Schlussbericht zum Verbundprojekt

FlexSbus-LR – Flexibler Schienenbus für den Ländlichen Raum
Teilvorhaben: Konzeptionierung, Konstruktion und Entwicklung des Innenausbaus sowie der Außenverkleidung und Umsetzung am Demonstratorfahrzeug

Daten zum Vorhaben	
Förderkennzeichen (FKZ)	19I21005G
Zuwendungsempfänger	MV Engineering GmbH & Co KG
Laufzeit des Vorhabens	01.06.2021 – 31.12.2024
Berichtszeitraum	01.06.2021 – 31.12.2024

Erstellt: Bogdanovic, Milos
Poslawski, Artur

Freigegeben: Bogdanovic, Milos

Inhalt

KURZE DARSTELLUNG 3

Aufgabenstellung 3

Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 3

Planung und Ablauf des Vorhabens 3

Wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde 4

• Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden 4

• Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste 4

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen 4

EINGEHENDE DARSTELLUNG 6

1. der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele 6

1.1 Visuelle Dokumentation (Abbildungen) 7

2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 14

3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 14

4. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans 14

5. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 16

6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 11. 16

KURZE DARSTELLUNG

Aufgabenstellung

Das Ziel des Verbundprojekts FlexSbus-LR war die Entwicklung, Konstruktion und Demonstration eines batterieelektrischen, flexiblen Schienenbusses als zukunftsfähige Lösung für den Schienenpersonennahverkehr im ländlichen Raum. Im Rahmen des vorliegenden Teilvorhabens (FKZ: 19I21005G) verantwortete die MV Engineering GmbH & Co KG die Konzeptionierung, Detailkonstruktion und Umsetzung des gesamten Fahrgastzellen-Interieurs sowie der GFK-basierten Außenverkleidung.
Die Hauptaufgabe war die Entwicklung modularer, leichtgewichtiger GFK-Komponenten für die Außenhaut (Kopfverkleidung, Schürzen) und ein fertigungsgerechtes Innenausbaukonzept (Sitze, Boden, Klima-/Lüftungsführung, Verglasung), das die erfolgreiche Endmontage am Demonstratorfahrzeug ermöglichte.

Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben wurde in enger Kooperation mit den Verbundpartnern durchgeführt. Die zentralen Voraussetzungen waren:

1. Spezifikationen: Einhaltung der technischen Vorgaben der Verbundpartner (insbesondere RWTH Aachen/IFS) hinsichtlich der Fahrgestell-Schnittstellen, der geforderten Einstiegshöhe von Schienenoberkante (SO) und des Fahrzeuggesamtschwerpunkts.
2. Dynamische Anpassung: Die Bereitschaft zur frühzeitigen und umfassenden Anpassung der Konstruktion aller Komponenten an ein korrigiertes, reduziertes Lichtraumprofil. Diese Flexibilität war entscheidend für die spätere Betriebsfähigkeit des Fahrzeugs.

Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben folgte dem geplanten Ablauf von der initialen Konzeptentwicklung bis zur finalen Montage:

Phase	**Schwerpunkt**	**Ergebnis**
Phase I (Konzept/Schnittstellen)	Festlegung der Fahrzeuggeometrie (Lichtraumprofil, Einstiegshöhe von SO), Initiales Konzept für Fahrgastzellenöffnungen und Sichtfeld Notfahrerstand.	Definition der fundamentalen Fahrzeugparameter.
Phase II (Detailkonstruktion/Anpassung)	Konstruktive Entwicklung aller GFK-Anbauteile (Kopf, Frontklappe, Schürzen) und Innenausbau-Grundlagen. Wesentliche Anpassung aller Komponenten an die reduzierte Wagenbreite.	Fertigungsgerechte 3D-Modelle unter korrigiertem Lichtraumprofil.

Phase III (Dokumentation/ Beschaffung)	Konstruktiver Abschluss der Außenhaut, Übergabe der 3D/2D-Daten an Fertiger (GFK-Kopfkomponenten). Bestellung der Großkomponenten (Verglasung, Fußboden, Beleuchtung).	Start der Fertigung der Hauptkomponenten.
Phase IV (Montage/Abschluss)	Lieferung der GFK-Großkomponenten. Finalisierung der Innenausbau-Dokumentation (Klima-/Lüftung, Innendecke, Haltestangen). Erfolgreiche Endmontage aller Außen- und Innenkomponenten am Demonstrator.	Fertiggestellter Demonstrator.

Wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde

Das Vorhaben knüpfte an den Stand der Technik im Bereich des Leichtbaus und der Modultechnik für Schienenfahrzeuge an. Im Fokus stand die konsequente Nutzung von Faserverbundkunststoffen (GFK) für die Außenhaut, um das Fahrzeuggewicht zu minimieren und so die Energieeffizienz des batterieelektrischen Antriebs zu maximieren.

• Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Für die Konstruktion der GFK-Außenhaut wurden etablierte Industriestandards und Verfahren des Faserverbundkunststoff- und Klebetechnik-basierten Schienenfahrzeugbaus genutzt. Diese Verfahren sichern die notwendige Festigkeit bei geringem Gewicht.
Es wurden keine fremden Schutzrechte benutzt. Im Laufe des Projekts wurden durch den Zuwendungsempfänger keine Schutzrechtsanmeldungen getätigt.

• Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Die konstruktiven Grundlagen stützten sich auf die einschlägigen nationalen (EBO) und europäischen Regelwerke (TSI) sowie auf die internen Spezifikationen und Simulationsergebnisse der Verbundpartner, insbesondere im Hinblick auf strukturelle Anforderungen und Brandschutz (DIN EN 45545).

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit erfolgte primär mit den Verbundpartnern (LBBZ GmbH, RWTH Aachen University/IFS/ISEA) und war gekennzeichnet durch die laufende Klärung komplexer Schnittstellen zwischen Fahrgestell (Chassis), Rohbau (Fahrgastzelle) und den von der MV Engineering entwickelten Anbauteilen. Die Kooperation mit den externen Fertigungsbetrieben (für die GFK-Teile und die Verglasung) stellte die termingerechte und spezifikationskonforme Lieferung sicher.

EINGEHENDE DARSTELLUNG

1. der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die Zuwendung wurde planmäßig zur Finanzierung der F&E-Leistungen in Konstruktion, Dokumentation, Beschaffung und Montage eingesetzt. Die vorgegebenen Ziele wurden vollumfänglich erreicht, wobei insbesondere die Qualität der Konstruktion und die termingerechte Umsetzung trotz Planänderungen hervorzuheben sind.

Die Zuwendung wurde primär zur Finanzierung der hochspezialisierten F&E-Leistungen in den Bereichen Leichtbau-Konstruktion und Fertigungs-Dokumentation genutzt. Der Fokus lag auf der Entwicklung von Großkomponenten aus GFK (Faserverbundkunststoff) und dem modularen Innenausbau. Ein wesentlicher Erfolg des Teilvorhabens war die agile Reaktion auf die notwendige Korrektur des Lichtraumprofils. Dies erforderte eine umfassende und erfolgreiche Umkonstruktion aller Anbaubaugruppen an die reduzierte Wagenbreite, was die technische Machbarkeit des Gesamtfahrzeugs sicherstellte.

Die Konstruktion der GFK-Außenhaut umfasste die Detaillierung des Fahrzeugkopfes, der Frontklappe mit Öffnungsmechanismus, der Verkleidung der Crashelemente sowie der Seitenschürzen. Hierbei wurde das Konzept der geklebten Außenhaut konsequent umgesetzt, um maximale Gewichtsersparnis zu erzielen. Im Innenausbau wurden die Schnittstellen zu Fußboden, Sitzkonsolen und dem flexiblen Mehrzweckbereich geklärt und die Detailkonstruktion für die Innendecke, die integrierte Luftführung (Klima-/Lüftung) sowie die Fahrgastinfosysteme und Haltestangen finalisiert und zur Beschaffung freigegeben.

Die erfolgreiche Endmontage aller Außen- und Innenausbaukomponenten am Demonstratorfahrgestell, unmittelbar nach Lieferung der GFK-Großkomponenten und des Innenausbaumaterials (Verglasung, Fußboden, Isolierung, Außenverglasung), bestätigt die Qualität der Konstruktion und die termingerechte Umsetzung.

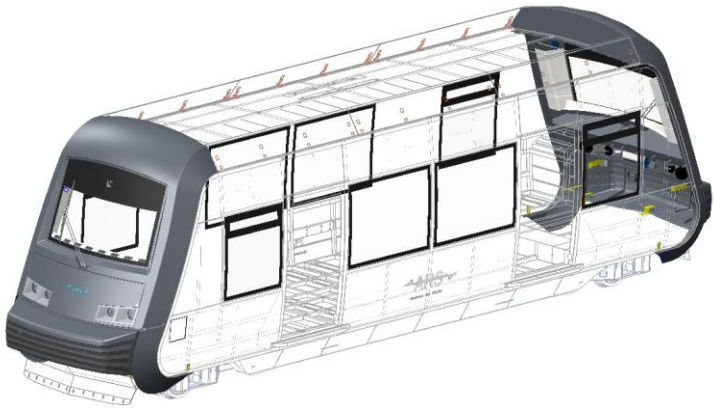
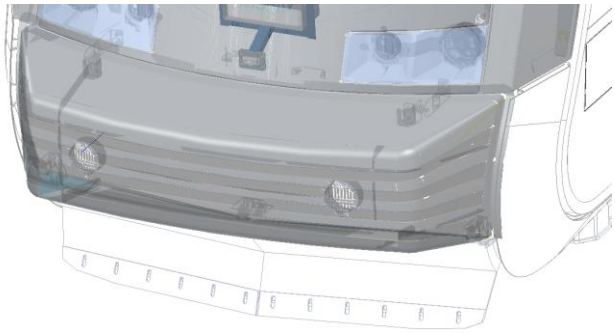
Gegenüberstellung der Ziele und Ergebnisse:

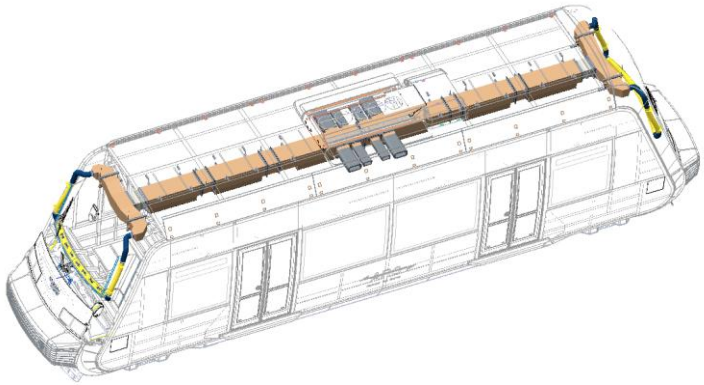
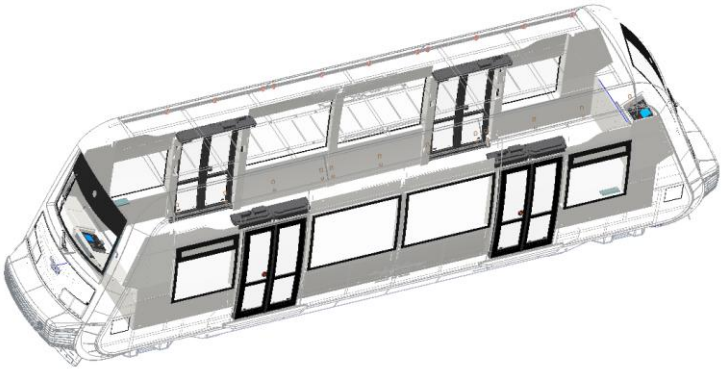
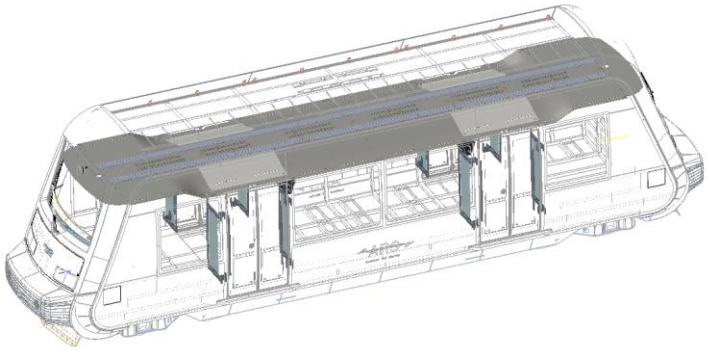
Vorgegebenes Ziel	**Erzieltes Ergebnis (Detail)**	**Zielerreichung**
Konstruktion der GFK-Außenhaut	Fertigungsgerechte Detaillierung des GFK-Kopfes, der Frontklappe mit Öffnungsmechanik sowie der Verkleidung der Crashelemente, inkl. Integration der Außenbeleuchtung.	Erreicht
Anpassung an korrigiertes Lichtraumprofil	Erfolgreiche und umfassende Umkonstruktion aller Komponenten an die reduzierte Wagenbreite ohne Beeinträchtigung der Funktionalität.	Erreicht

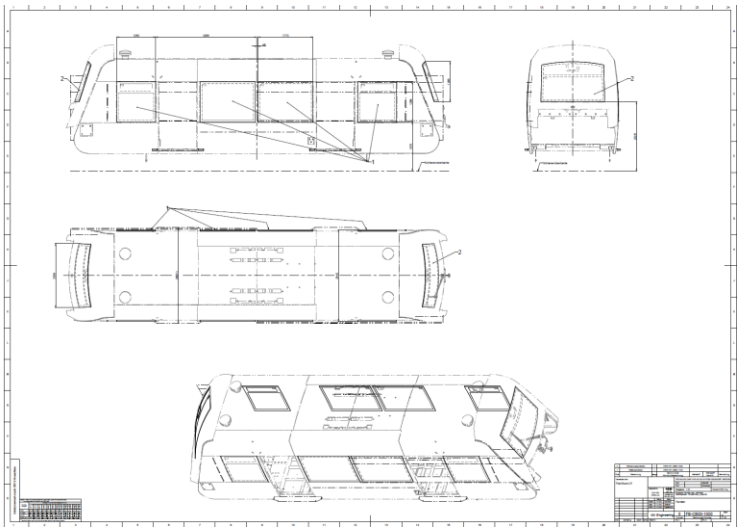
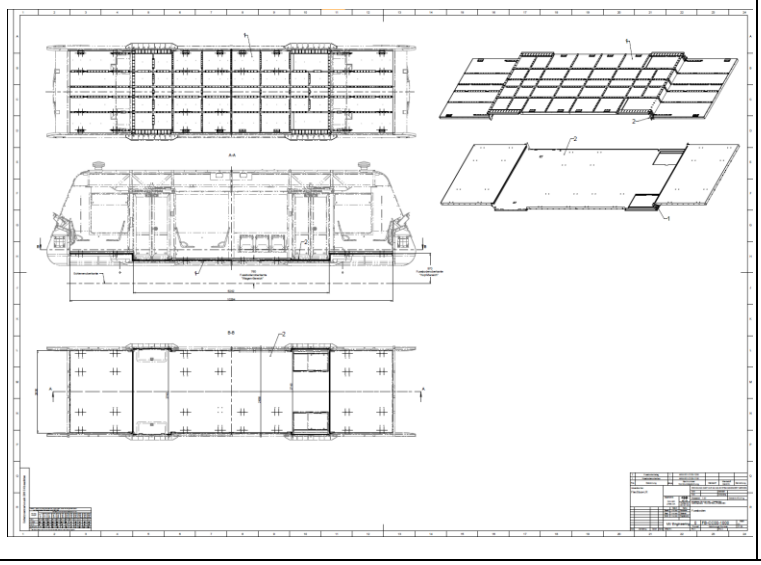
Entwicklung des Innenausbaus	Finalisierung der Detailkonstruktion für Innendecke, Luftführung, Innenverkleidung, Haltestangen, Fahrgastinfosysteme und des flexiblen Mehrzweckbereichs.	Erreicht
Endmontage am Demonstrator	Erfolgreiche Montage aller Außen- und Innenausbaukomponenten am Fahrgestell.	Erreicht

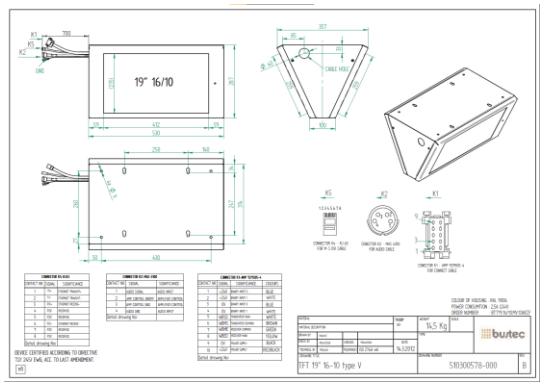
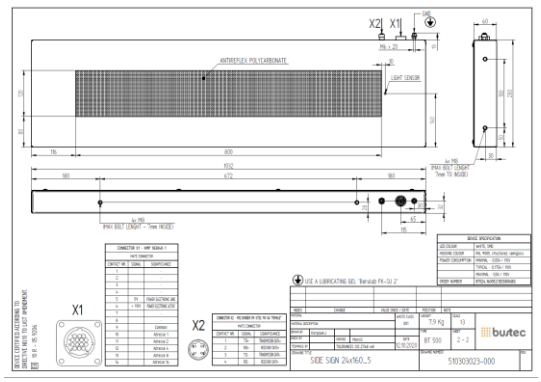
Der fertiggestellte Demonstrator stellt eine wirtschaftlich tragfähige technologische Lösung dar, deren modulares Innenraumkonzept und leichte GFK-Bauweise die zentralen Konstruktionsziele des Teilvorhabens erfolgreich umsetzen.

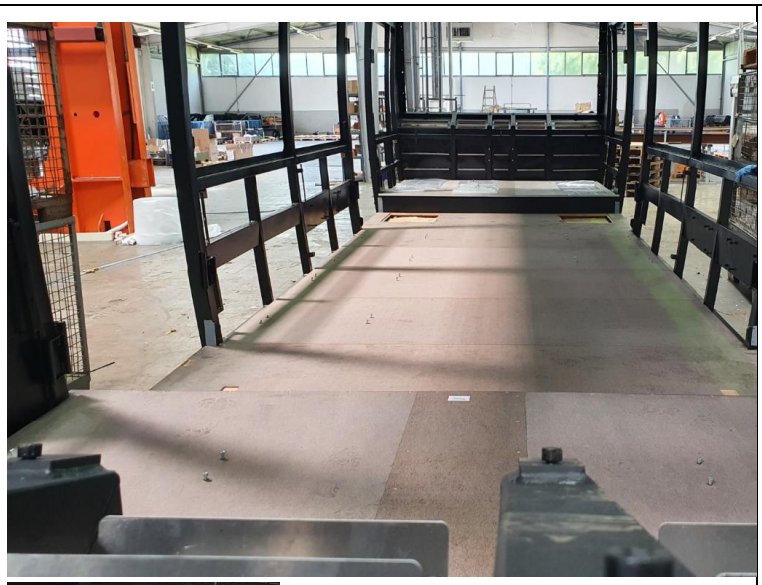
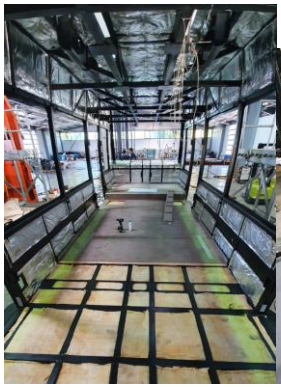
1.1 Visuelle Dokumentation (Abbildungen)

Darstellung	Tätigkeit
	Detailierung der GFK-Kopf-Komponenten, Erstellung der Außenflächen nach Designvorgaben sowie die Integration der Schnittstellen am GFK-Kopf für die Montage von Windschutzscheibe, Spitzenlicht, Wisch-/Waschanlagen, Öffnungs- und Verschlussmechanik der Frontklappe.
	Umsetzung der Leitungs- und Luftführung in den A-Säulen durch die Konstruktion der A-Säulenverkleidungen Innen und des im GFK-Kopf integrierten Querluftkanals
	Detailierung der Frontverkleidung der Crashelemente, Umsetzung der Designaußenfläche, konstruktive Umsetzung der Befestigung am Chassis, Integration der Schallöffnungen für die Signalhörner

	Umsetzung des Klima-/Lüftungskonzeptes des Fahrgastraumes, Konstruktion der Innendeckenkanäle, Klärung der Befestigung und Einbaumöglichkeit im Fahrzeug, Vorbereitung der Modelle für die Fertigungsanfrage
	Konstruktion der GFK-Innenverkleidung, Klärung der Schnittstelle und Befestigungsmöglichkeiten in der Fahrgastzelle und Vorbereitung der 3D-Modelle für die Fertigungsanfrage
	Konstruktion der Innendecke, Haltestangen, Fahrgastinfosystemen, Klärung der mechanischen und elektrischen Schnittstelle und Befestigungsmöglichkeiten in der Fahrgastzelle und Vorbereitung der 3D-Modelle für Fertigungsanfragen
	Übergabe der 3D Daten und Fertigungsstart der GFK-Kopfkomponenten (GFK-Kopfverkleidung, Frontklappe und Verkleidung der Crashelemente)

	Bestellung der Leuchtkörper für die Baugruppe Fahrzeugaußenbeleuchtung
	Bestellung und Fertigungsstart der Außenverglasung
	Bestellung und Fertigungsstart des Fußbodens

 	Bestellung und Fertigungsstart der Baugruppe Fahrgastinfosysteme
	Montage der GFK-Kopfverkleidung am Rohbau

  	Montage der Fahrzeugisolierung, Fußbodens und des Bodenbelages
 	Montage des Fahrgastinfosystems

	Montage der Innenverkleidung, Luftführung und Innendecke
	Montage der Frontklappe mit Außenbeleuchtung, Wischeranlage und Bugschürze

2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Position	Bewilligtes Budget	Tatsächliche Ausgaben	Abweichung in %
0813 Material	225.048,46 €	303.573,22 €	35 %
0837 Personalkosten	1.236.666,64 €	1.599.685,28 €	29,4 %
0838 Reisekosten	4.237,60 €	0,00 €	-100 %
Gesamtausgaben	**1.465.952,70 €**	**1.903.258,50 €**	**29,8 %**

Erklärung zu Abweichungen: Durch die signifikaten Produktdesignänderungen haben sich bedeutende Mehrkosten ergeben. Die Details wurden bereits oben angegeben.

3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleistete Arbeit war von zentraler Bedeutung und hoher Komplexität für das Gesamtprojekt, da die Entwicklung von Kernkomponenten, die nicht am Markt verfügbar sind, spezifische Forschungs- und Entwicklungsleistungen erforderte.

Die Notwendigkeit ergibt sich aus drei zentralen Aspekten:

- Leichtbau-Mandat: Die Konzeption sah die konsequente Nutzung von Faserverbundkunststoffen (GFK) vor, um das Fahrzeuggewicht zu minimieren und so die Energieeffizienz des batterieelektrischen Antriebs zu maximieren. Die Entwicklung der geklebten GFK-Außenhaut und des flexiblen Innenraumkonzepts waren hierfür essenziell und stellen eine technologische Neuentwicklung dar.
- Modulbauweise: Das Ziel des flexiblen Mehrzweckbereichs und der modularen Innenausstattung bedingte die Neukonstruktion sämtlicher Komponenten (Sitze, Haltestangen, Klima- und Luftführung, Innenverkleidungen), um eine einfache Austauschbarkeit und Anpassbarkeit zu gewährleisten.
- Schnittstellenmanagement: Die Ingenieurarbeit war zwingend erforderlich, um die komplexen Übergänge zwischen dem Fahrgestell (Chassis), dem Rohbau der Fahrgastzelle (Verbundpartner) und den von der MV Engineering entwickelten Anbauteilen präzise abzustimmen.

Die geleistete Arbeit war in vollem Umfang angemessen und gerechtfertigt:

- Detaillierungsgrad: Die Konstruktion der geklebten GFK-Außenhaut und die Integration aller Leitungs- und Luftführungskonzepte (insbesondere in den A-Säulen und der Innendecke) erforderten ein Höchstmaß an ingenieurtechnischer Präzision und

Detaillierung. Die Einhaltung strenger Brandschutzbestimmungen (DIN EN 45545) für die Materialien stellte zusätzliche konstruktive Anforderungen dar.
- Agile Anpassung: Die unvorhergesehene Umkonstruktion aller Komponenten aufgrund der Korrektur des Lichtraumprofils (reduzierte Wagenbreite) erhöhte den Aufwand signifikant, war aber notwendig, um die spätere Betriebsfähigkeit des Demonstrators sicherzustellen. Dieser zusätzliche, erfolgreiche Aufwand belegt die Angemessenheit und die hohe Problemlösungskompetenz des Projektteams, die zur technischen Machbarkeit und zum Projekterfolg führte.

4. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Verwertbarkeit der Ergebnisse ist hoch und folgt dem fortgeschriebenen Verwertungsplan:

Wissenschaftliche Verwertung und Transfer

Der fertiggestellte Demonstrator bildet die Basis für die weitere wissenschaftliche Erprobung und Lehre.

- Der FlexSbus-LR wird nach Abschluss des Verbundprojekts der RWTH Aachen University für weiterführende Forschungsaktivitäten zur Verfügung gestellt.
- Die Plattform dient insbesondere der Erprobung und Validierung der Verbundpartner-Forschungsergebnisse, wie etwa der dynamischen Erprobung des batterieelektrischen Antriebsstrangs und der Untersuchungen zum fahrerlosen Betrieb (ATO - Automatic Train Operation).
- Die entwickelten Konstruktionsprinzipien (GFK-Leichtbau, Modulkonzept) werden in wissenschaftlichen Publikationen und auf Fachtagungen der Öffentlichkeit zugänglich gemacht, um den Stand der Technik im Schienenfahrzeugbau voranzutreiben.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten und Transfer

Die entwickelten Lösungen bieten einen substanziellen funktionalen und wirtschaftlichen Vorteil gegenüber konventionellen Schienenfahrzeuglösungen, was die Grundlage für eine erfolgreiche Markteinführung bildet.

- Funktionale/Wirtschaftliche Vorteile: Die modulare GFK-Bauweise ermöglicht eine signifikante Gewichtsersparnis, was die Betriebskosten des batterieelektrischen Antriebs senkt und die Reichweite erhöht. Das modulare Innenraumkonzept erlaubt es Verkehrsbetrieben, das Fahrzeug schnell und kosteneffizient an unterschiedliche Anforderungen (z. B. Pendlerverkehr, Fahrrad- oder Gütertransport) anzupassen. Dies führt zu einer höheren Flexibilität und Attraktivität für den Einsatz auf Schwachlaststrecken.
- Marktpotenzial am Standort Deutschland: Die Ergebnisse adressieren einen zukunftsfähigen Markt zur Reaktivierung von Schienenstrecken im ländlichen Raum durch den Einsatz kostengünstiger, umweltfreundlicher Fahrzeuge. Die Wertschöpfung der Komponentenfertigung findet überwiegend am Standort Deutschland statt.

- Umsetzungs- und Transferstrategien: Die Ergebnisse sind direkt in eine mögliche Serienfertigung übertragbar. Der Verwertungsplan sieht die Lizenzierung des Designs oder die direkte Fertigung der entwickelten Leichtbau- und Interieur-Komponenten durch die MV Engineering GmbH & Co KG vor.

5. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit ist die Forschung zu batterieelektrischen und leichten Schienenfahrzeugen international stark vorangeschritten. Insbesondere die Entwicklungen in folgenden Bereichen wurden beobachtet:

Fahrerloser Betrieb (ATO): Die Automatisierung im Schienenverkehr nimmt weltweit zu. Der FlexSbus-LR ist durch die Forschung der Verbundpartner auf diese Entwicklung ausgerichtet und bildet eine flexible Plattform, die entsprechende Technologie- und Sensorintegrationen ermöglicht, womit ein Anschluss an zukünftige Standards gesichert ist.

Modulare Fahrzeugkonzepte: In europäischen Nachbarländern (z. B. Skandinavien, Niederlande) wird verstärkt an modularen Schienenfahrzeuglösungen gearbeitet, die eine schnelle Anpassung der Fahrgastzelle an wechselnde Anforderungen erlauben. Der FlexSbus-LR knüpft hier an, geht aber durch die konsequente Umsetzung eines völlig neuartigen GFK-Leichtbau-Ansatzes in der Außenhaut über diese Entwicklungen hinaus.

Der FlexSbus-LR behält durch seine konsequente Auslegung auf Extrem-Leichtbau (GFK-Außenhaut, geklebte Struktur) und die spezifische Adaption für den deutschen Regionalverkehr einen entscheidenden Innovationsvorsprung. Die Konzentration auf die maximale Gewichtsreduktion ist der zentrale Enabler für die Reichweite und Effizienz des Batterieantriebs und stellt ein Alleinstellungsmerkmal des Konstruktionskonzepts dar. Die Entwicklungen anderer Stellen stellen das im Vorhaben verfolgte Leichtbaukonzept und die Verwertungsstrategie nicht fundamental in Frage, sondern bestätigen vielmehr die Relevanz der Fokussierung auf die Zukunftsfelder Automatisierung und Modularität.

6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 11.

Erfolgte Veröffentlichungen:

- Messeauftritt: Vorstellung des fertiggestellten Demonstrators auf der InnoTrans 2024

Geplante Veröffentlichungen/Transfer:

- Wissenschaftliche Publikationen der Verbundpartner (RWTH Aachen) zur Validierung des Leichtbau- und Fahrkonzepts auf internationalen Tagungen
- Erstellung von Verwertungsunterlagen für potenzielle Kunden zur geplanten Markteinführung und Lizenzierung der entwickelten Komponenten.