul style="list-style-type: none"> • Kantenbeflammung <ul style="list-style-type: none"> ○ Verkohlungs/Zersetzung des Holzes und der obersten Furnier-Schicht ○ Tlw. lange Schmauchspur

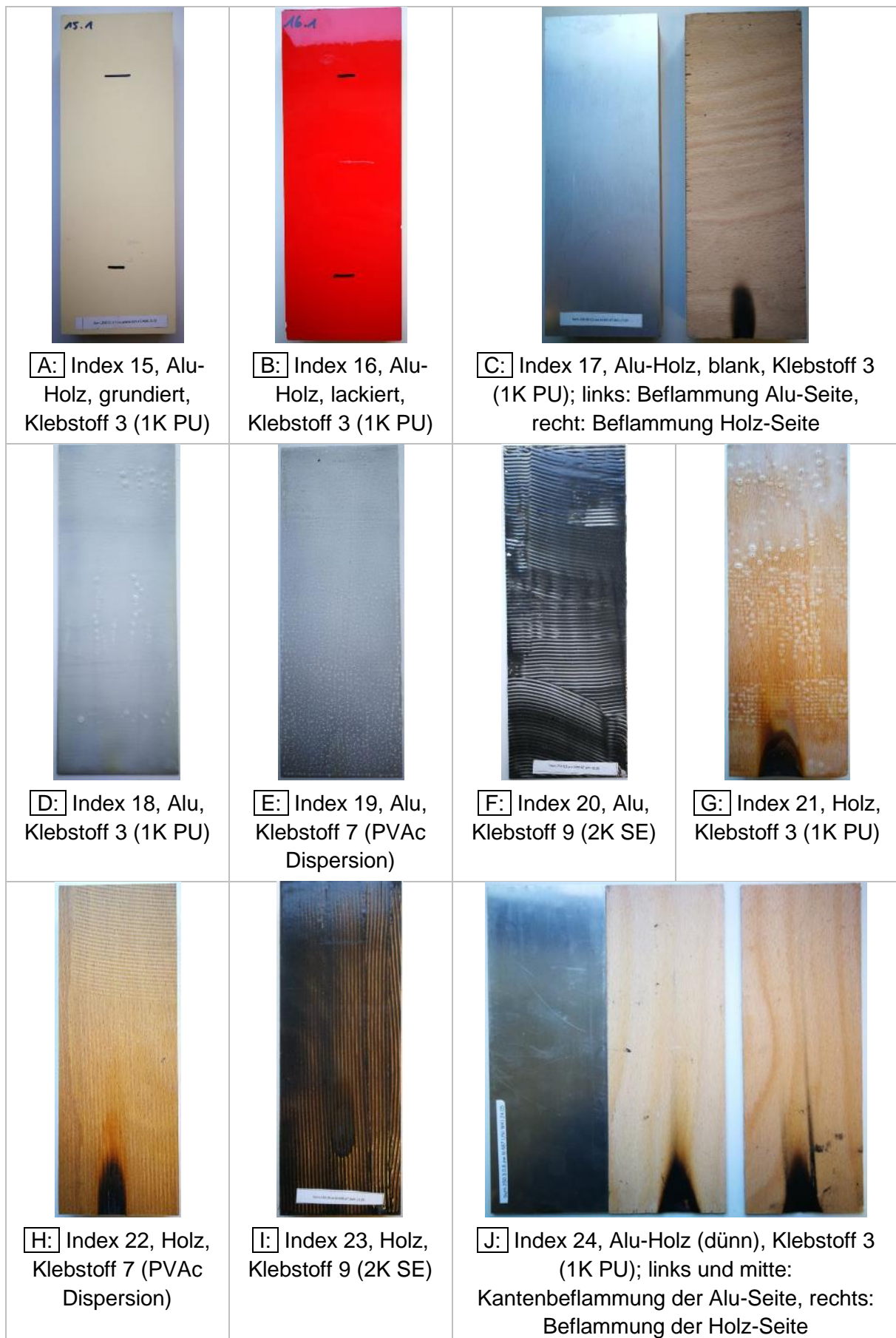


Abbildung 39: A - J: Fotos der Probekörper nach dem Einzelflammentest

Im Verlauf der Untersuchungen wurden weitere orientierende Versuche an den Probekörpern durchgeführt. Dabei hat sich das Auflegen eines Glühstabs auf die Probe als ungünstig erwiesen, da somit keine repräsentablen Ergebnisse erreicht werden konnten. Durch Verwendung des Glühstabs bei verschiedenen Temperaturen konnte die Wärme nicht gleichmäßig über den Probekörper verteilt werden. Zudem führten schon minimale Bewegungen bzw. Abweichungen beim Auflegen des Glühstabs zu großen Differenzen innerhalb einer Prüfserie.

Um die Verklebung zwischen Holz und Aluminium bei Temperatureinwirkung zu überprüfen, wurden die Proben in anschließenden Versuchen mit der Aluminium-Seite auf eine temperierbare Heizplatte gelegt. Nachfolgend wurde die Querkzugfestigkeit dieser Probekörper bestimmt. Geprüft wurden jeweils drei Probekörper mit einer Größe von 50 mm x 50 mm. Die Ergebnisse sind in Tabelle 20 dargestellt. Dabei ist zu sagen, dass der Lagenaufbau sowie die Klebstoffauswahl nachfolgender Indizes einander identisch sind: 3 = 10; 6 = 13; 14 = 24. Sowohl bei der Referenz als auch bei einer Temperierung mit 100 °C und 150 °C hat bei allen Prüfkörpern das Versagen im Sperrholz stattgefunden. Bei genauerer Betrachtung des industriellen Sperrholzes sind einzelne Fehlverklebungen innerhalb des Sperrholzes erkennbar. Darin sind auch die Abweichungen der einzelnen Querkzugfestigkeiten im Falle eines Versagens im Sperrholz zu begründen. Bei einer Temperatur von 200 °C versagten die Proben nicht mehr nur innerhalb des Sperrholzes, sondern auch in der Verklebung zwischen Aluminium und Deckfurnier. Bei den Proben, welche mit Klebstoff 3 (1K PU) verklebt wurden, konnte das Aluminium nach einer thermischen Belastung von 250 °C leicht vom Holz abgehoben werden. Bei gleicher Temperatur, aber Verklebung mit Klebstoff 9 (2K SE) trat sowohl ein Versagen im Sperrholz als auch in der Klebstofffuge zwischen Holz und Aluminium auf. Beispiele für Versagensbilder nach der Prüfung der Querkzugfestigkeit sind in Abbildung 40 zu sehen.

Tabelle 20: Ergebnisse der Querzugfestigkeit nach thermischer Belastung

Bezeichnung/ Index	Querzugfestigkeit [N/mm ²]	x [N/mm ²]	s [N/mm ²]	Versagensart	Bemerkung
Referenz					
10.1	2,67	2,13	0,47	Sperrholz	
10.2	1,91			Sperrholz	
10.3	1,82			Sperrholz	
11.1	1,53	1,28	0,23	Sperrholz	
11.2	1,22			Sperrholz	
11.3	1,09			Sperrholz	
12.1	2,82	2,75	0,23	Sperrholz	
12.2	2,50			Sperrholz	
12.3	2,94			Sperrholz	
13.1	0,59	0,68	0,10	Sperrholz	
13.2	0,78			Sperrholz	
13.3	0,66			Sperrholz	
14.1	0,34	0,60	0,26	Sperrholz	
14.2	0,85			Sperrholz	
14.3	0,61			Sperrholz	
100 °C					
3.1	1,74	2,00	0,28	Sperrholz	
3.2	2,29			Sperrholz	
3.3	1,95			Sperrholz	
6.1	1,48	1,09	0,35	Sperrholz	
6.2	0,98			Sperrholz	
6.3	0,82			Sperrholz	
24.1	1,31	0,97	0,53	Sperrholz	
24.2	0,36			Sperrholz	
24.3	1,25			Sperrholz	
150 °C					
3.1	1,81	1,58	0,72	Sperrholz	
3.2	2,15			Sperrholz	
3.3	0,77			Sperrholz	
6.1	1,34	1,41	0,09	Sperrholz	
6.2	1,39			Sperrholz	
6.3	1,51			Sperrholz	
24.1	2,36	1,28	0,95	Sperrholz	Alublech wölbt sich konkav während thermischer Belastung
24.2	0,87			Sperrholz	
24.3	0,61			Sperrholz	

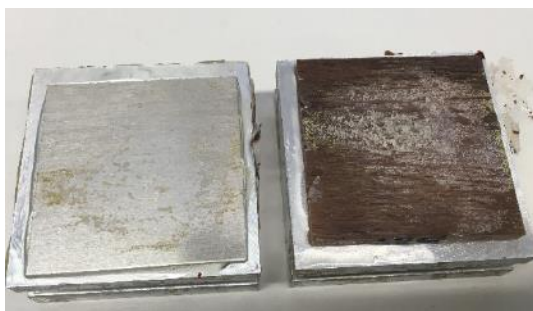
Bezeichnung/ Index	Querzugfestigkeit [N/mm ²]	x [N/mm ²]	s [N/mm ²]	Versagensart	Bemerkung
200 °C					
3.1	0,94	1,41	0,43	Sperrholz	(Siehe Abbildung 40 A)
3.2	1,79			1/2 Deckfurnier, 1/2 Alublech	
3.3	1,50			Sperrholz	
6.1	1,25	1,29	0,11	Sperrholz	(Siehe Abbildung 40 C)
6.2	1,20			1/2 Deckfurnier, 1/2 Alublech	
6.3	1,42			Sperrholz	
24.1	0,78	1,00	0,64	Sperrholz	Alublech wölbt sich konkav während thermischer Belastung (Siehe Abbildung 40 B)
24.2	1,72			Sperrholz	
24.3	0,49			Alublech	
250 °C					
3.1	Alublech löst sich durch thermische Belastung				
3.2					
3.3					
6.1	0,90	1,20	0,26	20 % Deckfurnier, 80 % Alublech	(Siehe Abbildung 40 D)
6.2	1,34			Sperrholz	
6.3	1,35			Alublech	(Siehe Abbildung 40 E)
24.1	Alublech löst sich durch thermische Belastung				Alublech wölbt sich konkav während thermischer Belastung
24.2					
24.3					



A: Probekörper 3.2, verklebt mit Klebstoff 3 (1K PU), thermische Belastung von 200 °C; Versagensart: ½ Deckfurnier, ½ Alublech



D: Probekörper 6.1, verklebt mit Klebstoff 9 (2K SE), thermische Belastung von 250 °C; Versagensart: 20 % Deckfurnier, 80 % Alublech



B: Probekörper 24.3, verklebt mit Klebstoff 3 (1K PU), thermische Belastung von 200 °C; Alublech löst sich durch thermische Belastung



E: Probekörper 6.3, verklebt mit Klebstoff 9 (2K SE), thermische Belastung von 250 °C; Versagensart: Alublech



C: Probekörper 6.2, verklebt mit Klebstoff 9 (2K SE), thermische Belastung von 200 °C; Versagensart: ½ Deckfurnier, ½ Alublech



F: Versagen im Sperrholz

Abbildung 40: A - F: Versagensbilder der Querkzugprüfung nach thermischer Belastung

In Abbildung 41 sind grundierete (Index 1) sowie grundierete und lackierte (Index 2) Probekörper nach 3 Minuten Beflammung mit einer Bunsenbrennerflamme abgebildet. Dabei sind sowohl Grundierung als auch Lackierung verbrannt und das Aluminium hat sich an der Fläche der Beflammung vom Holz gelöst. Hier wurde lediglich eine visuelle Betrachtung der Oberfläche nach Flammeneinwirkung durchgeführt.

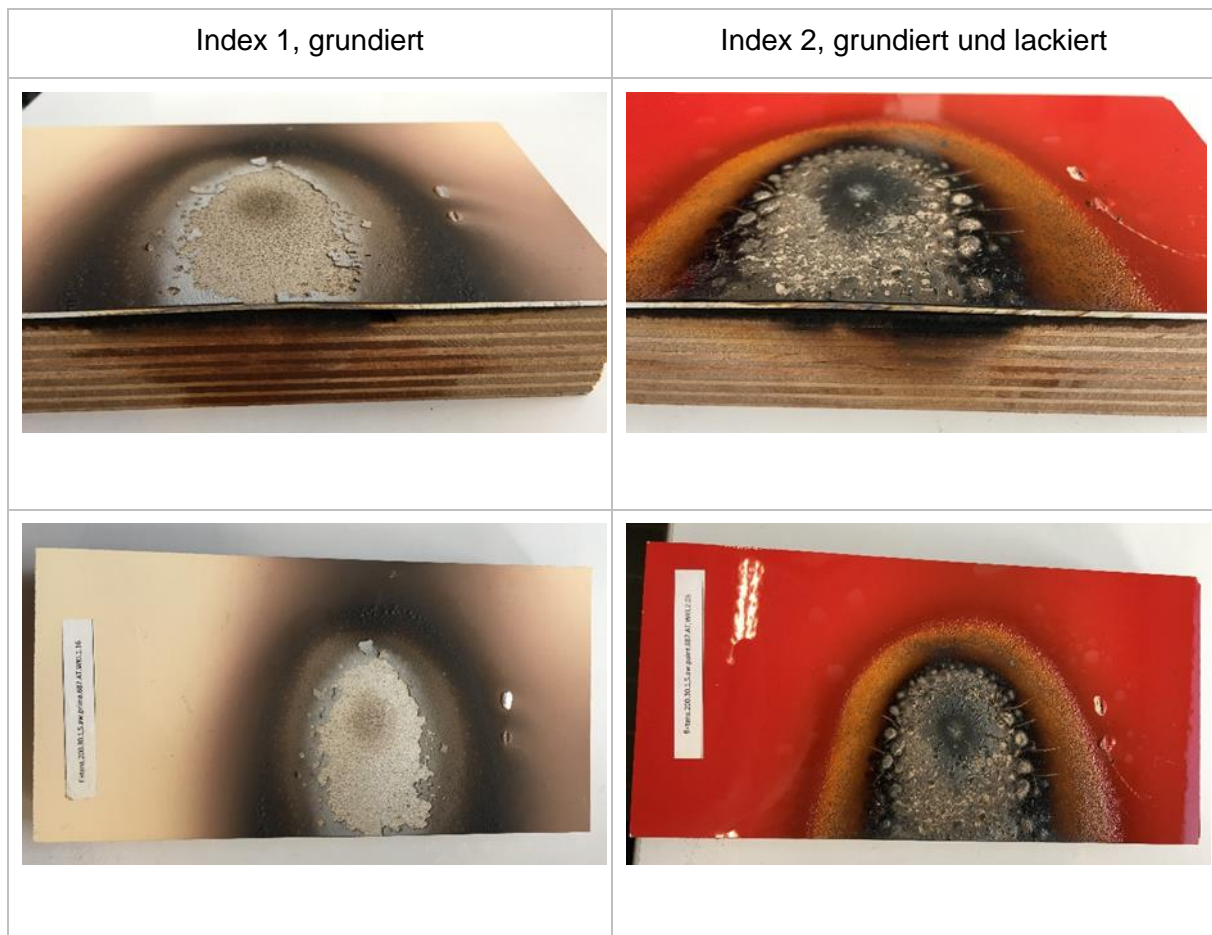


Abbildung 41: Probekörper nach 3 Minuten Beflammen mit Bunsenbrennerflamme

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass alle Proben den Einzelflammentest in Anlehnung an die DIN EN ISO 11925-2 bestanden haben und als normal entflammbar (B2) gelten. Keiner der Probekörper zeigte ein (brennendes) Abtropfen.

Bei der Prüfung der Querkzugfestigkeit nach thermischer Belastung zeigen die Klebstoffe 3 (1K PU) und 9 (2K SE) bis 200 °C ein ähnliches Versagensverhalten. Lediglich nach einer thermischen Belastung von 250 °C konnten die Aluminiumbleche, welche mit Klebstoff 9 (2K SE) verklebt wurden, noch einer Querkzugprüfung unterzogen werden, versagten dabei allerdings überwiegend in der Klebstoffuge Holz-Aluminium.

VI.9.2 Brandtechnische Prüfungen nach DIN EN 45545-2 – Baugruppe „Schiene“

Die DIN EN 45545-2 beschreibt die Anforderungen an das Brandverhalten von Materialien und Komponenten in Schienenfahrzeugen und ist damit für die im Projekt entwickelten holzbasierten Multimaterialsysteme von entscheidender Bedeutung. Für ihre spätere Verwendung in Schienenfahrzeugen müssen die Baugruppen die Anforderungen gemäß der strengen Brandschutznorm DIN EN 45545 Bahnanwendungen – Brandschutz in Schienenfahrzeugen zwingend erfüllen. Nachfolgend werden jene Prüfungen näher beschrieben, welche für die Anwendung der Baugruppen als Außenwand bzw. Tür laut Norm durchgeführt werden müssen.

Die brandtechnischen Prüfungen gemäß DIN EN 45545-2 wurden von der DMT GmbH & Co. KG durchgeführt. Entsprechend den Zielanwendung der zu prüfenden Bauteile als Außenwand von Schienenfahrzeugen gelten die Anforderungssätze R1 (z. B. innere Seitenwand, Tür) und R7 (äußere Seitenwand, Tür). Laut dieser sind dafür folgende Prüfungen erforderlich:

- Prüfung von (Verbund-)Werkstoffen auf seitliche Flammenausbreitung auf Basis der Normen ISO 5658-2 und DIN EN 45545-2
- Prüfung der Wärmefreisetzungsrate von (Verbund-)Werkstoffen auf Basis der Normen ISO 5660-1 und DIN EN 45545-2
- Prüfung von Werkstoffen auf Rauchdichte und Toxizität nach den Normen DIN EN ISO 5659-2 und DIN EN 45545-2.

Bei der Prüfung auf seitliche Flammenausbreitung wird ein plattenförmiger, vertikal ausgerichteter Probekörper (L x B: 800 mm x 155 mm) sowohl einer Wärmestrahlung mit definierter Leistung als auch einer Zündflamme ausgesetzt. Von dem Ende her, welches direkt der Zündflamme sowie der Wärmestrahlung ausgesetzt ist („heißes Ende“), nimmt die Leistung in horizontaler Richtung stetig ab. Der Parameter, bei welchem kein weiterer Fortschritt der Flammenfront in horizontaler Richtung erfolgt, wird quantitativ als CFE-Wert (critical heat flux at extinguishment = kritischer Wärmestrom beim Verlöschen der Flamme) bezeichnet. [DMT GMBH & Co. KG, 2016A; ISO 5658-2:2006(E)]

Auch bei der Prüfung der Wärmefreisetzungsrate wird ein plattenförmiger Probekörper (L x B: 100 mm x 100 mm) einer Wärmestrahlung von 50 kW/m² ausgesetzt. Weiterhin findet ein Funkenzünder Anwendung, welcher der Entzündung austretender Gase dienen soll. Während der Prüfdauer von 20 Minuten werden mittels eines optischen Systems die Rauchentwicklung, durch eine kalorimetrische Messung auf Basis des Sauerstoffverbrauchs die Wärmefreisetzungsrate sowie mit Hilfe einer integrierten Wiegeeinheit die Massenverlustrate ermittelt. Der MARHE-Wert, welcher das Beurteilungskriterium für Prüfungen am Cone Calorimeter ist, stellt das Maximum der mittleren Wärmefreisetzungsrate im Zeitraum der Messung dar. [DMT GMBH & Co. KG, 2016B; ISO 5660-1:2002(E)]

Zur Bestimmung der Rauchgastoxizität und Rauchdichte werden die plattenförmigen Probekörper (L x B: 75 mm x 75 mm) bei einer Strahlungsintensität von 50 kW/m² ohne Zündflamme getestet. Die so entstehenden Rauchgase werden in der Prüfkammer gesammelt. Zudem findet eine kontinuierliche Messung der Rauchdichte statt. In der 4. und 8. Minute der Prüfung sowie nach Erreichen der maximalen Rauchdichte, werden Proben zur Bestimmung der Rauchgastoxizität entnommen und anschließend mittels eines FTIR-Spektrometers analysiert. In Abhängigkeit von Anforderungssatz (in diesem Fall R1 und/oder R7) und Gefährdungsstufe (Hazard Level HL1 – HL3) sind verschiedene Parameter und Grenzwerte zur Bestimmung der Rauchdichte und Toxizität entscheidend:

- Maximale Rauchdichte ($D_{s,max}$)
- Rauchdichte nach 4 Minuten ($D_s(4)$)
- Integral der Rauchdichte (VOF_4)
- Toxizitäts-Index (CIT_G). [DMT GMBH & Co. KG, 2016c; DIN EN ISO 5659-2:2005-04 – ENTWURF]

Je nach Infrastruktur, Fahrzeugtyp sowie Einbauort der Baugruppe variieren die einzuhaltenen Grenzwerte. Dabei wird die Fähigkeit eines brennenden Schienenfahrzeugs betrachtet, die nächste sichere Evakuierungsmöglichkeit, bspw. bei Tunnelfahrten, zu erreichen. Folgende Kategorisierungen sind entsprechend EN 45545-1 für die Baugruppe „Schiene“ vorzunehmen:

1. Betriebsklasse 3
 - a. Im Brandfall 15 Minuten bei 80 km/h fahren bis zur Fahruntauglichkeit
2. Bauartklasse N
 - a. Standardfahrzeuge.

Nach EN 45545-2 ergibt sich aus Betriebsklasse 3 und Bauartenklasse N das Hazard Level 2 (HL2). Durch das Erreichen der strengeren Anforderungen von HL3 (u. a. Schlafwagen) ließe sich die gewonnene Technologie der For(s)tschritt-Seitenwand auch auf zukünftige Projekte und andere Wagentypen übertragen.

Die EN 45545-2 nimmt des Weiteren folgende Klassifizierung der Einbauorte vor:

- IN1A ... Innen liegende vertikale Oberflächen
- EX1A ... Wände des äußeren Wagenkastens.

Daraus ergeben sich die Anforderungssätze R1 für IN1A und R7 für EX1A.

In Tabelle 21 sind die Grenzwerte dargestellt, welche zum Erreichen der HL1 – HL3 für die Anforderungssätze R1 und R7 erforderlich sind.

Tabelle 21: Grenzwerte gemäß DIN EN 45545-2 für die Anforderungssätze R1 und R7 die Gefährdungsstufen HL1 – HL3

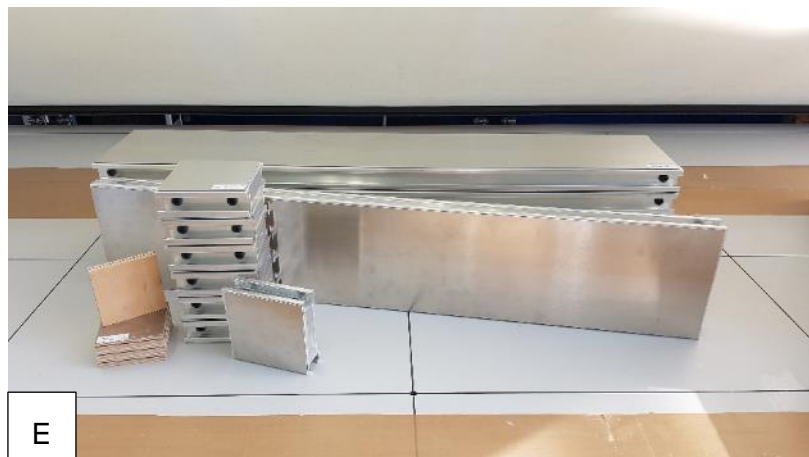
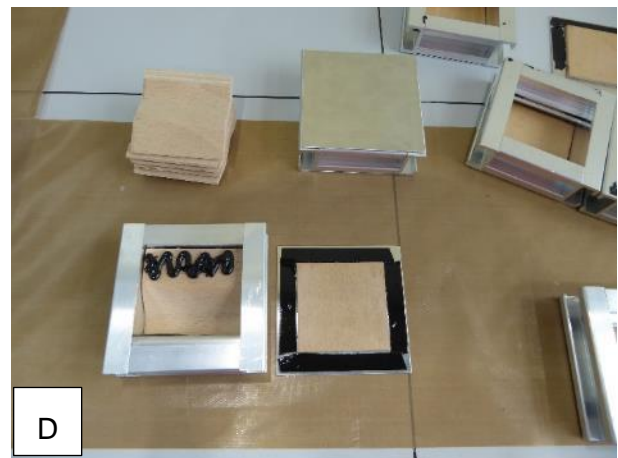
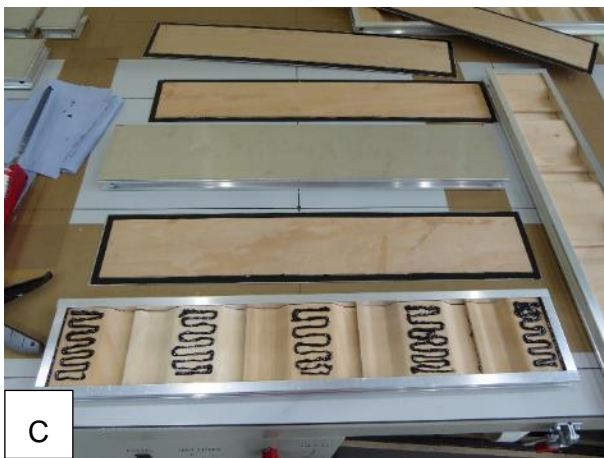
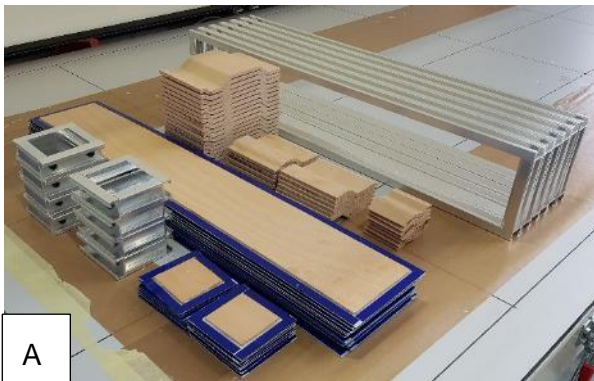
		Gefährdungsstufe					
		HL1		HL2		HL3	
Prüfungsvorschrift	Parameter	R1	R7	R1	R7	R1	R7
ISO 5658-2	CFE [kW/m ²]	≥ 20	≥ 20	≥ 20	≥ 20	≥ 20	≥ 20
ISO 5660-1: 50 kW/m²	MARHE [kW/m ²]	-	-	90	90	60	60
EN ISO 5659-2: 50 kW/m²	D _{s,max}	-	-	-	600	-	300
	D _s (4)	600	-	300	-	150	-
	VOF ₄ [min]	1200	-	600	-	300	-
	CIT _G	1,2	-	0,9	1,8	0,75	1,5

Die Probekörper wurden von Alstom hergestellt und bestehen aus einem industriell gefertigtem 16 mm starken Buchensperrholz, welches mittels Klebstoff 3 (1K PU) mit einem 1,5 mm dicken gebeiztem Aluminiumblech verklebt wurde.

Entsprechend der Ergebnisse erfüllen die Probekörper von Alstom die Anforderungssätze R1 und R7 für die Gefährdungsstufen (HL) 1-3. Die Gefährdungsstufe 3 (HL3, u. a. Schlafwagen) besitzt dabei die strengsten Grenzwerte. Ziel war es, mit den Probekörpern bzw. Bauteilen von Alstom HL2 zu erreichen. Dieses Ziel wurde somit erfüllt.

VI.9.3 Brandtechnische Prüfungen nach DIN EN 45545-2 – Baugruppe Schiene „Tür“

Die Herstellung der Probekörper bzw. das Zusammenfügen der einzelnen Probekörperkomponenten für die brandtechnischen Prüfungen der Baugruppe Schiene „Tür“ nach EN 45545-2 erfolgte bei dem Projektpartner Universität Kassel. In den nachfolgenden Abbildungen sind einzelne Produktionsschritte sowie Querschnitte der Probekörper zu sehen. Es wurden sowohl unlackierte als auch lackierte Probekörper hergestellt. Bei den lackierten Prüfkörpern wurde jeweils die graue Innenseite (in den Fahrgastraum weisend) geprüft, die Außenseite wurde mit einer blauen Lackierung versehen.



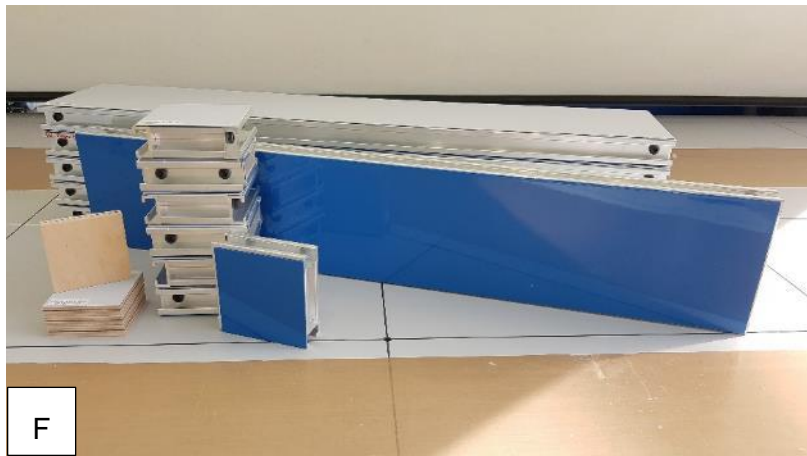


Abbildung 42: Prüfkörper für die brandtechnischen Untersuchungen nach DIN EN 45545-2. A: Einzelne Komponenten (Rahmen, Hutprofile, Außenbleche) für die Herstellung der Prüfkörper zur Bestimmung der seitlichen Flammenausbreitung sowie Wärmefreisetzungsrate. B: Einzelne Komponenten der Prüfkörper zur Bestimmung der seitlichen Flammenausbreitung. C: Klebstoff 8 (Klebeband) und Klebstoff 10 (2K SE) aufgebracht. D: Klebstoff 8 (Klebeband) und Klebstoff 10 (2K SE) auf Probekörpern zur Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate. E: Alle Probekörper zur Bestimmung der seitlichen Flammenausbreitung, Wärmefreisetzungsrate sowie Rauchgastoxizität und Rauchdichte, unlackiert. F: Alle Probekörper, lackiert. G: Probe zur Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate im Querschnitt. (Fotos: J. Enge, Fa. Bode)

Für die Holz-Aluminium-Verklebung diente Klebstoff 3 (1K PU), für die Verbindung Aluminium-Aluminium, also die Verklebung des Aluminiumblechs mit der Rahmenstruktur, wurde Klebstoff 8 (Klebeband) und für die Verklebung der Hutprofile mit den Holz-Außenlagen Klebstoff 10 (2K SE) verwendet.

Die Probekörper für die Bestimmung der seitlichen Flammenausbreitung und der Wärmefreisetzungsrate hatten somit eine Stärke von 34,1 mm. Durch die im Prüflabor gegebenen messtechnischen Anforderungen an die Probenabmessungen sowie aus fertigungstechnischen

Gründen wiesen die Probekörper zur Bestimmung der Rauchgastoxizität und Rauchdichte einen anderen, einfacheren Aufbau und daher nur eine Dicke von 11,8 mm auf.

Das methodische Vorgehen zur Durchführung der normgerechten Prüfungen wurde bereits in VI.9.2 beschrieben und wird daher hier nicht noch einmal gesondert dargestellt.

Von der Tatsache des unterschiedlichen Probekörperaufbaus abgesehen, erfüllen die unlackierten Proben der Fa. Bode die Anforderungssätze R1 und R7 der Gefährdungsstufen (HL) 1-3. Die lackierten Proben würden aufgrund des Toxizitätsindex CIT_G hingegen in den Anforderungssatz R7 der Gefährdungsstufe 2 eingeordnet werden.

Wie auch bei der Baugruppe „Schiene“, wurde das Ziel verfolgt, mit der Baugruppe Schiene „Tür“ jeweils HL2 zu erreichen. Dieses Ziel konnte für die unlackierte Prüfserie sowohl für die Außen- als auch die Innenanwendung erfüllt werden. Die lackierte Prüfserie erreicht hingegen mit dieser Lackierung nur die Anforderungen zur Außenanwendung im HL2. Für die spätere Anwendung der Baugruppe Schiene „Tür“ dürfen jedoch auch verschiedene, bereits geprüfte Lacksysteme genutzt werden.

VI.10 Zusammenfassung der Projektergebnisse

Im Projekt For(s)tschritt wurden innovative Ansätze für den Einsatz von Holz als ökologisch nachhaltigen Werkstoff in Multimaterialsystemen für tragende Strukturen in Mobilitätsanwendungen konzipiert. Entsprechend des im Antrag formulierten Ziels wurden sowohl großflächige strukturelle Baugruppen als auch lokale Verstärkungen mit holzbasierten Multimaterialsystemen entwickelt. Ausgehend von den konstruktiven Konzepten wurden auch die Grundlagen für eine Abbildung der relevanten Lastfälle mittels Finiter-Elemente-Methode hinsichtlich eines Materialmodells und einer Materialkarte geschaffen sowie zahlreiche experimentelle Untersuchungen an generischen Teilstrukturen zu deren Validierung durchgeführt.

Bei Untersuchungen zur Verklebung von Holz-Holz- und Holz-Metall-Verbunden konnte gezeigt werden, dass für zahlreiche Anforderungen, bei denen z. T. deutliche Unterschiede zwischen bisherigen Holzbauanwendungen (z. B. der Bauindustrie) zu Mobilitätsanwendungen bestehen, bereits geeignete Klebstoffe existieren. Besonders für die Holz-Holz-Verklebung zeigen die untersuchten 1K-PU-Klebstoffe hohes Potential. Für die Verklebung von Holz und Metall zeigen Epoxidklebstoffe die beste Eignung.

Das WKI konnte durch seine Arbeiten einen wichtigen Beitrag zur Ertüchtigung der Herstellungsprozesse von holzbasierten Multimaterialsystemen leisten. Dazu zählt auch die Optimierung von Umformwerkzeugen zum Pressen und Verdichten der Zielbauteile.

Die Aushärtezeiten der Klebstoffe, deren Materialkosten und die mit der Verwendung bei hohen Stückzahlen notwendige Anlagentechnik stellen die größten Herausforderungen für eine wirtschaftliche Umsetzung dar, wenn Bauteile mit anspruchsvollen Geometrien durch Pressvorgänge gefertigt werden sollen.

Bei den Emissionsuntersuchungen der Furniere wurde kein negativer Einfluss durch die einzelnen Modifizierungen (thermisch, acetyliert, KTL-behandelt) im Vergleich zu unbehandeltem Furnier beobachtet. Bei der thermischen Behandlung von Holz werden sowohl Aldehyde (Furfural und Formal) als auch flüchtige organische Säuren (Essigsäure und Ameisensäure) gebildet. Wie auch bei industrietypischen Pressvorgängen von Holzwerkstoffen, werden bei allen drei angewandten Vorbehandlungen hohe Temperaturen eingesetzt. Die nachgewiesenen Aldehyde waren daher zu erwarten. Bei der Geruchsintensitätsbewertung bewirkten die Modifizierungen Verbesserungen bei Intensität und Hedonik.

Bei den brandtechnischen Untersuchungen gemäß DIN EN 45545-2 erreichten die unlackierten Baugruppen für Schienenfahrzeuge „Schiene“ und „Tür“ HL3, welches die strengsten Anforderungen besitzt. Das Ziel HL2 beider Baugruppen konnte somit sogar übertroffen werden.

In Bezug auf die Zielstellung der Gewichtseinsparung kann zu den einzelnen Demonstratoren festgehalten werden, dass in allen Fällen deutliches Gewichtseinsparpotenzial nachgewiesen wurde.

Insgesamt wurden die vielfältigen Möglichkeiten, Vorteile und das Potential von Holz-Metall-Verbunden im Projekt For(s)tschritt sehr deutlich aufgezeigt. Besonders hervorzuheben ist dabei die ökologische Bilanz (LCA). Zu den Potentialen zählt u. a. die Möglichkeit des Leichtbaus mit Holz-Metall-Verbunden und deren besondere Eignung, Bauteil- und Fahrzeugeigenschaften bei gleichem Gewicht zu verbessern. Diese Stärke eröffnet ein breites Feld von Anwendungsmöglichkeiten bei Schienen- und Straßenfahrzeugen und verdeutlicht, dass im Projekt For(s)tschritt wichtige Beiträge für zukünftige Entwicklungen auf diesem Gebiet geleistet wurden. Jedoch folgt daraus auch, dass die Arbeiten noch am Anfang stehen und das Potential der holzbasierten Multimaterialverbunde bei Weitem noch nicht ausgeschöpft ist.

VII. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der Verwendungsnachweis des Teilvorhabens „Entwicklung, Prüfung und Ertüchtigung holzbasierter Lagenwerkstoffe für Multi-Material-Systeme (MMS)“ beinhaltet die Positionen Personalkosten, Reisekosten für Projektbesprechung sowie Kosten für Gebrauchsmaterialien.

Es kam zu keinen wesentlichen Abweichungen von der Gesamtvorkalkulation und die gesamte Zuwendung wurde abgerufen.

Die konkreten Zahlen können dem Verwendungsnachweis entnommen werden, der dem TÜV Rheinland Consulting GmbH in Köln vorliegt.

VIII. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Projekt erforderte einen hohen Entwicklungsaufwand, der die Zusammenarbeit mehrerer Partner dringend erforderlich machte. Es handelte sich dabei um eine komplexe interdisziplinäre Aufgabenstellung, die ausschließlich im Verbund und unter den Rahmenbedingungen einer Förderung erfolgreich bearbeitet werden konnte. Durch die Beteiligung von Unternehmen, welche die gesamte Wertschöpfungskette abdecken sowie die Unterstützung durch forschende und planerisch tätige Partner während des Projekts, konnte gewährleistet werden, dass die Projektergebnisse realitäts- und zeitnah in eine wirtschaftliche Nutzung überführt werden können.

Die Beteiligung der drei Forschungseinrichtungen war für die involvierten Industrieunternehmen von großer inhaltlicher Bedeutung. Die Notwendigkeit der geleisteten Arbeit ergab sich aus der Arbeitsplanung. Die geleistete Arbeit des Fraunhofer WKI war zum Erreichen der Ergebnisse notwendig. Vor allem die Kernaufgaben Entwicklung, Herstellung und Charakterisierung furnierbasierter MMS sowie die Unterstützung bei der Werkzeugoptimierung für holzbasierte Formteile hätte sowohl von den beteiligten Industrieunternehmen als auch von den weiteren Forschungseinrichtungen nicht abgedeckt werden können.

Ohne eine finanzielle Zuwendung hätte dieses, durch seinen Ansatz gänzlich neuartige Projekt ein erhebliches wirtschaftliches Risiko für die Verbundpartner dargestellt.

IX. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

IX.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Die im Projekt entwickelten holzbasierten MMS ermöglichen v. a. für mittlere Fahrzeugserien eine (teilweise) Substitution von konventionellen Werkstoffen und Prozessrouten in den Bereichen der Automobil- und Schienenfahrzeugindustrie. Überdies ist es möglich, die gewonnenen Erkenntnisse auch auf weitere Bereiche der Mobilität, wie die Luftfahrt oder den Schiffsbau auszuweiten. Die nachhaltige und ressourceneffiziente Werkstofflösung trägt ferner zur Verbesserung der Umweltbilanz in der Lebenszyklusanalyse und Senkung des ökologischen Fußabdrucks bei und stärkt zugleich mit seiner Wirkung als „green label“ die deutsche Automobilindustrie. Durch die Entwicklung von holzbasierten MMS bietet sich zudem die Möglichkeit der Schaffung eines neuen Marktes des in Deutschland zukünftig in großen Mengen zur Verfügung stehenden Buchenholzes.

IX.2 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten

Die Ergebnisse zur Herstellung von furnierbasierten Lagenwerkstoffen in Multi-Material-Bauweise für strukturelle Anwendungen, welche während der Projektlaufzeit durch das Fraunhofer WKI aufgebaut und intensiviert wurden, können von der Forschungseinrichtung fachübergreifend in weiteren Industriezweigen eingesetzt werden. Durch das Erweitern der fachlichen Kompetenzen in diesem Technologiebereich wird das WKI zukünftig verschiedenste Fahrzeughersteller bei der Entwicklung neuer Bauteillösungen unterstützen sowie seine gewonnenen Erkenntnisse - im Rahmen der mit den Partnern vereinbarten Grenzen - veröffentlichen und kontinuierlich erweitern.

IX.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Das WKI wird seine Erkenntnisse im Bereich der Formholzwerkstoffe für den Einsatz im strukturellen Fahrzeugbau auch in andere Bereiche der Industrie übertragen. Dies ist vor allem der Baubereich, in dem die holzbasierten MMS eine Rolle spielen können, aber auch der Leichtbau im Bereich des Maschinenbaus, in dem Maschinenkomponenten aus holzbasierten MMS gefertigt werden können.

Durch die F&E-Arbeiten des Verbundes wurden die Grundlagen zum Einsatz holzbasierter MMS in verschiedenen Bereichen des Fahrzeugbaus geschaffen und umfangreiche Kenn-

werte auf halbindustrieller Ebene (Technikums-Maßstab) generiert. Basierend auf diesen Erkenntnissen kann die folgende industrielle Umsetzung mit dem Ziel einer Serientauglichkeit aufbauen.

Das WKI wird sich auch zukünftig im Rahmen von Folgeprojekten und Industrieaufträgen mit der Entwicklung von holzbasierten MMS beschäftigen. Auch eine weitere Kooperation mit den Verbundpartnern des Projekts For(s)tschritt ist angestrebt, um gemeinsam die Implementierung von Holz-Verbundsystemen in die Fahrzeugindustrie zu fördern.

IX.4 *Technologiereifegrade (Technology Readiness Level (TRL))*

Die mit diesem Vorhaben angestrebte Technologie sollte ganze Baugruppen und, wie im Schienenfahrzeugbau üblich, relevante Teilstrukturen einer Baugruppe abdecken. Dabei wurden die einzelnen Herausforderungen an vereinfachten, technologisch überschaubaren, generischen Teilstrukturen bearbeitet und gelöst. Neben der Entwicklung verbesserter numerischer Auslegungsverfahren sollte die bereits existierende Wertschöpfungskette „Formholz“ für automobile und schienenfahrzeugbezogene Anforderungen qualifiziert werden.

Nachfolgend werden die Bereiche Materialbereitstellung, Herstellung von Holz-Metall-Verbunden, Anwendungsentwicklung und Simulationsfähigkeit näher betrachtet und nach Technology Readiness Level (TRL) eingestuft.

Die Bereitstellung von Holzfurnieren für die Herstellung von Metall-Holz Sandwichstrukturen stellt keine technologische Herausforderung dar. In der Holzindustrie bestehen bereits Prozesse und Prüfverfahren zur Herstellung und Auswahl geeigneter qualitativ hochwertiger Furniere. Daher wird der TRL an dieser Stelle mit TRL 9 angegeben. Im Verlauf des Projekts wurden hier auch keine weiteren Entwicklungen angestrebt und durchgeführt.

Der Bereich der Herstellung von Holz-Metall-Sandwichstrukturen mit stärker automatisierten Herstellprozessen stellte eine Neuheit dar. Im Zuge des Forschungsvorhabens „HAMMER“ konnten aber bereits Erfahrungen in der Herstellung von Proben und Prototypen gesammelt und Know-how aufgebaut werden. Die bei Unternehmen aus dem Bereich der Formholzherstellung etablierten Fertigungsverfahren, wie sie beispielsweise in der Möbelindustrie angewandt werden, konnten nicht direkt auf die Herstellung der im Projekt geplanten Sandwichbauteile für Fahrzeugstrukturen übertragen werden, da Verfahren und Prozesse den gegebenen Anforderungen nicht genügen. Hinsichtlich des TRL wird der Stand der Produktionstechnik vor Projektdurchführung somit mit TRL 4 (Versuchsaufbau im Labor) angegeben. Im Projekt angestrebt wurde TRL 6, also ein Prototyp in simulierter/vereinfachter Einsatzumgebung. Dieses Ziel konnte durch die Herstellung der finalen Bauteile bzw. Bauteilgruppen mittels entsprechender Werkzeuge und Pressen realisiert werden.

Der Bereich der Anwendungsentwicklung vor Projektbeginn kann mit TRL1 bzw. TRL2 angegeben werden. Aus Applikationen im Rahmen des Projekts „HAMMER“ wurden bereits erste Anwendungsgrenzen deutlich und Potentiale aufgezeigt. Allerdings wurde im Zuge des Projekts „For(s)tschritt“ nach neuen Anwendungsfeldern gesucht und der Fokus hinsichtlich der Bauteilbeanspruchung anders gelegt. Ziel war es, TRL 5 (Versuchsaufbau in simulierter/vereinfachter Einsatzumgebung) für die Anwendungsentwicklung zu erreichen. Sowohl für die Baugruppe „PKW“ als auch für beide Baugruppen der Schienenfahrzeuge „Schiene“ und „Tür“ konnte TRL 5 erreicht werden.

Abschließend bleibt die Betrachtung der Simulationsfähigkeit. Im Vorfeld lagen aus dem Projekt „HAMMER“ nur wenige Erfahrungen im Bereich der Simulation von Holz-Metall Schichtverbunden, insbesondere in der Crashberechnung vor. Startpunkt für diese Arbeiten war deshalb ein TRL 2. Zielsetzung im Projekt war daher die Entwicklung eines geeigneten Materialmodells und einer geeigneten Vorgehensweise zur Simulation dieser Strukturen. Zudem wurde eine erste Abschätzung des Bauteilverhaltens bei dynamischer und statischer Beanspruchung angestrebt. Das angestrebte Ziel, die Erreichung von TRL 6, was einer versuchsweisen Anwendung der entwickelten Simulationsmethode für die entwickelten Bauteile entspricht, wurde maßgeblich durch den Projektpartner DLR erreicht.

Um die Reifegrade 8 (Nachweis der Funktionsfähigkeit im Einsatzbereich, Zulassungsprozess abgeschlossen) und/oder 9 - also bis hin zur Markteinführung - zu erreichen, bedarf es noch weiterer Arbeitsschritte und Untersuchungen. Einen wichtigen Punkt stellt hier u. a. die industrielle Serienfertigung dar. Ein weiterer Faktor sind die, bei den beiden Baugruppen „PKW“ und Schiene „Tür“, bisher hohen errechneten Kosten zur Formteilherstellung, aber auch die hohen erforderlichen Investitionskosten für neue Produktionslinien. In weiteren Forschungsarbeiten sollten daher Ansätze zur Verkürzung der Taktzeiten, bspw. durch Modifizierung und schließlich kürzere Aushärtezeiten der Bindemittel sowie Möglichkeiten zur Kostensenkung untersucht und verfolgt werden. Bei der Baugruppe „Schiene“ sind die Untersuchungen zur Funktionsintegration der Wärmeisolierung und in Folge dessen auch die Kosten für die Herstellung der gesamten Baugruppe noch nicht abschließend geklärt. Aufgrund der genannten, noch offenen Punkte, kann zum aktuellen Zeitpunkt kein Zeithorizont zum Erreichen der Marktreife angegeben werden.

X. Bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen

Zu Beginn des Projekts For(s)tschritt ist bekannt geworden, dass relativ zeitgleich mit dem Projekt „WoodC.A.R.“ in Österreich ein internationales Forschungsprojekt gestartet ist, das ebenfalls den Einsatz von Holz als Strukturwerkstoff in Mobilitätsanwendungen im Fokus hat.

Über die Verbindung von MAN als Volkswagen-Tochter, welche am Projekt WoodC.A.R. beteiligt ist, wurde daher durch die Volkswagen Konzernforschung der Kontakt zwischen den Konsortien hergestellt. So erfolgte zunächst ein Besuch von Vertretern von Volkswagen am 11.10.2017 an der Universität für Bodenkultur in Wien und im Anschluss ein Treffen zwischen den Konsortien am 19./20.09.2018 in München. Hierbei wurde neben fachlichem Austausch vor allen Dingen das Netzwerk der Partner erweitert, um so z. B. Folgeprojekte zu initiieren. Dem Fraunhofer-Institut für Holzforschung sind keine weiteren Projekte bekannt, die sich im Projektverlauf mit der oben beschriebenen Thematik beschäftigt haben. Zudem sind sonst keine weiteren Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Forschungsstellen bekannt.

XI. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Um einer breiten Zielgruppe Informationen über das Projekt und dessen Ergebnisse zukommen zu lassen, wurde eine eigene Homepage mit einer allgemeinen Projektbeschreibung, Informationen zu den einzelnen Partnern und Publikationen aus dem Konsortium erstellt. Die Homepage ist unter den folgenden URLs zu erreichen:

- www.holz-im-fahrzeug.de
- www.holz-im-auto.de
- www.holz-im-automobil.de
- www.holz-im-karosseriebau.de

Des Weiteren wurden die erzielten Forschungsergebnisse durch Vorträge und Veröffentlichungen auf Konferenzen bzw. in Fachjournalen gezielt für ein Fachpublikum publiziert. Im Rahmen des Projekts sind die nachfolgend aufgeführten Veröffentlichungen mit WKI-Beteiligung entstanden. Die vollständige Liste der Veröffentlichungen ist dem Gesamtabschlussbericht bzw. den Abschlussberichten der einzelnen Verbundpartner zu entnehmen. Die Ergebnisse werden jedoch auch über das Projektende hinaus in Folgepublikationen Verwendung finden.

Veröffentlichungen durch das Fraunhofer WKI:

- Berthold, Dirk: „Furnierbasierte Hybridwerkstoffe – Chancen und Herausforderungen für die Holzindustrie in Deutschland“, 18. Holztechnologischem Kolloquium, Dresden, 12.04. - 13.04.2018
- Burgold, Claudia: „Hybride Bauteile für die Mobilität“, WKI-internes Seminar, Braunschweig, 03.09.2018
- Burgold, Claudia: „Furnierbasierte Werkstoff-Forschung“, WKI-Webinar, Braunschweig, 10.12.2019

- Burgold, Claudia; Berthold, Dirk; Ritter, Nina: „Use of wood in the mobility sector – Opportunities, benefits and challenges“, 3rd International Conference on Materials Design and Applications, 5. – 6. November 2020, Porto (online)

Veröffentlichungen durch Verbundpartner mit Beteiligung des Fraunhofer WKI:

- Große, Thomas; Fischer, Fabian; Berthold, Dirk; Schauerte, Oliver: „Wood materials – suitable for structural automotive applications?“, 11. European Wood-based Panel Symposium, Hamburg, 10.10. - 12.10.2018
- Große, Thomas; Fischer, Fabian; Hillmann, Jürgen; Berthold, Dirk; Piazza, Giovanni; Käse, David; Beeh, Elmar; Kohl, Daniel; Nguyen, Hoa: „Holz als Strukturwerkstoff im modernen Automobilbau“, WerkstoffPlus Auto 2019, Stuttgart, 20.02. - 21.02.2019
- Große, Thomas; Fischer, Fabian; Kohl, Daniel; Nguyen, Hoa; Böhm, Stefan; Poller, Benjamin; Käse, David; Piazza, Giovanni; Berthold, Dirk; Burgold, Claudia; Bachmann, Guido; Pellegrini, Andreas: „Woodbased multimaterials for structural parts in mobile applications“, Joining in Car Body Engineering 2019, Bad Nauheim, 09.04. - 10.04.2019
- Käse, David; Piazza, Giovanni; Beeh, Elmar; Fischer, Fabian; Große, Thomas; Kohl, Daniel; Nguyen, Hoa; Berthold, Dirk; Burgold, Claudia: „Einsatzpotentiale furnierbasierter Holzverbundwerkstoffe in Fahrzeugstrukturen“, 22. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde“, Kaiserslautern, 26.06. - 28.06.2019
- Enge, Jana; Bachmann, Guido; Pellegrini, Andreas; Nguyen, Hoa; Kohl, Daniel; Böhm, Stefan; Käse, David; Piazza, Giovanni; Beeh, Elmar; Burgold, Claudia; Berthold, Dirk; Albert, Torsten: „Türsysteme für den Schienenverkehr auf Basis nachhaltiger holzbasierter Materialien“, 20. Kolloquium: Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik, 3. - 4. März 2020, Würzburg
- Käse, David; Beeh, Elmar; Piazza, Giovanni; Friedrich, Horst E.; Kohl, Daniel; Nguyen, Hoa; Burgold, Claudia; Berthold, Dirk: „Innovative concepts for the usage of veneer based hybrid materials in vehicle structures“, 3rd International Conference on Materials Design and Applications, 5. – 6. November 2020, Porto (online)

Neben den wissenschaftlichen Beiträgen für das Fachpublikum erfolgten in der Projektlaufzeit die folgenden Schutzrechtsanmeldungen durch die Projektpartner:

- „Türinnenstruktur für eine Tür oder einen Deckel für ein Kraftfahrzeug“ (DE102018120190A1); Anmelder: DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Universität Kassel, Volkswagen AG, Anmeldetag 20.08.2018

- “Türflügelkonstruktion, Türflügel oder Tür sowie Verwendung von Holz oder eines auf Holz basierenden Materials bei einer Türflügelkonstruktion” (DE202018102451U1); Anmelder: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Gebr. Bode GmbH & Co. KG, Anmeldetag 03.05.2018
- „Türflügelkonstruktion, Türflügel oder Tür sowie Verwendung von Holz oder eines auf Holz basierenden Materials bei einer Türflügelkonstruktion“ (DE102019109251A1); Anmelder: DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Gebr. Bode GmbH & Co. KG, Anmeldetag 09.04.2019
- „Exterior wall segment for a railway vehicle, railway vehicle and method for manufacturing an exterior wall segment“ (20178594.6 -1107); Anmelder: DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Alstom S.A.; Anmeldetag 05.06.2020

Literaturverzeichnis

- DIN EN ISO 5659-2:2005-04 – Entwurf, 2004. Kunststoffe — Rauchentwicklung — Teil 2: Bestimmung der optischen Dichte durch Einkammerprüfung (ISO/DIS 5659-2:2004). DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
- DIN EN 45545-1, 2013. Bahnanwendungen - Brandschutz in Schienenfahrzeugen - Teil 1: Allgemeine Regeln; Deutsche Fassung EN 45545-1:2013. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
- DIN EN 45545-2, 2020. Bahnanwendungen - Brandschutz in Schienenfahrzeugen - Teil 2: Anforderungen an das Brandverhalten von Materialien und Komponenten; Deutsche Fassung EN 45545-2:2020. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
- DIN EN ISO 11925-2-2011-02, 2011. Prüfungen zum Brandverhalten - Entzündbarkeit von Produkten bei direkter Flammeneinwirkung - Teil 2: Einzelflammentest.
- DMT GmbH & Co. KG, 2016a. Prüfungen von (Verbund-)Werkstoffen auf seitliche Flammenausbreitung nach EN 45545-2. Dortmund: DMT.
- DMT GmbH & Co. KG, 2016b. Prüfung der Wärmefreisetzungsrate von (Verbund-) Werkstoffen nach EN 45545-2. Dortmund: DMT.
- DMT GmbH & Co. KG, 2016c. Prüfungen von Werkstoffen auf Rauchdichte und Toxizität nach EN 45545-2 und DIN 5510-2. Dortmund: DMT.
- Klein, B., 2011. Leichtbau-Konstruktion: Berechnungsgrundlagen und Gestaltung. 9. Auflage Hrsg. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Kohl, D., Million, M. & Böhm, S., 2013. adhesive bonded wood-textile-compounds as potentially new eco-friendly and sustainable high-tech materials. 36th Annual Meeting of the Adhesion Society, Red Hook, USA, pp. 27-29.
- Kohl, D., Flohr, T. & Böhm, S., 2014. Adhesively Bonded Wood-Based Multi-Material Systems as a Sustainable Material for Technical Applications. 37th Meeting of the Adhesion Society, Red Hook, USA, pp. 119-121.
- Kohl, D., Wicke, T., Alsmann, M. & Böhm, S., 2014. Holz in der modernen automobilen Karosserie. Holztechnologie, Bd. 55, Nr. 6, pp. 44-49.
- HS Merseburg, [Online]. Available: <https://www.hs-merseburg.de/hochschule/projekte/eco-emotion/>. [Zugriff am 25.02.2020].
- ISO 5658-2:2006(E), 2006. Reaction to fire tests — Spread of flame — Part 2: Lateral spread on building and transport products in vertical configuration. ISO copyright office, Geneva.
- ISO 5660-1:2002(E), 2002. Reaction-to-fire tests — Heat release, smoke production and mass loss rate — Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method). ISO copyright office, Geneva.
- Niemz, P., 2006. Holzphysik (Vorlesungsskript), Eidgenössische technische Hochschule Zürich: Institut für Baustoffe.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Verbundprojekt: For(s)tschritt – Strukturbaugruppen auf Basis nachhaltiger holzbasierter Materialsysteme zur Reduzierung von Masse und Umweltauswirkungen im Straßen- und Schienenfahrzeugbau Teilvorhaben: Entwicklung, Prüfung und Ertüchtigung holzbasierter Lagenwerkstoffe für Multi-Material-Systeme (MMS)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Burgold, Claudia Berthold, Dr. Dirk	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.08.2020
	6. Veröffentlichungsdatum 30.11.2020
	7. Form der Publikation Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. Hansastr. 27c, 80686 München Ausführende Stelle: Fraunhofer-Institut für Holzforschung - Wilhelm-Klauditz-Institut WKI Bienroder Weg 54 E, 38108 Braunschweig	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 19I16013I
	11. Seitenzahl 90
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 15
	14. Tabellen 22
	15. Abbildungen 42
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) TÜV Rheinland Consulting GmbH, Am Grauen Stein, 51105 Köln, 30.11.2020	
18. Kurzfassung Das WKI konnte durch seine Arbeiten einen wichtigen Beitrag zur Ertüchtigung der Herstellungsprozesse von holzbasierten Multimaterialsystemen, inkl. Optimierung der Umformwerkzeuge leisten. In Bezug auf die Zielstellung der Gewichtseinsparung kann zu den einzelnen Demonstratoren festgehalten werden, dass in allen Fällen deutliches Gewichtseinsparpotenzial nachgewiesen wurde. Insgesamt wurden die vielfältigen Möglichkeiten, Vorteile und das Potential von Holz-Metall-Verbunden im Projekt For(s)tschritt sehr deutlich aufgezeigt. Hervorzuheben ist dabei insbesondere die ökologische Bilanz (LCA). Zu den Potentialen zählt u. a. die Möglichkeit des Leichtbaus mit Holz-Metall-Verbunden und deren besondere Eignung, Bauteil- und Fahrzeugeigenschaften bei gleichem Gewicht zu verbessern. Diese Stärke eröffnet ein breites Feld von Anwendungsmöglichkeiten bei Schienen- und Straßenfahrzeugen und verdeutlicht, dass im Projekt For(s)tschritt wichtige Beiträge für zukünftige Entwicklungen auf diesem Gebiet geleistet wurden.	
19. Schlagwörter Holzwerkstoffe, Holzformteile, Multimaterialsystem, Hybridisierung, Fahrzeugstrukturen, Mobilität, Nachhaltigkeit	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) report
3. title Joint research project: For(s)tschritt – Structural assemblies based on sustainable wood-based material systems for reducing mass and environmental impact in road and rail vehicle construction Sub-project: Development, testing and upgrading of wood-based ply materials for multi-material-systems (MMS)	
4. author(s) (family name, first name(s)) Burgold, Claudia Berthold, Dr. Dirk	5. end of project 2020-08-31
	6. publication date 2020-11-30
	7. form of publication report
8. performing organization(s) (name, address) Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. Hansastr. 27c, 80686 München Implementing organization: Fraunhofer Institute for Wood Research - Wilhelm-Klauditz-Institut WKI Bienroder Weg 54 E, 38108 Braunschweig	9. originator's report no.
	10. reference no. 19I16013I
	11. no. of pages 90
12. sponsoring agency (name, address) Federal Ministry of Education and Research (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 15
	14. no. of tables 22
	15. no. of figures 42
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) TÜV Rheinland Consulting GmbH, Am Grauen Stein, 51105 Köln, 2020-11-30	
18. abstract Through its work, the WKI was able to make an important contribution to improving the manufacturing processes of wood-based multi-material-systems, including the optimization of forming tools. With regard to the goal of weight reduction, it can be stated for the individual demonstrators that in all cases significant weight reduction potential was demonstrated. All in all, the various possibilities, advantages and potential of wood-metal composites were very clearly demonstrated in the For(s)tschritt project. The ecological balance (LCA) is particularly emphasized. The potential includes the possibility of lightweight construction with wood-metal composites and their particular suitability for improving component and vehicle properties while maintaining the same weight. This opens up a wide range of possible applications for rail and road vehicles and shows that the project has made important contributions to future developments in this field.	
19. keywords wood materials, wood moulding, multi-material-system, hybridization, vehicle structures, mobility, sustainability	
20. publisher	21. price