

ABSCHLUSSBERICHT

Verbundprojekt MoWag – Modularer Wagenkasten für Schienenfahrzeuge in Multi-Material-Leichtbauweise

Teilvorhaben: Entwicklung, Simulation und Erprobung neuer innovativer Werkstoffverbünde für Schienenfahrzeuge

FKZ: 19I18012C

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU

Reichenhainer Straße 88

09126 Chemnitz

Marcus Knobloch (Tel.: +49 371 5397-1217, Mail: marcus.knobloch@iwu.fraunhofer.de)

Projektpartner:

CE cideon engineering GmbH & Co. KG

Tzschirnerstraße 5A

02625 Bautzen

Ulf Noteboom (Tel.: +49 3591 374483-17, Mail: ulf.noteboom@cideon-engineering.com)

Lakowa Kunststoffbe- und -verarbeitung GmbH

Dresdener Str. 25

02681 Wilthen

Ralf Liebscher (Tel.: +49 3592 54363-0, Mail: ralf.liebscher@lakowa.com)

Geplante Laufzeit: 01.01.2019 – 30.06.2021 (30 Monate)

Tatsächliche Laufzeit: 01.01.2019 – 31.12.2021 (36 Monate)

1. Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „MoWag – Modularer Wagenkasten für Schienenfahrzeuge in Multi-Material-Leichtbauweise“ hatte die Entwicklung und Umsetzung von innovativen Bauweisenkonzepten für den Wagenkasten von Schienenfahrzeugen zum Ziel. Anhand flexibler Multi-Material-Module sollte die Integration dieser Module in ein bestehendes Schienenfahrzeugsystem nachgewiesen werden. Der Aufbau der einzelnen Module sollte sich dabei sehr variabel je nach Bauraum- und Schnittstellenanforderungen modifizieren lassen.

Die Bauweisen sowie damit verbundene Konstruktions- und Fertigungsprozesse wurden exemplarisch an einem Wagenkastensegment als Technologieträger dargestellt. Dieses beinhalten ein Tragwerk mit ausgewählten Seiten- und Interieur-Komponenten sowie eine Bodenstruktur. Die Sicherstellung der geforderten Produkteigenschaften erfolgte mit Hilfe simulativer und experimenteller Validierung der Materialeigenschaften und Funktionen anhand von Technologieträgern. Gesamtziel des Projektkonsortiums war, anhand eines Demonstrators den Nachweis zu erbringen, dass die neu entwickelten Bauweisen eine signifikante Masseeinsparung von 5 bis 10 % gegenüber konventionellen Wagenkästen in Aluminium-Profilbauweise vermögen, ohne dabei Sicherheits-, Komfort- oder Brandschutzstandards zu vernachlässigen.

Im Teilvorhaben des Fraunhofer IWU lag der Fokus auf der Entwicklung einer Technologie zur Herstellung lastpfadgerechter, brandgeschützter Pultrusionsprofile sowie der Verifizierung der Materialeigenschaften im Hinblick auf den Einsatz im Schienenfahrzeug.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Durchhaben durchgeführt wurde

Die Schienenfahrzeugindustrie war, ist und bleibt einer der wichtigsten Transportsektoren in Deutschland und der Welt. Um einen angemessenen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten, mindestens aber die steigenden politischen Anforderungen zu erfüllen, steht auch im Schienenfahrzeugbereich die stetige Steigerung der Ressourceneffizienz im Vordergrund. Diese besteht dabei zum einen in der ökonomischen Herstellung von Bauteilen und Baugruppen, vor allem aber aus möglichst niedrigen Betriebskosten. Die Reduktion der Fahrzeugmasse weist dabei eines der größten Potenziale zur Reduktion der Betriebs- bzw. Lebenszykluskosten auf.

Gerade bei Schienenfahrzeugen zum Personentransport, wie Straßenbahnen oder Regionalbahnen, müssen große Massen sehr häufig beschleunigt und verzögert werden. Eine signifikante Massereduktion (bspw. der Fahrgastmodule) weist über die gesamte Betriebszeit ein erhebliches Energieeinsparpotenzial auf. Die Verringerung der zum Transport erforderlichen Energie bewirkt dabei direkt einen geringeren Ausstoß an CO₂.

Mit der im Projekt angestrebten signifikanten Massereduktion und als Konsequenz der Reduktion der CO₂-Emission im Betrieb wird die Marktstellung der nationalen Schienenfahrzeugindustrie und deren Zulieferer erhalten und gestärkt.

Das Vorhaben wurde im Förderprogramm „Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert. Die Einordnung des Projektantrags in die BMWi-Ausschreibung kann Abbildung 1 entnommen werden.

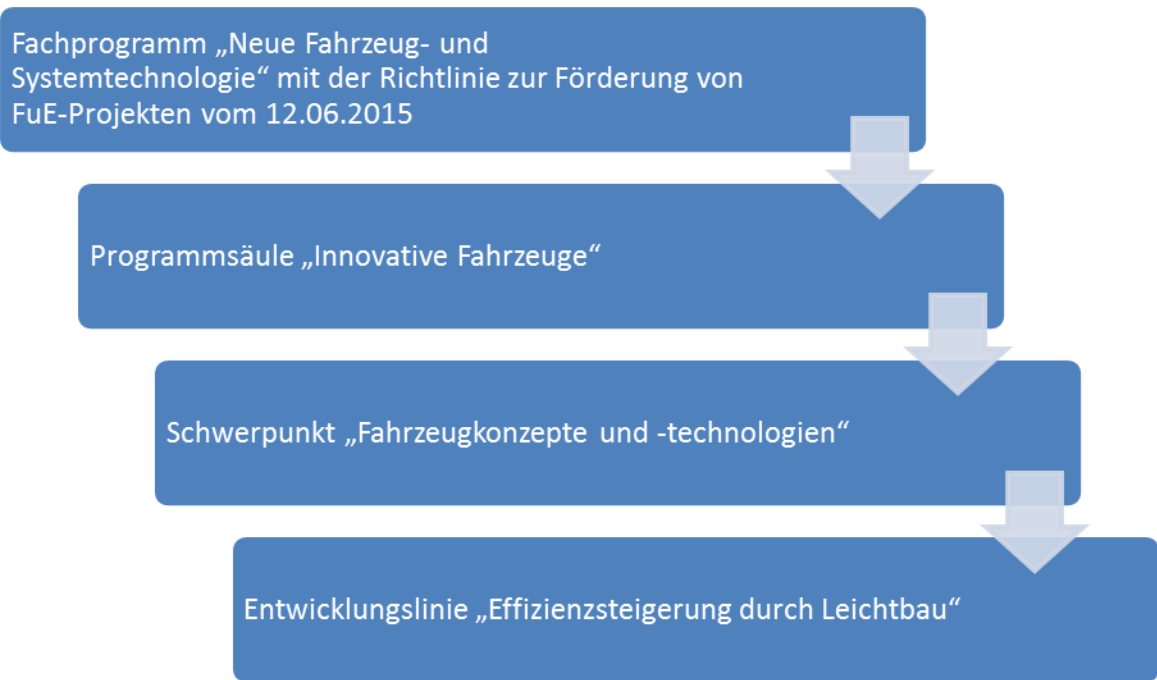


Abbildung 1: Einordnung des FuE-Vorhabens in die förderpolitischen Ziele

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Tabelle 1 zeigt den Arbeitsplan des Fraunhofer IWU nach Abschluss des Vorhabens. Die schraffierten Felder zeigen die ursprüngliche Planung bei Antragstellung; die farblich markierten Felder zeigen den tatsächlichen Verlauf. Es ergaben sich während der ursprünglich geplanten Projektlaufzeit (01.01.2019 – 30.06.2021) ab Q1/2020 deutliche Verzögerungen aufgrund der COVID-19-Pandemie. Mit Antrag vom 08.03.2021 wurde das Projekt kostenneutral um 6 Monate bis 31.12.2021 verlängert.

Tabelle 1: Zeitplanung des Fraunhofer IWU (grün: planmäßig bearbeitet, lila: Verzögerungen, blau: vorgezogen)

Arbeitspaket Arbeitsschritt	2019												2020												2021											
	Monat												Monat												Monat											
0 Projektmanagement	[Schraffiert]																																			
1 Grundlagen	[Schraffiert]																																			
1.1 Analyse, Klassifizierung und Bewertung bestehender Systemlösungen	[Schraffiert]																																			
1.2 Auswahl Referenzbaugruppe / Ableitung Zielgrößen und Randbedingungen	[Schraffiert]																																			
2 Erstellung der Anforderungsprofile für die Wagenkastenmodule (Lastenheft)	[Schraffiert]																																			
2.1 Erarbeitung / Aufstellung des mechanischen Anforderungsprofils (Lastfälle, Langzeitverhalten, ...)	[Grün]																																			
2.2 Erarbeitung / Aufstellung des geometrischen Anforderungsprofils (Bauraum, Form-, Lagegenauigkeit)	[Schraffiert]																																			
2.3 Erarbeitung / Aufstellung des thermischen und akustischen Anforderungsprofils	[Grün]																																			
2.4 Ableitung der erforderlichen Werkstoff- und Technologieentwicklungen	[Grün]																																			
3 Konzepterstellung / Auslegung	[Schraffiert]																																			
3.1 Konzeptionelle Entwürfe für Multi-Material-Module des Wagenkastens	[Grün]																																			
3.2 Erarbeitung der konstruktiven / funktionalen Möglichkeiten durch neue Bauweisen	[Lila]																																			
3.3 Werkstofftechnische Untersuchungen an Funktionsmustern	[Lila]																																			
3.4 Auswahl Vorzugsvariante unter Berücksichtigung des Bauraums, der Designvorgaben und Schnittstellen	[Lila]																																			
3.5 Konstruktive Umsetzung / Detaillierung des ausgewählten Entwurfs	[Grün]																																			

Für die einzelnen Bauweisen in Abbildung 2, welche sich auf den Einsatz einer bestimmten Materialgruppe konzentrieren, sind verschiedene Bauweisen hinsichtlich des Aufbaus der Komponenten entwickelt und angewandt worden, wie Abbildung 3 verdeutlicht.

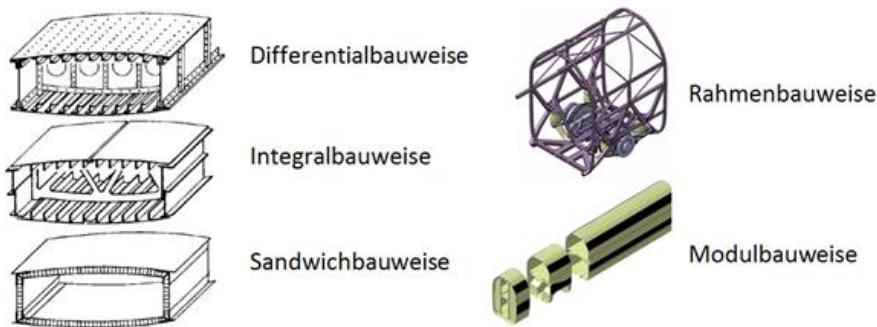


Abbildung 3: Bauweisen [1]

Für das Projekt war es aus Sicht der Projektpartner unerlässlich, von einer materialgleichen hin zu einer Multi-Material-Bauweise überzugehen und dabei gleichzeitig baugruppenspezifisch auf Bauweisen aus Abbildung 3 zurückzugreifen. Im Rahmen des Projektes sollte der Aufbau der Wagenkästen ganzheitlich betrachtet und optimale Bauweisen für ein Multi-Material-Design konzipiert werden.

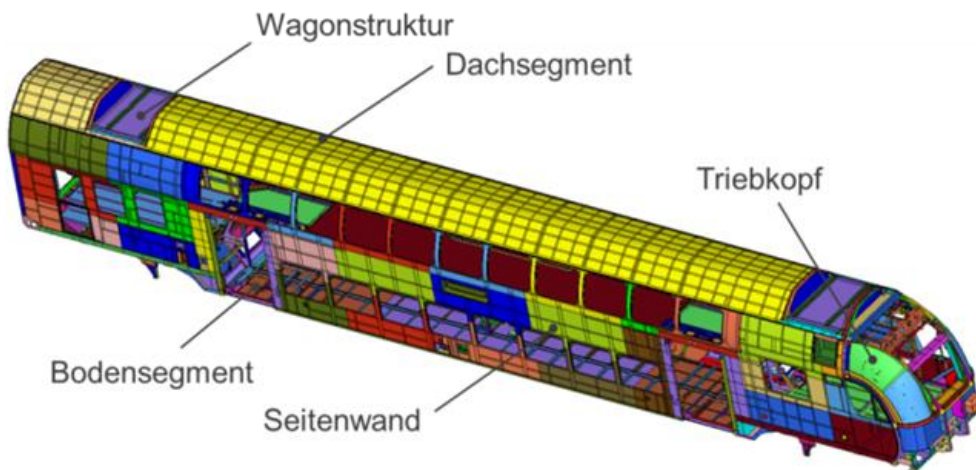


Abbildung 4: Komponenten eines Zugabschnitts [1]

Der Einsatz von Sandwichbauweisen fand bereits breite Anwendung bei Schienenfahrzeugen. Prädestinierte Baugruppen dafür sind Seitenwände und Bodensegmente, wie in Abbildung 4 dargestellt, aber auch Interieur-Komponenten. Für tragende Strukturen wie Böden oder Seitenwände setzen nahezu alle Serienanwendungen hauptsächlich auf den Einsatz von Metallen, wie Abbildung 5 aufzeigt.



Abbildung 5: Herkömmliche metallintensive Bauweisen von Schienenfahrzeugen

Die gezielte Materialauswahl, -zusammenstellung und -anordnung von Metallen und Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) ermöglicht erhebliche Massevorteile bei gleichzeitiger Gewährleistung der geforderten Eigenschaften, wie in Abbildung 6 beispielhaft am Elastizitätsmodul bzw. der spezifischen Steifigkeiten von Materialien verdeutlicht wird.

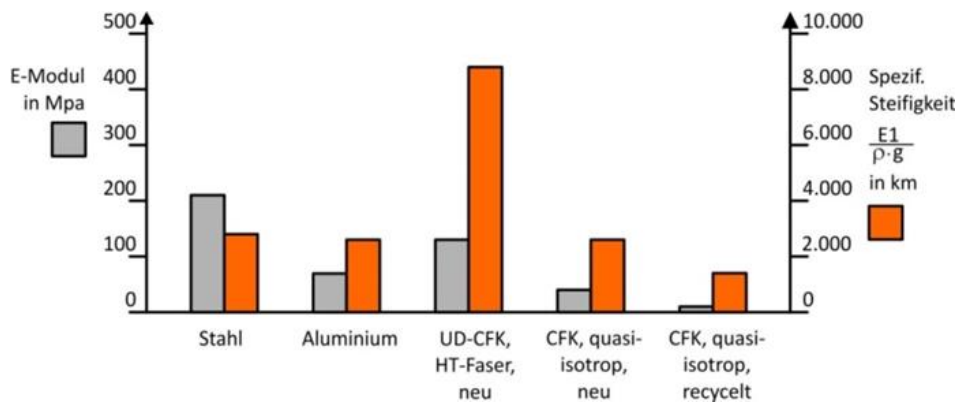


Abbildung 6: Vergleich der E-Moduln und spezifischen Steifigkeiten für ausgewählte Strukturwerkstoffe

Durch die Platzierung des geeigneten Werkstoffes an der entsprechend seiner Eigenschaften prädestinierten Position im Multi-Materialverbund ist es möglich, eine Massereduktion zu erzielen und dabei gleichzeitig der Vielzahl an Anforderungen an Komponenten im Schienenfahrzeugbau zu genügen:

Tabelle 2: Anforderungen an Komponenten im Schienenfahrzeug

- hohe Tragfähigkeit bei möglichst geringem Eigengewicht
- Erfüllung der Brandschutz-Normen
- Möglichkeit der Funktionsintegration
- kostengünstige Materialien / Herstellung
- für automatisierbares Fertigungsverfahren einsetzbar
- hohe Eigenstabilität
- Wärme- und Schalldämmung
- Recyclingfähigkeit
- gutes Crashverhalten & Impactvermögen

1.4.2 Aluminiumschaum

Zellulare Werkstoffe, wie zum Beispiel Metallschäume, sind Strukturen mit hoher Porosität. Sie zeichnen sich durch eine niedrige Dichte aus (Aluminiumschaum: etwa 0,3 – 0,8 g/cm³). Metallschäume weisen ein gutes Dämpfungsvermögen und variierend mit der Dichte eine verhältnismäßig hohe Festigkeit auf. Sie besitzen ein wesentlich höheres Druckspannungsniveau als Polymerschäume und sind damit für viele Maschinenbauanwendungen sehr attraktiv.

Zur Herstellung von Aluminiumschaumkomponenten existieren verschiedene Herstellungsverfahren. Nach der schmelzmetallurgischen Methode werden große Aluminiumschaumblöcke hergestellt (Abbildung 7). Die Fertigungskosten liegen hierbei unterhalb denen aller anderen Verfahrensvarianten.

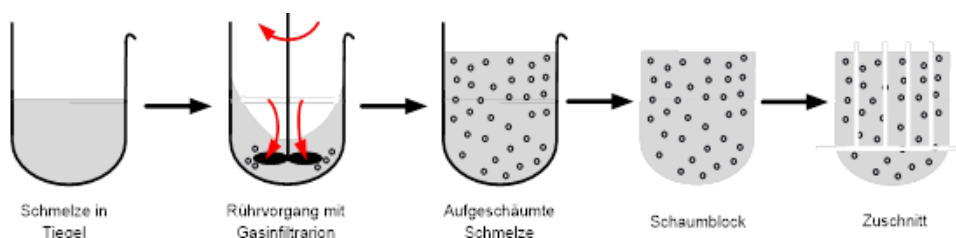
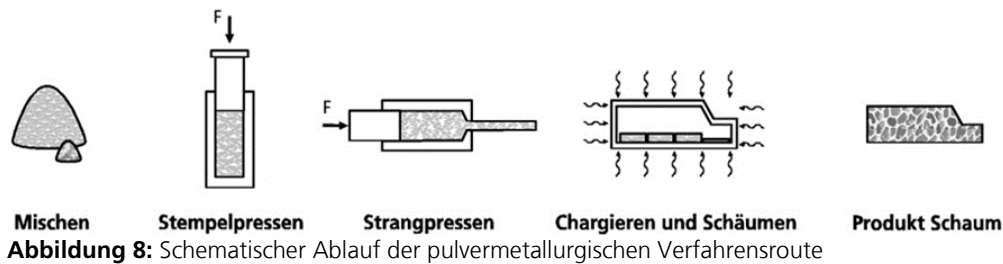


Abbildung 7: Schematischer Ablauf des schmelzmetallurgischen Schäumverfahrens

Hierbei wird in eine Metallschmelze Gas eingeblasen oder ein festes Treibmittel zugegeben. Letzteres spaltet in der Schmelze aufgrund der über der Zersetzungstemperatur liegenden Schmelztemperatur Treibgase ab. Die noch flüssige schaumige Substanz wird bis zur Erstarrung abgekühlt. Allerdings entstehen nur große Blöcke, die ihre endgültige Kontur durch spanende Verfahren erhalten. Diese Endbearbeitung ist zeitaufwändig und hebt den Vorteil der kostengünstigen Schaumherstellung wieder auf.

Die pulvermetallurgische Verfahrensrouten, wie sie am Fraunhofer IWU und bei der HMF GmbH angewandt wird, setzt sich aus den Prozessschritten Mischen des Metallpulvers mit einem gasabspaltenden Pulver (z. B. TiH_2), Verdichtung und Aufschäumen des Pulvergemischs, gefolgt von kontrolliertem Abkühlen zusammen (Abbildung 8).



Die einzelnen Parameter der Herstellung sind aufgrund der Aufteilung in mehrere Verfahrensschritte gut steuerbar, während bei anderen Verfahren alle Einflüsse gleichzeitig wirksam werden. Durch den Zwischenschritt des Strangpressens ist das aufschäumbare Halbzeug durch weitere Umformschritte gut auf die spätere Geometrie applizierbar. Des Weiteren können Werkstoffverbunde geschaffen werden (z. B. mit Stahl), die dann gemeinsam aufschäumen. Mit diesem Verfahren sind Platten, Profile, Sandwiches und Integralschäume herstellbar. Der entscheidende Vorteil liegt aber in der Möglichkeit, Konturen und Formen vollständig auszuschäumen, womit auch near-net-shape-Bauteile in 3-D-Volumenform herstellbar sind, welche über eine geschlossene Außenhaut verfügen [2 bis 4].

Dies ist für Aluminium, verschiedene Aluminiumlegierungen, Zink, Zinn, Bronze und Messing erprobt. Aus diesen Gründen wird für die pulvermetallurgische Herstellungsrouten das größte Applikationspotential gesehen.

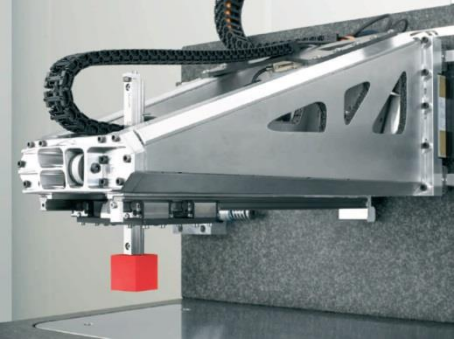
Zur Herstellung von porösen Metallen wurde eine ganze Reihe weiterer Verfahren entwickelt. Sie haben aufgrund technischer Probleme, zu geringer Reproduzierbarkeit in der Herstellung und meist ungenügender Wirtschaftlichkeit industriell kaum Bedeutung erlangt. Daher sollen sie nur kurz angeführt werden.

Beim Verfahren der Firma Shinko-Wire [5] wird die Aluminiumlegierung mit Kalzium oder Natrium versetzt, um die Viskosität zu erhöhen. Als Treibmittel wird ebenfalls Titanhydrid verwendet. Ein Abgießen in komplexe Formen oder die Herstellung gekrümmter Platten ist kaum möglich.

In einem Patent der Firma Hoesch [6] wird die Herstellung von Metallschaum im Stranggussverfahren erwähnt. Die Metallschmelze durchfließt dabei von unten nach oben eine wassergekühlte Stranggusskokille, mittels welcher die Querschnittsform der entstehenden Profile bestimmt wird. Die unter hydrostatischem Druck stehende Metallschmelze wird vor dem Durchfließen der Kokille mit Hilfe von Düsen mit einem Treibgas versetzt, welches die Porenbildung bewirkt. Diese Methode ermöglicht eine kontinuierliche Herstellung.

Industrielle Anwendungen von Aluminiumschaumkomponenten für Werkzeugmaschinen und im Automobilssektor sind in folgender Tabelle aufgelistet. Es ist zu betonen, dass es sich meist um Nischenanwendungen handelt. Das vorliegende Projekt soll dazu beitragen den Einsatz von Aluminiumschaumkomponenten weiter zu verbreiten.

Tabelle 3: Industrielle Anwendungen von Aluminiumschaumkomponenten

Bauteil / Maschine	Entwickler/ Hersteller
Werkzeugmaschinen	
	<p>Frässlitten in Aluminium-Schaum-Sandwich-Ausführung</p> <p>Rampf, Prototyp</p> <p>(hervorgegangen aus Vorprojekt mit dem IWU)</p>
Automobilindustrie	
	<p>Metallschaum-Crashabsorber im Gepäcknetz des Audi Q7 [7]</p>
	<p>Eingelegtes Schaumteil im stranggepressten Profil;</p> <p>Spaceframe; Ferrari [8]</p>

1.4.3 Pultrusion

Bei der Pultrusion handelt es sich um ein kontinuierliches Verfahren zur effizienten Herstellung von faserverstärkten Profilstrukturen. Es können nahezu alle Arten an Fasern bzw. Faserhalbzeugen sowie verschiedenste Kunststoffe als Matrixmaterial verarbeitet werden. Aktuell können gerade und konstant gekrümmte Profile erzeugt werden.

Verfahrensprinzip:

Beim Pultrusionsprozess werden Verstärkungsfasern durch ein Werkzeug gezogen, welches die Endkontur abbildet. Vor diesem Schritt werden die Fasern mit einer Matrix benetzt, die dem Profil die notwendige Stabilität verleiht. In Abbildung 9 ist ein schematisches Bild mit allen relevanten Verfahrenskomponenten abgebildet.

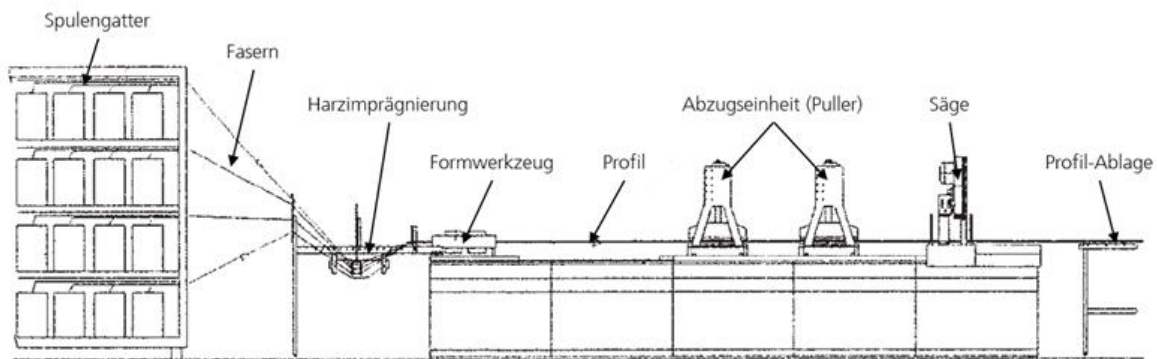


Abbildung 9: Pultrusionsprinzip

Der Großteil der pultrudierten Profile wird heute mit duroplastischer Matrix hergestellt. Hierzu zählen unter anderem ungesättigte Polyester-, Methacrylat- und Phenolharze [9]. Das Angebot an Harzsystemen für die Pultrusion erstreckt sich jedoch über ein wesentlich größeres Feld und geht mit einer sehr starken Beeinflussung der Anlagenparametersteuerung einher. Die Wahl des Harzsystems wird hauptsächlich von den Eigenschaftsanforderungen bestimmt.

Aufgrund der sehr starken Forschungstätigkeiten seitens großer Chemiekonzerne und Forschungseinrichtungen ist heutzutage eine sehr große Vielfalt an Harzsystemen für verschiedene Anwendungsfälle vorhanden. Neben den Hauptbestandteilen eines Verbundwerkstoffs, Verstärkungsfasern und Matrix kommen auch Zuschlagsstoffe zum Einsatz. Dabei handelt es sich größtenteils um chemische Zusätze, die bestimmte Eigenschaften der Profile erzeugen bzw. verbessern sollen. Hierzu zählen z. B. flammhemmende Stoffe oder Chemikalien, die eine UV-Resistenz bewirken.

In den vergangenen Jahren haben sich verschiedene Verfahrensspezifikationen des Pultrusionsprozesses entwickelt. Daran ist deutlich zu erkennen, dass dem Verfahren ein hohes Potential für die Faserverbundfertigung zugeschrieben werden kann. Dies hat verschiedene Gründe, die z. B. im kontinuierlichen Prozessablauf, der hohen Austragsgeschwindigkeit und nicht zuletzt an der starken Nachfrage der Industrie nach FKV-Bauteilen liegen.

Als Verstärkungsstruktur für Boden- und/oder Seitenwandmodul werden neben geraden Profilen ebenfalls konstant gekrümmte FKV-Profile in diesem Forschungsvorhaben berücksichtigt. Die „Revolution“ der Herstellung gekrümmter Pultrusionsprofile hat die Fa. Thomas GmbH + Co. Technik + Innovation KG im Jahre 2008 erfolgreich umsetzen können [10]. Dabei handelt es sich um die Möglichkeit faserverstärkte Profile mit einem konstanten Radius zwei- bzw. dreidimensional herzustellen (siehe Abbildung 10). Aufgrund dieser Entwicklung ergeben sich für die Pultrusion als Fertigungsverfahren große Felder an neuen Anwendungsgebieten.



Abbildung 10: Beispiele von 2-D und 3-D gekrümmten Profilen [11]

Bei dem entwickelten Verfahren handelt es sich jedoch um eine neue Prozessvariante des Pultrudierens, die sich von dem ursprünglichen Verfahrensprinzip, wie es einführend beschrieben wurde, unterscheidet. Grundsätzlich ist das Pultrusionsverfahren so definiert, dass imprägnierte Fasern durch ein temperiertes Werkzeug gezogen werden. Der von der Fa. Thomas GmbH + Co. Technik + Innovation KG entwickelte Prozess unterscheidet sich dadurch vom ursprünglichen Verfahren, dass nicht nur die Fasern bewegt werden, sondern zusätzlich auch das Werkzeug. Aus diesem Grund wird diese Verfahrensspezifikation auch als Moving Mould Pultrusion bezeichnet.

1.4.4 Schutzrechte

Die abschließend durchgeführte IP-Recherche ergab für das TVH des Fraunhofer IWU keine relevanten Treffer. Von daher ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht mit entgegenstehenden Schutzrechten zu rechnen.

1.4.5 Fachliteratur, Informations- und Dokumentationsdienste

Ergänzend zum bereits vorhandenen Design- und Material-Know-how wurden einschlägige Fachliteratur und Informationsdienste (siehe Literaturliste am Ende des Abschlussberichts) verwendet. Eine projektbegleitende und -abschließende Recherche nach aktuellen Veröffentlichungen zum FuE-Thema „Modularer Wagenkasten in Multi-Material-Leichtbauweise“ und (inkl. Variationen dieser Rechercheanfragen) wurde auf www.researchgate.net und www.scholar.google.com durchgeführt. Recherchen nach aktuellen Schutzrechten wurden auf www.patbase.com sowie <https://patents.google.com/> durchgeführt.

1.5 Zusammenarbeit mit Dritten

Für den Erfolg des Projekts MoWag war es notwendig, dass alle beteiligten Partner entsprechend ihren Fähigkeiten und Erfahrungen eng zusammenarbeiten. Auf diese Weise entstehende Synergien bewirkten einen deutlichen Mehrwert für alle Partner.

2. Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Alle Zuwendungen wurden im Vorhaben bestimmungsgemäß verwendet, um entsprechende personelle Stellen sowie die Beschaffung von Material, Fremdleistungen und Investitionen zu finanzieren. Die avisierten Ziele der geplanten Arbeitspunkte konnten mit den zur Verfügung gestellten Ressourcen erreicht werden. Im Folgenden sind die durchgeführten Arbeiten sowie die erzielten übergeordneten Ergebnisse zusammengefasst dargestellt.

2.1.1 AP 1: Grundlagen

Das Ziel von AP 1 war die Analyse und Bewertung von bestehenden Systemlösungen unter Berücksichtigung der für dieses Vorhaben gesteckten Ziele. Durch intensive Recherche der Schienenfahrzeugkomponenten wurden Potenziale nach leichtbauspezifischen, ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten ermittelt, analysiert und bewertet.

Das Fraunhofer IWU war im AP 1 nur beratend und unterstützend tätig, weshalb die Ergebnisse dieses AP hier nur kurz dargestellt werden. Ausführliche Projektergebnisse werden im ZB von CE dargelegt.

AS 1.1 Analyse, Klassifizierung und Bewertung bestehender Systemlösungen

Gemeinsam mit dem AP-verantwortlichen CE erfolgte eine Analyse, Klassifizierung und Bewertung bestehender modularer Systemlösungen für Schienenfahrzeuge – im Speziellen für Wagenkästen.

AS 1.2: Auswahl Referenzbaugruppe / Ableitung Zielgrößen und Randbedingungen

Abbildung 11 zeigt CAD-Modelle eines Wagenkastens, welche in diesem Projekt als Referenzbaugruppe bzw. Demonstrator dient.

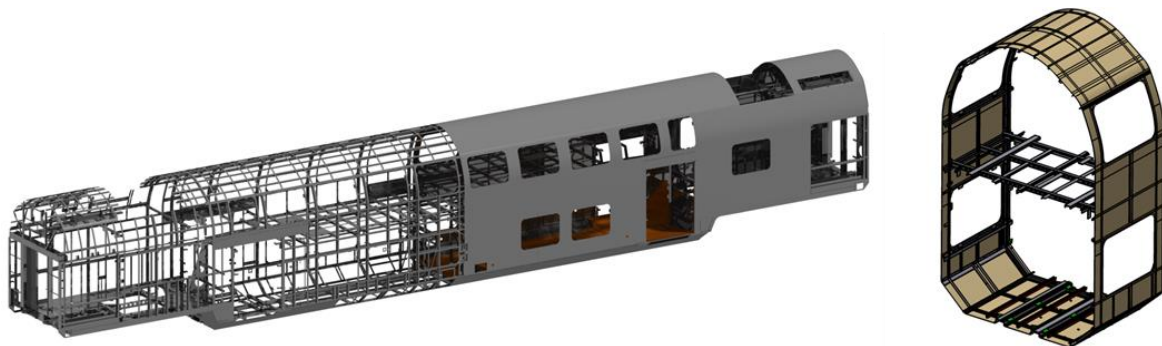


Abbildung 11: Referenzmodell doppelstöckiger Wagen (li); Wagenkastenausschnitt als Demonstrator (re)

2.1.2 AP 2: Erstellung der Anforderungsprofile für die Wagenkastenmodule (Lastenheft)

Das Hauptziel des 2. AP war die Erarbeitung von Anforderungsprofilen für die in AP 1 definierten Referenzmodelle. In einem Lastenheft wurden dabei alle relevanten Lastfälle definiert, welche für die folgenden AP beachtet werden mussten.

AS 2.1: Erarbeitung / Aufstellung des mechanischen Anforderungsprofils

In AS 2.1 arbeitete das Fh IWU gemeinsam mit dem AP-verantwortlichen CE an der Ausarbeitung des mechanischen Anforderungsprofils. Es wurden geltende Normen recherchiert und daraus Werte für normierte Lastfälle abgeleitet. Des Weiteren wurden Recherchen zum Langzeitverhalten (z. B. Dauerschwingfestigkeit) innovativer Werkstoffe (Metallschäume, faserverstärkte Kunststoffe bzw. Hybridwerkstoffe) durchgeführt und im Hinblick auf neue Bauweisenkonzepte analysiert.

Es erfolgte die Definition der Fahrzeugmassen nach DIN EN 15663 „Bahnanwendungen – Fahrzeugreferenzmassen“, mit welchen in den folgenden AP gerechnet wurde. In Tabelle 4 und Tabelle 5 sind die Gesamtmassen für das ausgewählte Referenzbauteil berechnet worden. Anschließend wurden statische und dynamische Lastfälle definiert, wie sie typischerweise bei Doppelstockwagen betrachtet werden müssen (Tabelle 6: Statische Lastfälle, Tabelle 7: Ermüdungslastfälle).

Tabelle 4: Berechnung Auslegungsmassen - Normale Zuladung

Beschreibung	Symbol	Auslastung	Einzelmasse [kg]	Anzahl [-]	Flächenlast [kg/m²]	Fläche [m²]	Einzelmasse [kg]2	Summe [kg]
Zuladung Sitzplätze im Oberstock		80%	70	55			3080	
Zuladung Sitzplätze im Unterstock		80%	70	50			2800	
Zuladung Stehplätze		80%			350	45	12600	
Masse Zuladung	m3							18480
Masse Laufdrehgestell	m2	100%	7500	2			15000	
Masse Wagenkasten	m1	100%	40000	1			40000	
Masse Fahrzeug								55000
Gesamtmasse	m_ges							73480

Tabelle 5: Berechnung Auslegungsmassen - Außergewöhnlich Zuladung

Beschreibung	Symbol	Auslastung	Einzelmasse [kg]	Anzahl [-]	Flächenlast [kg/m²]	Fläche [m²]	Einzelmasse [kg]2	Summe [kg]
Zuladung Sitzplätze im Oberstock		100%	70	55			3850	
Zuladung Sitzplätze im Unterstock		100%	70	50			3500	
Zuladung Stehplätze		100%			350	45	15750	
Masse Zuladung	m4							23100
Masse Laufdrehgestell	m2	100%	7500	2			15000	
Masse Wagenkasten	m1	100%	40000	1			40000	
Masse Fahrzeug								55000
Gesamtmasse	m_ges							78100

Tabelle 6: Statische Lastfälle

Lastfall	a_z [g]	$F_{x,Kuppl.}$ [kN]	$F_{x,Puffer}$ [kN]	Masse	Beschreibung / Erklärung
LF-1110	-1,00	-	+1500	m_1	Pufferdruck P-II
LF-1120	-1,00	-	+1500	$m_1 + m_4$	Pufferdruck P-II
LF-1210	-1,00	-1000	-	m_1	Kupplungszug P-II
LF-1220	-1,00	-1000	-	$m_1 + m_4$	Kupplungszug P-II
LF-1310	-1,00	+1500	-	m_1	Kupplungsdruck P-II
LF-1320	-1,00	+1500	-	$m_1 + m_4$	Kupplungsdruck P-II
LF-1400	-1,00	-	-500	m_1	Diagonaler Pufferdruck P-II
LF-1500	-1,30	-	-	$m_1 + m_4$	Maximales Betriebsgewicht P-II

Tabelle 7: Ermüdungslastfälle

Lastfall	a_z [g]	a_y [g]	a_x [g]	Masse	Beschreibung / Erklärung
LF-2001	-0,85	+0,15	-	$m_1 + m_3$	
LF-2002	-0,85	-0,15	-	$m_1 + m_3$	
LF-2003	-1,15	+0,15	-	$m_1 + m_3$	
LF-2004	-1,15	-0,15	-	$m_1 + m_3$	

AS 2.2: Erarbeitung / Aufstellung des geometrischen Anforderungsprofils

AS 2.2 ist nicht Bestandteil der Projektarbeit des Fh IWU. Hier sei auf den ZB des AP-Verantwortlichen CE verwiesen.

AS 2.3: Erarbeitung / Aufstellung des thermischen und akustischen Anforderungsprofils

Gemeinsam mit CE arbeitete das Fh IWU im AS 2.3 an der Aufstellung thermischer und akustischer Anforderungsprofile für Schienenfahrzeuge – speziell für Wagenkästen in innovativen Leichtbauweisen. Dabei wurden geltende Normen recherchiert und die für das Projekt relevanten Anforderungen definiert. Für das FuE-Projekt MoWag wurde angenommen, dass die entwickelten Wagenkästen den Anforderungen der Klasse A2 für Höhenbereiche bis 1000 m ü. HN genügen müssen. Dabei wurden 2 geltende Normen identifiziert:

- DIN EN 50125 „Bahnanwendungen - Umweltbedingungen für Betriebsmittel“
- DIN EN 60077-1 „Bahnanwendungen - Elektrische Betriebsmittel auf Bahnfahrzeugen – Teil 1: Allgemeine Betriebsbedingungen und allgemeine Regeln“

Mithilfe der Normen wurden Temperaturbereiche für die Entwicklungen des Projekts definiert:

- | | |
|--|-------------------|
| • Temperaturklasse | T1 (Mitteleuropa) |
| • Umweltgrenztemperaturen | - 25 bis + 40 °C |
| • Grenzflächentemperatur bei direkter Abstrahlung | - 40 bis + 70 °C |
| • Temperatur innerhalb von Gerätekästen/-schränken | - 25 bis + 70 °C |

Des Weiteren wurden Bereiche für die zu beachtende Luftfeuchtigkeit festgelegt:

- | | |
|--|--------------|
| • Relative Luftfeuchtigkeit | bis zu 100 % |
| • Relative Luftfeuchtigkeit Jahresmittelwert | 75 % |
| • Betauen und Vereisen sind möglich | |

Für das Projekt MoWag werden die klimatischen Bedingungen in Mitteleuropa zugrunde gelegt, die sich daraus ergebenden Anforderungen sind folgend beschrieben:

- Fahrzeuge sowie Komponenten sind für die maximal mögliche Sonneneinstrahlung in Mitteleuropa auszulegen. Entsprechend der Klasse R2 (hoch) ist von 1120 W/m² auszugehen.
- Die Auswirkung der UV-Strahlung auf Betriebsmittel, Teile und Komponenten, die der Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind, ist zu berücksichtigen.
- Die Beanspruchung durch Dauerregen bzw. in den Wintermonaten durch Flugschnee und Hagel muss berücksichtigt werden.
- Die Beanspruchung durch Streusalz bzw. Salzsole sind im Hinblick auf erweiterte Einsatzgebiete, z. B. im Bereich des ÖPNV, zu bewerten. Das bezieht sich insbesondere auf die konstruktiv verwendeten Materialien.
- Das Auftreten von einem hohen Anteil von Straßenstaub (Bereich ÖPNV – analog zu den Korrosionseinwirkungen), eisenhaltigem Abrieb und Staub im Gleisbereich ist bei der Konstruktion zu bewerten.

Aerodynamische Belastungen, welche während des Betriebs von Schienenfahrzeugen auftreten, werden in DIN EN 12663-1 „Bahnanwendungen - Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen - Teil 1: Lokomotiven und Personenfahrzeuge“ geregelt. Besondere aerodynamische Belastungen können unter folgenden Umständen entstehen:

- Zugbegegnungen bei hoher Geschwindigkeit
- Tunnelfahrten
- Starker Seitenwindeinfluss

AS 2.4: Ableitung der erforderlichen Werkstoff- und Technologieentwicklungen

Für das akustische Anforderungsprofil sind die Regelungen der TSI Fahrzeuge - Lärm (Anwendbare Technische Spezifikation für die Interoperabilität) zu beachten.

Im Projektverlauf kristallisierte sich heraus, dass eine Lösung in Metallschaum-Bauweise bevorzugt wird (vgl. AP 3: Konzepterstellung). Aus diesem Grund wurden folgende notwendige Technologie- und Werkstoffentwicklungen aus den Konzepten abgeleitet.

- Schäumen großflächiger SAS-Sandwichstrukturen (Stahl-Aluminiumschaum-Stahl) für Seitenwand (IWU und HMF als UA-Nehmer von Cideon)
- Beschichtung von großflächigen Aluminiumschaumplatten mit faserverstärktem Polyurethan (IWU und HMF als UA-Nehmer)
- Ausschäumen von Stahlprofilen
- Technologieentwicklung und Materialkennwertermittlung von faserverstärkten Polyurethanprofilen im Pultrusionsverfahren (IWU), welche sowohl die Aufgabe der Funktionsintegration als auch die der Kraft- und Lastleitung übernehmen.

2.1.3 AP 3: Konzepterstellung / Auslegung

Die Zielstellung in AP 3 war, einen ökonomisch sinnvollen Entwurf für neuartige Multi-Material-Module zu konzipieren und dabei die Zielsetzung der Massereduktion zu gewährleisten.

AS 3.1: Konzeptionelle Entwürfe für Multi-Material-Module des Wagenkastens

Gemeinsam mit dem Projektpartner CE arbeitete das Fh IWU an der Konzeption für neuartige Module in Multi-Material-Bauweise. Im Folgenden werden erste Konzepte kurz vorgestellt und deren Potenzial – bezogen auf das Wagenkastensegment (vgl. Abbildung 11 rechts) – abgeschätzt.

Abbildung 12 zeigt einen ersten Entwurf für den Zwischenboden des Doppelstockwagens. Eine erste FEM-Simulation wies nach, dass hier nicht alle Versteifungstreben gleich stark belastet werden. Im Zwischenboden werden lediglich die gelochten Querstrukturen und die längs verlaufenden U-Profile für die Lastaufnahme und -leitung zwingend benötigt; durch die Reduktion der Streben auf lasttragende Strukturen ist hier eine Masseersparnis von ca. 23 % (links: 91 kg, rechts: 70 kg) möglich. Ein ebenfalls großes Masseersparungspotenzial bietet die Bodenplatte mit ca. 19 % (hier nicht dargestellt; links: 53 kg, rechts: 43 kg), wenn der 15 mm dicke MDF-Boden durch einen innovativen, 20 mm dicken Sandwichverbund (Metallschaumkern und faserverstärkte Decklagen) ersetzt wird.

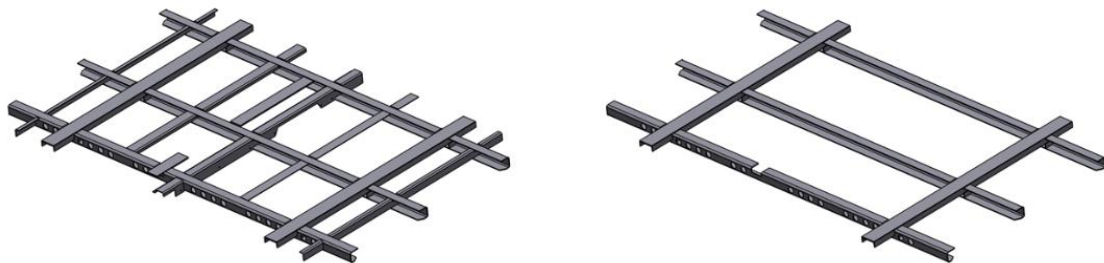


Abbildung 12: Zwischenboden (links: Ist-Stand; rechts: Konzept)

Abbildung 13 zeigt eine erste Optimierungsschleife des Untergestells. Da das Untergestell für den Großteil der Lastaufnahme verantwortlich ist, konnte hier nur ein geringes Masseersparungspotenzial von ca. 10 % nachgewiesen werden, indem nicht-lastführende Profile in ihren Wandstärken reduziert wurden. Vielversprechend war hier der Ansatz, lastführende Stahlprofile durch faserverstärkte Pultrusionsprofile zu substituieren.

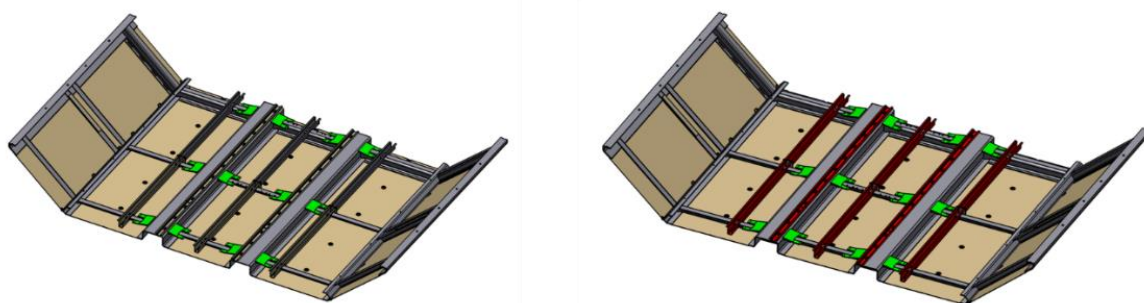


Abbildung 13: Untergestell (links: Ist-Stand; rechts: Konzept)

Das in Abbildung 14 (rechts) dargestellte Wagenkastensegment weist mehrere innovative Multi-Material-Bauweisen auf – die berechnete Masseersparung beträgt nach dem Entwurfsstand 57,6 kg bzw. 8,5 % und lag somit im Bereich des Projektziels (5 - 10 %). Die favorisierten (Einzel-)Konzepte wurden anschließend mit dem Ist-Stand der Referenzbaugruppe verglichen und die spezifischen Vorteile und Herausforderungen skizziert.

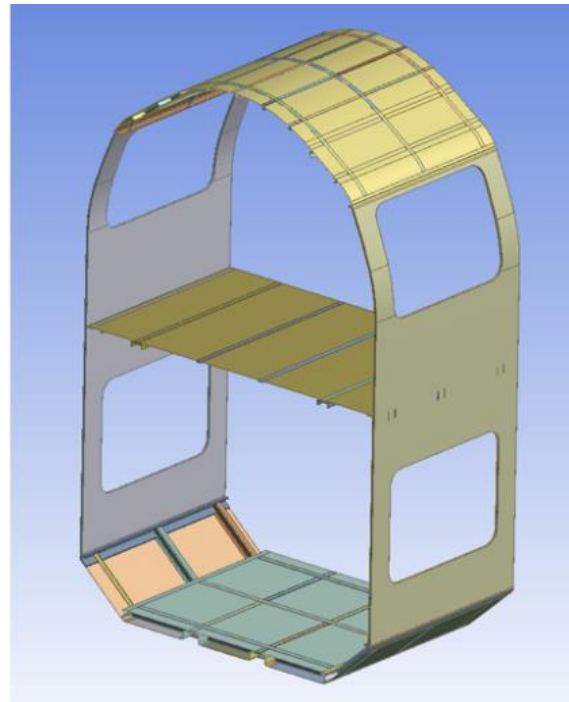
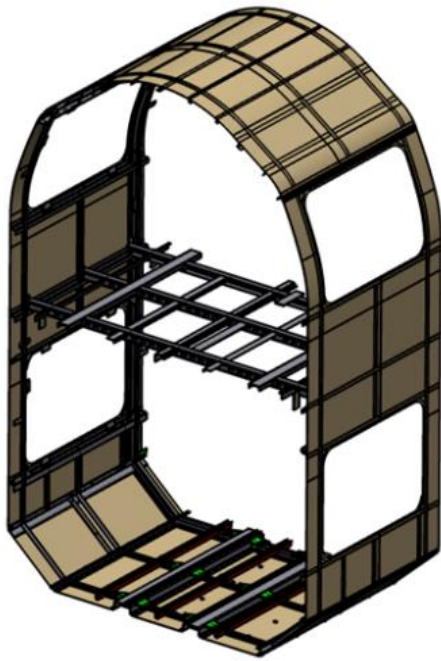


Abbildung 14: Konzeptionelle Entwürfe (links: Ist-Stand; rechts: Projektstand)

Seitenwand

Die Seitenwand eines Wagenkastens ist ein zentrales Element, an welches höchste Anforderungen gestellt werden (vgl. AS 2.1, 2.2 und 2.3). Das im Projekt „MoWag“ entwickelte Konzept sah vor, die Seitenwand in innovativer Sandwich-Bauweise auszuführen und dabei den Leichtbauwerkstoff Aluminiumschaum zu verwenden. Der Projektpartner IWU präferierte hierbei einen Aufbau als SAS (Stahldecklagen (1 mm) und Aluminiumschaumkern (17 mm)). Gegenüber dem Ist-Stand (2 mm Stahlbleche) verringert sich die Masse des eines Seitenwandsegments von 101 kg auf 93,4 kg (-7,5 %), da Aluminiumschaum lediglich eine Dichte von 0,6 g/cm³ besitzt. Durch den Aufbau als Sandwich konnten dabei aufgrund der höheren Widerstandsmomente alle auftretenden Lasten übertragen werden, ohne dass zusätzliche versteifende Spanten in Längs- und Querrichtung benötigt wurden – dies reduziert sowohl die Masse als auch den Montageaufwand bei der Fertigung deutlich. Lediglich im Bereich der Anbindungspunkte Seitenwand – Zwischenboden sowie Seitenwand – Boden werden Montagewinkel in die Seitenwandstruktur integriert (Abbildung 15).

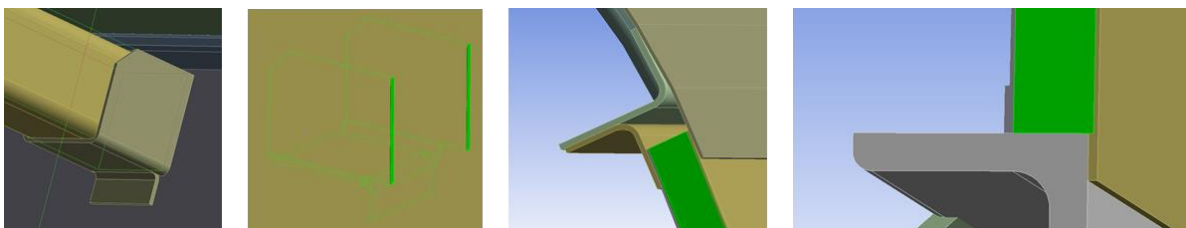


Abbildung 15: Konzeptstudie zur Anbindung weiterer Wagenkastenmodule an die Seitenwand

Zwischenboden

Der Zwischenboden trägt kaum zur Gesamtsteifigkeit des Wagenkastens bei, dementsprechend konnte die Anzahl der Anzahl der Versteifungen im Vergleich zum Ist-Stand deutlich reduziert werden (vgl. Abbildung 14), ohne dass ein Performanceverlust zu erwarten war. Die gelochten Querstreben blieben ebenso unverändert erhalten wie die längs verlaufenden U-Profile (beide Stahl), da diese für die Stabilität der Struktur zwingend benötigt werden. Weitere, längs verlaufende Profile, sollten als leichte, faserverstärkte Pultrusionsprofile ausgeführt werden, um die Auflagefläche der Bodenplatte zu erhöhen. Die Masse aller Stahlbauteile (ohne Schweißnähte) kann mit dieser Bauweise (Abbildung 16) bereits von 91 auf 70,2 kg gesenkt werden; mit den zusätzlich benötigten Pultrusionsprofilen (ca. 4 kg) bewirkt dies eine Massereduzierung von 18 %.

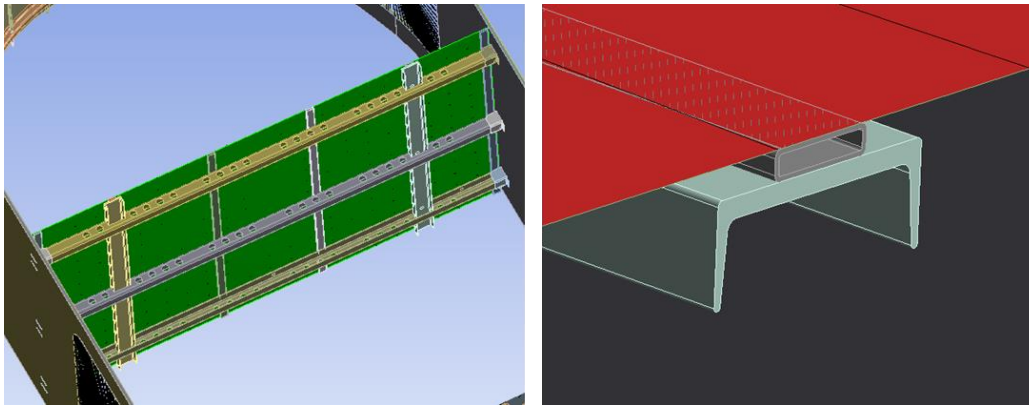


Abbildung 16: Konzept Zwischenboden (links: Konzept mit reduzierten Streben; rechts: Detailansicht U-Profile mit Pultrusionsprofilen)

Weiteres Masseinsparungspotenzial wurde für die Bodenplatte identifiziert, welche im Ist-Stand als 15 mm starke MDF-Platte ausgeführt ist (53 kg). Wird diese Platte als Sandwich (Aluminiumschaum mit faserverstärkter Decklage) ausgeführt, reduziert sich die Masse auf 38,5 kg (-27 %) bei sonst gleichbleibenden Randbedingungen (hier vor allem: Durchbiegung). Der neue Zwischenboden kann ohne Probleme an den Stahlunterbau mittels Nieten oder Schrauben befestigt werden. Zusammenfassend bietet der Konzeptstand des Zwischenbodens (112,7 kg) ein sehr hohes Masseinsparungspotenzial von knapp 22 % gegenüber dem Ist-Stand (144 kg).

Unterboden

Im Vergleich zum Zwischenboden bietet der Unterboden deutlich weniger Potenzial, um die Masse zu reduzieren. Grund hierfür ist, dass die Struktur des Unterbodens sehr stark zur Gesamtsteifigkeit des Wagenkastens beiträgt und der Ist-Zustand der Gesamtstruktur bereits sehr stark optimiert vorliegt. Durch die Verwendung ausgeschäumter Stahlprofile in Querrichtung könnte die Wandstärke dieser von 2 auf 1,5 mm reduziert werden. Die Masse des Stahlbaus reduziert sich damit um 4,5 kg bzw. 2,5 %. Hierbei werden jedoch noch zusätzliche Pultrusionsprofile für die Fußbodenlagerung benötigt (ca. 2,9 kg), wodurch sich die Gesamtmasse des Rohbaus um lediglich 1,6 kg bzw. 1 % verringert.

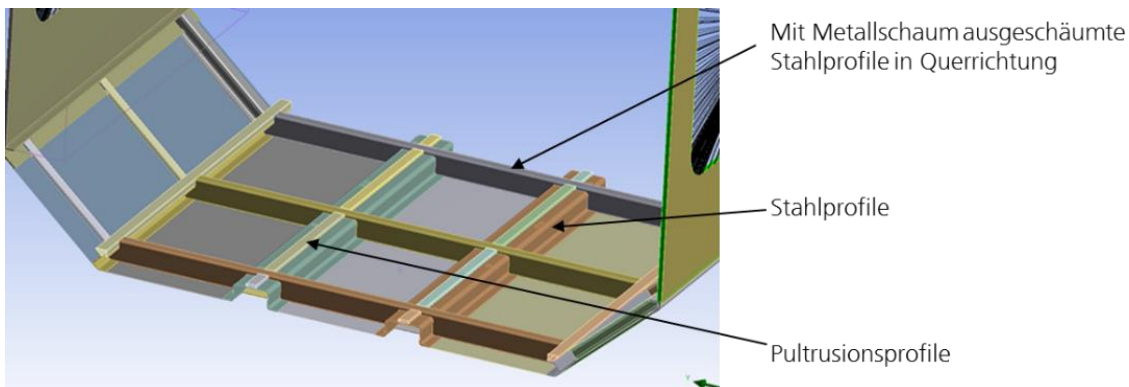


Abbildung 17: Konzept Untergestell

Größeres Potenzial bietet hier der Fußbodenaufbau, welcher im Ist-Stand als 15 mm starke MDF-Platte (37 kg) ausgeführt ist. Durch die Verwendung eines Zwischenbodens aus Metallschaum mit faserverstärkten Decklagen (27,5 kg) ergibt sich ein Masseinsparungspotenzial von 9,5 kg bzw. 26 %. Zusammenfassend bietet der Unterboden die Möglichkeit, durch innovative Bauweisen mit Hybridwerkstoffen 5 % Masse einzusparen.

AS 3.2: Erarbeitung der konstruktiven / funktionalen Möglichkeiten durch neue Bauweisen

Die Bearbeitung von AS 3.2 geschah parallel zu AS 3.1, 3.5 und AP 4, da sich Konzeption, Konstruktion und FEM gegenseitig stark beeinflussen. Wie unter AS 3.1 beschrieben und in den Abbildungen 12 – 17 zu erkennen, wurden konstruktiv-funktionale Möglichkeiten durch neue innovative Bauweisen konstruktiv erarbeitet. Hierbei war ein deutliches Masseinsparungspotenzial erkennbar.

AS 3.3: Werkstofftechnische Untersuchungen an Funktionsmustern

Ein Hauptforschungspunkt des Fraunhofer IWU im Verbundvorhaben MoWag war die Qualifizierung neuer FKV für die Anwendung im Schienenfahrzeugbau. Mit dem Versuchswerkzeug (vgl. Abbildung 26) wurden Funktionsmuster (Prüfplatten 300 mm x 2 mm) mit verschiedenen Harzsystemen hergestellt und in Zug- und Biegeversuchen deren mechanische Eigenschaften ermittelt.

Um die Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse sicherzustellen, wurde der Faservolumengehalt (FVG) bei allen hergestellten Platten derart eingestellt, dass er im Mittel über die gesamte Prüfplatte 69 % beträgt. Abbildung 18 links zeigt die Faserzuführung und -tränkung, Abbildung 18 rechts zeigt die pultrudierte Prüfplatte.

Untersucht wurden mehrere, für MoWag infrage kommende, Harzsysteme:

- Polyurethan (PU),
- Epoxid (EP),
- Vinylester (VE) und
- Ungesättigtes Polyesterharz (UP).



Abbildung 18: Herstellung von Prüfmustern (li: Fasertränkung und -einlauf; re: pultrudierte Prüfplatte)

Die Prüfplatten wurden zunächst an mehreren Stellen auf ihren tatsächlichen FVG hin untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 19 links dargestellt. Hier ist deutlich zu erkennen, dass der FVG je nach Entnahmeort der Platte (Rand oder Mitte) deutlich schwankt – in der Mitte der Prüfplatte war der FVG stets kleiner als am Rand. Die mikroskopierten Schliffbilder in Abbildung 19 rechts bestätigen dieses Phänomen.

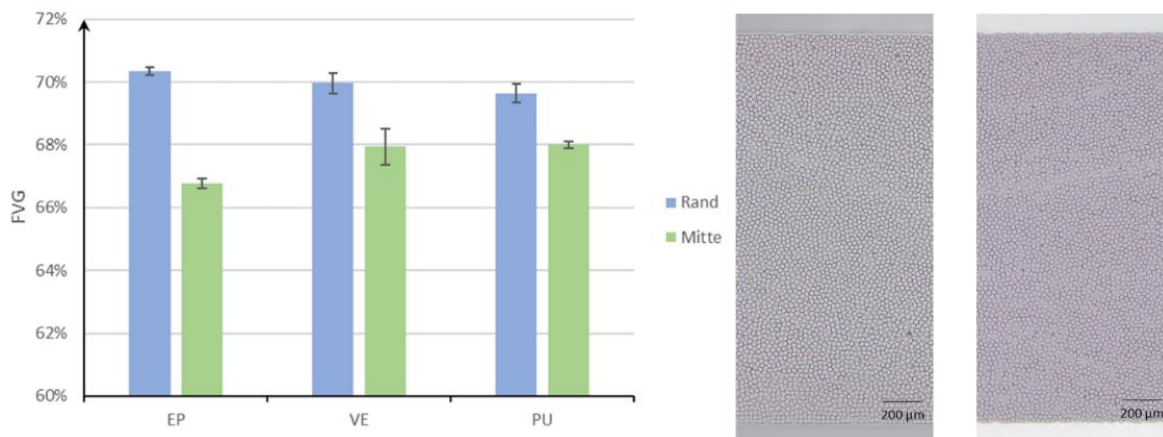


Abbildung 19: Faservolumengehalt der Prüfplatten an verschiedenen Entnahmestellen (li: Rand, re: Mitte)

Als nächstes wurde ein Versuchsplan (Tabelle 8) aufgestellt und die benötigten Proben mittels Wasserstrahlschneiden auf normierten Maße zugeschnitten. Auf die zugeschnittenen Zugproben wurden zusätzlich Aufleimer geklebt, damit die Kräfte bei der Prüfung optimal in die Proben eingeleitet werden konnten.

Tabelle 8: Versuchsplan

Werkstoff	Probenanzahl	Prüfung	Faserorientierung	Entnahmestort	Norm
Glas-EP	10	Zug	0°	Mitte	DIN EN ISO 527-5
	6	Zug		Rand	
	10	Zug	90°	Mitte	DIN EN ISO 14125
	10	Biegung	0°	Mitte	
	6	Biegung		Rand	
	10	Biegung	90°	Mitte	
16	Biegung	Rand			
Glas-VE	9	Zug	0°	Mitte	DIN EN ISO 527-5
	9	Zug		Rand	
	9	Biegung	0°	Mitte	DIN EN ISO 14125
	9	Biegung		Rand	
	9	Biegung	90°	Mitte	
	9	Biegung		Rand	
Glas-PU	10	Zug	0°	Mitte	DIN EN ISO 527-5
	6	Zug		Rand	
	10	Zug	90°	Mitte	DIN EN ISO 14125
	10	Biegung	0°	Mitte	
	6	Biegung		Rand	
	10	Biegung	90°	Mitte	
16	Biegung	Rand			

Zusätzlich zu dem in Tabelle 8 dargestellten Versuchsplan wurden weitere Werkstoffe untersucht: Ungesättigtes Polyesterharz (UP) sowie ein mit einer langsameren Geschwindigkeit pultrudiertes Epoxidharz (EP1). Abbildung 20 zeigt den Aufbau für den Zug- und Biegeversuch.



Abbildung 20: Werkstoffprüfung (li: Zugprüfung, re: 3-Punkt-Biegeversuch)

Da für jeden Zug- und Biegeversuch mindestens 6 Prüfungen durchgeführt wurden, konnten für die Ergebnisse Box-Plots erstellt werden, welche neben der direkten Vergleichbarkeit aller Werkstoffkombinationen auch statistische Merkmale (Mittelwert, Median, Varianz, Ausreißer) zeigen. In den folgenden Abbildungen 21 bis 24 sind die Ergebnisse der umfangreichen Werkstoffcharakterisierungen für alle fünf untersuchten Faser-Matrix-Kombinationen vergleichend dargestellt. Wie dem Versuchsplan in Tabelle 8 zu entnehmen ist, wurden für alle Werkstoffkombinationen Zug- und Biegeversuche mit Faserorientierungen in 0°- sowie in 90°-Richtung durchgeführt und dabei Steifigkeits- und Festigkeitskennwerte ermittelt, welche für die FEM-Berechnung gebraucht werden.

In Abbildung 21 ist deutlich zu sehen, dass der ermittelte Zug-E-Modul der Proben in Faserrichtung deutlich mit dem ermittelten FVG korreliert. Die Rand-Probekörper, welche einen höheren FVG aufwiesen, zeigten auch eine höhere Steifigkeit. Für die Auslegung von Struktur-Bauteilen im Schienenfahrzeugbau spielt die Steifigkeit eine entscheidende Rolle, da mit diesem Kennwert maximal zulässige Verformungen bei Belastung eingestellt werden können.

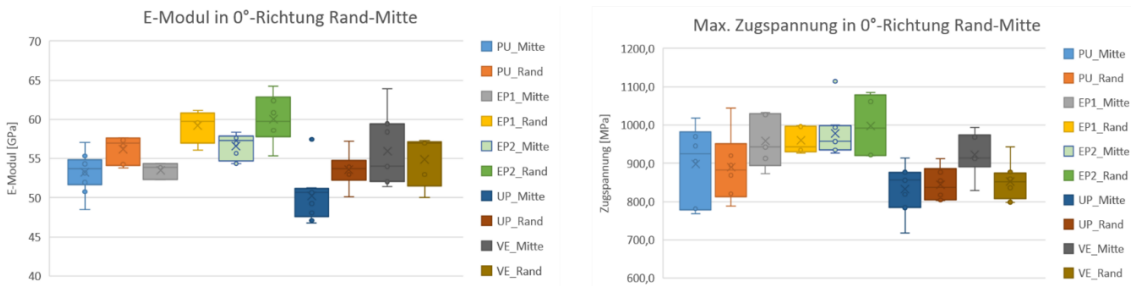


Abbildung 21: Zugsteifigkeit (links) und -festigkeit in 0°-Richtung

Abbildung 22 zeigt sehr deutlich, dass Bauteile aus FKV bei Zugbelastung quer zur Faserrichtung deutlich geringere Steifigkeits- und Festigkeitskennwerte erreichen. Bei der Auslegung von Strukturbauteilen im Schienenfahrzeugbau aus FKV müssen diese Anisotropie-Eigenschaften zwingend beachtet werden. Eine Kraftübertragung quer zur Faserrichtung ist zu vermeiden. In den Zugversuchen zeigte sich, dass Epoxidharze bei gleicher Faserverstärkung die besten mechanischen Eigenschaften aufweisen. Die deutlich günstigeren UP-Harze zeigen signifikant schlechtere Steifigkeits- und Festigkeitswerte.

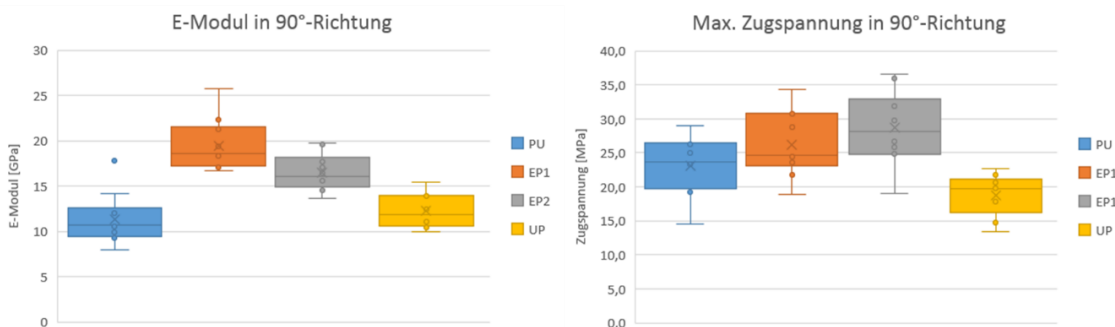


Abbildung 22: Zugsteifigkeit (links) und -festigkeit in 90°-Richtung

In Abbildung 23 und Abbildung 24 sind analog zu den Zugversuchen die Steifigkeits- und Festigkeitskennwerte der untersuchten Werkstoffe bei Biegebelastung dargestellt. In Faserrichtung zeigen Epoxidharze wieder höchste Steifigkeits- und Festigkeitskennwerte; gefolgt von faserverstärkten PU- und VE-Kunststoffen. Die im Verhältnis dazu schlechten Werte des UP-Harzes werden im Biegeversuch besonders deutlich.

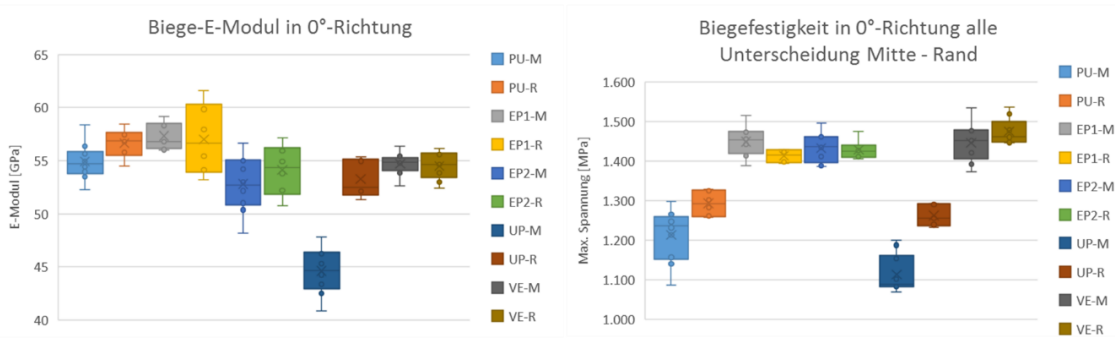


Abbildung 23: Biegesteifigkeit (links) und -festigkeit in 0°-Richtung (R... Randbereich; M... Mitte)

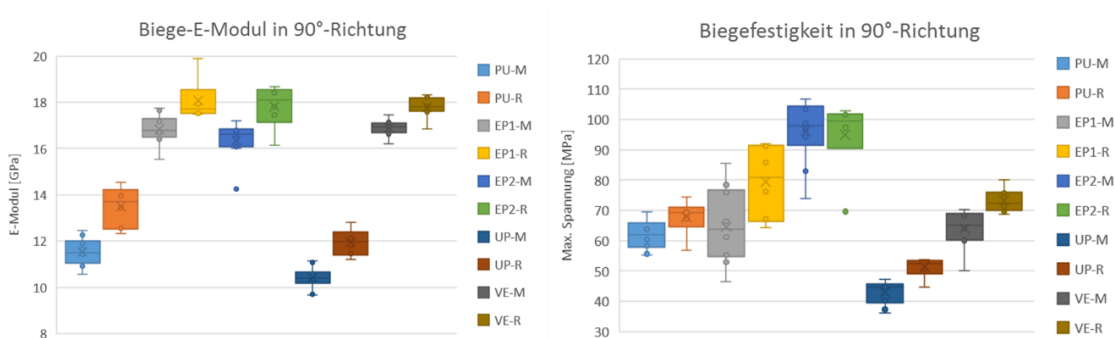


Abbildung 24: Biegesteifigkeit (links) und -festigkeit in 90°-Richtung (R... Randbereich; M... Mitte)

Bei Biegeuntersuchungen quer zur Faserrichtung spielt vor allem die Festigkeit der Matrix sowie die Faser-Matrix-Haftung eine entscheidende Rolle. Hier zeigte sich, dass vor allem der Biege-E-Modul des präferierten PU-Systems geringere Werte aufweist. Strukturbauteile, welche mit PU-Matrix ausgeführt werden, benötigen deshalb eine größere Wanddicke.

Da der Brandschutz für alle Komponenten im Schienenfahrzeugbau eine sehr hohe Relevanz hat, führte das Fraunhofer IWU an drei ausgewählten FKV-Proben (FVG 69 %) Branduntersuchungen nach ISO 5660-1 durch.

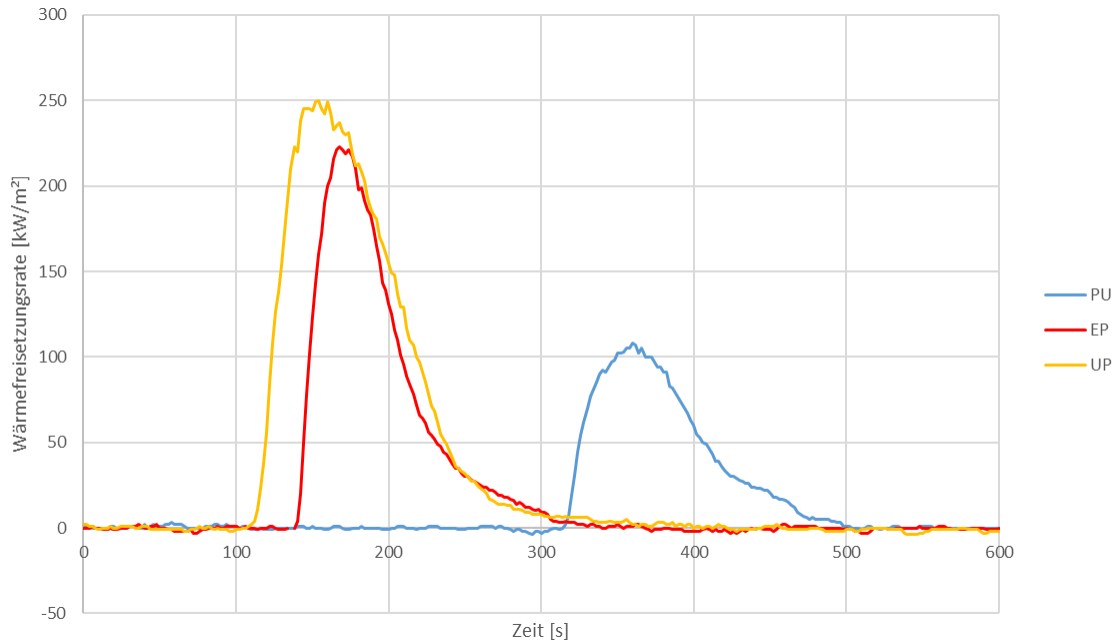


Abbildung 25: Branduntersuchungen nach DIN 5660-1

Wie in Abbildung 25 zu sehen, erreicht das flammgehemmte Polyurethanharz deutlich geringere Wärmefreisetzungsraten als die faserverstärkten EP- und UP-Proben. Dies lässt zwar keinen unmittelbaren Rückschluss zu, ob die späteren Bauteile auch die strenge Zulassungsnorm DIN EN ISO 45545 erfüllen, gibt aber eine deutliche Tendenz dahin, dass dies mit den PU-Harz am wahrscheinlichsten ist.

Mit den in Tabelle 9 dargelegten Materialtests wurden alle Werkstofftests zum Erreichen des Projektziels abgeschlossen. Die untersuchten Werkstoffe sind für den Einsatz im Schienenfahrzeugbau geeignet.

Tabelle 9: In Materialtests ermittelte Kennwerte der projektrelevanten Werkstoffe

	Dichte [g/cm ³]	E-Modul [GPa]			Querkontraktions- zahl ν [-]			Schubmodul G [GPa]		
		x	y	z	yx	yz	xz	yx	yz	xz
Aluminium- schaum mit fa- serverstärkten Decklagen	2,0	12,75	12,75	1,5	0,28	0,32	0,32	4,83	0,48	0,48
Aluminium- schaum SAS	0,6	4,95	4,95	4,95	0,33	0,33	0,33	1,86	1,86	1,86
Stahl	7,85	200	200	200	0,3	0,3	0,3	76,9	76,9	76,9

AS 3.4: Auswahl Vorzugsvariante unter Berücksichtigung des Bauraums, der Designvorgaben und Schnittstellen

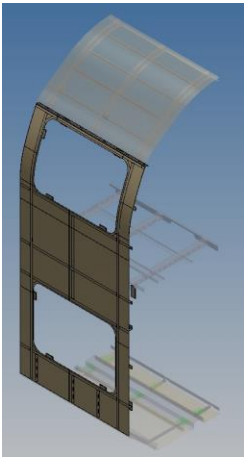
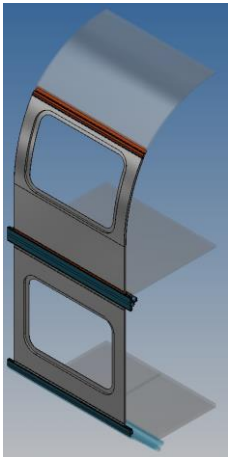
Im Projektverlauf verfolgten die Projektpartner IWU und CE in enger Absprache zwei eigene Konzeptlinien. CE entwickelte Konzepte auf Basis von AAS (Aluminium-Aluminiumschaum-Sandwich), das Fraunhofer IWU auf Basis von SAS (Stahl-Aluminiumschaum-Sandwich). Beide Sandwichvarianten unterscheiden sich dabei in der Decklage (Aluminium bzw. Stahl).


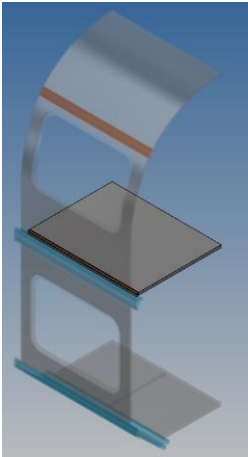
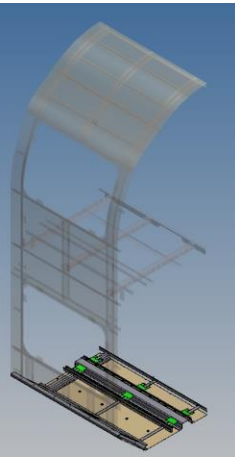
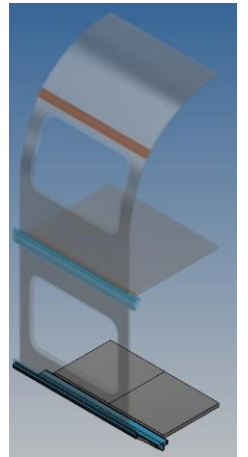
Die Berechnung der beiden Konzepte mittels FEM zeigte, dass beide Konzepte prinzipiell funktionieren. Die Belastungen, welche ein Wagenkasten aus diesen innovativen Sandwichwerkstoffen im Betrieb erfährt, können in beiden Bauweisen ertragen werden. Beim Vergleich beider Konzepte zeigte sich, dass der Werkstoff AAS in der späteren Fertigung des Demonstrators (bzw. bei einer zukünftigen Übertragung auf eine Serienanwendung) Vorteile hat. Durch die dickeren Deckbleche des AAS-Verbundes (ca. 1,5 - 2 mm) lässt sich dieser Werkstoff deutlich besser schweißen. Beim Werkstoff SAS beträgt die optimale Deckblechdicke 0,5 - 1 mm. Die Deckbleche müssten für einen sicheren Schweißvorgang dicker ausgelegt werden, wodurch das hohe Leichtbaupotenzial verloren ginge. Das Konzept des IWU für den Zwischenboden (vgl. Abbildung 27 und Abbildung 37) war die Vorzugsvariante im Hinblick auf Festigkeitseigenschaften, Fertigungsaufwand sowie Leichtbau.

Tabelle 10 zeigt die Gegenüberstellung wesentlicher Wagenmodule der Vorzugsvariante verglichen mit dem IST-Stand der Referenzbaugruppe. Nicht in der Massebilanzierung berücksichtigt sind Fügestoffe (Klebstoff, Schrauben etc.). Nach dem Konzeptstand des Demonstratormoduls ($m = 291$ kg) zeigte sich ein deutliches Masseeinsparungspotenzial von ca. 22 % gegenüber dem IST-Stand (374 kg).

Mit einem zeitlichen Verzug von 2 Monaten ggü. dem Zeitplan zur Antragstellung wurde der Meilenstein 1 erfüllt. Meilensteinkriterium 1 (Innovative Konzepte mit Multi-Material-Verbundwerkstoff zeigen Potenzial zur Masseeinsparung und erweitern den Stand der Technik) und 2 (Funktionsmustertests zeigen Eignung des innovativen Werkstoffverbundes für Strukturbauteile in Schienenfahrzeugen) wurden erfüllt.

Tabelle 10: Massevergleich Referenzbaugruppe und Konzeptstand MoWag

	IST-Stand	Vorzugskonzept MoWag
Seitenwandmodul (CE)		
m_{IST}	=	107 kg
m_{MoWag}	=	97 kg
Δm	=	10 kg ($\cong 9 \%$)
<p>Durch innovative Bauweisen kann das Seitenwandmodul bei gleicher Steifigkeit um 9 % leichter ausgelegt werden. Die Verwendung eines Sandwichmaterials aus Aluminiumdecklagen und Aluminiumschaumkern erfüllt dabei alle mechanischen Anforderungen. Unter Umständen muss noch eine thermische Isolierung eingefügt werden.</p>		
		

<p>Zwischenboden (IWU)</p> <p> $m_{IST} = 96 \text{ kg}$ $m_{MoWag} = 64 \text{ kg}$ $\Delta m = 32 \text{ kg} (\cong 26 \%)$ </p> <p>Wird der Zwischenboden als integrale Sandwich-Platte ausgeführt, so ergibt sich ein Masseinsparungspotenzial von ca. 26 %. Der Zwischenboden wurde dabei ohne metallische Stützstruktur ausgeführt (vgl. AS 3.5). Die verwendete Sandwichplatte (faserverstärkte Decklagen und Aluminiumschaumkern) besitzt bei erhöhter Steifigkeit eine deutlich geringere Dichte als die bisher verwendete Holzplatten. Pultrudierte Kunststoffprofile sorgen für die nötige Unterstützung.</p>		
<p>Untergestellmodul (CE)</p> <p> $m_{IST} = 129 \text{ kg}$ $m_{MoWag} = 81 \text{ kg}$ $\Delta m = 48 \text{ kg} (\cong 37 \%)$ </p> <p>Auch das Untergestellmodul wurde konzeptmäßig als integrale Bodenplatte ausgeführt. Ähnlich dem Zwischenbodenkonzept kann eine Sandwichplatte alle im Betrieb auftretenden Lasten derart aufnehmen, dass ein Masseinsparungspotenzial von 37 % erreicht werden kann, ohne dass mechanische Eigenschaften darunter leiden.</p>		

AS 3.5: Konstruktive Umsetzung / Detaillierung des ausgewählten Entwurfs / Konstruktion Versuchswerkzeug Pultrusion

Für das Fraunhofer IWU stand zunächst die konstruktive Umsetzung des Versuchswerkzeugs im Vordergrund. Mit diesem Werkzeug sollen in AS 3.3 Platten (Querschnitt 300 mm x 2 mm) im Pultrusionsverfahren hergestellt werden, um wichtige Materialkennwerte für die Simulation in AP 4 zu ermitteln. Abbildung 26 zeigt das Pultrusionswerkzeugsystem bestehend aus einem zweiteiligen Werkzeug (links) und einer damit verschraubten zweiteiligen Injektionsbox (rechts). Die Injektionsbox besitzt je 8 Angusspunkte auf Ober- und Unterseite, wodurch eine optimale Fasertränkung erreicht werden soll.

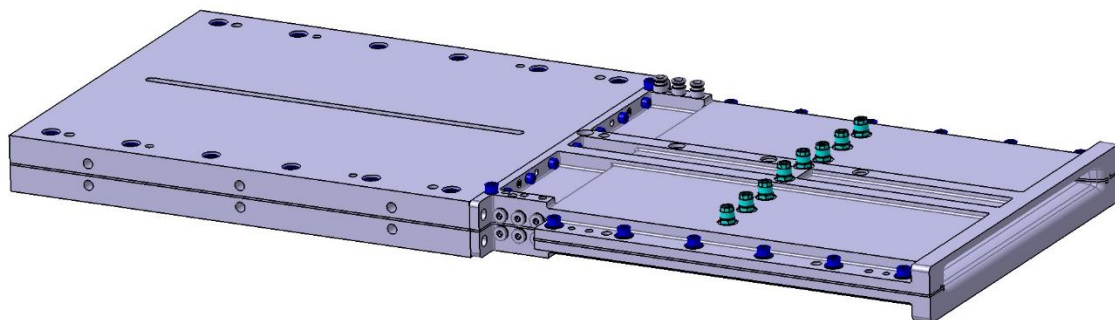


Abbildung 26: Pultrusionswerkzeugsystem (links: Werkzeug, rechts: Injektionsbox)

Nach der Auswahl der Vorzugskonzepte (vgl. Tabelle 10) für die Baugruppen Seitenwand, Zwischenboden und Untergestell wurden in enger Zusammenarbeit mit CE die ausgewählten

Entwürfe detailliert, so dass im AP 4 FEM-Berechnungen durchgeführt werden konnten. Der Schwerpunkt des IWU lag in der Detaillierung des Zwischenbodens. Dabei wurden mehrere AS parallel bearbeitet und dadurch die Vorzugslösung iterativ verfeinert: Jedes entwickelte Konzept (AS 3.2) wurde konstruktiv detailliert (AS 3.5), anschließend in ein vernetzungsfähiges Modell überführt (AS 4.1), bereinigt und modelliert (AS 4.2), anschließend berechnet (AS 4.3) und schließlich durch Material- oder Geometrieadjustierungen optimiert (AS 4.4). Abbildung 27 zeigt am Beispiel des Zwischenbodens 3 Evolutionsstufen von der Ausgangssituation in Stahlprofilbauweise (Abbildung 27 links) über eine optimierte Mischbauweise (Stahl- und Kunststoffprofile; Abbildung 27 mittig) hin zu einer Struktur ganz ohne metallischer Stützstruktur (Abbildung 27 rechts).

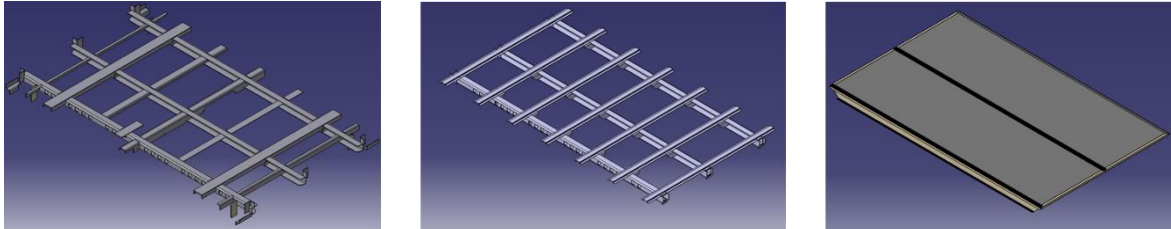


Abbildung 27: Evolutionsstufen der Konzeptdetaillierung „Zwischenboden“

Die Vorzugslösung (Abbildung 27 rechts) wird unter AS 4.5 näher beschrieben.

2.1.4 AP 4: Modellierung / Simulation

AP 4 war der Hauptbestandteil der geförderten Projektarbeit des Fh IWU. In diesem AP erfolgte eine iterative Anpassung der Konstruktion mit Hilfe umfangreicher FEM-Berechnungen unter Beachtung der

AS 4.1: Geometrieaufbereitung zur Erstellung eines vernetzungsfähigen Modells

Zu Beginn des AP 4 stand zunächst die Geometrieaufbereitung des Wagenkastenmodells an. Dafür lieferte der Projektpartner CE ein CAD-Modell eines Wagens, welcher im Projekt MoWag als Referenz diente. Zwar wurde in diesem Projekt nur ein kleiner Ausschnitt des Wagenkastens als Demonstrator betrachtet, jedoch ist es notwendig, dass der komplette Wagen mit allen Lasten modelliert wird, um die korrekten Schnittkräfte des Demonstrators erfassen zu können. Da die Projektpartner CE und IWU mit zwei unterschiedlichen FEM-Programmen arbeiteten, mussten beide Modelle aneinander angepasst werden. Aus diesem Grund war AS 4.1 deutlich umfangreicher als zur Antragstellung geplant. Die Integration von Ersatzmassen (Fenster, Türen, Kühlaggregate, etc.) erfolgte nach Vorgaben von CE (Abbildung 28).

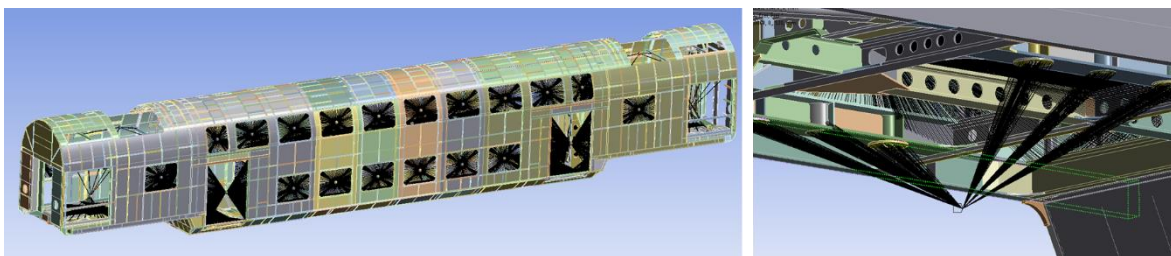


Abbildung 28: Simulationsmodell (links: kompletter Wagenkasten; rechts: Lastenleitung)

AS 4.2: Modellierung des bereinigten Entwurfs

In AS 4.2 erfolgte die Modellierung eines Modells aus den CAD-Daten. Abbildung 29 links zeigt das vernetzte Modell des kompletten Wagenkastens mit mehr als 4.000.000 Knoten. Das Modell liegt dabei bereits in optimierter Form vor, indem bei komplexen Geometrien Vereinfachungen modelliert werden. Abbildung 29 rechts zeigt die angenommene Masseverteilung in dem Wagen (grün: 7,85 g/cm³, gelb: 24 g/cm³, rot: 25 g/cm³), wie sie von CE vorgegeben wurden. Die ungewöhnlichen Dichten beinhalten dabei bereits Massen für Anbauteile, Aggregate und Fahrgäste.

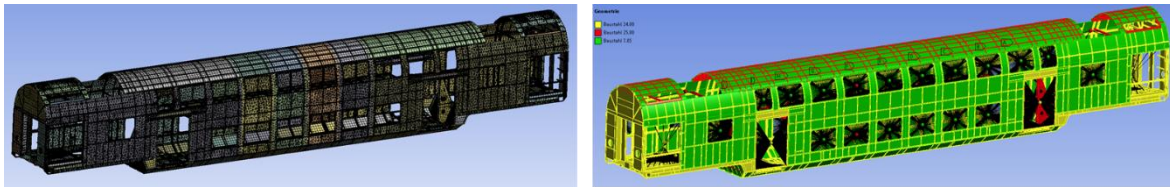


Abbildung 29: Modellierung des Wagenkastens (links: Vernetztes Modell; rechts: Materialdichten)

Die in AS 3.1 und 3.2 entwickelten und konstruktiv umgesetzten Konzepte wurden in der durchgeführten FEM-Berechnung nur in den mittleren 4 Segmenten des Wagenkastens berechnet und ausgewertet, da die Komplexität des Modells andernfalls exponentiell angestiegen wäre und die Berechnungen mit den Ressourcen des Projekts nicht umsetzbar gewesen wären.

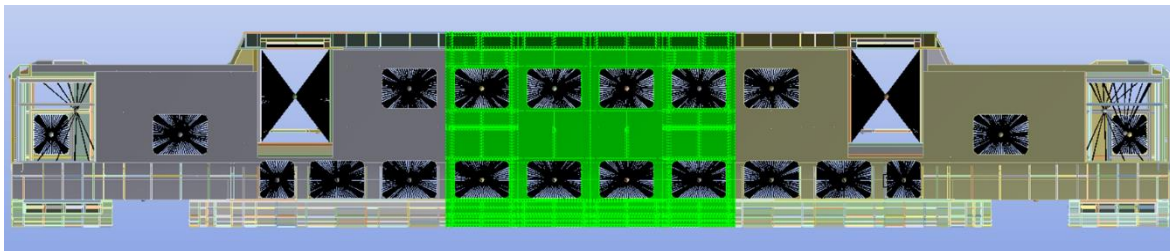


Abbildung 30: Konzeptstudien mittels FEM

AS 4.3: Berechnung mehrerer Varianten und iterative Anpassung

AS 4.3 war zentraler FuE-Schwerpunkt der Projektpartner CE und IWU. In aufwändigen Berechnungen wurden die unterschiedlichen Konzepte mittels FEM berechnet und sowohl untereinander als auch mit dem IST-Stand abgeglichen. In mehreren Iterationsschleifen wurden somit die unter AS 3.4 und AS 4.5 beschriebenen Vorzugsvarianten bestimmt. Für den Schienenfahrzeugbau musste dabei für insgesamt 8 Lastfälle eine Berechnung durchgeführt werden.

Tabelle 11 fasst alle für die Berechnung relevanten Lastfälle und die dabei resultierenden Kräfte, Drücke und Beschleunigungen zusammen, wobei m_1 der Grundmasse des Wagenkastens inkl. Fenstern, Türen, Aggregaten und Innenausbau entspricht. m_4 steht für die maximale Zuladung, wenn alle Stehplätze belegt sind (+20.202 kg).

Tabelle 11: Berechnete Lastfälle

Lastfall	Beschreibung	Masse	a_z [g]	F_x [kN]	p [Pa]
11-01	Druckkraft auf Puffer (entsprechend Tabelle 2 EN12663-1)	m_1+m_4	-1,00	-2000	
11-02		m_1	-1,00	-2000	
12-01	Zugkraft an der Kupplungsbefestigung (entsprechend Tabelle 5 EN12663-1)	m_1+m_4	-1,00	1000	
12-02		m_1	-1,00	1000	
13-00	Maximales Betriebsgewicht (entsprechend Tabelle 9 EN12663-1)	m_1+m_4	-1,30		
14-01	Diagonale Druckkraft auf die Puffer (entsprechend Tabelle 4 EN12663-1)	m_1+m_4	-1,00	-500	
14-02		m_1	-1,00	-500	
16-01	Überdruck	m_1	-1,00		2500
16-02	Unterdruck	m_1	-1,00		-2500

Die in AS 3.1 entwickelten Konzepte wurden anschließend in die FEM-Umgebung ANSYS geladen und mit dem Ist-Stand bei den verschiedenen Lastfällen verglichen. Abbildung 31 zeigt den Vergleich des besonders kritischen Lastfalls 13-00 (hier: überhöhte Darstellung der Durchbiegung). Es ist zu erkennen, dass die Konzepte aus AS 3.1 eine leicht geringere Durchbiegung zeigen als der Ist-Stand. Ähnliche Ergebnisse zeigen die Berechnungen für alle anderen Lastfälle.

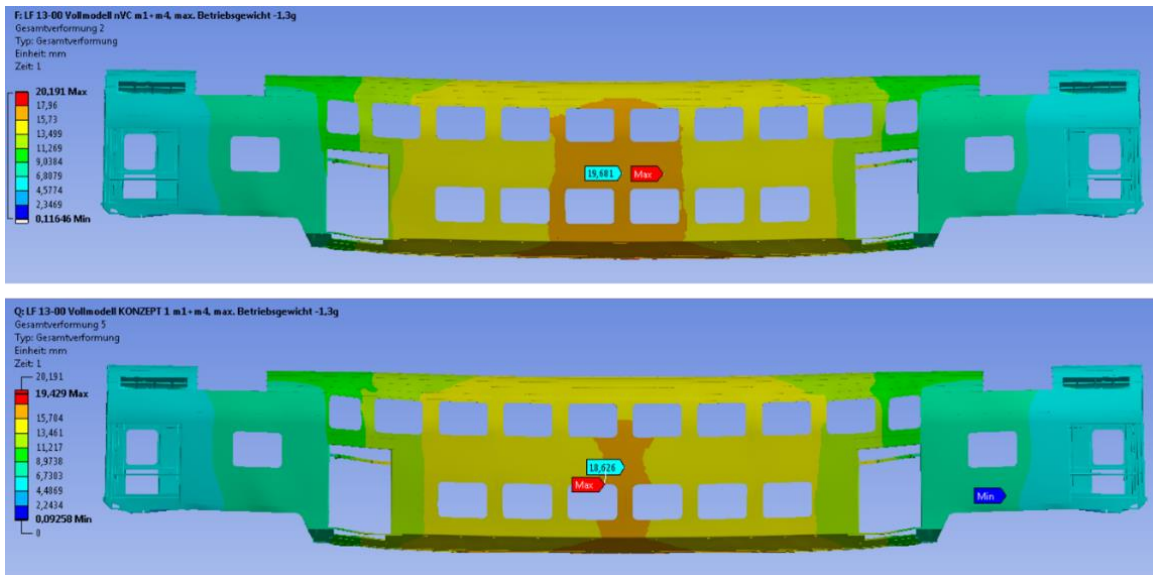


Abbildung 31: Lastfall 13-00: IST-Stand (oben); Konzeptstand (unten)

Die Konzepte aus AS 3.1 weisen somit eine deutlich geringere Masse (-8,5 %) auf und besitzen dabei leicht bessere mechanische Eigenschaften.

Zwischenboden

Wie bereits in Abbildung 27 dargestellt, wurden alle Evolutionsstufen des Zwischenbodens berechnet und iterativ optimiert. Tabelle 12 zeigt die vergleichenden FEM-Berechnungsergebnisse zweier Entwicklungsstufen des Zwischenbodens für den besonders kritischen Lastfall 13-00 (volle Beladung, Überlastfall).

Tabelle 12: Vergleich zweier Konzepte des Zwischenbodens mittels FEM

	Konzept A (Stahl-Kunststoff-Mischbauweise)	Konzept B (ohne metallische Stützstruktur)
Obere Decklage		
Kern		
Untere Decklage		

Konzept A (vgl. Abbildung 27 mittig) steht dabei für eine Mischbauweise des Untergestells aus Stahl- und Pultrusionsprofilen. Dargestellt ist hier der Spannungsverlauf im darauf befestigten Sandwichwerkstoff (unterschieden nach oberer und unterer Decklage sowie dem Kernwerkstoff aus Aluminiumschaum).

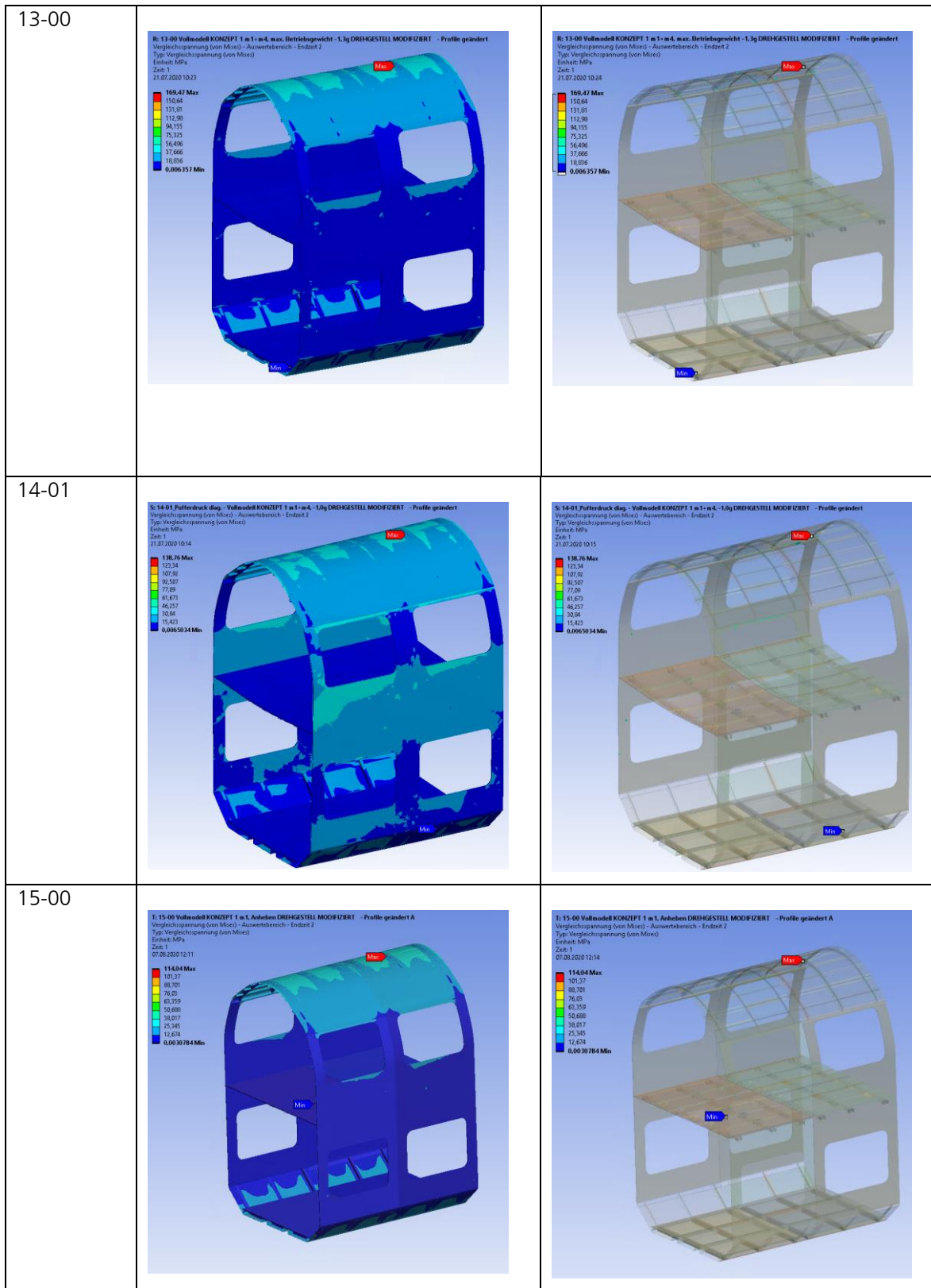
Konzept B (vgl. Abbildung 27 rechts) zeigt die Berechnungsergebnisse für die Vorzugsvariante, welche komplett ohne eine metallische Stützstruktur auskommt. Die Spannungen liegen bei diesem Konzept zwar höher als bei Konzept A, jedoch sind die zu erwartenden maximalen Spannungen im Bereich von 18 MPa im absolut unkritischen Bereich. Der Großteil der Spannungen wird durch ein Pultrusionsprofil (Demonstratorbauteil, vgl. Berechnungen in Tabelle 14 und CAD in Abbildung 38) aufgenommen. Konzept B ist aus leichtbautechnischer Betrachtung gegenüber Konzept A zu bevorzugen.

Simulation Füge- bzw. Anbindungskonzept

Die Berechnung des Füge- und Anbindungskonzepts für den innovativen Zwischenboden an die Tragstruktur des Wagenkastens ist in Tabelle 13 exemplarisch für 5 Lastfälle dargestellt.

Tabelle 13: FEM-Berechnungen für das Füge- und Anbindungskonzept

Lastfall	Spannungsverlauf	
11-01		
12-01		



Details zum Füge- und Anbindungskonzept werden unter AS 5.3 beschrieben. In Abbildung 32 ist der Spannungs- und Dehnungsverlauf der Anbindung des Zwischenbodens an die Seitenwand dargestellt (vgl. auch Abbildung 46). Abbildung 32 oben zeigt einen angeschweißten Winkel (Variante 1) unter Vollast, Abbildung 32 unten einen durch die Seitenwand gesteckten und verschweißten Winkel (Variante 2). Variante 2 ist aufgrund der besseren Spannungsverläufe und der geringeren Durchbiegung zu bevorzugen.

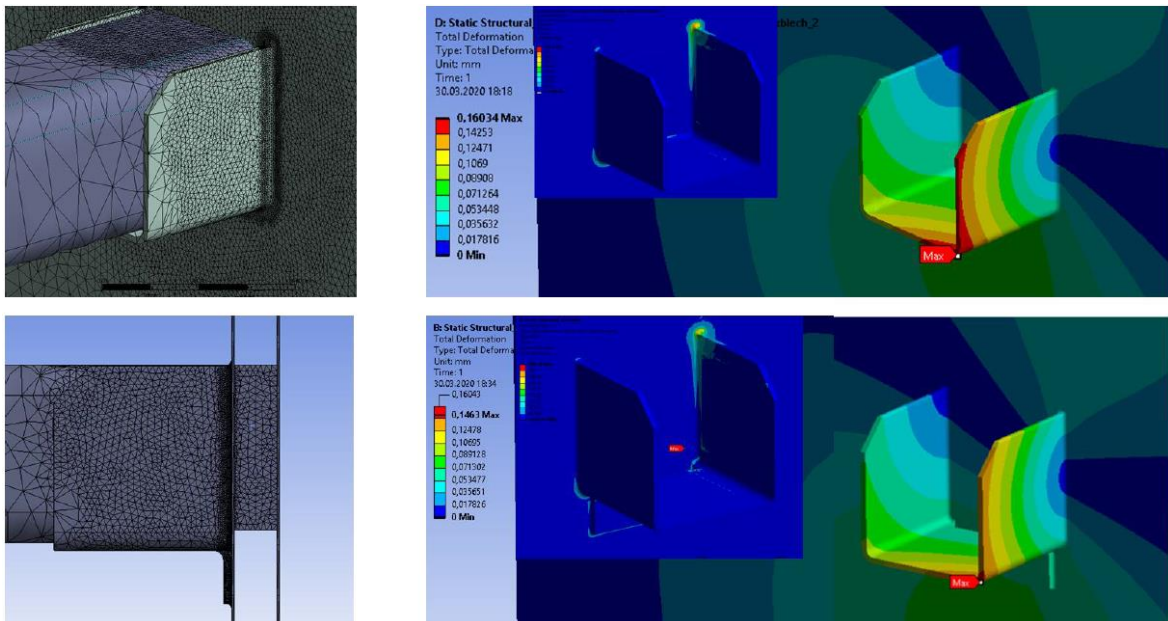


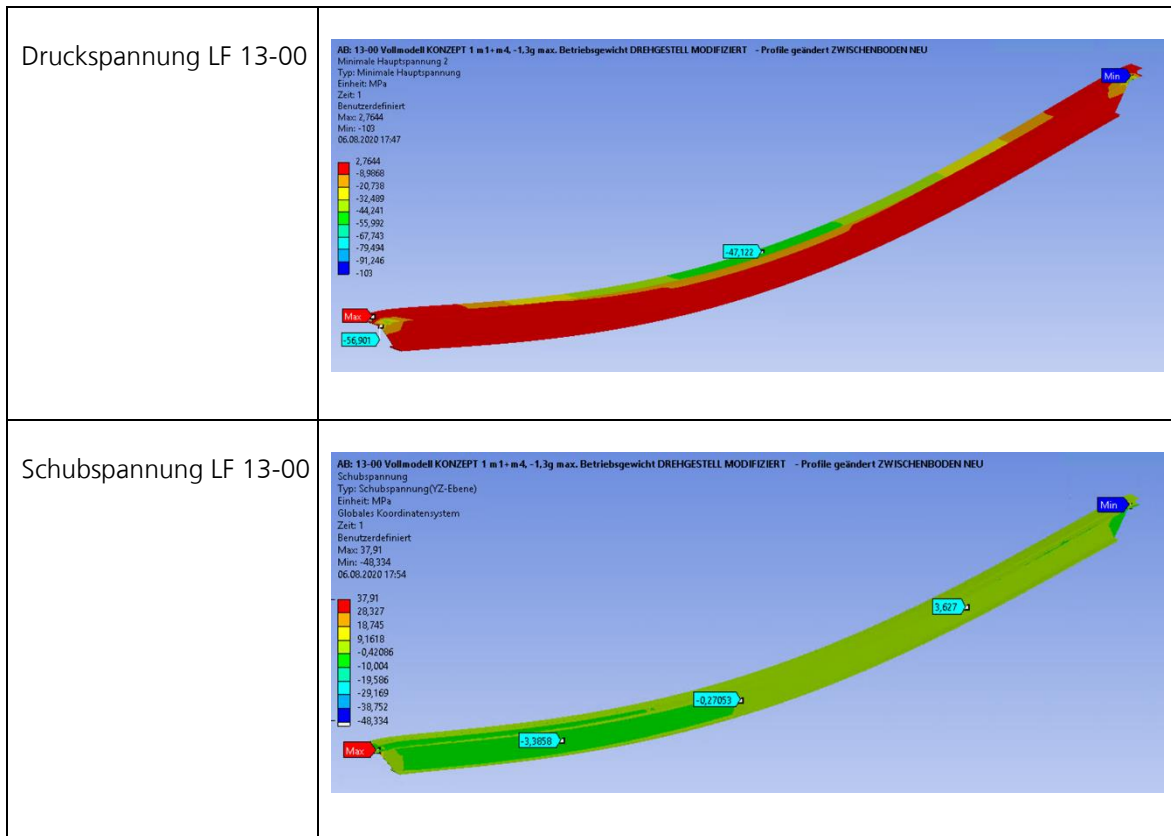
Abbildung 32: Detailberechnung Anbindungskonzept

Simulation Demonstratorbauteil

In Tabelle 14 sind die FEM-Berechnungen der FKV-Stützstruktur exemplarisch für den LF 13-00 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die zu erwartenden Spannungen mit unter 100 MPa im unkritischen Bereich liegen. Die zu erwartenden maximale Durchbiegung (ca. 18 mm) bei Vollast ist ebenfalls als unkritisch zu bewerten.

Tabelle 14: FEM-Berechnung der Stützstruktur aus FKV

Belastungsart	FEM
Durchbiegung LF 13-00	
Zugspannung LF 13-00	



Simulation im Gesamtfahrzeug

Die FEM-Berechnungsergebnisse des kompletten Wagenkastens sind in Abbildung 33 dargestellt. Die Verformungen sind dabei auf ähnlichem Niveau wie beim IST-Stand.

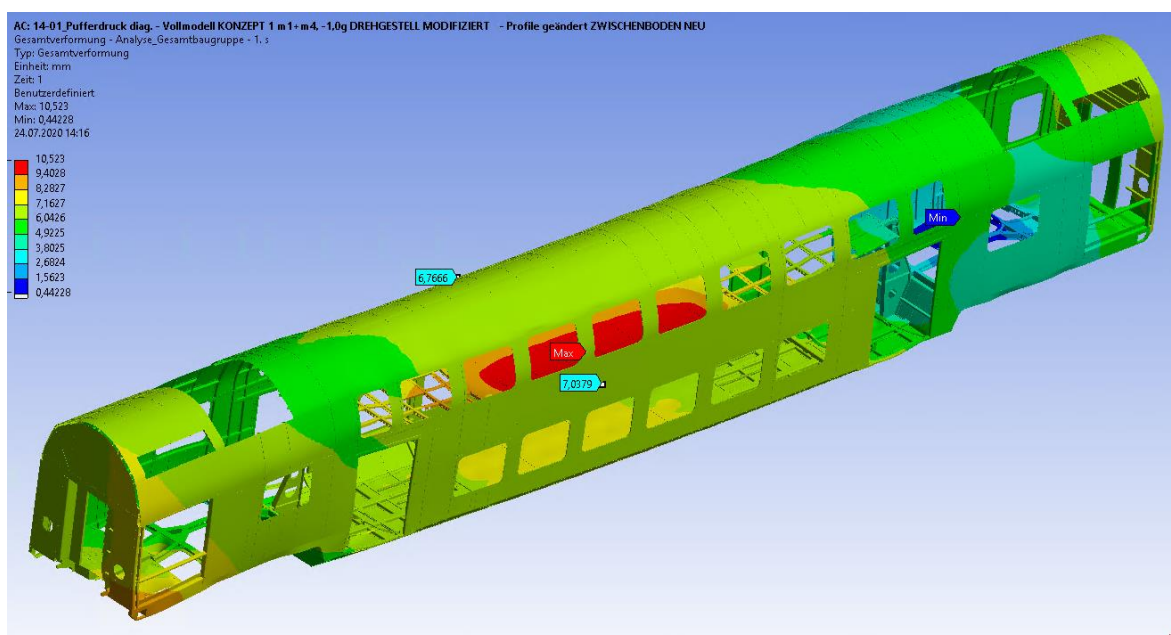


Abbildung 33: Darstellung der FEM-Ergebnisse für den kompletten Wagenkasten

Anschließend erfolgte die Optimierung des IWU-Demonstrators, indem der Lagenaufbau an die zu erwartenden Randbedingungen angepasst wurde.

Durch eine umfangreiche Parameter-Einflussanalyse konnte das IWU seinen Demonstrator optimal auslegen. Abbildung 34 zeigt einen kleinen Ausschnitt der durchgeführten Analyse.

Dicken										FEM-Ergebnisse										Halbzeuge		Stegdicken					
Optimierungslauf	Itd. Nr.	RB erfüllt?	erkannte Duplicate	carbon UD Druckgurt	carbon UD Zuggurt	glass UD Deckschicht	quad 0°	quad 45°	quad 90°	triax 0°	triax 45°	IR LS1	IR LS2	Verformung LS1	Verformung LS2	Masse [t]	Masse [kg]	IR LS1 x Masse	Favoriten	quad	triax	Druckgurt	Zuggurt	Mittellagert	Schubsteg	Standardabweichung Stegdicken	Dickendifferenz Zug-Druck-Gurt
1	1	true		1	3	0,4	0,071	0,213	0,037	0,142	0,213	0,74	1,98	-5,99	-7,97	0,00	1,53	1,14		0,534	0,568	1,934	3,934	1,868	3,004	0,98	2,0
1	2	true		5	4	0,3	0,213	0,142	0,071	0,213	0,071	0,86	2,09	-3,28	-5,12	0,00	1,79	1,54		0,568	0,355	5,868	4,868	1,736	2,446	1,96	-1,0
1	3	true		2	1	0,5	0,071	0,213	0,071	0,213	0,142	0,67	1,55	-7,48	-8,45	0,00	1,56	1,04		0,568	0,497	3,068	2,068	2,136	3,130	0,58	-1,0
1	4	true		3	1	0,5	0,142	0,213	0,107	0,142	0,213	0,55	1,21	-6,57	-7,08	0,00	1,79	0,99		0,675	0,568	4,175	2,175	2,350	3,486	0,95	-2,0
1	5	true		3	4	0,4	0,142	0,071	0,142	0,142	0,213	0,71	1,90	-3,90	-5,54	0,00	1,68	1,20		0,426	0,568	3,826	4,826	1,652	2,788	1,36	1,0
1	6	true		4	3	0,3	0,107	0,142	0,071	0,142	0,107	0,93	2,71	-3,94	-6,81	0,00	1,52	1,41		0,462	0,356	4,762	3,762	1,524	2,236	1,46	-1,0
1	7	true		3	4	0,3	0,142	0,037	0,213	0,071	0,213	0,71	2,04	-4,19	-6,52	0,00	1,55	1,10		0,429	0,497	3,729	4,729	1,458	2,452	1,43	1,0
1	8	true		4	1	0,5	0,142	0,107	0,142	0,213	0,037	0,79	1,69	-6,40	-7,36	0,00	1,56	1,23		0,498	0,287	4,998	1,998	1,996	2,570	1,43	-3,0
1	9	true		5	2	0,2	0,107	0,142	0,037	0,142	0,142	1,06	3,82	-5,05	-8,33	0,00	1,44	1,52		0,428	0,426	5,628	2,628	1,256	2,108	1,90	-3,0
1	10	true		2	2	0,2	0,142	0,142	0,213	0,037	0,213	0,70	1,45	-6,89	-8,33	0,00	1,40	0,98		0,639	0,463	2,839	2,839	1,678	2,604	0,55	0,0
1	11	true		3	2	0,2	0,037	0,213	0,107	0,107	0,107	0,87	2,15	-5,64	-8,79	0,00	1,34	1,17		0,570	0,321	3,770	2,770	1,540	2,182	0,95	-1,0
1	12	true		3	3	0,3	0,213	0,107	0,071	0,037	0,142	0,93	2,60	-4,50	-7,55	0,00	1,45	1,34		0,498	0,321	3,798	3,798	1,596	2,238	1,12	0,0
1	13	true		1	3	0,3	0,142	0,071	0,142	0,142	0,142	0,96	2,60	-6,95	-11,13	0,00	1,25	1,21		0,426	0,426	1,726	3,726	1,452	2,304	1,01	2,0
1	14	true		2	3	0,5	0,142	0,071	0,107	0,071	0,142	0,87	2,27	-5,06	-7,81	0,00	1,47	1,28		0,391	0,355	2,891	3,891	1,782	2,492	0,88	1,0

Abbildung 34: Parameterstudie Demonstratorbauteil

Durch die Vorgabe von Werkstoffkennwerten (vgl. AS 3.3) und der Randbedingungen (mechanische Lasten, maximal erlaubte Durchbiegung, zur Verfügung stehende Halbzeuge etc.) berechnete das Programm mehr als 10.000 mögliche Varianten und somit, wie sich verschiedene Stegdicken mit unterschiedlichen Faserhalbzeugen auf die Zielparameter Masse, Durchbiegung und Sicherheitsfaktor auswirken. Abbildung 35 zeigt die visualisierten Einflüsse auf die Verformung und den Sicherheitsfaktor.

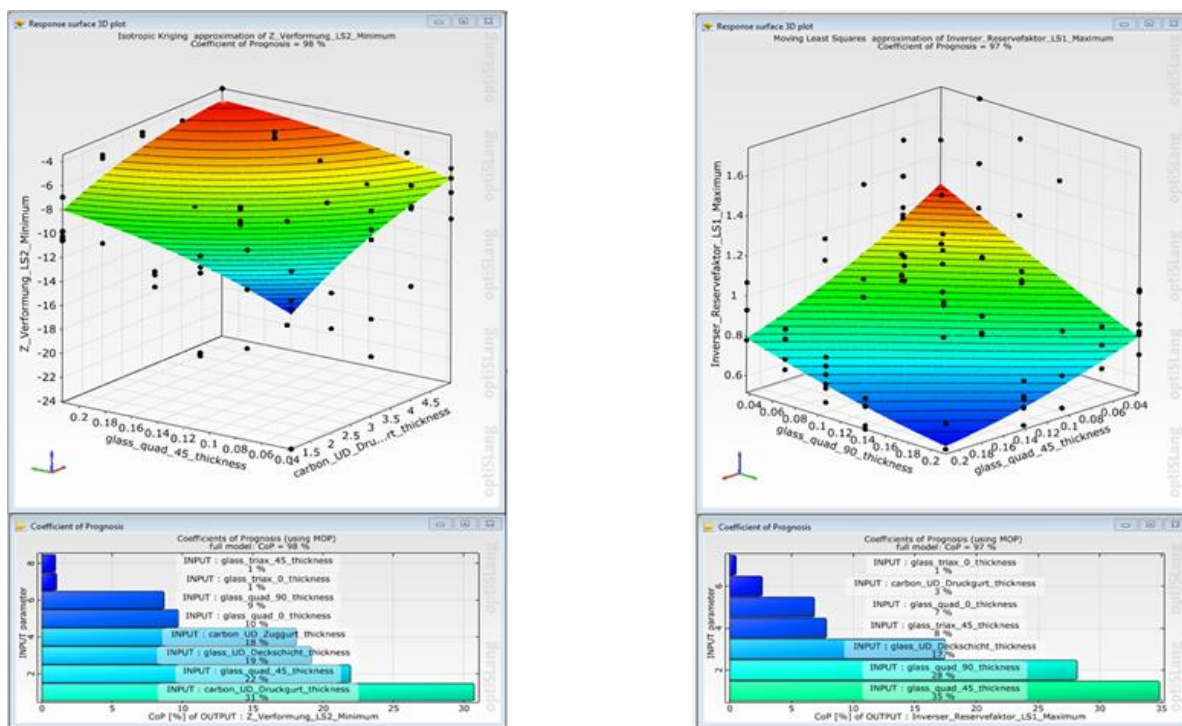
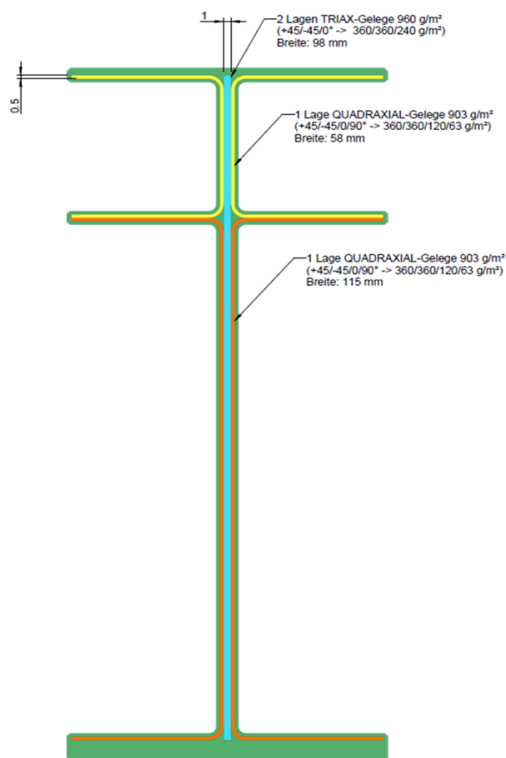


Abbildung 35: Ergebnisse der Parameterstudie: Einfluss auf Verformung (li) und Sicherheitsfaktor (re)

Im nächsten Schritt wurden die Ergebnisse im Hinblick auf eine möglichst geringe Bauteilmasse bei möglichst geringer Durchbiegung gefiltert. Abbildung 36 zeigt den finalen, optimierten Lagenaufbau des Demonstratorbauteils des Fraunhofer IWU.



Abmessungen	Dicke [mm]	Überzug
Druckgurt (oben)	3,5	0,344
Mittelgurt	2,5	0,394
Zuggurt (unten)	3,5	0,344
Steg	3,5	0,361
Triaxialgelege		
	Dicke [mm]	FFG [g/m²]
0°	0,107	180
45°	0,213	360
-45°	0,213	360
1 Lage	0,533	900
2 Lagen	1,066	
Quadraxialgelege		
	Dicke [mm]	FFG [g/m²]
0°	0,107	180
45°	0,107	180
-45°	0,107	180
90°	0,107	180
1 Lage	0,428	720
2 Lagen	0,856	
UD-CFK		
	Dicke [mm]	
Zuggurt (unten)	2,3	
Druckgurt (oben)	2,3	

Abbildung 36: Demonstrator mit optimiertem Lagenaufbau

Abbildung 36 links zeigt den komplexen Lagenaufbau, welcher zur Aufnahme der Belastungen notwendig ist. Die Farben zeigen dabei, an welchen Stellen welche Faserhalbzeuge zum Einsatz kommen. In Abbildung 36 rechts fasst die Abmessungen der Stegdicken zusammen.

AS 4.5: Detaillierung der Konstruktion; Erstellung von Einzelteilzeichnungen / Konstruktion Prototypenwerkzeug Pultrusion

Nach Auswahl der Vorzugskonzepte arbeitete das IWU gemeinsam mit CE an der Detaillierung der Konstruktion. Hauptaugenmerk des IWU lag hierbei auf dem Zwischenboden, welcher in der aktuellen Vorzugsvariante ohne metallischer Stützstruktur ausgeführt wird (Abbildung 37).

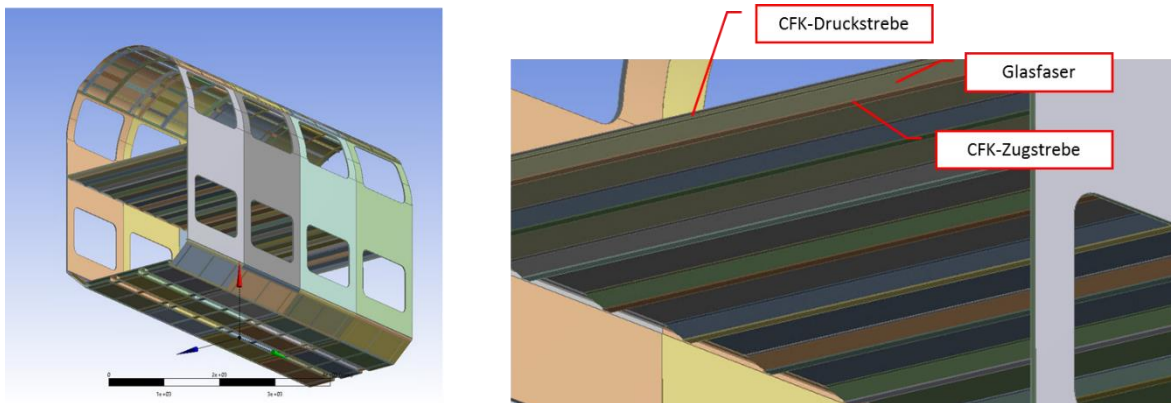


Abbildung 37: Detaillierung des Zwischenbodens

Dabei besteht der Zwischenboden aus einem Al-Schaumkern mit faserverstärkten Decklagen und einer Tragstruktur aus faserverstärkten Pultrusionsprofilen. Diese faserverstärkten Profile (Abbildung 38) bestehen aus einem Zug- und Druckbereich aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff sowie einer Trag- und Schubfeldstruktur aus glasfaserverstärktem Kunststoff.

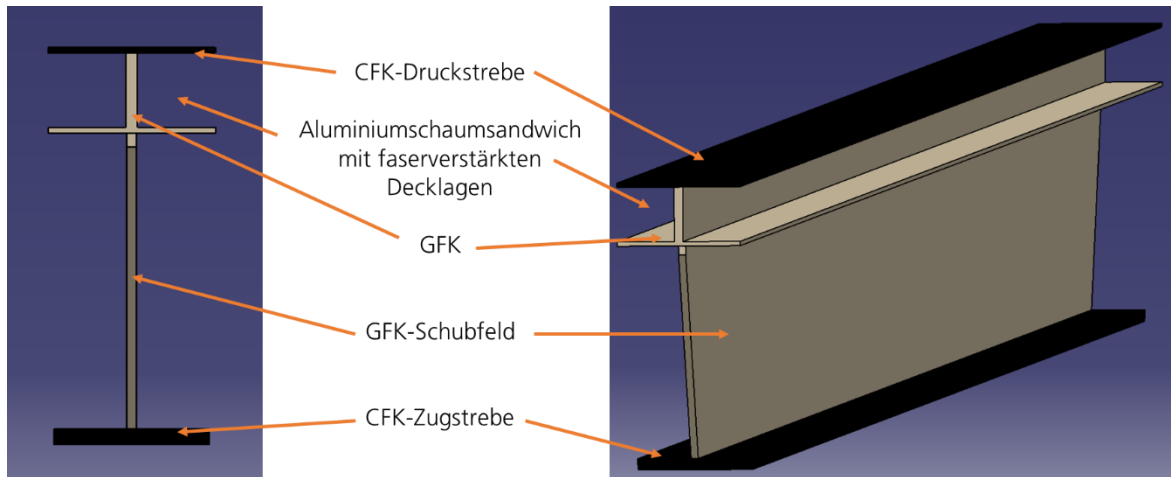


Abbildung 38: Technologiedemonstrator des Fraunhofer IWU

Mit dem in AS 4.4 berechneten Lagenaufbau wurde im AS 4.5 das Demonstratorwerkzeug konstruiert. Dieses besteht aus den beiden Baugruppen Injektionsbox (Abbildung 39) und Werkzeug (Abbildung 40). Sowohl die Injektionsbox (IB) als auch das Werkzeug (WZ) bestehen aus 6 einzelnen Bauteilen.

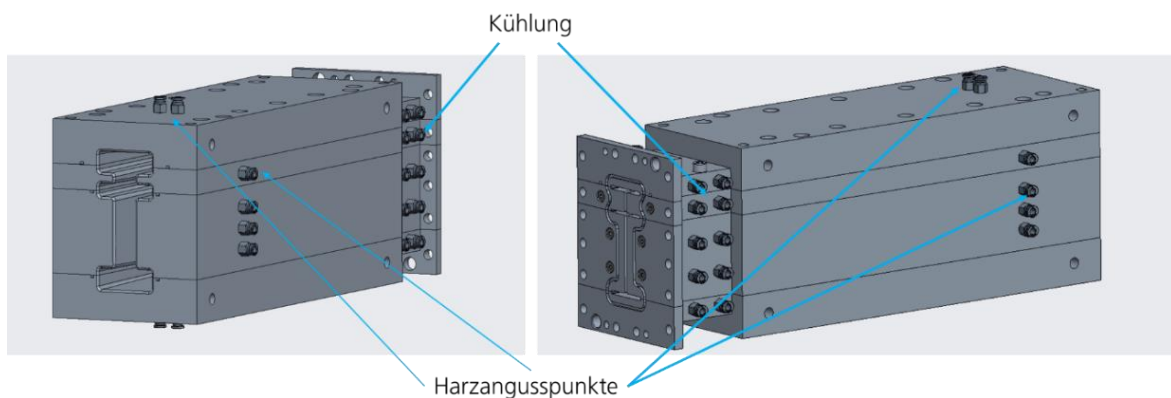


Abbildung 39: Auskonstruierte Injektionsbox: Fasereinlauf (li) und Werkzeugseite (re)

Die IB wird an das WZ geschraubt. Wichtig für einen funktionierenden Prozess ist, dass die IB nicht die hohen Temperaturen des WZ annimmt, weshalb ein Kühlkreislauf eingebracht werden musste. Über mehrere Harzangusspunkte erfolgte während des Prozesses fortlaufend die Injektion des flüssigen Kunststoff-Matrixmaterials.

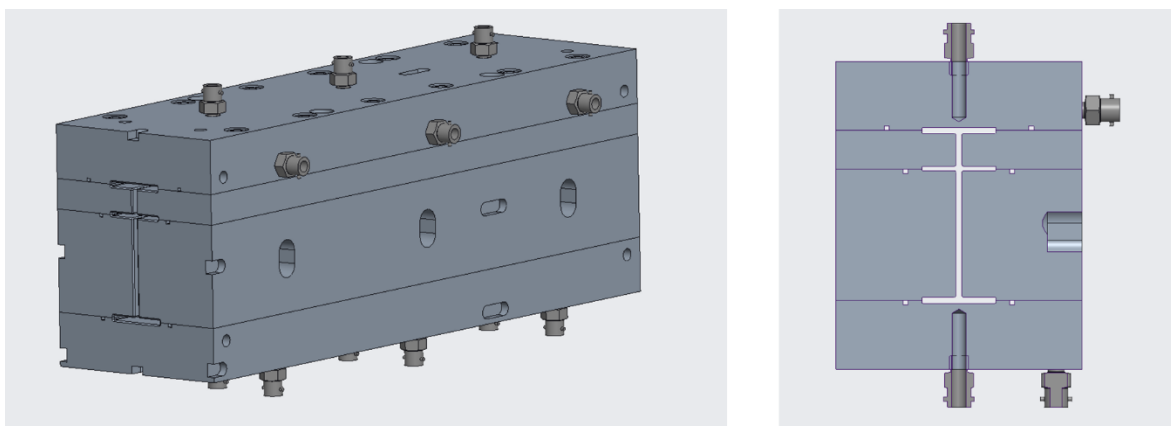


Abbildung 40: Pultrusionswerkzeug

Das WZ besitzt an mehreren Stellen Messpunkte, in welche Temperaturmessfühler eingebracht wurden. Auf diese Weise konnte garantiert werden, dass zu jedem Zeitpunkt die erforderliche Temperatur im WZ vorhanden ist.

Abbildung 41 zeigt das eingebaute Werkzeug. Für einen homogenen Energieeintrag der Heizplatten (ober- und unterhalb des WZ), erfolgte der Einbau um 90° gedreht. Dies vereinfachte auch das Greifen der Profile beim Abzug und vergrößerte gleichzeitig die Fläche zur Einleitung der Klemmkräfte.

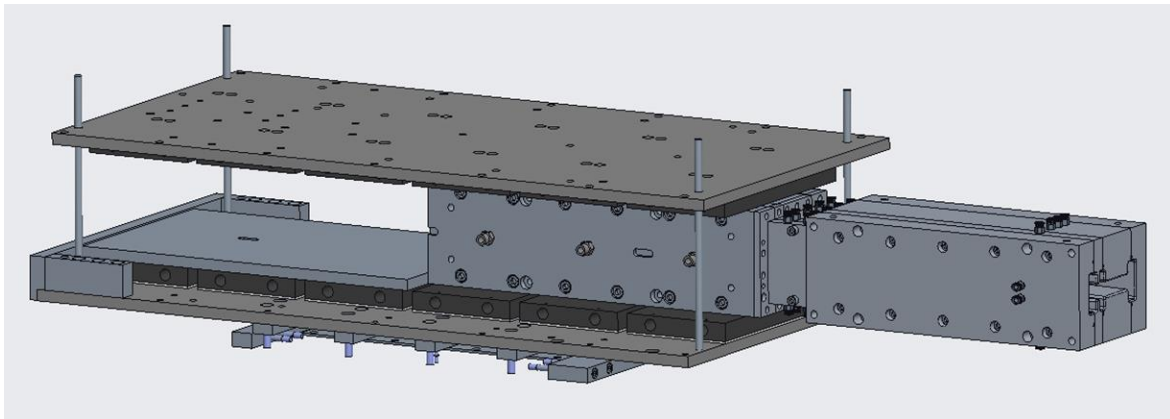


Abbildung 41: Einbau des Werkzeugsystems in den Werkzeugträger

2.1.5 AP 5: Technologieerarbeitung für Fertigung

Das Ziel des AP 5 lag in der Erarbeitung geeigneter Fertigungstechnologien, um das Potenzial neuer innovativer Bauweisen und Werkstoffe nachweisen zu können.

AS 5.1: Aufstellung der technologischen Prozesskette zur Herstellung der Wagenkastenmodule

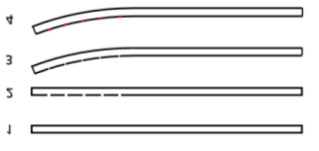
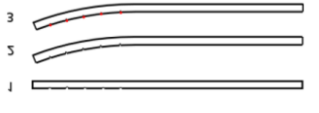
Die Betrachtung der Herstellbarkeit der Konzepte geschah fortlaufend über den Projektverlauf. Nur wenn die Konzepte mit vertretbarem Aufwand in eine spätere Serienanwendung überführt werden können, war eine Weiterverfolgung dieser sinnvoll.

Schäumen der oberen Seitenwand

In Tabelle 15 ist das Vorgehen anhand verschiedener Konzepte für die Herstellung der oberen Seitenwand skizziert. Dank jahrelanger Erfahrung konnte das Fraunhofer IWU hier bereits frühzeitig mögliche Prozessketten erstellen und bewerten.

Tabelle 15: Konzeptstudien zur Herstellung der oberen Seitenwand

Konzept	Abbildung	Vorteile	Nachteile
Schäumen von bereits gebogenen Sandwichblechen		Nutzung vorhandener Anlagentechnik möglich Schäumen der Endkontur, keine Nachbearbeitung in dieser Hinsicht notwendig Durchgehender Kraftfluss in den Deckblechen ist gegeben	Angepasste Schäumform notwendig ungleichmäßiger Abstand der Strahler zum Sandwich, kann ggf. über die Regelung kompensiert werden
Schäumen von bereits gebogenen Sandwichblechen		Schäumen der Endkontur, keine Nachbearbeitung in dieser Hinsicht notwendig Durchgehender Kraftfluss in den Deckblechen ist gegeben	aufwendig und kostenintensiv Angepasste Schäumform notwendig Angepasste Anlagentechnik notwendig

<p>Schäumen eines ebenen Sandwiches (1), Fräsen (2), Umformen (3) und Schweißen des Sandwiches im Nachgang (4)</p>		<p>Nutzung vorhandener Anlagentechnik möglich</p> <p>Nutzung von Standardhalbzeugen möglich</p> <p>Durchgehender Kraftfluss in Deckblechen gegeben (vollständiges Schweißen mehrere Längsnähte)</p> <p>Für AAS und SAS geeignet</p>	<p>Umfangreiche Bearbeitung der Sandwiches notwendig</p> <p>Geringfügiges Stauchen des Schaums im Bereich der Innenkontur (wahrscheinlich unproblematisch)</p> <p>Ungeprüftes Verfahren</p>
<p>Schäumen eines ebenen Sandwiches mit profilierten Deckblechen (1), Umformen (2) und ggf. Schweißen des Sandwiches im Nachgang (3)</p>		<p>Nutzung vorhandener Anlagentechnik möglich</p> <p>Nutzung von Standardhalbzeugen möglich</p> <p>Durchgehender Kraftfluss in den Deckblechen ist unterbrochen (teilweise, wenn geschweißt wird).</p>	<p>Umformen der Sandwichdeckbleche vor dem Schäumen notwendig (rollen, ziehen...)</p> <p>Bearbeitung der Sandwiches notwendig</p> <p>Geringfügiges Stauchen des Schaums im Bereich der Innenkontur</p> <p>Ungeprüftes Verfahren, weitere Versuche notwendig</p>

Alle dargestellten Konzepte weisen spezifische Vor- und Nachteile auf; für den Demonstratorbau wurden zunächst Konzept 1 und 2 bevorzugt, da diese den besten Kraftfluss aufwiesen. Die Projektpartner IWU und CE standen hierzu in enger Absprache mit dem UA-Nehmer HMF.

Konzept zur Verbindung der Seitenwandmodule

Ein weiteres wichtiges Konzept, welches vom Fh IWU entwickelt wurde, bestand in der optimierten Anbindung der Seitenwandmodule. Wie in Abbildung 42 skizziert, war hier eine gefaltete Sandwichabschluss zielführend, um die Schweißbarkeit zu verbessern.

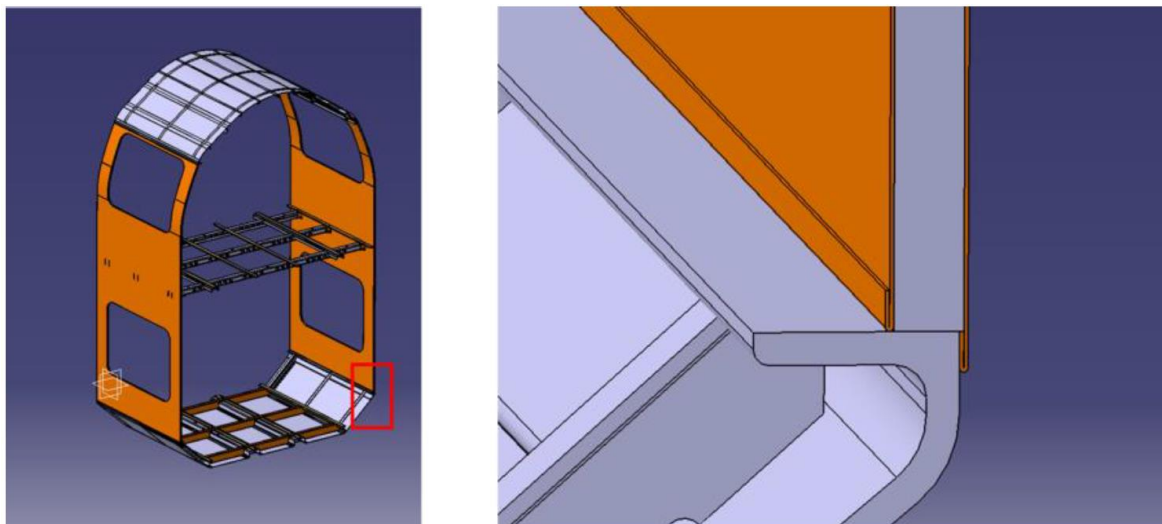


Abbildung 42: Konzept zur Anbindung Zwischendecke an Seitenwandmodul

Prozesskette Pultrusion

Die Aufstellung der technologischen Prozesskette zur Herstellung des Demonstrators erfolgte parallel zu AS 4.4 und 4.5, da die Werkzeugkonstruktion stets im Hinblick auf die spätere Fertigung geschehen muss. Dabei war die Lieferform der in AS 4.4 definierten Fasern und Faserhalbzeuge zu beachten:

- Unidirektionale Faserrovings sind in Form von großen, ca. 25 kg schweren Rollen verfügbar. Diese werden in Spulengattern gelagert, wobei der Faserabzug von innen erfolgt.
- Komplexe Faserhalbzeuge (Tri- bzw. Quadraxialgelege) werden in Form von ca. 100 m langen Rollen geliefert. Der Faserabzug erfolgt hier von außen.

Für einen erfolgreichen Pultrusionsprozess war es entscheidend, dass die Faserhalbzeuge dem Werkzeug prozessgerecht zugeführt wurden. Dabei erfolgte eine Vorausrichtung der Halbzeuge über mehrere Blenden (Abbildung 43).

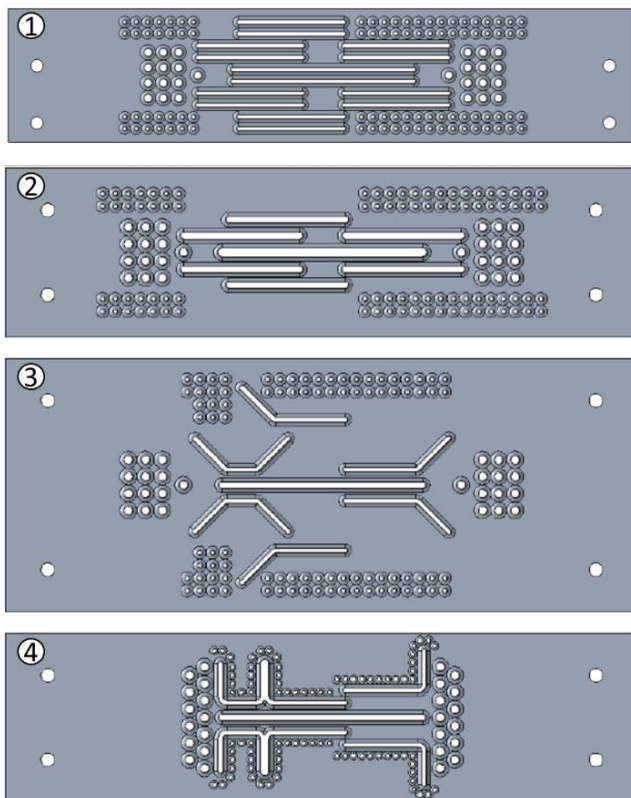


Abbildung 43: Faserblenden zur Vorausrichtung

- Direkt nach dem Abzug wurden die einzelnen Faserlagen durch separate Schlitze bzw. je zwei bis vier Rovings durch ein Loch von Blende 1 geföhrt.
- In Blende 2 erfolgte die Zusammenföhrung mehrerer Faserhalbzeuge, welche im späteren Bauteil an gleichen Stelle lagen.
- Blende 3 sorgte für die Vorausrichtung der Faserhalbzeuge; auch die Faserrovings wurden umsortiert.
- Blende 4 befindet sich direkt vor der Injektionsbox. Die Fasern und Faserhalbzeuge liegen in der Form vor, wie sie im Demonstrator positioniert sein sollen.

Die gesamte Prozesskette musste dabei derart aufgebaut werden, dass es zu keinen Kreuzungsstellen der einzelnen Fasern / Faserhalbzeuge kommt.

Abbildung 44 zeigt den finalen Aufbau und die finalen Abmessungen des IWU-Demonstrators.

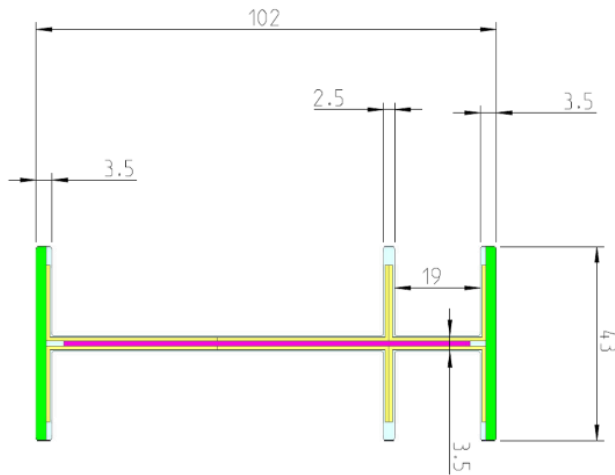


Abbildung 44: Komplexer Aufbau des Pultrusionsprofils (CFK-Zug- und Druckgurt (grün); GFK-Lasteinleitung (gelb); GFK-Schubfeld (rot); GFK-UD-Verstärkung (hellblau))

Der Demonstrator wurde aus mehreren Faserhalbzeugen aufgebaut, um die in den FEM-Berechnungen ermittelten Lasten und Momente optimal aufnehmen zu können:

- Je 34 Rovings Kohlenstofffaser im Zug- und Druckgurt zur Aufnahme der Biegekräfte (grün)
- 88 Rovings Glasfaser zum Schutz der komplexeren Halbzeuge
- 2 Traix-Gelege (0° , 45° , -45°) zur Aufnahme multiaxialer Belastungen im Schubfeld (rot)
- 12 Quadrax-Gelege (0° , 90° , 45° , -45°) zur Aufnahme multiaxialer Belastungen in den Stegen (gelb)

Abbildung 45 zeigt die Belegung der ersten Blende nach dem Abzug der Halbzeuge vom Spulengatter.

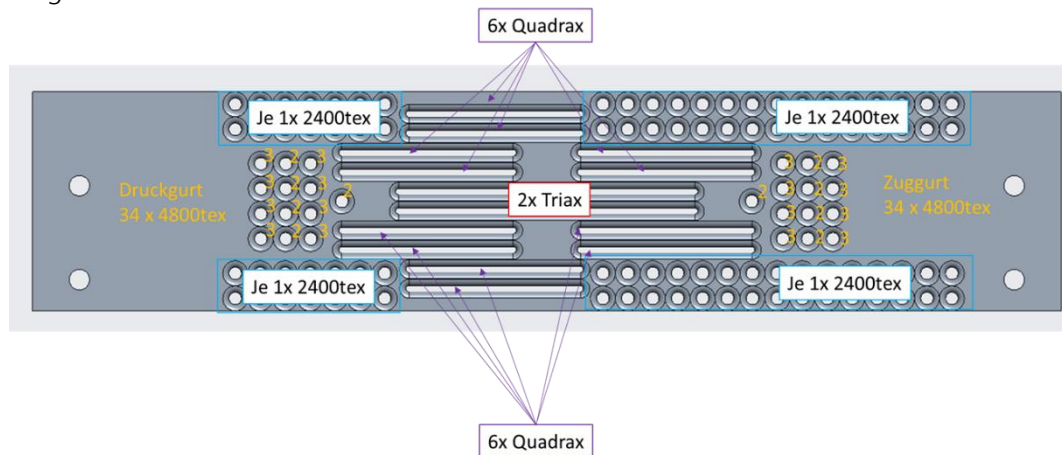


Abbildung 45: Blendenbelegung für Demonstratorherstellung

AS 5.2: Entwicklung und Test Fügetechnologien

Abbildung 46 zeigt CAD und FEM einer möglichen Fügetechnologie zur Anbindung des Zwischenbodens an die Seitenwand. Die obere Abbildung zeigt eine reine geschweißte Lösung, die untere Abbildung eine gesteckte und anschließend geschweißte Lösung. Für eine bessere Kräfteinleitung ist die gesteckte und geschweißte Lösung zu bevorzugen, auch wenn diese einen erhöhten Fertigungsbedarf aufweist.

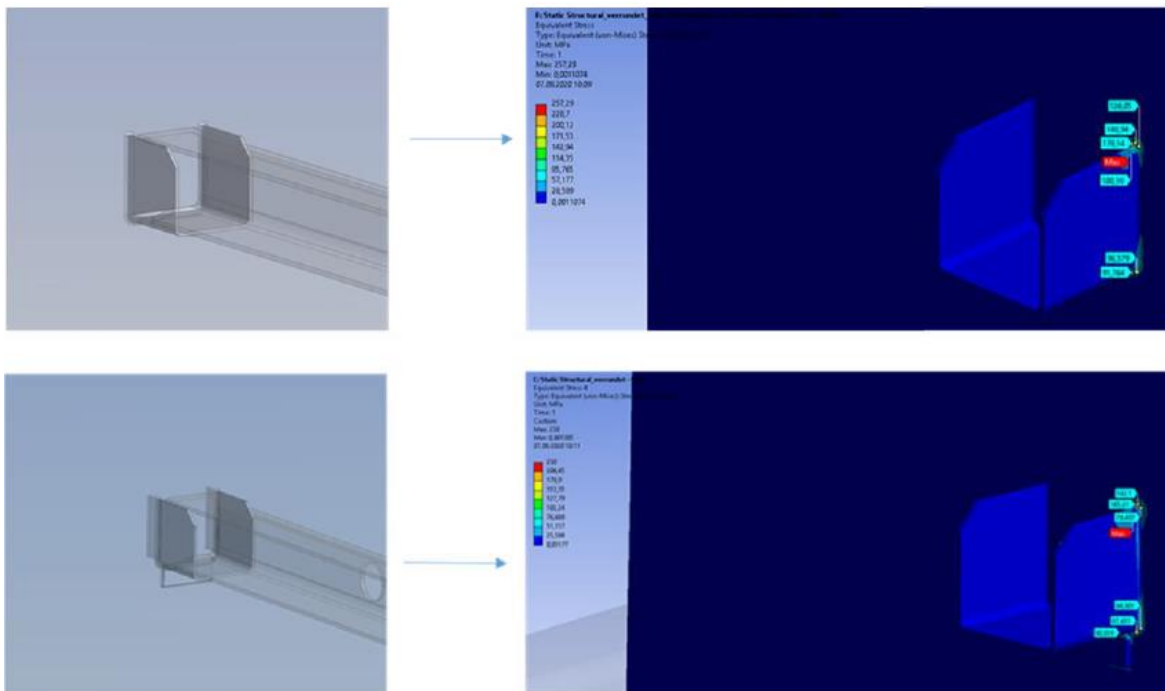


Abbildung 46: Füge- und Anbindungsstrategien

Abbildung 47 zeigt das Verbindungskonzept von Zwischenboden und Seitenwandaufbau. Wie bereits beschrieben, wurde der Zwischenboden über die komplette Länge auf beiden Seiten des Wagenkastens mit den Seitenwänden verklebt. Die Lagerung erfolgte über ein Stahlprofil, welches an den Seitenwänden verschweißt wurde. Neben der Klebung wurde über eine spezielle Formung dieses Profils auch ein Formschluss erreicht. Als Klebstoff wurde ein spezieller Dickschichtklebstoff gewählt, welcher auch für die Fensterverklebungen genutzt wird und perspektivisch auch teilautomatisiert aufgebracht werden kann.

Ein Vorteil der Verklebung über die gesamte Wagenkastenlänge war unter anderem die gleichmäßige Lastverteilung und damit die Möglichkeit, Lastspitzen zu vermeiden. Gleichzeitig ließ sich so eine höhere Steifigkeit des Wagenkastens erreichen.

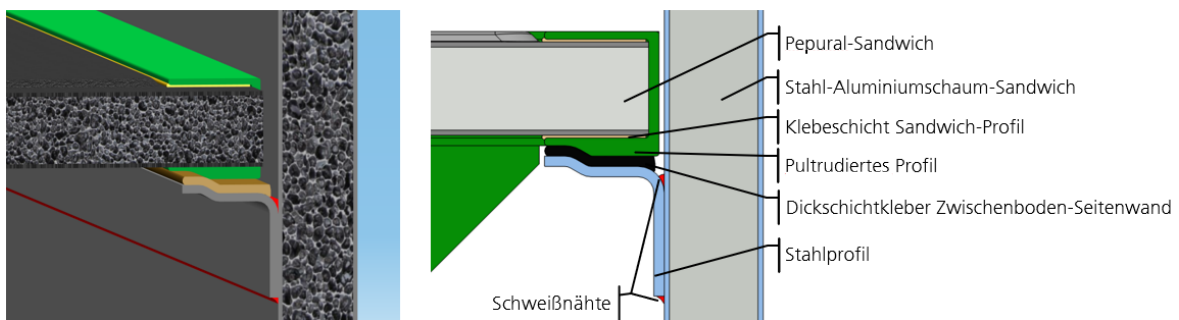


Abbildung 47: Verbindungskonzept Zwischenboden Seitenwand

AS 5.3: Konzepterstellung für Demonstrator-Aufbau einschließlich Montage

Während der Konzeptentwicklung wurde jedes Konzept hinsichtlich des späteren Aufbaus untersucht und bewertet.

Aufbau Zwischenboden

Da die Zwischenbodensegmente nicht als ein Stück gefertigt werden konnten, war eine Montage mehrerer Teilstücke nötig. Abbildung 48 zeigt einen Entwurf zur Fertigung des Zwischenbodenkonzepts.

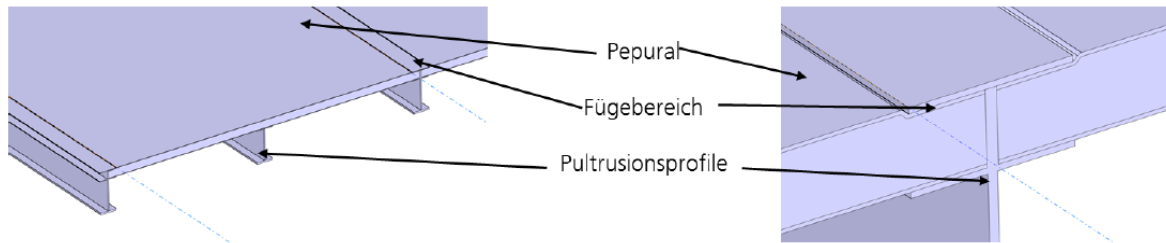


Abbildung 48: Konzept Demonstratoraufbau Zwischenboden

Hierbei wurden die Enden der Pepuralplatte (Sandwich aus faserverstärkte Decklagen und Aluminiumschaumkern) derart gefertigt, dass die Ränder dieser Platte leicht dünner sind als der Rest der Platte. Die Sandwichplatte konnte nun mit dem Pultrusionsprofil (vgl. Abbildung 38) verklebt werden.

Aufbau Demonstrator

Unter Federführung von CE erarbeiteten die Projektpartner mehrere Konzepte, wie die im FuE-Projekt MoWag entwickelten Technologien und Bauteile optimal demonstriert werden können. Abbildung 49 zeigt den finalen Stand. Der Demonstrator im Maßstab 1:1 ist dabei in mehrere Module unterteilt, um ihn leichter transportieren zu können.



Abbildung 49: Projektdemonstrator MoWag

Die linke Seite des Demonstrators zeigt das entwickelte Zwischenbodenmodul des Projektpartners CE, die rechte Seite zeigt das Modul des IWU. Die Innenwandverkleidungen des Projektpartners Lakowa (hier nicht dargestellt) können in diesen Aufbau integriert werden.

2.1.6 AP 6: Aufbau der Technologieträger / Demonstratoren

AS 6.1: Demonstratorfertigung

Nachdem alle Faserhalbzeuge vom Spulengatter abgezogen wurden (Abbildung 50 links), wurden diese der ersten Blende zugeführt, ohne dass sich die Fasern / Faserhalbzeuge überkreuzen durften (Abbildung 50 mitte und rechts).



Abbildung 50: Faserabzug (li: Faserabzug; mi: Faserzuführung; re: Faserzuführung nach Blende 1)

Anschließend wurden die Faserhalbzeuge durch 2 weitere Kunststoffblenden geführt und dabei immer weiter vorausgerichtet (Abbildung 51 li), bevor sie in das Werkzeugsystem einliefen (Abbildung 51 mi). In Abbildung 51 rechts ist zu sehen, wie die Halbzeuge im noch trockenen Zustand das Werkzeug verließen, ihre finale Form aber weiterhin beibehielten.



Abbildung 51: Faserzuführung (li: Vorausrichtung der Halbzeuge; mi: Einlauf; re: Werkzeugausgang)

Abbildung 52 zeigt das vollständig ausgehärtete Demonstratorprofil des Fh IWU.

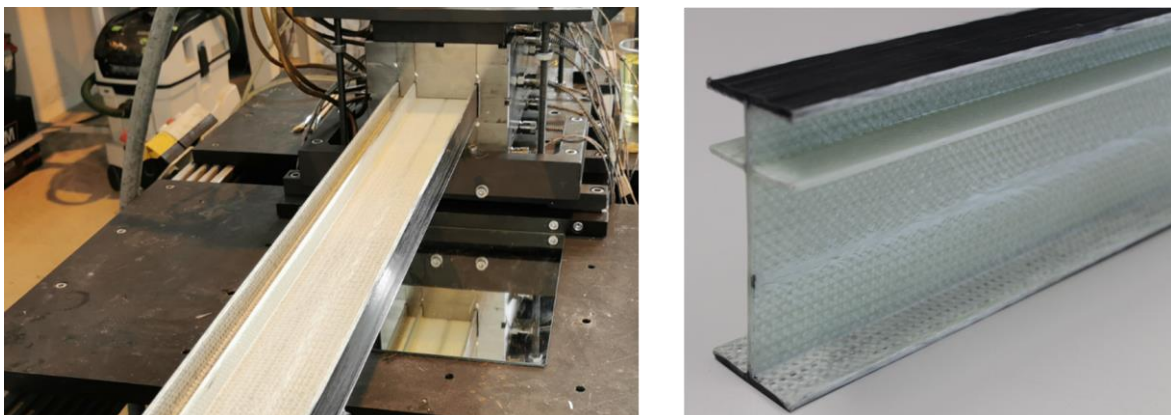


Abbildung 52: Ausgehärtetes Pultrusionsprofil

AS 6.2: Prüfung der Bauteilqualität und ggf. Anpassung der Prozessparameter

Im Verlauf der Demonstratorfertigung waren mehrere Iterationsschleifen notwendig, um den Demonstrator in der geforderten Qualität herstellen zu können (vgl. Abbildung 52). Die größte Herausforderung lag dabei in der Zuführung aller benötigten textilen Halbzeuge (vgl. Abbildung 36).

Zu Beginn der Versuche müssen diese Halbzeuge im trockenen Zustand durch das geschlossene Werkzeug geführt werden (vgl. Abbildung 51). Aufgrund des hohen FVG von ca. 65 % musste auf eine exakte Zuführung geachtet werden, da die Halbzeuge sonst – ohne die „Schmiermittelwirkung“ des Kunststoffes – im Werkzeug feststecken können bzw. verrutschen oder irreparabel geschädigt werden können. Das Problem konnte gelöst werden, indem im trockenen Zustand zunächst ein Halbzeug weniger zugeführt wurde. Erst nachdem der Prozess gestartet war – und der flüssige Kunststoff injiziert wurde – wurde das letzte Halbzeug im laufenden Prozess angebunden.

Auch bei der Temperaturführung wurden mehrere Iterationsschleifen durchgeführt, bevor das Prozessoptimum gefunden wurde. Abbildung 53 zeigt das Ergebnis der ersten Versuchsreihe. Zwar konnte das Bauteil mit allen Halbzeugen erfolgreich pultrudiert werden, allerdings verzog sich das Profil nach der Abkühlung auf Raumtemperatur sehr stark. Die Ursache liegt dabei in der ungleichmäßigen Aushärtung der unterschiedlich dicken Stege, wodurch höhere Eigenstressungen in dem Profil entstanden.



Abbildung 53: Erste Versuche

Durch eine Anpassung der Werkzeugtemperatur und der Pultrusionsgeschwindigkeit konnte dieses Problem gelöst werden.

AS 6.3: Komplettierung und Montage

Nach mehreren Technologieerarbeitungsschritten konnte das Fh IWU seinen Teildemonstrator erfolgreich herstellen. Dieser wurde zurechtgeschnitten und mit den Pepuralplatten verklebt. Abbildung 54 zeigt den Teildemonstrator im eingebauten Zustand im Gesamtdemonstrator.



Abbildung 54: Teildemonstrator des Fraunhofer IWU

In Abbildung 55 ist der Gesamtdemonstrator nach der Montage dargestellt. Dieser Demonstrator soll auf zukünftigen Messen ausgestellt werden und dient als Technologienachweis für die Entwicklungen im FuE-Projekt MoWag.



Abbildung 55: Projektdemonstrator Wagenkastensegment

2.1.7 AP 7: Messtechnische Bewertung / Eigenschaftsanalyse

AS 7.1: Experimentelle messtechnische Untersuchung der Demonstratoren

Die Untersuchungen zur Maßhaltigkeit (Abweichung IST vom SOLL) des Demonstrators erfolgte fortlaufend während der Fertigungsversuche. Die umfangreichen Voruntersuchungen zu den mechanischen Eigenschaften (vgl. AS 3.3) sowie der Berechnung (vgl. AS 4.1 – 4-4) der Faser-Kunststoffe ermöglichte im Projekt MoWag die Fertigung optimal lastangepasster Pultrusionsprofile.

Untersuchungen zu den Aluminiumschaum-Sandwiches sind umfangreich dem Abschlussbericht von CE zu entnehmen. Auch hier erfolgte eine enge Zusammenarbeit zwischen IWU und CE sowie der TU-Chemnitz als UA-Nehmer.

AS 7.2: Bewertung hinsichtlich Kosteneffizienz und Ressourceneinsatz / Ableitung von Optimierungsmaßnahmen

Hinsichtlich Ressourceneinsatz zeigt der im FuE-Projekt MoWag entwickelte Wagenkasten eine hohe Effizienz im Vergleich zum Stand der Technik.

- Aluminiumschaum-Sandwiches sind sehr gut für den Einsatz im Schienenfahrzeugbau geeignet. Sie besitzen gute mechanische Eigenschaften bei einer geringen Dichte sowie eine hervorragende Recyclingfähigkeit bei sehr guten Brandschutzeigenschaften. Nachteilig ist der – im Vergleich zum Stand der Technik – erhöhte Raumbedarf durch die Notwendigkeit dickerer Sandwichplatten. Da der Prozess der Metallschaum-Sandwich-Fertigung in Deutschland bisher ein Nischenprodukt ist, sind die Preise dafür aktuell noch deutlich höher als bei der bewährten Bauweise. Mit steigender Nachfrage wird der Preis dafür zukünftig deutlich sinken, da die Fertigung sehr gut automatisierbar ist.
- Die im Projekt entwickelten Füge- und Montagekonzepte bieten im Vergleich zum Stand der Technik eine deutliche Reduzierung des Montageaufwands. Durch den Einsatz großflächiger Sandwich-Module wird die Fertigungszeit minimiert.
- Die entwickelten FKV-Pultrusionsprofile wurden leichtbautechnisch optimal für den Einsatz im Schienenfahrzeugbau qualifiziert. Durch die Verwendung von günstigen Glasfasern im Schubereich und die Reduzierung teurer Kohlenstofffasern auf die hochbelasteten Zug- und Druckgurte wurde hier ein Bauteil entwickelt, welches alle ökonomischen Anforderungen für einen zukünftigen Einsatz im Schienenfahrzeug erfüllt. Zukünftig ist anstelle des Polyurethans auch der Einsatz von Fasern und Kunststoffen aus nachwachsenden Rohstoffen denkbar, wodurch sich der ökologische Fußabdruck spürbar verbessert. Aktuell stehen dem Einsatz ökologischer Werkstoffe aber noch die sehr hohen Kosten entgegen.

2.1.8 AP 8: Technische Dokumentation, Ergebnisaufbereitung

Die im Projekt erzielten Ergebnisse wurden im AP 8 in Zeichnungen und Simulationsmodellen im Detail dokumentiert. Eine fortführende Aufbereitung ist ohne weiteres möglich.

AS 8.1: Analyse, Aufbereitung und transfergerechte Dokumentation der Ergebnisse

Abbildung 56 zeigt die entwickelten finalen Konzepte, welche mit dem Demonstrator dargestellt wurden; zum einen das CE-Konzept bestehend aus AAS-Komponenten und Aluminiumstrangpressprofilen (links), und zum zweiten das IWU-Konzept bestehend aus SAS-Komponenten, Pepural-Elementen und Pultrusionsprofilen. Die Projektpartner haben sich für eine Kombination aus beiden Konzepten entschieden, da diese dem Leichtbauansatz und der Darstellung der Bauweisen am besten entspricht.

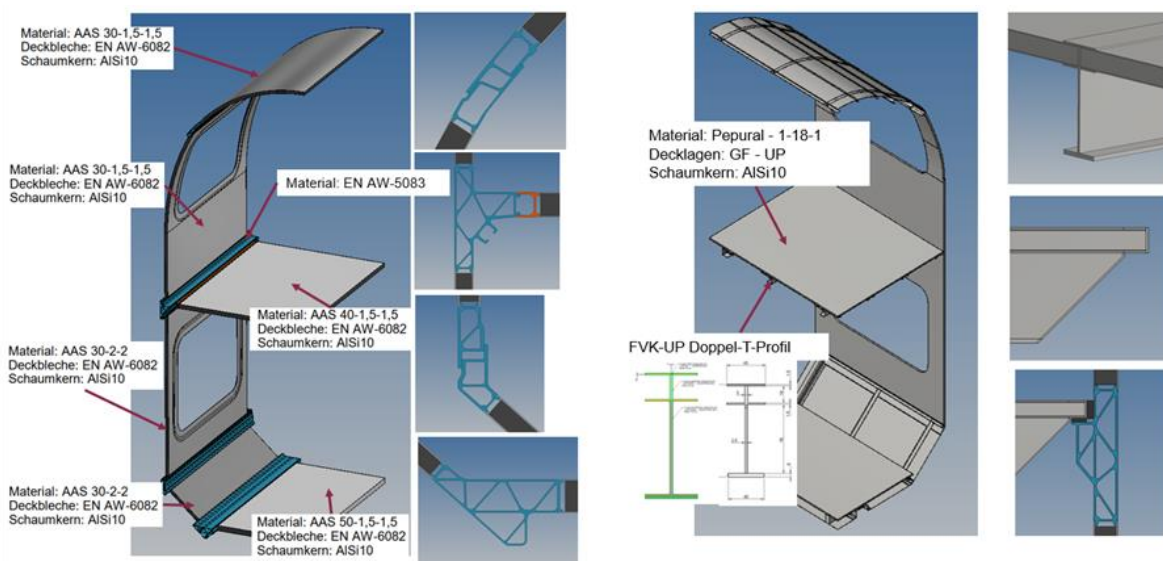


Abbildung 56: Finale Konzepte

Abbildung 57 stellt die Baugruppenmassen (Referenzfahrzeug (oben); MoWag-CE-Konzept (unten)) bezogen auf das halbe Wagenkastensegment gegenüber. Mit Ausnahme der Baugruppe Zwischenboden (+40 % Masse) konnte für alle Einzelbaugruppen eine Masseinsparung von 6 % - 9 % erreicht werden.

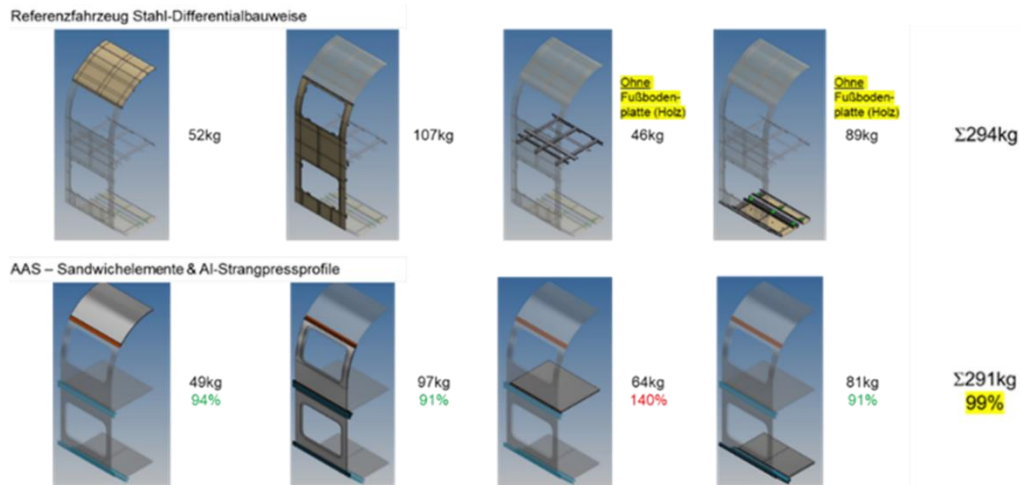


Abbildung 57: Detailmassen Referenzfahrzeug – CE-Konzept (AAS & Al-Strangpressprofile)

Wird die Baugruppe Zwischenboden (Abbildung 58) aus dem IWU-Konzept (Pepural, Pultrusionsprofile) für den Massenvergleich in Betracht gezogen, so erhöht sich die Massereduktion für diese Baugruppe auf 13 %. Somit wird mit dem kombinierten Konzept eine Masseinsparung für den Rohbau von > 9 % erreicht und damit das Projektziel erreicht.

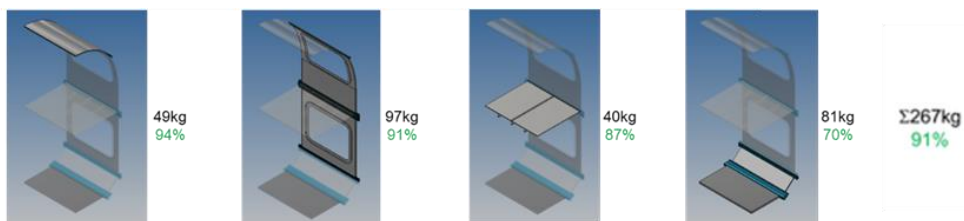


Abbildung 58: Detailmassen Referenzfahrzeug – CE-IWU-Konzept

Im Referenzfahrzeug kommt im Zwischen- und Fußboden eine Holzmehrschichtplatte zum Einsatz, welche zur Verteilung der Einzelkräfte auf dem Zwischenbodenrohbau dient. Die Sandwichelemente AAS und Pepural übernehmen im MoWag-Konzept diese Funktion, sodass hier auf eine Holzmehrschichtplatte verzichtet wurde. Wird diese Funktionsintegration hinsichtlich Masseinsparung progressiv betrachtet, dann kann von einer Masseinsparung von bis zu 22 % ausgegangen werden (Abbildung 59).

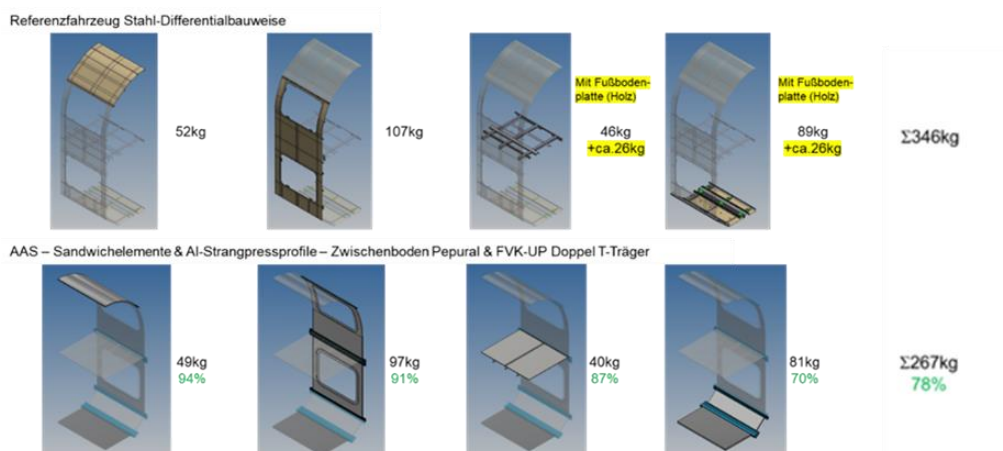


Abbildung 59: Detailmassen Referenzfahrzeug progressive Bewertung – CE-IWU-Konzept

Die Ergebnisse des FuE-Vorhabens wurden vom Fraunhofer IWU und dem Federführer CE auf mehreren Tagungen präsentiert und somit der Öffentlichkeit zugänglich gemacht (Kapitel 2.6).

AS 8.2: Erarbeitung konstruktiver und technologischer Konzepte zur Überführung der neuartigen Bauweise in erweiterte Anwendungsbereiche

Für das Fraunhofer IWU stellen die Technologieentwicklungen des Projekts MoWag einen deutlichen Know-how-Gewinn dar. Das IWU ist nun in der Lage, hochreaktive Kunststoffsysteme im Pultrusionsverfahren zu verarbeiten und konnte bereits erste Direktaufträge (Werkstoffuntersuchungen für die BASF AG) einwerben.

Die im Projekt entwickelten Bauweisen sollen zukünftig in aufbauenden Forschungsprojekten weiterentwickelt werden. Gemeinsam mit dem Partner CE laufen hier bereits erste Gespräche.

Für das Fraunhofer IWU ist die Anwendung nachwachsender Rohstoffe ein zukünftig stark wachsendes Forschungsfeld. Hier sind neue Projekte auch im Schienenfahrzeugbereich geplant, die im Projekt MoWag entwickelte Technologie zu transferieren.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Für das Vorhaben MoWag wurden dem Projektpartner Fraunhofer IWU mit Zuwendungsbescheid vom 28.11.2018 Mittel in Höhe von bis zu 501.971,29 € bewilligt (bei Selbstkosten von 590.554,42 € und einer Förderquote von 85 %).

Auf forschendes Personal (Pos. 0837) entfielen 462.188 € der Projektkosten, was in etwa der ursprünglichen Planung (460.328 €) entsprach. Die gebrauchten Sachkosten fielen mit 56.467 € leicht geringer aus als beantragt (59.326 €). Die bewilligten Mittel für die Anschaffung einer Zwei-Komponenten-Mischanlage für die Verarbeitung von hochreaktivem Polyurethan lagen mit 71.542 € leicht über dem Plan (70.900 €). Größere Abweichungen gab es im Bereich der Reisekosten (Plan: 3.686 €; IST: 1.464 €). Aufgrund der COVID-19-Pandemie waren Dienstreisen ab Q1/2020 nicht mehr im geplanten Umfang möglich. Die frei gewordenen Mittel wurden im Rahmen der Austauschregel für Personal verwendet. In Summe entsprachen die angeforderten Bundesmittel mit 590.196 € fast dem Plan (590.554 €).

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Der Verlauf der Arbeiten im FuE-Vorhaben MoWag folgte im ersten Projektjahr überwiegend der Zeit- und Ressourcenplanung des Antrags. Mit Beginn der COVID-19-Pandemie traten allerdings ab Q1/2020 massive Verzögerungen ein. Mit Bescheid vom 27.04.2021 wurde dem Projektkonsortium eine kostenneutrale Projektverlängerung um 6 Monate bewilligt.

Alle im Arbeitsplan formulierten Aufgaben des Fraunhofer IWU wurden erfolgreich bearbeitet. Es waren keine zusätzlichen finanziellen oder materiellen Ressourcen für das Projektvorhaben nötig. Die Kosten für die Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten entsprachen den geplanten Schätzungen und mussten nicht angepasst werden.

Im Verbundprojekt „MoWag“ wurden durch das Fraunhofer IWU grundlegende wissenschaftlich-technische Fragestellungen bearbeitet (vgl. Absatz 2.1). Hierfür wurden umfangreiche Entwicklungen und Untersuchungen durchgeführt und anschließend deren technisch-technologische Eignung bewertet. In mehreren Iterationsstufen wurden die Vorzugskonzepte erfolgreich umgesetzt. Die für das Projekt MoWag beantragten, bewilligten und abgerechneten Kosten für Personal, Material, Investition und Reisen waren im vollen Umfang notwendig und bzgl. den Herausforderungen des Vorhabens angemessen.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen (Verwertbarkeit der Ergebnisse)

Für das Fraunhofer IWU stellen die Technologieentwicklungen des Projekts MoWag einen deutlichen Know-how-Gewinn dar. Das IWU ist nun in der Lage, hochreaktive Kunststoffsysteme im Pultrusionsverfahren zu verarbeiten und konnte bereits erste Direktaufträge (Werkstoffuntersuchungen im Pultrusionsverfahren für die BASF AG und die Olin Corporation) einwerben.

Im Bereich der Bauteilentwicklung für Schienenfahrzeuge konnte – auch mit den Erkenntnissen aus MoWag – das Forschungsprojekt FunPul (Verbundvorhaben: FunPul - Inline-Funktionalisierung von Pultrusionsprofilen; Teilvorhaben: Technologieentwicklung und Prozesssimulation des Pultrusionsverfahrens zur Herstellung funktionsintegrierter Profile; BMWK; FKZ 03LB1002F; Laufzeit 01.01.2021 – 30.06.2023) akquiriert werden. Federführer dieses Projekts ist der Schienenfahrzeug-Engineering-Dienstleister Hörmann. Das Projektziel besteht in der Technologieentwicklung für die seriennahe Pultrusion hybrider Profile für ein Schienenfahrzeug.

Außerhalb des Schienenfahrzeugbereichs konnte das Projekt Hybrid-Switch (Verbundvorhaben: Hybrid-Switch - Großserientaugliche Technologien für Multimaterialeichtbau auf Basis hybrider Verbindungselemente; Teilvorhaben: Technologieentwicklung zur Herstellung hybrider Profilverbinder im Pultrusionsverfahren sowie Berechnung hybrider Leichtbaukomponenten; BMWK; FKZ 03LB2043A; Laufzeit 01.05.2022 – 30.04.2025) akquiriert werden. Bei diesem Vorhaben besteht das Ziel darin, die Pultrusionstechnologie für die seriennahe Fertigung hybrider Bauteilstrukturen zu qualifizieren. Adressierte Anwendungen in dem Vorhaben liegen im Schiff- und Nutzfahrzeugbereich. Nach erfolgreichem Abschluss ist ein Transfer in den Schienenfahrzeugbereich möglich.

Des Weiteren läuft aktuell die Akquise für das Vorhaben PulPro-SMC, bei welchem eine integrale Schienenfahrzeug-Knotenstruktur entwickelt werden soll, welche Pultrusionsprofile mittels Stoffschluss verbindet.

Weitere Akquisen sind in Vorbereitung.

2.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens an anderer Stelle

Während der Projektlaufzeit wurden keine Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens von anderer Stelle bekannt.

2.6 Veröffentlichungen

Erfolgte Veröffentlichungen:

- Noteboom, U., Knobloch, M., Vogel, R.: MoWag - Modularer Wagenkasten für Schienenfahrzeuge in Multi-Material-Leichtbauweise; Vortrag gehalten auf der Rad-Schiene-Tagung 2021, 18. Internationale Schienenfahrzeugtagung, 22.09.2021, Dresden
- Noteboom, U., Knobloch, M.: Pultrusionsprofile im Schienenfahrzeug – Steigerung des Leichtbaupotenzials durch die Nutzung von Verbundwerkstoffen; Vortrag auf dem Thementag "Leichtbau ein Profil geben", 18.01.2022
- Noteboom, U., Knobloch, M., Vogel, R.: Modularer Wagenkasten für Schienenfahrzeuge – Entwicklung neuartiger Multi-Material-Bauweisen; Beitrag in der Eisenbahntechnischen Rundschau; 2022

Geplante Veröffentlichungen:

- Noteboom, U., Knobloch, M., Vogel, R.: Modularer Wagenkasten für Schienenfahrzeuge – Entwicklung neuartiger Multi-Material-Bauweisen; Vortrag auf dem cUPdate - Leichtbaulösungen für den Nutz- und Schienenfahrzeugbau in Serie und After-Market, 17.06.2022

Literaturangaben

- [1] J. Wiedemann: Leichtbau – Elemente und Konstruktion, 3. Auflage, Springer, 2007
- [2] Banhart, J., Baumeister, J. u. Weber, M.: Geschäumte Metalle: Herstellung vereinfacht., Bd. 37. Industrieanzeiger 1993; S. 48-49
- [3] Baumeister, J., Banhart, J. u. Weber, M.: Effiziente Herstellungsmöglichkeiten für Bauteile aus geschäumten Metallen, Nr. 1151; S. 223-230. VDI-Berichte 1995
- [4] Kunze, H. D. u. a.: Möglichkeiten zur Herstellung von Bauteilen aus geschäumten Metallen. Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis, Band 9. Hagen: VDI-Verlag; S. 330-348 Symposium 1993
- [5] Miyoshi, T. u. Itoh, M.: Aluminium foams »ALPORAS« – the production process, properties and applications. Symposium R, USA 1998
- [6] Weber, J.: Verfahren und Anlage zum Herstellen von mit Gasblasen durchsetzten metallischen Werkstoffen in Form von Profilen. DE 35 16 737 A1. 1986
- [7] N. N.: Alulight – ein neuer Werkstoff aus Aluminiumschaum. Firmenprospekt, MEPURA Metallpulvergesellschaft mbH Ranshofen u. 1995
- [8] Hipke, T., Lang, G. u. Poss, R.: Taschenbuch für Aluminiumschäume, 1. Auflage. Aluminium-Verlag 2007
- [9] EPTA - European Pultrusion Technology Association: RAW MATERIALS. <https://pultruders.com/pultrusion/4-raw-materials/>, abgerufen am: 31.01.2022
- [10] Patentschrift EP2139670B1: Jansen, K., Weidler, D., Hoffmann, M. – Verfahren und vorrichtung zur herstellung". Patentschrift
- [11] Thomas GmbH and Co Technik and Innovation KG: TTI, 2022. <https://www.thomas-technik.de/de/>

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN -	2. Berichtsart Schlussbericht
3. Titel Verbundprojekt MoWag – Modularer Wagenkasten für Schienenfahrzeuge in Multi-Material-Leichtbauweise; Teilvorhaben: Entwicklung, Simulation und Erprobung neuer innovativer Werkstoffverbünde für Schienenfahrzeuge	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Marcus Knobloch (Fraunhofer IWU)	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2021
	6. Veröffentlichungsdatum -
	7. Form der Publikation Monografie
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V. Hansastraße 27 c, 80686 München für ihr Institut <ul style="list-style-type: none"> • Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU Reichenhainer Straße 88, 09126 Chemnitz 	9. Ber. Nr. Durchführende Institution -
	10. Förderkennzeichen 19I18012C
	11. Seitenzahl 46
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 11019 Berlin	13. Literaturangaben 11
	14. Tabellen 15
	15. Abbildungen 59
16. Zusätzliche Angaben -	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) -	
18. Kurzfassung Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „MoWag – Modularer Wagenkasten für Schienenfahrzeuge in Multi-Material-Leichtbauweise“ hatte die Entwicklung und Umsetzung von innovativen Bauweisenkonzepten für den Wagenkasten von Schienenfahrzeugen zum Ziel. Anhand flexibler Multi-Material-Module sollte die Integration dieser Module in ein bestehendes Schienenfahrzeugsystem nachgewiesen werden. Der Aufbau der einzelnen Module sollte sich dabei sehr variabel je nach Bauraum- und Schnittstellenanforderungen modifizieren lassen. Die Bauweisen sowie damit verbundene Konstruktions- und Fertigungsprozesse wurden exemplarisch an einem Wagenkastensegment als Technologieträger dargestellt. Dieses beinhalten ein Tragwerk mit ausgewählten Seiten- und Interieur-Komponenten sowie eine Bodenstruktur. Die Sicherstellung der geforderten Produkteigenschaften erfolgte mit Hilfe simulativer und experimenteller Validierung der Materialeigenschaften und Funktionen anhand von Technologieträgern. Gesamtziel des Projektkonsortiums war, anhand eines Demonstrators den Nachweis zu erbringen, dass die neu entwickelten Bauweisen eine signifikante Masseeinsparung von 5 bis 10 % gegenüber konventionellen Wagenkästen in Aluminium-Profilbauweise vermögen, ohne dabei Sicherheits-, Komfort- oder Brandschutzstandards zu vernachlässigen. Im Teilvorhaben des Fraunhofer IWU lag der Fokus auf der Entwicklung einer Technologie zur Herstellung lastpfadgerechter, brandgeschützter Pultrusionsprofile sowie der Verifizierung der Materialeigenschaften im Hinblick auf den Einsatz im Schienenfahrzeug.	
19. Schlagwörter Leichtbau, Pultrusion, Schienenfahrzeugbau, Wagenkasten, Polyurethan, Metallschaum, Aluminiumschaum	
20. Verlag	21. Preis Trifft nicht zu

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN n/a	2. type of document (e.g. report, publication) report
3. title Jjoint project MoWag - Modular body for rail vehicles in multi-material lightweight design; sub-project: Development, simulation and testing of new innovative material composites for rail vehicles	
4. author(s) (family name, first name(s)) Marcus Knobloch (Fraunhofer IWU)	5. end of project 31.12.2021
	6. publication date -
	7. form of publication monographie
8. performing organization(s) (name, address) Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V. Hansastraße 27 c, 80686 München with its institute <ul style="list-style-type: none"> • Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology IWU Reichenhainer Straße 88, 09126 Chemnitz 	9. originator's report no. -
	10. reference no. 19I18012C
	11. no. of pages 46
12. sponsoring agency (name, address) Federal Ministry for Economics and Climate Action (BMWK) 11019 Berlin	13. no. of references 11
	14. no. of tables 15
	15. no. of figures 59
16. supplementary notes -	
17. presented at (title, place, date) n/a	
18. abstract The research project "MoWag - Modular body for rail vehicles in multi-material lightweight design " aimed to develop and implement innovative construction concepts for the car body of rail vehicles. Using flexible multi-material modules, the integration of these modules into an existing rail vehicle system was to be demonstrated. The structure of the individual modules was to be very variable and modifiable according to installation space and interface requirements. The construction methods and the associated design and manufacturing processes were exemplified using a car body segment as a technology carrier. This includes a supporting structure with selected side and interior components as well as a floor structure. The required product properties were ensured with the aid of simulative and experimental validation of the material properties and functions using technology carriers. The overall objective of the project consortium was to demonstrate, by means of a demonstrator, that the newly developed construction methods are capable of achieving significant mass savings of 5 to 10 % compared to conventional car bodies in aluminum profile construction, without neglecting safety, comfort or fire protection standards. In the Fraunhofer IWU sub-project, the focus was on the development of a technology to produce load-path-compliant, fire-protected pultrusion profiles and the verification of the material properties with regard to their use in rail vehicles.	
19. keywords Lightweight design, pultrusion, rail vehicle design, car body, polyurethane, metal foam, aluminum foam	
20. publisher n/a	21. price n/a