

## Sachbericht zum Verwendungsnachweis

### Teil I – Kurzbericht

**WIR!-Projekt:** **Transparente Displays für kollektive visuelle Fahrgastinformationen (FKZ 03WIR1209)**

**Laufzeit:** **02/2021 – 01/2023**

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## 1 Ursprüngliche Aufgabenstellung

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung und realitätsnahe prototypische Erprobung eines kollektiven visuellen Fahrgastinformationssystems. Fahrgastinformationen und Warnungen wurden im Rahmen der SRCC-Konzepterstellung als relevantes Themenfeld identifiziert. Innovativer Kern der Entwicklung war die Anzeige von Fahrgastinformationen in der Außenscheibe von Bahnfahrzeugen. Die Transparenz der Scheibe musste dabei aufrechterhalten werden (transparentes Display). Die Informationen sollten wahlweise auf der Fahrzeuginnen- oder Außenseite sichtbar sein – und das in einem ergonomisch günstigen Bereich des menschlichen Blickfelds. Herausforderungen waren unter anderem die dynamische Veränderung der Hintergrundbeleuchtung durch Tag-, Nacht- und Witterungswechsel, die Vibrationsübertragung vom Fahrzeug, die hohen Sicherheits- und Zuverlässigkeitssanforderungen im Bahnsektor und die Integrationskonzepte für die Bordelektronik. Ergebnisse dieses Vorhabens sind zum einen ein statischer Labordemonstrator und ein mobiler Zugdemonstrator, die im Verlauf des Projektes entwickelt worden sind. Aus den an mit den Demonstratoren durchgeführten Versuchen wurden zum anderen Erkenntnisse und Empfehlungen für die technische Konzeption solcher Systeme und die Gestaltung der angezeigten Informationen abgeleitet.

## 2 Ablauf des Vorhabens

In Arbeitspaket (AP) 1 wurden Fragestellungen und Randbedingungen für die Erprobung der Smart-Window-Technologie und Entwicklung des Demonstrator-Konzepts sowie des Versuchsdesigns für Laborerprobungen ermittelt, die vor einem Einsatz in einem Zug durchgeführt werden müssen. Die Demonstrator-Konzepte wurden anschließend in AP 2 entwickelt und technisch umgesetzt. Entstanden ist ein stationärer Labordemonstrator der in zwei Ausführungen Indoor und in einem Test-Pkw umgesetzt wurde. Dieser wurden dann in AP 3 zur technischen Laborerprobung und Optimierung (Indoor) bzw. zur Evaluierung von Gestaltungsentwürfen in Form von Usability-Tests (Test-Pkw) genutzt. Auf Basis der Ergebnisse von AP 3 wurden in AP 4 Konzepte zur Integration der SmartWindow-Technologie in den Testzug unter Betrachtung der Bahnrichtlinien entwickelt und die nötigen Systemkomponenten beschafft. Die Ergebnisse der Laborversuche wurden in AP 8.1 in Form eines Zwischenworkshops vorgestellt und aufgearbeitet. In AP 5 erfolgte der physische Aufbau eines Labordemonstrators im Testzug der Baureihe 642 Desiro inkl. Entwicklung von technischen Detaillösungen. Der Aufbau im Testzug war wesentlicher Bestandteil von AP 6, in welchem die Durchführung und Auswertung der Versuche zum Nachweis der Funktionsfähigkeit im Zug und zur Ableitung maßgeblicher Gestaltungsempfehlung bezüglich der Gebrauchstauglichkeit und Nutzerexperience zentral im Mittelpunkt stand. Im Rahmen von AP 7 wurden die Ergebnisse aller Projektpartner zusammengeführt und Empfehlung für die nachfolgende Entwicklung zur Marktreife und anderer Folgeaktivitäten abgeleitet. Das Projekt endete mit AP 8.2, dessen Fokus im Abschlussworkshop auf der Vorstellung des Zugdemonstrators und der Feldversuchsergebnisse sowie auf der Diskussion von Folge- und Verwertungsaktivitäten lag.

## 3 Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse

Mit dem derzeitigen Stand der Technik ist eine Ausstattung von Bahnen mit Fahrgastinformationsystemen auf Basis der erprobten Technologie nur eingeschränkt möglich. Abgesehen davon, dass bisher keine verfügbaren Projektionsfolien und Projektoren für den Betrieb in einer Bahn zertifiziert sind, sind diese auch nur begrenzt für den Einsatz in der Bahn geeignet. Gründe sind die mangelnde Kontrastfähigkeit vorhandener Folien abhängig von der Außenbeleuchtung, Strom- und Bauraumbedarf vorhandener Projektoren sowie fehlende Vandalismussicherheit. Dies macht die Ausstattung ganzer Bahnen auf absehbare Zeit zudem unwirtschaftlich. Nach einer adäquaten Zertifizierung und Weiterentwicklung wäre jedoch die Ausstattung einzelner Fenster, insbesondere für den Einsatz auf touristisch attraktiven Strecken, denkbar. Da der derzeitige Entwicklungsstand der Technik eine

deutliche Sichtbarkeit der Informationen nur in der Dämmerung bzw. Dunkelheit zulässt, könnte die Aktivierung des Systems nur in diesen Zeiten geprüft werden. Dadurch böte sich zudem der Vorteil, dass kein Konflikt mit dem Wunsch entsteht, während der Fahrt den Ausblick auf die Landschaft zu genießen, während Informationen zu Sehenswürdigkeiten entlang der Strecke im Dunkeln, wenn die Sehenswürdigkeiten nicht zu sehen sind, einen Mehrwert bieten könnten. Auch in Untergrundbahnen könnte die Technologie genutzt werden, um Informationen in den Fenstern anzuzeigen, da hier während der Fahrt ein gleichmäßig dunkler Hintergrund besteht, sodass die Erkennbarkeit nicht beeinträchtigt wird.

In Bahnen mit fensterbasierten Fahrgastinformationssystemen sollten nicht an jeder Außenscheibe Informationen angezeigt werden, da sich manche Fahrgäste davon gestört fühlen würden. Die Fenster, an denen Fahrgastinformationen angezeigt werden, sollten ausreichend große Bereiche ohne Informationen vorsehen, um dauerhaft das Schauen aus dem Fenster ohne Ablenkung zu ermöglichen. Noch besser wäre es, wenn das optische Fahrgastinformationssystem durch Fahrgäste an ihrem Sitzplatz je nach Bedarf ein- oder ausgeschaltet werden könnte. Informationen zur Strecke, zur aktuellen Position und voraussichtlichen Ankunftszeiten sollten dauerhaft sichtbar sein. Informationen, die derzeit im Bahnverkehr üblicherweise durch akustische Durchsagen bekanntgegeben werden, sollten ergänzend auf den optischen Fahrgastinformationen im Fenster angezeigt werden. Dies sind beispielweise Vorankündigungen zum bevorstehenden Halt sowie Informationen zu Umstiegsmöglichkeiten einige Minuten vor Ankunft oder Informationen zu Störungen und Verspätungen. Die optischen Anzeigen sollten jedoch akustische Informationen nicht ersetzen, da dies die Barrierefreiheit für sehgeschädigte Menschen reduzieren würde. In bestimmten Ruhebereichen einer Bahn ist dies eine Option, sollte dann aber bereits beim Buchungsvorgang entsprechender Sitzplätze deutlich bekannt gegeben werden. Werbung sollte auf Fahrgastinformationssystemen im Fenster nur sparsam angezeigt werden. Dies betrifft insbesondere Werbevideos.

## Sachbericht zum Verwendungsnachweis

### Teil II – Ausführlicher Bericht

**WIR!-Projekt:** **Transparente Displays für kollektive visuelle Fahrgastinformationen (FKZ 03WIR1209)**

**Laufzeit:** **02/2021 – 01/2023**

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## 1 Durchgeführte Arbeiten

Im Projekt wurden gemäß dem Arbeitsplan die gesamten Arbeitspakete (AP) 1 bis 8 bearbeitet. Alle geplanten Meilensteine wurden erreicht und finden im Abschlussbericht ihre Auswertung.

### **AP 1 – Interaktionsgestaltung und User-Centred-Design**

Ziel des AP war die Ermittlung von Fragestellungen und Randbedingungen für die Erprobung der Smart-Window-Technologien und die Entwicklung des Demonstratorkonzepts sowie des Versuchsdesigns für Laborerprobungen, die vor einem Einsatz in einem Zug durchgeführt werden müssen.

#### ***AP 1.1 – Anforderungsanalyse und Konzeption des Labordemonstrators***

Ziel des AP 1.1 war die Spezifikation wichtiger Systemelemente der Labordemonstratoren und die Definition der Szenarien.

##### **Prüfung transparenter Displays**

Zunächst wurden verschiedene Technologien für transparente Bildschirme untersucht. Die Auswahl fiel auf die Verwendung eines Filmdisplays mit externer Projektionsquelle, da (1) die selbstklebende Folie auf jeder transparenten Oberfläche angebracht werden kann, (2) kein Eingriff in den Herstellungsprozessen der Fenster erforderlich und (3) die Kombination aus Folie und Projektor kostengünstiger als der Einsatz eines OLED-Panels ist. Für die Bewertungen von Projektionsflächen gibt es eine Vielzahl von Methoden:

##### **Test transparenter Displays**

Penczek et al. (2015) analysierten die Lichtstörung innerhalb transparenter Bildschirme. Sie schlugen optische Messmethoden unter Einbeziehung der Durchlässigkeitseigenschaften transparenter Bildschirme vor, um den Transmissionsfaktor für hemisphärische und direktionale Lichtquellen zu bewerten. Diese Konzepte wurden als Referenz für den Bau des Labordemonstrators verwendet. Eine andere Arbeit bearbeitet die Frage nach dem Qualitätsverlust von Bildern hinter einem transparenten Display (Qin et al. 2017). Für die automatische Evaluation wurde ein vollständiges Image Quality Assessment (IQA)-Bildbewertungsverfahren verwendet, um die Qualität des See-Through-Bildes vorherzusagen. Für den Labordemonstrator wurde eine ähnliche IQA-Methode verwendet, um die Qualität des Projektionsbildes zu bewerten.

##### **Test von Head-up-Displays**

Ziel war, korrekte Projektionen und Lesbarkeit bei typischer Raumbeleuchtung zu garantieren. Für den Test von Head-up-Displays wurden nach AZoOptics (2019) SAE-konforme HUD-Messkomponenten eingesetzt. Diese waren ein Spotmeter (zur akkurate Bewertung der Chromatizität & Luminanz), mehrere Bildverarbeitungskameras (zur Messung von Bildern in einem HUD) sowie humane Augen (zur schnellen Prüfung der Anzeigequalität). Im Projekt wurde die HUD-Engine mit dem Projektor und die HUD-Projektion mit dem transparenten Filmdisplay mit Projektionsbild verglichen. Das Bildphotometer war eine semiprofessionelle Kamera (Canon EOS600D).

##### **Bildqualitätsbewertung**

Für die objektive Bildqualitätsbewertung wurden IQA-Algorithmen als Ergänzung zur menschlichen subjektiven Bewertung herangezogen. Dabei lernt ein künstliches neuronales Netz ein deformiertes Bild vom projizierten Bild zu unterscheiden. Mittels eines existierenden Datensatzes (z. B. AVA- oder TID2013) wird das Modell trainiert und Bildeigenschaften extrahiert.

##### **Definition des Testaufbaus**

Auf Grundlage der Erkenntnisse wurde ein Testaufbau definiert, der sich aus folgenden Komponenten zusammensetzte: Acryl, welches mit einer transparenten Folie beklebt wurde, ein Projektor, um das Bild auf die Projektionsfläche zu werfen, eine Kamera, um das Projektionsbild für die Nachbearbeitung zu fotografieren, ein Computer, um die Bilder in den Projektor zu laden und etwaige Anpassungen durchzuführen, sowie jeweils ein Panel und ein Ring als Lichtquelle, um gerichtetes Licht zu emulieren.

## AP 1.2 – Nutzungskontextanalyse für die Entwicklung der Smart-Window-Technologie

Ziel war, mit nutzerzentrierten Methoden und unter Einbeziehung von Expertenwissen konkrete Anforderungen an das zu entwickelnde System zu identifizieren.

### Identifikation von Use-Cases

Im Bericht von Keller et al. (2019a) wurden an 18 Personas Use-Cases für ein interaktives Smart-Window im Straßenbahnbahnhofkontext herausgearbeitet, wovon sechs auf die Bedingungen im Projekt zutrafen: Detailinformation zu Orten (POI/Haltestelle), Hinweise auf eine Störung auf einer relevanten Route, Alternativen zur aktuellen Route, Erinnerungen, Störungshinweise am SmartWindow und Detailinformationen zu Fahrplaninformationen anzeigen (Linie/Zeit/Ort).

Zudem wurde eine Expertenbefragung mit dem Fokus auf physikalische und psychologische Einflussfaktoren bei der Wahrnehmung von transparenten Displays durchgeführt. Als wichtigste Faktoren ergaben sich dabei Blickwinkel und -distanz, Kontrastwahrnehmung sowie wahrgenommene Anstrengung. Von den Nutzenden wurden gewünschte Informationen auf Basis der Ergebnisse von Keller et al. (2019b) in einem Online-Fragebogen bewertet. Dabei waren die am meisten gewünschten Informationskategorien „nächster Halt“, „Verspätung“, „aktuelle Linie des Zuges“, „aktuelle Uhrzeit und Datum“ und „Ankunftszeit“.

### Parameterdefinition

Zur Definierung von Parametern wie Helligkeit und Kontrast dienten die Projektionslösungen des Folienherstellers Lux Lab als Orientierung. Festgelegt wurde ein Ultrakurzdistanzprojektor, der eine ANSI Lumenzahl von 4000 und ein Kontrastverhältnis von 22000:1 (Lux Labs 2021) bereitstellt.

## AP 2 – Aufbau Labordemonstratoren

Ziel des AP war der physische Aufbau von Labordemonstratoren inkl. Entwicklung technischer Detallösungen. Im AP wurden projektionsbasierte Technologien und direkt ins Fenster integrierte Displays für die vergleichenden Untersuchungen der nachfolgenden APs aufgebaut.

### AP 2.1 – Stationärer Labordemonstrator

#### Realisierung des Testaufbaus

Im Testaufbau wurde entsprechend der Ergebnisse aus AP 1 der Bildschirm aus Acryl in einem Dunkelraum positioniert. Für eine bessere Bildqualität bei der Frontprojektion befand sich die transparente Folie auf der Rückseite des Bildschirms. Für ein Bild, das einen großen Bereich des Bildschirms abdeckt und die gute Auflösung des Projektors beibehält, wurde der Projektor auf die Bildschirmmitte ausgerichtet und fokussiert. Die Lichtquellen wurden an den Seiten des Bildschirms oder auf der Rückseite des Bildschirms positioniert. Als Kameraposition wurde für die Perspektive eines Zugfahrgastes die Seite des Projektors verwendet und zudem für die Perspektive eines Benutzers außerhalb des Zuges die andere Bildschirmseite. Nach der Ausrichtung der Projektionselemente wurden die Kameraparameter so eingestellt, dass das aufgenommene Foto dem Original so nahe wie möglich kommt. Um automatische Korrekturen durch die Kamera zu vermeiden, wurden die Parameter der Kamera (Fokus, ISO, Verschluss, Verschlusszeit) zuvor festgelegt.

#### Betrieb des Testaufbaus

Bei der Projektion und der Aufnahme wurden zwei Sätze von Bildern verwendet: Der erste Satz besteht aus 15 Monitortest-Standardmustern, die von VideoForgePro (Collins 2019) generiert wurden, der zweite Satz enthält RGB-Bilder. Nachdem alle Bilder fotografiert wurden, waren Korrekturen erforderlich (d. h. Entfernen Trapezeffekt, Ausschneiden Projektionsbereich im Bild, Anpassen Bildgröße), bevor die Bilder mit dem Algorithmus evaluiert werden konnten. Die Bildeigenschaften der RGB-Bilder wurden mithilfe der OpenCV-Bibliothek und Python sowie durch Überprüfung der Histogramme für die roten, grünen und blauen Bildkomponenten bewertet. Die Fotos aus den Bildmustern von VideoForgePro wurden verkleinert und ein Perzeptionsabstand zur Referenz berechnet.

## **AP 2.2 – Mobiler Labordemonstrator**

Auf Basis der Ergebnisse aus AP 1.2 wurden für den Use Case die Interaktionsgestaltung konzeptiell entwickelt und in einem PKW-Demonstrator umgesetzt. Dieser ermöglicht den Test in einer Umgebung mit natürlichen Lichtverhältnissen (z. B. unterschiedliche Sonneneinstrahlung, Vibration von Fahrzeug/SmartWindow). Für die Umsetzung eines mobilen Labordemonstrators wurde das Fahrzeugmodell „Smart Fortwo Electric Drive“ (Baujahr 2014) der Professur Arbeitswissenschaft und Innovationsmanagement eingesetzt. Innerhalb des Wagens kam eine Glasscheibe mit einer aufgeklebten Folie der Firma LuxLabs zum Einsatz. Um eine gute Bildqualität auf dem SmartWindow zu gewährleisten, wurde der Projektor Optoma EH320USTi angeschafft, welcher durch seine ANSI-Lumenzahl von 4000 und einem Kontrastverhältnis von 20000:1 sehr gut geeignet ist. Mittels einer Konstruktion von Kunststoffstangen und Aluminiumleisten wurde ein Versuchsapparat aufgebaut, der zusammen ein schwingendes System ergibt und so die Bildstabilität gewährleistet.

## **AP 3 – Laborversuche**

Ziel des AP 3 waren Durchführung und Auswertung von Versuchen zum Nachweis der Funktionsfähigkeit der Demonstratoren sowie zur Bestimmung maßgeblicher technischer Parameter zur Sicherung der Gebrauchstauglichkeit und weiterer in AP 1 erhobener Anforderungen.

### **AP 3.1 – Technische Erprobung**

Ziel des AP 3.1 waren die technische Laborerprobung und die Optimierung des Testaufbaus. Hierzu gehörten die Untersuchung und Erstellung einer Matrix sowie die Gegenüberstellung von Projektor und Thin Film Electroluminescent Displays (TFEL)-Technologien. Entsprechend des Antrags wurde der Demonstrator in der Abrechnung weiterhin als „Stationärer Labordemonstrator TFEL“ bezeichnet. Zuverlässigkeitsuntersuchungen, wie Tests auf UV-Bestrahlung einer Thin Film Electroluminescent Displays (TFEL)-Technologie, wurden jedoch aufgrund der Fokussierung auf Projektoren für die Zugintegration nicht nötig. Der Bericht beschränkt sich daher nachfolgend auf die Bezeichnung „Stationärer Labordemonstrator“.

Nach ersten Pre-Tests musste festgestellt werden, dass der Einsatz besserer Projektoren notwendig ist, um die Qualität des angezeigten Bildes unter realistischen Bedingungen zu verbessern. Der entscheidende Faktor ist die Helligkeit des Projektors, gemessen in ANSI-Lumen. Einen positiven Effekt auf die Bildqualität hat außerdem die Minimierung des Abstandes zwischen Projektor und Projektionsfläche, was dazu führte, dass das ausgegebene Bild kleiner wurde.

Bei der Bildprojektion von der Rückseite erwies sich als Problem, dass sich das Licht des Projektors negativ auf die Bildintegrität auswirkt. Es wurde ein Kurzdistanzprojektor von Optoma mit einer ANSI-Lumenzahl von 4000 beschafft und evaluiert. Sein großer Vorteil ist der kleine Einfallswinkel für die Bildprojektion, womit der helle Punkt auf dem SmartWindow vermieden werden konnte, wenn der Blick der Nutzer\*in auf die Bildschirmmitte zentriert war. Um die Situation des Bildschirms in einem Zugfenster zu emulieren, wurden außerdem dimmbare Lichtquellen für die Tests erworben. Zusammenfassend zählen zum optimierten Laborsetup des „Stationären Labordemonstrators“ ein Projektor, ein Computer, eine transparente Glasscheibe mit einem Film von Lux Labs, eine Kamera und zwei Lichtquellen an der unteren Seite der Glasscheibe. Mit diesem Testaufbau ist es möglich, die generelle Leistung verschiedener Projektoren oder Konfigurationen von Projektoren zu messen. Dafür müssen die Parameter der Kamera und ihrer Position sowie die Größe und der Winkel des Projektionsbildes fixiert werden. Die Lichtquellen können in ihrer Lichtstärke (in Prozent) und weißen Farbtemperatur eingestellt werden. Das ermöglicht, die Lichtinterferenz zu prüfen und vergleichbare Ergebnisse zu emulieren, wie sie mit dem mobilen Demonstrator erzielt wurden und wie sie im zukünftigem Zugsystem zu erwarten sind.

Der Labor-Demonstrator kann noch verbessert werden, z. B. durch eine einfachere Positionierung der einzelnen Komponenten, um das Ergebnis nicht zu beeinflussen und die Zeit für die Tests zu reduzieren. Eine mögliche Lösung wäre die Markierung des Bodens und der Komponenten. Zudem

können Automatisierungsprozesse bei der Nachbearbeitung den Bewertungsprozess beschleunigen. Dies kann durch die Fixierung der Kameraposition und einem Skript zum automatischen Cropping und zur Korrektur des Trapezeffekts bei vielen Bildern realisiert werden.

Zusätzlich wurde ein Epson EB 800-F Ultrakurzdistanz-Projektor für den „Mobilien Labordemonstrator Display im Zug“ (siehe AP 4.3) beschafft. Dessen Leistung wurde mithilfe des stationären Labordemonstrators mit der des Optoma-Projektors verglichen.

Da zum Zeitraum der geplanten Experimente nicht das bisherige fensterlose Labor genutzt werden konnte, wurden alternative Räumlichkeiten gesucht, um eine vollständige Abdunkelung der Testumgebung zu ermöglichen. Im Gegensatz zum bisherigen Labor hatte der alternative Raum weiße Wände und war flächenmäßig kleiner. Dies führte während der Experimente zu einer deutlichen Reflexion des projizierten Lichts von den Wänden (siehe Bild 1). Dadurch wurde auch die Aufnahme der Bilder erschwert, denn obwohl die automatische Korrektur der Kamera durch die Festlegung der Parameter (Fokus, ISO, Verschluss, Verschlusszeit) vermieden wurde, entsprachen die Fotos nicht dem Original. Auch die Nutzung einer RGB-Analyse mittels der Smartphone-App „Color Picker“ ergab deutliche Abweichungen der RGB-Werte gegenüber dem Original, wie es anhand eines Hell-Dunkel-Farbwechseltests in Bild 2 zu sehen ist.

Um die beiden Projektoren dennoch vergleichen zu können, wurde stattdessen die Beleuchtungsstärke mittels Luxmeter ausgewertet. Dabei erbrachte der Epson-Projektor mit einem vom Hersteller angegebenen ANSI-Lumen von 5000 auch eine höhere Beleuchtungsstärke. Obwohl laut den Datenblättern die Betriebsgeräusche der Projektoren bei 36 dB (Epson) bzw. 30 db (Optoma) angegeben wurden, konnten während der Experimente eine geringere Geräuschentwicklung beim Epson gegenüber dem Optoma-Projektor festgestellt werden. Zudem konnte während des Betriebes des Optoma-Projektors eine höhere Hitzeentwicklung wahrgenommen werden.

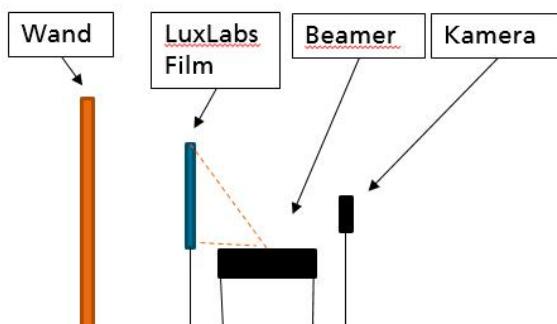


Bild 1: schematischer Aufbau des stationären Labordemonstrators TFEL (oben) und dessen praktischer Einsatz zur Vergleichsmessung der Leistung der beiden im Projekt eingesetzten Projektoren (unten)

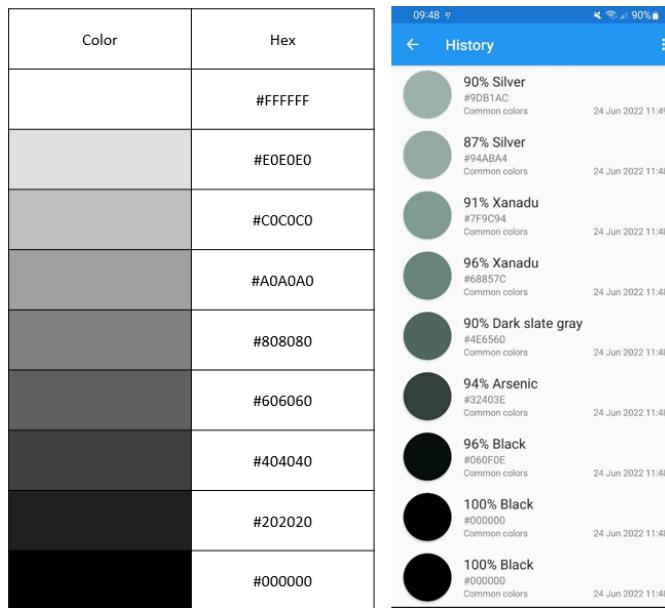


Bild 2: Test der Helligkeitserkennung mittels Smartphone-App (links Vorgabe, rechts Screenshot vom Smartphone)

Anhand der Ergebnisse bei der Messung der Beleuchtungsstärke und Geräuschentwicklung wurden mit dem Epson-Projektor ausreichende Lesbarkeiten sowie keine Auswirkungen auf den Fahrkomfort für die Feldversuche in AP 6 für den Zugdemonstrator erwartet. Zudem wurde die Anschaffung eines Luxmeters mitsamt Datalogging-Funktion für die Feldversuche empfohlen, um die sich ändernden Lichtverhältnisse während der Zugfahrt zu dokumentieren.

### **AP 3.2 – Usabilitystudie mobiler Labordemonstrator**

Für die Informationsanzeige auf dem transparenten Display im öffentlichen Personennahverkehr wurden in einem nutzerzentrierten Entwicklungsprozess drei Prototypen entwickelt und anschließend evaluiert. Die drei Prototypen enthielten entsprechend der Ergebnisse aus AP 1 allgemeine Informationen (Bezeichnung des Zuges, Ortsinformation, Zeitinformation, Umsteigemöglichkeiten, Wetter), öffentliche Informationen (Fakten, Nachrichten) und interaktive Informationen (Tickets, Route, Tourismus, Störung/Umleitung). Die Prototypen unterschieden sich in Darstellung bzw. Bedienung des Navigationsmenüs. Anschließend wurden die Prototypen in einem explorativen halbstrukturierten Interview mit fünf Usability-Experten evaluiert. Die Ergebnisse ergaben keinen bedeutsamen Unterschied zwischen den Prototypen hinsichtlich Usability und User Experience. Allerdings zeichnete sich in den Interviews eine Präferenz für die Navigation über eine seitliche statische Leiste beschrifteter Buttons ab.

Zur Evaluierung der Gestaltungsentwürfe aus AP 2.2 wurden vorbereitend ein Literaturreview sowie ein Workshop mit sechs Experten durchgeführt, um Einflussfaktoren auf die Wahrnehmung transparenter Displays einzugrenzen und aufbauend darauf Versuchshinweise für die späteren Studien zu formulieren. Zu den wichtigsten identifizierten Einflussfaktoren zählen Blickwinkel und Distanz zum Display, die Wahrnehmung von Kontrasten und die wahrgenommene Anstrengung.

Diese Faktoren wurden bei der Planung einer Studie im mobilen Demonstrator berücksichtigt, die der Evaluation und Proof-Of-Concept des SmartWindows in einer natürlichen Umgebung diente. Mitte März 2022 fand diese Studie im mobilen Demonstrator statt. Auf einem abgesperrten Parkplatz fuhren Probanden als Beifahrer im mobilen Demonstrator, während auf dem SmartWindow Texte mit touristischen Informationen angezeigt wurden, welche die Probanden laut vorlesen sollten. Der mobile Demonstrator fuhr eine festgelegte Strecke aus verschiedenen Manövern, um im SmartWindow den Wechsel des Hintergrunds unter natürlichen Bedingungen während einer Zugfahrt zu simulieren. Der Weg führte dabei an Hauswänden, bewachsenen Abschnitten und Abschnitten mit freiem Blick ins Weite vorbei. Um den Einfluss des Sonnenstands über den Tagesverlauf

berücksichtigen zu können, fanden Durchläufe in der Mittagszeit beim höchsten Sonnenstand, nachmittags bei mittlerem Sonnenstand und abends bis zur Dämmerung statt. Am Versuch nahmen 15 Personen teil (5 mittags, 7 nachmittags, 3 abends). Im Ergebnis zeigte sich eine starke Abhängigkeit der Textlesbarkeit von der Tageszeit: Während mittags nur rund 20 % der Texte zumindest teilweise erkennbar waren, konnten die Teilnehmer nachmittags bereits 70 % der Texte vollständig sowie weitere 22 % teilweise vorlesen, am Abend waren 94 % der Texte vollständig sowie 3 % teilweise lesbar. Unterschiede des Hintergrunds (Hauswand, Vegetation, freie Sicht) zeigten sich nicht. Jedoch zeigten die Durchläufe in den Nachmittagsstunden, dass Schatten der Umgebung auf dem Display die Texterkennbarkeit wesentlich erhöht. Dies merkten die Studienteilnehmer im Interview am Ende mehrfach an. Der Lichtwechsel, z. B. durch Lücken zwischen Bäumen, wurde dagegen kaum als wesentlich empfunden und die Teilnehmer fühlten sich durch das SmartWindow auch nicht geblendet. Da sich die Arbeiten in AP 4 und 5 stark verzögerten, wurde Ende Juli 2022 eine weitere Studie im mobilen Demonstrator durchgeführt, die untersuchen sollte, inwiefern sich die Erkennbarkeit auf dem SmartWindow bei natürlicher Lichteinstrahlung durch künstliche Verschattung verbessern lässt. Dazu wurde die Studie vom März mit leichten Veränderungen wiederholt. Die Texte waren nun alle ungefähr gleich lang, beinhalteten lange sowie kurze Wörter, um die Komplexität vergleichbar zu halten, und wurden in randomisierter Reihenfolge angezeigt. Zudem wurde mit jedem Studienteilnehmer der Parcours auf dem Parkplatz dreimal durchfahren, jeweils mit einer anderen Verschattungsvariante der Glasscheibe des SmartWindow: 1. ohne Verschattung (wie in vorangegangener Studie), 2. mit einer statischen Verschattungsfolie (Lichttransmission 24 %) und 3. mit einer selbsttönenden Verschattungsfolie (Lichttransmission 20-75 %). Am Versuch nahmen 19 Personen teil (6 mittags, 8 nachmittags, 5 abends). In den Abendstunden ergaben die Verschattungsvarianten keine Unterschiede in der Texterkennbarkeit. In den Mittags- und Nachmittagsstunden zeigten sich jedoch deutliche Unterschiede. Während die Probanden ohne Verschattung wie in der Studie zuvor kaum Texte erkennen konnten (mittlere Erkennungsrate max. 20 Silben pro Minute), ermöglichen die Verschattungsfolien eine deutlich verbesserte Erkennungsrate mit im Schnitt rund 85 (mittags) und 40 (nachmittags) gelesenen Silben je Minute im Fall der statischen Verschattungsfolie sowie im Schnitt rund 195 (mittags) und 150 (nachmittags) gelesenen Silben je Minute im Fall der selbsttönenden Verschattungsfolie. Die schlechtere Erkennbarkeit in den Nachmittagsstunden gegenüber der vorherigen Studie im März spiegelte die zeitliche Verschiebung des höchsten Sonnenstandes mit dem geringsten natürlichen Schattenwurf der Umgebung auf die Fahrtstrecke wider.

#### **AP 4 – Konzept zur Forschungszugintegration**

Ziel des AP war die Entwicklung eines Konzepts zur Integration der Smart-Window-Technologien in den Forschungszug.

##### **AP 4.1 – Konzeptentwicklung aus Ergebnissen des AP 3**

Ziel war a) die Auswahl der favorisierten Technologie (Projektor bzw. TFEL) nach Ergebnissen aus AP 3, b) die Erarbeitung eines Integrationskonzepts indem unter Einbeziehung Ergebnisse aus AP 3 z. B. Schnittstellen definiert werden, sowie c) die Skizzierung eines Fertigungskonzepts in Großserie.

##### **a) Auswahl favorisierter Technologie**

Die Ergebnisse der Versuche in AP 3 bestätigten die Festlegung auf Projektionstechnologie aus AP 1. In den Versuchen im mobilen Demonstrator zeigte sich eine starke Abhängigkeit der Texterkennbarkeit von der natürlichen Lichteinstrahlung auf dem transparenten Display, die im Anwendungsfall Zugfenster abhängig von Tageszeit und Schattenwurf der Umgebung stark schwankt. Bei Nutzung einer Projektionstechnologie kann eine selbsttönende Folie unter der Projektionsfolie angebracht werden und bei starker Lichteinstrahlung den mangelnden Kontrast zwischen Hintergrund und angezeigter Information auf dem transparenten Display abmildern. Dies wäre bei Verwendung einer TFEL-Technologie nicht möglich. Die weiteren Gründe für die Entscheidung aus AP 1 (Projek-

tionsfolien flexibler auf allen transparenten Flächen wie z.B. auch leicht gewölbten Zugfenstern aufbringbar sowie kostengünstiger als TFEL) blieben zusätzlich weiter bestehen.

### b) Erarbeitung Integrationskonzept

Im Februar 2022 begannen die Arbeiten am Integrationskonzept mit einem Vororttermin bei der Regio Infra Service Sachsen GmbH (RIS) im Fahrzeug-Technologie-Centrum (FTC), bei dem erste Möglichkeiten der technischen Umsetzung des SmartWindow im Zug diskutiert (z. B. Befestigungsmöglichkeiten des Projektors, Stromversorgung) sowie Messungen im Abteil zu Fenstergröße, Sichtachsen und Sitzposition der Fahrgäste vorgenommen wurden. Auf Basis dessen wurde in den folgenden Wochen ein Versuchsaufbau konzipiert und ein erstes Konzept erarbeitet, welches in Bild 3 skizzenhaft dargestellt ist.

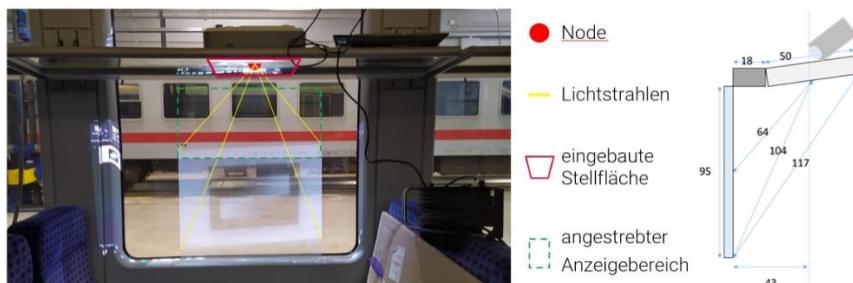


Bild 3: Konzeption des Zugdemonstrators mit zugehöriger Dimensionsabschätzung, Abmessungen in cm

### c) Fertigungskonzept in Großserie

Für die Großserie müssten SmartWindows im öffentlichen Nahverkehr eine Reihe weiterer Anforderungen erfüllen, die in bisher am Markt verfügbaren Technologien nicht bereitstehen. So hätte eine Projektionsfolie idealerweise bereits eine Selbsttönungsfunktion integriert und müsste gegen Vandalismus und Reinigungsschäden mit einer kratzfesten Schicht verstärkt werden. Eine weitere Herausforderung stellt der Strombedarf der Projektionstechnologie dar, die in großer Anzahl das Bordnetz jetziger Züge überlasten würde. Auch müssten platzsparendere Projektoren als derzeitige Consumergeräte entwickelt werden, die baulich direkt in die Gepäckablage integriert werden.

### AP 4.2 – Konzeptanpassung gemäß Bahnrichtlinien

Ziel war das Spiegeln der Integrationskonzepte gegenüber Sicherheitsrichtlinien und Zuverlässigkeitsspekten der Bahn sowie die Durchführung einer Risikoanalyse unter Mitwirkung des SRCC. Ein zu lösendes Problem war, dass verfügbare Projektionsfolien und Projektoren aus dem Consumerbereich nicht für den Betrieb in einer Bahn zertifiziert sind. Es musste sichergestellt werden, dass durch sie keine erhöhte Brandlast im Zug entsteht, die Befestigung des Projektors den Kräften starker Bremsungen widersteht und durch sie keine Stoßgefahr im Kopfraum der Fahrgäste entsteht. Die erforderliche Risikoanalyse konnte schließlich im November 2022 abgeschlossen werden – es erfolgte eine Freigabe als Sonderfahrt im Werkstattbetrieb mit Sicherheitseinweisung aller Mitfahrenden (inkl. Tragen einer Warnweste, Sitzenbleiben während der Fahrt).

### AP 4.3 – Finale Spezifikation und Beschaffung

Ziele waren die Anpassung der Spezifikation als Ergebnis aus AP 4.1 und AP 4.2, die Darstellung von Risikoparametern sowie die Beschaffung aller notwendigen Hardware- (Technologiekomponenten und Materialien) und Softwareblöcke.

Aufgrund der Informationen zum verfügbaren Stromnetz im Zug sowie dessen Leistungsfähigkeit entwickelte das Ingenieurbüro Weißflog im Unterauftrag ein Konzept für einen Spannungswandler mit allen notwendigen Anschlüssen und Sicherungen für den Betrieb der Projektionstechnik im Zug. Diese Spezifikationen wurden außerdem für die Recherche nach Projektoren genutzt, die mit dem Bordnetz im Zug betrieben werden können und gleichzeitig möglichst lichtstark sind, um einen hohen Kontrast der angezeigten Informationen auf dem SmartWindow zu gewährleisten. Die Wahl

fiel auf den Projektor Epson EB-800F. Auch lange HDMI-Kabel wurden beschafft, um die Übertragung der Anzeigeeinformationen im Zug vom Rechner auf den Projektor zu gewährleisten.

Parallel wurde mit der Konzeption der Feldstudie begonnen und festgelegt, was forschungsmethodisch aus den Studien aus AP 3 beibehalten werden kann und was angepasst bzw. erweitert werden muss. So wurde neben den Zielgrößen Anzeigehalt und Informationserkennbarkeit die Zielgröße subjektiver Komfort ergänzt. Da in den Vorstudien der Fensterhintergrund aufgrund von Bebauung und Vegetation über deren Schattenwurf nur indirekten Einfluss auf die Erkennbarkeit gezeigt hatte, wurden im Studiendesign die Beachtung der Himmelsrichtung und die Messung der objektiven Beleuchtungsstärke des Außenlichts auf dem Fenster ergänzt. Dafür wurde ein Luxmessgerät mit digitaler Aufzeichnungsfunktion beschafft. Bild 4 zeigt das Konzept des Versuchsaufbaus im Zug.

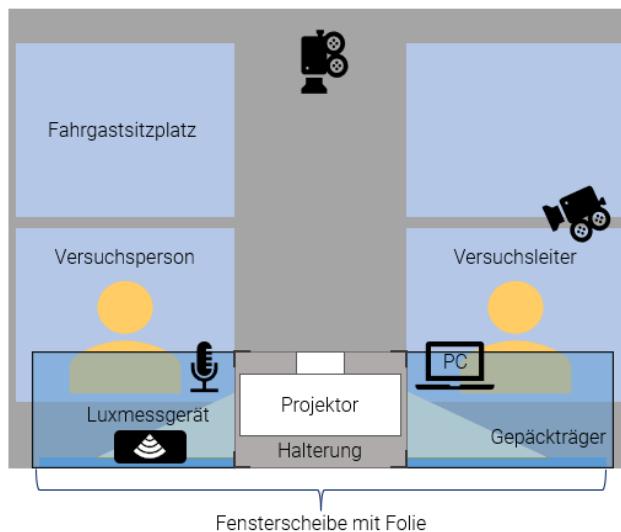


Bild 4: Vorgesehener Versuchsaufbau aus der Vogelperspektive

## **AP 5 – Aufbau des Zugdemonstrators**

Ziel des AP waren der physische Aufbau eines Labordemonstrators im Forschungszug der Baureihe 642 Desiro inkl. Entwicklung von technischen Detaillösungen, um die Technologie als Plattform für die Versuche in AP 6 bereitzustellen.

### ***AP 5.1 – Physischer Aufbau im Forschungszug***

Ziele waren die Integration der Smart-Window- Technologie im Forschungszug an einem Fenster und das Sicherstellen aller notwendigen Sicherheitsrichtlinien für das Betreiben der Technologie als Demonstrator in der Öffentlichkeit. Zudem wurden in diesem Arbeitspaket einige Arbeiten zur Spezifikation ergänzt, die in AP 4.3 offengeblieben waren.

In einem erneuten Vororttermin Ende Juli 2022 bei der RIS GmbH im FTC konnten weitere Fragen zur Stromversorgung im Zug geklärt werden, z. B. verfügbare Anschlüsse, Anforderungen an Leitungen. Im Nachgang entstehende Detailfragen wurden im Nachgang im direkten Kontakt mit den verantwortlichen Bahnmitarbeitern geklärt. Auf Grundlage dessen fertigte das Ingenieurbüro Weißflog im Unterauftrag den in AP 4.3 konzeptionierten Spannungswandler für den Betrieb der Projektionstechnik im Zug. Der Termin war zudem Basis für Konzeption und Herstellung einer Befestigung des Projektors auf der Gepäckhalterung des Forschungszugs, die den Sicherheitsvorgaben der Bahn entspricht (siehe auch AP 4.2).

Die Absprachen ergaben außerdem, dass die Stromversorgung aller weiteren für den Feldtest benötigten Geräte (z. B. Rechner für die Informationsanzeige, Kameras zur Versuchsaufzeichnung, Luxmessgerät) nicht über das Bordnetz des Testzugs erfolgen kann. Zum einen sind im Zug keine entsprechenden Anschlüsse vorhanden und zum anderen ist das Bordnetz schon durch die im Zug verbaute Elektronik sowie den Projektor vollständig ausgelastet. Zur Gewährleistung der Stromversor-

gung der Aufnahme- und Messgeräte wurden zusätzlich sechs 65 W-Powerbanks erworben. Dabei wurde beachtet, dass ihre Gesamtkapazität von 78 Wh die in den Bahnrichtlinien festgelegte Gefahrgutgrenze von 100 Wh nicht überschreiten.

In Abstimmung mit dem SRCC wurden die Pläne zur Felderprobung konkretisiert, wie z. B. die Versuchsstrecke festgelegt, die notwendige Anzahl der Fahrten kalkuliert und eine Zeitplanung für den Ablauf des Versuchs während einer Fahrt erstellt. Auch ein Fahrplan für die Versuchsfahrten wurde bei der Bahn für Oktober angefordert und beauftragt.

Aufgrund von Personalmangel bei der Bahn verzögerte sich der Aufbau im Forschungszug weiter. Daher wurde der Testaufbau probeweise in einem Laboraufbau an der TU Chemnitz (TUC) umgesetzt. Der Funktionstest im Zug sowie die Gefährdungsbeurteilung zur Abnahme erfolgten erst am 21.11.2022. AP 5 wurde mit dem Technikeinbau im Zug am 28.11.2022 einen Tag vor Beginn des Feldtests abgeschlossen. Deshalb konnte eine geplante Iteration des Testaufbaus im Zug nicht umgesetzt werden, der Umfang der Arbeiten in AP 6 musste zudem deutlich reduziert werden.



Bild 5: Versuchsaufbau im Labor für Funktions- und Ablauftest

### **AP 5.2 – Softwareimplementierung**

Ziele des Pakets waren die Integration von Software für das Content Management und die Usability-Felderprobungen (AP 6) sowie die Bereitstellung der Schnittstellen zur Ansteuerung des Demonstrations-Contents.

Die Informationsdarstellung auf dem SmartWindow wurde mittels einer PowerPoint-Präsentation umgesetzt und per HDMI-Kabel an den Projektor übertragen. Das Content Management (d. h., wann welche Informationen angezeigt werden) wurde über ein Timing der Folien umgesetzt. Dafür fuhren Projektmitarbeiter an einem Wochenende die vorgesehene Bahnstrecke zwischen den Bahnhöfen Annaberg-Süd und Bärenstein in Zügen des regulären Linienbetriebs ab und filmten aus den Fenstern die Umgebung der Bahnstrecke beider Zugseiten. Dies konnte nur einmal durchgeführt werden, da die Teilstrecke Cranzahl-Bärenstein nur im Sommer an Wochenenden von der tschechischen Länderbahn als touristisches Angebot befahren wird. In Probefahrten mit dem Testzug am Tag vor Beginn des Feldtests wurde die zeitliche Abstimmung der Anzeige überprüft und bei Bedarf angepasst. Die angezeigten Informationen wurden inhaltlich im Detail erarbeitet und die Anzeigescreens entsprechend der Ergebnisse aus den Versuchen in AP 3.2 gestaltet. Bild 6 zeigt exemplarisch einen Anzeigescreen. Auf dem SmartWindow wurden folgende Informationen streckenangepasst angezeigt:

- Fahrtinformationen über die gesamte Fahrt: Strecke inkl. Haltestellen und Ankunftszeiten
- Ausstieginformationen am jeweiligen Bahnhof (Vorankündigung des Bahnhofs jeweils 3 Minuten und 1 Minute vor Ankunft, Ausstiegsseite am Bahnhof)
- Touristische Informationen am entsprechenden Ort: Bilder zu Ortschaften, Bahnhöfen und Sehenswürdigkeiten entlang der Strecke inklusive jeweils eines Texts mit einer Länge zwischen 73 und 80 Wörtern und einer Leseschwierigkeit zwischen 53 und 61 nach dem Fleschindex (Flesch, 1948; deutsch: Amstad, 1978; berechnet mithilfe von Schöll, 2022)

- Werbung an festgelegter Position auf der Strecke: eine Bildanzeige für eine Veranstaltung der TUC und ein Werbevideo der TUC (14 Sekunden lang)



Bild 6: exemplarischer Anzeigescreen mit Fahrtinformationen (oberer Bildbereich) und touristischen Informationen (unterer Bildbereich)

Mithilfe der Software SILAB 7.0 wurde außerdem ein Programm zur Komfortmessung hinsichtlich der Sicht auf bzw. durch das SmartWindow im Zugfenster konzipiert und die Eingabe per Xbox-Controller implementiert.

## **AP 6 – Feldversuche**

Ziele des AP waren Durchführung und Auswertung der Versuche zum Nachweis der Funktionsfähigkeit im Zug und zur Ableitung maßgeblicher Gestaltungsempfehlung bezüglich der Gebrauchstauglichkeit und Nutzerexperience, zudem die Fortschreibung von Fragestellungen für Versuche, die vor der Weiterentwicklung der Smart-Window-Technologie zur Marktreife beantwortet werden müssen.

### ***AP 6.1 – Technische Felderprobung und Optimierung***

Im AP sollten alle entwickelten Module und Komponenten schrittweise im Gesamtsystem in Betrieb genommen und freigeschaltet werden.

Bild 7 zeigt, wie Projektor und Spannungswandler laut Sicherheitsbestimmungen auf der Gepäckablage im Testzug fixiert wurden. Im Vorfeld erfolgte testweise der Laboraufbau an der TUC, so dass der Aufbau im Zug gewährleistet werden konnte. Zum weiteren Equipment gehörten, wie in AP 3.4 skizziert, ein Laptop mit angeschlossenem HDMI-Kabel zum Projektor, ein Luxmessgerät, ein Audioaufnahmegerät, ein Xbox-Controller sowie drei Kameras zur Videodokumentation.

Der Testzug fuhr von der DB-Instandhaltungswerkstatt zur Haltestelle Annaberg-Süd, wo die Feldtests zur Optimierung der Abläufe auf der geplanten Teststrecke durchgeführt wurden. Auf der Zielstrecke zeigte sich, dass eine nachträgliche Repositionierung aller Geräte und Stromkabel notwendig war, die mit Unterstützung des DB-Bereitschaftsdienstes am gleichen Tag umgesetzt wurde.

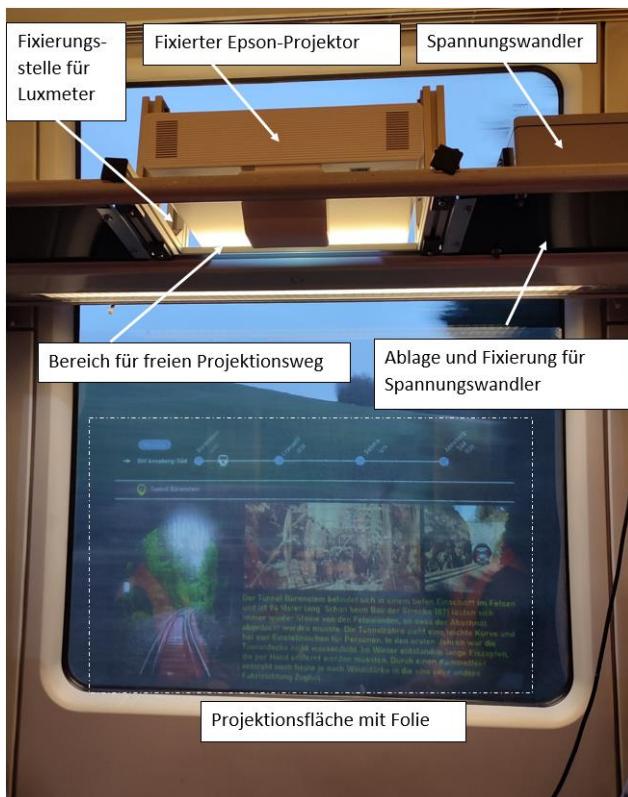


Bild 7: Einbau von Projektor und Spannungswandler auf der Gepäckablage im Testzug

### AP 6.2 – Usability-Feldstudie

Ziele waren die Durchführung einer nutzerbasierten Evaluation des Gesamtsystems anhand der entwickelten Smart-Window-Szenarien und die Ableitung von Optimierungspotenzial aus dem entwickelten technischen Gesamtkonzept anhand des Demonstrators. Dazu gehörte Planung, Durchführung und Auswertung einer Feldstudie sowie Evaluation und Proof-Of-Concept des SmartWindow im realistischen Testfeld.

Die Arbeiten zur Planung der Feldstudie wurde bereits in den Abschnitten zu AP 4.3 und AP 5.1 beschrieben, da diese aufgrund der umfassenden Verzögerungen in diesen Arbeitspaketen parallel zu den darin vorgesehenen Arbeiten erfolgten.

Die Feldstudie fand vom 28.11.2022 bis 09.12.2022 auf der Bahnstrecke zwischen Annaberg Süd über Cranzahl nach Bärenstein und zurück statt. Fahrten wurden werktags zwischen 10:30 Uhr und 17:30 Uhr durchgeführt. Zum Verständnis der Ergebnisse ist zu beachten, dass aufgrund der Jahreszeit ab ca. 16:00 Uhr die Dämmerung einsetzte. Vom 07.12.2022 bis 09.12.2022 lag entlang der Strecke Schnee, was den Kontrast zwischen den Informationen auf dem SmartWindow und dem Hintergrund deutlich verringerte.

Pro Versuchsdurchlauf konnten zwei Personen teilnehmen. Sie erlebten und beurteilten das Smart-Window jeweils einzeln auf Hin- oder Rückfahrt. Währenddessen fuhr die andere Versuchsperson in einem anderen Zugbereich mit und hatte Gelegenheit, die Probandeninformation und Datenschutzunterlagen zu lesen sowie die Einverständniserklärung und einen demografischen Fragebogen auszufüllen. Zu Beginn wurden die Versuchspersonen begrüßt und erhielten die notwendige Sicherheitseinweisung sowie eine Aufklärung über den Versuch. Dann wurde die zweite Person in den anderen Zugteil geschickt und die Testperson nahm am SmartWindow Platz. Nachdem der Zug losgefahren war, hatten die Testpersonen während der Fahrt die Aufgabe, an bestimmten Stellen Texte mit touristischen Informationen laut vorzulesen. Eine andere Aufgabe war es, den momentan empfundenen Diskomfort beim Betrachten der Informationsanzeige bzw. beim Hinausschauen auf die Landschaft (durch die Informationsanzeige hindurch) anzugeben. Die Reihenfolge der Aufgabe, während der

Diskomfortmessung aus dem Fenster bzw. auf das Fenster zu schauen, wurde über die Probanden hinweg gleichmäßig variiert. Für die Diskomfortmessung bekamen die Versuchspersonen einen Xbox-Controller überreicht. Ihre Aufgabe war es, dessen rechten Triggerknopf umso stärker zu betätigen, je unkomfortabler es sich anfühlte, auf bzw. durch das Fenster zu schauen. Hierbei bewegt sich das Diskomfortniveau zwischen 0 (nicht gedrückt) und 100 (komplett durchgedrückt). Vor und nach jeder Diskomfortmessung mit dem Xbox-Controller sollten die Versuchspersonen mündlich ihr allgemeines Komfortempfinden auf einer Skala zwischen 1 (völlig unkomfortabel) und 10 (völlig komfortabel) einschätzen. Fragebögen zu Komfort bzw. Diskomfort des SmartWindow wurden beim Zwischenstopp in Cranzahl sowie am Ende des Versuchs ausgefüllt. Zudem wurde am Ende des Versuchs ein Fragebogen zur User Experience ausgefüllt sowie ein kurzes Abschlussinterview bzgl. der persönlichen Eindrücke zum SmartWindow durchgeführt. Zusätzlich wurden während der Versuchsfahrt Ton- und Bilddaten sowie über ein Luxmessgerät die Lichtverhältnisse aufgezeichnet, um diese später mit den anderen Daten in Zusammenhang zu setzen und zu analysieren. Ein Versuchsdurchlauf dauerte ca. eine halbe Stunde. Jeder Versuchsteilnehmer erhielt 10 € Aufwandsentschädigung. Bild 8 zeigt schematisch den Verlauf der Versuchsstrecke sowie die durchgeföhrten Aufgaben je Streckenabschnitt.



Bild 8: schematischer Verlauf der Versuchsstrecke Aufgaben der Versuchsteilnehmer nach Streckenabschnitt

Die Feldstudie sollte nach ursprünglicher Planung bis Mitte September 2022 abgeschlossen werden, um eine adäquate Auswertung bis Projektende zu gewährleisten. Die verspätete Durchführung verkürzte die Zeit zum Auswerten der Daten deutlich, sodass diese in einem geringeren Umfang als ursprünglich geplant umgesetzt werden konnte.

## AP 7 – Ergebnissynthese und Ableitung von Empfehlungen

### AP 7.1 – Ergebnissynthese

#### Stichprobenbeschreibung

An der Feldstudie nahmen insgesamt 69 Versuchspersonen teil, wovon 29 Personen weiblich und 40 männlich waren. Im Durchschnitt betrug das Alter 52,8 Jahre ( $SD = 16,8$ ). Insgesamt war das Wetter während der Versuche vorrangig bewölkt ( $n = 61$ ), bei fast der Hälfte der Stichprobe trat entweder Regen oder Schnee auf ( $n = 37$ ).

#### Quantitative Daten

Die Versuchspersonen (VPn) hatten die Aufgabe, Texte zu den touristischen Standorten vom Smart-Window abzulesen. Die Position der Standorte zum Vorlesen der touristischen Texte zum Dorothea-

Stollen (A), dem Bahnhof Cranzahl (B), Königswalde (C) und dem Tunnel Bärenstein (D) sind in Bild 8 markiert. Der Anteil der Personen, die die Texte zu den verschiedenen Tageszeiten vollständig lesen konnten, ist in Bild 9 dargestellt. Die Abhängigkeit der Lesbarkeit von der Sonneneinstrahlung über den Tag ist deutlich erkennbar: Während am Vormittag und am frühen Nachmittag nur maximal zwei Drittel der Personen die Texte vollständig lesen konnten, war dies am späten Nachmittag mindestens 80% der Teilnehmenden möglich. Eine Ausnahme bildet der Text zum Tunnel Bärenstein, welcher zu jeder Tageszeit von den meisten Beteiligten vollständig wiedergegeben werden konnte. Dies ist auf den dunklen Hintergrund bei der Tunneldurchfahrt zurückzuführen.

Eine weitere Aufgabe der Teilnehmenden war es, mittels Handregler wiederzugeben, inwiefern das Lesen des Textes vom SmartWindow bzw. das Betrachten der Szenarien durch das SmartWindow das Empfinden von Diskomfort bewirkte. Auf Grund technischer Probleme im Zug wurde ein Großteil der Daten nicht richtig aufgezeichnet, weswegen eine aussagekräftige Auswertung dieser Daten nicht möglich ist.

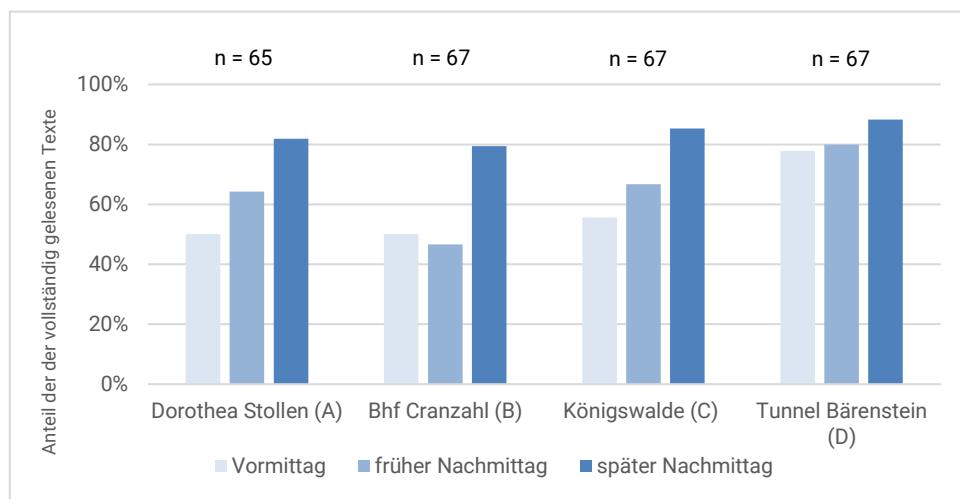


Bild 9: Vollständigkeit der gelesenen Texte zu jeweiligen touristischen Standorten, für Position der Texte A – D vgl. Bild 8

Hingegen ergab die Auswertung der Befragungsdaten zum Komfort- und Diskomforterleben ein deutliches Bild. Die Bewertung des Komforts stieg bei zunehmender Tageszeit stetig an, verblieb aber stets auf einem moderaten Level (Bild 10). Die Diskomfortbewertungen blieben hingegen für alle Uhrzeiten auf einem niedrigen Niveau.

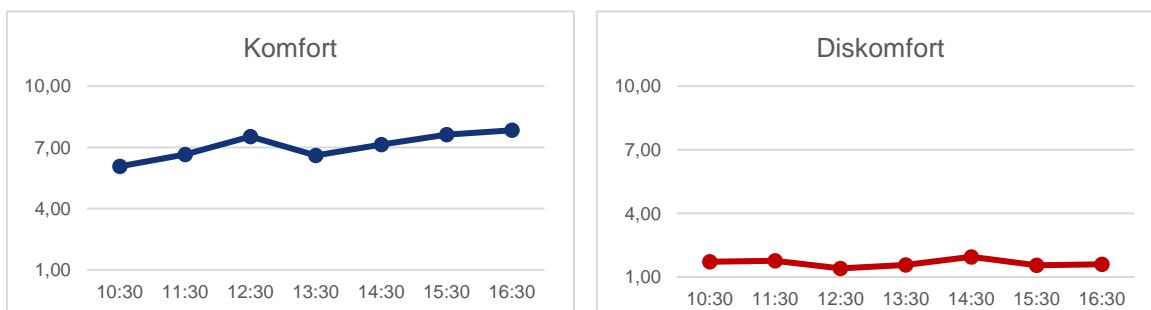


Bild 10: Bewertung des Komforts bzw. des Diskomforts hinsichtlich der Benutzung der SmartWindows in Abhängigkeit der Tageszeit

Ebenfalls waren die Bewertungen der Akzeptanz des Systems durchweg positiv (Bild 11). Um 16:30 Uhr wurde die Akzeptanz am höchsten bewertet.

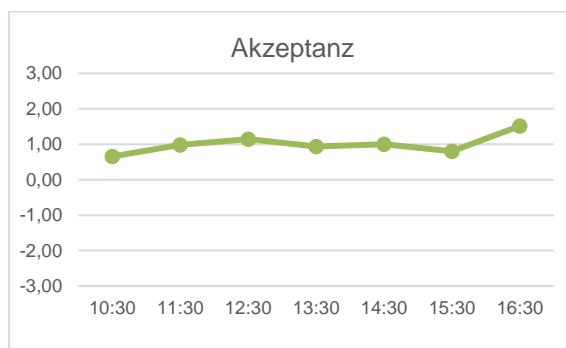


Bild 11: Bewertung der Akzeptanz hinsichtlich der Benutzung der SmartWindows in Abhängigkeit der Tageszeit

Auch die Bewertungen der User Experience Quality (UEQ) waren über den gesamten Tagezeitraum durchweg positiv (Bild 12). Die Bewertung um 16:30 Uhr fiel am besten aus.

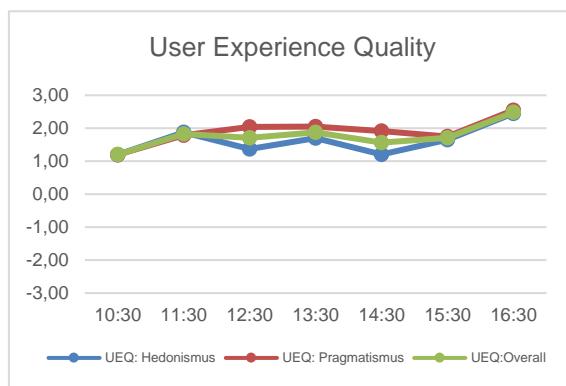


Bild 12: Bewertung des Nutzererlebens hinsichtlich der Benutzung der SmartWindows in Abhängigkeit der Tageszeit

### Qualitative Daten

Die Kommentare der Versuchspersonen (VPn) während des Versuchs betrafen entweder (a) das Konzept des SmartWindows (SWs) als Ganzes, (b) die abgebildeten, inhaltlichen Informationen, (c) die Sichtbarkeit bzw. Unsichtbarkeit der dargestellten Elemente, (d) das Layout des Displays, (e) Störfaktoren oder (f) konkrete Verbesserungsvorschläge bzw. Wünsche. Innerhalb dieser Kategorien wurden die Aussagen der Versuchspersonen anhand ihrer inhaltlichen Übereinstimmung weiter in spezifischere Subkategorien geclustert sowie entsprechend der zugrundeliegenden Valenz der Aussagen (positiv vs. negativ vs. uneindeutig/ambivalent) geordnet.

#### (a) Gesamtkonzept

Hinsichtlich des Gesamtkonzepts ließen sich die Aussagen der VPn weiter in Aussagen in Bezug auf die Idee des SmartWindows selbst und Aussagen in Bezug auf die Umsetzung dieser Ideen im Rahmen des Versuchs unterscheiden. In Bezug auf die Idee des SmartWindows äußerten sich von den insgesamt 69 VPn 22 positiv, 11 negativ und zwei weitere uneindeutig bzw. ambivalent. So äußerten 14 VPn sinngemäß, dass das SmartWindow grundsätzlich eine „gute Idee“ sei. Positiv zu bewerten sei dabei konkreter die Innovativität bzw. Neuartigkeit der Technologie (n=5) und dessen Unterhaltungspotenzial (n=3). Negativ zu bewerten sei beispielsweise, dass ein solches Unterhaltungspotenzial wahrscheinlich nur kurzlebig sein dürfte (n=2) und dass das SmartWindow im Vergleich zur herkömmlichen Lautsprecherdurchsage unwirtschaftlich sei (n=2). Als uneindeutig bzw. ambivalent wurden zwei Aussagen eingeordnet, bei denen VPn äußerten unsicher zu sein, ob eine Einbettung des Displays in jedem einzelnen Bahnenfenster „zu viel“ wäre. Hinsichtlich der Umsetzung des Displays im Rahmen des Versuchs äußerten vier VPn einen positiven Gesamteindruck und zwei weitere, dass sie die Fahrt als kurzweilig und unterhaltsam einstuften. Acht Personen äußerten sich negativ zur Umsetzung des SmartWindows: So sei beispielsweise die Anzeigedauer bestimmter Elemente zu lang oder vorherige Erwartungen an das Display seien enttäuscht worden.

**(b) Informationsgehalt**

Aussagen zum Informationsgehalt wurden kategorisiert in (1.) unspezifische Aussagen, bei denen unklar ist, welche Art der Informationen genau gemeint ist, bzw. die pauschal für sämtliche Informationen galten, (2.) Aussagen, die sich speziell auf fahrplanrelevante Informationen bezogen, und (3.) Aussagen, die sich auf die touristischen Informationen bezogen. Dabei ist festzuhalten, dass der Informationsinhalt über die drei Subkategorien hinweg überwiegend positiv bewertet wurde. So äußerten sich 19 VPn unspezifisch bzw. pauschal positiv, lediglich zwei VPn äußerten sich negativ. Die häufigste positive Nennung beinhaltete die Bezeichnung der Informationen insgesamt sinngemäß als wissenswert (n=6). Negativ angemerkt wurde hingegen vereinzelt, dass die Informationen den VPn bereits bekannt waren (n=2) und dass sie es grundsätzlich bevorzugen würden, hinauszuschauen als den Informationen Aufmerksamkeit zu widmen (n=1). Hinsichtlich der Fahrplaninformationen sowie der Touristeninformationen ergab sich jeweils ein ähnliches, positiv gefärbtes Bild: 20 VPn äußerten sich positiv zu den Fahrplaninformationen, wobei sich keine VP negativ äußerte. Für die Touristeninformationen wurden 22 positiv gestimmte VPn gezählt, allerdings auch 5 negativ gestimmte. In Bezug auf die Fahrplaninformationen wurden besonders häufig die Angaben der noch verbleibenden Zeit bis zum nächsten Bahnhof (n=14) sowie die dauerhafte Anzeige des Fortschrittsbalkens im oberen Teil des Displays (n=12) positiv erwähnt. In Bezug auf die Touristeninformationen waren relativ viele VPn der Ansicht, dass diese interessant (n=12) und nützlich (n=6) seien.

**(c) Sichtbarkeit der dargestellten Elemente auf dem Display**

In Bezug auf die Sichtbarkeit bzw. Unsichtbarkeit der Informationen wurden insgesamt die häufigsten Aussagen gezählt. Die genannte Kategorie wurde weiter aufgegliedert in Aussagen, die sich (1.) pauschal aufs gesamte Display bezogen bzw. nicht spezifisch zugeordnet werden konnten, (2.) die Leserlichkeit der Text- und Schriftelelemente oder (3.) die Erkennbarkeit von Bildelementen betrafen. In Bezug auf die Subkategorien (1.) und (2.) ergab sich unter den VPn ein ambivalenter Gesamteinindruck: So äußerten sich 34 VPn unspezifisch bzw. pauschal positiv zur Sichtbarkeit der abgebildeten Elemente, 36 VPn negativ und 24 VPn uneindeutig bzw. ambivalent. Hinsichtlich der Leserlichkeit der Textelemente äußerten sich 29 VPn positiv, 33 VPn negativ und 11 VPn uneindeutig/ambivalent. In Bezug auf die Erkennbarkeit der Bilder ergab sich jedoch ein überwiegend negatives Meinungsbild. So äußerten sich diesbezüglich lediglich zwei VPn positiv, demgegenüber standen 13 negative Aussagen und drei uneindeutige bzw. ambivalente Aussagen. Über die drei Subkategorien hinweg bezogen sich die meisten Aussagen jeweils darauf, dass die Sichtbarkeit bzw. Leserlichkeit der angezeigten Elemente von der Helligkeit des Hintergrundes abhängig sei. So seien die angezeigten Elemente hauptsächlich dann gut erkennbar, wenn die Außenumgebung beispielsweise im Wald, im Tunnel oder zu später Uhrzeit dunkel war. Andersherum waren sie stets dann schlecht erkennbar, wenn die Außenumgebung durch Sonnenschein, Schnee oder Nebel erhellt war. Ambivalente bzw. uneindeutig valente Aussagen betonten dabei meist die Wechselhaftigkeit der Sichtbarkeit.

**(d) Layout**

Aussagen in Bezug auf das Layout bezogen sich entweder auf die Komposition bzw. die Anordnung der Anzeigeelemente oder auf die Ästhetik des Displays. Jeweils neun VPn äußerten sich dabei positiv zu beiden Aspekten. Weiterhin äußerten sich fünf VPn negativ zur Komposition und zwei VPn negativ zur Ästhetik. Hinsichtlich der Komposition gab es des Weiteren drei uneindeutig bzw. ambivalent positionierte VPn. Gründe für positive Eindrücke der VPn waren in Bezug auf die Komposition z. B. eine angemessene Größe (n=3), Informationsmenge (n=2) und Übersichtlichkeit (n=1). Allerdings wurden neben weiteren Aspekten dieselben Elemente teils negativ betrachtet (Textmenge: n=1; Anzeigegröße bzw. -breite: n=2). Positive Nennungen hinsichtlich der Ästhetik betrafen neben Pauschalaussagen (n=5) die Schönheit der Bilder (n=3), die Schriftfarbe (n=1), die Farbgebung generell (n=1) und das Werbevideo (n=1). Die beiden negativen Nennungen betrafen das Bahnhof-Icon, das nach Meinung einer VP nicht erkennbar war, und eine fehlende Variabilität der Schriftfarbe nach Aussage einer weiteren VP.

### (e) Störfaktoren

Mit fünf Subkategorien war die Kategorie der Störfaktoren die inhaltlich breiteste Kategorie. Aussagen von VPn bezogen sich hier entweder auf (1.) ein pauschales bzw. unbestimmtes Störgefühl bzw. Unwohlsein, (2.) Werbung, (3.) eine Störung der Durchsichtigkeit des Displays, (4.) körperliche Anstrengung bzw. Beschwerde oder aber (5.) Faktoren über diese Kategorien hinaus.

Dabei äußerten sich in Bezug auf das unspezifische bzw. pauschale Störgefühl 11 VPn positiv, 7 VPn negativ und eine weitere VP uneindeutig/ambivalent. Dabei äußerten 10 der 11 positiv gestimmten VPn mehr oder weniger explizit, dass das Display sie nicht stört oder gar „angenehm“ sei; eine VP betonte als Vorteil gegenüber der herkömmlichen Bahndurchsage, dass es keine akustische Störung mit sich bringe. Lediglich zwei VPn fühlten sich durch das Display unspezifisch bzw. pauschal gestört, drei VPn empfanden es als störend und frustrierend, dass die Sichtbarkeit des Displays eingeschränkt war, wobei eine weitere VP explizit die Abhängigkeit der Sichtbarkeit von der Außenumgebung als störend empfand. Eine weitere VP störte sich am Bewegtbild des Werbevideos.

Die Werbung wurde überwiegend negativ bewertet: So standen 14 negativ gestimmte VPn lediglich drei positiv gestimmten VPn gegenüber. Grund dafür war bei wenigstens neun VPn eine generelle Aversion gegenüber Werbung, wobei sich fünf VPn explizit am Werbevideo störten. Eine weitere VP äußerte außerdem, dass sie durch das Werbevideo erschreckt wurde. Eine weitere VP störte sich an der Dauer der statischen Werbeanzeige. Uneindeutige bzw. ambivalente Äußerungen in Bezug auf die Werbung ( $n=7$ ) beinhalteten unter anderem, dass die Bewertung abhängig von der Zielgruppe sowie der Werbebotschaft sei ( $n=4$ ), dass sie in diesem Falle (Bewerbung einer lokalen Veranstaltung der TU-Chemnitz) „okay“ sei ( $n=1$ ), dass „etwas“ daran „komisch“ sei ( $n=1$ ) und dass sie im Wald weniger störe als bei anderen Hintergründen ( $n=1$ ).

Ebenfalls überwiegend negativ wirkte sich das SmartWindow gemäß der VPn auf die Transparenz der Scheibe aus: 26 VPn äußerten eine Störung der Durchsicht durch das Display gegenüber lediglich 3 positiv gestimmten VPn und weiteren 10 uneindeutig bzw. ambivalent gestimmten VPn. In Bezug auf die positiven Äußerungen störe das Display die Durchsicht laut einer VP „maximal zu fünf Prozent“. Laut zwei weiteren VPn werde die Durchsicht nicht gestört, sofern wenig Informationen abgebildet werden bzw. am Tage, da das Display dann ohnehin nur in geringem Maße sichtbar sei. Für einen negativen Einfluss auf die Transparenz durch das Display wurden viele verschiedene Gründe genannt, von denen der Großteil Einzelnen waren. Sechs VPn erwähnten dabei eine unspezifische bzw. pauschale Störung der Durchsicht durch das Display und acht weitere berichteten, dass das Display die Aussicht verdecke bzw. trübe. Die meistgenannten Begründungen dafür waren, dass das Display ablenkend wirke bzw. die Konzentration beim Hinausschauen störe ( $n=5$ ) bzw. dass insbesondere (große) Abbildungen die Durchsicht störten ( $n=7$ ). Ambivalente Äußerungen berichteten beispielsweise, dass das SmartWindow die Durchsicht zwar störe, dass dies in Waldabschnitten ( $n=3$ ) bzw. bei Dunkelheit ( $n=2$ ) aufgrund der weniger ansprechenden Aussicht jedoch okay sei.

Weiterhin berichteten einige VPn vom Belastungs- bzw. Anstrengungspotenzial des Displays. Während sich lediglich drei VPn positiv äußerten, dass das das Display ihrer Meinung nach gesundheitlich unbedenklich sei ( $n=1$ ), dass es nicht blendet ( $n=1$ ) und dass der Betrachtungswinkel angemessen sei ( $n=1$ ), empfanden 25 VPn das Display als anstrengend. Gründe hierfür waren insbesondere die einseitige Nackenbelastung durch den seitlichen Betrachtungswinkel ( $n=10$ ) und eine gewisse Anstrengungserfordernis, um das Display lesen zu können ( $n=5$ ).

Schließlich äußerten sich einige VPn zu Faktoren, die sich nicht den anderen Kategorien zuordnen lassen: Insgesamt neun VPn äußerten beispielsweise positiv, dass die Landschaft „schön“ sei ( $n=4$ ), dass sie sich insgesamt gut fühlten ( $n=3$ ), dass die Bahn im Vergleich zu PKWs angenehm ruhig gefahren sei ( $n=2$ ), dass die Folierung der Scheibe vor der Sonne schütze ( $n=1$ ) und dass der Zug sauber sei ( $n=1$ ). Negative Faktoren wurden von insgesamt 15 VPn genannt. Beispielsweise führten fünf VPn die gestörte Durchsicht anstatt aufs Display auf normale Spiegeleffekte des Innenraums bei Dunkelheit außen zurück. Sieben VPn empfanden es als störend, dass das Display vibrierte bzw.

verwackelt war, was auf die Umsetzung mittels Projektors zurückzuführen ist. Neben weiterem störten sich außerdem weitere fünf VPn an der Folierung der Scheibe, da Luftbläschen sichtbar waren.

#### (f) Verbesserungsvorschläge

Insgesamt formulierten 25 der 69 VPn ihre Kritik als konkrete Verbesserungsvorschläge bzw. Wünsche an das finale Produkt. Die Gesamtzahl an Verbesserungsvorschlägen betrug 28, wobei manche VPn gleich mehrere Vorschläge äußerten. Dennoch ergab sich kein einheitliches Bild, inwieweit das Display verbessert werden sollte: Viele Vorschläge waren sehr verschiedene Einzelmeinungen, teils widersprachen sich Verbesserungsvorschläge. So wünschten sich drei VPn, dass die obere Fahrtfortschrittsanzeige weiter nach oben gerückt werden sollte, während eine andere VP sich gewünscht hätte, dass diese als die wichtigste Information mittiger positioniert sein sollte.

Jedoch wurden einige Vorschläge auch häufiger genannt: Fünf VPn äußerten sinngemäß, dass die Anzeigeelemente so angeordnet sein sollten, dass sie die Aussicht nicht verdecken können, etwa indem das Display ein fixes Sichtfenster integriert, in welchem keine Informationen angezeigt werden, oder indem die Informationen lediglich an den Rändern oder Ecken des Fensters positioniert werden. Vier VPn rieten im Zuge dessen, die Anzeige bzw. die angezeigten Elemente zu verkleinern. Ebenfalls wiederholt angeregt wurde eine Ergänzung von Anschlussmöglichkeiten in den Fahrplaninformationen (n=3), eine Ein- und Ausschaltmöglichkeit des Displays (n=3), mehr Variation bei der Schriftfarbe sowie eine automatische Kontrastanpassung je nach Hintergrundhelligkeit (n=3).

### **AP 7.2 – Ableitung von Empfehlungen**

Ziele des Arbeitspakets waren das Ableiten von Empfehlungen zu Beschaffung, Systemintegration und Nutzung für Betreiber sowie die Ableitung von Empfehlungen zur weiteren Forschung und Entwicklung sowie zur Produktion an Wissenschaft und Hersteller. Dazu erfolgte am 16.01.2023 ein Workshop der Projektbeteiligten.

#### Empfehlungen zu Beschaffung, Systemintegration und Nutzung für Betreiber

Mit dem derzeitigen Stand der Technik ist eine Ausstattung von Bahnen mit Fahrgästinformationssystemen auf Basis der erprobten Technologie nur eingeschränkt möglich. Abgesehen davon, dass bisher keine verfügbaren Projektionsfolien und Projektoren für den Betrieb in einer Bahn zertifiziert sind, sind diese auch nur begrenzt für den Einsatz in der Bahn geeignet. Gründe sind die mangelnde Kontrastfähigkeit vorhandener Folien abhängig von der Außenbeleuchtung, Strom- und Bauraumbedarf vorhandener Projektoren sowie fehlende Vandalismussicherheit. Dies macht die Ausstattung ganzer Bahnen auf absehbare Zeit zudem unwirtschaftlich. Nach einer adäquaten Zertifizierung und Weiterentwicklung wäre jedoch die Ausstattung einzelner Fenster, insbesondere für den Einsatz auf touristisch attraktiven Strecken, denkbar. Da der derzeitige Entwicklungsstand der Technik eine deutliche Sichtbarkeit der Informationen nur in der Dämmerung bzw. Dunkelheit zulässt, könnte die Aktivierung des Systems nur in diesen Zeiten geprüft werden. Dadurch böte sich zudem der Vorteil, dass kein Konflikt mit dem Wunsch entsteht, während der Fahrt den Ausblick auf die Landschaft zu genießen, während Informationen zu Sehenswürdigkeiten entlang der Strecke im Dunkeln, wenn die Sehenswürdigkeiten nicht zu sehen sind, einen Mehrwert bieten könnten. Auch in Untergrundbahnen könnte die Technologie genutzt werden, um Informationen in den Fenstern anzuzeigen, da hier während der Fahrt ein gleichmäßig dunkler Hintergrund besteht, sodass die Erkennbarkeit nicht beeinträchtigt wird.

In Bahnen mit fensterbasierten Fahrgästinformationssystemen sollten nicht an jeder Außenscheibe Informationen angezeigt werden, da sich manche Fahrgäste davon gestört fühlen. Die Fenster, an denen Fahrgästinformationen angezeigt werden, sollten ausreichend große Bereiche ohne Informationen vorsehen, um dauerhaft das Schauen aus dem Fenster ohne Ablenkung zu ermöglichen. Noch besser wäre es, wenn das optische Fahrgästinformationssystem durch Fahrgäste an ihrem Sitzplatz je nach Bedarf ein- oder ausgeschaltet werden könnte. Informationen zu Strecke, aktueller Position und voraussichtlichen Ankunftszeiten sollten dauerhaft sichtbar sein. Informationen, die derzeit im

Bahnverkehr üblicherweise durch akustische Durchsagen bekanntgegeben werden, sollten ergänzend auf den optischen Fahrgastinformationen im Fenster angezeigt werden. Dies sind z. B. Vorankündigungen zum bevorstehenden Halt sowie Informationen zu Umstiegsmöglichkeiten einige Minuten vor Ankunft oder Informationen zu Störungen und Verspätungen. Die optischen Anzeigen sollten jedoch akustische Informationen nicht ersetzen, da dies die Barrierefreiheit für sehgeschädigte Menschen reduzieren würde. In bestimmten Ruhebereichen einer Bahn ist dies aber eine Option, sollte dann aber bereits beim Buchungsvorgang entsprechender Sitzplätze deutlich bekannt gegeben werden. Werbung sollte auf Fahrgastinformationssystemen im Fenster nur sparsam angezeigt werden. Dies betrifft insbesondere Werbevideos.

#### *Empfehlungen zur weiteren Forschung und Entwicklung*

Die Umsetzungsmöglichkeiten im Projekt und die gewählte Methodik der Feldstudie sowie deren Ergebnisse eröffneten weitere Fragen, die im Rahmen zukünftiger Forschung beantwortet werden sollten. Im Projekt konnte die Wirkung von Fahrgastinformationen im Fenster auf Erleben und Komfort der Fahrgäste nur über den Zeitraum einer einzelnen, etwa zwanzigminütigen Fahrt untersucht werden. Zukünftige Forschung sollte auch längere und wiederholte Fahrten untersuchen, da die Versuchspersonen anmerkten, dass sich beispielweise Komfortempfinden und Interesse an den gezeigten Informationen über die Zeit und bei wiederholten Fahrten verändern könnte. Auch die Frage, wie viel Information angemessen ist, könnte sich im Vergleich zwischen Viel- und Gelegenheitsfahrern sowie zwischen ortsansässigen und ortsfremden Fahrgästen unterscheiden und konnte im Projekt nicht untersucht werden. Zudem sollte zukünftige Forschung einen Vergleich zu anderer Technologie ziehen, z. B. der im Forschungsprojekt SmartMMI eingesetzten Technologie in einer Straßenbahn, zu der bisher keine gezielten Untersuchungen zu Fahrkomfort vorliegen. Außerdem sollten Gestaltungsvarianten der angezeigten Informationen, die entsprechend der oben genannten Empfehlungen erarbeitet wurden vor einem Einsatz in der Praxis getestet und mit den vorliegenden Ergebnissen zu Fahrkomfort und Nutzererleben verglichen werden. Weiterhin wurde im Projekt ausschließlich die Anzeige von Informationen in Außenfenstern des Zugs untersucht. Ein weiteres denkbare Einsatzfeld wäre die Nutzung innenliegender Glasscheiben zur Informationsanzeige, beispielsweise Trenn- oder Schutzscheiben in den Abteilen.

#### *Empfehlungen zur Produktion an Wissenschaft und Hersteller*

Die Ergebnisse zeigen, dass ein Einsatz der untersuchten Technologie im Zug derzeit nicht sinnvoll und wirtschaftlich ist. Für einen Einsatz im öffentlichen Nahverkehr muss die Projektionsfläche dahingehend weiterentwickelt werden, dass sie eine kratzfeste Oberfläche aufweist sowie eine automatische Erfassung der Hintergrundbeleuchtung mit adaptiver Verdunklung bereits integriert. Zudem muss praktisch einsetzbare Projektortechnologie deutlich kleiner, stromsparender und kostengünstiger werden als derzeit, um vandalismusgeschützt und effizient in Bahnwagen integrierbar zu sein.

### **AP 8 – Transfer**

Ziele des AP waren die Vermittlung der Ergebnisse an die regionale Wirtschaft und an Partner aus der Branche, Diskussion von Folgeaktivitäten und Verwertungsmöglichkeiten.

#### **AP 8.1 – Zwischenworkshop**

Ziele des Zwischenworkshops waren die Vorstellung der Labordemonstratoren und der Ergebnisse der Laborversuche sowie die Diskussion über die Zugintegration und über die langfristige Vorbereitung der Verwertung (inkl. Vor- und Nachbereitung). Im September 2022 stellten die Projektbeteiligten ihre Erkenntnisse aus den Laborversuchen in AP 3 einander vor und führten diese zusammen. Anhand dessen wurden Versuchsdesign und -ablauf der Feldstudie (AP6) final konzipiert. Dabei wurden auch die Videos der in AP5.2 durchgeföhrten Linienfahrt gemeinsam gesichtet und festgelegt, welche Informationen an den verschiedenen Punkten entlang der Bahnstrecke zu sehen sein sollen

und welche Aufgabe die Versuchsteilnehmer auf den verschiedenen Streckenabschnitten haben sollten (Leseaufgabe oder Komfortmessung beim Betrachten der Landschaft bzw. der Inhalte auf dem SmartWindow). Zudem wurde ein Auswertungs- und Verwertungsplan für die verbleibende Projektzeit erstellt, der den Verzögerungen in den Arbeitspaketen 4 und 5 Rechnung trug und dennoch das Erreichen der gesteckten Projektziele erlaubte.

### **AP 8.2 – Abschlussworkshop**

Am 31.01.2023 fand der Abschlussworkshop an der TUC statt. Hierfür wurden Partner aus der Branche sowie Vertreter aus Wirtschaft und Presse eingeladen. In dieser zweistündigen Veranstaltung wurden die Ergebnisse aus den jeweiligen Projektschritten präsentiert und anschließend diskutiert. Für diesen Anlass wurden Teile des Zugdemonstrators in einen Austellungsaufbau integriert, welcher den Versuchsaufbau aus dem Feldversuch im Zug nachstellt (Bild 13). Dieser diente dazu, dem Publikum die Smart-Window-Technologie und den Versuchsablauf im Zug zu veranschaulichen. Am Ende wurden mögliche Folge- und Verwertungsaktivitäten besprochen und diskutiert.



Bild 13: Nachbau des Felddemonstrators zur Veranschaulichung

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

Das Projekt wurde an der TUC durch die Professur Arbeitswissenschaft und Innovationsmanagement und das Zentrum für Mikrotechnologien durchgeführt. Über Auftragsvergaben waren das Ingenieurbüro Weißflog und die SRCC gGmbH eingebunden. Ursprünglich war auch eine Auftragsvergabe an das Fraunhofer-Institut für Elektronische Nanosysteme angedacht, um Unterstützung in den AP 1 bis 7 bei der industrienahen Konzeptionierung der Applikation, dem Aufbau der Demonstratoren in der Laborumgebung, der Mitwirkung während der Laborerprobung und dem Aufbau der finalen Zugdemonstratoren zu erhalten. Nach vier Monaten im Projekt ergab sich aber die Möglichkeit, stattdessen einen Mitarbeiter direkt im Projekt zu beschäftigen. Der Projektträger hat einem entsprechenden Umwidmungsantrag zugestimmt.

Die im Rahmen des Projektes entstandenen Ausgaben betragen insgesamt 416.634,84 € (zzgl. Projektpauschale i. H. v. 83.326,97 €). Sie liegen damit 1.787,38 € (ohne Projektpauschale) unter der bewilligten Zuwendung. Die Ausgaben wurden im Wesentlichen für Personalausgaben zur Beschäftigung wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TUC (326.720,95 €), für die Auftragsvergabe zur Einbindung externer Kompetenzträger (57.902,36 €) sowie für Beschäftigungsentgelte studentischer/wissenschaftlicher Hilfskräfte (19.281,10 €) verwendet.

Gegenüber den geplanten Ausgaben nach Umwidmung wurden 10.288,35 € mehr Personalausgaben (Pos. 0812) benötigt, die aber v. a. durch Einsparungen bei der Beschaffung von Gegenständen (Pos. 0850, 7.599,70 €) und den Beschäftigungsentgelten (Pos. 0822, 3.298,90 €) ausgeglichen wurden. Die weiteren Positionen entsprechend weitgehend der Finanzplanung.

### 3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die durchgeführten Forschungsarbeiten im Projekt SmartWindow und die dafür aufgewendeten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da sie der Planung laut Projektantrag entsprachen und alle wesentlichen im Arbeitsplan formulierten Aufgaben erfolgreich bearbeitet wurden. Das Projekt trägt insbesondere zur Zusammenarbeit zwischen regionaler Wissenschaft (TUC) und Wirtschaft (Ingenieurbüro Weißflog, SRCC) und zur Erhöhung der regionalen Sichtbarkeit des SRCC (z. B. Aufruf und Berichterstattung zur Studie über Rundfunk und Presse) für ein breites Publikum bei. Perspektivisch bestehen Chancen, neue Produkte und Services in der Region zu realisieren (Herstellung von Mikrosystemkomponenten, Einsatz moderner Nanotechnologien und -materialien für Applikationen, Funktionsdruck von Folien in Chemnitz, Elektronikentwicklung und -fertigung im Erzgebirge, Nachrüstung von Bahnfahrzeugen durch Erzgebirgsbahn-Instandhaltung). Es waren keine zusätzlichen Ressourcen für das Projekt notwendig.

### 4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Eine Anmeldung gewerblicher Schutzrechte oder Patente auf Ergebnisse des Vorhabens erfolgte nicht und ist auch zukünftig nicht geplant.

Die Forschungsergebnisse werden einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Um das breite Verwertungspotential zu nutzen, sollen Erkenntnisse aus der Erprobungsphase in Form von Best-Practice-Beispielen aufbereitet und – unter Nutzung des Ausstellungsaufbau des mobilen Demonstrators – im Mittelstand verbreitet werden. Dazu wird auch bis August 2024 das Transferzentrum Kompetenzzentrum Mittelstand 4.0 genutzt, eines der bundesweiten Kompetenzzentren des BMWK zum Thema Industrie 4.0 in Mitteldeutschland. Die Projektergebnisse sollen über Informationsmaterial, Netzwerkveranstaltungen sowie Präsentation der Demonstratoren öffentlich vorgestellt werden.

Die Erkenntnisse des Evaluationsversuchs sollen in den nächsten Monaten auf wissenschaftlichen Konferenzen veröffentlicht und in die Lehre an der TUC integriert werden. Die TUC wird ihre Ergebnisse vor allem im arbeitswissenschaftlichen Bereich veröffentlichen. Hierzu sind Veröffentlichungen in Peer-Review-Journals, beispielsweise Applied-Ergonomics, sowie Vorträge auf dem „Jahreskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft“ sowie dem „Europapanel der Human Factors and Ergonomics Society“ (Open Access) vorgesehen. Darüber hinaus wird die TUC im Bereich der Mensch-Maschine-Schnittstellen-Forschung publizieren. Hierzu gehören die Fachkonferenz „Mensch und Computer“ sowie die „Human-Computer Interaction International Conference“. Es sollen Publikationen zudem in Form von Vorträgen und Beiträgen auf praxisrelevanten Tagungen sowie in relevanten Fachzeitschriften veröffentlicht werden.

Die wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit ist gegeben. Mithilfe der Ergebnisse wird zukünftig hinsichtlich der menschengerechten Gestaltung von MRK-Systemen weitere, auch industrielle Forschung auf den Weg gebracht. Für solche sollen bspw. konkrete Anwendungspotenziale barrierefreier Interaktionskonzepte in unterschiedlichen weiteren Anwendungsgebieten erarbeitet werden. Die Projektergebnisse werden zudem genutzt, um Erkenntnisse zu Zukunftstechnologien im Bereich der MRK in die Lehre und Weiterbildung einzubinden. Die Forschungserkenntnisse werden zum einen in die Hauptvorlesungen „Arbeitswissenschaft“ und „Erfolgsfaktor Mensch“ integriert und zudem fließen Inhalte in den neu entstandenen Masterstudiengang „Human Factors“ ein.

### 5 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Für das Jahr 2024 ist die Vorstellung eines Bestandteils der Feldstudie auf der „Human-Computer-Interaction International 2024“ geplant. Des Weiteren sollen die Gesamtergebnisse des Feldver- suches in einem Fachjournal veröffentlicht werden (siehe auch Kapitel 4).

## 6 Literaturverzeichnis

- Amstad, T. (1978). *Wie verständlich sind unsere Zeitungen?* [Dissertation]. Universität Zürich.
- AZOptics. (2019). *Measuring the Optical Performance of Head-Up Displays*. Abgerufen am 14. Januar 2021, von <https://www.azooptics.com/Article.aspx?ArticleID=1667>
- Collins, M. (2019). *VideoForge Pro - Pattern Descriptions*. Abgerufen am 29. September 2021, von <https://kb.portrait.com/help/videoforge-pro-pattern-descriptions>
- Flesch, R. F. (1948). A new readability yardstick. *Journal of Applied Psychology*, 32(3), 221–233. <https://doi.org/10.1037/h0057532>
- Keller, C., Struwe, S., Titov, W. & Schlegel, T. (2019). Understanding the usefulness and acceptance of adaptivity in smart public transport. In *Lecture Notes in Computer Science* (S. 307–326). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22666-4\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22666-4_23)
- Keller, C., Titov, W., Sawilla, S. & Schlegel, T. (2019). Evaluation of a smart public display in public transport. *Mensch & Computer Workshopband*. <https://doi.org/10.18420/muc2019-ws-605>
- Lux Labs. (2021). *Projector Guide - Overview*. Abgerufen am 28. September 2021, von <https://static1.squarespace.com/static/56e44df5c6fc082c7575b88f/t/603571dc82c5c313b1326552/1614115293310/Lux+Labs+Projector+Guidelines.pdf>
- Penczek, J., Kelley, E. F. & Boynton, P. A. (2015). 48.5: Optical measuring methods for transparent displays. *Sid's Digest Of Technical Papers*, 46(1), 731–734. <https://doi.org/10.1002/sdtp.10180>
- Qin, Z., Xie, J., Lin, F., Huang, Y. & Shieh, H. D. (2017). Evaluation of a transparent display's pixel structure regarding subjective quality of diffracted See-Through images. *IEEE Photonics Journal*, 9(4), 1–14. <https://doi.org/10.1109/jphot.2017.2722000>
- Schöll, P. (2022). *Berechnen: Testen Sie Ihren Text auf Lesbarkeit*. Abgerufen am 27. September 2022, von <https://www.fleschindex.de/berechnen>