



Schlussbericht

INTEGRAL

Zuwendungsempfänger: Hörmann Vehicle Engineering GmbH	Förderkennzeichen: 19I20009A
Förderprogramm: Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien	
Titel des Vorhabens: Integratives Leichtbaudach für Schienenfahrzeuge Teilvorhaben: Bauteilauslegung, Umsetzung und Integration	
Projektleiter: Reymond Kreuziger Tel.: +49 371 66653 141 E-Mail: reymond.kreuziger@hoermann-gruppe.com	
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2020 – 31.12.2023	
Projektträger: TÜV Rheinland Consulting GmbH	
Projektpartner: <ul style="list-style-type: none">• RCS GmbH Rail Components and Systems• Fraunhofer IWU Kunststoffzentrum Oberlausitz (FKO)• ARNELL Arno Hentschel GmbH• Heiterblick GmbH (assoziierter Partner)	
Fördermittelgeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)	
Projektträger: TÜV Rheinland Consulting GmbH	

Inhaltsverzeichnis

I. Kurzdarstellung	3
1 Aufgabenstellung	3
1.1 Gesamtprojektzielstellung	3
1.2 Aufgaben Teilprojekt HVE	3
2 Vorhabensvoraussetzungen	6
3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	6
4 Stand der Wissenschaft und Technik.....	9
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	12
II. Eingehende Darstellung	13
1 Projektergebnisse	13
1.1 Zusammenstellung und Festlegung der Bauteilanforderungen (AP1)	13
1.2 FKV-Bauweisenkonzepte für die integrative Dachstruktur (AP 2)	15
1.3 Materialauswahl FKV und umfassende mechanische Werkstoffcharakterisierung (AP3)....	22
1.4 Bauteilkonstruktion, Bauteilauslegung, Topologieoptimierung (AP4)	23
1.5 Gestaltungs- und Technologiekonzepte integrationsgerechter Metalleinleger (AP5).....	31
1.6 Entwicklung und Umsetzung wirtschaftlicher Füge-technologien und Systemintegration prototypischer FKV-Leichtbaudächer (AP 10).....	35
1.7 Messedemonstrator.....	36
2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	36
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	37
4 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	37
5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	38
6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	38
Abbildungsverzeichnis	40
Tabellenverzeichnis.....	40
Abkürzungsverzeichnis	41

I. Kurzdarstellung

1 Aufgabenstellung

1.1 Gesamtprojektzielstellung

Das Verbundvorhaben hatte als Hauptziel die Entwicklung und Serienproduktion von wettbewerbsfähigen Schienenfahrzeugdächern in Faserkunststoffverbund-Leichtbauweise mit spezifischen Merkmalen im Vergleich zu herkömmlichen metallischen Dachstrukturen.

Dabei sollte durch eine wesentliche Gewichtsreduzierung von 40 % bei gleichbleibenden Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften erreicht werden. Eine kompakte und funktionsintegrierte Bauweise des Faserkunststoffverbundes (FKV) mit einem um 70 % geringeren Montageaufwand wurde angestrebt. Des Weiteren war die Entwicklung serientauglicher und wirtschaftlicher Fertigungs- und Montageprozesse ein wichtiger Aspekt, um die bisherige manuelle und ressourcenintensive Fertigung mit Metallhalbzeugen zu ersetzen

Die angestrebte Masseoptimierung von Schienenfahrzeugdächern zeigte viele positive Effekte. Neben der Reduzierung der Antriebsenergie kann sie zu geringeren Betriebskosten, besserem Fahrverhalten, niedrigeren Wartungskosten und höheren Reichweiten batteriebetriebener Fahrzeuge führen. Um einen hohen Leichtbaugrad der Dachstruktur zu erreichen, wurden belastungsgerechte FKV-Bauweisen und Funktionsleichtbau genutzt. Der Fokus lag auf der Umsetzung material- und funktionsintegrierter Bauweisen sowie auf wirtschaftlichen Fertigungs- und Fügetechnologien, um die Wettbewerbsfähigkeit sicherzustellen.

Ein prototypisches Leichtbaudach aus Faserkunststoffverbund wurde entwickelt, um die Ergebnisse des Projekts zu demonstrieren. Besonderes Augenmerk lag dabei auf Dachstrukturen für Niederflurstraßenbahnen, da sie das größte Potential für integrative Leichtbaulösungen boten. Die Innovation dieses Projekts lag in der ganzheitlichen Betrachtung von der Entwicklung der Leichtbauweisen bis hin zur Technologieentwicklung für ein angepasstes, wirtschaftliches Fertigungsverfahren.

1.2 Aufgaben Teilprojekt HVE

Hörmann Vehicle Engineering hat das Teilprojekt „Bauteilauslegung, Umsetzung und Integration“ innerhalb des Forschungsprojektes bearbeitet und war hauptverantwortlich für die Arbeitspakete AP 1, AP 2, und AP 4. Unterstützend wurden in enger Kooperation mit den anderen Projektpartnern die Arbeitspakete AP 3, AP 5 und AP 10 bearbeitet. Im Folgenden werden die spezifischen Aufgabenstellungen der Arbeitspunkte dargestellt.

AP 1: Zusammenstellung und Festlegung der Bauteilanforderungen, Definition des demonstratorischen Straßenbahndaches

Das Ziel des Arbeitspaketes ist die Analyse und Bewertung von bestehenden Systemlösungen sowie den allgemeinen Anforderungen an Schienenfahrzeugdachstrukturen gemäß der

Projektzielstellung. Durch intensive Recherche des Standes der Technik zu großformatigen FKV-Strukturen sollen Potentiale nach leichtbauspezifischen, wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten ermittelt, analysiert und bewertet werden. Auf diese Weise werden die Grundlagen für die weiteren Arbeitspakete ermittelt sowie Zielgrößen, Randbedingungen und das Demonstratorbauteil definiert. Eine ausführliche Literatur-, Internet- und Patentrecherche sowohl zu Straßenbahndächern in Leichtbauweise als auch zu großformatigen FKV-Strukturen mit hohem Integrationsgrad wird durchgeführt. Die Anforderungen an Straßenbahndächer aus abgeschlossenen Projekten und Erfahrungswerten des Projektkonsortiums sowie aus bahntechnischen Normen werden analysiert. Anschließend erfolgt die Festlegung der Anforderungen und Erstellen eines Lastenheftes für die integrative FKV-Dachstruktur, sowie die Definition des Fahrzeugtyps und der Grundmaße für das prototypische Straßenbahndach als Demonstratorbauteil.

AP 2: FKV-Bauweisenkonzepte integrative Dachstruktur

Das Arbeitspaket 2 beschäftigt sich mit der Gestaltung intelligenter FKV-Bauweisen, die eine prozesstechnische Strukturintegration von Komponenten und Funktionselementen des Schienenfahrzeugdaches aufweisen. Durch den teilweisen oder vollständigen Verzicht von nachträglich gefügten Komponenten, reduzieren sich gleichermaßen das Bauteilgewicht und die Fertigungskosten. Dazu werden bisher separat montierte Anbauteile, wie etwa Klimakanäle, Befestigungsschienen für Dachkomponenten, Fahrzeugverbindungseinrichtungen, Kabelschächte und Tragstrukturen für Innen- und Außenverkleidungen während der Herstellung der FKV-Dachstruktur eingebracht. Die Integration erfolgt sowohl durch die Formgebung der Komponentengeometrie innerhalb der FKV-Struktur mit Hilfe angepasster Werkzeugsysteme (Einleger, Formkerne etc.) als auch durch Einbindung von Einlegerstrukturen während des Preformingprozesses, wie etwa Profile, Metallinserts und Sandwichkernwerkstoffe. Ein zusätzlicher Arbeitsschwerpunkt zur Steigerung des Leichtbaugrades ist die belastungsgerechte Kombination von GFK- und CFK-Werkstoffen, wobei sich der Einsatz der kostenintensiven, jedoch hochfesten und hochsteifen C-Fasern auf partielle, lasttragende Bereiche in der Dachstruktur, wo sie das größte Potential zur Aufnahme der mechanischen Lasten besitzen, beschränken. Die schwächer belastete „Reststruktur“ des Daches hingegen besteht aus niedrig-preisigen Glasfasertextilien und gewährleistet somit einen wettbewerbsfähigen Materialeinsatz für die Gesamtstruktur.

AP 3: Materialauswahl FKV und umfassende mechanische Werkstoffcharakterisierung

Die Basis für eine erfolgreiche Auslegung der integrativen FKV-Dachstruktur bilden wirklichkeitsgetreue mechanische Kennwerte der verwendeten Materialien. Bedingt durch die hohe Varianz der heterogenen, anisotropen Verbundwerkstoffe in Abhängigkeit der Verstärkungsfaser, dem Textiltyp, dem Harzsystem, der Verarbeitungstechnologie, der Nachbehandlung sowie der Belastungsrichtung lässt sich nicht auf Tabellenwerte im Vergleich zu isotropen Werkstoffen zurückgreifen, sondern es müssen die Kennwerte FKV-Werkstoffes für den individuellen Anwendungsfall ermittelt werden.

In AP 3 werden zunächst zielführende Glasfaser- und Kohlenstofffaserverstärkungstextilien und Matrixharzsysteme gemäß Projektzielstellung ausgewählt. Die Vorzugsvarianten werden anschließend anhand von Verbundwerkstoff-Probekörpern entsprechend des ausgewählten Herstellungsverfahrens umfassend charakterisiert und relevante Berechnungskennwerte ermittelt. Die erforderlichen Kennwerte sind dabei die anisotropen Ingenieurskonstanten (E , G , ν) sowie die Festigkeiten für die einzelnen Belastungen hinsichtlich Zug und Druck sowie intra- und interlaminarem Schub (ILSS).

AP 4: Bauteilkonstruktion, Bauteilauslegung, Topologieoptimierung

Auf Basis des in AP 2 erarbeiteten und ausgewählten Gestaltungskonzeptes für integrative FKV-Straßenbahndächer in Leichtbauweise werden 3D-CAD-Modelle der Gesamtbaugruppe konstruktiv umgesetzt. Alle Funktionskomponenten der jeweiligen Dachstruktur werden in der Konstruktion berücksichtigt und deren jeweilige Funktion in das neuartige Dach integriert. Mit Hilfe der 3D-Konstruktionsdaten, der in AP 3 ermittelten mechanischen Materialkennwerten sowie der festgelegten bahntypischen statischen und dynamischen Belastungen wird die anisotropen FKV-Dachstruktur mittels FEM berechnet und iterativ hinsichtlich Steifigkeit und Festigkeit dimensioniert. Durch die Erstellung eines 3D-Composite-Modells kann eine Auswertung der tatsächlichen Faserorientierung für jede Lage durchgeführt werden. Dieser Vorgang ist elementar für die zu erzielende Festigkeit des finalen Laminates. Die Konstruktionsdaten werden abschließend in die FEM zurück überführt und die Berechnungsergebnisse angepasst. Parallel wird das Laminat immer auf die Herstellbarkeit sowie auf die Kompatibilität mit dem vorausgewähltem Fertigungsverfahren geprüft und ggf. weiter darauf angepasst. Die Fertigungszeichnungen sowie der Laminatplan für die einzelnen Laminatzonen werden im Anschluss daran abgeleitet. Die Projektverantwortung übernimmt HVE. Es wurde versucht die Arbeitsinhalte so kompakt wie möglich zu halten. Allerdings ist davon auszugehen, dass mehrere konstruktive Varianten anzufertigen sind und somit auch der Berechnungsaufwand entsprechend steigt. Des Weiteren erfolgt eine Konzentration auf wesentliche Elemente und Geometrien für die Darstellung des Demonstrators, deren Relevanz für die spätere Adaption für Serienprozesse höher einzustufen ist und einer weiteren Optimierung im Anschluss an das Projekt bedarf. Des Weiteren soll in dem AP ein Integrationskonzept für Wasserstofftanks entwickelt werden, da diese Antriebstechnologie enormes Potenzial für zukünftige Mobilitätslösungen besitzt.

AP 5: Gestaltungs- und Technologiekonzepte integrationsgerechter Metalleinleger

Zur Befestigung der Dachgeräte auf dem Dach und zur Ableitung der auftretenden Kräfte in die Dachkonstruktion werden in AP 5 von der Firma ARNELL Metalleinleger konzipiert. Diese werden dann von HVE in FE-Simulationen mit den angenommenen Lastfällen getestet und bei ARNELL entsprechend weiterentwickelt.

AP 10: Entwicklung und Umsetzung wirtschaftlicher Füge-technologien und Systemintegration prototypischer FKV-Leichtbaudächer

Im Arbeitspaket 10 werden Konzepte für angepasste Verbindungssysteme und Füge-technologien unter Berücksichtigung sowohl der geometrischen Besonderheiten des Wagenkastens und der hohen Maßtoleranzen als auch der statischen und dynamischen Belastungen, thermischen Ausdehnungen, Korrosionseffekten und Witterungseinflüssen erarbeitet und bewertet. Dabei werden verschiedene kraft-, form- und/oder stoffschlüssige Verbindungssysteme, wie beispielsweise Klebeverbindungen oder Schweißverbindungen durch im FKV-Dach integrierte schweißbare Metallprofile, untersucht und zielführende Systeme auf die Anwendung übertragen sowie belastungsgerecht ausgelegt.

Zur experimentellen Analyse des Verbindungssystems und der entwickelten Füge-technologie werden exemplarische Dachanbindungsprofile gefertigt und mit angepassten FKV-Versuchsmustern gefügt. Die Qualität der Verbindung wird anschließend, auch unter Nutzung zerstörungsfreier Prüfmetho- den, umfassend analysiert und optimiert. Zum Nachweis des entwickelten Verbindungssystems und der angepassten Füge-technologie unter wirklichkeitsnahen Bedingungen wird als weiteren Entwicklungsschritt eine tragende Wagenkastenstruktur mit angepasster Schnittstelle zum Dach gefertigt, mit dem FKV-Prototypendach verbunden und validiert wird

2 Vorhabensvoraussetzungen

Die Hörmann Vehicle Engineering GmbH (HVE) mit Firmensitz in Chemnitz ist ein Unternehmen der Hörmann Industries GmbH. HVE ist ein weltweit agierender Engineering-Partner und bietet zuverlässige Gesamtfahrzeugkompetenz für Schienenfahrzeuge und Entwicklungs-Know-How für Straßenfahrzeuge von der ersten Idee bis zur Serie. Im Fokus stehen dabei die Bestimmung des Fahrzeugkonzeptes, die Fahrzeugentwicklung, die Tests auf dem Fahrzeug inkl. Vorbereitung und die Produktionsunterstützung inkl. Homologation.

Hinzu kommt eine langjährige Erfahrung von HVE im Umgang mit verschiedensten Anforderungen, Materialien und Fertigungstechnologien. Eine leistungsfähige Berechnungs- abteilung mit Kompetenzen in statischer und dynamischer Strukturanalyse, Betriebsfestigkeit, Lebensdauerberechnung und Crash-Simulation ergänzt die effiziente Entwicklung neuer Produkte. Über Jahre wurde so fundiertes Know-how im Bereich Leichtbau- und Faserverbundwerkstoffe aufgebaut.

HVE konnte bei diesem Forschungsvorhaben vorhandenes Knowhow einbringen und zusätzlich neues Wissen für zukünftige Entwicklungsdienstleistungen in dem Bereich des Leichtbaus generieren.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt INTEGRAL wurde am 01.09.2020 gestartet. Die ursprüngliche Laufzeit des Forschungsvorhabens von 36 Monaten wurde durch einen Antrag kostenneutral um 4 Monate bis zum 31.12.2023 verlängert. Die Gesamtprojektleitung lag bei Hörmann Vehicle

Engineering. Das Projekt wurde in 12 Arbeitspakete (AP) unterteilt, die in Kooperation von den jeweiligen Projektpartner bearbeitet wurden.

Tabelle 1: Arbeitspakete des Förderprojektes

Nr.	Kurzbeschreibung	Zuständigkeit
AP1	Zusammenstellung und Festlegung der Bauteilanforderungen für Schienenfahrzeugdächer in FKV-Bauweise	<u>HVE</u> , RCS, FKO
AP2	Erarbeitung von leichtbau- und fertigungsgerechten FKV-Bauweisenkonzepten mit hohem Integrationsgrad gemäß Projektzielstellung	<u>HVE</u> , RCS, FKO
AP3	Materialauswahl FKV und umfassende mechanische Werkstoffcharakterisierung; Definition von Stoffgesetz und Versagenskriterium	<u>FKO</u> , HVE
AP4	Bauteilkonstruktion; faserverbundgerechte Bauteilauslegung und Topologieoptimierung mittels FEM; Definition des Laminataufbaus des GF/CF-Hybridverbundes	<u>HVE</u> , FKO
AP5	Gestaltungskonzepte und technologische Umsetzung zur Herstellung belastungs- und FKV-gerechter Metalleinleger zur Integration in den Laminataufbau	<u>ARNELL</u> , FKO
AP6	Kennwertermittlung und Auslegung der Angussstrategie für den Harzinfusionsprozess	FKO
AP7	Prozess- und Bauweisenvalidierung an exemplarischem, komplexem FKV-Versuchsmuster	<u>RCS</u> , FKO, HVE
AP8	Entwicklung Formwerkzeug und Einlegersysteme für integrative FKV-Dachstruktur	<u>RCS</u> , FKO
AP9	Erarbeitung effizienter Preformingprozesse und Herstellung prototypischer FKV-Dachstrukturen zur Demonstration der erarbeiteten Fertigungstechnologien und der Bauteilfunktion	<u>RCS</u>
AP10	Entwicklung und Umsetzung wirtschaftlicher Füge-technologien und Systemintegration prototypischer FKV-Leichtbaudächer in die Wagenkastenstruktur	<u>FKO</u> , HVE
AP11	Umsetzung eines angepassten Strukturprüfstandes und Durchführung statischer und Dauerbelastungs-Tests an Demonstratordachstrukturen	<u>FKO</u>
AP12	Ergebnisaufbereitung, Evaluation und Ableitung von technischen Maßnahmen zur Optimierung der Fertigungstechnologien und Abläufe	Alle Projektpartner

Das Forschungsprojekt wurde auf Grundlage dieses Arbeitsplanes bearbeitet und mit der Erreichung der Projektziele erfolgreich abgeschlossen. Basierend auf verschiedenen Konstruktionsentwürfen für das Leichtbaudach erfolgte nach Festlegung der Vorzugsvariante die Berechnung und Bauteilauslegung. Mit diesen Ergebnissen konnte unter Berücksichtigung

fertigungstechnischer Restriktionen der Lagenaufbau des FKV-Halbzeuges definiert werden. Parallel dazu wurden durch FEM-Simulationen die Kraftverteilung in dem Lagenaufbau ermitteln und in exemplarischen Biegeversuchen an Probekörpern untermauert. Anhand der durchgeführten Versuche konnten die grundsätzliche Eignung der geplanten Fertigungsstrategie nachgewiesen werden.

Im weiteren Projektverlauf erfolgte die Entwicklung und fertigungstechnische Umsetzung eines VARI-Werkzeugs für ein Harzinfusionsverfahren (Vacuum assisted resin infusion) zur Herstellung der Leichtbau-Dachstruktur. In der finalen Projektphase konnten anschließend zwei Prototypen für die Verifizierung des Fertigungsverfahrens hergestellt werden. Die Testung der mechanischen Belastbarkeit erfolgte auf einem separat entwickelten Dauerversuchsstand.

IV/2020	I/2021	II/2021	III/2021	IV/2021	I/2022	II/2022	III/2022	IV/2022	I/2023	II/2023	III/2023	IV/2023
AP 1: Anforderungen												Verlängerung um vier Monate
AP2: Bauweisenkonzepte												
AP3: Werkstoffcharakterisierung												
AP4: Bauteilkonstruktion												
	AP5: Metalleinleger											
	AP6: Harzinfusionsprozess											
	AP7: FKV-Versuchsmuster											
			AP8: Formwerkzeug und Einlegersysteme									
				AP9: Herstellung des Demonstratordaches								
				AP10: Fügetechnologie und Systemintegration								
					AP11: Prüfstandentwicklung und Tests							
						AP12: Ergebnisse						

Abbildung 1: Projektzeitplan mit Arbeitspaketen nach kostenneutraler Verlängerung

Als Kontrollpunkte zur Überprüfung des Projektfortschrittes während der gesamten Laufzeit dienten drei Meilensteine (MS):

Tabelle 2: Festgelegte Meilensteine

Nr.	Kurzbeschreibung	Zeitpunkt
MS1	Vorzugsvariante für optimales Bauweisenkonzept des FKV-Leichtbaudaches konstruiert und ausgelegt	Projektmonat 18
MS2	Versuchsmuster erfolgreich validiert und Demonstratorwerkzeug zur Herstellung der integrativen FKV-Dachstruktur umgesetzt	Projektmonat 27
MS3	Funktionsnachweis für Demonstratorbauteil erbracht	Projektmonat 34

Bei Nichterreichung eines Meilensteins wäre eine Iterationsschleife erforderlich, um die Abweichungen zu analysieren und mögliche Schwachstellen sowie die Überprüfung der Vorarbeiten und Prozesse unter Berücksichtigung des Zeithorizonts zu ermöglichen und die sichere Erreichung des nächsten Meilensteins abzuschätzen.

4 Stand der Wissenschaft und Technik

Konventionelle Dachstrukturen im Schienenfahrzeugbau sind gekennzeichnet durch Längs- und Querträger aus Stahl oder Aluminium, die durch vierteilige Montageelemente mit dem Rohbau verschweißt sind (Abbildung 2). Die Dachabdeckung bildet eine versteifte Schale in Stringer- oder Sandwichbauweise, die mit der metallischen Tragstruktur verschweißt oder dicht verklebt ist. Zur Aufnahme der auf dem Fahrzeugdach befindlichen Anbauteile werden Profilschienen auf der Dachschale befestigt. Die Stirnflächen des Fahrzeugdaches bestehen typischerweise aus einem Metallflansch zur Montage der Fahrzeugverbindungseinrichtungen (z. B. Nickgelenk, Faltenbalg, Leitungsbrücken).

Die hohe Teilevielfalt der Einzelkomponenten führt zu einem hohen Montageaufwand zur Herstellung des Fahrzeugdaches. Die Fertigung großflächiger Dachstrukturen lässt sich bei den schienenfahrzeugtypischen Kleinserien bisher nur bedingt wirtschaftlich automatisieren, wodurch derartige Prozesse noch sehr handarbeitsintensiv sind. Durch den steigenden Kostendruck aus Fernost wird es für Hochlohnländer zunehmend schwieriger, diese Fertigungsprozesse in Deutschland aufrecht zu erhalten.

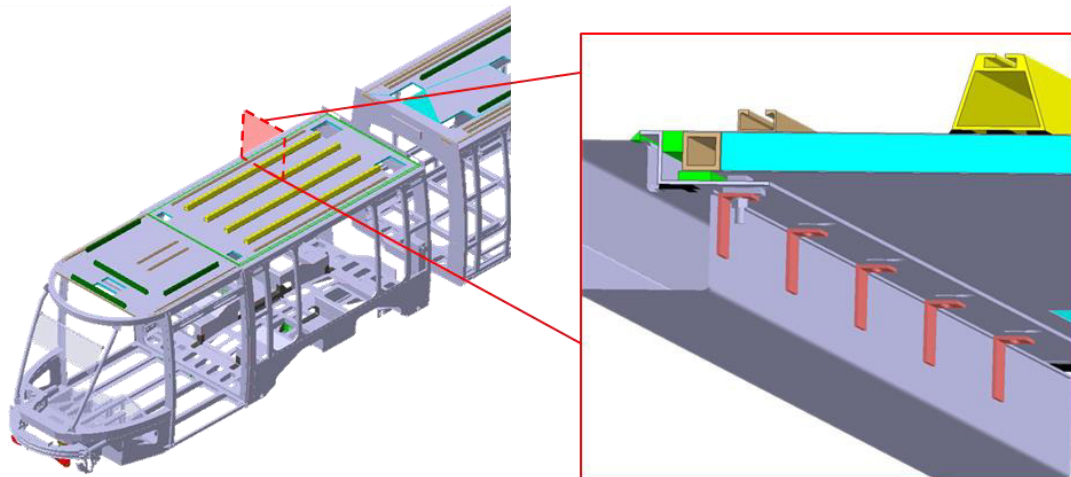


Abbildung 2: Beispiel einer konventionellen Dachstruktur einer Niederflurstraßenbahn [1]

Die differentielle Metallbauweise von Schienenfahrzeugdächern führt zudem zu einem hohen Bauteilgewicht. Eine große Masse des Gesamtfahrzeugs wirkt sich insbesondere bei Nahverkehrsügen und Straßenbahnen durch die häufige Beschleunigung des Fahrzeuges negativ auf den Energieverbrauch aus. Darüber hinaus wachsen die Anforderungen der Fahrzeugbetreiber (Verkehrsbetriebe) hinsichtlich einer Reduzierung der Achslast zur Verringerung des Wartungsaufwandes, zur Steigerung der Transportkapazität bei unveränderter Infrastruktur (Schienen, Brücken etc.) sowie zur Erhöhung der Reichweite von netzunabhängigen Fahrzeugen.

Insbesondere moderne Niederflurstraßenbahnen stellen weitreichende Anforderungen an die Dachstruktur. Diese ist nicht nur entscheidend für die Versteifung der Fahrzeuggesamtstruktur, sondern muss auch große statische und dynamische Lasten durch die vielfältigen Fahrzeugaggregate, wie etwa Energiespeicher, Stromwandler, Bremswiderstände, Pantograph, Klimageräte und Telekommunikationseinrichtungen aufnehmen, die u. a.

aufgrund des begrenzten Bauraumes im Fahrwerksbereich auf dem Fahrzeugdach angebracht werden.

Langfristig wird sich die Anzahl an Fahrzeugaggregaten aufgrund des hohen Anteils nichtelektrifizierter Strecken weiter steigern. Für die Realisierung eines emissionsfreien Bahnverkehrs werden batterie- und brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge eine immer wichtigere Rolle spielen. In den letzten Jahren hat sich die Technologie in Bezug auf Lebensdauer, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit erheblich weiterentwickelt und nun auch im Transportsektor Beachtung gefunden.

Die dadurch entstehenden großen mechanischen Belastungen haben wiederum gewichtsintensive metallische Dachstrukturen zur Folge, die den Schwerpunkt weiter erhöhen und somit zu einem ungünstigen Fahrverhalten und einer hohen Beanspruchung des Gesamtfahrzeugs führen. Der Anteil des Straßenbahndaches beträgt dabei ca. 7 % vom Gesamtfahrzeuggewicht [1] und bildet somit eine entscheidende Komponente innerhalb der Fahrzeugmassebilanz. Es besteht daher ein beträchtlicher Bedarf an neuartigen, integrativen Leichtbaukonzepten für Dachstrukturen von Schienenfahrzeugen zur deutlichen Reduktion von Bauteilmasse und Montageprozessen. Die daraus resultierende hohe Packungsdichte an Anbauteilen auf dem Fahrzeugdach führt zu neuen Herausforderungen bei modernen Straßenbahnen in Niederflurbauweise. Die Verlagerung der Anbauten sowie das hohe Eigengewicht der Wagensegmente bedingt bei konventionellen Wagenstrukturen eine erhöhte Massekonzentration auf dem Dachsegment und eine Verschiebung des Masseschwerpunktes.

Um diesem Innovationsbedarf zu entgegnen, wurden in der Vergangenheit bereits erste Konzepte von Schienenfahrzeugwagenkästen in CFK- oder GFK-Bauweise entwickelt und prototypisch umgesetzt. Die Abbildung 3 zeigt eine der ersten FKV-Wagenkastenstrukturen in Leichtbauweise, nahtlos hergestellt im Fasernasswickelverfahren durch das Schweizer Unternehmen Schindler. Der Wagenkasten in GFK-Bauweise zeigte entscheidender Leichtbauvorteile gegenüber der konventionellen Metallbauweise, konnte sich jedoch aus wirtschaftlichen Gründen aufgrund der aufwendigen, langwierigen Fertigung im Wickelverfahren nicht als Serienbauteil durchsetzen.



Abbildung 3: FKV-Wagenkastenstruktur im Fasernasswickelverfahren [2]

Auch andere Unternehmen und Forschungseinrichtungen waren von dem Leichtbaupotential der Faserverbundwerkstoffe für Wagenkästen fasziniert und entwickelten sogar hochbelastete Doppelstockwagenkästen aus FKV (Abbildung 4). Dabei wurden mehrere flächige Segmente in biegesteifer FKV-Sandwichbauweise hergestellt und anschließend durch Kleben und Überlamine miteinander verbunden.

Trotz der Reduktion der Fertigungszeiten gegenüber dem gewickelten „Schindler-Waggon“ hat sich dieses Konzept ebenfalls nicht im Schienenfahrzeugmarkt durchsetzen können. Die Gründe liegen hier sowohl in den hohen Prozesskosten als auch in den hohen Materialkosten durch den ganzheitlichen Einsatz teurer FKV-Materialien in der Gesamtstruktur. Viele Bereiche des Wagenkastens, insbesondere mit ebenen oder einfach gekrümmten Konturen ohne großen Montageaufwand durch Anbauteile, können mit Metallbauweisen deutlich preiswerter und ebenfalls leichtbaugerecht hergestellt werden. Dazu zählen beispielweise die Seitenwandstrukturen, die in heutiger Aluminium-Strangpressprofil-Bauweise deutlich unter den Fertigungskosten von FKV-Bauteilen liegen.



Abbildung 4: Doppelstock-Wagenkästen in GFK [3] und CFK-Bauweise [4]

Der Wettbewerbsvorteil von FKV gegenüber Metallen liegt insbesondere bei geometrisch komplexen, vielseitig belasteten Strukturen mit vielen Anbauteilen und somit hohem Potential zur Funktionsintegration. Im Bereich der Wagenkästen bildet vor allem das Schienenfahrzeugdach von Stadt- und Straßenbahnen ein Bauteil, das die Potentiale von FKV vollkommen ausschöpfen kann. Bei modernen Triebwagenköpfen hat sich FKV bereits als Werkstoff der ersten Wahl etabliert. Die Kombination aus den hohen mechanischen Werkstoffeigenschaften sowie der Möglichkeit der wirtschaftlichen Fertigung von komplexen Geometrien in geringen Stückzahlen prädestiniert die FKV für den Einsatz bei hochbelasteten Zugfrontmasken (Abbildung 5).

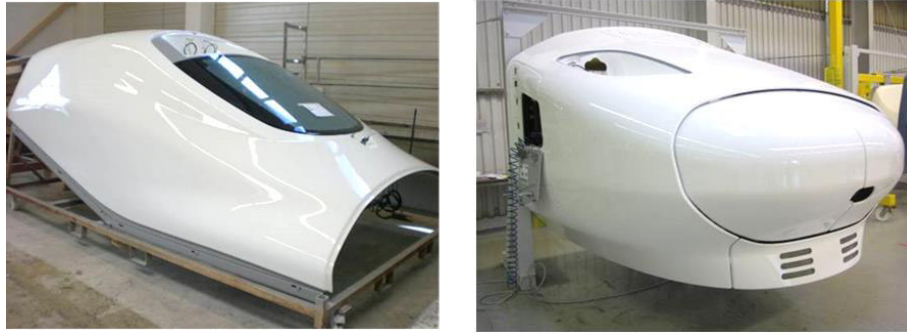


Abbildung 5: Frontmaske des Talgo Harem Schnellzuges in GFK-Sandwichbauweise [5]

Die Übertragung dieser Erfolge auf die Wagenkastenstrukturen setzt eine innovative Strategie voraus, welche die Eigenschaften aller Materialien berücksichtigt und kombiniert. Grundlage für dieses Konzept muss die Unterscheidung zwischen den verschiedenen Bereichen der Wagenkastenstruktur und deren Anforderungen sein.

Literaturverzeichnis

- [1] Fa. Hörmann Vehicle Engineering GmbH, internes Dokument, 2019
- [2] Flemming, M.; Roth, S.; Ziegmann, G.: Faserverbundbauweisen – Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix. Springer, 2002
- [3] Carruthers, J.: The research requirements of the transport sectors to facilitate an increased usage of composite materials. Part III, NewRail – Newcastle Centre for Railway & Transport Research, ComposiTN, 2004
- [4] Winter, J.; König, J.: Neue Bauweisen im Leichtbau für Hochgeschwindigkeitstrieb-züge. Verbundprojekt Next Generation Train, Veröffentlichung des DLR e.V., 2011
- [5] Scholz, S.; Müller, M.: Trends und Innovationen bei FKV-Strukturen in der Schienen-fahrzeugindustrie. Vortrag: BRIDGE Conference, Oppole, 08.04.2016

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Förderprojekt wurde gemeinschaftlich durch die Projektpartner Hörmann Vehicle Engineering GmbH (HVE) als Koordinator, RCS GmbH Rail Components and Systems, ARNELL Arno Hentschel GmbH und das Fraunhofer-Institut IWU Kunststoffzentrum Oberlausitz (FKO) durchgeführt. Alle Aufgaben wurden eigenverantwortlich, aber in enger Abstimmung mit den beteiligten Projektpartnern bearbeitet. Während der Vorhabenlaufzeit fanden regelmäßig Projekttreffen in Form von Webmeetings, und soweit es möglich war, als Präsenzveranstaltung statt. Darüber hinaus stimmen sich die einzelnen Partner nach Bedarf untereinander ab. Die Heiterblick GmbH unterstützte das Vorhaben als assoziierter Partner.

II. Eingehende Darstellung

1 Projektergebnisse

1.1 Zusammenstellung und Festlegung der Bauteilanforderungen (AP1)

Literatur- und Patentrecherche

Zu Beginn des Projektes wurde eine ausführliche Literatur- und Patentrecherche zu vorhandenen und vergleichbaren Schienenfahrzeugdächern und Leichtbausystemen durchgeführt. Der Fokus lag dabei auf der Leichtbauweise von tragenden Strukturen im Schienenfahrzeugbau wie zum Beispiel der Sandwichbauweise und auf den Verbindungstechniken, die eine Anbindung der Leichtbaustrukturen an den metallischen Wagenkasten ermöglichen. Wichtig waren weiterhin die Brandschutzmaßnahmen bei Faserkunststoffmaterialien, die Reparaturfähigkeit der hergestellten Faserkunststoffverbunde und in Anbetracht der ökologischen Bedeutung, die Recyclingmöglichkeiten des zukünftigen Daches nach der angedachten Laufzeit von mindestens 30 Jahren. Obwohl es mehrere Ansätze für Leichtbau von Komponenten in der Schienenfahrzeugtechnik in der Vergangenheit gab, existiert bis jetzt keine im Personennahverkehr eingesetzte Straßenbahn mit einem Leichtbaudach aus reinem Faser-Kunststoff-Verbundmaterial, wie es in diesem Projekt geplant war.

Lastenheft

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurden alle relevanten technischen Anforderungen für das Leichtbaudach analysiert und in einem Lastenheft dokumentiert. Durch die Integration von Funktionalitäten in das Leichtbaudach, wie der Haltestangenanbindung, der Leitungsverlegung und den Klimakanälen, werden mehr Anforderungen an das Dach gestellt als normalerweise üblich (z.B. in den Bereichen Brandschutz, Abschirmung, Maintenance).

Die Lastfälle für das Dach wurden wie folgt definiert.

- 6 Beschleunigungslastfälle:
in $\pm x$, $\pm y$, $\pm z$ + Eigengewicht nach VDV 152
- 4 Lastfälle Verwindung:
Anheben an vier Ecken, davon je eine Ecke um 10 mm angehoben

Layout Dachaufbauten

Durch die moderne Niederflurbauweise der Straßenbahn ist es notwendig die Geräte, die sonst im Unterflurbereich Platz finden können, auf dem Dach des Fahrzeuges unterzubringen. Besonders bei der Variante mit Wasserstoffantrieb bedeutet das eine nahezu vollständige Belegung der Dachflächen mit Aufbauten. In Abbildung 6 sieht man die Dachgeräte, die für den Betrieb mit Oberleitung (schwarz) benötigt werden und die Geräte für den ergänzenden Wasserstoffantrieb (blau). Das bedeutet für das Dach eine größere Belastung als bei reinem Oberleitungsbetrieb. Der angestrebte Nutzen der Straßenbahn auch nichtelektrifizierte Teilabschnitte des Streckennetzes ohne Probleme zu überbrücken, begründet die Notwendigkeit der hohen Masseinsparung in der Dachstruktur. Aus diesem Grund sollte das

INTEGRAL-Dach 40 % leichter als konventionelle Dächer werden, dabei allerdings seine Strukturfestigkeit im Vergleich zum Stahldach beibehalten.

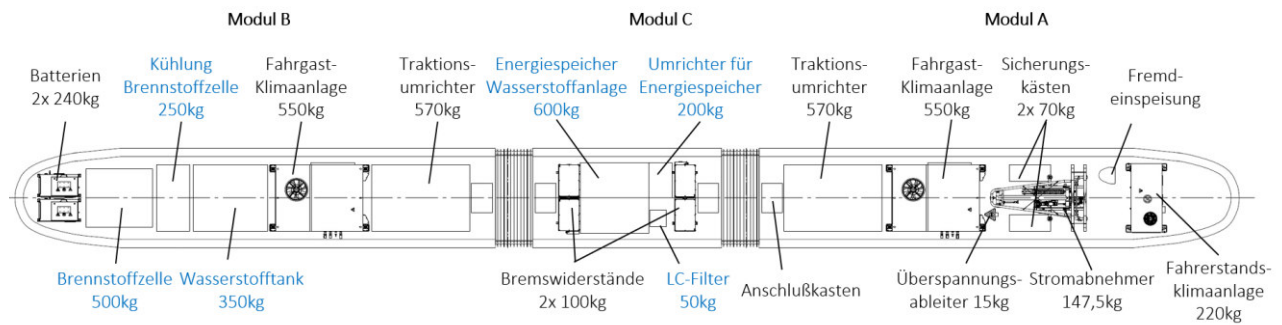


Abbildung 6: Layout für Dachaufbauten

Definition des FKV-Funktionsmuster

Zur Bestimmung der mechanischen Kennwerte wurden zunächst einfache Funktionsmuster hergestellt. Ein repräsentativer Ausschnitt des zu entwickelnden Straßenbahndaches mit den Abmessungen 1,5m x 1,5m wurde zunächst als FKV-Versuchsmuster ausgewählt. Dabei lag der Fokus auf dem Nachweis der Machbarkeit für den Herstellungsprozess und die Bauweise. Es wurden verschiedene Teilaspekte wie Verbindungstechniken, Metalleinleger und die Entformung des Funktionsmusters untersucht. Des Weiteren wurde die Drapierbarkeit der ausgewählten Textilien getestet, ebenso wie das Handling und die mögliche Fixierung der Schaumkernteilstücke und der Harzfluss in den unterschiedlichen Materialien. Der Ausschnitt für die geplante Montage der Fahrzielanzeige wurde verkleinert. Die Entformung des Funktionsmusters aus der Werkzeugform gab Hinweise auf eine geometrische Verbesserung von Radien und Entformungsschrägen. Zudem konnte die Ausbreitung des Harzes mit den vorher erfolgten Permeabilitätsversuchen verglichen und die Angusstrategie verfeinert werden.

Definition des Demonstratordaches:

Im weiteren Projektverlauf wurde der Aufbau eines exemplarischen Daches und die Abbildung aller notwendiger Strukturen vorangetrieben. Als Demonstrator wurde das Dach von Modul 1 einer Straßenbahn ausgewählt (inkl. Klimaanlage, Pantograph, Maximalbelastung durch Aufbauten für Wasserstoffantrieb). Das Demonstratordach wurde so aufgebaut, dass es auf einem üblichen Wagenkasten platziert werden kann, um es später einmal auf der Schiene zu testen. Die Möglichkeit des Einbaus einer Fahrzielanzeige mit üblicher Größe wurde in dem Entwurf im Seitenträger des Demonstratordaches vorgesehen. Die in diesem Arbeitspaket gewonnenen Erkenntnisse und getroffenen Festlegungen wurden mit RCS und FKO abgestimmt und wurden später in Arbeitspaket 9 bei der Herstellung des Demonstrators umgesetzt.

1.2 FKV-Bauweisenkonzepte für die integrative Dachstruktur (AP 2)

Konstruktion Stahldachvariante als Vergleichsgrundlage

Als Vergleichsgrundlage wurde eine Variante aus Stahl konstruiert, die die Besonderheiten des Designentwurfes von Heiterblick enthielt. Diese wurden bei der Entwicklung des Leichtbaudaches beachtet. Eine designgerechte Konstruktion und Zeichnungsableitung der Stahlvariante ist notwendig, um eine genaue Kalkulation zu Herstellungskosten und Gewicht treffen zu können. Besondere Herausforderungen stellten bei dem vorgegebenen Design die einseitig hochgezogenen Panoramafenster und das geschwungene Deckendesign im Türbereich dar. Diese Asymmetrie hatte Auswirkungen auf den Verlauf der Klimakanäle und führte zu einem geringeren Querschnitt des Längsträgers über den Türausschnitten. Die Stahlvariante ist als Stahlskelett mit Blechbeplankung in Differentialbauweise aufgebaut. Im Vergleich zum Leichtbaudach muss das Gewicht, der in das Leichtbaukonzept integrierten Baugruppen dazu addiert werden (u.a. Klimakanäle, Haltestangenbefestigung, Leitungsverlegung)

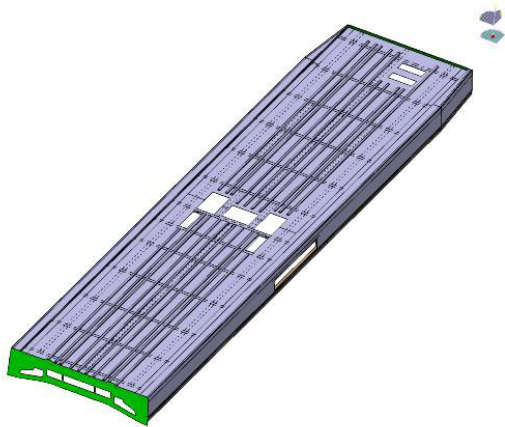


Abbildung 7: Stahldach mit Durchbrüchen für Klimaanlage

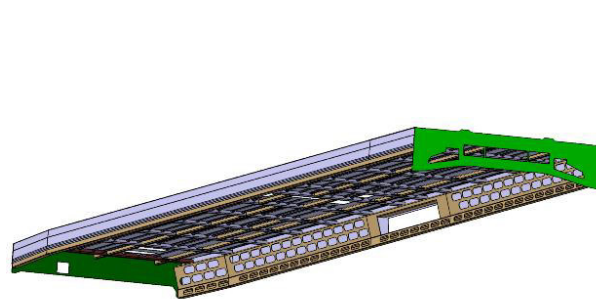


Abbildung 8: Asymmetrischer Aufbau

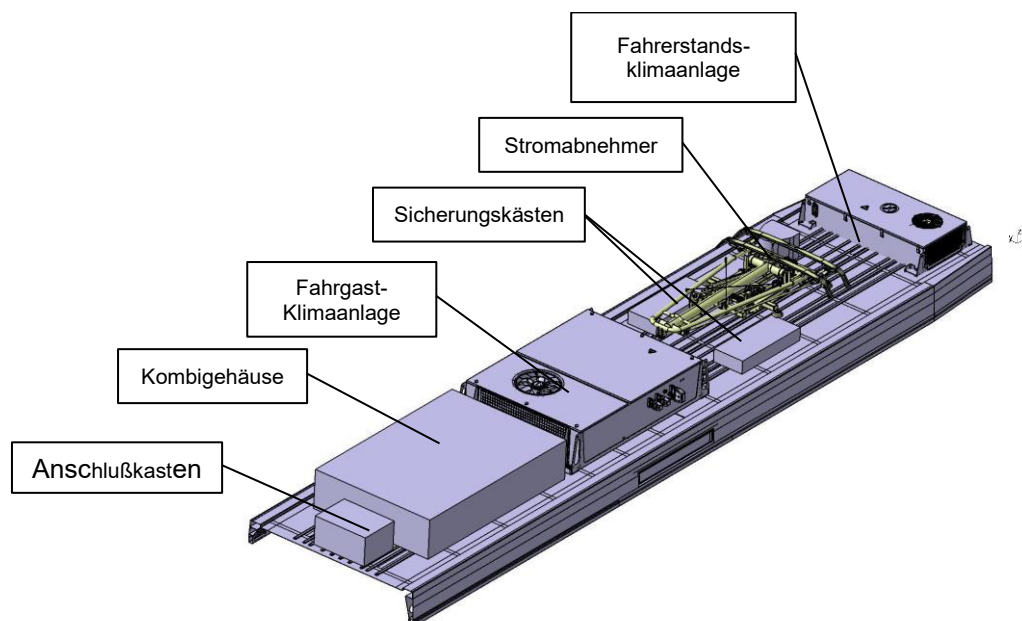


Abbildung 9: Schwere Geräte auf Mittelachse angeordnet

FEM-Berechnung der Stahldachvariante

Zur Evaluierung der Eignung der konstruierten Stahlvariante für die spezifischen Anforderungen wurde eine FE-Analyse anhand der Lastfälle gemäß DIN EN 12663 (Kategorie P-V) durchgeführt. Die Lagerpunkte wurden an die Positionen der Fenstersäulen des metallischen Wagenkastens gesetzt. Die höchste Belastung durch die Dachgeräte tritt bei einer Kombination aus Dachlast Modul A und Modul B auf, aus dem Grund wurde diese für die Berechnungen verwendet.

Berücksichtigte Dachlasten (von vorn nach hinten):

Brennstoffzelle 500kg

Kühlung Brennstoffzelle 250kg

Wasserstofftank 350kg

Klimaanlage 550kg

Traktionsumrichter 570kg

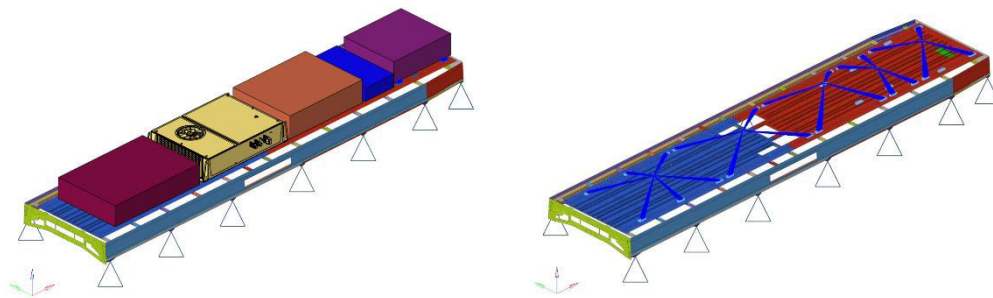


Abbildung 10: Lastverteilung auf dem Dach (links) und die resultierenden Kräfte (rechts)

Leitungsverlegung

Im Rahmen der Planung der Verlegung der Kabel von den Anschlusskästen in den Längsträger sind verschiedene Aspekte zu berücksichtigen.

Diesbezüglich sind zunächst Konzepte zur Verlegung der Kabel zu erstellen. Hierbei ist insbesondere auf die Einhaltung der Mindestbiegeradien zu achten. Zudem sind die Maintenance-Anforderungen zu beachten. Zunächst ist sicherzustellen, dass die Mindestbiegeradien der Kabel nicht unterschritten werden, um Beschädigungen oder Leistungsverluste zu vermeiden. Eine zu enge Biegung der Kabel ist zu vermeiden, da dies eine Beeinträchtigung der Signalübertragung zur Folge haben kann.

Des Weiteren sind die Anforderungen an die Instandhaltung zu berücksichtigen. Die Verlegung der Kabel sollte so erfolgen, dass sie leicht zugänglich sind, um im Falle von Reparaturen oder Wartungsarbeiten schnell darauf zugreifen zu können. Es ist von essentieller Bedeutung, dass die Verlegung der Kabel so erfolgt, dass eine leichte Identifikation und ein einfacher Austausch im Falle einer erforderlichen Reparatur oder Wartung gewährleistet sind.

Im Allgemeinen ist es von entscheidender Bedeutung, bei der Planung der Verlegung der Kabel von den Anschlusskästen in den Längsträgern sowohl die technischen Anforderungen als auch die praktischen Aspekte zu berücksichtigen, um eine effiziente und zuverlässige Verbindung sicherzustellen.

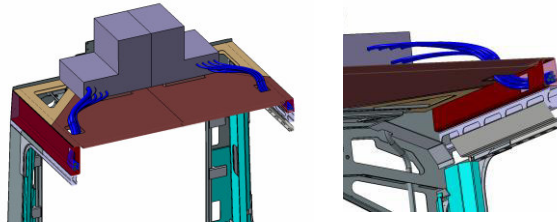


Abbildung 11: Elektro-Anschlusskästen aus CFK innen positioniert

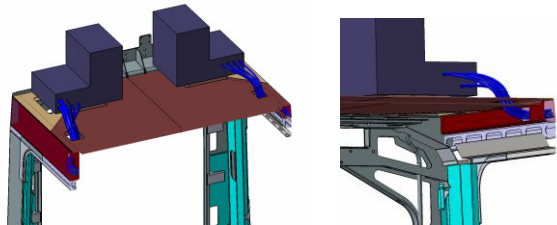


Abbildung 12: Elektro-Anschlusskästen aus CFK außen positioniert

Einteilige oder zweiteilige Bauweise

Die ersten Konzeptentwürfe befassten sich mit der Frage, ob das Leichtbaudach in zwei parallelen Schritten mit anschließender Montage oder komplett in einem Schritt und somit mit einem einzigen Werkzeug gefertigt werden kann. Die Seitenträger werden dabei entweder in das Dach integriert oder in zwei Schritten getrennt gefertigt. Der Vorteil einer Fertigung in einem Schritt ist evident: Es werden sowohl Fertigungs- als auch Montageaufwand, Maschinenbelegungszeit und Personaleinsatz reduziert. Diese Variante wurde daher weiterverfolgt.

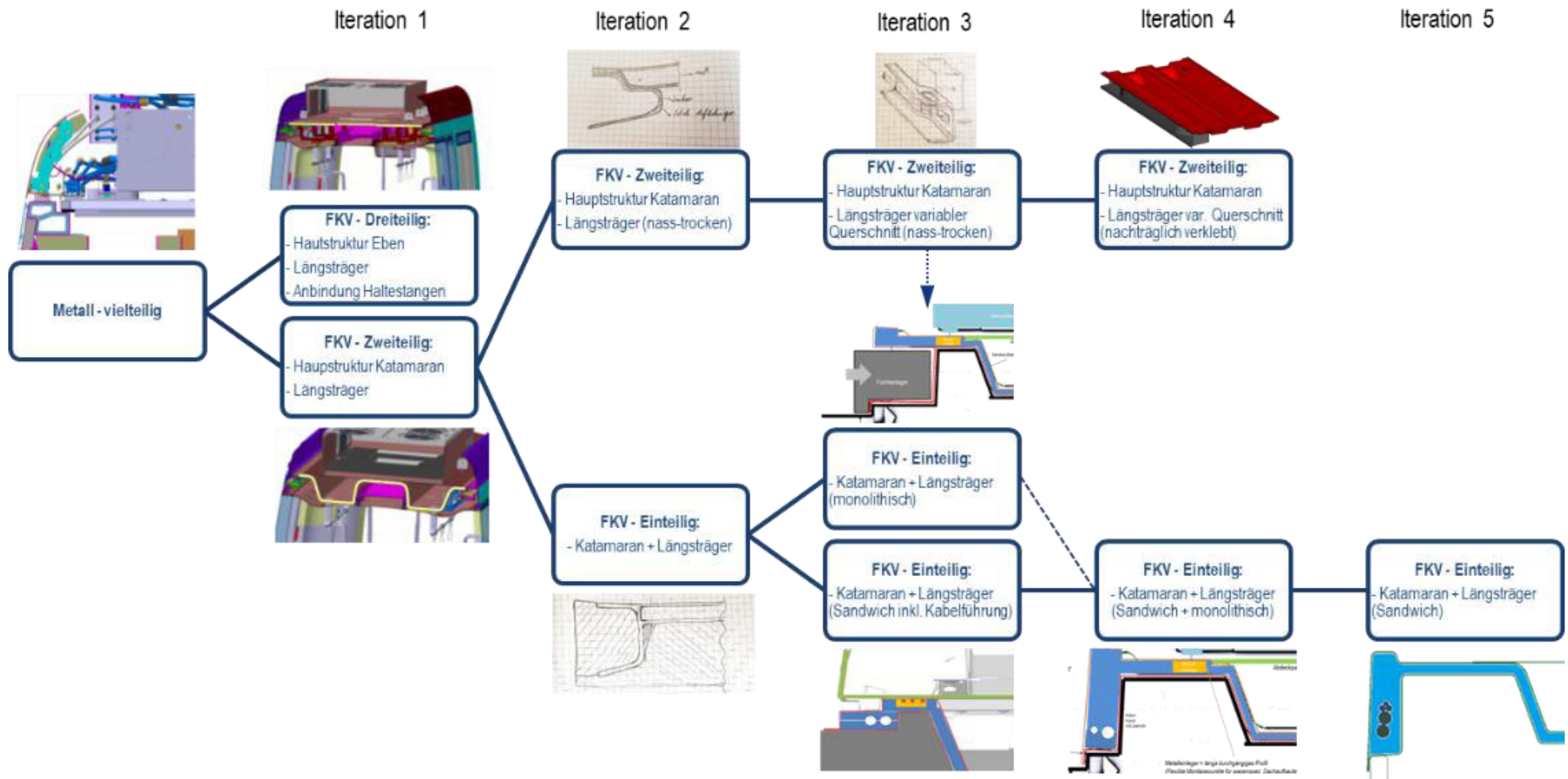


Abbildung 13: Iterationsschritte bei der Entwicklung der Bauweise

Gestaltung Seitenträger

Die Seitenträger, in denen die Elektrokabel lang geführt werden, waren in den früheren Konzepten offen mit einer Rippenverstärkung ausgeführt und sollten lediglich mit Hilfe der Seitenverkleidung nachträglich geschlossen werden. Eine andere Variante sah eine geschlossene Struktur vor, bei der die Elektrokabel in einem Hohlraum eingezogen werden können. Aufgrund der Vorteile für die Fertigung mittels Vakuuminfusionsverfahren wurde diese Variante weiterentwickelt.

Dachformen

Im Rahmen der Untersuchung wurden diverse Ausformungen und Dachprofile hinsichtlich ihrer Eignung analysiert. In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern kristallisierten sich zwei Profile heraus, die in der Folge weiterentwickelt wurden. Hierbei handelte es sich um ein gerades Dach mit Omegaprofilen (Abbildung 14) als Versteifungen sowie ein Dach mit ausgeformten Profilen, welches optisch an einen Katamaran erinnerte.

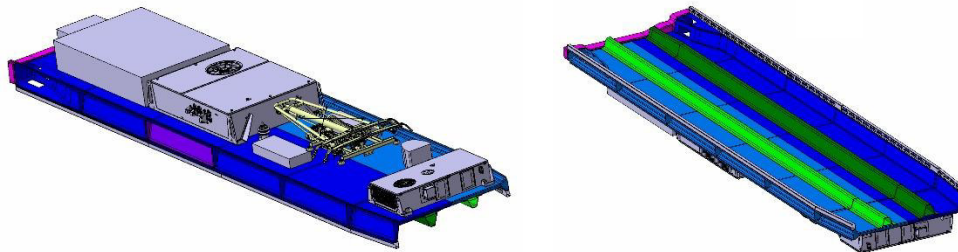


Abbildung 14: Konzeptentwurf Omegaprofil (links Oberseite, rechts Unterseite)

Für den Aufbau der Dachgeräte sind beide Varianten gut geeignet. Das Konzept Katamaran (Abbildung 15) bringt dabei allerdings mehr Stabilität als ein gerades Dach mit Omegaprofilen und ermöglicht die Integration der Klimakanäle direkt in die Dachstruktur. Eine Möglichkeit der Anbindung der Haltestangen direkt an Unterseite des Daches muss noch überprüft werden, dafür sind an der Unterseite weitere Metalleinleger notwendig. Die Oberseite des Daches wird als Werkzeugseite der Form festgelegt (Gutseite), d.h. das Dach wird bei der Herstellung mit der Oberseite nach unten gefertigt. Da die Form nur mit einer Vakuumfolie bzw. mit einer Silikonhaube abgedeckt wird, ist die spätere Unterseite des Daches von der Oberflächenqualität her schlechter als die werkzeugzugewandte Dachoberseite. Die Oberflächenqualität spielt bei der Unterseite des Dachs keine Rolle, sie wird durch die Innendecke des Fahrgastraumes verdeckt.

In Abstimmung mit RCS wurden die Radien und Entformungsschrägen teilweise angepasst. Einleger wurden festgelegt, um in dem Seitenträgern Hohlräume für die Elektroleitungen zu schaffen. Die Leitungen dürfen dabei nicht zu nah beieinander liegen, da sonst die erzeugte Wärme nicht abgeleitet werden kann, was wiederum zu hohen elektrischen Verlusten führt. Eine Kompensation wäre nur mit vielfach größeren Leitungsquerschnitten möglich. Aus diesem Grund werden die Hochvoltkabel auf dem Dach verlegt und ausschließlich die Niedervoltleitungen im Seitenträger

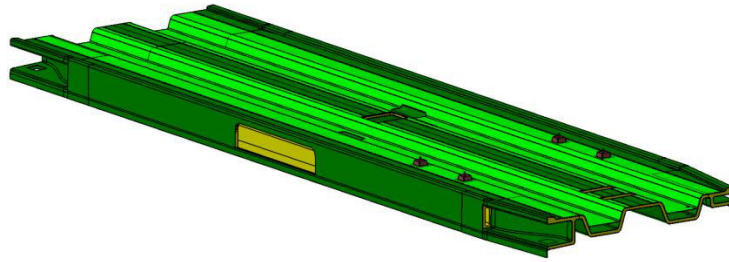


Abbildung 15: Konzeptentwurf Katamaran

Anpassung Klimakanäle:

Die Klimakanäle werden nicht wie üblich unterhalb des Rohbaudaches montiert, sondern direkt in die Dachstruktur integriert. Dafür eignen sich die ausgeformten Profile, die den Katamaran bilden. Das notwendige Volumen des Klimakanals kann durch das Höher- oder Tiefersetzen der Abdeckung während der Konstruktionsphase je nach Strömungsbedarf variiert werden (Abbildung 16). Eine nachträgliche Änderung des Klimakanalvolumens und damit einhergehend der Volumenstrom im Klimakanal ist, bei Verlagerung des Luftbedarfes im Fahrgastraum, mit geringem Aufwand möglich.

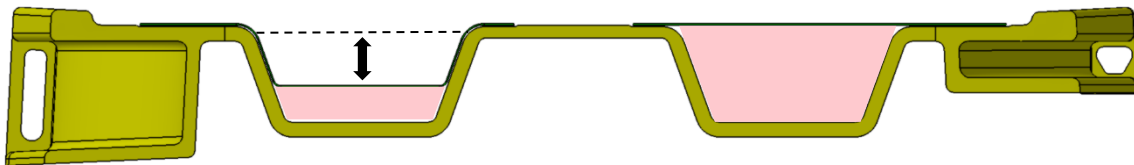


Abbildung 16: Änderung des Klimakanalvolumens durch konstruktive Anpassung der Abdeckungen

Der duroplastische Laminataufbau mit Schaumkern bietet eine gute Isolationschicht zwischen den seitlichen Warmluftkanälen und dem Kaltluftkanal in der Mitte. Über Ausströmungsöffnungen in der Zwischendecke wird die Kaltluft schlussendlich in dem Fahrgastraum verteilt (Abbildung 17).

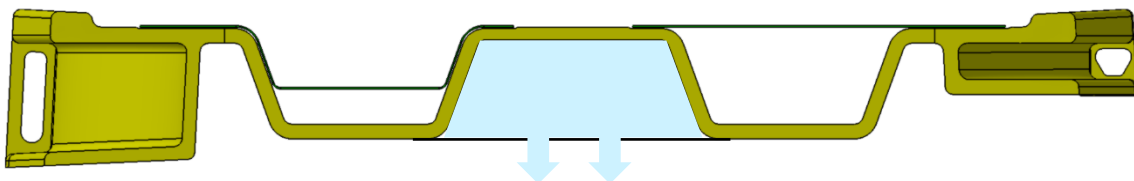


Abbildung 17: Kaltluftkanal mit Ausströmungsöffnungen in der Zwischendecke

Dachentwässerung:

Das Dachentwässerungssystem wird in die beiden Abdeckungen der Klimakanäle integriert (Abbildung 18). Diese bilden den tiefsten Punkt des Daches, wodurch sich in den Rillen das Regen- bzw. Schmelzwasser ansammelt und über Schläuche zwischen Rohbau und Innenverkleidung abgeleitet werden kann. Auch bei maximalem Klimakanalvolumen (Abdeckung annähernd gerade) muss sichergestellt werden, dass die Abflussöffnungen dennoch an der tiefsten Stelle des Daches sitzen. Abflussöffnungen werden im vorderen und hinteren Bereich des Daches benötigt, damit je nach Neigung der Straßenbahn ein Abfließen des Wassers immer gewährleistet werden kann.

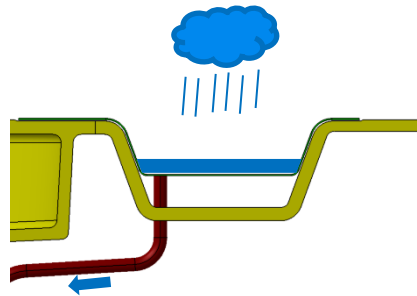


Abbildung 18: Dachentwässerungssystem

Partielle Carbonfaser-Verstärkung im Glasfaser-Basislaminat

Eine partielle Verstärkung mit unidirektionalen Carbonfaser-Tapes wurde im Bereich der Modellunterseite an den Warmluftkanälen im FE-Modell getestet (Abbildung 19). Es gab nur eine geringfügige Verbesserung zum vergleichbaren Modell ohne lokale Verstärkung (Variante C1 und A4), dem gegenüber stehen die hohen Anforderungen an eine Verarbeitung von Carbonfasern beim Lagenaufbau. Elektrische Geräte in den Herstellungsräumen müssen hinsichtlich möglicher Kurzschlüsse vor Faserflug der elektrisch leitenden Carbonfasern geschützt werden. Außerdem verursacht die energieintensive Herstellung der Fasern wesentlich höhere Materialkosten im Vergleich zur Glasfaserverstärkung.

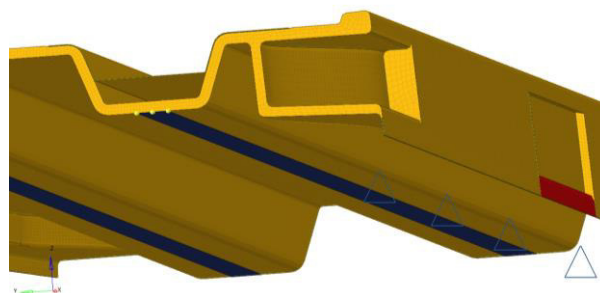


Abbildung 19: Partielle Carbonfaser-Verstärkung im Bereich der Warmluftkanäle

Konzeptentwicklung Verbindungssystem und Fahrzeugintegration

Mehrere Fügemethoden der Dachstruktur mit dem Wagenkasten wurden im Verlauf des Projektes betrachtet. Das finale Fügekonzept des Leichtbaudaches mit den Stahlträgern der Seitenwände sieht eine Verklebung vor. Dazu wurden durch HVE die Verbindungsebenen des Leichtbaudaches zum Wagenkasten definiert. Eine Endblende mit Aussparungen für

Medienleitungen wurde beim Übergang zum nächsten Wagen hinzugefügt. Die Endblende zum Cab bleibt ohne Aussparungen.

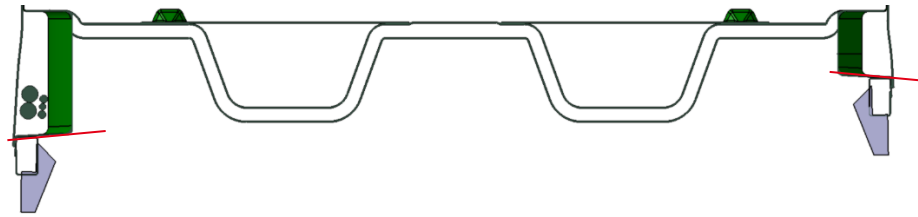


Abbildung 20: Asymmetrische Verbindungsebenen zwischen Dach und Längsträgern (rot)

1.3 Materialauswahl FKV und umfassende mechanische Werkstoffcharakterisierung (AP3)

Die Abstimmung erfolgte mit den anderen Projektpartnern zur Auswahl geeigneter Verstärkungstextilien (Glasfasern, Kohlenstofffasern, Vorkonfektionierung der möglichen textilen Flächen) und Matrixmaterialien. Zusammenstellung der relevanten Materialparameter für die Auslegung der Dachstruktur. Auswahl eines biaxialen Glasfasergeleges mit einem Flächengewicht von 400 g/m^2 (Leo-Gelege). Für die ersten Berechnungen wurde als Kernmaterial der PET-Strukturschaum AIREX T90.100 ausgewählt. Als mögliche Alternativen für einen steiferen Aufbau werden nachfolgend auch faserverstärkte Schäume untersucht, allerdings bringen diese durch die Faserverstärkung ein höheres Eigengewicht als unverstärkte Schäume mit. Das Harzsystem ist ein Injektionsharz aus dem Leo-System Büfa R-6500.

Diese Materialien sind alle hinsichtlich ihrer brandtechnischen Eigenschaften (fire, smoke, toxicity) für die Verwendung in Schienenfahrzeugen zugelassen (EN 45545). Das Fraunhofer Institut hat die benötigten Materialkennwerte in Zug-, Druck-, Scher- und Biegeversuchen ermittelt und HVE zur Verfügung gestellt, diese wurden als Grundlage für die Berechnungsmodelle genutzt. Drei Lagen des Glasfasergeleges bilden jeweils die Deckschicht oben und unten, dazwischen liegt der geschlossenzellige Schaumkern.

Der Schaumkern wird dabei passend zugeschnitten und in das Werkzeug eingelegt. Die Gelegelagen wurden symmetrisch aufgebaut (Abbildung 21) um ein späteres Aufwölben des Laminates durch Spannungen zu vermeiden. Der ganze Lagenaufbau wird danach abgedichtet und die enthaltene Luft evakuiert, sodass auf Grund des entstehenden Unterdruckes der Aufbau mit Harz infiltriert wird.

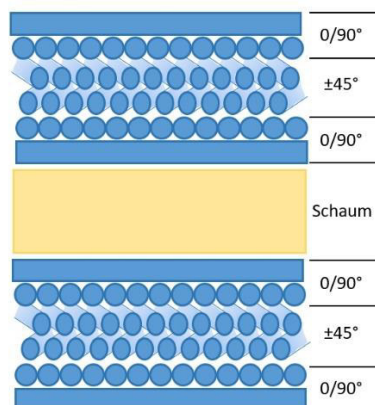


Abbildung 21: Lagenaufbau mit dreifachem Glasfasergelege und Schaumkern

Es ergibt sich ein quasiisotroper Aufbau, durch gleichmäßige Orientierung der Faser-richtungen. Die $0/90^\circ$ Glasfaserlagen stabilisieren in X-Richtung, die besonders belastet wird und die $\pm 45^\circ$ Lage wirkt gegen die Verwindung des Daches.

Erweiterung Materialauswahl

Als Glasfasergelege wurde schlussendlich Saerfix ausgewählt. Bei den Verarbeitungsversuchen bei RCS, ließ sich dieses besser in die Werkzeugform einlegen als Saertex Leo. Um das Projektziel von 40 % Masseinsparung zu erreichen, erfolgte der Wechsel auf den Schaum von Airtex T90.60 mit geringerer Dichte anstatt dem T90.100. Kombiniert wurde das mit einer Reduzierung der Glasgelege-Decklagen von 3 mm auf 2 mm. Daraus ergab sich eine enorme Masseinsparung. Ein weiterer Schaumstoff von der Firma 3D-Core (GR 75) wurde in die engere Materialauswahl übernommen.

Faserverstärkte Schaumplatten mit Glasfaser- und Carbonfasern konnten über die Firma Groz Beckert bezogen werden und wurden mit den ausgewählten Schaumstoffen zusammen getestet. Die Ermittlung der mechanischen Kennwerte von Schaumstoffen der verschiedenen Hersteller durch 3-Punkt-Biegeversuche erfolgte beim FKO. Die daraus resultierenden Schubspannungen wurden mittels iterativer FE-Simulationen bestimmt. Der Schaumstoff GR 75 von 3D-Core wurde ausgewählt, da er bessere Zuverlässigkeit und Verarbeitbarkeit bei guten mechanischen Kennwerten aufwies.

1.4 Bauteilkonstruktion, Bauteilauslegung, Topologieoptimierung (AP4)

Es wurde begonnen die Gestaltungsentwürfe von Arbeitspunkt 2 zu bewerten und zu detaillieren.

Bauteilkonstruktion

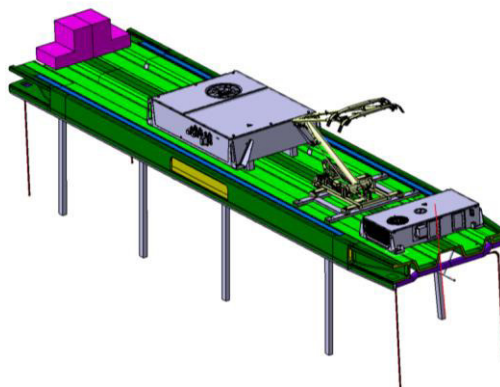


Abbildung 22: Modell Leichtbaudach mit Klimageräten und Stromabnehmer

Die Entwicklung des CAD-Modells erfolgt nun anhand der abgestimmten Konzepte. Dazu werden mehrere Iterationsschleifen mit Konstruktion und Berechnung durchgeführt, um Verbesserungspotenziale in der Konstruktion zu erkennen und anwenden zu können.

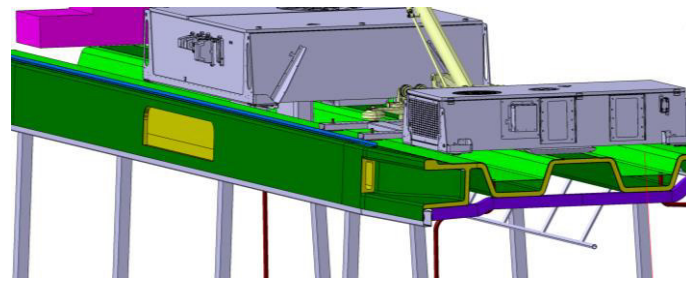


Abbildung 23: Seitenträger mit Aussparung für Fahrzielanzeige und Elektroleitungen (gelb)

Ergebnisse der statischen Berechnung:

In Abbildung 24 sieht man die überlagerte Darstellung sämtlicher geforderter Lastfälle. Diese umfassen die Beschleunigung der Dachlasten, eine 10 mm Verwindung, eine 8 kN Ausreißkraft am Pantographen sowie eine äußerst gleichmäßige Verteilung der Spannungen über die gesamte Dachfläche. Es ist anzumerken, dass spezifische lokale Spannungsstellen noch nicht vollständig ausgearbeitet sind, was auf weiterführende Konstruktionsarbeiten hindeutet.

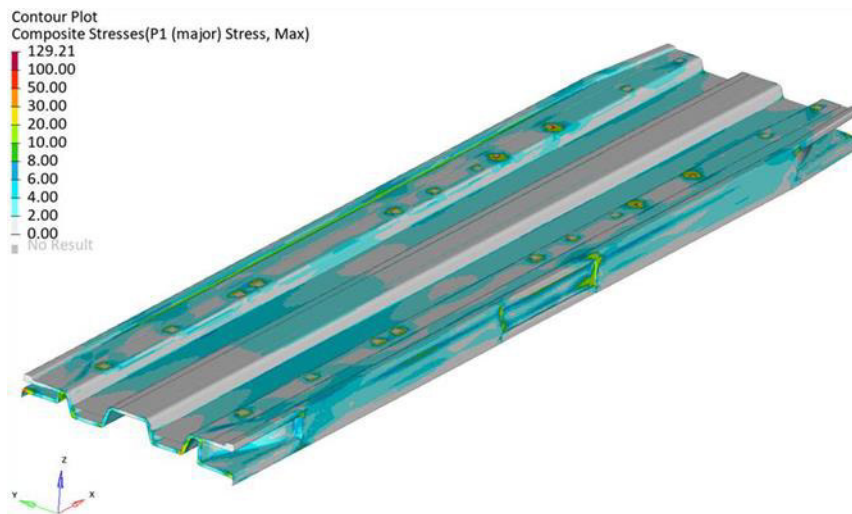


Abbildung 24: Überlagerte Darstellung aller geforderter Lastfälle

Die Durchbiegung des Leichtbaudaches bei einer Beschleunigung von 3g in negativer Z-Richtung beträgt 22 mm. Die Werte für die Durchbiegung sind nahezu doppelt so hoch wie bei einem Stahldach. Die erste Eigenfrequenz liegt bei 9,5 Hz.

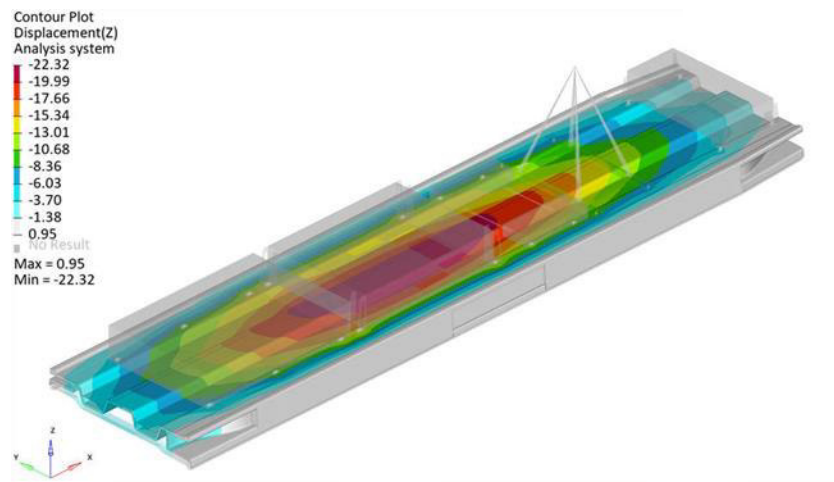


Abbildung 25: Durchbiegung des Daches in -Z bei 3g Beschleunigung

Gewichtvergleich mit Stahlvariante:

Gewicht von ca. 850 kg auf. Die Leichtbaustruktur weist aktuell ein Gewicht von ca. 700 kg auf. Bei isolierter Betrachtung dieser Zahlen ist die eingesparte Masse nicht besonders beeindruckend. Berücksichtigt man jedoch alle bei dem Leichtbaudach integrierten Bauteile, wie beispielsweise die Klimakanäle und Elektrokanäle, sowie die modernere und damit leichtere Fahrzielanzeige, ergibt sich folgende Gewichtsverteilung:

Stahldach – differenzierte Bauweise

Dachstruktur	850 kg
Klimakanäle	49 kg
Elektrokanäle	54 kg
Fahrzielanzeige	8 kg
Gesamt	961 kg

Leichtbaudach – integrierte Bauweise

Dachstruktur	703 kg
Fahrzielanzeige	1,5 kg
Gesamt	704,5 kg

Diese Einsparung von 256,5 kg entspricht einer Massereduzierung von 27%.

Das Ziel einer Massereduzierung von 40% wurde damit im ersten Schritt noch nicht erreicht, allerdings gab es weitere Optimierungsmöglichkeiten, die zu diesem Zeitpunkt nicht ausgeschöpft waren. Diese werden im nächsten Abschnitt behandelt.

Eine Reduktion der Lagen mit Glasfasergelege in den Decklagen (z. B. 2 mm Dicke) war ebenso denkbar wie eine Verringerung der Schaumdicke und/oder des Schaumstoffs mit geringerer Dichte. Auch ein Mischverbund aus Glasfasern und Kohlenstofffasern ist eine Möglichkeit. Die Unterseite der Klimaschächte kann gleichzeitig als Anschraubpunkt für die Innendecke dienen.

Durch eine Kombination der zuvor genannten Einsparungspotenziale lässt sich eine Massereduzierung um 40 % erzielen, wobei die mechanischen Eigenschaften des Leichtbaudaches berücksichtigt werden.



Abbildung 26: Perspektivische Ansicht INTEGRAL-Dach

Massereduzierung

Das Ziel einer Massereduzierung von 40 % was zunächst nicht leicht zu erreichen. Die Bemühungen zielten demnach darauf ab, diesen für das Gelingen des Projektes sehr wichtigen Parameter zu verbessern.

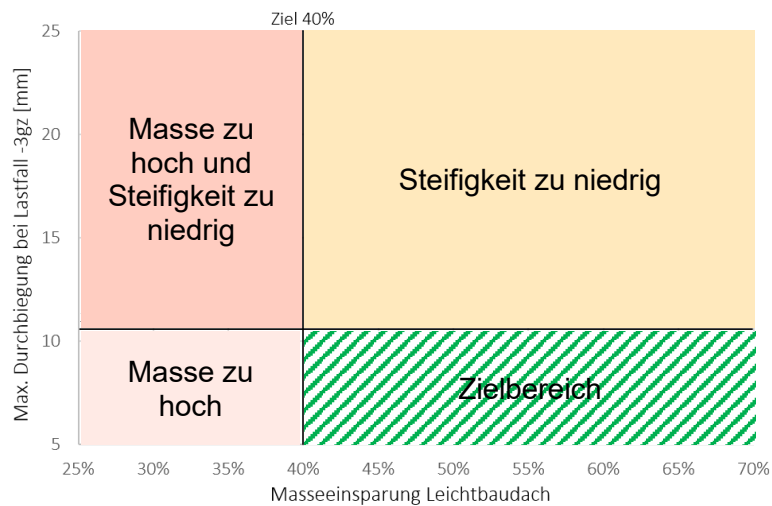


Abbildung 27: Bewertungsdiagramm mit Zielbereich

Die Dicke der Glasfaserdecklagen wurde daraufhin von 3 mm (Variante A1) auf jeweils 2 mm (A2) reduziert. Die Überprüfung mittels FE-Simulationen ergab eine viel höhere Durchbiegung. Als Schaum wurde zusätzlich eine Variante mit geringerer Dichte von 60 g/cm³ (A3, A4) eingesetzt

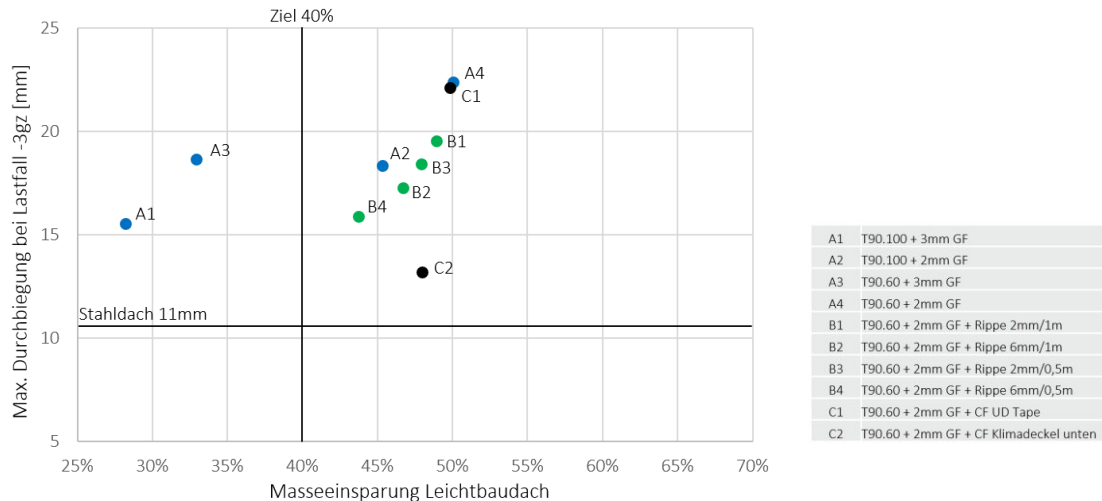


Abbildung 28: Bewertungsdiagramm Varianten Masseinsparung

Eine Reduzierung der Schaumdicke brachte kaum eine Massereduzierung im Vergleich zur damit einhergehenden Steifigkeitsreduzierung. Viel stärker wirkte sich hierbei eine dünnere Decklage aus. Die Spannungen waren bei den Berechnungsergebnissen stets unkritisch, die Durchbiegung wurde aus diesem Grund als Vergleichsparameter gewählt, da sich hier eine fehlende Steifigkeit sofort bemerkbar macht

Steifigkeitserhöhung

Um mehr Stabilität in der Struktur zu erhalten, wurde die Möglichkeit der Rippenverstärkung in dem Sandwichaufbau in Betracht gezogen. Bei den Rippen wurden Gestaltungsmöglichkeiten als Z-Rippe und als alternierende Verstärkungslage (stätiger Wechsel zwischen oberer und unterer Glasfaserdecklage) untersucht.

Der Rippenabstand wurde mit 1 m und 0,5 m festgelegt. Die Dachstruktur wurde hinsichtlich ihrer Stabilität bei einer Rippenstärke von 2 mm bzw. 6 mm untersucht (B1-B4). Dabei wurde ersichtlich, dass die Integration der Klimaabdeckungen der Kalt- und Warmluftkanäle als Strukturbauteil in das Berechnungsmodell zu einer zusätzlichen Stabilisierung der Dachstruktur gegen eine Durchbiegung in Z-Richtung führt. Dies bedeutet, dass auf eine Rippenverstärkung als Versteifung verzichtet werden kann. Die Integration von Wartungsöffnungen in die Klimaabdeckungen ermöglicht eine einfache und regelmäßige Reinigung und Instandsetzung. Die Öffnungen werden an den Abzweigungen im Klimakanal gesetzt, sodass die dort vorgesehenen Luftleitbleche installiert und angepasst werden können.

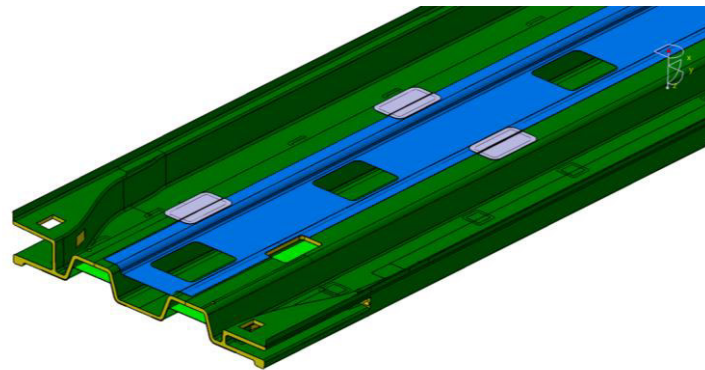


Abbildung 29: Modellunterseite, Wartungsöffnungen für Klimakanäle

Die schrittweise Verringerung der Decklagendicke auf 1,5 mm und 1 mm wurde in Erwägung gezogen, um die Masse der Dachstruktur weiter zu optimieren.

Eine Reduzierung der Masse um über 65 % könnte auf diese Weise erzielt werden, allerdings müssen damit einhergehend besondere Maßnahmen zum Brandschutz getroffen werden, die ihrerseits wieder zu einer Zunahme der Masse führen werden. Ab Variante E1 wurden die Wartungsöffnungen in die Berechnungsmodelle integriert (Abbildung 30). Durch die gewählten Maßnahmen konnte sowohl die Masse als auch gleichzeitig die Durchbiegung der Dachstruktur signifikant reduziert werden.

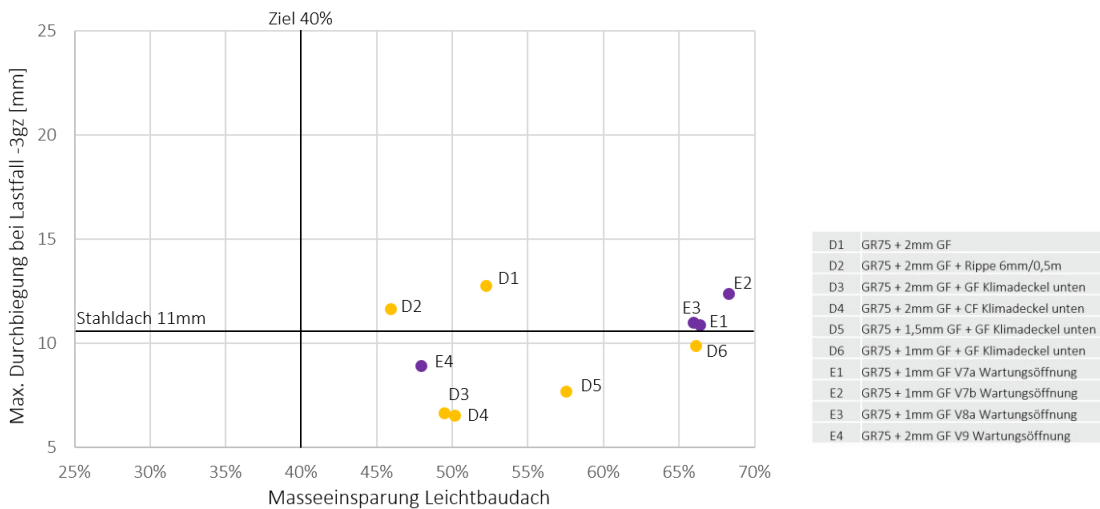


Abbildung 30: Bewertungsdiagramm Varianten Steifigkeitserhöhung

Finales Modell: Variante E4

In enger Abstimmung mit den Projektpartnern wurde beschlossen, dass die Decklagen eine Mindestschichtdicke von 2 mm aufweisen sollen, um sicherzustellen, dass die Glasgeleglagen im Brandfall ausreichend Widerstand bieten können. Dieser Schritt wurde unternommen, um die Sicherheit und Zuverlässigkeit des Leichtbaudachs zu gewährleisten. Die erzielte Massereduzierung von 48 % im Vergleich zum Referenzstahldach übertrifft das Projektziel von 40 % dennoch deutlich. Diese signifikante Reduzierung des Gewichts zeigt die Effizienz und

Leistungsfähigkeit der Dachstruktur in der gewählten Materialkombination. Darüber hinaus konnte eine verbesserte Steifigkeit des Leichtbaudaches nachgewiesen werden, wobei die Durchbiegung mit 9 mm im Vergleich zu 11 mm beim Stahlreferenzdach geringer ausfiel. Diese erhöhte Steifigkeit trägt zur Stabilität und Belastbarkeit des Dachs bei.

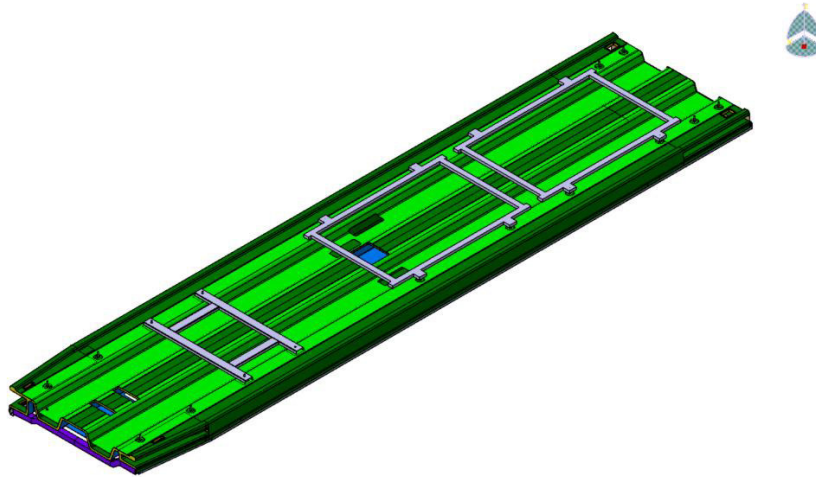


Abbildung 31: Finales Modell des Leichtbaudaches mit Träger für Dachgeräte

Designstand

Der finale Designstand für den zu fertigenden Demonstrator wurde mit den Projektpartnern abgestimmt, die Firma RCS hat aus diesem Modell die Grundform für das Werkzeug abgeleitet. Eine zusätzliche Designanpassung der Klimakanäle im Türbereich an den neuen Wagenkasten wurde als Modellvariante ausgearbeitet und in FE-Simulationen berechnet, wurde allerdings nicht in dem Demonstrator umgesetzt, sondern nur theoretisch betrachtet. Alle wichtigen Merkmale, die durch die Herstellung des Demonstrators in Erfahrung gebracht werden sollen, sind bereits in dem finalen Designstand abgebildet

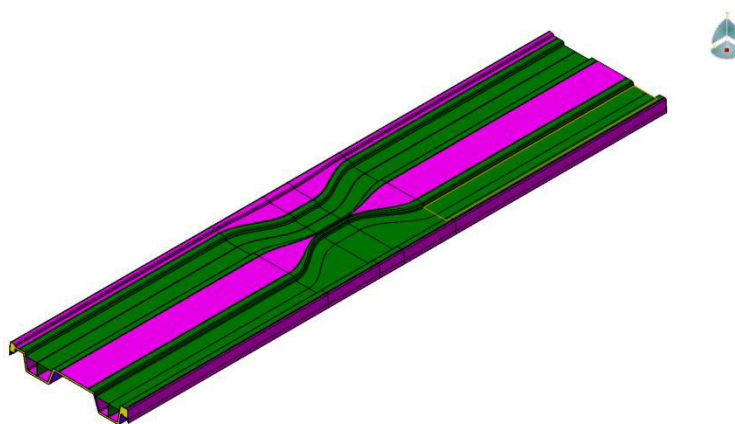


Abbildung 32: Designvariante für neuen Wagenkasten

Berechnungsmodell

Der Konstruktionsprozess der Designvariante wurde wieder durch FE-Simulationen unterstützt. Durch eine Abdeckung an der Unterseite aus 3 mm Leo-Glasfaser-Gelege wird die Dachstruktur versteift. Die Durchbiegung ist im Mittel aber besser als das alte Konzept, das Befestigungssystem für die Dachgeräte wurde entsprechend angepasst.

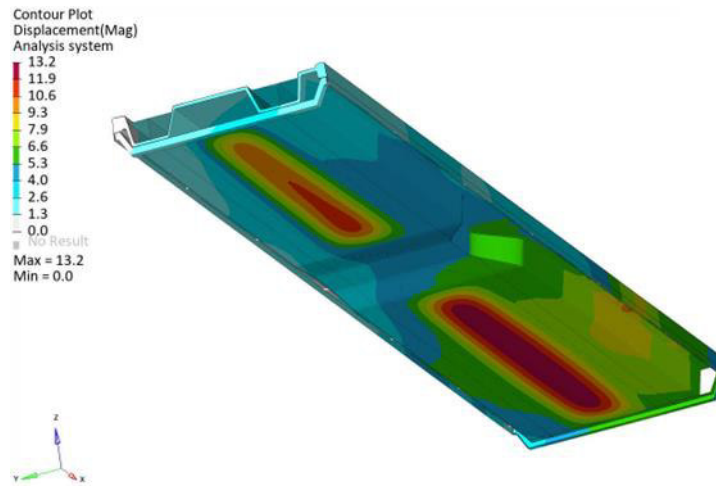


Abbildung 33: Durchbiegung im Bereich des unteren Deckels

Das asymmetrisch geschwungene Design führt zu einer einseitigen hohen Belastung auf einen der Längsträger. Eine Verstärkung in dem Bereich, um die zusätzlichen Lasten aufzufangen, würde viel zusätzliches Gewicht in dem Bereich bedeuten, was wiederum mehrere negative Effekte auf das Gleichgewicht in der Konstruktion hätte. Die Anbindungsflächen wurden abgeändert, um eine symmetrische Anbindung möglich zu machen und um die Belastung auf die Längsträger harmonischer zu gestalten

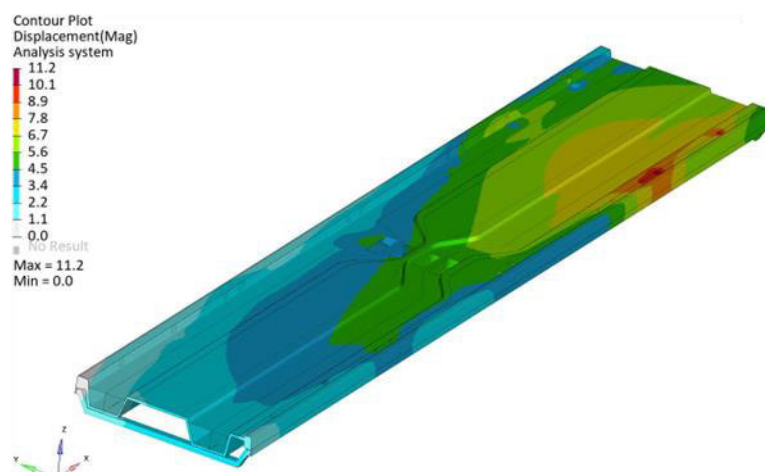


Abbildung 34: Asymmetrische Belastung am Längsträger bei Durchbiegung

Es wird die Möglichkeit der Erprobung eines zukünftigen Daches auf dem Wagenkasten einer Leipziger Straßenbahn erörtert, eine Annäherung an das Leipziger Design wie mit dieser Designvariante geschehen, wäre dann notwendig.

Erweitertes Integrationskonzeptes für Wasserstoffhybridantrieb

Das Konzept für die Integration eines Wasserstoffantriebs wurde um ein Modell mit reinem Wasserstoffantrieb ergänzt. Dieses soll die vielfältigen Möglichkeiten des zukünftigen Leichtbaudaches aufzuzeigen. Statt nur eine kurze Strecke ohne Oberleitung zu überbrücken, wird die Bahn bei diesem Modell ausschließlich mit Wasserstoff angetrieben. Die Masse der Dachgeräte steigt dadurch stark an: statt nur einer Brennstoffzelle werden drei Stück benötigt, dementsprechend sind auch die Wasserstofftanks und Kühlgeräte größer dimensioniert. Trotz der deutlich höheren Belastung werden die Grenzwerte für die Belastung der Dachstruktur nicht überschritten.

Summe der Dachgeräte auf jeweils einem Wagendach

Reiner Elektroantrieb	1.500 kg
Kombinierter Elektro-/Wasserstoffantrieb	2.200 kg
Reiner Wasserstoffantrieb	3.900 kg

1.5 Gestaltungs- und Technologiekonzepte integrationsgerechter Metalleinleger (AP5)

Die Abstimmung mit Fa. ARNELL erfolgte bezüglich Anforderungen, Gestaltung und auftretenden Kräften der für die Befestigung der Dachaufbauten auf dem Dach benötigten Metalleinleger. Die Metalleinleger brauchen sicheren Halt in den Laminatschichten, sie werden so konzipiert, dass sie oben und unten zwischen den Decklagen und dem Schaumkern liegen und sich mit Hilfe von Sicken oder ähnlichen Ausformungen in den Lagen verkrallen. Die Belastbarkeit der einlamierten Metalleinleger wird durch statische Berechnungen überprüft.

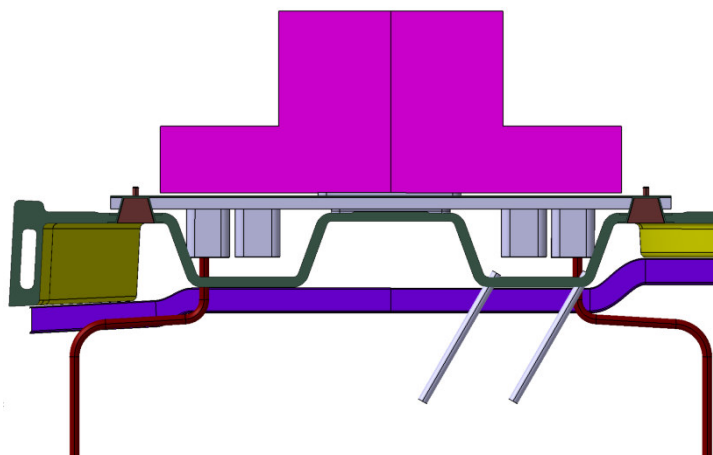


Abbildung 35: Metalleinleger zur Befestigung der Aufbauten (braun)

Die Position der Einleger wird durch passende Vertiefungen im Laminierwerkzeug sichergestellt. Die Vertiefungen werden mit Dichtungen versehen, um ein Verschmutzen der Einlegeroberfläche oberhalb des Laminates mit Harz zu vermeiden. Beim Positionieren der

Einleger wird der Schaumkern entsprechend ausgeschnitten. Die Gelegelagen müssen sehr vorsichtig ausgeschnitten und um den Einleger herumdrapiert werden, um nicht zu viele Filamente zu durchtrennen. Bei der Harzinfiltration dürfen die Einleger nicht aufschwimmen ansonsten ist die Positionsgenauigkeit nicht garantiert. Die Metalleinleger ragen ein Stück aus dem Laminataufbau heraus, damit durch den Abstand zum Dach Wasser ungehindert abfließen kann und sich keine Feuchtigkeit zwischen Einleger und Dach sammelt.

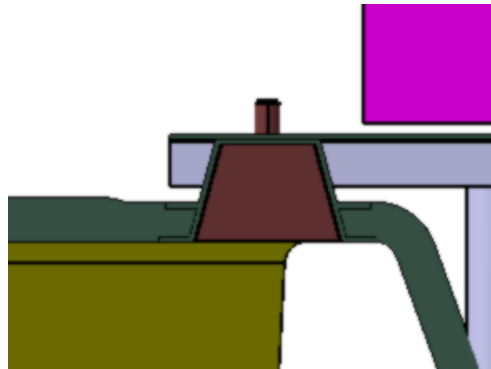


Abbildung 36: Metalleinleger in Lagenaufbau integriert

Bei der Verwendung von Kohlenstofffasern werden die Metalleinleger durch eine Trennschicht aus Glasfasergelege elektrisch isoliert. Kombinierte Langlöcher sorgen bei dem Einleger für eine Einstellmöglichkeit im kleinen Rahmen. Das schwerste Dachgerät ist die Fahrgastraumklimaanlage mit 550 kg. Daraus ergibt sich bei einer Beschleunigung von 3g eine Gesamtkraft von rund 16,2 kN die auf die Befestigungselemente wirkt.

Auf die Metalleinleger wirken hohe statische und dynamische Kräfte. Je nach Verteilung der Dachgeräte kann die Kraft pro Einleger reduziert werden. Die im Schienenfahrzeugverkehr geforderten Lastfälle wurden überprüft. Sowohl die Zug- und Druckbelastung als auch Schubbelastungen wurden betrachtet. Die Vorspannung der Schraube wurde mit 30 kN angenommen.

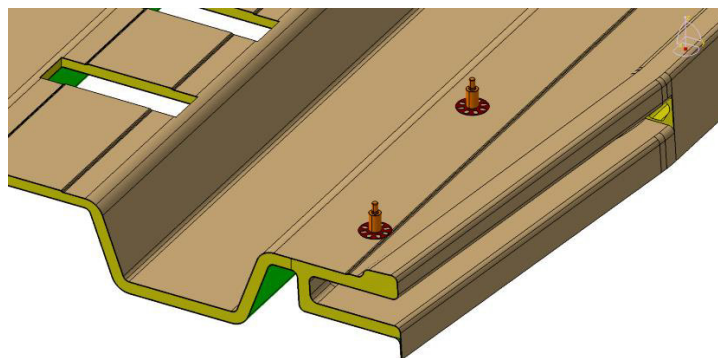


Abbildung 37: Metalleinleger integriert in den Laminataufbau

Zug/Druck-Lastfall

Es wird von einer externen Belastung von 5 kN ausgegangen, was einer Gewichtskraft von etwa 170 kg bei einer Beschleunigung von 3 g entspricht. Diese Kräfte werden gleichmäßig auf das Laminat der großflächigen Platinen übertragen, wodurch eine effiziente Kraftverteilung gewährleistet wird. An den Innenrändern der Platinen, insbesondere im Bereich des Übergangs zum Schweißeinsatz, können erhöhte Spannungen auftreten. Diese Spannungen liegen jedoch noch innerhalb der zulässigen Grenzwerte und stellen daher keine unmittelbare Gefahr dar. Die Belastung der übrigen Teile der Einleger, abgesehen von den genannten Innenrändern, wird als unkritisch eingestuft. Dies bedeutet, dass diese Teile der Struktur die auftretenden Kräfte ohne Probleme aufnehmen können und keine weiteren Maßnahmen erforderlich sind, um ihre Integrität zu gewährleisten.

Schubbelastung

Die aufgebrachte Kraft beträgt 5 kN. Die Belastungen auf den Innenrand der Platinen bei Schub erreichen 448 MPa, was als zu hoch eingestuft wird. Ebenso sind die Schubbelastungen auf den Schweißeinsatz mit 868 MPa deutlich über den zulässigen Grenzwerten und somit als viel zu hoch anzusehen. Im Gegensatz dazu wird die Belastung der restlichen Teile der Einleger als unkritisch bewertet, da sie die auftretenden Kräfte ohne Probleme aufnehmen können.

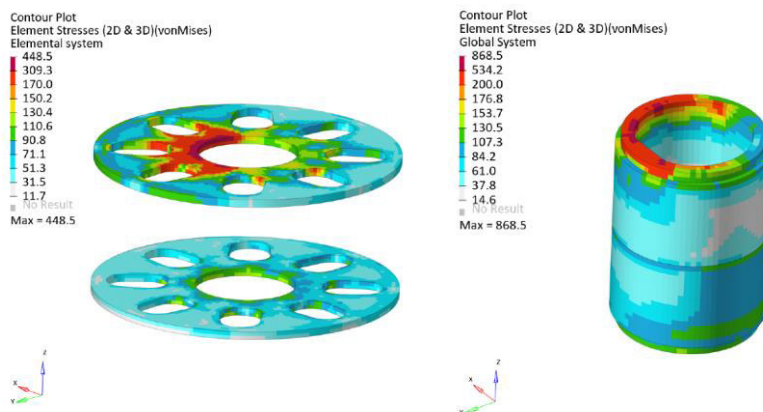


Abbildung 38: Spannungen in der Platine (li.) und dem Schweißeinsatz (re.) bei Schubbelastung

Aufgrund der Ergebnisse mussten die Metalleinleger angepasst werden. Eine wesentliche Änderung bestand in der Modifikation des Materials des Schweißeinsatzes und der Platine, um eine verbesserte Festigkeit zu erzielen. Durch die Verwendung eines robusteren Materials konnten die Belastbarkeit und Widerstandsfähigkeit gegenüber äußeren Kräften signifikant gesteigert werden. Zusätzlich wurden zwei zusätzliche Glasfaserlagen in das Design der Platinen integriert, um eine verstärkte Struktur zu schaffen und eine höhere Stabilität zu gewährleisten. Diese zusätzlichen Lagen tragen dazu bei, die Belastungsfähigkeit der Platinen zu erhöhen und somit die Gesamtleistung des Leichtbaudachs zu verbessern. Des Weiteren wurden die Positionen der Einleger auf dem Dach nochmals überarbeitet und optimiert, um eine bessere Verteilung der Lasten und Kräfte zu gewährleisten.

Beurteilung der Anpassungen

Die lokalen kritischen Spannungen erforderten eine gezielte Materialänderung bei dem Schweißensatz von S235 auf S355 sowie bei der Platine von DD11 auf S355. Diese Maßnahme wurde ergriffen, um die Belastbarkeit und Widerstandsfähigkeit der betroffenen Komponenten gegenüber äußeren Kräften deutlich zu erhöhen. Zur weiteren Stärkung der Struktur wurden zwei zusätzliche Glasfaserlagen in das Design der Platinen integriert. Diese zusätzlichen Lagen dienen dazu, die Platinen umfassend abzudecken und ein vorzeitiges Herausreißen des Metalleinlegers zu verhindern. Durch diese gezielte Verstärkung wird die Gesamtstabilität und Belastbarkeit des Leichtbaudachs signifikant verbessert. Des Weiteren wurde der Durchmesser der Schweißensätze nochmals vergrößert, um die geforderten Festigkeiten auch bei der erhöhten Masse der Dachlasten im Hinblick auf eine Nutzung mit Wasserstoffantrieb zu gewährleisten. Diese Anpassung gewährleistet eine zuverlässige und sichere Struktur, die den spezifischen Anforderungen des Wasserstoffantriebs an Belastung und Festigkeit des Leichtbaudachs gerecht wird.

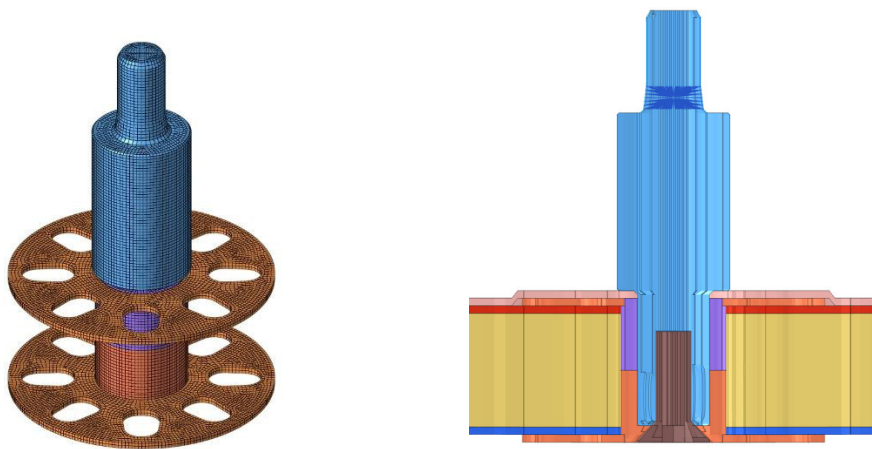


Abbildung 39: Angepasster Metalleinleger (li.), Schnittdarstellung mit Schaum (re.)

Ergebnisse:

In der Zug- und Druck-Simulation wurden die Spannungen auf die einzelnen Bauteile der Metalleinleger als unkritisch eingestuft. Dabei wurden auch die umgebenden Laminatdecklagen und der Kernschaumbereich berücksichtigt, um eine umfassende Bewertung der Belastungssituation vorzunehmen. Bei der Simulation in 45° Richtung wurde festgestellt, dass die Belastung der Schweißensätze an der Kontaktfläche zum Bolzen lokal hoch ist. Dennoch konnte diese Belastung mit einem Sicherheitsfaktor von 1,4 noch als akzeptabel eingestuft werden. Diese Erkenntnisse zeigen, dass die Einleger unter realistischen Belastungsszenarien robust und stabil sind, wobei potenzielle kritische Bereiche identifiziert und bewertet wurden.

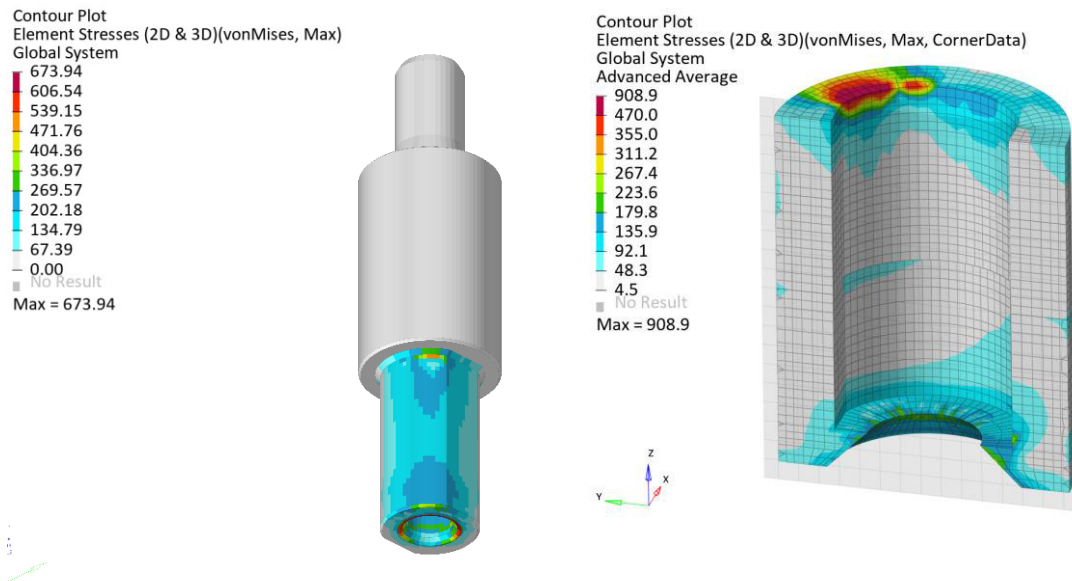


Abbildung 40: Belastung des Bolzens (li.) und des Schweißeinsatzes (re.)

Durch die Änderungen des Materials und in der Geometrie der Metalleinleger konnten die Spannungsverläufe optimiert werden und der aktuelle Aufbau wurde so umgesetzt.

1.6 Entwicklung und Umsetzung wirtschaftlicher Füge Technologien und Systemintegration prototypischer FKV-Leichtbaudächer (AP 10)

Die Füge Technologien wurden im Hinblick auf die Positionierung der Stahlträger mit dem CAD-Modell bei FKO untersucht. Dabei wurde das Kleben mit und ohne Verstiftung betrachtet, um ein Verrutschen in der Y-Richtung zu verhindern. Die Verbindung des Leichtbaudaches zum metallenen Wagenkasten über Schnittstellen an den Seitenwänden wurde modifiziert, um von einem asymmetrischen zu einem symmetrischen Aufbau zu gelangen, was große Vorteile für die Verbindung bietet. Die Anbindungsflächen zum Rohbau wurden entsprechend angepasst, um einen symmetrischen Aufbau zu ermöglichen und Probleme mit einseitig hoher Belastungszone zu vermeiden. Eine alternative Verbindungstechnik namens FAUSST wurde betrachtet, die eine neuartige Schweißverbindung zwischen Metallträger und textilverstärktem Kunststoff ermöglicht. Es musste darauf geachtet werden, dass die Brandschutznormen im Schienenfahrzeugbereich erfüllt sind und die Verbindung sowohl haltbar als auch zähelastisch ist, um einen Toleranzausgleich zu gewährleisten.

Die Verbindung des Leichtbaudaches zu den metallenen Seitenwänden kann durch Verkleben realisiert werden, wobei ein Klebespalt von mindestens 15mm zwischen Dach und Rohbau gegeben sein muss. Die Bereitstellung angepasster Modelle und Zeichnungen des Stahlangträgers und der Klebefläche war erforderlich. Es wurden auch die Fügevarianten zweier INTEGRAL-Segmente im Bereich der Sandwichstruktur betrachtet, um die Möglichkeit der Fertigung längerer Dächer im Vollbahnbereich zu ermöglichen.

Die Segmentierung von langen Reisezügen mit einer Wagenlänge von 26m erfordert eine Modularisierung des Daches, da die Werkzeugform zu lang ist, um komplett gefertigt zu werden. Eine Kombination von Kleben und Nieten wird ebenfalls in Betracht gezogen, wobei

eine vorsichtige Haltung gegenüber dem Kleben aufgrund von Rückmeldungen von Anwendern eingenommen wird.

Im Rahmen der Beschichtungstechnik ist eine Zinklamellenbeschichtung bei Verschraubungen im Dachbereich vorgesehen. Dies ist erforderlich, da eine chromfreie Beschichtung aufgrund der eingeschränkten Zulassung in der EU nicht in Frage kommt. Zudem weist die Beschichtung eine hohe Beständigkeit gegen saure und alkalische Reiniger sowie eine hohe Beständigkeit im Salzsprühnebeltest für eine Dauer von 1.440 h auf.

1.7 Messedemonstrator

Es erfolgte die fortlaufende Abstimmung mit den Projektpartnern. Die gewonnenen Erkenntnisse und Rückmeldungen von potenziellen Anwendern wurden in dem Prototyp umgesetzt. Unter anderem wurde die Dämmung der Warmluft-Klimakanäle verbessert. Des Weiteren gab es eine Anpassung beim Modell im Bereich der unteren Abdeckung des Kaltluftkanal zur optimierten Fertigung. Als Vorbereitung für den Messestand auf der TRAKO im Danzig wurde ein Messe-Demonstrator angefertigt.

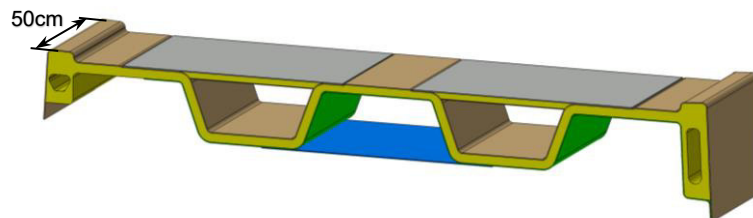


Abbildung 41: Ausschnitt des Bauteils für Messedemonstrator

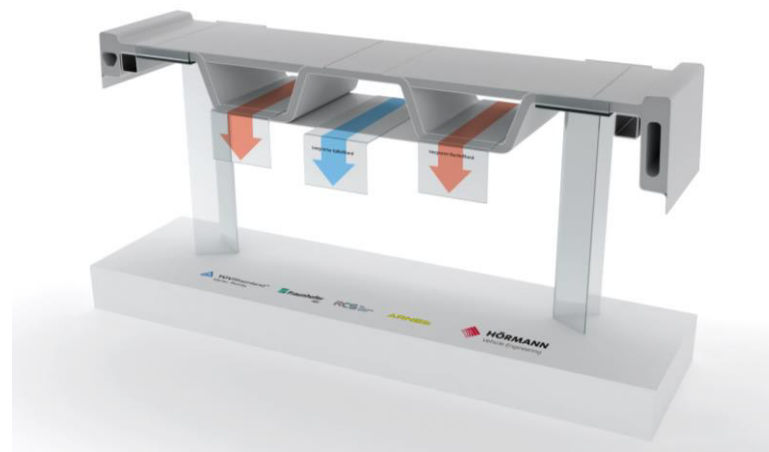


Abbildung 42: Messeaufbau mit Visualisierung der Luftströmungen

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die einzelnen Positionen des zahlenmäßigen Nachweises gehen aus den zahlenmäßigen Verwendungsnachweisen hervor der beim Projektträger eingereicht wurde.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Es konnte gezeigt werden, dass zur Erreichung der Projektziele ein erheblicher Forschungs- und Entwicklungsaufwand notwendig war. Der damit verbundene finanzielle Aufwand war durch die Projektteilnehmenden nicht ohne Förderung zu erbringen. Aufgrund der Komplexität der angestrebten Entwicklung und des innovativen Charakters des Vorhabens bestand zu Projektbeginn ein hohes wissenschaftlich-technisches und damit auch wirtschaftliches Risiko. Vor Projektbeginn war ein integratives Leichtbaudach entsprechend der Projektzielstellung nicht realisiert worden. Entsprechend neuartig und mit technischen und technologischen Risiken behaftet waren demzufolge auch die Teilprojekte. Die zu erbringenden Eigenanteile, die ihrerseits für die Projektteilnehmenden ein hohes Risiko darstellten, erforderten ein hohes Verantwortungsbewusstsein und besondere Qualitäten bei der Planung und Durchführung. Durch die Expertise aller Projektteilnehmenden sowie die systematische, zielgerichtete Zusammenarbeit, konnte die Zuwendung zielführend und angemessen eingesetzt werden und hat maßgebend zum Erfolg des Projektes beigetragen.

4 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die deutliche Gewichtsreduzierung des Schienenfahrzeugdaches wird durch eine Funktions- und Materialintegration im Multi-Material-Design erreicht. Im Zuge dessen werden sowohl Konzepte für wettbewerbsfähige, hoch integrative Schienenfahrzeugdächer entwickelt, als auch serientaugliche und wirtschaftliche Fertigungs- sowie Montageprozesse erarbeitet. Auf Grund des ganzheitlichen und kooperativen Projektansatzes führt die erfolgreiche Umsetzung und Markteinführung des geplanten Verbundvorhabens nicht nur zu einem Beitrag zur Schonung von Ressourcen und Verringerung von CO₂-Emissionen, sondern fördert auch die Innovationskraft sowie die Wettbewerbsfähigkeit aller beteiligten Projektpartner, vom Halbzuglieferanten bis zum Fahrzeughersteller. Dadurch werden zum einen gezielte Impulse in Richtung der Innovationskraft von regionalen Unternehmen gesetzt und zum anderen die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Schienenfahrzeugindustrie langfristig erhalten und gestärkt.

Die geplante Dachstruktur bedient die heute bereits bestehende Nachfrage nach hoch integrativen Leichtbaustrukturen im Bereich der Niederflurstraßen- und Stadtbahnen und sichert den beteiligten Unternehmen ein entscheidendes Alleinstellungsmerkmal auf dem konkurrenzintensiven Markt. Mittelfristig werden so neue Märkte erschlossen sowie der Umsatz gesteigert. Die damit verbundene Vergrößerung der Produktions- und Entwicklungsabteilung führt zu einer gesteigerten Nachfrage nach Fachkräften und konzentriert mittel- und langfristig Knowhow sowie Innovationskraft in der Region.

Das folgende Verbundprojekt konnte direkt aus den Erkenntnissen des Projekts INTEGRAL abgeleitet werden:

3D-FiberTrain - Entwicklung eines werkzeuglosen Fertigungsverfahrens zur Herstellung großformatiger und hochbelastbarer Schienenfahrzeugkomponenten;

Teilvorhaben: Entwicklung von belastungs- und fertigungsgerechten Bauweisen für additiv

*gefertigte großformatige Schienenfahrzeugkomponenten (FKZ 19I23008A).
Fördermaßnahme "Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien" des BMWK.
Laufzeit 01.09.2023 – 30.06.2026.*

Die gewonnenen Erkenntnisse aus dem Projekt INTEGRAL wurden auch bei der Konzeptionierung weiterer Projekte mit beachtet:

*PulPro-SMC - Einsatz von Pultrusion-Profilen in Kombination mit lastpfadgerechten SMC aus recycelten Kohlenstofffasern in Rohbaustrukturen von Schienenfahrzeugen;
Teilvorhaben: Entwicklung von Einsatzmöglichkeiten lastpfadgerechter Pultrusionsprofile im Schienenfahrzeugbau (FKZ 19I23004A).
Fördermaßnahme "Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien" des BMWK.
Laufzeit 01.10.2023 – 30.06.2026.*

Die Ergebnisse des Leichtbaudaches für Straßenbahnen sind auch auf andere Fahrzeugtypen wie Busse übertragbar. Damit ist HVE in der Lage, diese Kompetenz auch für Nutzfahrzeuge als Konstruktions- und Entwicklungsleistung zukünftigen Betreibern anzubieten.

Das Konzept übertragen auf Busdächer wurde auf folgenden Messen präsentiert:

Bus2Bus Berlin 27.-28.04.2022 und Busworld Europe Brüssel 07.-12.10.2023

Und unter anderem diesen Unternehmen vorgestellt:

eVersum mobility solutions, Limbus, Slowenien und VDL Groep, Eindhoven, Niederlande.

5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Bewilligungszeitraum wurden keine Konkurrenzprodukte und -verfahren bekannt.

6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Während des Projektzeitraumes wurde das Projekt INTEGRAL auf verschiedenen Veranstaltungen repräsentiert. Auch in Zukunft wird die weitere Vermarktung der Ergebnisse aus dem Projekt angestrebt. Die folgende Übersicht gibt nur eine Auswahl der Präsentationen und Veröffentlichungen wieder:

Kreuziger, Reymond, Integratives Leichtbaudach für Schienenfahrzeuge. Fachtagung Faserverbundkunststoffe im Schienenfahrzeugbau Merseburg, 10.05.2022

N.N., Dachstruktur leichtgemacht. Firmenseite Hörmann Vehicle Engineering, <https://www.hoermann-engineering.de/de/news/newsmeldung/dachstruktur-leichtgemacht>, 22.10.2021

N.N., Leichtbaudach für Straßenbahnen. Leichtbauwelt – Inspiration für ihren Fortschritt im Leichtbau, <https://www.leichtbauwelt.de/leichtbaudach-fuer-strassenbahnen>, 22.11.2021

Kreuziger, Reymond. *Faserverbundwerkstoffe im Schienenfahrzeugbau.*

Projektpräsentation bei Siemens Krefeld, 23.01.2023 und Fa. HeiterBlick, 31.05.2023

Des Weiteren wurde das Projekt am 07.09.2022 im Rahmen der Wirtschaftstour des sächsischen Wirtschaftsministers Martin Dulig vorgestellt



Abbildung 43: Wirtschaftstour des sächsischen Wirtschaftsministers Martin Dulig

In Zusammenarbeit mit allen Partnern wurde ein Messedemonstrator aus einem Teilsegment des Integraldaches hergestellt. Dieser wurde auf einem Gemeinschaftsstand bei der folgenden Messe ausgestellt und beworben:

15th International Railway Fair; 19.09.2023 – 22.09.2023; Danzig, Polen.



Abbildung 44: Messestand TRAKO

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektzeitplan mit Arbeitspaketen nach kostenneutraler Verlängerung	8
Abbildung 2: Beispiel einer konventionellen Dachstruktur einer Niederflurstraßenbahn [1].....	9
Abbildung 3: FKV-Wagenkastenstruktur im Fasernasswickelverfahren [2]	10
Abbildung 4: Doppelstock-Wagenkästen in GFK [3] und CFK-Bauweise [4].....	11
Abbildung 5: Frontmaske des Talgo Haramain Schnellzuges in GFK-Sandwichbauweise [5].....	12
Abbildung 6: Layout für Dachaufbauten	14
Abbildung 7: Stahldach mit Durchbrüchen für Klimaanlage	15
Abbildung 8: Asymmetrischer Aufbau	15
Abbildung 9: Schwere Geräte auf Mittelachse angeordnet	15
Abbildung 10: Lastverteilung auf dem Dach (links) und die resultierenden Kräfte (rechts)	16
Abbildung 11: Elektro-Anschlusskästen aus CFK innen positioniert	17
Abbildung 12: Elektro-Anschlusskästen aus CFK außen positioniert	17
Abbildung 13: Iterationsschritte bei der Entwicklung der Bauweise	18
Abbildung 14: Konzeptentwurf Omegaprofil (links Oberseite, rechts Unterseite).....	19
Abbildung 15: Konzeptentwurf Katamaran	20
Abbildung 16: Änderung des Klimakanalvolumens durch konstruktive Anpassung der Abdeckungen	20
Abbildung 17: Kaltluftkanal mit Ausströmungsöffnungen in der Zwischendecke.....	20
Abbildung 18: Dachentwässerungssystem	21
Abbildung 19: Partielle Carbonfaser-Verstärkung im Bereich der Warmluftkanäle.....	21
Abbildung 20: Asymmetrische Verbindungsebenen zwischen Dach und Längsträgern (rot)	22
Abbildung 21: Lagenaufbau mit dreifachem Glasfasergelege und Schaumkern.....	23
Abbildung 22: Modell Leichtbaudach mit Klimageräten und Stromabnehmer	23
Abbildung 23: Seitenträger mit Aussparung für Fahrzielanzeige und Elektroleitungen (gelb).....	24
Abbildung 24: Überlagerte Darstellung aller geforderter Lastfälle.....	24
Abbildung 25: Durchbiegung des Daches in -Z bei 3g Beschleunigung	25
Abbildung 26: Perspektivische Ansicht INTEGRAL-Dach	26
Abbildung 27: Bewertungsdiagramm mit Zielbereich	26
Abbildung 28: Bewertungsdiagramm Varianten Masseeinsparung.....	27
Abbildung 29: Modellunterseite, Wartungsöffnungen für Klimakanäle.....	28
Abbildung 30: Bewertungsdiagramm Varianten Steifigkeitserhöhung	28
Abbildung 31: Finales Modell des Leichtbaudaches mit Träger für Dachgeräte	29
Abbildung 32: Designvariante für neuen Wagenkasten.....	29
Abbildung 33: Durchbiegung im Bereich des unteren Deckels	30
Abbildung 34: Asymmetrische Belastung am Längsträger bei Durchbiegung	30
Abbildung 35: Metalleinleger zur Befestigung der Aufbauten (braun)	31
Abbildung 36: Metalleinleger in Lagenaufbau integriert	32
Abbildung 37: Metalleinleger integriert in den Laminataufbau	32
Abbildung 38: Spannungen in der Platine (li.) und dem Schweißeinatz (re.) bei Schubbelastung	33
Abbildung 39: Angepasster Metalleinleger (li.), Schnittdarstellung mit Schaum (re.)	34
Abbildung 40: Belastung des Bolzens (li.) und des Schweißeinatzes (re.)	35
Abbildung 41: Ausschnitt des Bauteils für Messedemonstrator	36
Abbildung 42: Messeaufbau mit Visualisierung der Luftströmungen	36
Abbildung 43: Wirtschaftstour des sächsischen Wirtschaftsministers Martin Dulig	39
Abbildung 44: Messestand TRAKO	39

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Arbeitspakete des Förderprojektes	7
Tabelle 2: Festgelegte Meilensteine	8

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
DMS	Dehnungsmessstreifen
E-Modul	Elastizitätsmodul
FE	Finite Elemente
FKV	Faser-Kunststoff-Verbunde
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
LCC	Life Cycle Cost
MKS	Mehrkörpersimulation
VARI	Vacuum assisted resin infusion

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel INTEGRAL – Integratives Leichtbaudach für Schienenfahrzeuge Teilvorhaben: Bauteilauslegung, Umsetzung und Integration	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Kreuziger, Reymond Böhme, Constanze	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2023
	6. Veröffentlichungsdatum 28.06.2024
	7. Form der Publikation Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) HÖRMANN Vehicle Engineering GmbH Aue 23-27 D-09112 Chemnitz	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 19I20009A
	11. Seitenzahl 41
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 5
	14. Tabellen 2
	15. Abbildungen 44
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) TÜV Rheinland Consulting GmbH, Köln, 28.06.2024	
18. Kurzfassung <u>Stand der Wissenschaft und Technik</u> Konventionelle Dachstrukturen im Schienenfahrzeugbau bestehen aus Stahl- oder Aluminiumträgern. Die Dachabdeckung bildet eine versteifte Schale in Stringer- oder Sandwichbauweise, die mit der metallischen Tragstruktur verschweißt oder dicht verklebt ist. Die hohe Teilevielfalt der Einzelkomponenten führt zu einem großen Montageaufwand und zu einer hohen Masse, was sich insbesondere bei Nahverkehrszügen und Straßenbahnen durch die häufige Beschleunigung des Fahrzeuges negativ auf den Energieverbrauch auswirkt. Darüber hinaus wachsen die Anforderungen hinsichtlich der Verringerung des Wartungsaufwandes, zur Steigerung der Transportkapazität sowie zur Erhöhung der Reichweite von netzunabhängigen Fahrzeugen. <u>Zielsetzung</u> Das Verbundvorhaben hatte als Hauptziel die Entwicklung von wettbewerbsfähigen Schienenfahrzeugdächern in Faserkunststoffverbundbauweise mit spezifischen Merkmalen im Vergleich zu herkömmlichen metallischen Dachstrukturen. Dabei sollten 40 % Gewichtseinsparung bei gleichbleibenden Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften erreicht werden. Eine kompakte und funktionsintegrierte Bauweise des Faserkunststoffverbundes mit einem um 70 % geringeren Montageaufwand wurde angestrebt. <u>Ergebnisse</u> Ein prototypisches Leichtbaudach aus Faserkunststoffverbund wurde entwickelt, um die Ergebnisse des Projekts zu demonstrieren. Besonderes Augenmerk lag dabei auf Dachstrukturen für Niederflurstraßenbahnen, da sie das größte Potential für integrative Leichtbaulösungen boten. Die Innovation dieses Projekts lag in der ganzheitlichen Betrachtung von der Entwicklung der Leichtbauweisen bis hin zur Technologieentwicklung für ein angepasstes, wirtschaftliches Fertigungsverfahren.	
19. Schlagwörter Schienenfahrzeuge Leichtbau, Faser-Kunststoff-Verbund, Straßenbahndach, Funktionsintegration, Vakuuminfusion	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title INTEGRAL – Integrative lightweight roof for rail vehicles Sub-project: Component design, realisation and integration	
4. author(s) (family name, first name(s)) Kreuziger, Reymond Böhme, Constanze	5. end of project 31.12.2023
	6. publication date 28.06.2024
	7. form of publication Final report
8. performing organization(s) (name, address) HÖRMANN Vehicle Engineering GmbH Aue 23-27 D-09112 Chemnitz	9. originator's report no.
	10. reference no. 19I20009A
	11. no. of pages 41
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. no. of references. 5
	14. no. of tables 2
	15. no. of figures 44
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) TÜV Rheinland Consulting GmbH, Köln, 28.06.2024	
18. abstract <u>State of the art</u> Conventional roof structures in rail vehicle construction consist of steel or aluminium beams. The roof covering forms a stiffened shell in stringer or sandwich construction, which is welded or tightly bonded to the metal support structure. The large number of parts in the individual components leads to a great deal of assembly work and a high mass, which has a negative impact on energy consumption, particularly in local trains and trams due to the frequent acceleration of the vehicle. In addition, there is a growing need to reduce maintenance costs, increase transport capacity and extend the range of off-grid vehicles. <u>Objective</u> The main objective of the joint project was to develop competitive rail vehicle roofs in fibre-reinforced plastic composite construction with specific features compared to conventional metal roof structures. The aim was to achieve a 40% weight saving while maintaining the same strength and rigidity properties. The aim was to achieve a compact and functionally integrated design of the fibre-reinforced plastic composite with 70% less assembly work. <u>Results</u> A prototype lightweight roof made of fibre-reinforced plastic composite was developed to demonstrate the results of the project. Particular attention was paid to roof structures for low-floor trams, as they offered the greatest potential for integrative lightweight construction solutions. The innovation of this project lay in the holistic approach from the development of lightweight construction methods to the development of technology for an adapted, economical manufacturing process.	
19. keywords Rail vehicles, lightweight construction, fibre-reinforced plastic composite, tram roof, functional integration, vacuum infusion	
20. publisher	21. price