

## **Sachbericht zum Verwendungsnachweis**

### **Teil II – Ausführlicher Bericht**

**WIR!-Projekt:   Verbundvorhaben: Gedruckte Audio-Informationssysteme mittels Multikanal-Lautsprecherbahnen für innovative Bahnfahrzeuge**

**Teilvorhaben: Systemintegration gedruckter Multikanal-Lautsprecherbahnen in innovative Bahnfahrzeuge (FKZ 03WIR1215C)**

**Zuwendungs-  
empfänger:   Hörmann Vehicle Engineering GmbH**

**Laufzeit:       10/2021 – 06/2024**

## 1 Eingehende Darstellung

### AP1 Szenarien-Entwicklung, Anforderungsanalyse und Konzeption

#### AP1.2 Untersuchung möglicher Einbauräume

Untersucht wurden mögliche Einbauräume von Triebzügen S- und U-Bahnen, sowie Straßenbahnen. Dabei bietet sich eine Integration der Lautsprecherbahnen in Teile der Innenverkleidung an, um den Schutz und die Steifigkeit der gedruckten Lautsprecherbahnen auf Papier zu gewährleisten. Folgende Verkleidungsteile befinden sich in schienen-gebundenen Fahrzeugen:

- Fußboden
- Seitenwände
- Fenstersäulen
- Vouten (im Übergang von Seitenwand und Decke)
- Decke
- Portalverkleidung an den Übergängen
- Gepäckablagen (nur in Triebzügen)
- Türsäulenverkleidung
- Leuchtenbandabdeckungen

#### Integration in Decken- und Voutenelementen

Decken- und Voutenelemente erstrecken sich nahezu durchgängig über die gesamte Länge des Zuges. Dies ermöglicht die Installation von Lautsprecherbahnen, die eine gleichmäßige Schallverteilung und somit eine homogene Beschallung des Fahrgastraums gewährleisten.



Abbildung 1: Anbringung der Lautsprecherbahnen unter- bzw. oberhalb des Deckenpanels

Diese kontinuierliche Schallquelle kann die Sprachverständlichkeit erheblich verbessern, insbesondere in größeren und voll besetzten Zugabteilen. Die Lautsprecherbahnen können unauffällig unter oder über den Deckpanelen installiert werden, wie in Abbildung 1 dargestellt, ohne die Funktionalität oder das Design des Fahrzeugs zu beeinträchtigen.



Abbildung 2: Anbringungsmöglichkeiten in den Vouten und der Mitteldecke

## Türbereich

Die Integration von Lautsprechern im Türbereich von Bahnfahrzeugen bietet zahlreiche zusätzliche Vorteile, die über die reine Verbesserung der akustischen Beschallung und Sprachverständlichkeit hinausgehen.



Abbildung 3: Anbringung im Türbereich, bedruckt oder unbedruckt

Die Bedruckbarkeit der Lautsprecherbahnen bietet eine einzigartige Gelegenheit, diese Flächen für Werbung oder informative Inhalte zu nutzen. Die Lautsprecher können mit wechselnden Werbebotschaften, Fahrgastinformationen oder Sicherheitsanweisungen bedruckt werden. Die Bedruckbarkeit der Lautsprecherbahnen bietet eine einzigartige Gelegenheit, diese Flächen für Werbung oder informative Inhalte zu nutzen. Die

Lautsprecher können mit wechselnden Werbebotschaften, Fahrgastinformationen oder Sicherheitsanweisungen bedruckt werden.

### **Gepäckablage**

Eine Integration der rollengedruckten Lautsprecherbahnen in die Gepäckablage wurde ebenfalls in Betracht gezogen. Die semi-transparenten Lautsprecher könnten dann zudem die Abdeckung der Beleuchtungseinheit übernehmen.



Abbildung 4: Anbringung in der Gepäckablage als Lichtabdeckung (transluzent)

Bei der Integration der Lautsprecherbahnen in die Verkleidungselemente muss die Möglichkeit zur Demontage und Teilbarkeit der Elemente entsprechend der Komponenten-größe berücksichtigt werden. Dies ist wichtig für Wartungs- und Reparaturarbeiten, um sicherzustellen, dass die Lautsprecherbahnen bei Bedarf problemlos entfernt und wieder installiert werden können.

### **1.3 Definition und Analyse verschiedener Einbausituationen nach verschiedenen Fahrzeuggattungen**

Um die Features der gedruckten Lautsprecher optimal nutzen zu können, bietet sich ein Einbau in Längsrichtung an. Die Länge der Lautsprecherbahn orientiert sich an den Einbaukomponenten in den verschiedenen Fahrzeuggattungen. Die Einzelkomponenten in Schienenfahrzeugen sind meist demontierbar, um die Zugänglichkeit der Unterbauten, verlegten Elektrik etc. im Servicefall garantieren zu können.

## **1.4 Anforderungen an bahntechnische Integration der Technologie**

Um in Schienenfahrzeugen Subkomponenten zu integrieren, müssen gewisse Normen eingehalten werden. Dazu gehören allen voran die Brandschutznorm DIN EN 45545-2 und die Norm für Bahnanforderungen DIN EN 16584-2.

Lautsprechersysteme in Schienenfahrzeugen müssen den klimatischen Bedingungen der jeweiligen Einsatzorte entsprechen und geeignet sein. So sind die Bahnkomponenten in Einsatzgebieten am Meer z.B. größeren Feuchtigkeitsschwankungen ausgesetzt.

### **1.4.1 Brandschutzanforderung**

#### **Normvorgaben**

Die aktuelle Brandschutznorm DIN EN 45545-2 gibt die Anforderungen für Werkstoffe in Bahnfahrzeugen vor. Anhand der verschiedenen Fahrzeugtypen werden entsprechend die Betriebsklasse und Bauartklasse zugeordnet. Daraus ergibt sich die Einordnung in die Gefährdungsstufen (Hazard Level 1-3).

Die Klassifizierung der Brandsicherheitsanforderungen der gewählten Werkstoffe und Komponenten werden anhand der Abmessungen, Gewicht und Einsatzort festgelegt.

#### **Eingruppierung gedruckter Lautsprecher**

Die Eingruppierung von Lautsprechern aus brennbarem Material z.B. Papier kann entsprechend der Gruppierungsregel aus DIN EN 45545-2 (siehe Abbildung 5) erfolgen. Um die Gruppierungsregel nutzen zu können, muss die exponierte Fläche in jedem Fall kleiner gleich 0,2 m<sup>2</sup> sein.

- a) Sollte das Gewicht der nicht nachgewiesenen Komponente unter 10 g liegen, kann die Komponente ohne Test eingesetzt werden.
- b) Bei einem Gewicht über 10 g und unter 100 g sind die horizontalen und vertikalen Abstände zu anderen Komponenten, die keine brandschutztechnische Zulassung haben, zu beachten.
- c) Bei einem Gewicht ab 100 g sind in jedem Fall Brandschutzprüfungen, entsprechend der Gruppierungsregel, notwendig.

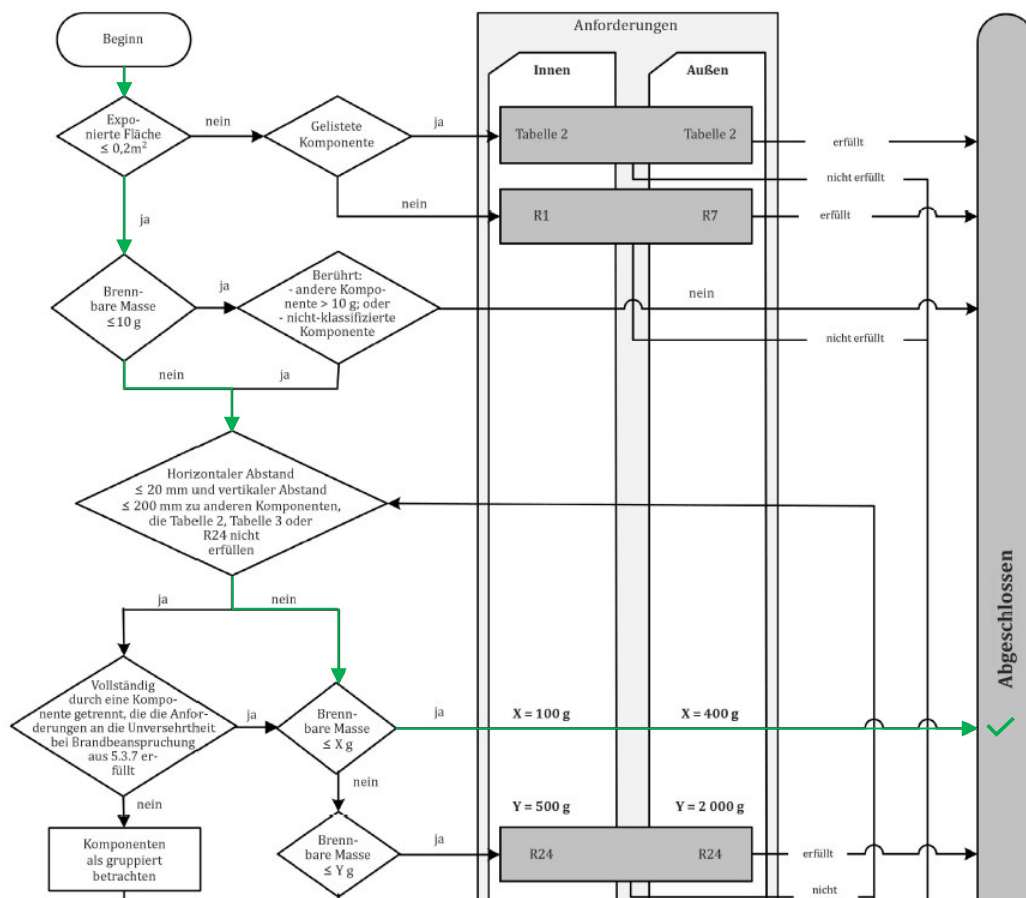


Abbildung 5: Gruppierungsregel gemäß DIN EN 45545-2

Die gedruckten Lautsprecher weisen ein Flächengewicht von 250 g/m<sup>2</sup> auf und wiegen somit bei einer Fläche von 0,2 m<sup>2</sup> genau 50 g. Sie fallen damit in die Kategorie B, wodurch ein horizontaler Abstand von 20 mm und ein vertikaler Abstand von 200 mm zur nächsten Komponente ohne brandschutztechnische Zulassung einzuhalten ist.

Bei einer Fläche von über 0,2 m² ist die Eingruppierung der Komponenten in der Norm 45545-2 Tabelle 2 entscheidend.

### 1.4.2 Akustische Anforderungen

## Normvorgaben

Akustische Anforderungen für die Zugänglichkeit für Menschen mit Behinderung und Menschen mit eingeschränkter Mobilität werden in der TSI PRM und DIN EN 16584-2 beschrieben.

Die DIN EN 16584-2 (2017) legt fest, wie gut die Sprachverständlichkeit für akustische Informationen über eine bestimmte Entfernung erhalten bleiben muss. Dieser STI-PA-Wert (Speech Transmission Index for Public Address Systems) für Sprachinformationen muss nach der Norm mindestens 0,45 betragen, damit die Sprachansage für alle Personen im Schienenfahrzeug verständlich bleibt. Die Anforderungen an die Lautsprecheranlage müssen an jedem Sitz- und Rollstuhlplatz sowohl bei Stillstand des Zuges als auch bei einer

Geschwindigkeit von 80 km/h auf freier Strecke erfüllt werden. Die Bewertung der Anlage erfolgt durch die Erfüllung der Anforderungen an jedem Sitz- und Rollstuhlplatz durch Messung an den folgenden festgelegten Punkten (siehe Abbildung 6). Die Messung muss auch in der Mitte jedes Rollstuhlplatzes erfolgen. Für die Messpunkte wird eine Gleichmäßigkeit mit einer maximalen Abweichung von 10 % gefordert.

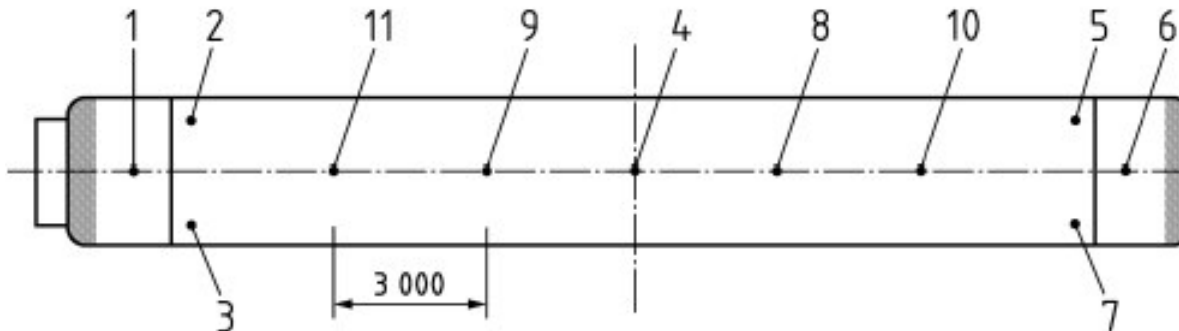


Abbildung 6: Beispiel für akustische Messpunkte

Die Bewertung muss in Übereinstimmung mit EN 60268-16 „Elektroakustische Geräte – Teil 16: Objektive Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den Sprachübertragungsindex“ erfolgen.

### 1.4.3 Anforderungen zum Testbetrieb von Systemen

#### Autarke Testsysteme

- Bedingungen:
  - Testsystem funktioniert unabhängig von der bestehenden Fahrgastinformationssystem
  - System benötigt nur Bordspannung
  - System greift nicht in Sicherheitsrelevante Prozesse ein (Durchsagen mit dem Bahnzugelassenen Sprachsystem bei Gefahren und betrieblich notwendigen Situationen sind weiter möglich)
  - Metergewicht ist vernachlässigbar
- Einsatzprinzip:
  - Unabhängiges System kann mittels ortveränderlicher mobiler Komponenten für Sprache und Steuerung im Führerstand so platziert werden, dass keine Beeinträchtigung des TF beim Betrieb des Fahrzeuges entsteht
  - → Bewertung ist durchzuführen:
    - Risikobewertung (durch Fahrzeughalter, Personalvertretung, Mitarbeiter)
    - Ggf. Bewertung durch zuständige Stelle, wenn erste Instanz nicht ausreicht
  - Nutzung der Bordnetzspannung nach dem Generator/Batterie
  - Steuerung wird in eigenem Behältnis, gekapselt, mobil, sicher im Führerstand untergebracht
  - Lose Kabel sind zu vermeiden – Verlegung hinter Verkleidungsteile

- Sprechstelle ist separat, gut erreichbar ohne Beeinträchtigung von Bedienprozessen und Sichtverhältnissen für den Triebfahrzeugführer zu installieren
  - Lautsprecher sind geklebt
- Überwachung des Installationszustandes während des Testbetriebes

## **1.5 Ableitung von Design, Ergonomie- und Betriebsanforderungen**

Die Anforderungen an die gedruckten Lautsprecher zur Integration in die Bahn können erfüllt werden, wenn diese das Gewicht von 100 g auf 0,2 m<sup>2</sup> nicht überschreiten. Nutzung, Erweiterung bestehender Bauteilkomponenten ist notwendig, um die Stabilität der Lautsprecher zu sichern. Pro Wagen wird eine Unterteilung der Lautsprecherbahnen notwendig, um im Wartungsfall einen Austausch zu gewährleisten. Dabei orientiert sich die maximale Länge eines Abschnittes an der Bauteilgröße des jeweiligen Verkleidungsteils (ca. 1425 mm bei 140 mm Breite). Um Vandalismus vorzubeugen, wird eine Anbringung hinter perforierten Verkleidungselementen, wie z.B. der Lochblech-Decke empfohlen. Weiterhin denkbar ist die Integration in Verkleidungsteile mit einem minimalen Abstand zur Bauteiloberfläche, um eine Schwingung gerade noch zu ermöglichen. Im Sichtbereich kann die Einbindung mit einer Zweitfunktion wie z.B. Printwerbung oder Leuchtenabdeckung kombiniert werden, um unentdeckt zu bleiben.

## **1.6 Untersuchung Audiotechnischer Applikationen der Lautsprecherbahnen im Schienenfahrzeug**

Bestehende Audiosysteme in Bahnen sind individuell auf jedes Fahrzeug abgestimmt. Je nach Fahrzeuggröße, Raumverteilung und installierten System werden diese vom Betreiber festgelegt. Lautsprechersysteme gibt es von z.B. VISATON und Annax.

## **1.7 Ableitung von Material-, Konstruktions- und Fertigungsrandbedingungen**

Nach den vorangegangenen Untersuchungen zur Systemanforderung, welche Verkleidungsteile sich für die Anbringung von gedruckten Lautsprecherbahnen anbieten, wurden verschiedene Einbaumöglichkeiten hinsichtlich Hörqualität und Befestigung aufgezeigt (siehe Abbildung 7). Dabei wurde eine optimale Lautsprecherlänge, im Hinblick auf die Einbausituation in einem Schienenfahrzeug, auf max. 1750 mm festgehalten. Bei einer Standard-Lautsprecherbahnbreite von 140 mm (Bahnbreite bei Rollen-druckverfahren) sollte allerdings eine Länge von 1425 mm nicht überschritten werden, um bei einer Fläche von unter 0,2 m<sup>2</sup> zu bleiben. Alternativ kann die Bahnbreite entsprechend verringert werden. Für eine gute Schallentwicklung ist eine gewölbte Form in Querrichtung notwendig. Der Grad der optimalen Wölbung soll anhand des Demonstrators im Arbeitspaket 3 herausgefunden werden. Die Entscheidung für eine Anbindungsart an ein Verkleidungsteils ist abhängig vom jeweiligen Designentwurf des Bahn-Interieurs. Hierfür kommen die Verbindungen Kleben, Klemmen oder die Anbringung mit Hilfe von Pilzkopf-Klett in Frage.

AudioBAHN<sup>2</sup>  
Mockup – Variantenvielfalt zum Prüfen der Hörqualität

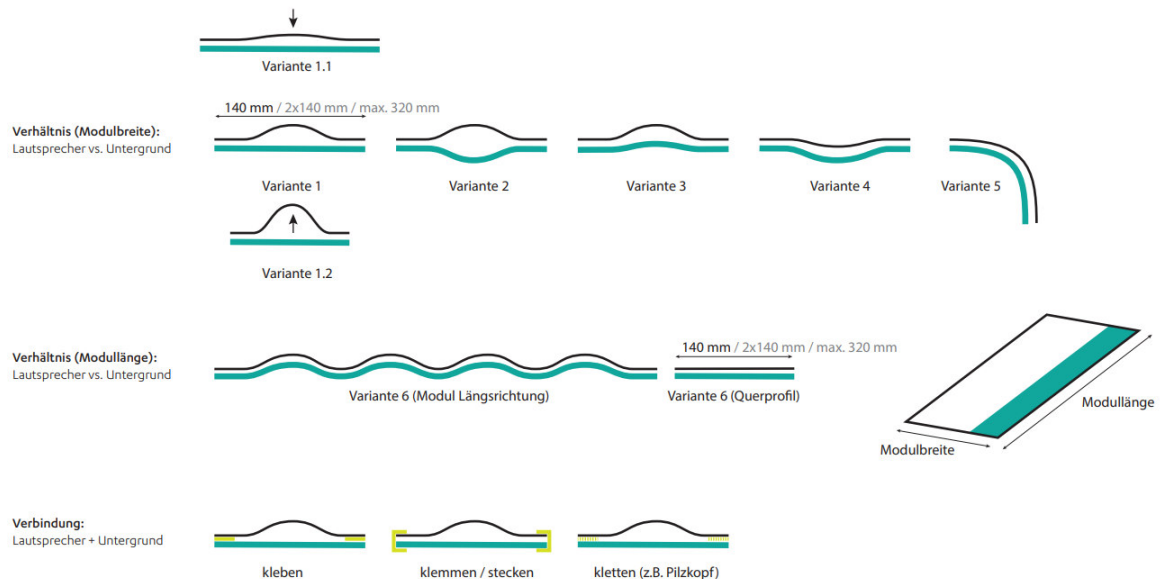


Abbildung 7: Variantenvielfalt zum Prüfen der Hörqualität

## Technische Konzeption Gesamtsystem

Als Grundlage für die Erstellung einer Testvorrichtung wurden diverse Einbauszenarien aufgezeigt. Die Variantenvielfalt zum Prüfen der Hörqualität soll durch eine Verschiebung des Querschnitts der Lautsprecherbahn erreicht werden.

Um die bestmögliche Schallausbreitung zu erreichen, wurden verschiedene Krümmungswinkel sowie unterschiedliche Abstände – sei es konkav, konvex oder flach – zu einer Bauteilfläche untersucht. Diese Variationen sind entscheidend, um den optimalen Einbauwinkel und die ideale Krümmungshöhe zu bestimmen. Außerdem konnte die Modulbreite und die Modullänge variiert werden, um den Einfluss auf die Qualität der Schallausbreitung zu untersuchen. Entsprechend den Anforderungen an die Verstellbarkeit wurde von der Firma Seiwo GmbH zunächst ein 3D-Modell erstellt. Dieses Modell dient als Grundlage für die Planung und Visualisierung und anschließend ein physisches MockUp aufgebaut, das es ermöglichen sollte, die theoretischen Überlegungen in der Praxis zu testen und zu validieren.

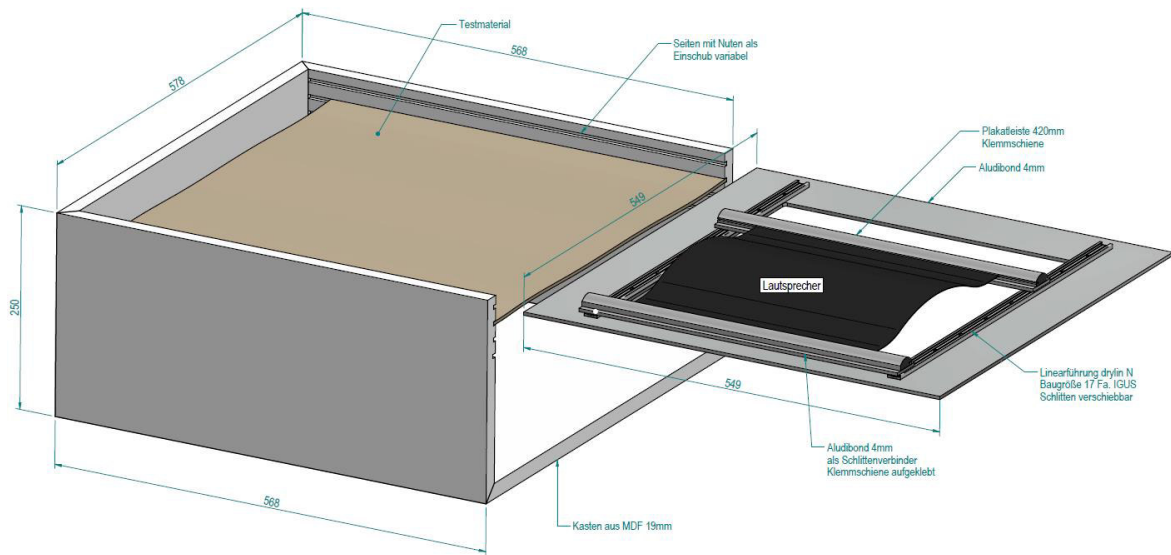


Abbildung 8: MockUp zum Prüfen der Hörqualität bei unterschiedlichen Parametern

Die gedruckte Lautsprecherbahn konnte nun auf einer Länge von 1750 mm eingespannt werden. Für Rollenbreiten von 140 mm bis 320 mm lassen sich nun die Längsseiten stufenlos zusammenschieben und somit verschiedene Krümmungen realisieren. Die im Winkel 0-30° einstellbaren Klemmschienen sorgen dabei für eine sinusähnliche Auswölbung des Bahnquerschnittes. Unterhalb der Lautsprecherbahn lassen sich diverse Materialien, die üblicherweise in Bahnen verwendet werden (z.B. Listolan, Edelstahl, lackierte Oberflächen), einschieben, um mögliche Reflexionseigenschaften zu überprüfen.



Abbildung 9: Verstellbare Befestigung Rollenbahn (links) / Eingespannte Lautsprecherbahn mit Wölbung (rechts)

Durch die zwischenzeitliche Insolvenz der Firma Seiwo, konnte das Mockup im weiteren Verlauf des Projektes nicht für fortgesetzte Untersuchungen genutzt werden.

## AP 3 Aufbau Labordemonstratoren und Testumgebung

### AP 3.1 Labordemonstratoren

Die konzeptionierten Labordemonstratoren wurden im Verlauf des Projektes umfassend weiterentwickelt, von einer einfachen Holzkonstruktion zu einer Version mit Aluklemmschienen, Aluminiumwinkelschienen und 3D-gedruckten Kunststoffverbindungssteilen. HVE entwickelte dabei die Konzeption von den bei der Professur Printmedien entwickelten Prototypen weiter. Die Entscheidung, von Holzkonstruktionen auf Aluminium- und 3D-gedruckte Teile umzusteigen, wurde getroffen, um die Stabilität und Haltbarkeit der Demonstratoren zu verbessern.

Es wurde durch das Institut Printmedien ein Lautsprecher gedruckt und kaschiert. In den Vorversuchen wurde der Klemmwinkel der Papierbahn untersucht und ein idealer Winkel von 30° ermittelt. Dieser feste Winkel wurde mit Hilfe von Winkelschienen konstruktiv umgesetzt, auf die die Klemmschienen montiert wurden. Die Befestigungselemente wurden so konzipiert, dass sie einen leichten Austausch der Lautsprecherbahn ermöglichen. Die Lautsprecherbahn wurde dabei mithilfe von Klemmschienen sicher und stabil an einer Rückwand fixiert. Diese Methode ermöglichte es, das Lautsprechersegment fest zu positionieren und eine optimale Klangabstrahlung zu gewährleisten.



Abbildung 10: Anschlussstück aus PMMA mit Kupferbändern

Für die Befestigung der Elektroanschlüsse wurde ein PMMA-Bauteil mit Schrauben verwendet. Durch dieses konnten die Kupferbänder für die Kontaktierung der Lautsprecherkontakte sicher befestigt werden. Die HVE liefert die Zuarbeit der schienenverkehrsseitigen Anforderungen, die in dem Aufbau des Messedemonstrators Beachtung finden. Der Brandschutz stellte sich dabei als kritische Anforderung heraus. Solange die Fläche des Papierlautsprechers unter 0,2 m<sup>2</sup> bleibt, müssen keine zusätzlichen Brandtests nachgewiesen werden. Der horizontale Abstand zu anderen Komponenten ohne Zulassung nach DIN EN 45545 muss mindestens 20 mm und der vertikale Abstand mindestens 200 mm betragen.



Abbildung 11: Funktioneller Lautsprecher als Messedemonstrator

## AP 4 Bewertung und Evaluation der Demonstratoren

### AP 4.1 Technische Laborerprobung und Optimierung

Die Professuren Printmedien und Arbeitswissenschaften unterstützen HVE mit der Fertigung von 3D-Druckteilen zur Befestigung der Klemmschienen und Gewährleistung des Winkels von 30° der Lautsprecherpapierbahn. Dieses 3D-Druckteil musste im Laufe der Versuche optimiert werden, da der Füllgrad wahrscheinlich nicht ausreichend für die Stabilität war. Bei der Abkühlung verzog sich das Druckteil, was die Maßhaltigkeit des Werkstücks beeinträchtigte. Die Löcher waren zudem nicht an der richtigen Position, was weitere Anpassungen erforderlich machte. Es war also notwendig, das Design und den Druckprozess zu überarbeiten, um ein qualitativ hochwertiges und funktionsfähiges

Endprodukt zu erhalten. Die Anpassung der Druckparameter und des Füllgrades führte dann zu einem sehr guten Ergebnis.

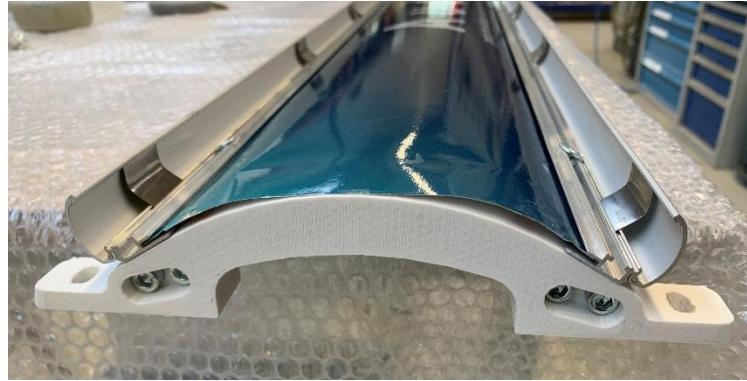


Abbildung 12: 3D-Druckteil zur Befestigung der Klemmschienen

## **AP 5 Konzept zur Forschungszugintegration und Aufbau Zugdemonstrator**

### **AP 5.1 Konzeptentwicklung aus den Ergebnissen von AP3 und AP4**

Der Demonstrator wurde dahingehend weiterentwickelt, sodass er an der Decke der Tatabahn montiert werden konnte. Als Schnittstelle wurden die Befestigungspunkte der Haltestangen genutzt. Durch die Verwendung der Schraublöcher der Haltestangen als Befestigungspunkte konnten die Lautsprecher fest verankert werden, was eine sichere und dauerhafte Installation gewährleistete. Diese Methode ermöglichte eine einfache Montage der Lautsprecher, ohne zusätzliche Bohrungen vornehmen zu müssen, und sorgte dafür, dass die Lautsprecher genauso einfach wieder demontiert werden können.

Der Druck auf Folie und Papier ist grundsätzlich möglich und wurde für die Konzeptionierung des Zugdemonstrators betrachtet, wobei die Handhabung von Folie aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften etwas schwieriger ist. Der Druck auf Papierbahnen ist durch die Professur Printmedien sehr gut erforscht und es existiert ein stabiler Herstellungsprozess. Aus diesem Grund wurde zunächst keine transparente Anwendung mit Folienbahnen getestet, um mögliche Schwierigkeiten und Verzögerungen bei der Verarbeitung und dem Druck zu vermeiden. Es wird empfohlen, Kontakt zu Leuchtenherstellern aufzunehmen, um deren Anforderungen und Möglichkeiten für den Druck auf Folie und Papier zu besprechen. Ebenso ist es ratsam, den Kontakt zu Deckenelementbauern zu suchen, um die Integration gedruckter Materialien in ihre Produkte zu planen und umzusetzen. Durch eine enge Zusammenarbeit mit Experten aus diesen Bereichen können maßgeschneiderte Lösungen entwickelt werden, um die bestmöglichen Ergebnisse für die Anwendung von gedruckten Materialien in Leuchten und Deckenelementen zu erzielen.

Das CAD-Modell zeigt die verschiedenen Komponenten der Befestigung, darunter die Halteschienen, Schrauben und Verbindungselemente, die nahtlos miteinander verbunden sind, um eine zuverlässige Befestigung der Lautsprecherbahn zu gewährleisten. Die Konstruktion des Befestigungssystems ist so gestaltet, dass es einfach zu montieren und zu demontieren ist, was eine schnelle und unkomplizierte Installation ermöglicht.

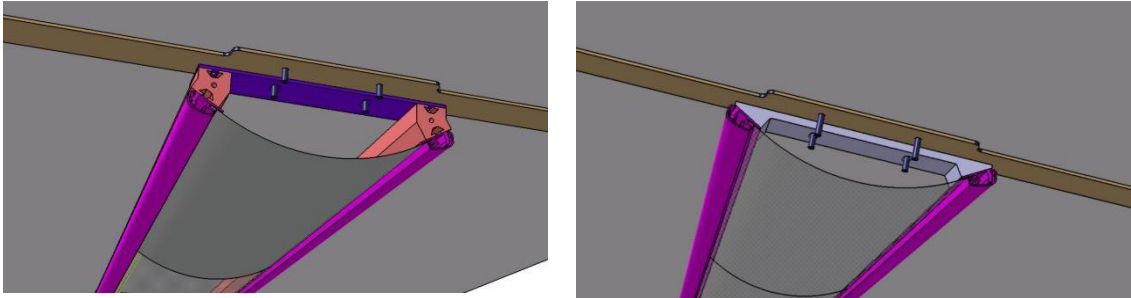


Abbildung 13: Befestigungsvarianten 1 und 2 der Lautsprecherbahn

Für die Befestigung der Lautsprecher an der Decke der Tartabahn wurden mehrere Varianten miteinander verglichen. Auf Höhe der Haltestangenbefestigungen, wurden die einzelnen vormontierten Lautsprechermodule mit Hilfe von Bolzen auf den Halteblechen fixiert.

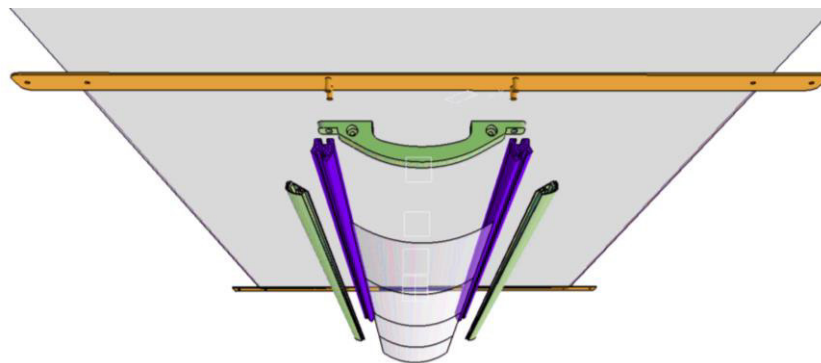


Abbildung 14: Finale Befestigung Lautsprecherbahn

Final wurde sich für eine Befestigung mittels 3D-Druckteil aus PLA als Abschlussteil entschieden. Die Variante 1 mit Winkelschienen wurde wegen ihrer verbesserten Stabilität gegenüber der Variante 2 ausgewählt. Allerdings wurde das 3D-Druckteil umgebaut, damit die Montage vereinfacht wird.

## AP 5.2 Physischer Aufbau in der Straßenbahn

Aufgrund der anhaltenden Problematik mit dem Forschungszug, der auch nach mehreren Monaten nicht zugänglich war, sah sich das Forschungskonsortium gezwungen, nach Alternativen zu suchen, um die geplante Feldstudie dennoch durchführen zu können. Nach intensiver Diskussion und Evaluation verschiedener Optionen entschied sich das Konsortium schließlich, ein Einbaukonzept für eine Straßenbahn der Chemnitzer

Verkehrs-AG (CVAG) zu entwickeln und umzusetzen. Diese Entscheidung war notwendig, um die geplante Feldstudie nicht zu verzögern und den Zeitplan des Projekts einzuhalten. Diese Tatabahn vom Typ T3D-M bot die erforderlichen Voraussetzungen und Möglichkeiten, um die Lautsprecherpaneele und andere Komponenten des Labor-demonstrators einzubauen und zu testen.



Abbildung 15: Einbau der Lautsprecher in eine Tatra T3D-M

Bei der Entwicklung des Einbaukonzepts für die Tatabahn wurde besonders der Deckeneinbau favorisiert. Diese Entscheidung basierte auf verschiedenen Faktoren, darunter die Platzverhältnisse in der Bahn, die optimale Positionierung der Lautsprecherpaneele für eine gute Klangübertragung sowie die praktische Umsetzbarkeit des Einbaukonzepts. Der Deckeneinbau wurde daher als die effektivste und platzsparendste Lösung angesehen, um die Lautsprecherpaneele in der Bahn zu integrieren und eine optimale Klangqualität zu gewährleisten.



Abbildung 16: Deckeninstallation Lautsprecher

Die Entwicklung des Einbaukonzepts für die Tatrabahn der CVAG war eine Herausforderung, die eine enge Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Partnern erforderte. Es mussten technische, logistische und finanzielle Aspekte berücksichtigt werden, um sicherzustellen, dass das Einbaukonzept den Anforderungen der Feldstudie entsprach und reibungslos umgesetzt werden konnte. Trotz der unerwarteten Änderung des Fahrzeugs für die Feldstudie gelang es dem Forschungskonsortium, ein geeignetes Konzept zu finden und das Projekt erfolgreich fortzusetzen.

Nach der erfolgreichen Installation und Testung von zwei Lautsprechermodulen wurden vier weitere Module eingebaut, sodass die Deckenpanelle zwischen vorderem und hinterem Eingang komplett mit Lautsprecherbahnen versehen waren. Die Entscheidung wurde getroffen um eine gute Abstrahlung der Lautsprecher als Linienstrahler zu demonstrieren. Der Vorteil des Systems zeigt sich hier in der gleichmäßigen Verteilung der akustischen Signale über die ganze Länge der Bahn. Die konventionellen Lautsprecher der Bahn wurden im Vergleich dazu getestet. Sie befindet sich jeweils im Kopfbereich der drei Eingangstüren des Wagens und beschallen nur punktuell. Eine qualitativ gute Verständlichkeit der Haltestellenansagen ist abseits des Türbereichs bei dem konventionellen System, gerade bei voller Besetzung der Straßenbahn, nicht gegeben.



Abbildung 17: Verdrahtung von zwei Lautsprechermodulen

### **AP 5.3 Medienimplementierung**

Durch SRCC und die CVAG wurden Soundfiles bereitgestellt, die auf den Lautsprechern erprobt wurden. Dabei zeigte sich, dass nicht alle Samples für eine Überprüfung der Sprachqualität der Papierlautsprecher geeignet waren. Die Haltestellenansagen der CVAG waren nicht professionell in einem Studio von einem Sprecher eingesprochen worden und erzeugten teilweise bei s- und z-Lauten ein unangenehmes Zischen.

Die Abstimmung und gemeinsame Präsentation der Projekte AudioBahn und SmartWindow bot sich an, da beide die unkonventionelle und verknüpfte Vermittlung von Informationen an den Fahrgast zum Ziel haben. Auf der Digital Rail Convention des SRCC konnten der Messedemonstrator von AudioBahn zusammen mit dem Demonstrator von SmartWindow gezeigt werden.

## **AP6 Feldversuche**

### **AP 6.2 Analyse und Ableitung der Anforderungen zu aktivem Noise-Cancelling**

Aktives Noise-Cancelling (ANC) ist eine Technologie, die verwendet wird, um unerwünschte Umgebungsgeräusche zu reduzieren oder zu eliminieren. Dies geschieht durch die Verwendung von Mikrofonen, die die Umgebungsgeräusche aufnehmen und analysieren, um dann ein entsprechendes Geräusch zu erzeugen, das diese Störgeräusche neutralisiert. Das Prinzip des aktiven Noise-Cancellings beruht dabei auf der Überlagerung von Schallwellen. Wenn ein Mikrofon eine Schallwelle erfasst, wird dieses Signal in Echtzeit analysiert und eine entsprechende phasenverschobene Schallwelle erzeugt. Diese Schallwelle wird dann über Lautsprecher abgespielt und mit dem Umgebungsgeräusch

überlagert, wodurch sich die Wellen gegenseitig aufheben, was zu einer Reduzierung oder im Idealfall Eliminierung des unerwünschten Geräuschs führt.

Es ist wichtig zu beachten, dass aktives Noise-Cancelling nicht alle Arten von Geräuschen vollständig beseitigen kann, insbesondere bei unregelmäßigen oder sehr lauten Geräuschen. Die Effektivität von ANC hängt auch von der Qualität der Mikrofone, Lautsprecher und der Reaktionsgeschwindigkeit ab. Dennoch kann diese Technologie dazu beitragen, die Umgebungslärmbelastung zu reduzieren und den Komfort und die Ruhe der Nutzer zu verbessern. Störende Nebengeräusche während der Fahrt, die vor allem durch das tiefe Brummen der Motordrehgestelle, dem Rad-Schiene-Kontakt und der Heizungs-Klima-Lüftungsanlagen der Bahn entstehen können, verschlechtern den Komfort der Fahrgäste und beeinflussen die Sprachverständlichkeit der Lautsprecherdurchsagen negativ.

Die komplette Überlagerung und damit Neutralisierung der Schallwellen funktioniert nur wenn beide Wellen zueinander exakt 180° phasenverschoben sind, bei gleichbleibender Frequenz. Jede Reflektion im Raum und an sich bewegenden Personen stört dabei das Ergebnis, daher sollte sich das Mikrofon, was die Störgeräusche aufzeichnet, und der dazugehörige Lautsprecher möglichst in Kopfnähe des Fahrgastes befinden. Bei unterschiedlicher Ausbreitung der Wellen im Raum kann es zu lokalen Überhöhungen statt zur Auslöschung kommen, wodurch an diesen Stellen die Geräusche sogar lauter wahrgenommen werden als es ursprünglich der Fall ist. Aufgrund der Verzögerungen im Projektablauf können bis zum Projektende die Möglichkeiten eines solchen Systems nur theoretisch betrachtet werden, sollte allerdings in einem weiterführenden Projekt unbedingt durch Versuche erprobt werden, da es ein interessanter und noch sehr wenig erforschter Anwendungsbereich dieser Technologie ist.

Als vielversprechendste Variante bietet sich die testweise Implementierung einer Lautsprecherbahn mit integrierten Mikrofonen zum Beispiel oberhalb einer Vierersitzgruppe an, um die Noise-cancelling Eigenschaften auf einem begrenzten Bereich zu nutzen. Denkbar ist dadurch die Schaffung von Ruheinseln, in denen sich die Fahrgäste besser auf Aktivitäten wie Lesen, Arbeiten oder Entspannen konzentrieren können. Durch die Verwendung von ANC könnten die Fahrgäste in der Vierersitzgruppe auch ungestörter kommunizieren, Musik hören oder Filme schauen, ohne von den Umgebungsgeräuschen beeinträchtigt zu werden.

## **AP 7 Dissemination und Transfer**

### **AP 7.1 Zwischenworkshop**

Im Rahmen des Projektes wurden die Zwischenergebnisse regelmäßig verschiedenen interessierten Firmen präsentiert. Eine dieser Firmen ist SBF Spezialleuchten aus Leipzig, die sich auf die Herstellung von Decken- und Beleuchtungssystemen spezialisiert hat. Auch bei der Firma Seisenbacher in Ybbsitz, Österreich, einem renommierten Innenausstatter für

Schienenfahrzeuge, wurde das Projekt vorgestellt. Seisenbacher produziert Deckensysteme, Gepäckablagen und LED-Beleuchtung und verfügt somit über das notwendige Know-how und die technischen Möglichkeiten, um die Lautsprecher in die Innenausstattung zu integrieren. HVE konnte gemeinsam mit der Professur Printmedientechnik die Lautsprecher in der Tatrabahn der CVAG der Firma SBF Spezialleuchten vorführen, so dass sich diese direkt von der Funktionalität überzeugen konnten.

Die Präsentation des Messedemonstrators auf der Digital Rail Convention auf dem Smart Rail Connectivity Campus in Annaberg vom 20. bis 23.09.2023 stieß auf großes Interesse bei vielen Unternehmen, die in den Lautsprechern ein Potenzial und eine Chance für innovative Lösungen im Bereich der Schienenfahrzeugausrüstung erkannten. Auch auf der InnoTrans vom 24. bis 27.09.2024 in Berlin konnte das Lautsprecherkonzept am Stand der HVE verschiedenen Unternehmen vorgestellt werden.

## **AP 7.2: Abschlussworkshop**

Am Ende der Laufzeit erfolgte die Präsentation des Gesamtprojekts sowie der kontinuierlichen technischen Weiterentwicklung der Lautsprechertechnologie im Rahmen eines Abschlussworkshops. Gegenstand der Präsentation der Professur Printmedientechnik waren die Ergebnisse der statischen und dynamischen akustischen Messreihen und die Professur Arbeitswissenschaften präsentierte die Auswertung der durchgeführten Feldstudie. Anhand eines von der Firma Seiwo gefertigten Demonstrators, konnte die Funktionsweise der Lautsprecher veranschaulicht werden. Der Demonstrator wurde von HVE konstruiert, die Einbindung der Medien mit den Projektpartnern zusammen konzipiert und von der Firma Seiwo messebautechnisch umgesetzt. Gestaltet ist er in Form eines Seitenwandabschnittes mit Gepäckträger, in dem die Lautsprecher integriert wurden. Auf einem Medienbedienpult können Informationstexte, Bilder und Videos zum Projekt angezeigt werden. Die Firma Seiwo konnte hier ihre Expertise im Messebau und der Gestaltung und Programmierung von Informationsoberflächen einbringen.

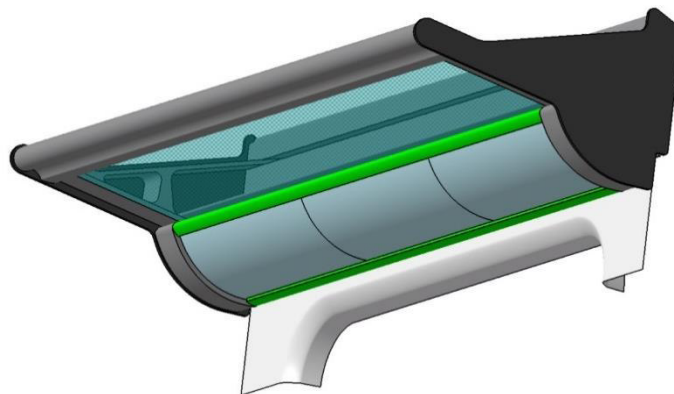


Abbildung 18: Integration der Lautsprecher in die Gepäckablage (3D-Modell)



Abbildung 19: Messeaufsteller Fensterelement mit Gepäckablage

Darüber hinaus wurden im Rahmen des Workshops von HVE verschiedene Einsatzmöglichkeiten der entwickelten Lautsprechertechnologie in Schienenfahrzeugen vorgestellt. Die Teilnehmer hatten so die Gelegenheit, die Potenziale der Technologie hinsichtlich Verwertungsmöglichkeiten und zukünftiger Aktivitäten zu diskutieren. Zur weiteren Veranschaulichung der Einsatzmöglichkeiten steht ein von der Professur Arbeitswissenschaften produziertes Werbevideo zur Verfügung, das die praktischen Anwendungen und Vorteile der Lautsprecherintegration in realitätsnahen Szenarien demonstriert.

## **Erreichte Meilensteine**

### **Meilenstein 1 – Spezifikation Labordemonstrator und Definition der Szenarien abgeschlossen**

Erfüllt im August 2022

Die Spezifikation des Labordemonstrators und die Definition der Anwendungsszenarien wurden erfolgreich abgeschlossen. Die Anforderungen, die sich speziell durch die Normen und Einsatzkriterien der Schienenfahrzeugbranche ergaben, wurden für die weitere Bearbeitung des Projektes berücksichtigt.

### **Meilenstein 2 – Labordemonstrator verfügbar**

Erfüllt im August 2023

Die zwischenzeitliche Insolvenz von Seiwo, dem Partnerunternehmen, das maßgeblich an der Entwicklung des Labordemonstrators beteiligt sein sollte, stellte das Forschungskonsortium vor erhebliche Herausforderungen. Um die Entwicklung des Labordemonstrators doch noch realisieren zu können, musste das Forschungskonsortium schnell handeln und alternative Lösungen finden.

Der Labordemonstrator wurde daher durch die Professur Arbeitswissenschaften in Anlehnung an eine Hochflur-Straßenbahn gestaltet. Die Höhe der Lautsprecheraufhängung entsprach dabei der Höhe der Straßenbahn, die später in der Feldstudie zum Einsatz kommen sollte. Der Demonstrator wurde somit an die Gegebenheiten der Feldstudie angepasst. In der Laborstudie wurden verschiedene Tests und Experimente durchgeführt, um die Funktionalität und Effektivität der Lautsprecherpaneele zu überprüfen.

Im Verlauf der Laborstudie zeigte sich, dass Hintergrundgeräusche in der Bahn, wie das Motorengeräusch und der Rad-Schiene-Kontakt, sehr die subjektive Verständlichkeit der Bandansagen beeinflussen. Die Ergebnisse der Laborstudie lieferten wichtige Erkenntnisse für die geplante Feldstudie und zeigten, dass die Lautsprecherpaneele in der Straßenbahn effektiv eingesetzt werden konnten. Durch die Anpassung des Laboraufbaus an die Gegebenheiten der Feldstudie konnte das Konsortium wertvolle Informationen für die weitere Entwicklung des Forschungszuges gewinnen und die Effizienz der Lautsprecherpaneele verbessern.

## **Meilenstein 3 – Konzept zur Forschungszugintegration abgeschlossen**

Erfüllt im Oktober 2023

Aufgrund der anhaltenden Problematik mit dem Forschungszug, der auch nach mehreren Monaten nicht einsatzbereit war, sah sich das Forschungskonsortium gezwungen, nach Alternativen zu suchen, um die geplante Feldstudie dennoch durchführen zu können. Da der Forschungszug nicht zur Verfügung stand, wurde ein Kontakt zu der Chemnitzer Verkehrs AG (CVAG) hergestellt, die eine traditionelle Tatra-Straßenbahn für weitere Versuche zur Verfügung stellte.

Die Anbringung der Lautsprecherbahnen an der Decke wurde bei dem Einbaukonzept favorisiert. Diese Entscheidung basierte auf verschiedenen Faktoren, darunter die Platzverhältnisse in der Bahn, die optimale Positionierung der Lautsprecherpaneele für eine gleichmäßige Klangübertragung sowie die praktische Umsetzbarkeit des Einbaukonzepts mittels Nutzung an den Haltestangenbefestigung.

Die Entwicklung des Einbaukonzepts für die Tatabahn war eine Herausforderung, die eine enge Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Partnern erforderte. Es mussten technische, logistische und finanzielle Aspekte berücksichtigt werden, um sicherzustellen, dass das Einbaukonzept den Anforderungen der Feldstudie entsprach und reibungslos umgesetzt werden konnte. Trotz der unerwarteten Änderung des Fahrzeugs für die Feldstudie gelang es dem Forschungskonsortium, eine geeignete Alternative zu finden und das Projekt erfolgreich fortzusetzen.

## **Meilenstein 4 – Zugdemonstrator ist verfügbar**

Erfüllt im Dezember 2023

Der Aufbau und die Testung des Zugdemonstrators in der Tatabahn stellen einen wichtigen Schritt in der Entwicklung und Validierung neuer Technologien und Konzepte im Bereich des öffentlichen Nahverkehrs dar. Die Tatabahn, als eine Form der historischen oder traditionellen Straßenbahn, bietet eine einzigartige Plattform, um innovative Systeme und Komponenten zu integrieren und in einem realen Betriebsumfeld zu erproben. Zunächst wurden die spezifischen Anforderungen des Demonstrators definiert und ein detaillierter Plan für den Einbau und die Integration der verschiedenen Komponenten erstellt.

Der Einbau des Zugdemonstrators erfolgte in enger Zusammenarbeit mit den Technikern und Ingenieuren der CVAG. Nach dem erfolgreichen Einbau des Zugdemonstrators folgte die Testung des Systems in der Tatabahn. Diese lieferte wichtige Erkenntnisse über die Funktionalität und Effektivität der integrierten Technologien. Durch die Analyse der gesammelten Daten konnten Schwachstellen identifiziert und Verbesserungsvorschläge erarbeitet werden, um das System weiter zu optimieren.

## **2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

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

## **3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten**

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. Die neuartigen papierbasierten Lautsprecher wurden bis jetzt nur prototypisch im Messebau und in der Wissensvermittlung eingesetzt, allerdings noch nicht in technologisch so anspruchsvollen und stark reglementierten Branchen wie im Schienenfahrzeugbau. Entsprechend neuartig und mit technischen und technologischen Risiken behaftet waren demzufolge auch die Teilprojekte.

Die erbrachten Projektarbeiten entsprechen im Wesentlichen den im Projektantrag beschriebenen Arbeitspaketen, wobei einige Abweichungen zu verzeichnen sind. Die Arbeitspakete 3.2 und 3.3 wurden aufgrund des Insolvenzverfahrens des Projektpartners Seiwo nicht wie ursprünglich geplant, sondern konnten nur mit Abweichungen umgesetzt werden. Das gebaute Mockup war Teil des Insolvenzverfahrens der Seiwo Technik GmbH, was seine Verfügbarkeit innerhalb des geplanten Zeitraums für den Nutzertest einschränkte. Zudem stand der für die Integration geplante Forschungszug des SRCC aufgrund eines Defekts nicht zur Verfügung. Diese Entwicklungen erforderten eine Anpassung der Projektplanung. Es wurden jedoch alternative Lösungsansätze identifiziert, um die Fortführung der Arbeitspakete ohne signifikante Verzögerungen zu gewährleisten. Konkret wurde eine alternative Testumgebung beim Projektpartner Arbeitswissenschaften aufgebaut.

Die in AP 3.1 verfügbaren Demonstratoren der Professur für Printmedientechnik, ein einfacher Halterungskonstruktion sowie die real zugängliche Testumgebung in Form der Tatabahn der CVAG kompensierten die zuvor beschriebenen Einschränkungen. Dies ermöglichte eine realitätsnahe Vorbereitung, Durchführung von Tests und erfolgreiche Evaluation in AP 6, sowohl im Labor als auch im Feld.

Aufgrund der Nichtverfügbarkeit des Forschungszuges der Baureihe 642 Desiro musste das Arbeitspaket 5 jedoch angepasst werden, um die Gegebenheiten der CVAG-Trambahn zu berücksichtigen. Dies führte zu gewissen Einschränkungen, da die räumlichen Gegebenheiten der Trambahn nur begrenzt Spielraum für unterschiedliche Integrationskonzepte ließen. Nichtsdestotrotz konnte mit dem finalen Demonstrator eine Einbausituation präsentiert werden, die den realen Bedingungen im Zug und einer realistischen Einbausituation entspricht.

Arbeitspunkt 6.2 Noise Cancelling konnte Aufgrund der Verzögerungen im Projektablauf können bis zum Projektende die Möglichkeiten eines solchen Systems nur theoretisch

betrachtet werden, sollte allerdings in einem weiterführenden Projekt unbedingt durch Versuche erprobt werden, da es ein interessanter und noch sehr wenig erforschter Anwendungsbereich dieser Technologie ist.

#### **4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse**

##### **a) Wirtschaftliche Verwertung**

Im Rahmen des Projektes wurden die Zwischenergebnisse regelmäßig verschiedenen interessierten Firmen präsentiert. Eine dieser Firmen ist SBF Spezialleuchten aus Leipzig, die sich auf die Herstellung von Decken- und Beleuchtungssystemen spezialisiert hat. Auch bei der Firma Seisenbacher in Ybbsitz, Österreich, einem renommierten Innenausstatter für Schienenfahrzeuge, wurde das Projekt vorgestellt. Seisenbacher produziert Deckensysteme, Gepäckablagen und LED-Beleuchtung und verfügt somit über das notwendige Know-how und die technischen Möglichkeiten, um die Lautsprecher in die Innenausstattung zu integrieren.

Die Präsentation des Messedemonstrators auf der Digital Rail Convention auf dem Smart Rail Connectivity Campus in Annaberg vom 20. bis 23.09.2023 stieß auf großes Interesse bei vielen Unternehmen, die in den Lautsprechern ein Potenzial und eine Chance für innovative Lösungen im Bereich der Schienenfahrzeugausrüstung erkannten. Auch auf der InnoTrans vom 24. bis 27.09.2024 in Berlin konnte das Lautsprecherkonzept am Stand der HVE verschiedenen Unternehmen vorgestellt werden. Am 07.09.2024 konnten die Lautsprecher beim Tag der offenen Tür der CVAG auch einem breiteren Publikum vorgestellt werden und die Resonanz darauf war sehr gut.

##### **b) Wissenschaftliche Verwertung**

Die Ergebnisse können für interne Mitarbeiterschulungen genutzt werden, damit auch bei der Konzipierung zukünftiger Projekte die Einsatzmöglichkeit der Papierlautsprecher mitberücksichtigt werden kann.

#### **5 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen**

##### *Erfolgte Veröffentlichungen:*

Präsentation des Projektes auf HVE-Messestand bei der 15. Internationalen Eisenbahnmesse TRAKO vom 19. - 22.09.2023 in Danzig

Präsentation des Messedemonstrators bei der Digital Rail Convention auf dem Smart Rail Connectivity Campus in Annaberg vom 20. bis 23.09.2023

Präsentation der Ergebnisse und Vorführung der mit den Lautsprechern ausgestatteten Tatrabahn beim Tag der offenen Tür der CVAG am 07.09.2024 in Chemnitz

Vorstellung der Ergebnisse auf dem Messestand und bei Firmenpräsentationen auf der InnoTrans vom 24. – 27.09.2024 in Berlin

##### *Geplante Veröffentlichungen:*

Geplante Präsentation der Ergebnisse bei der 16. Internationalen Eisenbahnmesse TRAKO vom 23. – 26.09.2025 in Danzig

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anbringung der Lautsprecherbahnen unter- bzw. oberhalb des Deckenpanels .....	1
Abbildung 2: Anbringungsmöglichkeiten in den Vouten und der Mitteldecke .....	2
Abbildung 3: Anbringung im Türbereich, bedruckt oder unbedruckt .....	2
Abbildung 4: Anbringung in der Gepäckablage als Lichtabdeckung (transluzent) .....	3
Abbildung 5: Gruppierungsregel gemäß DIN EN 45545-2.....	5
Abbildung 6: Beispiel für akustische Messpunkte.....	6
Abbildung 7: Variantenvielfalt zum Prüfen der Hörqualität .....	8
Abbildung 8: MockUp zum Prüfen der Hörqualität bei unterschiedlichen Parametern .....	9
Abbildung 9: Verstellbare Befestigung Rollenbahn (links) / Eingespannte Lautsprecherbahn mit Wölbung (rechts) .....	9
Abbildung 10: Anschlussstück aus PMMA mit Kupferbändern .....	10
Abbildung 11: Funktioneller Lautsprecher als Messdemonstrator .....	11
Abbildung 12: 3D-Druckstück zur Befestigung der Klemmschienen.....	12
Abbildung 13: Befestigungsvarianten 1 und 2 der Lautsprecherbahn.....	13
Abbildung 14: Finale Befestigung Lautsprecherbahn .....	13
Abbildung 15: Einbau der Lautsprecher in eine Tatra T3D-M.....	14
Abbildung 16: Deckeninstallation Lautsprecher.....	15
Abbildung 17: Verdrahtung von zwei Lautsprechermodulen.....	16
Abbildung 18: Integration der Lautsprecher in die Gepäckablage (3D-Modell).....	18
Abbildung 19: Messeaufsteller Fensterelement mit Gepäckablage .....	19