

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil I – Kurzbericht

WIR!-Projekt: Entwicklung und nutzungszentrierte Evaluation gedruckter
Multikanal-Lautsprecherbahnen für innovative
Bahnfahrzeuge
(FKZ 03WIR1215A)

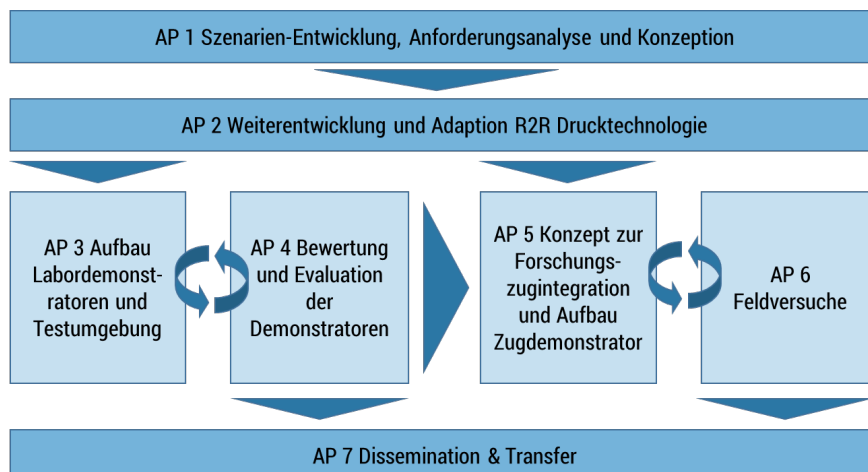
**Zuwendungs-
empfänger:** Technische Universität Chemnitz

Laufzeit: 10/2021 – 06/2024

1 Ursprüngliche Aufgabenstellung

Das Vorhaben AudioBAHN² verfolgt das Ziel, ein innovatives Audio-Fahrgastinformationssystem für Bahnfahrzeuge zu entwickeln und in der Praxis zu erproben. Im Mittelpunkt steht dabei die erstmalige Integration von gedruckten Multikanal-Lautsprecherbahnen, die von der Technischen Universität Chemnitz (TUC) entwickelt wurden. Diese Technologie stellt eine Weltneuheit dar und ermöglicht eine gleichmäßige und positionsspezifische Verteilung akustischer Informationen, z. B. in Zügen. Das System bietet mehrere wesentliche Vorteile. Durch die Multikanal-Lautsprecherbahnen kann der Schall im gesamten Fahrzeug homogen verteilt werden, was zu einer besseren Verständlichkeit führt, ohne dass die Lautstärke in der Nähe der Lautsprecher erhöht werden muss. Außerdem erlaubt die Technologie positionsspezifische Durchsagen, etwa für bestimmte Sitzbereiche oder Türen. Ein weiterer Vorteil ist der geringe Platzbedarf und das geringe Gewicht der papier-basierten Lautsprecherbahnen, die nicht nur robust gegenüber Vibrationen und Stößen sind, sondern sich auch einfach und kostengünstig nachrüsten lassen. Die zugrundeliegende Innovation basiert auf den bisherigen Forschungsarbeiten der TUC, die mit ihrer Technologie T-PAPER bereits internationale Anerkennung gefunden hat. Die Rolle-zu-Rolle-Produktion von Lautsprecherbahnen bietet völlig neue Möglichkeiten für Beschallungskonzepte in Zügen und anderen öffentlichen Verkehrsmitteln. Diese gedruckten Lautsprecher sind besonders leicht, flexibel und kostengünstig in der Herstellung. Im Vergleich zu herkömmlichen Lautsprechern, die tiefere Bauräume und mehr Gewicht benötigen, bietet diese Technologie Vorteile in der Fahrzeugintegration. Ein wichtiger Bestandteil des Projekts ist die Verbesserung der Barrierefreiheit im öffentlichen Nahverkehr. Die Technologie soll insbesondere für ältere Menschen und Fahrgäste mit eingeschränkten Wahrnehmungsfähigkeiten Vorteile bieten, indem akustische Informationen besser und flächendeckender bereitgestellt werden. Dabei liegt besonderes Augenmerk auf der technischen Weiterentwicklung sowie dem nutzerzentrierten Entwicklungsprozess. Mit der Erprobung in realen Bahnszenarien soll die Leistungsfähigkeit des Systems sowohl objektiv als auch subjektiv gemessen werden, um am Ende ein akustisches Informationssystem zu schaffen, das nicht nur technisch innovativ, sondern auch auf die Bedürfnisse der Fahrgäste zugeschnitten ist. AudioBAHN² stellt somit einen wichtigen Fortschritt in der Entwicklung von Audioinformationssystemen im Bahnverkehr dar und könnte, durch die einfache Nachrüstbarkeit und die geringen Produktionskosten, auch außerhalb der Bahntechnik Anwendung finden. Die Technologie bietet großes Potenzial, die Art und Weise, wie akustische Informationen in öffentlichen Verkehrsmitteln vermittelt werden, grundlegend zu verbessern.

2 Ablauf des Vorhabens



Zuvor dargestellte Abbildung gibt einen Überblick über die sieben Arbeitspakete und den Ablauf im Vorhaben.

3 Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse

Die wesentlichen Ergebnisse des Projekts AudioBAHN² lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Nutzeranforderungen und Szenarien:

Durch die Analyse von Interviews und Workshops mit verschiedenen Zielgruppen (insbesondere Menschen mit Seh- und Hörbeeinträchtigungen) wurden spezifische Nutzeranforderungen für das Fahrgastinformationssystem ermittelt. Dies führte zu zentralen Erkenntnissen, wie der Notwendigkeit einer besseren akustischen Verständlichkeit und homogenerer Beschallung.

Technologische Entwicklung:

Gedruckte Multikanal-Lautsprecherbahnen wurden erfolgreich im Rollendruckverfahren hergestellt und in verschiedenen Variationen und Formaten getestet. Erstmals konnten dabei Lautsprecherbahnen mit Mehrschichtaufbau im Rollendruckverfahren realisiert werden. Dabei werden zwei (Dual-Layer) oder mehrere aktive Lautsprecher-Schichten übereinander gedruckt, was zu einer deutlichen Verbesserung des Schalldruckpegels im sprachrelevanten Frequenzbereich führt. Als wichtiges Ergebnis konnte hier der Nachweis erbracht werden, dass R2R gedruckte Papierlautsprecher mit doppelter aktiver Schicht (Dual-Layer) bei gleicher Lautsprecherfläche und gleicher Signalspannung im Vergleich zu Single-Layer Lautsprechern einen um ca. +8 dB höheren energetischen Mittelwert des Schalldruckpegels im Frequenzbereich von 200-8.000 Hz aufweist.

Labordemonstratoren:

Mehrere Labordemonstratoren wurden entwickelt, darunter semi-transparente Varianten auf Foliensubstrat und farbig bedruckbare papier-basierte Lautsprechermodule. Diese Module wurden erfolgreich in einer Testumgebung installiert, um realitätsnahe Nutzungsbedingungen zu simulieren. Zudem wurde neben den Labordemonstratoren ein weiterer Demonstrator gefertigt, der den Ansprüchen an Robustheit, technischer Reife, Anmutung und realitätsnaher Einbausituation im Schienenfahrzeug gerecht wird, um damit das Interesse der Fachwelt für den Transfer zu wecken.

Labor- und Feldversuche:

Es wurden sowohl objektive als auch subjektive Messungen zur Sprachverständlichkeit im Labor sowie in einer Feldstudie im realen Einsatzszenario im Schienenfahrzeug durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass das gedruckte Lautsprechersystem eine sehr gute Sprachverständlichkeit, auch unter schwierigen akustischen Bedingungen (hohe Umgebungsgeräusche, fahrzeugseitige Limitationen) aufweist. Im Gegensatz zu konventionellen Punktlautsprechern zeigte sich eine homogenere Beschallung im Fahrgastraum.

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil II – Ausführlicher Bericht

WIR!-Projekt: Entwicklung und nutzungszentrierte Evaluation gedruckter
Multikanal-Lautsprecherbahnen für innovative
Bahnfahrzeuge
(FKZ 03WIR1215A)

**Zuwendungs-
empfänger:** Technische Universität Chemnitz

Laufzeit: 10/2021 – 06/2024

1 Durchgeführte Arbeiten

AP1: Szenarien-Entwicklung, Anforderungsanalyse und Konzeption

AP 1.1: Nutzungskontextanalyse und Entwicklung von Einsatzszenarien (aw&I-TUC)

Ziel des AP1.1 war die Erhebung der für die Entwicklung der AudioBAHN²-Technologie relevanten Nutzerbedürfnisse, -wünsche und -fähigkeiten nach DIN EN ISO 9241-210. Hierzu wurden neben einer Literaturrecherche acht leitfadengestützte Interviews mit der relevanten Zielgruppe (stark seheingeschränkt, Schwerhörigkeit, Asperger-Syndrom) durchgeführt. Inhalt der Interviews waren unter anderem Nutzungshäufigkeit und Grund der Nutzung von öffentlichen Verkehrsmitteln, Erfahrungen hinsichtlich der Bereitstellung und Qualität akustischer Informationen, Informationsgehalt und Bedarfe der Weiterentwicklung akustischer Fahrgastinformationssysteme. Darüber hinaus wurden in zwei Fokusgruppen im Rahmen des Projektes ÖPNV für alle des Sozialverbandes VdK Sachsen mit Interessensvertretern des Blinden- und Sehbehindertenverbandes Sachsen (BSVS Sachsen), der Behindertenbeiräte des Landkreises Mittelsachsen sowie Chemnitz, Vertretern für die Interessen von gehörlosen Menschen sowie Vertretern der regionalen Verkehrsbetriebe vergleichbare Fragestellungen diskutiert. Weiterhin fand im Rahmen des Projektes Schlaue Technik. Tolle Helfer? ein Workshop mit 8 ÖPNV-Nutzern ab 65 Jahren als ergänzende relevante Zielgruppe statt. Nach durchgeführter Transkription erfolgte durch qualitative Inhaltsanalyse die Analyse und Beschreibung der Benutzergruppen und deren Bedürfnisse im Use-Case AudioBAHN² sowie von Fähigkeits- und Interaktionsprofilen. Eine exemplarische Darstellung der Ergebnisse der Nutzungskontextanalyse ist im Folgenden beschrieben.

Exemplarische Darstellung der Ergebnisse der Nutzungskontextanalyse

Methoden

- 8 leitfadengestützte Interviews
- 2 Fokusgruppen
- 1 Workshop

35 Teilnehmer

- 13 weiblich, 22 männlich
- Altersspanne: 33 bis 85 Jahre
- Einschränkungen: blind bzw. sehbehindert, hörgeschädigt, körperliche Einschränkungen (gehbehindert), Asperger-Syndrom
- Interessenvertretungen: Blinden- und Sehbehindertenverband Sachsen, Behindertenbeiräte des Landkreises Mittelsachsen sowie Chemnitz, Vertretern für die Interessen von gehörlosen Menschen, Vertreter der regionalen Verkehrsbetriebe

Vorgehen



Interviews Transkribieren Kategorisieren Paraphrasieren

Kategorien des Leitfadens

- Demografische Daten
- Einschränkungen
- Nutzungshäufigkeit (Zug, Straßenbahn, Bus)
- Grund der Nutzung
- Erfahrungen (hinsichtl. akustischer Informationen)
 - Positiv
 - Negativ
- Informationsgehalt
- Bedarf Weiterentwicklung

Auszug aus der Ergebnisdarstellung

Dokumente und Variablen	positiv	negativ	Informationsgehalt	Bedarf Weiterentwicklung
20220315_1000a		manchmal schlecht zu verstehen, besonders wenn undeutlich gesprochen wird oder es im Zug zu laut ist. Wenn Nebengeräusche (Menschen, Zugeräusche) vorhanden sind oder Lautsprecher einen defekt hat kommt es zu Verständnisproblemen.	Mitteilung zu barrierefreien Zugänge auf dem Bahnhof	Kopplung mit Monitor. Zwei-Sinne-Prinzip. Ansagen individuell einschalten/abhören. Sollte aber andere Fahrgäste nicht belästigen
20220315_1300-converted	Ansage im Zug ordentlich, menschliche Stimme sehr angenehm (Chennitz)	Verständnisprobleme bei ungünstiger Platzwahl und Nebengeräuschen (Handys, Menschen, Kinder). Synthetische Stimmen oftmals schwer zu verstehen, bzw. schlechte Qualität und Lautstärke. Kein Hinweis, wenn Ansage beginnt (bspw. Klingelton, Gong)	Hinweis zur Ausstiegseite ist wichtig (fehlt wohl manchmal noch). Informationen die nicht mit der Fahrt zu tun haben, werden nicht benötigt (Wetter, Sehenswürdigkeiten etc.)	Ansagen individuell einschalten/abhören (Wiederholen). Sollte aber andere Fahrgäste nicht belästigen. Musik etc. eher unerwünscht. Menschliche Stimmen werden bevorzugt. Außenlautsprecher besser abgrenzen
20220323_1000-converted	Ansagen sind besser geworden. Wenn die Lautstärke ordentlich eingestellt ist, hat man gutes Verständnis. Die Ansagen waren immer laut und deutlich.	Besonders auf Busse bezogen: bei ungünstiger Platzwahl und Nebengeräuschen zu leise und undeutlich	Mit Informationsgehalt zu Frieden. Informationen die nicht mit der Fahrt zu tun haben, werden nicht benötigt (Wetter, Sehenswürdigkeiten etc.)	Ansagen individuell einschalten/abhören. Sollte aber andere Fahrgäste nicht belästigen
20220322_0930-converted	gute Erfahrungen mit Mobilitätshilfe	Verständnisprobleme bei Nebengeräuschen bspw. während Beschleunigungsphasen oder Unebenheiten auf der Bahnstrecke. Mit Hörgeräten und Umgebungsgeräuschen noch größere Probleme (evtl. selektives Hören nicht mehr möglich)	Information zur Lage bestimmter Tasten wichtig (Bedarfshalt etc.)	Durchsagenlautstärke an Umgebungsgeräusche anpassen. Ansagen individuell einschalten/abhören. Sollte aber andere Fahrgäste nicht belästigen
20220317_0945-converted	In Erzgebirgsbahn gut Erfahrungen. Die Ansagen funktionieren eigentlich schon sehr gut. Männerstimme ist angenehmer als Frauenstimme	S-Bahn oder U-Bahn nur punktuelle Beschallung, dadurch schlechtes Akustik. Synthetische Stimmen sind sehr unangenehm. Qualität der Ansagen in den Bussen mangelhaft. Punktuelle Beschallung bzw. falscher Sitzplatz+Umgebungsgeräusche (Kindergruppe) führen zu Verständnisproblemen.	Informationen zur Ausstiegseite und Höhe und zu Lage der Haltewunschast. Informationen die nicht mit der Fahrt zu tun haben, werden nicht benötigt (Wetter, Sehenswürdigkeiten etc.)	Information zur Lage der Haltewunschast. Haltestellenansage immer im gleichen Abstand, damit man sich zeitl. vorbereiten kann. Gleichmäßige Schallausbreitung. Keine Musik oder ähnliches.
20220317_1230-converted	In Zügen meist sehr gute Ansage. Deutlich und laut. In der Erzgebirgsbahn sogar sehr laut.	In Erzgebirgsbahn ist Ansage teilweise zu laut. Akustik in Bussen sehr mäßig, die Lautsprecher nur vom angebracht. In Bussen viel Bedarf zur Nachbesserung	Infos zum Bahnsteig. Ausstiegseite und höhe der Bahnsteigkante. Informationen die nicht mit der Fahrt zu tun haben, werden nicht benötigt (Wetter, Sehenswürdigkeiten etc.)	Ansagen individuell einschalten/abhören. Sollte aber andere Fahrgäste nicht belästigen. Information zur Lage der Haltewunschast. Akustisches Signal vor der eigentl. Ansage. Tiefe, deutliche Stimme
20220322_1300-converted	Ansagen sind in letzter Zeit sehr gut geworden	Verständnisprobleme bei falscher Platzwahl	Informationen die nicht mit der Fahrt zu tun haben, werden nicht benötigt (Wetter, Sehenswürdigkeiten etc.)	Zwei-Sinne-Prinzip. Im Zug muss es mehr schriftliche Informationen geben. Entfernungen zum Lautsprecher reduzieren bzw. homogene Beschallung. Bzw. für alte und Hörbehinderte auch Markierung der Lautsprecher möglich.

Abbildung 1: Exemplarischer Auszug aus der Ergebnisdarstellung

Zusammenfassung der Ergebnisse der Nutzungskontextanalyse

Erfahrungen

- im Allgemeinen sind die Ansagen in Zügen vertretbar
- Abhängigkeit von Platzwahl, Umgebungsgeräusche (Menschen, Beschleunigungsvorgänge, Unebenheiten), synthetische Stimmen, undeutliche Aussprache, weibl. Stimme, fehlende wichtige Infos

Informationsgehalt

- keine Zusatzinfos zu Wetter, touristischen Zielen etc. gewünscht
- Ausstiegseite, Bahngleis, Höhe bzw. Abstand Bahnsteigkante, Lage der Tasten (Bedarfshalt)

Bedarf Weiterentwicklung

- homogener Klang evtl. dolby surround, Wiederholmöglichkeit (dann allerdings punktuell), Ansagen immer im standardisierten Abstand zum Halt, menschliche Stimme, Durchsagenlautstärke an Umgebungsgeräusche anpassen, Signal, wenn Ansage beginnt, Lage wichtiger Tasten standardisieren und Ansagen (Beschreiben)

Zwei-Sinne-Prinzip (Kombination aus visuellen und auditiven Informationen)

Auf Grundlage der qualitativen Inhaltsanalysen erfolgte die Ableitung von spezifischen Anforderungen aus Nutzersicht. Diese Anforderungen (Montageort, Ansteuerung, Verständlichkeit, Informationsgestaltung) wurden von 3 Experten hinsichtlich der Faktoren technische Umsetzbarkeit, wirtschaftliche Umsetzbarkeit, Erstinstallation/Instandsetzung, Eignung Demonstrator bewertet und mit den Projektpartnern diskutiert. Darauf aufbauend wurden vom Projektpartner Hörmann Vehicle Engineering GmbH (HVE) relevante Einbauräume bzw. deren Einbausituation analysiert. Möglichkeiten ergaben sich bspw. in der Deckenverkleidung, Gepäckablage oder Voute. Die diversen Einbausituationen bedingten den akustischen Test (subjektiv sowie objektiv) von verschiedenen Radien der eigentlich flachen Lautsprecherbahnen. Dementsprechend wurde als wichtige Spezifikation des Demonstrators eine Variabilität der Lautsprecherbahnradien gefordert.

AP 1.4: Anforderungen an die bahntechnische Integration der Technologie in die identifizierten Szenarien sowie Anforderungen an die Interaktionskonzepte. Untersuchung der normativen, mechanischen und elektrischen Anforderungen (aw&I-TUC + pmTUC)

Im AP 1.4 unterstützte die Professur Arbeitswissenschaft und Innovationsmanagement der TU Chemnitz (aw&I-TUC) gemeinsam mit der Professur Printmedientechnik der TU Chemnitz (pmTUC) den Projektpartner HVE bei der Erarbeitung der Anforderungen an die bahntechnische Integration der Technologie in die identifizierten Szenarien sowie der Anforderungen an die Interaktionskonzepte. In diesem Zusammenhang erfolgten Regeltermine, Absprachen und Zuarbeiten.

Detaillierte Darstellungen der Teilergebnisse sind im Folgenden und in den entsprechenden Berichten der Projektpartner dargelegt.

Untersuchung möglicher Einbauräume und Analyse Einbausituation

Auf Grundlage der Nutzungskontextanalyse erfolgte die Ableitung von spezifischen Anforderungen aus Nutzersicht sowie die Erarbeitung einer Bewertungsmatrix, in welcher eine Expertenbewertung der eruierten Anforderungen (Montageort, Ansteuerung, Verständlichkeit, Informationsgestaltung) hinsichtlich der Faktoren technische Umsetzbarkeit, wirtschaftliche Umsetzbarkeit, Erstinstallation/Instandsetzung und Eignung Demonstrator erfolgte und im Projektverbund diskutiert wurde. Darauf aufbauend wurden vom Projektpartner HVE relevante Einbauräume bzw. deren Einbausituation analysiert. Möglichkeiten ergaben sich bspw. in der Deckenverkleidung, Gepäckablage oder Voute.



Abbildung 2: Integration in Deckenverkleidung (Loch-Wellblech) (links), in Gepäckablage als Lichtabdeckung (Transparenz) (Mitte), in Verkleidung/Türvouten (rechts)

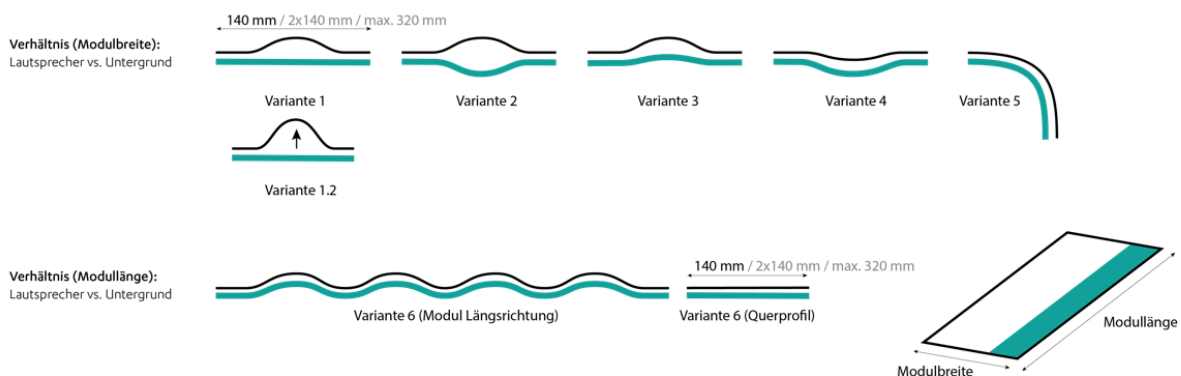


Abbildung 3: Aufzeigen diverser Anbindungsmöglichkeiten in Decke, Vouten, Gepäckablagen, Seitenwände etc. zur Untersuchung des Verhältnisses von Untergrund zu den gedruckten Lautsprechern in einem Demonstrator

Anforderungen an die Integration

Brandschutz

- Eingruppierung in die Brandschutznorm DIN EN 45545-2
- Ist die exponierte Fläche in jedem Fall kleiner gleich $0,2\text{m}^2$, dann sollte das Gewicht der nicht nachgewiesenen Komponente unter 10g liegen, kann die Komponente ohne Test eingesetzt werden.

Akustik

- 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

Testbetrieb

- Die gedruckten Lautsprecher können in ein Bestandsfahrzeug integriert werden, wenn:
 - Testsystem unabhängig von der bestehenden Fahrgastinformationssystem funktioniert.
 - eine Überwachung des Installationszustandes während des Testbetriebes erfolgt.

AP2: Weiterentwicklung und Adaption R2R Drucktechnologie (pmTUC)

AP2.1: Herstellung von rollengedruckten Papier-Lautsprecherbahnen nach dem Stand der Technik unter Beachtung der festgelegten Spezifikationen (z. B. der Geometrie) zum Aufbau erster Test-Installationen

Papier-Lautsprecherbahnen konnten mittels Rollendruckverfahren am pmTUC gefertigt werden. Der prinzipielle Aufbau der genutzten Versuchsdruckmaschine Laborman II ist in Abb. 4 skizziert.

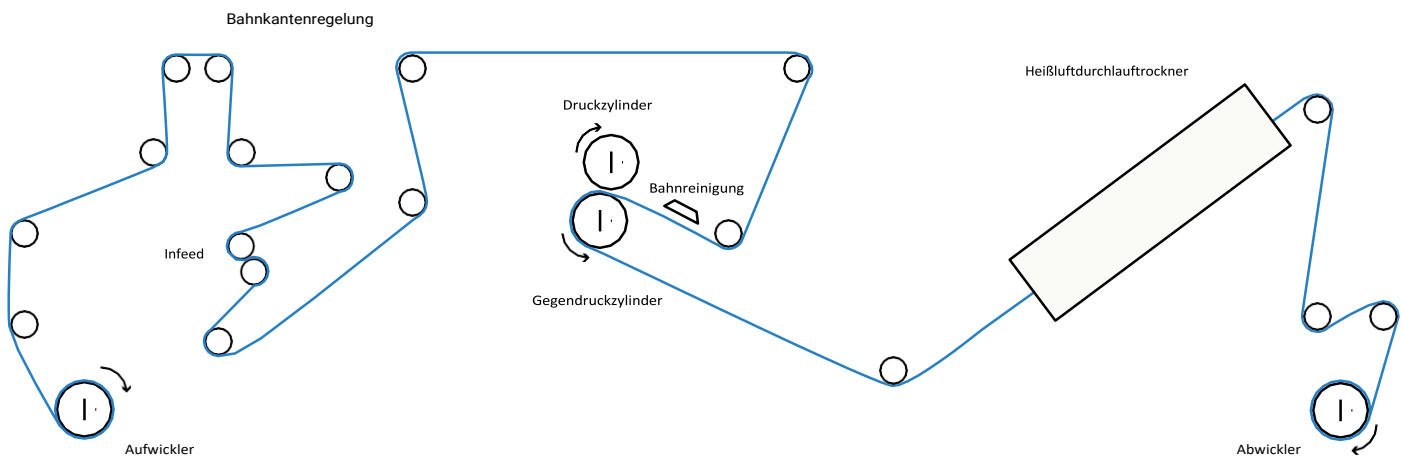


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Versuchsdruckmaschine Laborman II

Nach anfänglichen Schwierigkeiten in der Rolle-zu-Rolle (R2R) Produktion von Lautsprecherbahnen konnte die Qualität und Ausbeute funktionsfähiger Lautsprecher deutlich gesteigert werden. Dazu wurden zahlreiche Druckversuche durchgeführt, um generelle Druckparameter, wie Rakeldruck, Rakelwinkel, Pressung und Trocknung zu optimieren und damit die Qualität der einzelnen gedruckten Schichten zu verbessern. Zudem wurden Maßnahmen ergriffen, um Verunreinigungen und Fremdpartikel in den Elektroden- (PEDOT:PSS) und Piezoschichten (P(VDF-TrFE)) zu minimieren. Vor dem Druckwerk wurde dazu eine Bahnreinigungseinheit installiert und zusätzliche Filter in die Trocknungseinheit eingebaut.

Die Schichtdicke der P(VDF-TrFE) Schicht konnte durch ein neues Siebgewebe (Tecsreen 64Z) mit höherem Schöpfvolumen von anfänglich $\sim 4.5\text{-}5\text{ }\mu\text{m}$ auf $\sim 6\text{-}7\text{ }\mu\text{m}$ gesteigert werden. Sowohl die Minimierung von Fremdpartikeln in Elektroden und Aktivschicht, als auch die Erhöhung der PVDF Schichtdicke reduzieren das Risiko eines elektrischen Durchschlags beim Polarisieren der Lautsprecher.

Etwa 100 Meter rollengedrucktes Material für single-layer (SL) Lautsprecherbahnen (Abb. 5) konnte so produziert werden. Für den Aufbau von AudioBAHN²-Demonstratoren wurden daraus Bahnen mit 5 Lautsprechersegmenten von je $\sim 1,75\text{m}$ Länge gefertigt.

AP2.2: Weiterentwicklung Rollendruck und Inline-Nachverarbeitung für hochleistungs-fähige papierbasierte Lautsprecherbahnen

Nach erfolgreichen Vorversuchen im Bogenformat, konnte ein neuer Dual-Layer (DL) Aufbau, mit 2 aktiven Schichten pro Lautsprecher-Segment erstmalig auch im Rollendruckverfahren an der Laborman II realisiert werden (s. Abb. 6). Der prinzipielle Aufbau der rollengedruckten Dual-Layer Lautsprecherbahnen ist in Abb. 5 (rechts) skizziert. Durch diesen Aufbau ist eine deutliche Verbesserung der Performance der Lautsprecher (SPL ~ +8dB) zu erwarten, da bei gleicher Substratdicke zwei aktive Schichten zum Einsatz kommen. Messtechnische und akustische Auswertungen dazu finden sich in den Ausführungen zu AP2.5.

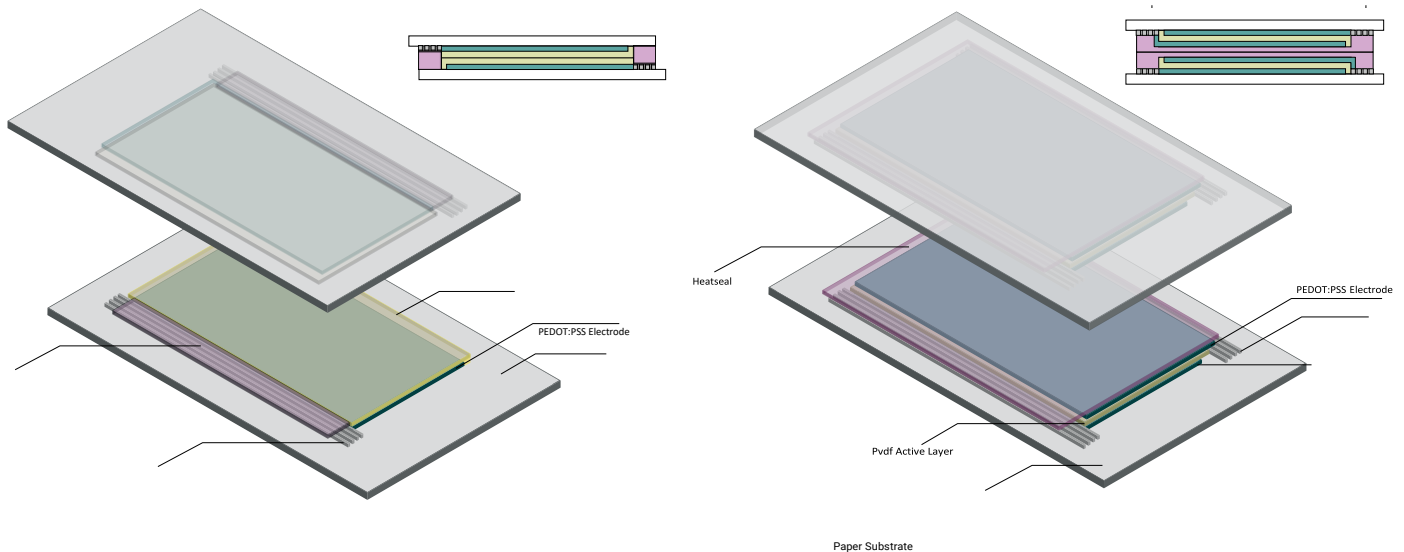


Abbildung 5: single-layer (links) und double-layer Schichtaufbau (rechts) rollengedruckter Lautsprechermodule

Zur Optimierung der Leitfähigkeit der Elektroden wurden zahlreiche Versuche durchgeführt. Druckparameter wie Rakelwinkel und Rakeldruck wurden optimiert, verschiedene PEDOT:PSS Formulierungen verglichen (AGFA 3155, 3165) und der Einfluss von Oberflächenvorbehandlung durch Koronabehandlung evaluiert. Zwar konnten mit einem Materialwechsel auf AGFA 3165 eine höhere Leitfähigkeit erzielt werden, doch hinsichtlich Schichtdicke und -homogenität ist die Formulierung 3155 zu bevorzugen. Zudem hat ein Chargenvergleich beim Material 3155 deutliche Unterschiede in der Schichtqualität rollengedruckter Proben, bei gleicher Maschinen- und Parameterkonfiguration gezeigt. Die Ergebnisse dieses Vergleichs wurden an den Hersteller kommuniziert und ausreichend Material der besseren Charge geordert, um weiterhin die Produktion hochqualitativer Elektrodenschichten gewährleisten zu können.



Abbildung 6: Rollendruck Dual-Layer Lautsprecherbahn

AP2.3: Rollendruck und Inline-Nachverarbeitung von folienbasierten semi-transparenten Lautsprecherbahnen

Analog zu den in AP2.2 beschriebenen Versuchen mit papierbasierten Lautsprecherbahnen, wurden Material und Vorbehandlungsversuche im Rollendruckverfahren mit folienbasierten Lautsprecherbahnen durchgeführt. Dabei wurden zwei Folientypen getestet, eine 100 µm starke PET Folie (Melinex® 401) und eine 50 µm starke PEN Folie (Teonex® Q51) beide von Dupont. Mit beiden Folientypen konnten bislang keine funktionsfähigen Lautsprecherbahnen produziert werden. Die PET Folie dehnt sich zu stark durch Bahnspannung und die nötigen hohen Trocknungszeiten und -temperaturen, sodass ein registerhaltiges Drucken von 4-5 Schichten kaum möglich ist.

Die PEN Folie hingegen hat eine wesentlich bessere Temperaturbeständigkeit und mechanische Stabilität als PET Folie und lässt sich gut im R2R Verfahren bedrucken ohne starke Dehnungserscheinungen (bis 160°C Trocknertemperatur bei 0.05 m/s Bahngeschwindigkeit). Allerdings ist die Adhäsion der gedruckten Schichten auf diesem Substrat mangelhaft, was zusätzliche Versuche zur Erhöhung der Adhäsion und Verbundhaftfestigkeit durch Substratvorbehandlung oder Primer Vordruck nötig macht.

Im Bogenverfahren konnten allerdings erfolgreich semi-transparente, folienbasierte Lautsprecher hergestellt werden. Da hier keine mechanische Belastung des Substrats während des Druckvorgangs wirkt, sind die Dehnungs- bzw. Schrumpfungerscheinungen im Bogendruck wesentlich geringer. Zum Einsatz kamen Folien aus dem Digitaldruckbereich im Format SRA3, die üblicherweise in der Xerographie eingesetzt werden und eine spezielle Oberflächenbehandlung aufweisen, was für gute Adhäsion der gedruckten Schichten auf dem Substrat und zu hoher Verbundhaftfestigkeit der laminierten Lautsprecherbogen sorgt. Die SRA3 Bögen sind so konzipiert, dass sie der Länge nach zu einer längeren Folienbahn kombiniert werden können.

AP2.4: Rollendruck hochleitfähiger Leiterbahnen zur Ansteuerung und Verbindung von gedruckten Lautsprecherarrays auf Lautsprecher-Papier- und -Folienbahnen

Zur Verbesserung der Leitfähigkeit der Verbindungsleiterbahnen wurden Tintenformulierungen unterschiedlicher Hersteller zunächst im Bogensiebdruck getestet und verglichen. Neben der Leitfähigkeit sind Rauheit der gedruckten Strukturen, sowie Verdruckbarkeit, Preis und Trocknungs- bzw. Sinterkonditionen entscheidende Faktoren. Verglichen wurden 6 Formulierungen von 5 Herstellern.

Tabelle 1: Übersicht Silbertinten für Verbindungsleiterbahnen

Hersteller	Prod. Name	Leitfähigkeit (30 cm Linien) [Ohm]	Trocknung	Rauheit Rz / Ra [µm]	Verdruckbarkeit
AGFA / Orgacon	SI-P2000	$2.9 \pm 0.3 \Omega$	150° C / 10 min	28.7 / 1.65	-
SunChemical	SunTronic PTF Silver AST6202	$7.0 \pm 0.1 \Omega$	150°C / 7 min	12.9 / 1.08	+/-
Saralon	Saral HSCSilver 600	$12.0 \pm 1.0 \Omega$	150°C / 5-10 min	25.4 / 1.49	--
	Saral 700	$7.0 \pm 0.5 \Omega$	150°C / 5-7 min		+
Dupont	5028 Silver	$8.0 \pm 0.1 \Omega$	150°C / 5 min	10.6 / 1.59	+
Henkel	Loctite 1011	$3.3 \pm 0.6 \Omega$	150°C / 10 min	7.1 / 0.59	++

Das bewährte Loctite 1011 Silber von Henkel zeigt hierbei die besten Ergebnisse bezüglich Leitfähigkeit, Rauheit und Verdruckbarkeit, sowohl im S2S als auch im R2R Verfahren. Für den Rollendruck von folienbasierten Lautsprecherbahnen wäre zudem ein Material mit niedrigerer Trocknungs-/Sintertemperatur und Dauer interessant, um die Dehnungserscheinungen des Foliensubstrats durch hohe Temperatureinwirkung unter Bahnspannung zu vermindern. Die beiden Formulierungen von SunChemical (SunTronic PTF Silver AST6202) und Saralon (Saral700) sind hinsichtlich Leitfähigkeit und Rauheit zwar dem bisher genutzten Loctite unterlegen, doch bezüglich der Trocknung zeigten die Vorversuche im Bogendruck vielversprechende Ergebnisse.

Zur Optimierung der Leitfähigkeit im Rollendruck mit Loctite 1011 wurden Versuche zu Trocknungs- bzw. Sintering-Temperatur und Dauer durchgeführt. Gedruckt wurde sowohl auf Folien- als auch Papiersubstrat. Variiert wurden dabei Bahngeschwindigkeit (3/6 m/min) und Temperatur des Heißluftdurchlauftrockners (150°/160°/170°C). Die Versuche haben gezeigt, dass für eine optimale Leitfähigkeit für Loctite 1011 langsame Bahngeschwindigkeiten von 3 m/min bei hoher Trocknertemperatur von 170°C nötig sind.

AP2.5: Inline- und Offline-Charakterisierung der R2R gedruckten Lautsprecherbahnen

Dielektrische und elektroakustische Charakterisierung gedruckter Lautsprecher

Zur Qualitätssicherung und Charakterisierung der Eigenschaften der gedruckten Lautsprecher wurden kontinuierlich verschiedene elektrische und akustische Untersuchungen an den hergestellten Proben durchgeführt. Insbesondere betrifft dies die Aufnahme der:

- Polarisations-Hysteresekurven zur Bestimmung der remanenten Polarisation als wichtiges Qualitätskriterium für die piezoelektrische Polymerschicht,
- Impedanzspektroskopie zur Bestimmung der Impedanz, Kapazität und des dielektrischen Verlustfaktors als Indikatoren für die dielektrischen Eigenschaften der piezoelektrischen Polymerschicht sowie des elektrischen Verhaltens des gesamten Bauelements inklusive Verlustanteilen infolge von Serienwiderständen,
- Akustischen Eigenschaften wie dem Frequenzgang

Im Folgenden werden für im Rahmen des Projektes hergestellten Proben Beispiel-Messungen und Ergebnisse des Weiterentwicklungsprozesses zur Verbesserung der Performance gedruckter Lautsprecher dargestellt.

Polarisation gedruckter Lautsprecher:

Beispiel Vergleich R2R SL vs. DL

Die Polarisation der piezoelektrischen Schicht der Lautsprecher erfolgte in Form von Kontaktpolung an einem in Vorprojekten entwickeltem Polarisationsstand auf Basis einer Sawyer-Tower-Schaltung. Das System, bestehend aus Signalgenerator, Oszilloskop, HV-Verstärker und PC kann vollständig softwarebasiert gesteuert und ausgewertet werden. Abbildung 7 zeigt typische Messkurven zweier Proben mit einfacher und doppelter aktiver Schicht.

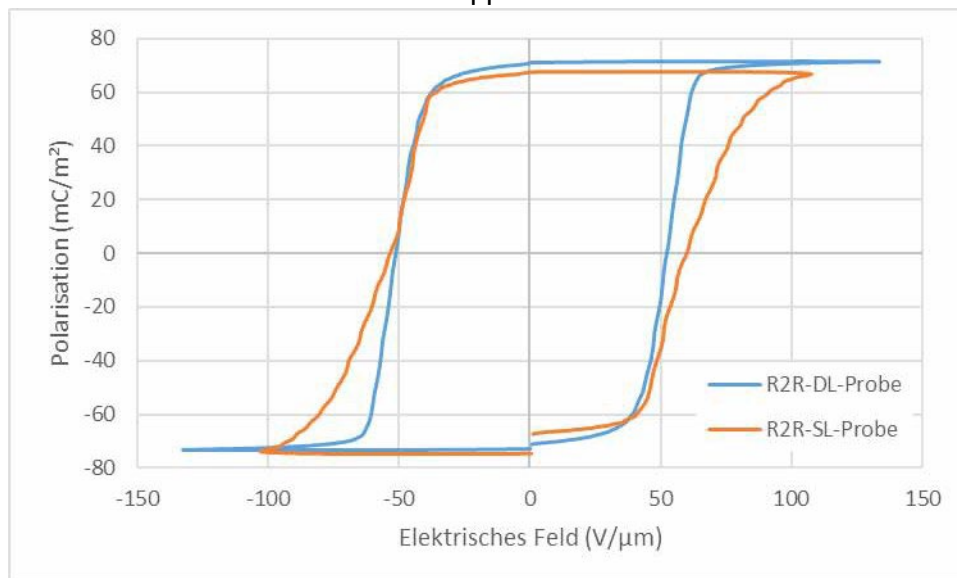


Abbildung 7: Hysteresekurven der Polarisation zweier R2R gedruckter Proben mit einfacher und doppelter aktiver Schicht.

Die Werte für die remanente Polarisation lagen typischerweise im Bereich von 65-75 mC/m². Diese Werte entsprechen den für die Materialkombination zu erwartenden Werten. Für einzelne Proben wurden Spitzenwerte von bis zu 85 mC/m² erreicht.

Beispiel Gleichmäßigkeit S2S-DL-Proben

Ein weiteres Beispiel zeigt die Polarisationskurven eines Probensatzes im Format SRA3, welches mittels Bogendruck-Verfahren hergestellt wurde (Abbildung 8).

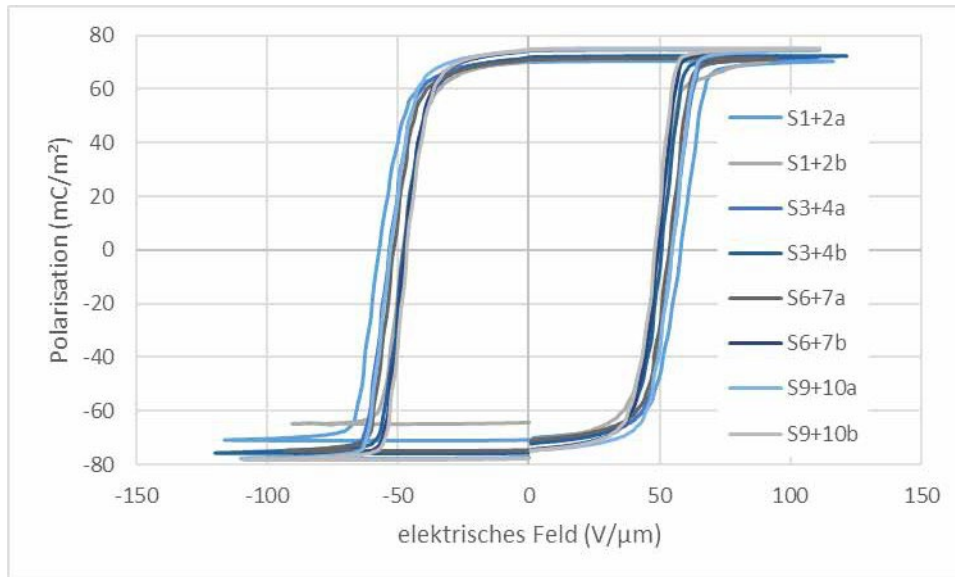


Abbildung 8: Hysteresen-Kurven der Polarisation von vier S2S gedruckter Proben mit doppelter aktiver Schicht und je zwei separat ansteuerbaren Bereichen (a+b).

Für diesen Probensatz wurde eine mittlere remanente Polarisation von $74,1 \pm 4,5$ mC/m² erreicht. Von diesen acht Proben zeigt ein Bereich einen deutlich niedrigeren Wert von 64,2 mC/m². Dieser konnte nur mit einer moderaten maximalen elektrischen Feldstärke von 90 V/μm polarisiert werden, da es aufgrund von Inhomogenitäten in den gedruckten Schichten ansonsten zu einem elektrischen Durchbruch und somit einer Zerstörung der Probe gekommen wäre. Nichtsdestotrotz können Proben mit einer Polarisation von ≥ 60 mC/m² durchaus weiterverwendet werden, da der Einfluss auf das akustische Verhalten ab einer gewissen Polarisation relativ klein ist.

Akustische Charakterisierung

Die akustische Charakterisierung erfolgte für Einzelproben im Format 345 mm x 150 mm (R2R gedruckte Samples) und im Format SRA3, d.h. 450 mm x 320 mm (S2S gedruckte Samples) in einem schallarmen Messschrank des pmTUC. Die Charakterisierung selbst erfolgte mit dem Messsystem Sinus Apollo mit der Software Samurai der Fa. Sinus Messtechnik. Das Audio-Testsignal wurde über einen Monacor PA-1122 100 V ELA- Verstärker mit einer Spannung von 50 Vrms an die Lautsprecher angelegt. Die Signalabnahme erfolgte über ein Messmikrofon der Fa. Microtech Gefell (Modell M370) im Abstand von 50 oder 100 cm.

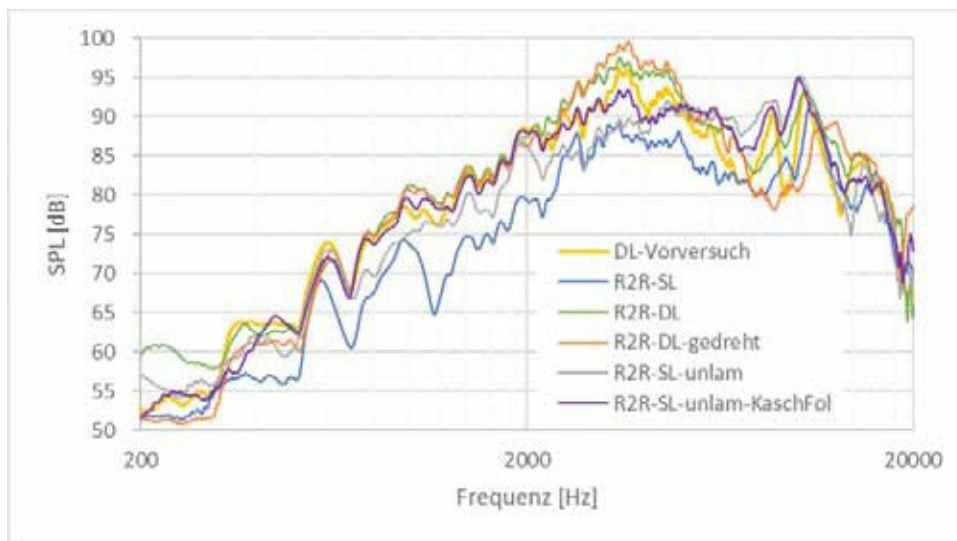


Abbildung 9: Akustischer Frequenzgang verschiedener R2R gedruckter Lautsprecherproben auf Papier im Frequenzbereich 200-20.000 Hz.

Ein Beispiel für einen solchen Vergleich des Frequenzgangs wird in Abbildung 9 gegeben. Im Wesentlichen wurden hier Proben des Standardaufbaus (R2R-SL) mit einer aktiven Schicht (SL = single layer) mit den neu entwickelten Proben mit doppelter aktiver Schicht (DL = double layer) verglichen. Als wichtiges Ergebnis konnte hier der Nachweis erbracht werden, dass R2R gedruckte Papierlautsprecher mit doppelter aktiver Schicht bei gleicher Lautsprecherfläche und gleicher Signalspannung einen um ca. +8 dB höheren energetischen Mittelwert des Schalldruckpegels im Frequenzbereich von 200-8.000 Hz aufweisen, der für die Sprachwiedergabe entscheidend ist. Die ermittelten Abweichungen der einzelnen Proben gegenüber dem Standardaufbau können der folgenden Tabelle entnommen werden:

Tabelle 2: Gegenüberstellung der energetischen Mittelwerte des Schalldruckpegels im Frequenzbereich 200-8.000 Hz verschiedener R2R gedruckter Papierlautsprecherproben.

Probe	DL-Vorversuch	R2R-SL (Standard)	R2R-DL	R2R-DL-gedreht	R2R-SL-unlam	R2R-SL-unlam-Kasch-Fol
Energetischer Mittelwert (dB)	85,1	79,9	87,3	88,4	84,1	84,9
Abweichung ggü. R2R-SL Probe (dB)	+5,2	0	+7,4	+8,5	+4,2	+5,0

Der Verlauf des Frequenzgangs ändert sich zwischen den einzelnen Proben nur unwesentlich, was in Anbetracht der unveränderten lateralen Abmaße und der nur geringfügig geänderten Materialanteile und somit der Masse und Steifigkeit zu erwarten war.

Impedanzspektroskopie

Betrachtet man die vorgenannten Proben aus dielektrischer Sicht und führt eine Impedanzspektroskopie durch, kann festgestellt werden, dass die Proben mit doppelter aktiver Schicht eine 5- bis 6-fach niedrigere Impedanz (bei 1 kHz) aufweisen (Abbildung 10). Dies ist insofern verständlich, da die dielektrische Fläche der Kondensatoranordnung verdoppelt wurde und zudem die Schichtdicke des Dielektrikums in etwa halbiert wurde, was zu einer theoretischen Vervierfachung führt. Die ermittelte Abweichung kann auf Abweichungen in der Prozessführung und/oder Schichtdickenunterschiede der einzelnen Proben zurückgeführt werden.

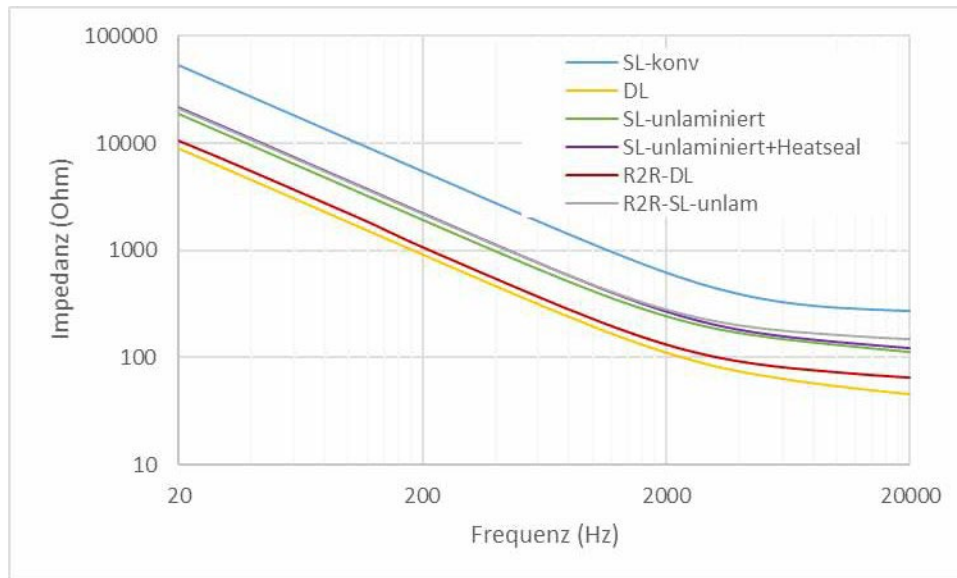


Abbildung 10: Impedanzverlauf verschiedener gedruckter Lautsprecher mit einfacher und doppelter aktiver Schicht.

Werden diese verschiedenen Lautsprecher mit einer gleich hohen Versorgungsspannung betrieben, führt dies zu einer ca. 5-fach höheren anliegenden elektrischen Leistung, die wiederum zu einer theoretischen Schalldruckpegel-Erhöhung von ca. +7 dB führen sollte, was letztlich mit den Messwerten aus Tabelle 2 praktisch nachgewiesen werden konnte.

Verbesserung des Frequenzgangs

Um den Frequenzgang insbesondere für Frequenzen unterhalb von 2 kHz zu verbessern, wurden neben R2R gedruckten Proben Lautsprecher im Format SRA3 hergestellt und akustisch miteinander verglichen.

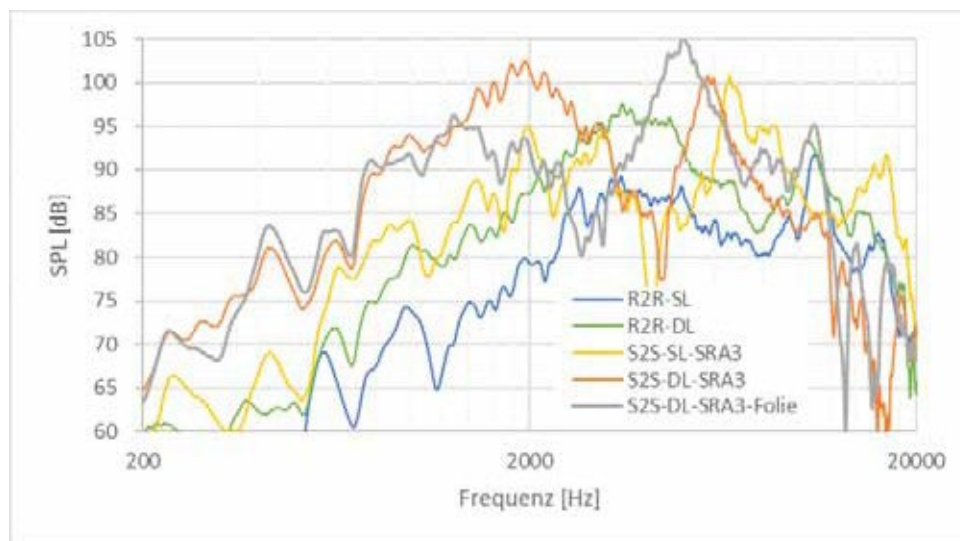


Abbildung 11: Frequenzgang verschiedener S2S gedruckter Lautsprecher im Format SRA3 gegenüber R2R gedruckter Lautsprecherproben jeweils mit einer und zwei aktiven Schichten im Frequenzbereich 200-20.000 Hz

Wie Abbildung 11 zeigt, kann mit breiteren Lautsprechern (320 mm ggü. 150 mm) bei zudem doppelter aktiver Fläche der Schalldruckpegel wesentlich gesteigert werden. Vergleicht man Proben mit jeweils zwei aktiven Schichten („DL“-Proben), ergibt sich eine Steigerung um mindestens +10 dB im Frequenzbereich bis 2 kHz und somit einer deutlich höheren Steigerung als den zu erwartenden +6 dB für zwei kohärent überlagerte Schallquellen gleichen Schalldruckpegels.

AP3: Aufbau Labordemonstratoren und Testumgebung

AP3.1: Labordemonstratoren – Aufbau zweier Installationen (i) als semi-transparente Variante (ii) als farbig bedruckbare/anpassbare Variante (pmTUC)

Die Labordemonstratoren sind in beiden Ausführungen vorhanden. Eine Installation als semi-transparente Variante für ein Sound-Beleuchtungsmodul, bestehend aus drei der Länge nach kombinierten bogengedruckten Folienlautsprechern auf einem LED-Panel ist in Abb. 13 links zu sehen. Papierbasierte Lautsprechermodule sind in unterschiedlichen Ausführungen und Formaten (Abb. 12) vorhanden und können in zwei einfache Halterungssysteme (s. Abb. 13 rechts) eingespannt werden. Diese Halterungssysteme sind auf die Modullänge eines Deckenpanels im Zug VT642 abgestimmt und können dort als Beschallungsmodul für eine Sitzgruppe genutzt und im „ECOTrain“ als realitätsnahe Testumgebung erprobt werden. Weiterhin können diese Halterungen zur akustischen Charakterisierung der Lautsprecherbahnen genutzt werden. Ein zusätzliches Halterungssystem konzipiert von HVE und umgesetzt von der SEIWO Technik GmbH (SEIWO), steht außerdem zur Verfügung. Dabei sind bestehen mehr Einstellmöglichkeiten, wie Winkel, flexible Breite und einschiebbare Plattenmaterialien können getestet werden. Folgende Ausführungen und Formate gedruckter Lautsprecher sind im Laufe des Projekts entstanden und verfügbar:

a) Rollendruck:

- papierbasierte single-Layer Lautsprecherbahnen (s. Abb. 12 links) mit 150 mm Bahnbreite, kombinierbar auf doppelbreites Format
- papierbasierte double-Layer Lautsprecherbahnen (s. Abb. 12 links) mit 150 mm Bahnbreite, kombinierbar auf doppelbreites Format

b) Bogendruck:

- papierbasierte single-Layer Bogenlautsprecher im Format SRA3 (320x450 mm) der Länge nach kombinierbar zu Lautsprecherbahnen
- papierbasierte double-Layer Bogenlautsprecher im Format SRA3 (320x450 mm) der Länge nach kombinierbar zu Lautsprecherbahnen
- folienbasierte semi-transparente single-Layer Bogenlautsprecher im Format SRA3 (320x450 mm) der Länge nach kombinierbar zu Lautsprecherbahnen

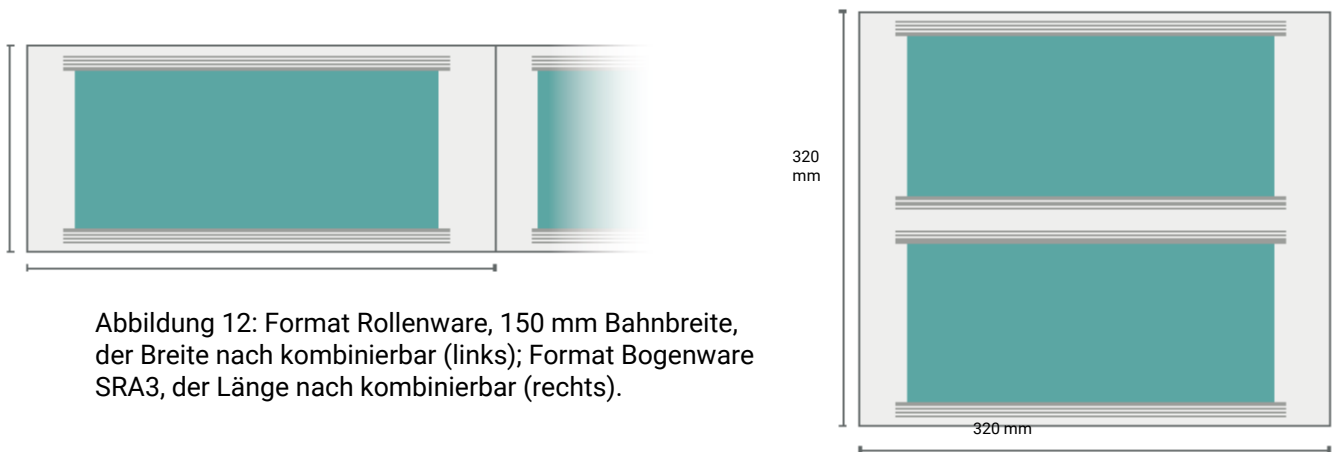


Abbildung 12: Format Rollenware, 150 mm Bahnbreite, der Breite nach kombinierbar (links); Format Bogenware SRA3, der Länge nach kombinierbar (rechts).



Abbildung 13: Labordemonstrator als semi-transparente Variante für ein Sound-Beleuchtungsmodul (links). Labordemonstratoren in einfacher und doppelter Breite mit papier- und folienbasierten Lautsprecherbahnen (rechts).

Die Labordemonstratoren wurden umfassend weiterentwickelt, von einer einfachen Holzhalterung mit Schraubklemmen zu einer Leichtbauversion basierend auf Alu-Klemmschienen und 3D-gedruckten Verbindungselementen. Die Konzeption erfolgte durch den Partner Hörmann, basierend auf einem an der TU Chemnitz entwickelten Prototypen, auf dessen Basis bei der Umsetzung durch die Herstellung der 3D-Druck Elemente unterstützt werden konnte.

Zusätzlich wurde ein neues Konzept der Anschluss- und Verbindungstechnik erarbeitet und getestet zum Übergang von den gedruckten Lautsprechern auf konventionelle Elektronik. Zunächst wurde diese Schnittstelle zu Ansteuer- und Versorgungselektronik durch leitfähiges Klebeband auf den Lautsprechern und einer mechanischen Klemmung realisiert, was in Hinblick auf die Anwendung jedoch einige Nachteile mit sich bringt. Die Kontaktierung zu den Lautsprechern über eine mechanische Klemmung kann sich beispielsweise durch Vibration im Fahrbetrieb lockern und so lokal zu hohen Kontaktwiderständen führen.

Eine Lösung, die Vibrationssicherheit, elektrische Isolierung und einfaches Lösen und Verbinden einzelner Lautsprechermodule bietet wurde mit passenden FPC (Flat Printed Circuits) Steckverbindern, Crimps, sowie Buchsen- und Pingehäusen realisiert (s. Abb.14).

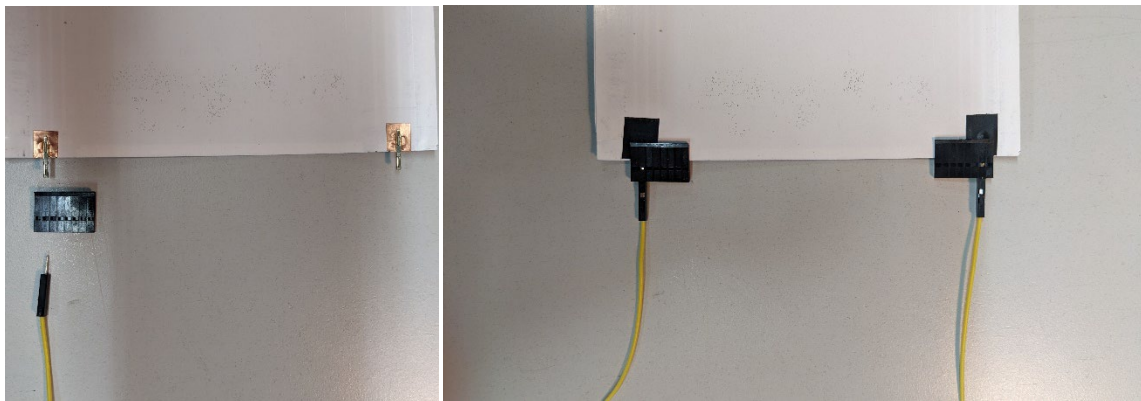
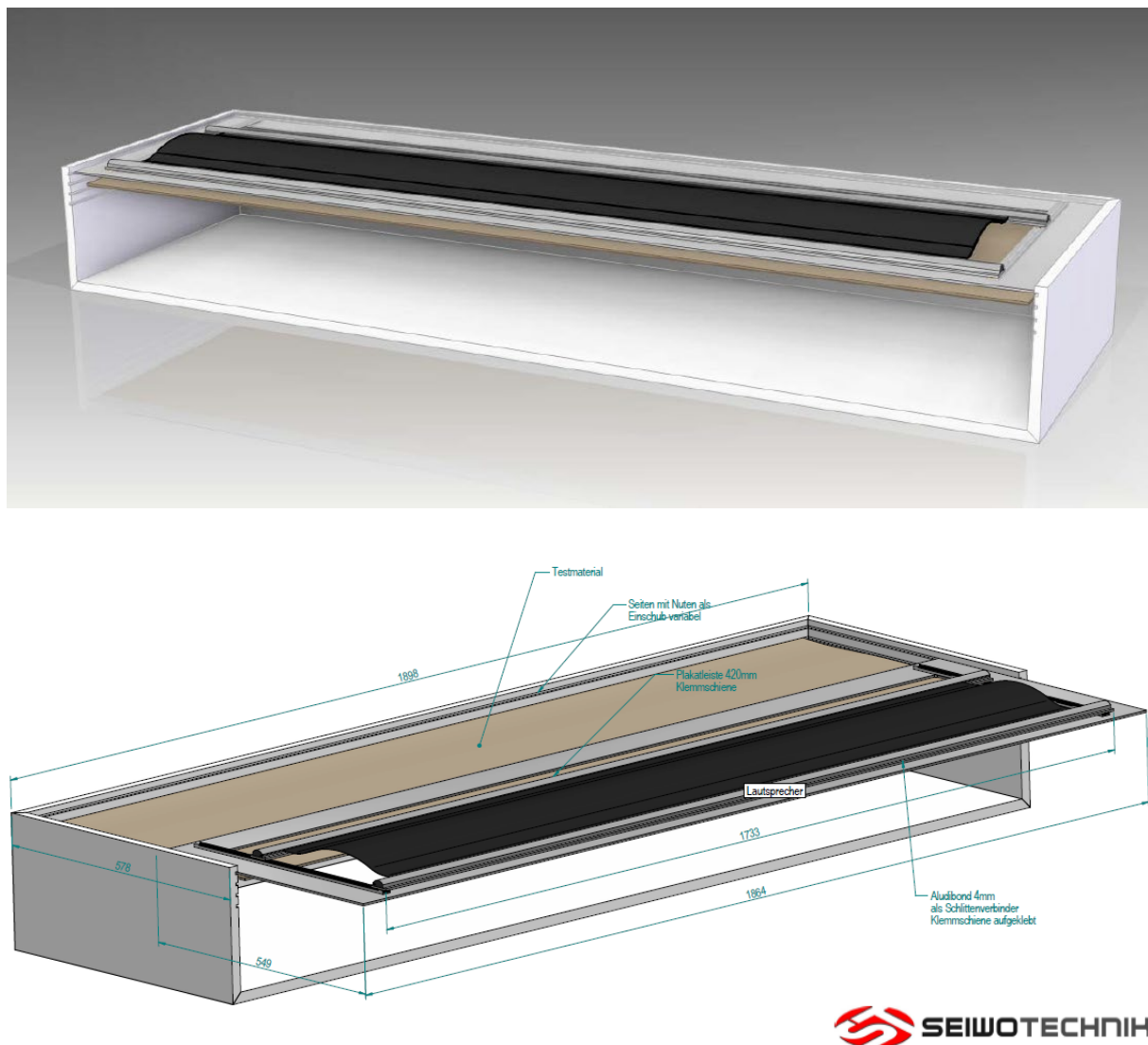


Abbildung 14: Übergang gedruckte zu konventioneller Elektronik mit FPC Steckverbindern

AP 3.2: Aufbau einer mobilen Testumgebung zur Erzeugung einer möglichst realen Nutzungsumgebung (aw&I-TUC)

Im AP 3.2 unterstützte die aw&I-TUC die Projektpartner SEIWO und HVE bei der Konzeption und dem Aufbau einer mobilen Testumgebung. Da eine umfangreiche Testung im laufenden Bahnbetrieb vor allem unter Berücksichtigung standardisierter Umgebungsfaktoren schwierig umsetzbar ist, wurde eine Simulationsumgebung erarbeitet, die neben der Nutzung im Labor auch für eine Evaluation im realen Versuchsträger genutzt werden kann. Damit können Einstellmöglichkeiten, wie Winkel, flexible Breite und einschiebbare Plattenmaterialien getestet werden.

Eine detaillierte Darstellung ist in Abbildung 15 und im Bericht des Projektpartners dargelegt.



SEIWOTECHNIK

Abbildung 15: Versuchsaufbau Demonstrator

Darüber hinaus stehen zwei weitere einfache Halterungssysteme zur Verfügung. Diese Halterungssysteme wurden von pmTUC konzipiert und gebaut und werden von der aw&I-TUC dupliziert. Somit wurden neben Versuchen in realitätsnaher Testumgebung parallel stattfindende Laboruntersuchungen zu objektiven (pmTUC) und subjektiven (aw&I-TUC) Parametern von Klangqualität und Sprachverständlichkeit möglich.

AP 3.3: Integration in die Versuchsumgebung sowie Konfiguration von Audio-Content (aw&i-TUC)

Im Rahmen des Arbeitspakets 3.3 wurden Fortschritte bei der Integration eines Demonstrators in die Versuchsumgebung sowie der Konfiguration von Audio-Content innerhalb einer Laborumgebung erzielt. Das zentrale Ziel dieses Arbeitspakets war die realitätsnahe Abbildung einer Zugumgebung in Vorbereitung auf eine Nutzerstudie unter kontrollierten Bedingungen. Im Folgenden werden die erzielten Ergebnisse detailliert dargestellt.

Entwicklung und Fertigung eines Halterungssystems:

Ein wesentlicher Bestandteil war die Entwicklung und Auftragsfertigung eines einfachen Halterungssystems, welches speziell für die Anforderungen dieses Projekts konzipiert wurde. Das System, bestehend aus einem Holzgestell und der von pmTUC konzipierten Halterung für bedruckte Lautsprecher, ist angepasst an die Dimensionen des Forschungszugs (Abbildung 16). Dadurch wird die Beschallung einer Sitzgruppe sowohl für den Niederflur- als auch den Hochflurbereich ermöglicht. Durch diese Konstruktion wird eine flexible Testumgebung geschaffen, die es erlaubt, innerhalb einer Laborumgebung die von pmTUC entwickelten Lautsprecher anhand von Faktor-Mensch-Kriterien durch Probanden zu bewerten.



Abbildung 16: Einfacher Nachbau eines Zugabteils (Holzgestell mitsamt Halterungssystem)

Integration von Audio-Content:

Ein weiterer wichtiger Schritt war die Beschaffung und Integration von professionell aufgezeichneten Audio-Samples. Diese wurden vom SRCC in Form von Haltestellendurchsagen der Erzgebirgsbahn zur Verfügung gestellt. Die Audio-Samples zeichnen sich durch eine hohe Sprachqualität aus und sind ein entscheidendes Element, um die Authentizität der simulierten Zugumgebung zu erhöhen. Die sorgfältige Auswahl und Integration dieser Samples trägt maßgeblich dazu bei, eine immersive Testumgebung zu schaffen, die es ermöglicht, die Auswirkungen verschiedener Audio-Szenarien auf das Verhalten und die Wahrnehmung der Probanden zu analysieren.

Herausforderungen bei der Implementierung des mobilen Demonstrators:

Es ist zu vermerken, dass der geplante Einsatz des mobilen Demonstrators des Partners SEIWO (siehe AP3.1 – Abbildung 15) aufgrund von unvorhergesehenen Umständen nicht realisiert werden konnte. Die Verfügbarkeit des Demonstrators der SEIWO Technik GmbH war innerhalb des geplanten Zeitraums eingeschränkt. Zudem stand der für die Integration geplante Forschungszug aufgrund eines Defekts nicht zur Verfügung, weshalb eine alternative Testumgebung beim Projektpartner aw&i aufgebaut wurde (siehe Abbildung 16). Diese Entwicklungen erforderten entsprechend einer Anpassung der Projektplanung. Jedoch wurde durch den alternativen Lösungsansatz die Fortführung der Arbeitspakete ohne signifikante Verzögerungen gewährleistet.

AP 4 – Bewertung und Erprobung der Demonstratoren

AP 4.1: Technische Laborerprobung und Optimierung (pmTUC)

Zur Sicherstellung der Funktionsfähigkeit und Betriebsstabilität wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt. Gegenstand der Untersuchungen waren bei auf Papiersubstrat gedruckten Lautsprechern Dauerbeschallungstests, Temperaturentwicklung im Betrieb, und Leckstrom in Abhängigkeit der rel. Luftfeuchte.

Ein 24-Stunden Dauerbeschallungstest mit für die Anwendung üblichen Audiodateien ergab keine signifikanten Veränderungen der Funktionsfähigkeit.

Eine Untersuchung des Leckstrom Verhaltens der Papierlautsprecher in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte wurde in einer Klimakammer durchgeführt. Dabei wurde eine zusätzliche Silber-Elektrode auf die Außenseite des Lautsprechers aufgedruckt und der Leckstrom durch das Papiersubstrat bei einer Spannung von 200 V (DC) gemessen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Isolationswirkung des Papiersubstrates mit steigender Luftfeuchte stark abnimmt. Der Widerstand der Papierschicht sinkt von hohem mehrstelligem MΩ-Bereich bei 40% rel. Luftfeuchte auf $10^5 \Omega$ bei 90% rel. Luftfeuchte ab. Zu beachten ist hierbei, dass dieses Verhalten auch Spannungsabhängig ist und für diesen Versuch eine Spannung weit über der üblichen Betriebsspannung gewählt wurde. Zusätzlich kann Abhilfe durch das Kaschieren der Papierlautsprecher mit einer dünnen Folie geschaffen werden.

Weiterhin wurde die Temperaturentwicklung bei Doppelschicht-Lautsprechern im Betrieb untersucht mittels einer Thermografiekamera (Jenoptik). Zur Temperaturentwicklung muss zunächst die elektrische Leistung am Lautsprecher betrachtet werden. Grundlage der Berechnung der Leistung ist die Annahme einer Reihenschaltung bestehend aus kapazitiver Last und in Reihe befindlichem ohmschen Widerstand. Die kapazitive Last wird von dem piezoelektrischen Dielektrikum P(VDF-TrFE) gebildet. Der Reihenwiderstand setzt sich aus dem Widerstand der Elektroden aus PEDOT:PSS und den Leitungswiderständen aus Silber zusammen. Aufgrund des hohen Serienwiderstands nimmt die Wirkleistung, die im Anwendungsfall

Lautsprecher eine Verlustleistung darstellt, mit steigender Frequenz stark zu. Ab ca. 5.000 Hz ist sie gleich hoch mit der Blindleistung, die das kapazitive Verhalten abbildet. Die Wirkleistung wird thermisch umgesetzt, d. h. der Lautsprecher erwärmt sich. Während der Temperaturanstieg bis zu 2.000 Hz und einer Spannung von 48 Vrms moderat bleibt, steigt die Oberflächentemperatur mit zunehmender Frequenz stark an und erreicht bei 5.000 Hz auf einer Kontaktseite über 68 °C. Für den Anwendungsfall Audioinformationssystem spielt das allerdings keine Rolle, da das beschriebene Verhalten nur beim Anlegen hochfrequenter Sinus-Signale auftritt. Sowohl das Abspielen eines Pink-Noise-Signals als auch eine Sprachansage (Erzgebirgsbahn) erbrachten nur eine minimale Temperaturerhöhung um jeweils ca. 1-2°C nach 120 s trotz maximal möglicher Signalhöhe.

Zur EMV-Prüfung wurde ein Angebot eingeholt. Aufgrund der hohen Kosten wurde jedoch zunächst von der EMV-Prüfung abgesehen.

AP 4.2: Nutzertests am Labordemonstrator (aw&i-TUC)

Aufgrund der Nichtverfügbarkeit des Forschungszuges entschied sich das Konsortium die städtische Chemnitzer Verkehrs-AG (CVAG) für die in AP6 geplante Feldstudie zu beauftragen. Unter diesem Gesichtspunkt wurde sich im Hinblick auf die Laborstudie entschieden, die Lautsprecherpaneele in Höhe von 2 Metern – analog zu der in der Feldstudie geplanten TATRA-Bahn anzubringen. Entsprechend wurde der Laboraufbau (siehe Abbildung 16) in Anlehnung an eine Hochflur-Straßenbahn angepasst. Die Laborstudie gestaltete sich im Laufe dessen wie folgt.

Methodik:

Für die Studie wurde die Laborumgebung entsprechend den Maßen eines realen Straßenbahnwagens (Modell TATRA T3D-M) angepasst. Diese vereinfachte Nachbildung eines Waggonabteils wurde mit zwei verschiedenen Größen von gedruckten Lautsprecherpanelen (140 mm vs. 280 mm Breite) ausgestattet und in 2 m Höhe angebracht. Die Sitze wurden entsprechend der realen Maße in Bezug auf Sitzhöhe und Abstand zu den Lautsprecherpaneelen positioniert. Um Hintergrundgeräusche wie beispielsweise Motorengeräusche zu simulieren, wurden handelsübliche Stereolautsprecher verwendet. Zur Bewertung der subjektiv wahrgenommenen Sprachverständlichkeit, Klangqualität und des Hörerlebens wurde der bereits aufbereitete Audio-Content der Erzgebirgsbahn über die gedruckten Lautsprecherpaneele abgespielt, während Hintergrundgeräusche mit verschiedenen Signal-Rausch-Verhältnissen (SNRs) präsent waren. Die Hintergrundgeräusche wurden in zwei Varianten reproduziert – entweder als rosa Rauschen oder als reale Aufnahme von Umgebungsgeräuschen (aufgezeichnet durch pmTUC) aus einem Zugabteil der Erzgebirgsbahn. Insgesamt resultierten daraus 4 verschiedene Variationen von Hintergrundgeräuschen sowie eine Bedingung ohne Hintergrundgeräusch. Dabei wurden die Lautsprecherdurchsagen, gestört durch die Hintergrundgeräusche, mittels Fragebogen im Hinblick auf das Konstrukt subjektive Sprachqualität, subjektiv empfundene Sprachverständlichkeit, Klangqualität und Hörerleben (semantisches Differential mit Adjektivpaaren) bewertet.

Ergebnisse:

Die Studie mit N = 24 Teilnehmenden zeigte, dass die subjektiv empfundene Sprachverständlichkeit sowie Sprachqualität signifikant abnahm, wenn Hintergrundgeräusche vorhanden waren (siehe Abbildung 17). Insbesondere in den Bedingungen, in denen das Hintergrundgeräusch lauter war als die Ansage (-5 db(A) SNR), reichten die Bewertungen für die subjektive Sprachqualität von "schlecht" bis "mittelmäßig" (SQ_UG_laut) und "extrem schlecht" bis "schlecht" (SQ_PN_laut). Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass rosa Rauschen den Frequenzbereich der menschlichen Wahrnehmung in einer sehr konsistenten Weise stört, was zu einer Überschätzung seiner Lautstärke führt.

Eine Varianzanalyse mit Messwiederholung (ANOVA) ergab statistisch signifikante Unterschiede für die Hintergrundgeräusche, die Lautstärke der Hintergrundgeräusche und deren Kombinationen. Die Breite der gedruckten Lautsprecher hatte an dieser Stelle keinen statistisch signifikanten Einfluss auf die subjektive Sprachqualität und Sprachverständlichkeit.

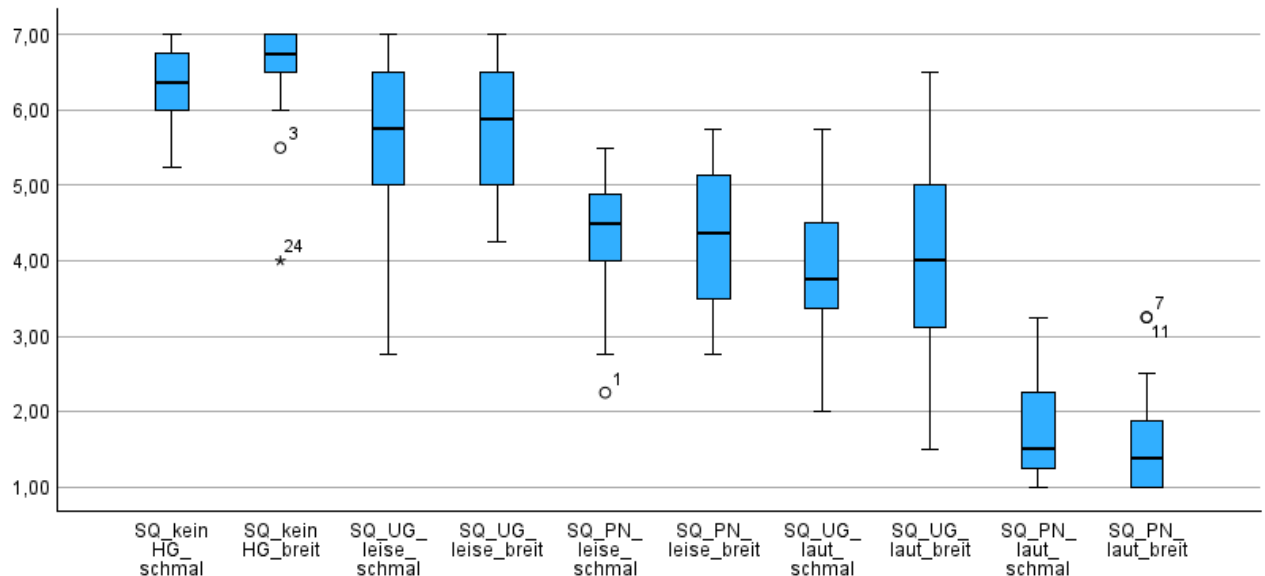


Abbildung 17: Subjektive Sprachqualität (SQ) in jeder Bedingung für die beiden Lautsprecherpaneele (Skalenwerte: 1 = "extrem schlecht" bis 7 = "ideal"). keinHG = kein Hintergrundgeräusch, UG = Umgebungsgeräusch, PN = rosa Rauschen, leise = +7,5 db(A) SNR, laut = -5 db(A) SNR, schmal = 140 mm Lautsprecherpaneel, breit = 280 mm Lautsprecherpaneel.

Allerdings zeigten sich signifikante Unterschiede in Bezug auf die Breite der Lautsprecher bei einzelnen Items der semantischen Differenzialskala, die das Hörerleben abbildete – insbesondere, wenn kein Hintergrundgeräusch vorhanden war.

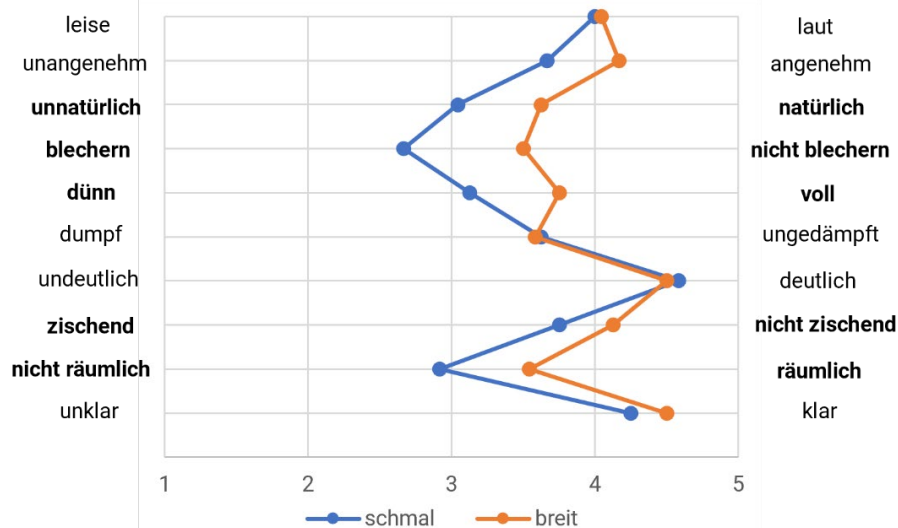


Abbildung 18: Polaritätsprofil zum Hörerleben

Signifikante Unterschiede zeigten sich diesbezüglich bei den Items „unnatürlich-natürlich“, „blechern-nicht blechern“, „dünn-voll“, „zischend-nicht zischend“ und „nicht räumlich-räumlich“. Die Studienergebnisse verdeutlichen, dass mit abnehmendem Signal-Rausch-Verhältnis (zunehmendes Geräuschpegelniveau des Hintergrundgeräusches) die subjektive Sprachqualität abnimmt. In Bedingungen mit einem SNR von +7,5 dB(A) wurde die Sprachqualität als „gut“ bis „ausgezeichnet“ bewertet, während sie in Bedingungen mit rosa Rauschen als „ordentlich“ bis „gut“ eingestuft wurde. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit der ISO Norm 9921, 2003 (Ergonomie – Beurteilung der Sprachkommunikation), welche Signal-Rausch-Verhältnisse größer als +7,5 dB(A) als „sehr gut“ oder „ausgezeichnet“ definiert. Daraus lässt sich auf eine grundlegend sehr gute Eignung der gedruckten Lautsprecher im Kontext der Bewertung von Faktor-Mensch-Kriterien in einer simulierten Zugumgebung schließen. Dabei spielte die Breite der Lautsprecher in diesem Setup lediglich für das Hörerleben eine übergeordnete Rolle. Die subjektiv wahrgenommene Sprachverständlichkeit, als Teil des Konstrukts subjektive Sprachqualität, blieb in diesem Zusammenhang unbeeinflusst.

AP 5: Konzept zur Forschungszugintegration und Aufbau Zugdemonstrator

AP 5.1: Konzeptentwicklung aus Ergebnissen AP 3 und AP 4 (pmTUC)

Die Konzeptentwicklung zur Integration der AudioBahn²-Technologie in ein Schienenfahrzeug musste im Laufe des Projektes durch den Wechsel des Versuchsträgers vom ursprünglich vorgesehenen Forschungszug auf eine Trambahn der Baureihe Tatra T3D-M der CVAG angepasst werden. Im Vergleich zum Forschungszug bietet die Tram T3D-M keine Möglichkeit der direkten Integration der gedruckten Lautsprechertechnologie in Bauteile des Schienenfahrzeugs, wie etwa der Voutenelemente, Deckenpaneelen, Gepäckablagen oder Beleuchtung. Im Fall der Tram T3D-M war lediglich eine oberflächliche Applikation der Lautsprecher an den Deckenelementen der Tram möglich. Daher wurde hier das Konzept Decken-/Wand-Modul favorisiert.

Basierend auf den in AP3.1 beschriebenen weiterentwickelten Demonstratoren wurden Halterungen basierend auf gewinkelten Aluprofilen, Klemmschienen (HVE) und 3D-Druck Elementen (aw&i-TUC, pmTUC) gefertigt und ein Konzept zur Befestigung an den Deckenelementen der Tram erarbeitet (Abb. 19). Bei der Fertigung konnten wir durch Herstellen der 3D-Druck Elemente unterstützen. Die Länge der Module (~1,40 m) wurde auf die Deckenpaneele der Tram abgestimmt. Jedes Modul fasst eine Lautsprecherbahn mit 4 aktiven Einzellautsprechern.

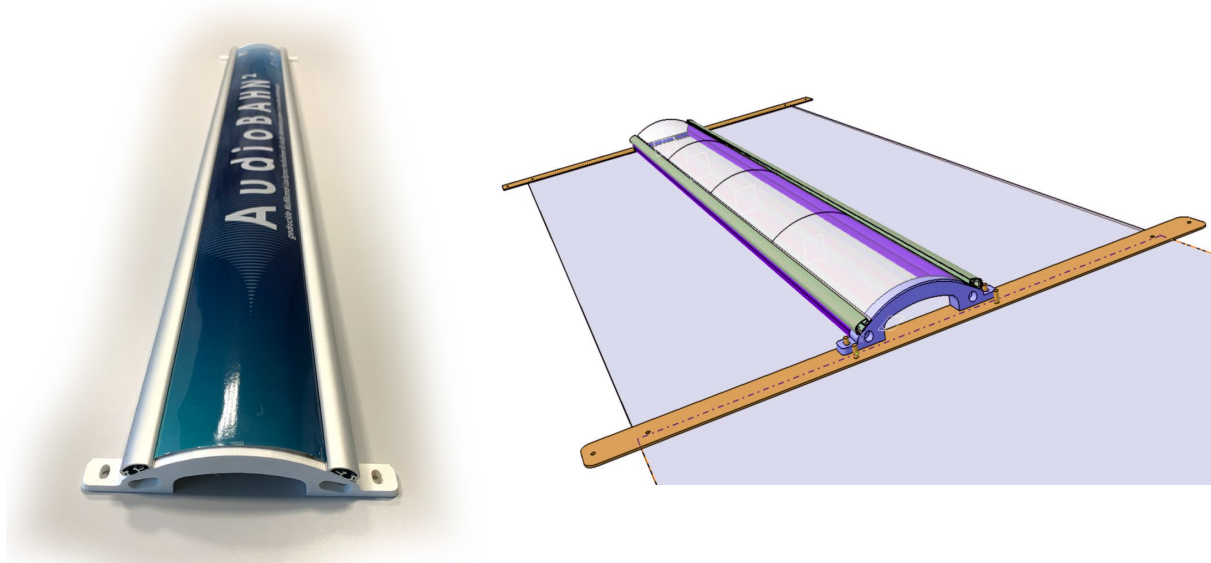


Abbildung 19: Halterung mit gedruckter Lautsprecherbahn (links), Skizze Integrationskonzept (rechts)

AP 5.2: Physischer Aufbau im Forschungszug (pmTUC + aw&i-TUC)

Insgesamt 6 der in AP5.1 beschriebenen Module wurden im Deckenbereich der Tram T3D-M verbaut (Abb. 20). Mit sechs Modulen wird die gesamte Länge des Waggons abgedeckt. Dies ermöglicht für die objektive und subjektive Beurteilung des Audiosystems in AP6.1 und AP6.3 positionsspezifische Unterschiede des Linienstrahlers des AudioBAHN² Systems im Vergleich zum herkömmlichen Punktlautsprecher-System zu evaluieren.

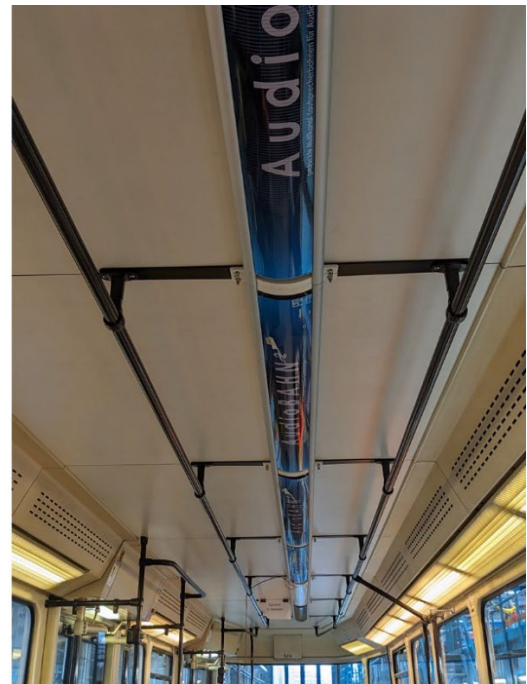


Abbildung 20: Tatra T3D-M (links) und Deckenbereich mit 6 Lautsprechermodulen (rechts)

AP 5.3: Medienimplementierung (pmTUC + aw&i-TUC)

Zunächst wurden am pmTUC Untersuchungen zum Verhalten verschiedener 100V-Verstärker in Kombination mit verschiedenen T-PAPER Lautsprechern durchgeführt. Verglichen wurden 4 unterschiedliche, am pmTUC verfügbare Verstärker Modelle:

Tabelle 3: Vergleich Verstärker Modelle

	Monacor PA1122	Monacor AKB- 160	Monacor PA 1850D	Monacor PA- 4040
Leistung	120 W	40 W	8 x 50 W	4 x 40 W
Kanäle	1	1	8	4
Eingangs- empfindlichkeit	1,2 V _{rms}	390 mV _{rms}	390 mV _{rms}	100 mV _{rms}

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die hohen kapazitiven Lasten der Doppelschicht-Lautsprecher, im Falle der Module wie sie in der Tram zum Einsatz kommen sollen mit 4 aktiven Doppelschicht-Flächen je Modul und einer Last von etwa 3 µF nur von dem leistungsstärksten Modell Monacor PA1122 mit 120W über den gesamten Audio-Frequenzbereich getrieben werden können. Um wie in AP5.2 beschrieben sechs dieser Module betreiben zu können wurde ein neuer Verstärker basierend auf diesen Untersuchungen angeschafft (MonacorPA1480), der dem Modell PA1122 entspricht, jedoch mit 480W deutlich leistungsstärker ist.

Von einem Multikanalbetrieb wurde abgesehen, da dies in der Einbausituation in der Tram keinen großen Mehrwert zu bringen schien. Zudem gibt es nur eine sehr begrenzte Auswahl passender Verstärkermodelle mit acht Kanälen und genug Leistung die Installation zu betreiben. Die technische Realisierung und Möglichkeit des Multikanalbetriebs wurde bereits an anderer Stelle (T-Ring) vom pmTUC demonstriert.

Eine funktionstechnische Abstimmung mit dem SmartWindow-Demonstrator (WIR!-Projekt: Transparenzte Displays für kollektive visuelle Fahrgastinformationen) hat wie geplant stattgefunden. Eine parallele Vorstellung der Demonstratoren fand beispielsweise auf Veranstaltungen des SRCC sowie im eigenen Haus statt.

AP 6 – Feldversuche

AP 6.1: Technische Felderprobung und Optimierung (pmTUC)

Zur objektiven Bewertung der Audio-Qualität des AudioBahn Systems sollten ortsabhängige Sprachverständlichkeitsmessungen durchgeführt werden und ein Vergleich zu Standardaudiosystemen basierend auf Punktlautsprechern gezogen werden. Der Terminus Sprachverständlichkeit beschreibt, wie gut Informationen bei der Übertragung über ein Beschallungssystem erhalten bleiben. Messverfahren wie STI (Speech Transmission Index) oder STIPA (Speech Transmission Index of Public Address Systems) stellen Sprachverständlichkeit über einen Zahlenwert zwischen 0,00 (keine Verständlichkeit) und 1,00 (perfekte Verständlichkeit) dar. Einfluss auf das Ergebnis solcher Messungen haben u. a. die Qualität des Beschallungssystems, die Raumakustik, Qualität der Audiofiles, Hintergrund- und Störgeräusche, wie z. B. Betriebslärm und der Signal-Rausch-Abstand.

Detaillierte Beschreibungen zur Durchführung und Auswertung von Sprachverständlichkeitsmessungen finden sich in der Norm DIN EN IEC60268-16 (Elektroakustische Geräte – Teil 16: Objektive Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den Sprachübertragungsindex).

Zur Durchführung der Sprachverständlichkeitsmessungen werden das Messsystem Sinus Apollo mit der Software Samurai vom Hersteller Sinus Messtechnik verwendet, sowie ein Messmikrofon der Fa. Microtech Gefell (Modell M370). Zur Ermittlung des STIPA-Wertes wurden je Messposition vier Einzelmessungen durchgeführt:

STIPA Prüfsignal über das zu bewertende Audiosystem

Betriebslärm, Schienenfahrzeug im Fahrbetrieb

Messung Fremdgeräusch – Umgebungslärm Schienenfahrzeug außer Betrieb

Sprachsignal – entsprechende Durchsage, z.B. Durchsage Erzgebirgsbahn oder CVAG

Die STIPA Messungen wurden zunächst im Akustik-Labor der TU Chemnitz realitätsnah nachgestellt. Dafür wurden Betriebslärm und Fremdgeräusch in der Tatra T3D-M aufgenommen und in die Simulation einbezogen. Diese vorläufigen Messungen zeigten aussichtsreiche Ergebnisse mit STIPA Werten zwischen 0,6 und 0,7. Zur Einordnung dieser Werte bietet die DIN EN IEC60268-16 eine Tabelle (G.1 – Beispiele für typische Anwendungen der STI-Qualifikationsbänder, S. 77). Ein Wert von min. 0,46 entspricht den Mindestanforderungen für Sprachalarmanlagen, dieser Wert findet sich auch in entsprechenden Anforderungen für Schienenfahrzeuge als Mindestanforderung, ein Wert größer 0,76 gilt außerhalb von Aufnahmestudios als kaum erreichbar. Diese vorläufigen Ergebnisse deuteten darauf hin, dass die für AudioBAHN² konzipierte Beschallungsanlage basierend auf gedruckten Papierlautsprechern von sehr guter Qualität mit hoher Sprachverständlichkeit sind. Zu beachten ist, dass in der Simulation die Raumakustik nicht mit abgebildet werden kann. Zu erwarten waren daher tendenziell etwas schlechtere Werte in der realen Einbausituation.

Die geplanten Messungen in der realen Einbausituation sind in folgender Abbildung 21, sowie Tabelle 4 kurz skizziert.

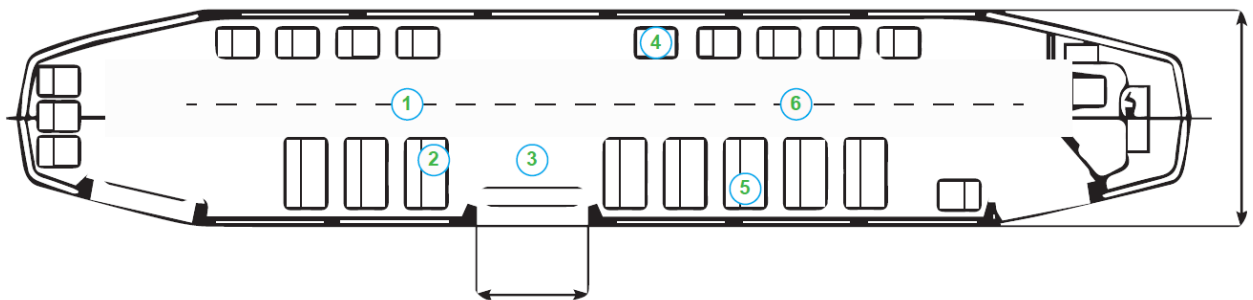


Abbildung 21: Skizze Tatra T3D-M, mit markierten Messpositionen

Tabelle 4: Beschreibung der Messpositionen zur Sprachverständlichkeitsmessung in der Trambahn

Messposition	Beschreibung	Mikrofonhöhe	STIPA Wert	Kategorie
Position 1	mittig, stehend	160 cm	0,63	D
Position 2	innen,sitzend, rechts	120 cm	0,65	C
Position 3	außermittig, stehend, Türbereich	160 cm	0,64	D
Position 4	innen, sitzend, links	120 cm	0,63	D
Position 5	außen, sitzend, rechts	120 cm	0,66	C
Position 6	mittig, stehend	150 cm	0,66	C

Die Messpositionen wurden entsprechend der DIN EN IEC60268-16 gewählt. Insgesamt wurde an sechs Messpositionen gemessen. Das Messmikrofon wurde dabei für Messpositionen an Sitzplätzen auf 1,20 m Höhe, für Stehplätze auf 1,60 m positioniert. Für Messposition 6 wurde die Mikrofonhöhe auf 1,50 m reduziert, da der Abstand zum Lautsprecher dort zu gering gewesen wäre. Die Position des Messmikrofons entsprechend den Vorgaben der DIN-Norm. Ein Drittel der Messpositionen (1,6) sind auf der Hauptachse des Beschallungssystems und die restlichen Messpositionen sind so verteilt, dass sie möglichst alle realen Hörpositionen abbilden (stehend, sitzend, innen, außen, Fenster- und Türbereich).

Die Ergebnisse der STIPA Messungen sind ebenfalls in Tabelle 4 aufgelistet. Die ermittelten Werte weichen über die 6 Messpositionen wenig voneinander ab und reichen von 0,63 bis 0,66. Damit sind die Zielforderungen für Sprachalarmanlagen (0,5) weit übertroffen. Laut Tabelle G.1 – Beispiele für typische Anwendungen der STI-Qualifikationsbänder – im folgenden Tabelle 5, entsprechen die ermittelten STIPA Werte des gedruckten Lautsprechersystems einer Beschallungsanlage mit hoher Sprachverständlichkeit. Außerdem zeigt die geringe Abweichung der ermittelten Messwerte in Abhängigkeit der Messposition eine homogene Schallverteilung durch den Einsatz der gedruckten Lautsprecherbahnen. Die rot markierten Bereiche in Tabelle 5 entsprechen den Mindest- bzw. Zielforderungen für Sprachalarmanlagen, der gelb markierte Bereich entspricht einer Beschallungsanlage guter Qualität. Die grün markierten Bereiche entsprechen den für das AudioBAHN Lautsprechersystem ermittelten STIPA Werten und einer guten, bis hohen Sprachverständlichkeit.

Eine vergleichende Bewertung des konventionellen Systems, das in der Tatra Tram verbaut ist, war leider nicht möglich. Die für die Messung erforderlichen Signale (STIPA Prüfsignal und Sprachsignal) konnten zwar über das konventionelle Lautsprechersystem abgespielt werden, aber eine Einstellung des Wiedergabepegels ist nicht möglich, was eine STI-Bewertung nach DIN-Norm unmöglich macht.

Tabelle 5: Auszug aus DIN EN IEC60268-16: Beispiele für typische Anwendungen der STI-

Kategorie	STI-Nennwert	Art der Nachrichteninformation	Beispiele für typische Anwendungen (für natürliche oder reproduzierte Sprache)	Bemerkung
A+	> 0,76		Aufnahmestudios	Sehr gute Verständlichkeit, aber in den meisten Umgebungen selten erreichbar
A	0,74	Komplexe Nachrichten, unbekannte Wörter	Theater, Vortragssäle, Plenarsäle, Gerichtssäle, Hörhilfesysteme	Hohe Sprachverständlichkeit
B	0,7	Komplexe Nachrichten, unbekannte Wörter		
C	0,66	Komplexe Nachrichten, unbekannte Wörter sed	Theater, Vortragssäle, Telefonkonferenzen, Plenarsäle, Gerichtssäle	Hohe Sprachverständlichkeit
D	0,62	Komplexe Nachrichten, bekannte Wörter	Hörsäle, Klassenräume, Konzertsäle	Gute Sprachverständlichkeit
E	0,58	Komplexe Nachrichten, bekannter Kontext	Konzertsäle, moderne Kirchen	Beschallungsanlagen hoher Qualität
F	0,54	Komplexe Nachrichten, bekannter Kontext	Beschallungsanlagen in Einkaufszentren, Büros in öffentlichen Gebäuden, Sprachalarmanlagen, Kathedralen	Beschallungsanlagen guter Qualität
G	0,5	Komplexe Nachrichten, bekannter Kontext	Einkaufszentren, Büros in öffentlichen Gebäuden, Sprachalarmanlagen	Zielforderung für Sprachalarmanlagen
H	0,46	Einfache Nachrichten, bekannte Wörter	Sprachalarm- und Beschallungsanlagen in schwierigen akustischen Umgebungen	Mindestanforderung für Sprachalarmanlagen

AP 6.3: Durchführung einer Feldstudie (aw&i)

Zur subjektiven Bewertung der Audioqualität des AudioBAHN²-Systems wurde eine nutzerbasierte Evaluation in Form einer Feldstudie mit Unterstützung der Chemnitzer Verkehrs AG (CVAG) durchgeführt. Spezielles Augenmerk lag dabei auf Faktor-Mensch-Kriterien wie subjektiv empfundener Sprachverständlichkeit, Klangqualität und Hörerleben. Außerdem wurde das System in Bezug auf Gesamtbeschallung sowie sitzplatzindividueller Beschallung untersucht und mit dem konventionellen Lautsprechersystem der Tatra T3D-M verglichen. Die Probanden erlebten dabei eine jeweils fünfundzwanzigminütige Fahrt mit dem AudioBAHN²-Lautsprechersystem sowie dem konventionellen Lautsprechersystem in randomisierter Reihenfolge. Während der Fahrt hatten die Probanden die Aufgabe Haltestellendurchsagen mittels Fragebogen zu bewerten. Zur Überprüfung der Beschallung auf Homogenität wurde die Test-Straßenbahn in verschiedene Sitzbereiche eingeteilt (analog zur objektiven Messung). Die Probanden wechselten entsprechend während der Fahrt die Sitzplätze, um alle Bedingungen erleben und bewerten zu können. Teil davon war ebenso eine stehende Bedingung, in denen die Probanden die Möglichkeit gegeben wurde in der Straßenbahn umherzulaufen, um einen Eindruck von den Haltestellendurchsagen während des Stehens zu erhalten. Die mit 1 und 2 gekennzeichneten Sitzplätze waren aufgrund ihres Abstands zu beiden Lautsprechersystemen der schlechten Bedingung zugeordnet (siehe Abbildung 22). Die mit 3 und 4 gekennzeichneten

Sitzplätze hingegen spiegelten gute Bedingungen in Bezug auf die Hörakustik wider (geringer Abstand zu beiden Lautsprechersystemen).

An der Studie nahmen insgesamt 26 Personen (11 weiblich, 15 männlich) im Alter von 19-78 Jahren ($M = 53$, $SD = 21$) teil. In Bezug auf die subjektiv empfundene Sprachverständlichkeit und Klangqualität, welche auf einer Skala von 1 – extrem schlecht bis 7 – ideal bewertet wurden zeigte eine ANOVA keine signifikanten Unterschiede zwischen den Sitzplätzen 1 und 2 sowie zwischen den Sitzplätzen 3 und 4 sowohl für das AudioBAHN²- als auch das konventionelle Lautsprechersystem. Dieses Ergebnis hinsichtlich schlechter und guter Bedingung war wie erwartet eingetreten und spiegelte eine angemessene Sitzverteilung, welche so auch in der objektiven Messung hervorging, wider. Für das AudioBAHN²-System konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen dem Sitzbereich vorne (1/2), hinten (3/4) und dem Stehbereich festgestellt werden was auf eine sehr homogene Schallverteilung schließen lässt. Dieses Ergebnis zeigte erneut die Eignung für den Einsatz in Schienenfahrzeugen in Bezug auf die akustische Leistung.



Abbildung 22: Einteilung der Tatra-T3DM in verschiedene Sitzbereiche (1, 2 bzw. rot = schlechte Bedingung; 3, 4 bzw. grün = gute Bedingung; gelb = Stehbereich)

Für das konventionelle Lautsprechersystem konnte an dieser Stelle keine homogene Schallverteilung anhand der subjektiven Bewertungen der Probanden gemessen werden. Hier gab es große Unterschiede im vorderen und hinteren Sitzbereich sowie dem Stehbereich. Dabei konnte erneut der bestehende Bedarf an homogener Schallverteilung hervorgehoben werden, für den das AudioBAHN²-System eine geeignete akustische Lösung bietet. Die Bewertungen der einzelnen Sitzbereiche in Bezug auf subjektiv empfundener Sprachverständlichkeit sowie

Klangqualität sind in Abbildung 23 und Abbildung 24 dargestellt. Neben den genannten Kriterien wurden als Kontrollvariablen die Störeinflüsse durch Umgebungsgeräusche bewertet (Konzentration, Störeinfluss). Die Sprachverständlichkeit des AudioBAHN²-Systems wurde wie in der Abbildung zu sehen als gut bis ausgezeichnet bewertet. Die Sprachverständlichkeit des konventionellen Lautsprechersystem der Tatra-Bahn hingegen wurde je nach Sitzbereich von extrem schlecht bis ordentlich bewertet. Dies ist u .a. allerdings auf die fahrzeugseitige Limitierung zurückzuführen, welche es nicht ermöglichte die Lautstärke der Durchsagen für das konventionelle System anzupassen, wodurch dieses mit ~ 60 db(A) deutlich leiser war als das AudioBAHN²-System mit ~ 73 db(A) bei vorherrschenden Umgebungsgeräuschen von ~ 68 db(A). Ein paarweiser Vergleich war an dieser Stelle folglich nicht zielführend.

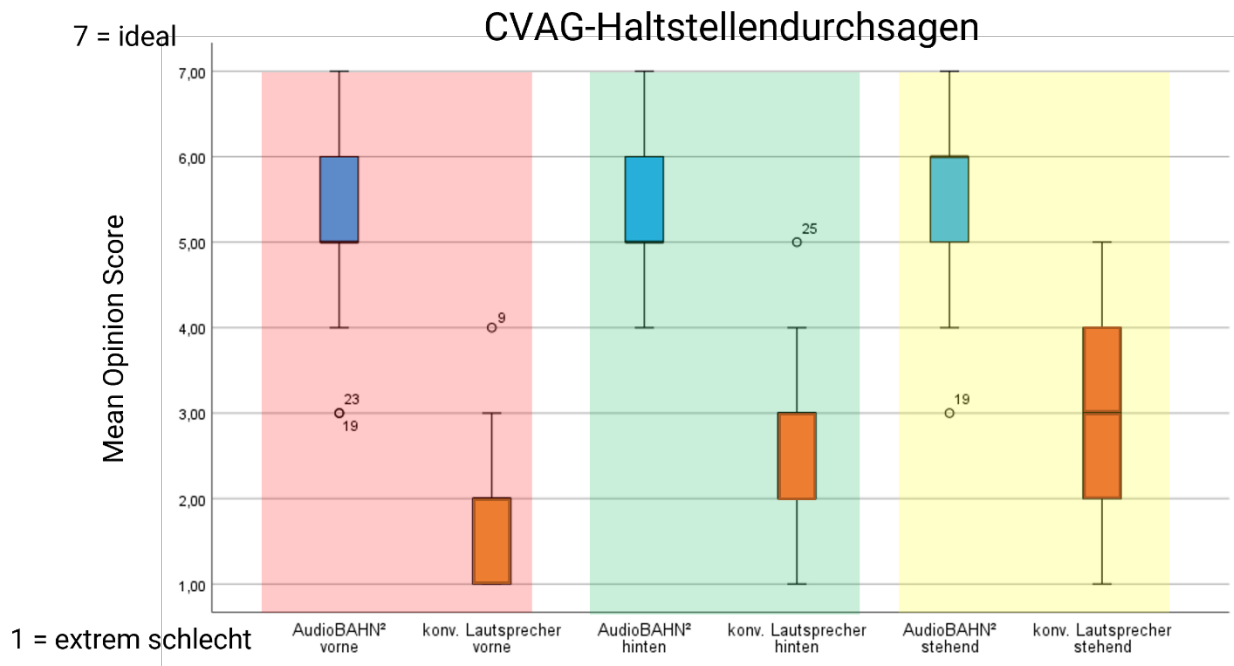


Abbildung 23: Bewertung der subjektiv empfundenen Sprachverständlichkeit in den einzelnen Sitzbereichen (rote Markierung = roter Sitzbereich, grüne Markierung = grüner Sitzbereich, gelbe Markierung = Stehberiech; zur Veranschaulichung siehe auch Abbildung 22)

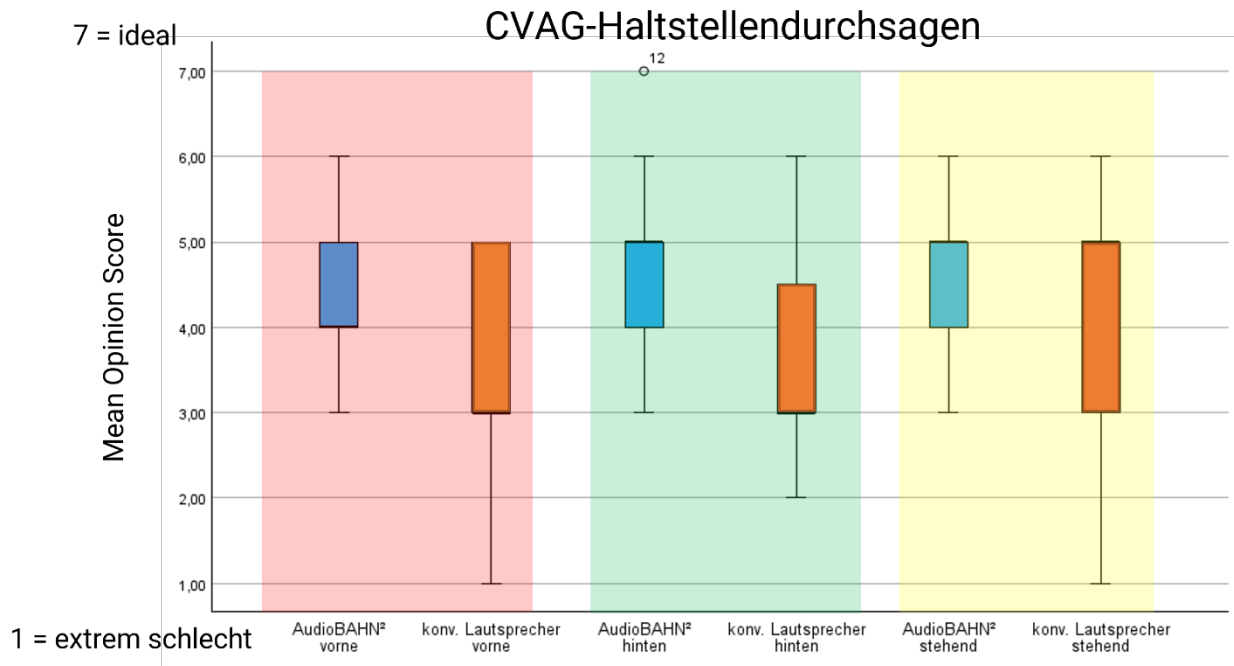


Abbildung 24: Bewertung der Klangqualität in den einzelnen Sitzbereichen (rote Markierung = roter Sitzbereich, grüne Markierung = grüner Sitzbereich, gelbe Markierung = Stehberiech; zur Veranschaulichung siehe auch Abbildung 22)

Zur Bewertung des Hörerlebens wurden verschiedene Adjektivpaare evaluiert, welche sich in der Laborstudie bereits als zielführend erwiesen. Die Adjektivpaare wurden mittels semantischen Differentials bewertet und bilden das in Abbildung 25 dargestellte Polaritätsprofil, welches gleichzeitig ein vom Menschen empfundenes Soundprofil für die Lautsprechersysteme widerspiegelt.

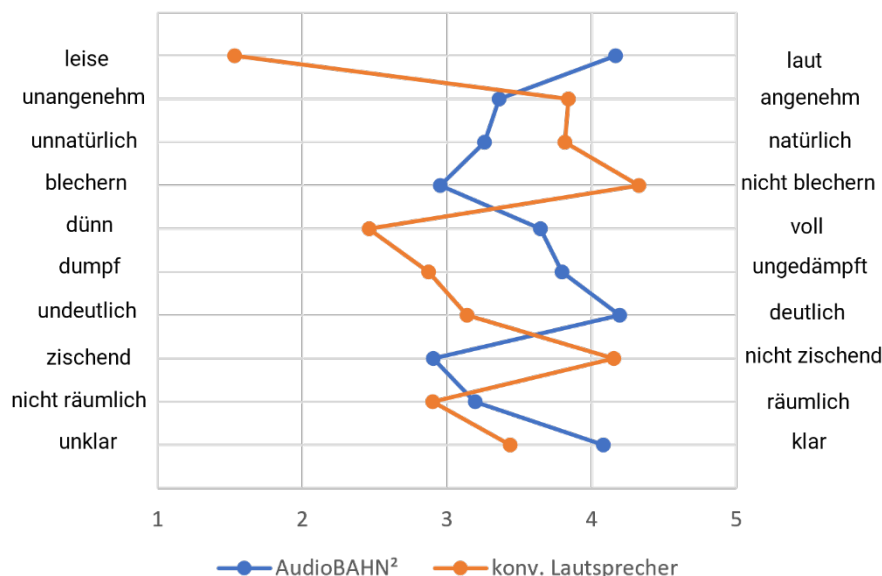


Abbildung 25. Polaritätsprofil zum Hörerleben im Feldversuch

Aus den Ergebnissen der Labor- und Feldstudie sowie der objektiven Messungen lässt sich zusammengefasst folgendes ableiten. Die Stärken des AudioBAHN²-Lautsprechersystems liegen speziell in der Sprachverständlichkeit. Diese wurde sowohl in den subjektiven Messungen als auch den objektiven Messungen hoch bewertet. Dabei zeigt das Lautsprechersystem vor allem

positive Aspekte in der homogenen Beschallung, welche auch in schwierigeren akustischen Umgebungen mit hoher Umgebungslautstärke, wie in der Test-Straßenbahn, den Schall für das menschliche Gehör gleichmäßig verteilt. Herkömmliche Systeme hingegen erreichen an Sitzplätzen, an denen keine Lautsprecher in unmittelbarer Nähe angebracht sind, eine vergleichsweise schlechtere Sprachverständlichkeit. Trotz der hohen Sprachverständlichkeit hat das System in puncto Klangqualität seine Schwächen. Wie anhand Abbildung 24 und 25 zu sehen ist, beschrieben Probanden die Haltestellenansagen durch das AudioBAHN²-System im Vergleich zu einem herkömmlichen Lautsprechersystem als unangenehmer, unnatürlicher, blecherner und zischender. Diesbezüglich äußerten die Probanden, dass sie sich eine Anwendung im Entertainmentbereich aufgrund des weniger ausgeprägten Basses eher weniger vorstellen können.

Limitationen zum Feldversuch

Aufgrund des nicht zur Verfügung stehenden Forschungszuges, welcher ursprünglich für das Projekt geplant war, musste auf eine Tatra-3DM der CVAG ausgewichen werden. Die Tatra-3DM, welche in den Jahren 1960-1990 gefertigt wurde ist heute in Bezug auf Akustik kaum mehr vergleichbar mit einem modernen Zug oder Straßenbahn. Die Bedingungen, unter denen der Feldversuch stattfand, spricht insofern für die AudioBAHN²-Lautsprecher, da trotz dessen gute Werte für die Sprachverständlichkeit gemessen wurden. Allerdings war das konventionelle Lautsprechersystem der Tatra-T3DM kaum vergleichbar mit dem Lautsprechersystem eines modernen Zuges. Hinzu kam, dass die Haltestellenansagen der CVAG weder von einem professionellen Sprecher eingesprochen wurden noch in Studioqualität vorlagen. An dieser Stelle besteht für zukünftige Studien Weiterentwicklungsbedarf.

Ein weiterer Punkt in Bezug auf Limitationen betrifft den Einbauraum. In der Tatra-3DM war keine Möglichkeit vorzufinden das Lautsprechersystem beispielsweise durch Verdeckung vor Vandalismus zu schützen. Eine solch freihängende Lösung ist für den Einsatz in Schienenfahrzeugen im öffentlichen Raum nicht erstrebenswert und war lediglich in unserem Experimentalsetup für den Feldversuch unter Begleitung eines Versuchsleiters anwendbar.

AP 7: Dissemination & Transfer (pmTUC + aw&i)

AP 7.1: Zwischenworkshop

Während der Vorbereitungen zum Feldversuch wurden die Ergebnisse der Laborstudie sowohl an die Projektpartner in Form von Zwischenworkshops in Online-Meetings als auch an den SRCC-Steuerungskreis in Form von Projektmonitoring und bei Veranstaltungen des SRCC an die Öffentlichkeit kommuniziert und diskutiert. Dabei wurde auch immer wieder über Verwertungsmöglichkeiten diskutiert. Ansätze waren an dieser Stelle die Integration der Lautsprecher in den Ideenzug der Deutschen Bahn und ein Austausch durch den Projektpartner HVE mit anderen Unternehmen bezüglich einer Lautsprecher-Leuchten-Kombination. Ein wissenschaftlicher Transfer hat beispielsweise durch den Besuch des 70. Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft in Stuttgart (Konferenzpaper + Vortrag) stattgefunden, bei dem sich mit Experten bezüglich der Methodik der Laborstudie sowie über Technologie und Verwertung ausgetauscht wurde.

AP 7.2: Abschlussworkshop

Im Rahmen eines Abschlussworkshops wurde das Gesamtprojekt (aw&i) sowie die technische Weiterentwicklung der Lautsprecher (pmTUC) über das gesamte Projekt hinweg vorgestellt. Dabei wurden die Ergebnisse der Feldstudie präsentiert und anhand eines von der Firma SEIWO gefertigten Demonstrators in Form eines Messeaufbaus veranschaulicht. Im Rahmen des Abschlussworkshops wurden außerdem Einsatzmöglichkeiten in Schienenfahrzeugen (HVE) präsentiert und mit den Besuchern in Bezug auf Verwertungsmöglichkeiten und Folgeaktivitäten diskutiert. Außerdem steht zur Veranschaulichung der Einsatzmöglichkeiten ein von der aw&i produziertes Werbevideo zur Verfügung.

Neben dem Abschlussworkshop wurden weitere Transferaktivitäten unternommen. Die Professur Arbeitswissenschaft besuchte die Abschlussveranstaltung des Projekts Rumba (gefördert vom BMWK: Förderkennzeichen 19A20007D), um sich mit Experten für Innenraumkonzepte aus dem Automobilbereich bezüglich der AudioBAHN²-Technologie auszutauschen. Der Fokus lag darauf, Transfer- und Verwertungsaktivitäten voranzutreiben sowie Integrations- und Interaktionskonzepte im Bereich Mobilität zu diskutieren.

Die Professur Printmedientechnik besuchte gemeinsam mit dem Projektpartner HVE und einem potentiellen Verwertungspartner den Versuchsträger bei der Chemnitzer Verkehrs AG. Dabei wurde die Technologie live in der Tram demonstriert und über mögliche Verwertungspläne diskutiert. Weitere Verwertungsaktivitäten liegen an dieser Stelle bei den Projektpartnern HVE und SEIWO.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Das Projekt wurde an der TU Chemnitz durch die Professur Arbeitswissenschaft und Innovationsmanagement sowie die Professur Printmedientechnik durchgeführt. Die im Rahmen des Projektes entstandenen Ausgaben betrugen insgesamt 420.128,59 € (zzgl. Projektpauschale i. H. v. 84.025,72 €). Sie liegen damit 76.500,69 € (ohne Projektpauschale) unter der bewilligten Zuwendung. Die Ausgaben wurden im Wesentlichen für Personalausgaben zur Beschäftigung wissenschaftlicher Mitarbeiter (276.526,60 €), zur Beschäftigung weiteren Personals/Techniker (60.536,51 €) und zur Beschäftigung von Hilfskräften (22.792,25 €) verwendet.

Weiterhin erfolgten wesentliche Ausgaben für die Vergabe von Aufträgen (24.095,99 €) und für sonstige allgemeine Verwaltungsausgaben (32.017,12 €). Es wurde eine Umwidmung von Mitteln i. H. v. 5.000,00 € aus der Position 0835 in die Position 0843 vorgenommen. Ein ursprünglich geplanter Auftrag der Position 0835 wurde nicht vergeben. Dafür freiwerdende Mittel wurden zur Anschaffung weiteren Verbrauchsmaterials in Position 0843 verwendet.

Auch wegen der COVID-19 Pandemie und der damit eingeschränkten Mobilität konnten Reisetätigkeiten zunächst nur eingeschränkt unternommen werden, weshalb ein Teil der dafür eingeplanten Mittel (Pos. 0846: Verausgabung i. H. v. 2.270,40 € statt der geplanten 4.900 €) ungenutzt blieb. Durch die sich ergebenden digitalen Möglichkeiten zum Austausch und hybrider Veranstaltungsformate konnten hier generell Mittel eingespart werden. Dennoch wurden Konferenzen besucht und die Möglichkeit zum Austausch vor Ort wahrgenommen, wie beim Besuch der 70. Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft in Stuttgart.

Wesentliche Abweichungen gegenüber den ursprünglich geplanten Ausgaben gab es bei der Position 0850 (Gegenstände über 800 €). Hier wurden von den bewilligten 16.000,00 € lediglich 1.889,72 € für den Einsatz eines Laminiergerätes sowie für Messtechnik zur akustischen Charakterisierung verausgabt.

Es erfolgte eine kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit um drei Monate. Diese wurde notwendig, um die Verzögerungen durch den notwendigen Wechsel des Versuchsträgers auszugleichen. Die kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit ermöglichte die Entwicklung eines realitätsnahen Demonstrators.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die geleisteten Projektarbeiten entsprechen im Wesentlichen den im Projektantrag beschriebenen Arbeitspaketen, mit wenigen Abweichungen, die im Folgenden kurz erläutert werden.

Die Teilarbeiten in AP2 wurden entsprechend der Beschreibung im Projektantrag durchgeführt. Dabei musste in einigen Teilarbeitspaketen mehr Arbeit investiert werden als ursprünglich geplant. Konkret betrifft dies das AP 2.1, die Herstellung von rollengedruckten Papier-Lautsprecherbahnen nach dem Stand der Technik. Grund hierfür war eine mangelhafte Charge von PEDOT:PSS Material, die zu schlechteren Ergebnissen und vor Allem einer geringeren Ausbeute funktionsfähiger Papierlautsprecher führte. Das Problem konnte durch Neubestellung des Materials mit anderer Chargennummer behoben werden, aber die Identifikation und der Nachweis der Ursache nahmen viel Zeit in Anspruch.

Weiterhin soll gesondert auf das AP 2.3, „Rollendruck und Inline-Nachverarbeitung von folienbasierten semi-transparenten Lautsprecherbahnen“ eingegangen werden. Es konnte nachgewiesen werden, dass folienbasierten semi-transparente Lautsprecher im Bogendruck hergestellt werden können. Diese wurden auch entsprechend charakterisiert und vermessen (s. z.B. Abb. 11). Im Rollendruck gab es jedoch das Problem der mangelnden Verbundhaftfestigkeit laminierter Lautsprecherbahnen. Grund dafür war ein Folienmaterial mit spezieller

Oberflächenbehandlung, das zu der Zeit als Rollenmaterial nicht lieferbar war, aber als Bogenware vorlag. Andere Folienmaterialien, wurden im Rollendruck getestet, führten aber zu keiner Lösung des Haftungsproblems. In Anbetracht des Zeitplans wurde sich an dieser Stelle entschieden, sich für den weiteren reibungslosen Projektablauf auf papierbasierte Lautsprecherbahnen zu konzentrieren.

Grundsätzlich konnte mit den Arbeiten in AP 2 ein wichtiger Grundstein für den Erfolg des Projektes gelegt werden, v. a. durch die Weiterentwicklung zur Multilayer-Technologie, welche Lautsprecherbahnen mit deutlich verbessertem Frequenzgang, besonders im Frequenzbereich menschlicher Sprache ermöglicht.

Arbeitspaket 3.2 und 3.3 wurden aufgrund der Herausforderungen beim Projektpartner SEIWO nicht wie ursprünglich geplant, sondern mit Abweichungen, umgesetzt. Der Demonstrator aus Arbeitspaket 3.2 stand innerhalb des geplanten Zeitraums für den Nutzertest nur einschränkt zur Verfügung. Zudem stand der für die Integration geplante Forschungszug nicht zur Verfügung. Diese Entwicklungen erforderten entsprechend einer Anpassung der Projektplanung. Jedoch wurden alternative Lösungsansätze gefunden, um die Fortführung der Arbeitspakete ohne signifikante Verzögerungen zu gewährleisten. Entsprechend wurde eine alternative Testumgebung (siehe AP 3.3 bzw. Abbildung 13 rechts und Abbildung 16) beim Projektpartner aw&i aufgebaut. Folglich konnten die Einschränkungen durch die aus AP 3.1 zur Verfügung stehenden Demonstratoren (pmTUC), dem Nachbau eines einfachen Halterungssystems (siehe AP 3.3., Abbildung 16) sowie der sehr gut zugänglichen realen Testumgebung in Form der Tatabahn der CVAG kompensiert werden. Entsprechend konnte sowohl im Labor als auch im Feld realitätsnah vorbereitet, getestet und somit erfolgreich in AP6 evaluiert werden. Reale Geräuschsituationen wurden während einer Fahrt mit der regulären Erzgebirgsbahn vom Partner pmTUC aufgezeichnet. Ein 360°-Audiosystem wurde aufgrund der Herausforderungen beim Partner SEIWO nicht konzipiert.

In AP 4.1 wurde ein Angebot eingeholt für einen EMV-Test. Aufgrund der hohen Kosten wurde dieser Test allerdings nicht durchgeführt.

Arbeitspaket 5 musste wegen des nicht zur Verfügung stehenden Forschungszugs entsprechend auf die Gegebenheiten der Trambahn der CVAG angepasst werden. Dies brachte einige Einschränkungen mit sich, v. a. AP 5.1 betreffend, da die räumlichen Gegebenheiten der Trambahn wenig Spielraum für unterschiedliche Integrationskonzepte ließen. Dafür konnte mit dem finalen Demonstrator eine Einbausituation gezeigt werden, die den realen Bedingungen im Zug und einer realistischen Einbausituation entsprechen.

In Arbeitspaket 6.3 wurde eine Kombination akustischer und visueller Rückmeldung (Projekt SmartWindow) nicht erprobt. Das Projekt SmartWindow verwendete ein Halterungssystem, welches für den Forschungszug vorgesehen war. Da dieser nicht zur Verfügung stand und die als Alternative verwendete Tatra-Bahn nicht die Einbaumöglichkeiten und Gegebenheiten für SmartWindow bot wurde eine Kombination aus visueller und akustischer Rückmeldung, wie ursprünglich vorgesehen, nicht evaluiert.

Die restlichen Arbeitspakete wurden entsprechend dem Antrag durchgeführt.

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

a) Wirtschaftliche Verwertung

Teil des Projektergebnisses ist der zur Verfügung stehende mobile Demonstrator, der u. a. für Transferaktivitäten bei Veranstaltungen im eigenen Haus und auf Fachmessen verwendet werden soll. Weitere Transferaktivitäten sind über die Beteiligung der Professuren an Konferenzen und an Veranstaltungen des Smart Rail Connectivity Campus möglich, bei dem die Technologie

sowohl gegenüber dem öffentlichen Publikum als auch möglichen Interessenspartnern veranschaulicht werden soll.

b) Wissenschaftliche Verwertung

Die Ergebnisse aus AudioBAHN² sollen als Fallbeispiel in Lehrveranstaltungen wie Produktergonomie, Innovation & Value Creation sowie in studentische Arbeiten einfließen. Die Forschungserkenntnisse werden zum einen in die Hauptvorlesungen „Arbeitswissenschaft“ und „Erfolgsfaktor Mensch“ integriert, zum anderen fließen Inhalte in den Masterstudiengang „Human Factors“ ein.

Die Erkenntnisse des Evaluationsversuchs sollen zudem in den nächsten Monaten auf wissenschaftlichen Konferenzen veröffentlicht werden. Hierzu wurde bereits ein Vortrag auf dem „Jahreskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft“ gehalten. Weiterhin ist eine Veröffentlichung mitsamt Vortrag auf dem „Europapanel der Human Factors and Ergonomics Society“ (Open Access) vorgesehen. Darüber hinaus wird die TU Chemnitz im Bereich der Mensch-Maschine-Schnittstellen-Forschung publizieren. Publikationen in Form von Vorträgen und Beiträgen auf praxisrelevanten Tagungen sowie in relevanten Fachzeitschriften sind in Planung.

5 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Erfolgte Veröffentlichungen:

Hentschel, M., Dettmann, A., Bullinger, A. C. (2024). User-Centred Evaluation of Printed Multi-Channel Loudspeaker Panels in the Context of Rail Vehicles. Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, Sankt Augustin (Hrsg.): Frühjahrskongress 2024, Stuttgart.

Geplante Veröffentlichungen:

Geplante Konferenzveröffentlichung beim Annual Meeting (Konferenz) der Human Factors and Ergonomics Society 2025