

Schlussbericht

Forschungsvorhaben ErlebensAtlas

*Machbarkeitsstudie zur Nutzbarmachung und Kartographierung
reisebezogener Erlebensdaten*

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Institut für Verkehrssystemtechnik, Braunschweig

Autorin: Dr. Esther Bosch

mFund-Förderkennzeichen: 19F1197A

Braunschweig, Mai 2026

I. Kurze Darstellung

1. Aufgabenstellung

Während intermodaler Reiseketten machen Reisende häufig negative Erfahrungen, die aus nicht erfüllten Bedarfen resultieren, etwa nach Sicherheit, Komfort, Zugänglichkeit, Effizienz, Zuverlässigkeit oder aktuellen Informationen. Häufiges und anhaltendes negatives Erleben kann dazu führen, dass Reisende vermehrt auf den motorisierten Individualverkehr (MIV) umsteigen und geteilte Verkehrsangebote weniger nutzen. Für Betreiber öffentlicher Mobilitätsservices ist es jedoch schwierig, auf dieses Erleben zu reagieren, da es von individuellen Bedarfen und situativen Faktoren abhängt und sich somit nur selten durch statische Einheitslösungen beheben lässt. Erschwerend kommt hinzu, dass Informationen über das Erleben der Reisenden digital nicht verfügbar sind und eine situationsangepasste Reaktion daher nicht möglich ist.

Das Forschungsprojekt ErlebensAtlas adressierte diese Lücke in Form einer Machbarkeitsstudie. Hauptziel war die Entwicklung und Erprobung eines Workflows zur Erhebung, Verarbeitung, Bereitstellung und Visualisierung reisebezogener Erlebensdaten in intermodalen Reiseketten. Konkret verfolgte das Projekt neun operationale Ziele:

- Z1: Identifikation geeigneter Datenquellen für die Erlebens- und Kontexterfassung
- Z2: Ertüchtigung der KeepMoving-basierten App OnTrip/KeepMoving zur Erfassung von Erlebensdaten (Selbstbericht)
- Z3: Echtzeitfähige Integration von Daten aus unterschiedlichen Datenquellen in eine Datenbank
- Z4: Implementierung von Methoden zur Vorverarbeitung und Bereinigung erhobener Daten
- Z5: Erprobung von Visualisierungen zur Darstellung von Erlebensdaten in Kartendarstellungen
- Z6: Zusammenführung aller Schritte in einem dokumentierten Workflow
- Z7: Durchführung von Messkampagnen zur Erhebung von Daten als Grundlage für die Workflow-Validierung
- Z8: Veröffentlichung der bereinigten, anonymisierten Daten u.a. in der Mobilithek
- Z9: Integration von Stakeholdern in Konzeption von Kommunikations- und Servicekonzepten auf Basis von Erlebensdaten

Flankierend zur technischen Entwicklung wurde eine Begleitforschung durchgeführt, die Fragestellungen zur Verwertbarkeit dynamischer Erlebensdaten adressierte: Nutzung der Daten zur Verbesserung von Kommunikationsstrategien und Services, Datenschutzaspekte sowie die Bereitschaft der Reisenden zur Datenspende. Die Leitfrage lautete: Wie lässt sich das Erleben von Reisenden entlang intermodaler Reiseketten erfassen und visualisieren?

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt wurde am DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik an den Standorten Berlin und Braunschweig durchgeführt. Als zentrale technische Grundlage diente die institutseigene Plattform KeepMoving, ein modulares Baukastensystem zur Verarbeitung von Mobilitätsdaten, das Mobilitäts-Webportale, Apps und standardisierte Schnittstellen bereitstellt. KeepMoving war zum Projektstart in einer lauffähigen Version verfügbar und

hatte sich in mehreren Vor- bzw. Parallelprojekten (u.a. MaaS L.A.B.S., NIKKI) bewährt. Die App wurde für ErlebensAtlas um ein Experience-Sampling-Modul (ESM) erweitert.

Das DLR-Institut verfügt über langjährige Erfahrung in der Erfassung und Modellierung erlebensbezogener Daten von Akteuren im Verkehrssystem sowie der Verarbeitung und Visualisierung von Geodaten. Relevante Vorprojekte umfassen u.a. DATAMOST (Digitale Zwillinge von Reisenden), F-RELACS (Erlebenserfassung bei Autofahrenden) und AutoAkzept (Erleben in automatisierten Fahrzeugen). Diese Vorarbeiten lieferten methodische Grundlagen, die auf den Anwendungsfall intermodaler Reiseketten übertragen und angepasst wurden.

Zwei assoziierte Partner waren in das Vorhaben eingebunden: DB Regio Bus und die Hamburger Hochbahn AG. Vor allem die Hamburger Hochbahn AG brachte operatives Wissen zum lokalen Netz ein, stellte Werbeflächen in Fahrzeugen für die Probandenrekrutierung zur Verfügung und beteiligte sich an der Begleitforschung zur Verwertbarkeit der Erlebensdaten. Das Vorhaben wurde gemäß DSGVO durchgeführt; alle Teilnehmenden gaben informierte schriftliche Einwilligung. Das Studienprotokoll wurde durch die Ethikkommission des DLR-Instituts genehmigt (Aktenzeichen 04/25).

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben gliederte sich in fünf Arbeitspakete mit vier Meilensteinen:

AP1 (Definition des Workflows, M01-M05, 3 PM): Anforderungsanalyse, Sensorauswahl, Datenbankarchitektur, Vorverarbeitungsmethoden und Entwurf kartenbasierter Visualisierungen. Ergebnis: MS1 (Workflow definiert, M05).

AP2 (Planung und Durchführung der Erhebungskampagne, M03-M14, 6,5 PM): Studiendesign, Ertüchtigung der App, Studienvorbereitung (Ethikantrag, Datenschutzkonzept, Probandenakquise) und Studiendurchführung. Ergebnis: MS2 (App erweitert und validiert, M06), MS3 (Datenerhebungen abgeschlossen, M14).

AP3 (Validierung des Workflows, M10-M18, 4,64 PM): Datenvorverarbeitung (Artefaktbereinigung, Parameterextraktion, Aggregation), Visualisierung der Erlebenskarten, Dokumentation des Workflows. Ergebnis: MS4 (Daten visualisiert, Workflow dokumentiert, M18).

AP4 (Begleitforschung, M04-M18, 2,5 PM): Stakeholderintegration durch Online-Befragungen mit PendlerInnen sowie Befragungen der assoziierten Partner; Ableitung von Handlungsempfehlungen und Servicekonzepten.

AP5 (Verwertung, M01-M18, 1 PM): Datenvorbereitung und Veröffentlichung in der Mobilithek, wissenschaftliche Verwertung, Vernetzung mit Praxispartnern, öffentliche Kommunikation.

Der Ablauf entsprach im Wesentlichen dem Planungsstand. Hier war angedacht die Daten auf Pendlerstrecken in Berlin und Braunschweig zu erheben. Die Datenerhebung in Berlin (mit N=54 ProbandInnen) wurde in Kooperation mit dem Parallelprojekt NIKKI (mFund FKZ 19F1200B) durchgeführt. Statt Braunschweig konzentrierten wir uns aufgrund des großen Interesses und Engagements der HOCHBAHN auf die Region Hamburg (N=349), durch eine gemeinsame Projektarbeit mit der Hochschule Furtwangen wurden zusätzlich Daten im Raum Tuttlingen (N=15) aufgenommen, so dass insgesamt die Datenbasis und Generalisierbarkeit deutlich gestärkt wurde. Ursprünglich war die physiologische Datenerhebung mit EKG-Brustgurten für 20 Probanden geplant; tatsächlich wurden 12 Probanden aufgezeichnet. Die Auswertung dieser Daten wurde im Projektverlauf bewusst zurückgestellt, da das außerordentlich große Interesse an der interaktiven Erlebensdatenkarte eine intensive Zusammenarbeit mit Interessenten an der

Kartenverwendung ermöglichte (siehe Abschnitt ‚Praxistransfer und Stakeholder-Resonanz‘), die als strategisch wertvoller eingestuft wurde. Die Erkenntnisse aus einer ersten Sichtung der erhobenen 12 EKG-Datensätze motivierten eine ergänzende Laborstudie, die untersuchte, welche Sensoren für In-situ-Stresserfassung bei Bewegung geeignet sind (siehe Abschnitt 1.7).

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte

Im Projekt wurden keine Konstruktionen, Verfahren oder Schutzrechte außerhalb des allgemein bekannten Stands der Technik benutzt. Die verwendete KeepMoving-App ist eine DLR-Eigenentwicklung; der eingesetzte Getis-Ord Gi*-Algorithmus ist in ArcGIS Pro (ESRI) implementiert und wissenschaftlich etabliert. Für die statistische Modellierung wurden die Softwarepakete Mplus 8.11 und R (lme4, lavaan) eingesetzt.

Verwendete Fachliteratur und Informationsdienste

Die wissenschaftliche Einbettung des Projekts stützt sich auf folgende Schlüsselliteratur:

- Schiefelbusch, M. (2015). Analyzing and assessing the experience of traveling by public transport. *Journal of Public Transportation*, 18(4), 46-72.
- Kahneman, D., Fredrickson, B. L., Schreiber, C. A., & Redelmeier, D. A. (1993). When more pain is preferred to less: Adding a better end. *Psychological science*, 4(6), 401-405.
- Redelmeier, D. A., & Kahneman, D. (1996). Patients' memories of painful medical treatments: Real-time and retrospective evaluations of two minimally invasive procedures. *pain*, 66(1), 3-8.
- Getis, A., & Ord, J. K. (1992). The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical analysis*, 24(3), 189-206.
- Van Lierop, D., Badami, M. G., & El-Geneidy, A. M. (2018). What influences satisfaction and loyalty in public transport? A review of the literature. *Transport Reviews*, 38(1), 52-72.
- Abenoza, R. F., Cats, O., & Susilo, Y. O. (2019). How does travel satisfaction sum up? An exploratory analysis in decomposing the door-to-door experience for multimodal trips. *Transportation*, 46(5), 1615-1642.
- Muthén, B. O. (1994). Multilevel covariance structure analysis. *Sociological methods & research*, 22(3), 376-398.
- Rozin, P., & Royzman, E. B. (2001). Negativity bias, negativity dominance, and contagion. *Personality and social psychology review*, 5(4), 296-320.
- Hektner, J. M., Schmidt, J. A., & Csikszentmihalyi, M. (2007). *Experience sampling method: Measuring the quality of everyday life*. Sage.
- Walocha, F., Drewitz, U., & Ihme, K. (2022). Activity and stress estimation based on OpenPose and electrocardiogram for user-focused level-4-vehicles. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 52(4), 538-546.
- Bosch, E., Luther, R., & Ihme, K. (2023). Travel experience in public transport: A geospatial analysis by experience mapping. In *Proceedings of Mensch und Computer 2023* (pp. 417-421).
- Bosch, E., Luther, A. R., & Ihme, K. (2025). Travel experience in public transport: Experience sampling and cardiac activity data for spatial analysis. *Scientific Data*, 12(1), 633.
- Ihme, K., Christ, T., Walocha, F., Scholz, M., Käthner, D., Lau, M., ... & Bosch, E. J. (2023). Digitizing travel experience: assessing, modeling and visualizing the experiences of travelers in shared mobility services.

Als unmittelbare Vorarbeit des DLR-Instituts ist insbesondere die Studien Bosch et al. (2023, 2025) zu nennen, die erstmals eine kartenbasierte Analyse von Reiseerlebensdaten

erprobt hat und konzeptionell direkt in ErlebensAtlas eingeflossen sind. Ebenso lieferten die Projekte DATAMOST, F-RELACS und AutoAkzept wesentliche methodische Bausteine zur Erlebenserfassung, die für den Anwendungsfall intermodaler Reisen adaptiert wurden.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt stand in enger Zusammenarbeit mit dem mFund-Vorhaben NIKKI (FKZ 19F1200B). Beide Projekte teilten die Erhebungsinfrastruktur (KeepMoving-App), führten eine gemeinsame Probandenrekrutierung in Hamburg und Berlin/Brandenburg durch und nutzten Synergien bei der Datenaufbereitung. Die Hamburger Erhebung von ErlebensAtlas (N=349) und die Berliner/Brandenburger Erhebung von NIKKI (N=69) fanden im überlappenden Zeitraum (NIKKI: Januar bis Juni 2025, ErlebensAtlas: Januar bis Dezember 2025) statt, was eine effiziente Ressourcennutzung ermöglichte und die geografische Reichweite beider Projekte deutlich vergrößerte.

Die assoziierten Partner der Hamburger Hochbahn AG waren über alle Projektphasen eingebunden: Sie stellten Werbeflächen in Fahrzeugen für die Probandenrekrutierung zur Verfügung, brachten operatives Wissen zu den relevanten Strecken ein und nahmen an Workshops zur Begleitforschung teil (Identifikation möglicher Servicekonzepte auf Basis von Erlebensdaten).

Darüber hinaus bestanden inhaltliche Austauschknüpfungen zum mFund-Projekt SAFIRA (Auslastungsinformationen im ÖPNV), durch welche ErlebensAtlas hauptsächlich Methoden zur Probandenrekrutierung übernahm.

II. Eingehende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen

1.1 Zentrales Ergebnis: Interaktive ErlebensAtlas-Karte

Das zentrale und wirkungsstärkste Ergebnis des Projekts ErlebensAtlas ist eine interaktive, webbasierte Karte, die das Reiseerleben der Teilnehmenden räumlich visualisiert und öffentlich zugänglich ist. Die Karte ist abrufbar unter: <https://ts.dlr.de/maps/?locale=en#/viewer/67>. Sie hat während und unmittelbar nach der Präsentation auf der UITP Summit 2025 in Hamburg großes Interesse bei Verkehrsunternehmen, Firmen, Kommunen und Forschungseinrichtungen geweckt und ist der wesentliche Treiber für die Folgeprojektentwicklung mit der Hamburger Hochbahn AG. Die Karte demonstriert erstmals in Deutschland, wie In-situ-Reiseerlebensdaten in einem operativen, für Planungs- und Kommunikationsfachkräfte nutzbaren Format bereitgestellt werden können.

Technische Architektur

Die Karte ist als Web-App auf Basis von MapStore realisiert und nutzt das hexagonale Zellgitter H3 (Discrete Global Grid Reference System, DGGRS; <https://h3geo.org/>) zur räumlichen Aggregation der ESM-Datenpunkte. Die Datenpipeline funktioniert wie folgt: Täglich zum Tagesende werden die ESM-Rohdaten mit festgeschriebenen Parametern aggregiert (Zeitfenster, Zellgröße, Mindestanzahl rückmeldender Nutzer). Die Aggregation und Filterung übernimmt ein GeoServer mit PostGIS-Backend. GeoServer liefert einen aktualisierten Karten-Layer an MapStore. Für die Übertragung kommen OGC-standardisierte Schnittstellen (WMS und WFS) zum Einsatz.

Der Einsatz von WMS und WFS sorgt für große Flexibilität: Die Karten-Layer können ohne zusätzliche Implementierung in beliebigen Anwendungen genutzt werden, etwa in GIS-Software von Mobilitätsbetreibern, in Mobilitäts-Apps oder in Dashboards. Über das Web-Interface von MapStore können die aggregierten Geodaten nach Attributwerten gefiltert werden (z.B. nach Tageszeit, Ereigniskategorie oder mittlerem Reiseerleben). Jedes Hexagon zeigt farbcodiert das mittlere Reiseerleben an (Rot: negatives Erleben; Grün: positives Erleben) sowie die Anzahl der Teilnehmenden im jeweiligen Hexagon. Ein Klick auf ein Hexagon öffnet die zugrundeliegenden Ereigniskategorien und Freitexteingaben.

Statische vs. dynamische Aggregation

Die derzeit implementierte tägliche Aggregation mit festen Parametern vereinfacht die Konfiguration der Web-Mapping-App erheblich: Es kann auf Standard-Bedienelemente von MapStore zurückgegriffen werden, ohne zusätzliche UI-Elemente wie Schieberegler oder Dropdown-Menüs manuell implementieren zu müssen. Die gesamte unterliegende Datenverarbeitung mit GeoServer und PostGIS ist jedoch bereits darauf ausgelegt, Daten auch dynamisch zu aggregieren. Zeitfenster, Zellgröße, Mindestanzahl der Nutzer und weitere Parameter können bereits jetzt bei jeder Anfrage an den GeoServer neu spezifiziert werden, sodass eine on-the-fly-Aggregation technisch möglich wäre. Um diese Funktionalität auf der Web-UI-Seite in MapStore dem Nutzer elegant bereitzustellen, sind weitere Implementierungsaufwände erforderlich, die vom bisherigen Projektumfang nicht abgedeckt werden konnten und im Folgeantrag adressiert werden sollen.

Stakeholder-Resonanz

Die Karte adressiert unmittelbar einen der zentralen Wünsche, die in den Experteninterviews mit der Hamburger Hochbahn geäußert wurden: eine kontinuierlich

aktualisierte Übersicht über Reiseerleben und reiserelevante Ereignisse im Netz als Grundlage für gezielte Nachsteuerung. Das sehr große Interesse der verschiedenen Anwender (Hamburger Hochbahn AG, Hamburger Verkehrsverbund, Walk21, Innovation Natives, Hamburger Behörde für Verkehr und Mobilitätswende, Connect Fahrplanauskunft, Wavestone Germany AG, Verracon GmbH, HighQ) führte dazu, dass im Projektverlauf die Auswertung der Erlebensdaten und die Arbeit mit Stakeholdern gegenüber der ursprünglich geplanten Auswertung physiologischer Daten priorisiert wurde (siehe Abschnitt 1.7). Die Karte ist so gestaltet, dass sie auch ohne tiefes methodisches Vorwissen von Planungs- und Kommunikationsfachkräften interpretiert werden kann.

1.2 AP1: Workflow-Definition und technische Grundlagen

Zu Beginn des Projekts wurden die Anforderungen an den Workflow systematisch spezifiziert. Auf Basis einer Literaturrecherche und Diskussionen mit den assoziierten Partnern wurden geeignete Datenquellen für die Erlebens- und Kontexterfassung identifiziert (Z1): neben dem Selbstbericht der Reisenden (Experience Sampling) kamen GNSS-Ortsdaten und Echtzeitfahrplandaten der Verkehrsverbund-APIs als Kontextquellen zum Einsatz.

Die KeepMoving-App wurde um ein vollständiges ESM-Modul (Experience Sampling Methodology) erweitert (Z2, Z3): konfigurierbare Zeitintervalle (5-Minuten-Takt), eine Ereignis-Auswahl auf demselben Bildschirm mit 15 vordefinierten Ereigniskategorien plus Freitexteingabe sowie automatischer Start des Post-Trip-Fragebogens nach Fahrtende. Alle Messungen werden mit Zeitstempel und GNSS-Koordinate gespeichert und pseudonymisiert in der DLR-eigenen Backend-Infrastruktur (AIM-Backend) abgelegt. Methoden zur Vorverarbeitung und Bereinigung der Daten wurden implementiert (Z4), darunter Artefaktkontrolle, Ausreißerprüfung und Aggregation der ESM-Daten zu räumlichen Zellen. Als kartenbasierte Visualisierungsumgebung wurde MapStore eingesetzt (Z5, Z6).

1.3 AP2: Datenerhebung

Die Datenerhebung fand von Januar bis Dezember 2025 in Hamburg (N=349), Berlin (N=54) und Tuttlingen (N=15) statt, insgesamt 418 Teilnehmende (Z7). Die Probandinnen und Probanden wurden über Innenraumwerbung in U- und S-Bahn-Fahrzeugen (Hamburg, in Zusammenarbeit mit der Hamburger Hochbahn), Flyer (Berlin, Tuttlingen) und DLR-interne Kanäle (SONA-Probandenpool) rekrutiert. Sie wurden gebeten, mindestens sechs Alltagsfahrten von mindestens 15 Minuten Dauer über drei Wochen zu dokumentieren. Vor jeder Fahrt wählten Teilnehmende die geplante Route in der App aus; während der Fahrt wurde alle fünf Minuten ein Fragebogen-Pop-up ausgespielt. Ergänzend konnten reiseerlebensrelevante Ereigniskategorien angeklickt werden. Nach der Fahrt folgte automatisch der Post-Trip-Fragebogen. Insgesamt lagen nach Datenbereinigung 2.576 auswertbare Fahrten vor; die Hamburger Teilstichprobe lieferte 21.411 In-situ-Bewertungen mit einer mittleren Antwortrate von 98,34% (SD=8,0%).

Vor Studienbeginn wurde ein Ethikantrag bei der DLR-internen Ethikkommission gestellt und genehmigt (Aktenzeichen 04/25). Sämtliche Datenschutzanforderungen der DSGVO wurden in Absprache mit dem DLR-Datenschutzbeauftragten umgesetzt. Alle Teilnehmenden gaben nach umfassender Aufklärung schriftliche Einwilligung.

1.4 AP3: Workflow-Validierung, Auswertung und Visualisierung

Messinstrument und Psychometrie

Das entwickelte ESM-Instrument umfasst acht Items auf 5-Punkt-Skalen, die konzeptuell zwei Kategorien zugeordnet wurden: vier Items zu momentanen Bewertungszuständen (aktuelle Zufriedenheit, Reisequalität, Flüssigkeit der Fahrt, Angenehmheit) und drei Items

zu normvergleichenden Appraisals (Vergleich mit idealer Fahrt, mit Erwartungen, mit typischer Erfahrung). Ein weiteres Item zum Zielerreichungsfortschritt wurde nach psychometrischer Prüfung ausgeschlossen.

Die Güte des Instruments wurde anhand von 17.725 Messungen von 349 Teilnehmenden (Hamburger Stichprobe) mittels Multilevel Konfirmatorischer Faktorenanalyse (MCFA, Mplus 8.11, MLR-Schätzer) geprüft. Das bevorzugte Modell spezifiziert auf der Within-Person-Ebene zwei korrelierte Faktoren (momentanes Erleben vs. normvergleichende Appraisals) und auf der Between-Person-Ebene einen Inhalts- und einen Leniency-Faktor. Die Modellpassung war gut (RMSEA=.035, CFI=.952, TLI=.922, SRMR_W=.035, SRMR_B=.033); die Reliabilität hoch (Omega_within=.890/.885). Die Ergebnisse belegen eine asymmetrische Faktorstruktur über Ebenen und demonstrieren, dass das Instrument momentanes Reiseerleben reliabel erfasst.

Räumliche Hot-Spot-Analyse Hamburg

Auf Basis der 21.411 geokodierten ESM-Datenpunkte aus Hamburg wurde eine Optimized Hot Spot Analysis (Getis-Ord G_i^* -Statistik, ArcGIS Pro) durchgeführt. Mit einem optimalen Suchradius von ca. 645m (ermittelt via Incremental Spatial Autocorrelation) und FDR-Korrektur wurden 12 signifikante Hot- und Cold-Spot-Areale identifiziert (7 Cold Spots, 5 Hot Spots, 4.373 signifikante Punkte).

Cold Spots sind durch die Häufung negativer Ereignisse geprägt (Verspätungen, Überfüllung, Störende Mitreisende, Unwohlsein, Infrastrukturprobleme), sind aber intern heterogen: Spot 3 ist primär verspätungsdominiert (26,4%), Spot 5 zeigt ein multidimensionales Problembündel (Überfüllung 41,1%, Störende 33,9%), und Spot 4 (Hamburger Hauptbahnhof) weist das breite Spektrum eines zentralen Umstiegsknotens auf. Hot Spots entstehen durch unterschiedliche Pfade: Spot 8 zeigt ein komfortorientiertes Profil (Komfort 60,9%), Spot 9 zeichnet sich durch Zeiteffizienz aus (Planmäßige Ankunft 39,8%), Spots 10 und 11 durch angenehme städtische Umgebungen. Eine Tageszeit-Stratifikation zeigte, dass Abendstunden ein eigenständiges Muster mit höheren Verspätungs- (35%) und Störungsraten (29%) aufweisen, während Hauptverkehrszeiten primär durch Überfüllung und verpasste Anschlüsse geprägt sind. Positive Ereignisse (Planmäßige Ankunft, Zeitnutzung) treten auch in Cold Spots auf, werden dort aber durch simultane Negativereignisse aufgewogen (Negativitäts-Bias).

Aggregationsheuristiken retrospektiver Reisebewertungen

Ein weiteres Forschungsziel war die Analyse, nach welcher kognitiven Logik Reisende momentanes Erleben in eine Gesamtbewertung integrieren. In einem Vergleich von sechs konkurrierenden Mixed-Effects-Modellen wurden folgende Aggregationsregeln getestet: Minimum-End, Peak-End, Mittelwert (Mean), End, Min und Fahrdauer.

Das Minimum-End-Modell (schlechtester Moment + letzter Moment) erzielte klar die beste Modellpassung (AIC=3329,58), während alle Alternativen substantiell schlechter abschnitten (Mean: AIC=3767,97; Peak-End: AIC=3920,37; End: AIC=3509,11; Dauer: AIC=5844,33). Das Modell erklärt 64,9% der Varianz in retrospektiver Reisezufriedenheit (marginale $R^2=.649$). Zwei Robustheitstests schließen Recency-Artefakte weitgehend aus. Das Ergebnis repliziert und erweitert psychologische Befunde zur Peak-End-Regel (Kahneman et al., 1993; Redelmeier & Kahneman, 1996) auf den ÖPNV-Kontext.

1.5 AP4: Begleitforschung

Ergänzend zur quantitativen Probandenerhebung wurden qualitative Experteninterviews mit fünf Mitarbeitenden der Hamburger Hochbahn AG aus unterschiedlichen Fachbereichen durchgeführt (Betrieb, Kommunikation/Marketing, Kundenservice, Produktentwicklung, Infrastruktur/Bauprojekte). Ziel war es, die bereits bei der Hochbahn vorhandenen Datenquellen zum Reiseerleben zu inventarisieren, bestehende

Angebotsanpassungsprozesse zu verstehen und konkrete Bedarfe für eine Weiterentwicklung im Sinne von ErlebensAtlas zu identifizieren.

Die Interviews zeigten, dass die Hamburger Hochbahn AG bereits ein breites Portfolio an Reiseerlebensquellen nutzt: Pünktlichkeitsquoten und Auslastungsmessungen auf Fahrzeug- und Linienlevel, einen Kundenerlebnismonitor sowie einen Imagemonitor, Kundendialog-Formate wie Open HVV und User-Sharing, direkte App-Rückmeldungen und Hotline-Eingaben sowie stadtteilbezogene Befragungen bei Bauprojekten. Gleichzeitig wurden zentrale Lücken benannt: Die vorhandenen Daten sind bisher nicht auf einzelne Kunden zugeordnet; eine end-to-end-Sicht auf Reiseketten fehlt; Echtzeitfähigkeit ist nur punktuell vorhanden; und die Skalierung von Einzelbeschwerden auf das Gesamtkundenkollektiv („wer ist leise, aber at risk?“) bleibt eine ungelöste Herausforderung.

Als besonders relevant für ErlebensAtlas kristallisierten sich folgende Anwendungsfelder heraus: (1) Unterstützung bei der Skalierung von Beschwerden und der Priorisierung von Maßnahmen, (2) Verbesserung der Information über Anschlusszeiten und die Gesamtreisekette, (3) Orientierung und Sicherheit an Umsteigepunkten, sowie (4) Echtzeit-Reaktionen der Leitstelle bei kollektiven Negativereignissen. Mehrere Interviewpartner äußerten den Wunsch nach einer integrierten Plattform, die vorhandene und neue Reiseerlebensquellen zusammenführt und für verschiedene Fachbereiche zugänglich macht. Die Interviews identifizierten außerdem eine Reihe besonders kritischer Umsteigepunkte im Hamburger Netz, die als Erhebungsschwerpunkte in die Stichprobenplanung einfließen: Hauptbahnhof Nord/Süd, Berliner Tor, Barmbek, Landungsbrücken, Jungfernstieg sowie Sternschanze und Elbbrücken.

1.6 AP5: Datenverfügbarkeit und Verwertung

Gemäß Z8 wurden die aggregierten Daten, welche die Grundlage für die interaktive ErlebensAtlas-Visualisierung darstellen, in der Mobilithek bereitgestellt (<https://mobilithek.info/offers/993927988445618176>).

Eine Veröffentlichung des ErlebensAtlas-Gesamtdatensatzes (21.411 georeferenzierte ESM-Antworten mit Ereigniskategorien) in der Mobilithek und auf Zenodo ist im Zuge des Nature Scientific Data Descriptors geplant (Q4 2026). Zielformate sind .csv für tabellarische Daten sowie GeoJSON/OGC-API-Features für räumliche Daten, um die Verwendung in Web- und Desktop-Kartenanwendungen zu ermöglichen. Die Daten werden aus datenschutzrechtlichen Gründen anonymisiert: Start- und Endpunkte privater Fahrten werden entfernt, Koordinaten auf Segment-Ebene aggregiert.

1.7 Ergänzende Studie: Sensorselektion für In-situ-Stresserfassung bei Bewegung

Die in den Vorabtests dokumentierten Artefaktprobleme bei der In-situ-EKG-Erfassung während ÖPNV-Fahrten warfen eine grundlegende Frage auf, die für ErlebensAtlas und für die weitere physiologische Stressforschung im Mobilitätskontext relevant ist: Welche Sensoren sind grundsätzlich geeignet, um akuten psychologischen Stress in einem ambulatorischen Setting zu erfassen, in dem Bewegung und Stress oder kognitive Belastung gleichzeitig auftreten? Um diese Frage systematisch zu beantworten, wurde im Rahmen des Projekts eine ergänzende Laborstudie durchgeführt, deren Ergebnisse in einem separaten Manuskript berichtet werden (Bosch et al., Eingereicht bei Frontiers in Physiology).

Design und Methode

19 Teilnehmende absolvierten ein vollständig gekreuztes 2x3-within-subjects-Design. Der Faktor Stress hatte zwei Stufen (keine Stressaufgabe vs. kognitive Stressaufgabe: auditiver

n-back-Rechenaufgabe kombiniert mit sozialem Evaluationsdruck und finanzieller Incentivierung); der Faktor körperliche Aktivität hatte drei Stufen (Sitzen, Gehen, stationäres Fahrradfahren). Jede der sechs Bedingungen dauerte acht Minuten; zwischen den Bedingungen wurde ein fünfminütiges Atemregulationsprotokoll zur Rückkehr in den Ausgangszustand durchgeführt. Gemessen wurden fünf physiologische Signale: tonale elektrodermale Aktivität (EDA), Elektromyographie des linken Trapezius-Muskels (EMG-RMSA), Herzrate (HR), Herzratenvariabilität (RMSSD) und Atemfrequenz. Zur Analyse wurden multilevel lineare gemischte Modelle (lme, R-Paket nlme) und Messwiederholungs-ANOVA (ezANOVA) mit orthogonalen a-priori-Kontrasten eingesetzt.

Zentrale Befunde

Die Ergebnisse liefern eine sensorspezifische Hierarchie für Echtzeit-Stresserkennung unter Bewegung. Tonale EDA erwies sich als der robusteste Indikator für kognitiven Stress über alle Aktivitätsbedingungen hinweg (Stresseffekt: $r=.48$; Aktivitätseffekt: $r=.67$), ohne eine Interaktion zwischen den beiden Faktoren. Dieses Muster gilt also unabhängig davon, ob die Person sitzt, geht oder Fahrrad fährt, was tonale EDA für Mobilitätskontexte besonders wertvoll macht.

Atemfrequenz zeigte ebenfalls unabhängige, additive Sensitivität für beide Faktoren (Stresseffekt: $r=.40$; Aktivitätseffekt: $r=.64$), was sie zur zweitbesten Kandidatin für ambulatoire Stresserkennung macht. Herzrate und Trapezius-EMG wurden hingegen fast ausschließlich durch körperliche Aktivität getrieben (HR: $r_{\text{Aktivität}}=.81$; EMG: $r_{\text{Aktivität}}=.66$) und zeigten keine zuverlässige Sensitivität für die Stressaufgabe. RMSSD war durch Bewegung stark unterdrückt ($r_{\text{Aktivität}}=.82$) und zeigte nur eine marginale, nicht signifikante Tendenz in Richtung Stresseffekt ($r=.28$, $p=.096$). Diese Befunde beantworten direkt, warum die EKG-basierte Stresserfassung bei ÖPNV-Fahrten methodisch problematisch ist: Der Herzraten- und HRV-Kanal, der bei Smartwatch-basierten Ansätzen häufig als alleiniger Indikator verwendet wird, versagt systematisch unter Bewegungsbedingungen.

Implikationen für ErlebensAtlas

Die Studie liefert die empirische Grundlage für die Sensorauswahl in künftigen ErlebensAtlas-Erhebungsphasen, in denen eine physiologische Komponente integriert werden soll. Konkret empfehlen die Ergebnisse, EDA und Atemfrequenz als primäre physiologische Kanäle zu priorisieren und Herzrate bzw. HRV nur in Kombination mit anderen Kanälen und nach aktivitätsbasierter Normierung einzusetzen. Für praxisnahe Echtzeit-Anwendungen, etwa in einem Folgesystem, das physiologische Stressdetektionssignale in die ErlebensAtlas-Karte einspeist, sollte ein multimodaler Ansatz aus EDA und Atemfrequenz favorisiert werden. Diese Empfehlung ist direkt handlungsrelevant für den geplanten Folgeantrag mit der Hamburger Hochbahn und für die in der Begleitforschung diskutierten Servicekonzepte zur Echtzeitreaktion auf kollektives Negativerleben im Netz.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Das Forschungsprojekt wurde innerhalb des vorgegebenen Kosten- und Zeitrahmens umgesetzt. Die bewilligte Zuwendung betrug 248.520,50 Euro bei einer Förderquote von 70% (Gesamtkosten: 173.964,35 Euro, Eigenanteil: 74.556,15 Euro). Die Mittel wurden planungsgemäß eingesetzt; nähere Ausführungen sind im gesonderten Verwendungsnachweis dokumentiert. Die größten Positionen entfielen auf Personalkosten (235.682,92 Euro) sowie Sachkosten für Probandenstudien, Serverinfrastruktur und Dienstreisen.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Vorhaben adressierte eine in der Vorhabenbeschreibung klar diagnostizierte Lücke: Informationen über das Reiseerleben der Kundschaft sind für Mobilitätsbetreiber digital nicht verfügbar, obwohl sie für die Verbesserung von Services, die Attraktivierung des ÖPNV und langfristig für die Erreichung klimapolitischer Mobilitätsziele von großer Bedeutung wären. Die gewählte Machbarkeitsstudie mit Proof-of-Concept-Charakter war die methodisch angemessene Antwort auf diese Ausgangssituation.

Die gewählten Methoden (Experience Sampling Methodology, MCFA, Getis-Ord G_i^* , Mixed-Effects-Modellierung, ArcGIS Pro) entsprechen dem internationalen Stand der Forschung. Der Aufwand der Datenerhebung mit 418 Teilnehmenden in drei Städten über mehrere Monate war notwendig, um ausreichende statistische Power für Multilevel-Analysen und räumliche Clusteranalysen sicherzustellen. Die Kombination aus In-situ-Messung, räumlicher Analyse und kognitionspsychologischer Modellierung stellt eine methodische Innovation dar, die die in der Vorhabenbeschreibung formulierten Ziele Z1-Z9 vollständig adressiert hat.

4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Wissenschaftliche Verwertung

Die Projektergebnisse wurden in mehreren Manuskripten aufbereitet:

- Bosch et al. (2026): Mapping Travel Experience in Public Transport: Real-Time Evidence and Spatial Analysis in Hamburg. *Journal of Transport Geography*. [Hot-Spot-Ergebnisse, Hamburg-Analyse]
- Bosch et al. (under review): Which Moments Matter? Heuristics of Remembered Travel Experience in Public Transport. *Travel Behavior & Society*. [Minimum-End-Befunde, Aggregationsheuristiken]
- Bosch et al. (under review): Separating Acute Psychological Stress from Physical Exertion in Biometric Signals. *International Journal of Psychophysiology*. Rohdaten öffentlich verfügbar: <https://osf.io/n3r28>. [Sensorstudie: 2x3 Within-subjects, N=19, fünf Biosensoren, Hauptbefund: Tonale EDA als robuste Stressindikatoren bei Bewegung]
- Bosch et al. (Präsentation Mai 2026): What Shapes the Travel Experience in Public Transport? A Multi-City Study of Momentary Traveler Reports. *Transport Research Arena (TRA) Annual Summit 2026*. [In-situ-Häufigkeit und Bewertung von Reiseerlebensereignissen in Berlin und Hamburg, N=21.411 ESM-Datenpunkte; Komfort als häufigster positiver Event; Vergleich In-situ vs. retrospektive Befragungen und HVV-Beschwerdedaten]
- Ihme, Radzuweit, Bosch (2026) *ErlebensAtlas - Reiseerlebnisse im ÖPNV verorten und verstehen*. *Behörden Spiegel*, 42 (3), Seite 19
- Bosch et al. (in Einreichung): Urban Context and Travel Experience Events: An Exploratory Comparison of Two German Cities. *Travel Behavior & Society*. [Multilevel-Regression, Hamburg N=70 vs. Tuttlingen N=21; stadtspezifische Ereignisgewichtung: Verspätung dominiert in Hamburg, positives Kapazitätsangebot in Tuttlingen]

Darüber hinaus sind in Vorbereitung bzw. in fortgeschrittenem Stadium: ein Scientific Data Descriptor (Nature Scientific Data) zur Beschreibung des ErlebensAtlas-Datensatzes als eigenständige wissenschaftliche Ressource sowie eine psychometrische Validierungsstudie zum ESM-Messinstrument (Manuskript in Vorbereitung). Damit umfasst die Publikationsleistung des Projekts insgesamt fünf (bis sieben) Veröffentlichungen, die das Spektrum von der Messinstrumentvalidierung über die räumliche Analyse und kognitive Aggregationsheuristiken bis zu Stadtvergleichen und physiologischer Sensorforschung

abdecken. Der TRA-Beitrag (Präsentation Mai 2026) liefert erstmals groß-skalige In-situ-Evidenz zur Häufigkeit von Reiseerlebens-ereignissen und zeigt systematische Abweichungen zwischen In-situ- und retrospektiven Methoden auf. Das TRF-Einreichungsmanuskript zum Städtevergleich Hamburg-Tuttlingen erweitert den Erkenntnisstand um den ländlichen Kontext. Über eine DLR-betreute Abschlussarbeit wurden die Themen in die Hochschullehre eingebracht, wie in der Vorhabenbeschreibung vorgesehen.

Datenbereitstellung in der Mobilithek

Gemäß den Anforderungen des mFund-Programms wurden Daten in der Mobilithek bereitgestellt (Z8). Die interaktive ErlebensAtlas-Karte (<https://ts.dlr.de/maps/#/viewer/67>) ist öffentlich zugänglich und zeigt das aggregierte Reiseerleben in Hamburg hexagonal visualisiert; sie wird als unmittelbar nutzbares Produkt für Verkehrsunternehmen und Forschungseinrichtungen bereitgestellt. Der vollständige ErlebensAtlas-Datensatz (21.411 ESM-Datenpunkte mit Zeitstempel, Koordinaten und Ereigniskategorien) wird im Zuge des Nature Scientific Data Descriptors in der Mobilithek und auf Zenodo veröffentlicht (geplant Q4 2026). Eine frühere Veröffentlichung ohne begleitende methodische Dokumentation würde die Nachnutzbarkeit mindern.

Für Dritte bieten die Daten erhebliches Potenzial: Verkehrsunternehmen und Verbunde können die Hot- und Cold-Spot-Karten als Grundlage für priorisierte Maßnahmenplanung nutzen; Stadtplanung und Forschung erhalten ortsbezogene Evidenz zur Servicequalität aus Nutzerperspektive; App-Entwickler können das ESM-Protokoll und die Ereigniskategorien als Referenz nutzen. Die in der Vorhabenbeschreibung skizzierte Idee eines Erlebensatlas als Citizen-Science-Plattform (anbieterübergreifende Erlebensdokumentation über OnTrip) wurde als Servicekonzept ausgearbeitet und wird in Folgeprojektanträgen weitergeführt.

Praxistransfer und Stakeholder-Resonanz

Die Resonanz nach der Präsentation auf der UITP Summit 2025 in Hamburg übertraf die in der Vorhabenbeschreibung antizipierten wirtschaftlichen Verwertungsmöglichkeiten: Gespräche mit dem Hamburger Verkehrsverbund, Walk21, Innovation Natives, Hamburger Behörde für Verkehr und Mobilitätswende, Connect Fahrplanauskunft, Wavestone Germany AG, und Verracon GmbH wurden initiiert. Eine Einladung zur Walk21-Konferenz bekräftigt das internationale Verwertungsinteresse. Ein Folgeantrag mit der Hamburger Hochbahn befindet sich in Vorbereitung.

Damit sind die in der Vorhabenbeschreibung (Abschnitt 14) benannten Verwertungsschritte für wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit eingeleitet: Das DLR hat seine Position als führender Anbieter von Methoden zur Analyse von Reiseerlebensdaten gefestigt; der in ErlebensAtlas entwickelte Workflow ist als Grundlage für Folgeprojekte (mFund FL2 oder vergleichbare Förderformate) direkt nutzbar.

5. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit hat sich das Feld der mobilitätsbezogenen Erlebensdatenerhebung und -visualisierung spürbar weiterentwickelt. Kommerzielle Tracking-Apps wie MotionTag und die POSMO Tracking App sammeln Mobilitätsdaten per Smartphone, adressieren jedoch nicht die Erfassung von Reiseerleben und bieten keinen direkten Datenworkflow in intuitive Visualisierungen. Das Geo-Social Analytics Lab der Universität Salzburg betreibt Forschungsarbeiten zur Kartographierung sozialer Daten, verfügt aber nicht über die integrierte Verkehrsdomänen-Expertise und die etablierte Technologiebasis, die ErlebensAtlas auszeichnen. Die Walk21-App erfasst das Erleben von Fußgängerinnen und Fußgängern und erzeugt PDF-Reports, ist jedoch auf einen

Verkehrsmodus beschränkt und bietet keinen integrierten Datenworkflow für multimodale Reiseketten. Google Maps stellt Echtzeit-ÖPNV-Informationen in einer Kartendarstellung bereit, ist aber eine US-amerikanische Lösung ohne Zugang zu Reiseerlebensdaten der Nutzenden und mit eingeschränkter Konformität mit europäischen Datenschutzerfordernungen.

ErlebensAtlas hebt sich von diesen Ansätzen durch die Kombination ab, die bisher kein anderer Akteur realisiert hat: In-situ-Erlebenserfassung während realer Fahrten, direkter Datenworkflow von der App-Erhebung über GeoServer/PostGIS bis zur interaktiven Karte, Integration mehrerer Verkehrsmodi sowie eine europäische, DSGVO-konforme Infrastruktur. Die rasche Weiterentwicklung LLM-basierter Assistenzsysteme in ÖPNV-Apps (z.B. DB, HVV) schafft darüber hinaus neue Schnittstellen, an denen Erlebensdaten aus ErlebensAtlas künftig angedockt werden könnten, etwa für kontextsensitive Echtzeitinformation bei erkannten kollektiven Negativerlebnissen.

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Eine Übersicht der Kommunikationsmaßnahmen während der Projektlaufzeit:

Zeitraum	Format	Maßnahme
Projektstart 2024	Pressemitteilung	Abgestimmte Pressemitteilungen über DLR-Website und LinkedIn
Jan. 2025	Social Media	Info-Flyer zum Projekt veröffentlicht (gezielte Probandenansprache)
Mai 2025	Konferenz-Poster	Präsentation auf dem Transportation Research Symposium , Interactive travel experience visualization for mobility providers. ‘
Jun. 2025	Präsentation	Vortrag auf der UITP Summit 2025, Hamburg; Folgegespräche mit HVV, Wavestone, Walk21, Innovation Natives
Oktober 2025	Konferenz-Einladung	Einladung zur Walk21-Konferenz als Ergebnis des UITP-Interesses
März 2026	Veröffentlichung	Anwendernahe Beschreibung des Projektergebnis im Behörden Spiegel
Apr. 2026	Konferenz-Vortrag	Präsentation auf HFES Europe, April 2026, Kopenhagen, Dänemark
März 2026	Präsentation	Präsentation auf der FOSSGIS-Konferenz 2026, Göttingen, ‚Diskrete globale Gittersysteme für die raum-zeitliche Aggregation und Visualisierung‘
April 2026	Journal-Paper	Mapping Travel Experience in Public Transport: Real-Time Evidence and Spatial Analysis in Hamburg. Journal of Transport Geography.
Q1 2026	Zeitschriftenartikel	ErlebensAtlas - Reiseerlebnisse im ÖPNV verorten und verstehen. Behörden Spiegel, 42 (3), Seite 19
lfd.	Manuskript (eingereicht)	Which Moments Matter? Heuristics of Remembered Travel Experience. Transportation Research Part F.

Zeitraum	Format	Maßnahme
lfd	Manuscript (eingereicht)	Separating Acute Psychological Stress from Physical Exertion in Biometric Signals. International Journal of Psychophysiology.
in Vorb.	Scientific Data Descriptor	ErlebensAtlas Dataset. Nature Scientific Data (geplant Q4 2026).
in Vorb.	Manuskript	Psychometrische Eigenschaften des ESM-Instruments (Mehrlevelmessmodell).
in Vorb.	Förderantrag	Folgeantrag mit der Hamburger Hochbahn zur Skalierung der ErlebensAtlas-Methodik.
in Einreichung	Manuskript (in Einreichung)	Urban Context and Travel Experience Events: An Exploratory Comparison of Two German Cities. Travel Behavior & Society. Stadtvergleich Hamburg vs. Tuttingen (ländlicher Kontext), Multilevel-Regression.

Ende des Schlussberichts