

KREISLAUFORIENTIERTEN ÖFFENTLICHEN VERKEHR VORANBRINGEN

Pilot-Erfahrungen und Lösungen der
Kreislaufwirtschaft für Betreiber des
öffentlichen Verkehrs



Impressum

Projekt

CE0100250 CE4CE - Öffentliche Verkehrsinfrastruktur in Mitteleuropa - den Übergang zur Kreislaufwirtschaft erleichtern

Kontakt

Leipziger Verkehrsbetriebe (LVB) GmbH
Adresse: Georgiring 3, 04103 Leipzig, Deutschland
Web: <https://www.l.de/verkehrsbetriebe/>
E-mail: CE4CE.Verkehrsbetriebe@L.de

Gefördert durch

Programm Interreg Central Europe
Web: <https://www.interreg-central.eu/>

Autorinnen und Autoren

Danijel Hojski, Marjan Lep, Vlasta Rodošek (Universität Maribor, Slowenien)

Mitwirkende

Stefan Röhl, Conrad Jentzsch (Leipziger Verkehrsbetriebe (LVB), Deutschland), Jan Röhl (Kruch Railways, Österreich), Liliana Donato, Sara Biffi (ATB Bergamo, Italien), Gabriele Grea (Redmint Impresa Sociale srl, Italien), Dominika Kowalkowska (PKA Gdynia, Polen), Agnieszka Szmelter-Jarosz, Marcin Wolek (Universität Gdańsk, Polen), Németh Zoltán Ádám, Gábor Jéga-Szabó (SZKT Szeged, Ungarn), Mitja Klemencic (Stadtgemeinde Maribor), Alexandra Scharzenberger, Marta Woronowicz (Verein trolley:motion, Österreich), Laura López, Ana-Maria Baston (Rupprecht Consult, Deutschland), Nikolett Csörgő (Mobilissimus Kft, Ungarn)

Layout und Gestaltung

Danaja Dvornik (@_studio_kai_)

Erscheinungsdatum

April 2026

Urheberrecht

Diese Veröffentlichung ist urheberrechtliches Eigentum des CE4CE-Projektconsortiums unter Leitung der Leipziger Verkehrsbetriebe (LVB) GmbH. Alle Bilder und Textelemente in dieser Veröffentlichung, für die eine Quelle angegeben ist, sind Eigentum der jeweils genannten Organisationen oder Personen.

Über das CE4CE-Projekt

Das CE4CE-Projekt stärkt systemisches Denken im Sinne der Kreislaufwirtschaft bei Akteuren des öffentlichen Verkehrs in mitteleuropäischen Ländern, um Abfälle zu reduzieren und entlang neuer Lebenszyklen von Infrastruktur und Rollmaterial Wert zu schaffen. Zu diesem Zweck entwickelt CE4CE gemeinsam Lösungen, die Wissen und Kompetenzen im Sektor erweitern, Barrieren und Kosten verringern und die Entwicklung neuer Dienstleistungen und qualifizierter Arbeitsplätze sowie von Strategien und Aktionsplänen anstoßen, die Politikentwicklung, Lernen und Austausch auf regionaler und transnationaler Ebene verbessern.

CE4CE zielt darauf ab, Prinzipien der Kreislaufwirtschaft in den öffentlichen Verkehr zu bringen und damit Abfälle zu verringern, die Effizienz im Sektor zu steigern und den ökologischen Fußabdruck des öffentlichen Verkehrs zu verbessern.



Abbildung 1: CE4CE-Partner während einer gemeinsamen Diskussion über Lösungen und Aktionspläne im Jahr 2025.
Bildnachweis: Das CE4CE-Konsortium.

Inhalt

1. Einleitung	6
2. Aufbau der CE4CE-Pilotprojekte und Lösungen	6
2.1. Verknüpfung der CE4CE-Aktivitäten mit dem AETE-Lebenszyklusrahmenwerk	7
3. CE4CE-Pilotprojekte und Lösungen	10
3.1. Aktivität A.1: Entwicklung des CE4CE Circularity Compass und der Wissensplattform für den öffentlichen Verkehr	11
3.1.1. Pilotprojekt P.1: Circularity Compass für den öffentlichen Verkehr	11
3.1.2. Lösung S.1: CE4CE-Wissensplattform für Kreislaufwirtschaft im öffentlichen Verkehr	13
3.1.3. Lösung S.2: Online-Second-Hand- und Matchmaking-Marktplatz	15
3.2. Aktivität A.2: Entwicklung gemeinsamer digitaler Lösungen zur Ermöglichung und Beschleunigung der Kreislaufwirtschaft im öffentlichen Verkehr	16
3.2.1. Pilotprojekt P.2: Digitale Optimierung von Infrastruktur und Fahrzeugen durch vorausschauende Instandhaltung (Leipzig, Deutschland)	16
3.2.2. Pilotprojekt P.2: Optimierung von Infrastruktur und Fahrzeugen durch vorausschauende Instandhaltung (Bergamo, Italien)	18
3.2.3. Lösung S.3: Module für die vorausschauende Instandhaltung von Infrastruktur und Rollmaterial	20
3.2.4. Pilotprojekt P.4: Simulation elektrifizierter Korridore des öffentlichen Verkehrs und von Energieflüssen (Gdynia, Polen)	22
3.2.5. Lösung S.4: Geschäftsplanungstool für elektrifizierte Flotten und Infrastruktur des öffentlichen Verkehrs	24
3.3. Aktivität A.3: Entwicklung von Lösungen zur Werterhaltung und Abfallvermeidung bei der Infrastruktur des öffentlichen Verkehrs	25
3.3.1. Pilotprojekt P.5: Wiederverwendung von Trolleybus-Oberleitungsweichen (Szeged, Ungarn)	25
3.3.2. Lösung S.5: Definition von Übernahmekriterien für die Wiederverwendung von Trolleybus-Oberleitungsweichen	27
3.3.3. Pilotprojekt P.6: Second-Life-Nutzung von Traktionsbatterien als stationäre Energiespeicher für erneuerbar betriebene Schnellladung (Maribor, Slowenien)	27
3.3.4. Lösung S.6: Übertragbare Geschäftsmodelle für die Second-Life-Nutzung von Traktionsbatterien	29
3.4. Aktivität A.4: Förderung der Übernahme von Lösungen zur Werterhaltung und Abfallvermeidung bei Fahrzeugen und Rollmaterial	30
3.4.1. Pilotprojekt P.7: Wiederaufarbeitung und Neugestaltung von Straßenbahn-Steuergeräten zur Ermöglichung der Wiederverwendung von Komponenten (Szeged, Ungarn)	30
4. Erkenntnisse	33
5. Umsetzungcheckliste und zentrale Aspekte	35
5.1. Zentrale Aspekte für eine erfolgreiche Umsetzung	35
5.2. Umsetzungcheckliste	35
5.3. Häufige Risiken und Minderungsmaßnahmen	37
5.4. Schlussfolgerungen und Ausblick	37
6. Quellenverzeichnis	38

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Definition
AETE	Avoid - Extend - Transform - Enable (Vermeiden - Verlängern - Transformieren - Ermöglichen)
BESS	Batterie-Energiespeichersystem
CAN-BUS	Controller Area Network Bus
CE4CE	Kreislaufwirtschaft für Mitteleuropa
DC	Gleichstrom
EFS	Energieflusssimulation
GNSS	Globales Navigationssatellitensystem
IMC	Laden während der Fahrt (In-Motion Charging)
KPI	Leistungskennzahl
PV	Photovoltaik
RES	Erneuerbare Energiequellen

Abkürzungsverzeichnis der Partner

Abkürzung	Definition
LVB	Leipziger Verkehrsbetriebe, Deutschland
KRUCH	KRUCH Railway Innovations, Österreich
TM	trolley:motion, Österreich
ATB	Azienda Trasporti Bergamo, Italien
REDMINT	Redmint Impresa Sociale, Italien
SZKT	Verkehrsbetrieb Szeged, Ungarn
MOBILISSIMUS	Mobilissimus, Ungarn
PKA	Öffentlicher Busverkehrsbetreiber in Gdynia, Polen
MOM	Stadtgemeinde Maribor, Slowenien
UG	Universität Gdańsk, Polen
UM	Universität Maribor, Slowenien
RUPPRECHT	Rupprecht Consult (consultant to LVB), Deutschland

Zusammenfassung

Das CE4CE-Projekt unterstützt den Übergang zu kreislaforientierten Praktiken in den Systemen des öffentlichen Verkehrs in Mitteleuropa, indem es Prinzipien der Kreislaufwirtschaft in praktische Pilotmaßnahmen und übertragbare Lösungen für die Lebenszyklen von Infrastruktur und Rollmaterial überführt. Durch Erprobungen unter realen Bedingungen und die Entwicklung konkreter Lösungen trägt CE4CE dazu bei, Abfälle zu reduzieren, Werte zu erhalten und neue zirkuläre Wertschöpfungsketten im öffentlichen Verkehr zu schaffen.

Im Rahmen des Projekts haben Aufgabenträger, Betreiber und weitere Akteure des öffentlichen Verkehrs gemeinsam Pilotmaßnahmen und Lösungen entwickelt und getestet, die sektorales Wissen und Kompetenzen erweitern, Umsetzungsbarrieren und Kosten verringern und die Entwicklung neuer Dienstleistungen, Fähigkeiten und zirkulärer Geschäftsmodelle ermöglichen. Durch die Konzentration auf konkrete Anwendungen unter realen Betriebsbedingungen unterstützt CE4CE eine bessere Ressourceneffizienz, geringere Umweltauswirkungen und die langfristige Nachhaltigkeit von Systemen des öffentlichen Verkehrs.

Die in diesem Handbuch vorgestellten Pilotprojekte und Lösungen bauen auf Ko-Kreation, Pilotversuchen und Peer-Review-Prozessen auf. Sie zeigen kreislaforientierte Praktiken wie die Verlängerung der Nutzungsdauer, Wiederverwendung, Umnutzung und Wiederaufarbeitung von Anlagen sowie ermöglichende Mechanismen, darunter digitale Tools, Plattformen und Geschäftsmodelle, die eine breitere Anwendung im öffentlichen Verkehr unterstützen.

CE4CE wurde von einer transnationalen Partnerschaft umgesetzt, die die gesamte Wertschöpfungskette und Systemperspektive abbildet und Aufgabenträger und Betreiber des öffentlichen Verkehrs, Kommunen, Industrie- und Forschungseinrichtungen aus sechs mitteleuropäischen Ländern umfasst. Die Einbindung assoziierter Partner und internationaler Netzwerke unterstützte zusätzlich die Kommunikation, den Wissensaustausch und den breiteren Transfer der Projektergebnisse.

Dieses Handbuch dokumentiert und verbreitet die zentralen Pilotmaßnahmen und Lösungen, die im Rahmen von CE4CE entwickelt wurden, und bietet praktische Einblicke sowie Orientierung für Akteure, die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft im öffentlichen Verkehr anwenden möchten.

Das Handbuch ist wie folgt aufgebaut:

Kapitel 2

stellt den konzeptionellen und methodischen Rahmen des CE4CE-Ansatzes vor, einschließlich des AETE-Modells und seiner Relevanz für die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft im öffentlichen Verkehr.

Kapitel 3

präsentiert die CE4CE-Pilotmaßnahmen zusammen mit den entsprechenden Lösungen und zeigt auf, wie praktische Erfahrungen in übertragbare und anwendungsorientierte Ergebnisse überführt wurden.

Kapitel 4

bündelt die zentralen Erkenntnisse aus allen Pilotprojekten und Lösungen und benennt gemeinsame Erfolgsfaktoren, Herausforderungen und Implikationen für die Replikation.

Kapitel 5

gibt Umsetzungshinweise, einschließlich praktischer Schritte, zentraler Überlegungen und Risikofaktoren für den Einsatz der CE4CE-Lösungen, und schließt mit einem Ausblick auf künftige Anwendungen und Skalierungsmöglichkeiten.



Abbildung 2: CE4CE-Konsortium beim abschließenden Projekttreffen in Maribor, März 2026. Copyright: Universität Maribor.

1. Einleitung

Hauptziel des CE4CE-Projekts

Das Hauptziel des CE4CE-Projekts besteht darin, Aufgabenträgern und Betreibern des öffentlichen Verkehrs den Übergang von linearen Ansätzen des Asset-Managements zu zirkulären, lebenszyklusorientierten Modellen zu ermöglichen. Durch die Beseitigung technischer, organisatorischer und marktbezogener Hemmnisse unterstützt CE4CE die Werterhaltung, die Abfallvermeidung und die effizientere Nutzung von Ressourcen in Infrastruktur, Fahrzeugen und damit verbundenen Anlagen des öffentlichen Verkehrs.

Zu diesem Zweck verbindet CE4CE die Umsetzung von Pilotprojekten mit der Entwicklung anwendungsorientierter Lösungen, die auch über die Projektpartnerschaft hinaus übertragen und angepasst werden können.

Projektpartnerschaft

CE4CE wird von einer transnationalen Partnerschaft umgesetzt, die Aufgabenträger und Betreiber des öffentlichen Verkehrs, Kommunen,

Forschungseinrichtungen und Lösungsanbieter aus mehreren mitteleuropäischen Ländern zusammenbringt. Diese Vielfalt ermöglicht die Erprobung und Weiterentwicklung von Kreislaufwirtschaftsansätzen in unterschiedlichen betrieblichen, organisatorischen und regulatorischen Kontexten und fördert zugleich wechselseitiges Lernen und den Austausch zwischen den Regionen.

Zielsetzung dieses Handbuchs

Ziel dieses Handbuchs ist es, die im Rahmen von CE4CE entwickelten Pilotmaßnahmen und Lösungen zu dokumentieren, zu strukturieren und darzustellen. Es zeigt auf, wie Prinzipien der Kreislaufwirtschaft in der Praxis erprobt wurden und wie die daraus hervorgegangenen Lösungen die Übernahme durch Organisationen des öffentlichen Verkehrs unterstützen können.

Das Handbuch ist als praxisorientiertes Referenzdokument für Aufgabenträger, Betreiber, politische Entscheidungsträger und andere Akteure gedacht, die Kreislaufwirtschaftsansätze umsetzen möchten. Es bietet strukturierte Beschreibungen der Pilotprojekte und Lösungen, hebt zentrale Erkenntnisse hervor und unterstützt die Übertragbarkeit und Replikation in anderen Kontexten

2. Aufbau der CE4CE-Pilotprojekte und Lösungen

Im Rahmen von CE4CE werden Pilotmaßnahmen und Lösungen nach **drei thematischen Aktivitätsclustern** gegliedert und dargestellt. Diese Aktivitätscluster spiegeln unterschiedliche Herausforderungen der Kreislaufwirtschaft im öffentlichen Verkehr wider und bilden den gemeinsamen Rahmen für die Entwicklung der Projektergebnisse.

Jedes Aktivitätscluster umfasst sowohl **Pilotmaßnahmen als auch die zugehörigen Lösungen**. Pilotmaßnahmen werden als praktische Interventionen unter realen Betriebsbedingungen umgesetzt und dienen dazu, Ansätze zu testen, empirische Evidenz zu erzeugen und technische, organisatorische sowie marktbezogene Herausforderungen zu identifizieren. Auf Grundlage der Erfahrungen, Ergebnisse und Erkenntnisse aus der Pilotumsetzung und den gemeinsamen Entwicklungsprozessen ist **jedes Pilotprojekt direkt mit einer entsprechenden Lösung verknüpft**, die die Pilotbefunde in ein übertragbares und anwendungsorientiertes Ergebnis überführt.

Die vier in diesem Handbuch behandelten Themenbereiche sind:

- **A.1: Entwicklung des CE4CE Circularity Compass und der Wissensplattform für den öffentlichen Verkehr**, einschließlich eines strukturierten Bewertungsrahmens zur Kreislaufwirtschaft, einer webbasierten Wissensplattform und eines Online-Second-Hand- und Matchmaking-Marktplatzes, der Zusammenarbeit und Informationsaustausch zwischen Akteuren entlang des Lebenszyklus im öffentlichen Verkehr unterstützt

- **A.2: Entwicklung gemeinsamer digitaler Lösungen zur Ermöglichung und Beschleunigung der Kreislaufwirtschaft im öffentlichen Verkehr**, einschließlich eines gemeinsamen analytischen Rahmens und Pilotprojekten zu vorausschauender Instandhaltung und zur Simulation von E-Korridoren.

- **A.3: Entwicklung von Lösungen zur Werterhaltung und Abfallvermeidung bei der Infrastruktur des öffentlichen Verkehrs**, mit Fokus auf die Wiederverwendung von Infrastrukturkomponenten und Second-Life-Anwendungen energiebezogener Anlagen.

- **A.4: Förderung der Übernahme von Lösungen zur Werterhaltung und Abfallvermeidung bei Fahrzeugen und Rollmaterial**, mit Schwerpunkt auf Wiederaufarbeitung, Wiederverwendung und marktorientierten Mechanismen.

Die aktivitätsbasierte Struktur erleichtert den Leserinnen und Lesern die Navigation zwischen Pilotmaßnahmen und Lösungen innerhalb desselben Themenbereichs und unterstützt ein klares Verständnis dafür, wie die CE4CE-Ergebnisse zur Umsetzung von Prinzipien der Kreislaufwirtschaft in verschiedenen Segmenten des öffentlichen Verkehrs beitragen.

2.1. Verknüpfung der CE4CE-Aktivitäten mit dem AETE-Lebenszyklusrahmenwerk

Die CE4CE-Aktivitäten und die dazugehörigen Pilotmaßnahmen und Lösungen sind auf das **AVOID-EXTEND-TRANSFORM-ENABLE (AETE)**-Lebenszyklusrahmenwerk für die Einführung der Kreislaufwirtschaft im öffentlichen Verkehr ausgerichtet. Dieses Rahmenwerk unterstützt die systematische Identifizierung, wo und wie zirkulärer Wert in den verschiedenen Lebenszyklusphasen von Anlagen des öffentlichen Verkehrs geschaffen oder erhalten werden kann

Jede CE4CE-Aktivität adressiert vorrangig bestimmte **AETE-Handlungsfelder** und trägt zugleich zu ermöglichenden Rahmenbedingungen im Gesamtsystem bei. Die unter den einzelnen Aktivitäten umgesetzten Pilotprojekte operationalisieren die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft, indem sie auf konkrete Lebenszyklusphasen wie Nutzung, Instandhaltung, Wiederverwendung, Wiederaufarbeitung oder Umnutzung abzielen.

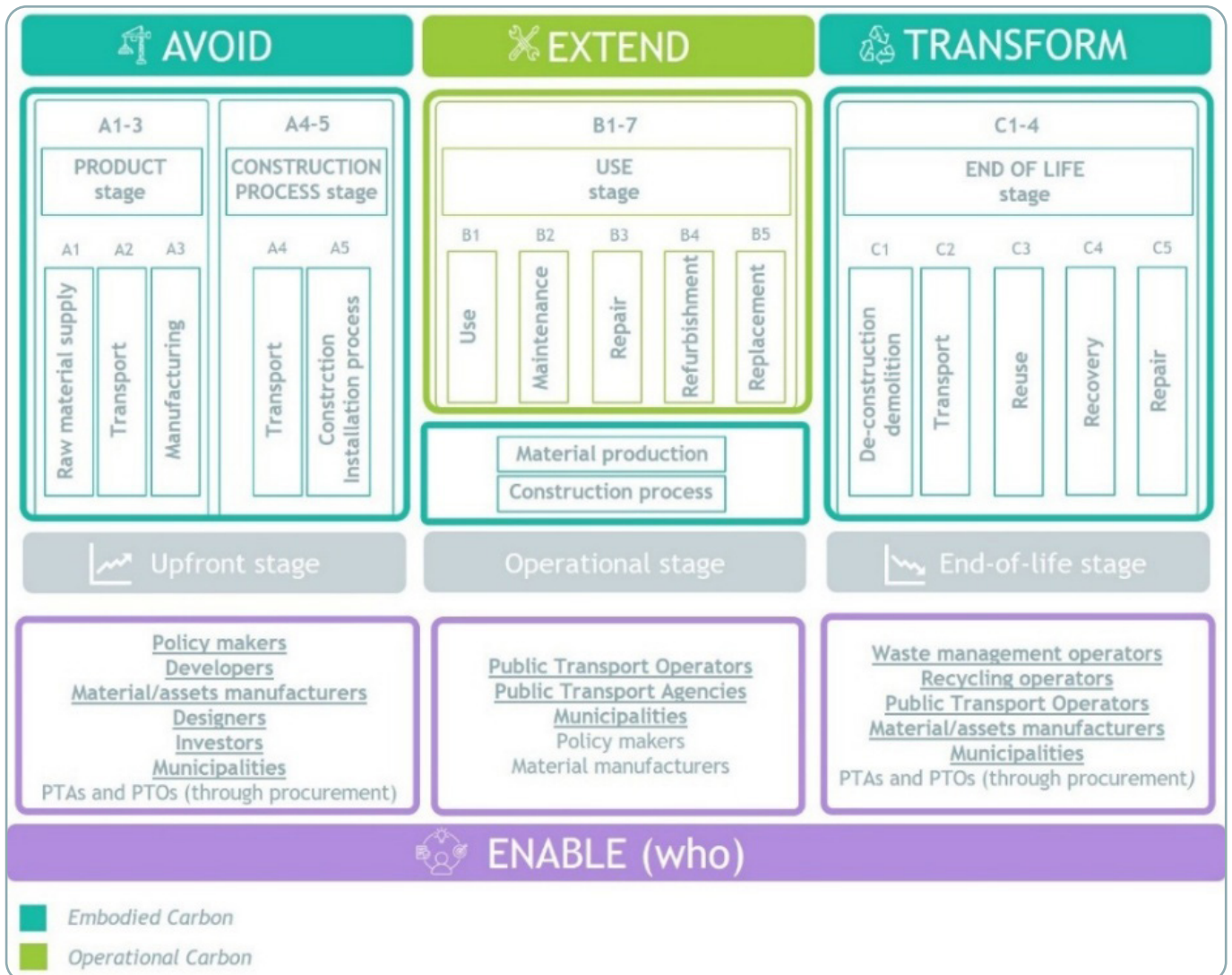


Abbildung 3: Angepasster PTI-Lebenszyklus auf Basis der EN15978-Version.

A.1: Entwicklung des CE4CE Circularity Compass und der Wissensplattform für den öffentlichen Verkehr

Diese Aktivität adressiert in erster Linie die ENABLE-Dimension des AETE-Rahmens. Durch die Entwicklung und Erprobung des CE4CE Circularity Compass und der zugehörigen Wissensplattform schafft sie die systemischen und organisatorischen Voraussetzungen, die für die Einführung der Kreislaufwirtschaft im öffentlichen Verkehr erforderlich sind.

Das Circularity Compass-Pilotprojekt unterstützt **ENABLE** durch die Bereitstellung einer strukturierten **Bewertungsmethodik** zur Identifizierung von Defiziten im Hinblick auf die Kreislaufwirtschaft und zur Gestaltung neuer lebenszyklusbasierter Wertschöpfungsketten. Er erleichtert strategische Reflexion, Stakeholder-Einbindung und fundierte Entscheidungsfindung.

Die Wissensplattform und der Online-Second-Hand- und Matchmaking-Marktplatz stärken die ENABLE-Rahmenbedingungen zusätzlich, indem sie Wissensaustausch, Informationsweitergabe und Zusammenarbeit zwischen Akteuren entlang des Lebenszyklus fördern. Gleichzeitig unterstützt die Matchmaking-Plattform indirekt **EXTEND - Wiederverwendung und Wiederaufarbeitung** durch die Ermöglichung von Marktmechanismen für Second-Life-Komponenten und aufgearbeitete Anlagen.

Diese Aktivität bildet damit die horizontale Grundlage, auf der die stärker technisch ausgerichteten Pilotmaßnahmen und Lösungen aufbauen.

A.2: Digitale Lösungen zur Ermöglichung und Beschleunigung der Kreislaufwirtschaft im öffentlichen Verkehr

Diese Aktivität adressiert in erster Linie die ENABLE-Dimension des AETE-Rahmens. Durch digitale Werkzeuge für vorausschauende Instandhaltung, Simulation und Geschäftsplanung schafft sie die Voraussetzungen, um AVOID- und EXTEND-Maßnahmen über die Lebenszyklen von Infrastruktur und Rollmaterial hinweg zu unterstützen. Pilotprojekte zur vorausschauenden Instandhaltung leisten insbesondere im Handlungsfeld **EXTEND - Instandhaltung und Reparatur** einen Beitrag, indem sie frühe Eingriffe ermöglichen, Ausfälle reduzieren und die Nutzungsdauer von Anlagen verlängern. Die Simulation von E-Korridoren und Energieflüssen unterstützt **AVOID** durch bessere Planungsentscheidungen und die Vermeidung einer Überdimensionierung von Anlagen.

A.3: Lösungen zur Werterhaltung und Abfallvermeidung bei der Infrastruktur des öffentlichen Verkehrs

Diese Aktivität ist hauptsächlich in den Dimensionen **EXTEND** und **TRANSFORM** des AETE-Rahmens verortet. Pilotprojekte zur Wiederverwendung von Trolleybus-Oberleitungsweichen adressieren direkt **EXTEND - Wiederverwendung**, indem sie den in Komponenten gebundenen Material- und Energieaufwand erhalten und Infrastrukturkomponenten über ihre erste Nutzungsphase hinaus im Einsatz halten. Das in Maribor durchgeführte Pilotprojekt zur Nutzung gebrauchter Batterien für Schnellladestationen adressiert **EXTEND - Umnutzung**, da Batterien von ihrer ursprünglichen Traktionsfunktion einer neuen Verwendung als stationärer Energiespeicher zugeführt werden. Gleichzeitig trägt diese Aktivität zu **TRANSFORM** bei, da sie den Boden für neue lebenszyklusbasierte Wertschöpfungsketten und Strategien für das Management am Ende der ersten Lebensphase bereitet.

A.4: Förderung der Übernahme von Lösungen zur Werterhaltung und Abfallvermeidung bei Fahrzeugen und Rollmaterial

Diese Aktivität adressiert in erster Linie **EXTEND - Wiederaufarbeitung und Wiederverwendung** sowie **ENABLE**.

Das Pilotprojekt zur Wiederaufarbeitung von Straßenbahn-Steuergeräten konzentriert sich darauf, die funktionale Lebensdauer von Fahrzeugkomponenten durch Neugestaltung und Wiederaufarbeitung zu verlängern. Die zugehörige Lösung, eine Online-Second-Hand- und Matchmaking-Plattform, stärkt **ENABLE**-Rahmenbedingungen, indem sie Informationsaustausch, Marktentwicklung und Zusammenarbeit zwischen Akteuren entlang des Lebenszyklus unterstützt - Voraussetzungen für skalierbare Wiederverwendungs- und Wiederaufarbeitungspraktiken.

Insgesamt zeigen die CE4CE-Aktivitäten, wie unterschiedliche **AETE-Handlungsfelder im öffentlichen Verkehr komplementär adressiert werden**. Während sich einzelne Pilotprojekte auf bestimmte Stufen wie Instandhaltung, Wiederverwendung oder Umnutzung konzentrieren, trägt ihre kombinierte Wirkung zu einem systemischen Übergang von linearem Asset-Management zu zirkulären, lebenszyklusorientierten Systemen des öffentlichen Verkehrs bei.

Einen Überblick über die thematischen Aktivitätscluster und die zugehörigen Pilot-Lösungs-Paare bietet Tabelle 1, die die Beziehungen zwischen Pilotmaßnahmen, Lösungen und den beteiligten Partnern zusammenfasst.

Aktivität	Pilotprojekt	Lösung	Lösungstyp	Primäre AETE-Maßnahme
A.1 Entwicklung des CE4CE Circularity Compass und der Wissensplattform für den öffentlichen Verkehr	P.1 Circularity Compass für den öffentlichen Verkehr - Bewertung von Defiziten der Kreislaufwirtschaft und Gestaltung neuer Wertschöpfungsketten zur Steigerung der Ressourceneffizienz	S.1 CE4CE-Wissensplattform zur Kreislaufwirtschaft im öffentlichen Verkehr	Digitale Plattform / Wissenshub	ENABLE - Systemwissen & Zusammenarbeit
		S.2 Online-Second-Hand- und Matchmaking-Markt für gebrauchte Teile, Produkte und Informationsaustausch	Digitaler Marktplatz / Matchmaking-Tool	EXTEND - Ermöglichung von Wiederverwendung / Wiederaufarbeitung
A.2 Entwicklung gemeinsamer digitaler Lösungen zur Ermöglichung und Beschleunigung der Kreislaufwirtschaft im öffentlichen Verkehr	P.2 & P.3 Digitale Optimierung von Infrastruktur und Fahrzeugen durch vorausschauende Instandhaltung	S.3 Module für die vorausschauende Instandhaltung von Infrastruktur und Rollmaterial	Monitoringsystem / digitale Lösung	EXTEND - Instandhaltung / Reparatur
	P.4 Simulation eines E-Korridors und von Energieflüssen zur Abbildung zirkulärer Szenarien für den Ausbau der Elektrifizierung (Busspur, Stromversorgung und In-Motion Charging)	S.4 Geschäftsplanungstool für elektrifizierte Flotten und Infrastruktur des öffentlichen Verkehrs	Planungsinstrument / Entscheidungsunterstützung	AVOID - vorgelagerte Planung / Systemoptimierung
A.3 Entwicklung von Lösungen zur Werterhaltung und Abfallvermeidung bei der Infrastruktur des öffentlichen Verkehrs	P.5 Demonstration der Machbarkeit der Wiederverwendung von Trolleybus-Oberleitungsweichen	S.5 Definition von Übernahmekriterien für die Wiederverwendung von Trolleybus-Oberleitungsweichen	Methodik / Entscheidungsrahmen	EXTEND - Wiederverwendung
	P.6 Analyse von Anwendungen gebrauchter Batterien zur Speicherung erneuerbarer Energie für den Betrieb eines Schnelladers als Beispiel für eine strategische Ausrichtung auf Kreislaufwirtschaft	S.6 Übertragbare Geschäftsmodelle für die Second-Life-Nutzung von Traktionsbatterien als stationäre Speicher	Geschäftsmodell / Umsetzungsrahmen	EXTEND - Umnutzung
A.4 Förderung der Übernahme von Lösungen zur Werterhaltung und Abfallvermeidung bei Fahrzeugen und Rollmaterial	P.7 Konzept für Straßenbahn-Steuergeräte im Rahmen der Wiederaufarbeitung von Straßenbahnen	Förderung und Skalierung unterstützt durch S.2 Online-Second-Hand- und Matchmaking-Markt		EXTEND - Instandsetzung / Wiederaufarbeitung

Tabelle 1: Überblick über die CE4CE-Pilotprojekte und die zugehörigen Lösungen nach Aktivität.

3. CE4CE-Pilotprojekte und Lösungen

Pilotmaßnahmen sind ein zentrales Umsetzungselement des CE4CE-Projekts. Sie übertragen Konzepte, Methoden und Werkzeuge der Kreislaufwirtschaft in konkrete Anwendungen unter realen Betriebsbedingungen und ermöglichen es Aufgabenträgern, Betreibern und weiteren Akteuren des öffentlichen Verkehrs, Ansätze zu testen, die Machbarkeit zu bewerten und praktische Erfahrungen zu sammeln.

Die im Rahmen von CE4CE umgesetzten Pilotprojekte erfüllen mehrere Funktionen. Sie liefern empirische Evidenz zu den technischen, organisatorischen und wirtschaftlichen Auswirkungen von Kreislaufwirtschaftspraktiken, unterstützen das Lernen zwischen den Partnern und verringern Unsicherheiten im Zusammenhang mit Umsetzung und Übernahme. Zugleich fungieren die Pilotmaßnahmen als Brücke zwischen strategischen Zielen und der Entwicklung von Lösungen, indem sie die Erkenntnisse und Daten erzeugen, die erforderlich sind, um die Pilotenerfahrung in übertragbare und skalierbare Lösungen zu überführen.

Im Rahmen von CE4CE konzentrieren sich die Pilotmaßnahmen auf eine Reihe definierter **Pilot-Schwerpunktthemen**, die die zentralen Hebel der Kreislaufwirtschaft widerspiegeln, die das Projekt über die Lebenszyklen von Infrastruktur und Rollmaterial im öffentlichen Verkehr adressiert:

- Bewertung der Kreislaufwirtschaft und Gestaltung neuer lebenszyklusbasierter Wertschöpfungsketten
- Vorausschauende Instandhaltung der Infrastruktur und des rollenden Materials im öffentlichen Verkehr
- Digitale Simulation elektrifizierter Korridore des öffentlichen Verkehrs und von Energieflüssen
- Wiederverwendung von Infrastrukturkomponenten des öffentlichen Verkehrs
- Second-Life-Nutzung von Traktionsbatterien als stationäre Energiespeicher
- Wiederaufarbeitung und Wiederverwendung von Komponenten des rollenden Materials

Diese Schwerpunktthemen werden durch **sieben Pilotmaßnahmen** adressiert, die von Aufgabenträgern und Betreibern des öffentlichen Verkehrs in verschiedenen mitteleuropäischen Städten umgesetzt werden:

- Ein Pilotprojekt zum Circularity Compass für den öffentlichen Verkehr, koordiniert vom Verein trolley:motion (mit Unterstützung von Rupprecht Consult), entwickelte und erprobte ein strukturiertes Bewertungsinstrument, um Defizite im Bereich der Kreislaufwirtschaft zu identifizieren und neue Wertschöpfungsketten zur Steigerung der Ressourceneffizienz zu gestalten. Das Pilotprojekt umfasste die Entwicklung einer webbasierten Schnittstelle und ihre praktische Anwendung innerhalb der Projektpartnerschaft.
- In **Leipzig**, Deutschland, setzte der lokale Betreiber des öffentlichen Verkehrs LVB ein Pilotprojekt zur **vorausschauenden Instandhaltung**, bei dem digitale

Zustandsüberwachung auf ausgewählte Infrastrukturkomponenten und Fahrzeuge angewendet wurde, um datenbasierte Instandhaltungsansätze zu testen und die Verlängerung der Nutzungsdauer zu unterstützen.

- In **Bergamo**, Italien, wurde von ATB ein ähnliches **Pilotprojekt zur vorausschauenden Instandhaltung** in einem anderen betrieblichen Kontext umgesetzt, sodass Methoden, Datenanforderungen und organisatorische Voraussetzungen netzübergreifend verglichen werden konnten
- In **Gdynia**, Polen, setzte der Betreiber des öffentlichen Verkehrs PKA ein Pilotprojekt zur **Simulation elektrifizierter Korridore des öffentlichen Verkehrs** um, um Energieflüsse zu analysieren und zirkuläre Elektrifizierungsszenarien einschließlich In-Motion Charging und Elektrifizierung von Busspuren zu bewerten.
- In **Szeged**, Ungarn, setzte der Betreiber des öffentlichen Verkehrs SZKT ein Pilotprojekt um, das die **Wiederverwendung von Trolleybus-Oberleitungsweichen** demonstrierte und sich auf die Verlängerung der Nutzungsdauer stark beanspruchter Infrastrukturkomponenten sowie auf die Verringerung von Materialabfällen konzentrierte.
- In **Maribor**, Slowenien, analysierte die Stadtgemeinde Maribor - MOM die **Second-Life-Nutzung von Traktionsbatterien** als stationäre Energiespeicher zur Unterstützung erneuerbar gespeister Schnellladeinfrastruktur und untersuchte dabei technische Machbarkeit und Integrationsaspekte
- In **Szeged** setzte SZKT außerdem ein zusätzliches Pilotprojekt zur **Wiederaufarbeitung und Neugestaltung von Straßenbahn-Steuergeräten** um, das darauf abzielte, die Nutzungsdauer von Komponenten zu verlängern und Wiederverwendung durch angepasstes Design und Informationsaustausch zu ermöglichen

Während Pilotmaßnahmen auf die Erprobung und Validierung von Ansätzen in realen Betriebsumgebungen ausgerichtet sind, stellen Lösungen konsolidierte, anwendungsorientierte Ergebnisse dar, die auf der Umsetzung der Pilotprojekte und gemeinsamer analytischer Arbeit basieren.

Lösungen überführen die Erfahrungen aus den Pilotprojekten in **strukturierte Werkzeuge, Methoden, Kriterien und Geschäftsmodelle**, die in anderen Kontexten des öffentlichen Verkehrs übertragen, repliziert und skaliert werden können. Jede Lösung ist mit einer oder mehreren Pilotmaßnahmen innerhalb desselben thematischen Aktivitätsbereichs verknüpft und baut auf empirischer Evidenz, Stakeholder-Rückmeldungen und iterativen Verfeinerungsprozessen auf.

Für jeden Aktivitätsbereich werden die Pilotmaßnahmen gemeinsam mit den zugehörigen Lösungen beschrieben, wobei der Weg von Erprobung und Validierung bis hin zu Konsolidierung und Transfer nachvollziehbar gemacht wird

3.1. Aktivität A.1: Entwicklung des CE4CE Circularity Compass und der Wissensplattform für den öffentlichen Verkehr

Obwohl diese Aktivität formal nicht zum Arbeitspaket „Demonstration, wie der öffentliche Verkehr kreislaufforientiert werden kann“ gehört, wurde der Circularity Compass durch einen pilotähnlichen Testprozess umgesetzt und validiert. Das Instrument wurde entwickelt und anschließend gemeinsam mit Akteuren des öffentlichen Verkehrs in Workshops, Umfragen und Validierungsübungen getestet, an denen Betreiber, Aufgabenträger, Forschende und

Industrievertreter beteiligt waren. Diese Aktivitäten ermöglichten eine praktische Überprüfung der Methodik und eine Verfeinerung des Instruments auf Grundlage realer betrieblicher Rückmeldungen. Der Circularity Compass stellt daher sowohl ein technisches Pilotprojekt als auch eine Lösung zur Unterstützung des Übergangs zu zirkulären Systemen des öffentlichen Verkehrs dar, auch wenn er organisatorisch im methodischen Arbeitspaket des Projekts und nicht im Demonstrationsarbeitspaket verortet ist.

3.1.1. Pilotprojekt P.1: Circularity Compass für den öffentlichen Verkehr

Kurzbeschreibung des Pilotprojekts

Das Pilotprojekt Circularity Compass wurde entwickelt, um eine zentrale Herausforderung beim Übergang zu zirkulären Systemen des öffentlichen Verkehrs anzugehen: das Fehlen praktischer Werkzeuge, die Organisationen dabei helfen zu verstehen, wo und wie Prinzipien der Kreislaufwirtschaft in den täglichen Betrieb und in die strategische Planung integriert werden können.

Obwohl Konzepte der Kreislaufwirtschaft im Verkehrssektor zunehmend diskutiert werden, fehlen Aufgabenträgern und Betreibern des öffentlichen Verkehrs häufig strukturierte Ansätze, um diese Prinzipien in konkrete Maßnahmen zu überführen. Der Circularity Compass soll daher ein praktisches Orientierungsinstrument bereitstellen, mit dessen Hilfe Organisationen ihre aktuellen kreislaufforientierten Praktiken bewerten und Verbesserungsmöglichkeiten im gesamten System des öffentlichen Verkehrs identifizieren können.

Ziel des Pilotprojekts war es, eine Methodik zu entwickeln und zu validieren, mit der Akteure des öffentlichen Verkehrs Praktiken der Kreislaufwirtschaft über den gesamten Lebenszyklus von Infrastruktur, Fahrzeugen und Energiesystemen hinweg bewerten können. Anders als Infrastruktur- oder Technologiepilotprojekte innerhalb von CE4CE stellt der Circularity Compass eine wissensbasierte Lösung dar, die den zirkulären Wandel durch besseres Systemverständnis und fundiertere Entscheidungen ermöglichen soll.

Die Lösung Circularity Compass

Der [Circularity Compass](#) ist ein online verfügbares [Selbstbewertungsinstrument](#) auf der CE4CE-Wissensplattform. Er bietet einen strukturierten Rahmen, mit dem Organisationen des öffentlichen Verkehrs Praktiken der Kreislaufwirtschaft über verschiedene Komponenten ihrer Systeme hinweg bewerten können.

Die Bewertung umfasst vier zentrale Bereiche von Systemen des öffentlichen Verkehrs: Flotten, einschließlich Fahrzeuge und Batterien; Infrastruktur; Energiesysteme; sowie Governance, die organisatorische und ermöglichende Rahmenbedingungen einschließt. Durch die gemeinsame Betrachtung dieser Bereiche bildet das Instrument den systemischen Charakter der Kreislaufwirtschaft im öffentlichen Verkehr ab.

Der Rahmen folgt der zirkulären Lebenszykluslogik Avoid - Extend - Transform - Enable (AETE). In der Praxis bedeutet dies, dass Organisationen dazu angeleitet werden zu reflektieren, wie sie den Ressourcenverbrauch durch bessere Planung und Beschaffung verringern, die Nutzungsdauer von Anlagen durch Instandhaltung und Wiederaufarbeitung verlängern, Anlagen durch Wiederverwendung oder Umnutzung transformieren und die organisatorischen Voraussetzungen schaffen können, die für eine kreislaufforientierte Umsetzung erforderlich sind.

Kernstück des Instruments ist eine strukturierte Selbstbewertungsumfrage, die zentrale Lebenszyklusphasen von der Herstellung und Beschaffung bis hin zu Betrieb, Instandhaltung und End-of-Life-Management abdeckt. Die Ergebnisse liefern einen klaren Überblick über aktuelle kreislaufforientierte Praktiken und heben Bereiche hervor, in denen Organisationen ihre kreislaufforientierten Strategien und Lösungen weiterentwickeln können.

10 R-principles for circular public transport systems

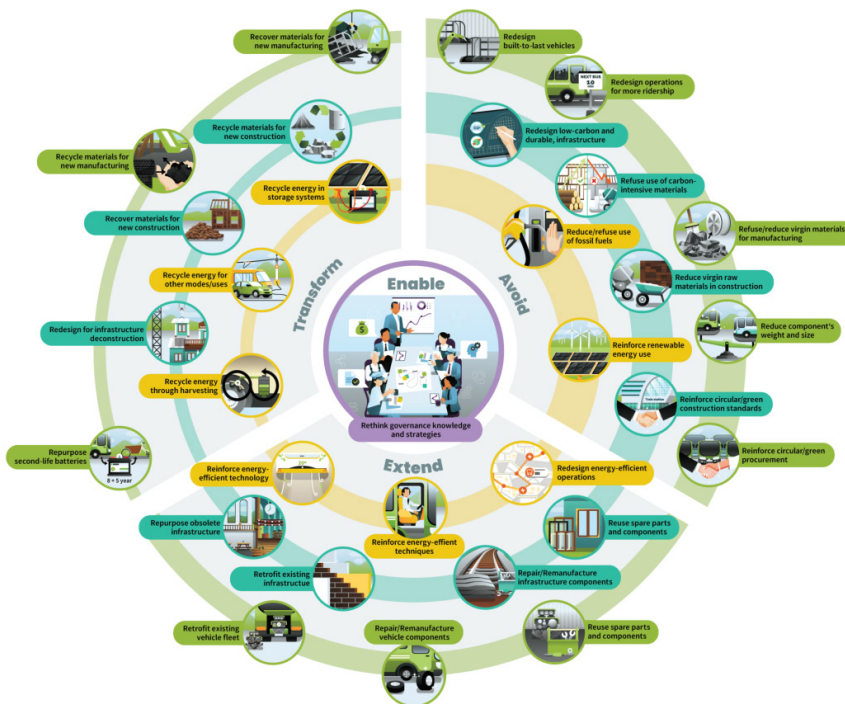


Abbildung 4: Anpassung der 10R-Prinzipien der Kreislaufwirtschaft für Systeme des öffentlichen Verkehrs.

Erforderliche Ressourcen

Für die Umsetzung des Circularity Compass werden vor allem organisatorische und analytische Ressourcen benötigt. Er stützt sich auf die Einbindung relevanter Akteure, fachliche Moderation und Zugang zu betrieblichem Wissen innerhalb von Organisationen des öffentlichen Verkehrs.

Die Testphase wurde in Form von Workshops, Expertenconsultationen und Selbstbewertungsumfragen durchgeführt, an denen Betreiber, Aufgabenträger und Forschende aus dem öffentlichen Verkehr beteiligt waren. Dieser kollaborative Prozess stellte sicher, dass das Instrument reale betriebliche Bedingungen widerspiegelt und in unterschiedlichen organisatorischen Kontexten anwendbar ist.

Erwartete Ergebnisse/Nutzen

Der Circularity Compass ermöglicht es Organisationen des öffentlichen Verkehrs, Defizite im Hinblick auf die Kreislaufwirtschaft zu identifizieren, ihre Bereitschaft für die Einführung entsprechender Ansätze zu bewerten und potenzielle Verbesserungsbereiche entlang des Lebenszyklus des öffentlichen Verkehrs zu erkunden.

Indem komplexe Informationen in einen klaren Bewertungsrahmen überführt werden, unterstützt das Instrument Sensibilisierung und strategische Planung. Es hilft Organisationen, besser zu verstehen, wie Prinzipien der Kreislaufwirtschaft in der Praxis angewendet werden können, insbesondere in Bereichen wie Infrastrukturmanagement, Flottenbetrieb und Energiesystemen.



Abbildung 5: Benutzeroberfläche des Online-Selbstbewertungsinstrumentes CE4CE Circularity Compass.

Skalierbarkeit und künftiges Entwicklungspotenzial

Der Circularity Compass bietet einen skalierbaren Rahmen, der den Übergang zu kreislauforientierten Praktiken im Sektor des öffentlichen Verkehrs unterstützt. Als Instrument zur Sensibilisierung und Selbstbewertung hilft er Organisationen, Defizite im Hinblick auf die Kreislaufwirtschaft zu identifizieren und Maßnahmen in den Bereichen Infrastruktur, Flotten und Energiesysteme zu priorisieren.

Die Ergebnisse der Bewertung können als

Ausgangspunkt für vertiefte Analysen dienen, etwa Lebenszyklusanalysen, Strategien für kreislauforientierte Beschaffung oder Planungen zur Ressourceneffizienz. Gleichzeitig hängen die Weiterentwicklung und praktische Relevanz des Instruments stark von der aktiven Beteiligung der Akteure und vom kontinuierlichen Einbringen von sektoralem Wissen und Erfahrungen ab.

Bei anhaltender Beteiligung der Akteure kann sich der Circularity Compass zu einer umfassenderen Wissens- und Benchmarking-Plattform entwickeln, die den zirkulären Wandel in Systemen des öffentlichen Verkehrs unterstützt

3.1.2. Lösung S.1: CE4CE-Wissensplattform für Kreislaufwirtschaft im öffentlichen Verkehr

Kurzbeschreibung der Lösung

Die CE4CE-Wissensplattform ist ein Online-Wissenshub, der den Übergang zu kreislauforientierten Praktiken im öffentlichen Verkehr unterstützen soll. Sie bietet ein strukturiertes digitales Umfeld, in dem Akteure des öffentlichen Verkehrs auf Werkzeuge, Best Practices, Methoden und Lernmaterialien rund um die Kreislaufwirtschaft in Verkehrssystemen zugreifen können.

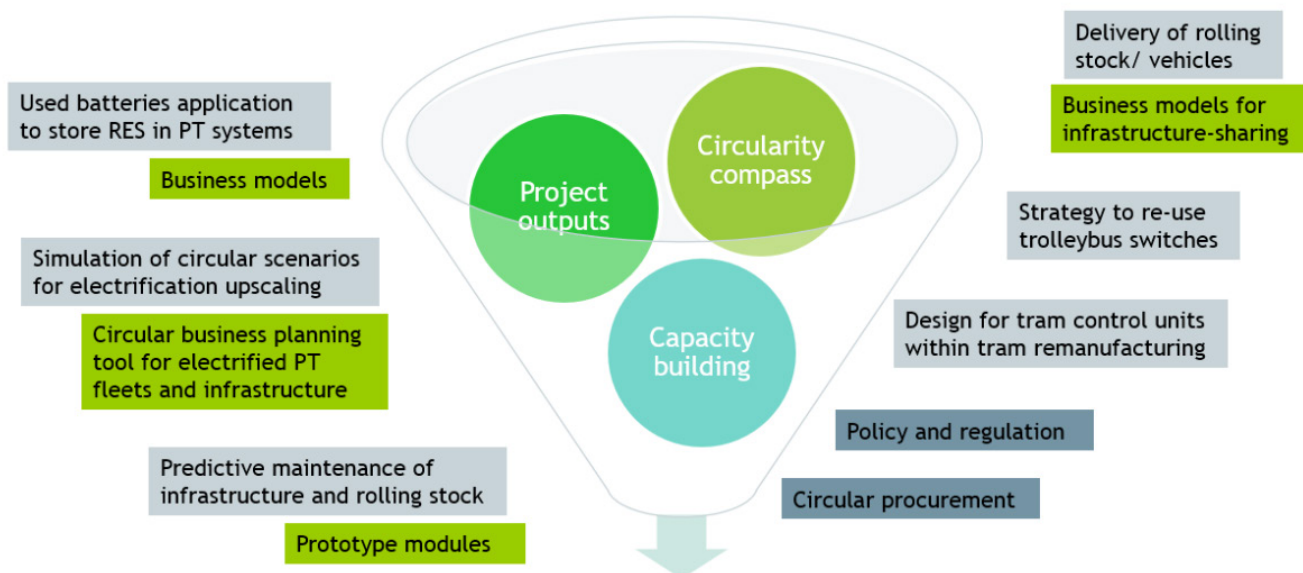
Die Plattform adressiert eine zentrale Herausforderung, die im Projekt identifiziert wurde: Wissen zu zirkulären Lösungen im öffentlichen Verkehr ist häufig fragmentiert und für Praktiker schwer zugänglich. Indem relevante Ressourcen gebündelt und mit praktischen Projektergebnissen verknüpft werden, unterstützt die Plattform Kompetenzaufbau, Wissensaustausch und die breitere Übernahme zirkulärer Lösungen.

Die Plattform ist öffentlich zugänglich unter:

<https://circularity4publictransport.eu/>

Ziele der Lösung

Hauptziel der CE4CE-Wissensplattform ist es, die Fähigkeiten der Akteure des öffentlichen Verkehrs zur Umsetzung von Prinzipien der Kreislaufwirtschaft zu stärken. In der Praxis fungiert die Plattform als zentraler Zugangspunkt, an dem Nutzer Werkzeuge und Ressourcen zur Kreislaufwirtschaft aufrufen, praktische Beispiele und erprobte Lösungen erkunden und besser verstehen können, wie identifizierte Lücken adressiert werden können. Sie unterstützt den Wissenstransfer innerhalb des Sektors und hilft Organisationen zugleich, verfügbare Ansätze und Umsetzungswege zu erschließen.



CE4CE knowledge platform matches new skills with knowledge

Abbildung 6: Konzeptionelle Struktur der CE4CE-Wissensplattform, die zirkuläre Lösungen, Werkzeuge und Kompetenzaufbau miteinander verbindet.

Kernkonzept der Lösung

Die CE4CE-Wissensplattform wurde parallel zum **Circularity Compass** entwickelt, der als Selbstbewertungsinstrument zur Bewertung von Praktiken der Kreislaufwirtschaft in Organisationen des öffentlichen Verkehrs dient.

Die beiden Lösungen sind konzeptionell miteinander verknüpft:

- der **Circularity Compass** ermöglicht es Organisationen, ihre Leistung im Hinblick auf die Kreislaufwirtschaft zu bewerten und Verbesserungsbereiche zu identifizieren
- die **Wissensplattform** stellt die Ressourcen, Werkzeuge und Beispiele bereit, die helfen, die identifizierten Lücken zu schließen

Auf diese Weise verbindet die Plattform **Bewertungsergebnisse mit praktischer Umsetzungsunterstützung**.

Das Konzept der Plattform basiert auf den **10R-Prinzipien der Kreislaufwirtschaft**, angepasst an den Kontext des öffentlichen Verkehrs. Diese Prinzipien steuern die Strukturierung der Wissensressourcen über zentrale Komponenten von Systemen des öffentlichen Verkehrs hinweg, etwa Infrastruktur, Fahrzeuge, Energiesysteme und Governance

Die Wissensplattform ist in fünf Hauptkomponenten gegliedert:

1. **Competence Map** - identifiziert die zentralen Fähigkeiten und Wissensbestände, die für die Umsetzung von Prinzipien der Kreislaufwirtschaft im öffentlichen Verkehr erforderlich sind.
2. **Circularity Compass** - eine Online-Selbstbewertungsumfrage, mit der Organisationen ihren Stand im Hinblick auf die Kreislaufwirtschaft bewerten können.
3. **Best Practices** - eine Sammlung von Fallstudien, die zirkuläre Lösungen im Sektor veranschaulichen.
4. **Knowledge Hub** - ein Repositorium aus Werkzeugen, Leitfäden, Berichten und Methoden zur Unterstützung kreislauforientierter Planung, des Betriebs und der Instandhaltung.
5. **Matchmaking Forum** - ein geplanter digitaler Marktplatz, der den Austausch von Ersatzteilen und Ausrüstung zwischen Organisationen des öffentlichen Verkehrs ermöglicht.

Mit dieser Struktur verknüpft die Plattform die **Bewertung der Kreislaufwirtschaft, Wissensressourcen und praktische Lösungen** und schafft damit ein umfassendes Unterstützungsumfeld für Organisationen, die zirkuläre Systeme des öffentlichen Verkehrs umsetzen.

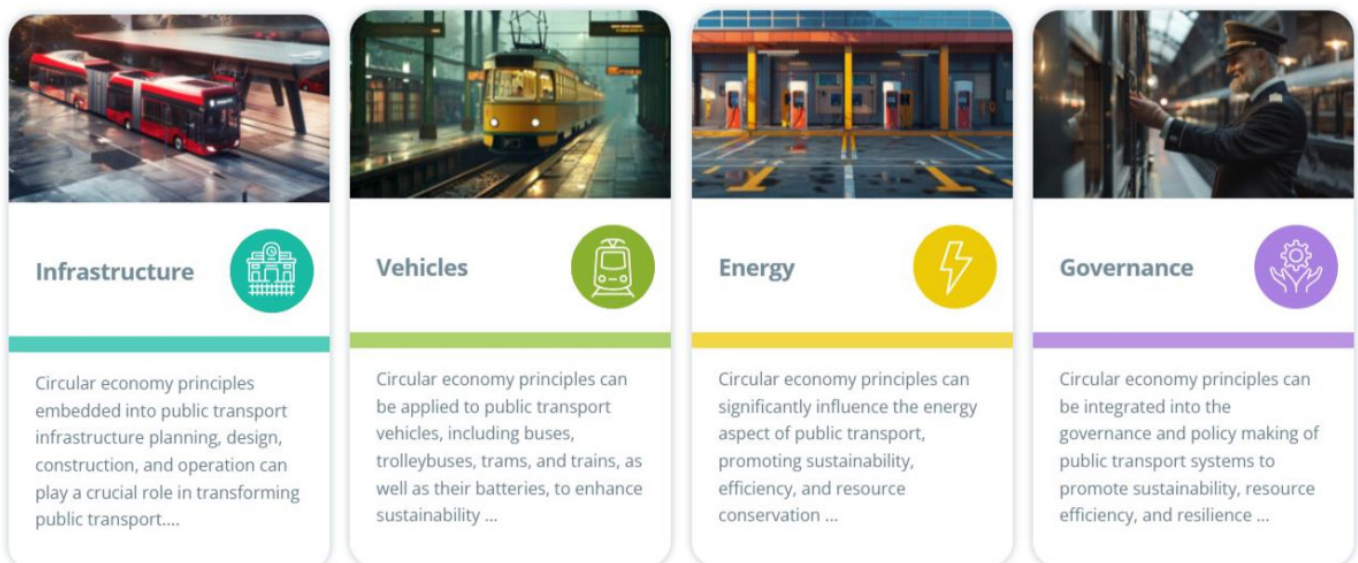


Abbildung 7: Zentrale Kompetenzbereiche der CE4CE-Wissensplattform: Infrastruktur, Fahrzeuge, Energie und Governance.

Fazit zur Lösung

Die CE4CE-Wissensplattform bietet ein strukturiertes und skalierbares Umfeld zur Unterstützung des Übergangs zu zirkulären Systemen des öffentlichen Verkehrs. Durch die Verknüpfung von Bewertung (Circularity Compass), Wissensressourcen und praktischen Lösungen ermöglicht sie es den Akteuren, vom Bewusstsein zur Umsetzung überzugehen. Ihr langfristiger Wert hängt von der kontinuierlichen Weiterentwicklung der Inhalte, der Beteiligung der Akteure und der Anbindung an sektorale Initiativen ab, sodass sie sich zu einem zentralen Referenzpunkt für Kreislaufwirtschaftspraktiken im öffentlichen Verkehr entwickeln kann.

3.1.3. Lösung S.2: Online-Second-Hand- und Matchmaking-Marktplatz

Kurzbeschreibung der Lösung

Die Lösung führt eine digitale Matchmaking-Plattform ein, die es Akteuren des öffentlichen Verkehrs ermöglicht, Informationen über gebrauchte Fahrzeuge, Ersatzteile und Infrastrukturkomponenten auszutauschen und damit deren Wiederverwendung und Wiederaufarbeitung zu unterstützen.

Die als funktionales Modul der CE4CE-Wissensplattform entwickelte Lösung ergänzt deren Rolle in den Bereichen Wissen und

Kompetenzaufbau um ein praktisches Instrument zur Identifizierung und Realisierung zirkulärer Anwendungsfälle. Sie adressiert den Mangel an strukturierten Austauschmechanismen im Sektor, wo Chancen zur Wiederverwendung aufgrund begrenzter Sichtbarkeit und fragmentierter Kommunikation oft ungenutzt bleiben.

Das Matchmaking Forum ist öffentlich zugänglich unter: <https://circularity4publictransport.eu/matchmaking-forum/>

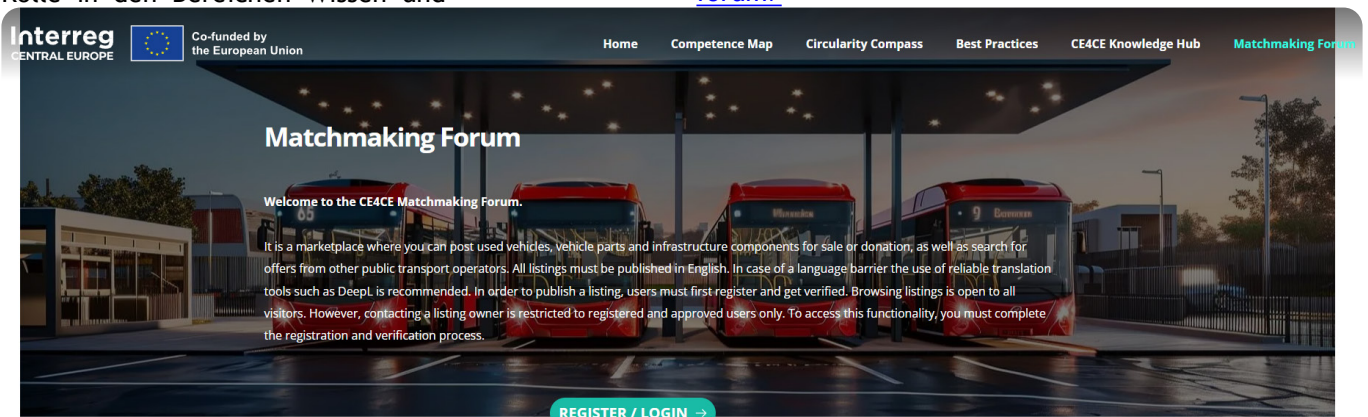


Abbildung 8: Benutzeroberfläche des CE4CE Matchmaking Forum - Startseite.

Ziele der Lösung

Hauptziel der Lösung ist es, den strukturierten Austausch gebrauchter Anlagen im Sektor des öffentlichen Verkehrs zu ermöglichen und die Sichtbarkeit wiederverwendbarer Komponenten zu erhöhen.

Durch die Verbesserung des Informationsflusses und die Unterstützung von Verbindungen zwischen Betreibern, Aufgabenträgern und Lieferanten trägt die Plattform zu Praktiken der Wiederverwendung und Wiederaufarbeitung bei, verringert die vorschnelle Entsorgung von Assets und stärkt die Zusammenarbeit innerhalb des Sektors.

Kernkonzept der Lösung

Die Lösung basiert auf einem digitalen Matchmaking-Forum, das Angebot und Nachfrage nach gebrauchten Anlagen des öffentlichen Verkehrs zusammenführt. Seine Funktionsweise folgt einem einfachen Prozess:

1. Organisationen veröffentlichen Angebote oder Gesuche für Fahrzeuge, Komponenten oder Infrastrukturelemente
2. Nutzer suchen und filtern Inserate anhand relevanter Kriterien
3. Interessierte Parteien treten über die Plattform in Kontakt

Die Plattform fungiert als Instrument für Informationsaustausch und Matchmaking, nicht als transaktionales System. Indem sie Informationslücken verringert und die Transparenz erhöht, schafft sie die Voraussetzungen dafür, dass Wiederverwendungs- und Wiederaufarbeitungspraktiken im Sektor skaliert werden können.

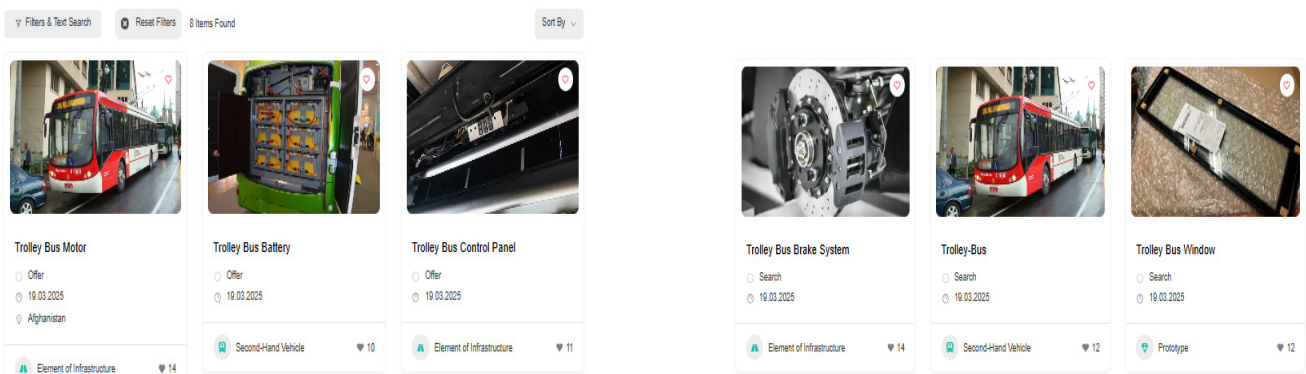


Abbildung 9: Beispielhafte Inserate im CE4CE Matchmaking Forum für gebrauchte Fahrzeuge, Komponenten und Infrastrukturelemente.

Fazit zur Lösung

Das Matchmaking Forum ist ein praktisches unterstützendes Instrument, das die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft unterstützt, indem es Wiederverwendung erleichtert und die Lebensdauer von Anlagen des öffentlichen Verkehrs verlängert. Seine Wirksamkeit steigt mit einer breiteren

Beteiligung, da eine höhere Zahl von Nutzern die Sichtbarkeit und die Matching-Möglichkeiten verbessert.

Bei anhaltender Beteiligung der Akteure und weiterer Entwicklung der Funktionen hat die Plattform das Potenzial, zu einem wichtigen Mechanismus für die Unterstützung zirkulärer Wertschöpfungsketten im öffentlichen Verkehr zu werden.

3.2. Aktivität A.2: Entwicklung gemeinsamer digitaler Lösungen zur Ermöglichung und Beschleunigung der Kreislaufwirtschaft im öffentlichen Verkehr

Diese Aktivität konzentriert sich auf den Einsatz digitaler Werkzeuge, um eine zirkuläre und ressourceneffiziente Bewirtschaftung von Infrastruktur und Rollmaterial im öffentlichen Verkehr zu unterstützen. Untersucht wird, wie datenbasierte Überwachung und Simulation die Instandhaltungspraxis, die Infrastrukturplanung und die betriebliche Effizienz über den gesamten Systemlebenszyklus hinweg verbessern können.

Im Rahmen dieser Aktivität wurden drei Pilotprojekte in Leipzig, Bergamo und Gdynia umgesetzt. Die Pilotprojekte in Leipzig und Bergamo erproben

vorausschauende Instandhaltung mittels digitaler Zustandsüberwachung, während das Pilotprojekt in Gdynia Modellierung mit digitalen Zwillingen und Energieflusssimulation einsetzt, um die Planung elektrifizierter Korridore des öffentlichen Verkehrs zu unterstützen.

Die Ergebnisse und Erfahrungen aus diesen Pilotprojekten bilden die Grundlage für die Entwicklung einer gemeinsamen Lösung mit modularen digitalen Werkzeugen für die vorausschauende Instandhaltung und die zirkuläre Planung von Systemen des öffentlichen Verkehrs, die im folgenden Abschnitt vorgestellt wird.

3.2.1. Pilotprojekt P.2: Digitale Optimierung von Infrastruktur und Fahrzeugen durch vorausschauende Instandhaltung (Leipzig, Deutschland)

Kurzbeschreibung des Pilotprojekts

Dieses Pilotprojekt konzentriert sich auf die Umsetzung von Ansätzen der vorausschauenden Instandhaltung für die Infrastruktur und das rollende Material des öffentlichen Verkehrs mithilfe digitaler Zustandsüberwachung. Das von den Leipziger Verkehrsbetrieben (LVB) in Leipzig umgesetzte Pilotprojekt zielt darauf ab, von reaktiver und zeitbasierter Instandhaltung zu datenbasierter, vorausschauender Instandhaltung überzugehen, um die Nutzungsdauer von Anlagen zu verlängern, ungeplante

Ausfälle zu reduzieren und ressourcenintensive Eingriffe zu minimieren.

Drei Straßenbahnfahrzeuge wurden mit Sensoren, Kameras und Lasersystemen ausgestattet, um während des regulären Betriebs Gleise und Oberleitungen entlang von 14 km der Linie 1 zu überwachen. Die erhobenen Daten werden analysiert, um frühe Verschleißanzeichen zu erkennen und gezielte Instandhaltungsmaßnahmen zu ermöglichen; zudem wurde auch die Überwachung des Energieverbrauchs untersucht.



Laser & Point-cloud scanner



Accelerometere



Kamera

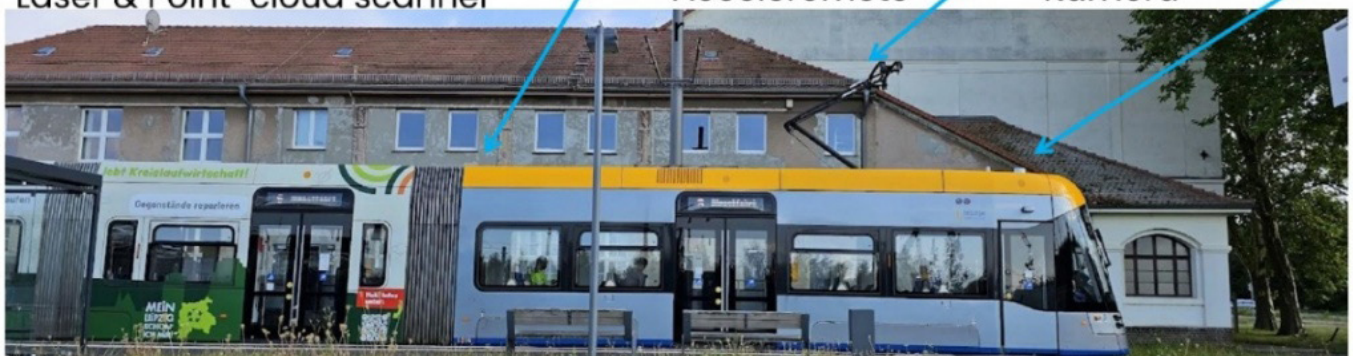


Abbildung 10: Teil des in den Straßenbahnen installierten Schwingungsüberwachungssystems (PantoHealth)

Erforderliche Ressourcen

Für die Umsetzung waren Sensorsysteme, Datenverarbeitungsinfrastruktur und analytische Software erforderlich, ergänzt durch Koordination zwischen dem Betreiber, Technologieanbietern und

Projektpartnern. Hinzu kamen Mitarbeiterschulungen, die Integration in Arbeitsabläufe sowie die Einhaltung von Bahnstandards und Zertifizierungsverfahren für den Einsatz unter realen Betriebsbedingungen.

Das Projekt

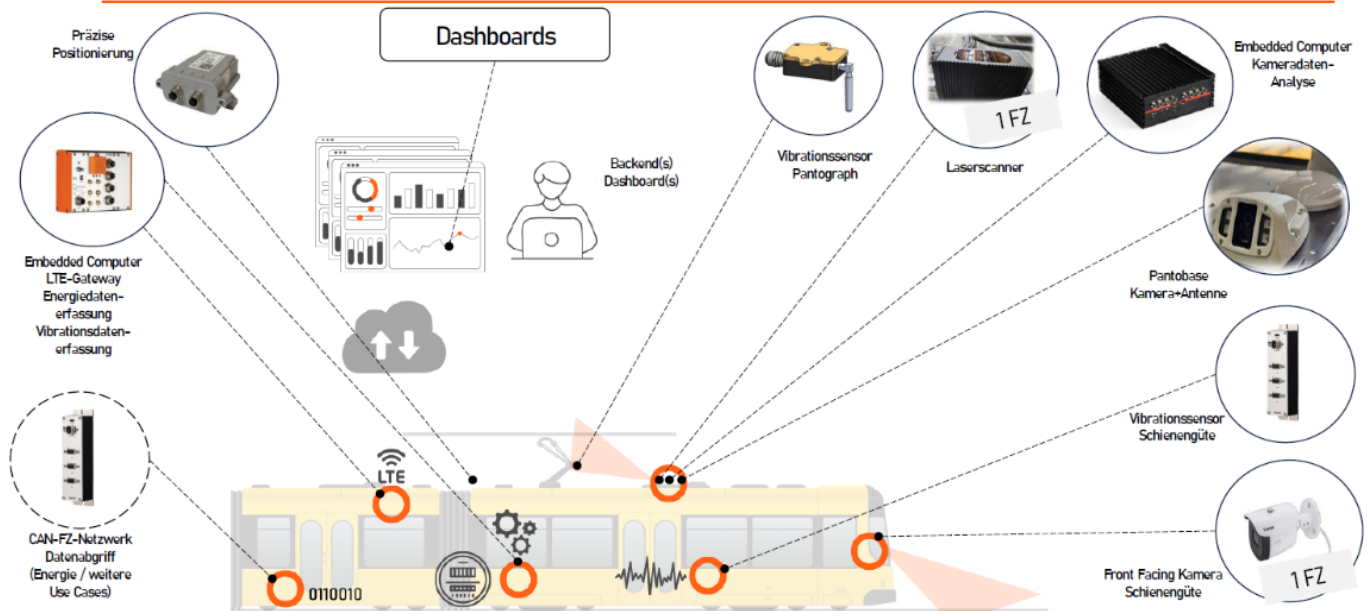


Abbildung 11: Überblick über das im Leipziger Pilotprojekt umgesetzte Setup zur Überwachung der vorausschauenden Instandhaltung

Erfolgsnachweise

Das Pilotprojekt bestätigte, dass eine kontinuierliche fahrzeugbasierte Überwachung unter realen Betriebsbedingungen (Juni 2024 bis Februar 2025) machbar und wirksam ist und die frühzeitige Erkennung von Infrastrukturschäden ermöglicht.

Es wurden acht kritische Punkte an der Oberleitung identifiziert, darunter zwei nachjustierte

Streckentrenner, während acht Gleisfehlerbereiche erkannt wurden, darunter drei zuvor unentdeckte Schienenbrüche; zehn Standorte wurden inspiziert und Korrekturmaßnahmen umgesetzt.

Die Ergebnisse führten zu Aktualisierungen der Instandhaltungspläne in Abschnitten mit beschleunigter Verschlechterung und zu einer verbesserten Datenzuverlässigkeit durch die Integration einer direkten CAN-BUS-Schnittstelle für die Energieüberwachung.

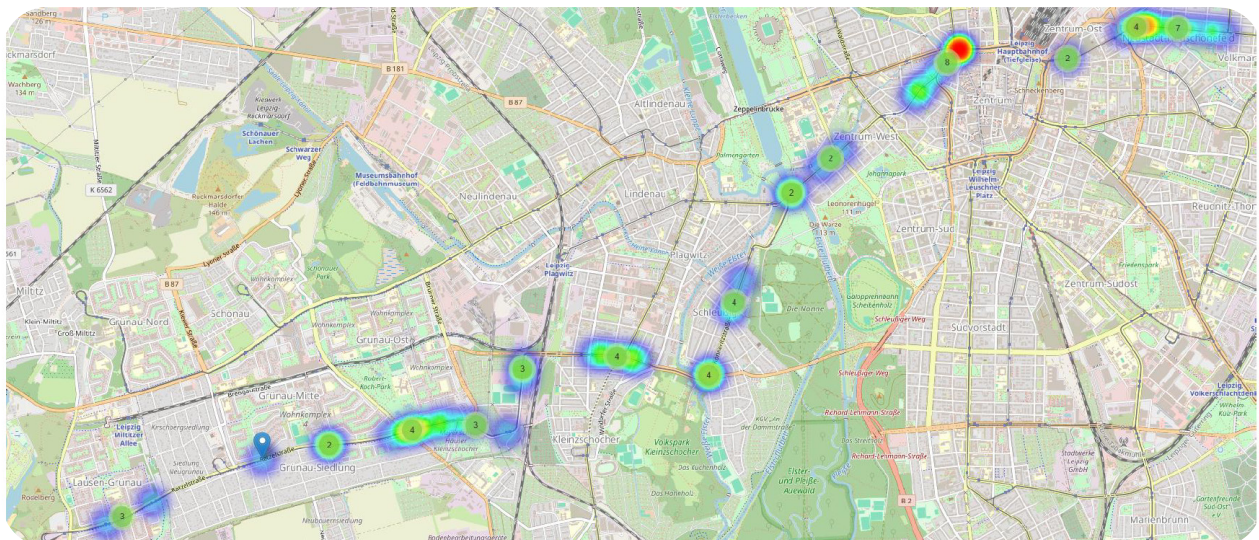


Abbildung 12: Heatmap mit Gleisfehlerbereichen.

Herausforderungen

Bei der Umsetzung traten mehrere Herausforderungen auf. Dazu gehörten die Integration neuer Sensorsysteme in bestehende Fahrzeuge, die Sicherstellung von Datenqualität und Zuverlässigkeit sowie die Bewältigung von Einschränkungen bestehender Energiemesssysteme. Insbesondere ungenaue Bestandsdaten zum Energieverbrauch machten es erforderlich, alternative Datenquellen zu identifizieren und zusätzliche Schnittstellen zu integrieren, um direkt auf Energiedaten des Fahrzeugs zuzugreifen.

Betriebliche Herausforderungen im Zusammenhang mit der Installation während des laufenden Betriebs, der Koordination zwischen mehreren Dienstleistern und der Notwendigkeit, strenge eisenbahnrechtliche

Zertifizierungsanforderungen zu erfüllen, wurden durch schrittweise Umsetzung, enge Abstimmung und iteratives Testen bewältigt.

Lern- und Transferpotenzial

Das Pilotprojekt weist aufgrund seines modularen Ansatzes und der Nutzung von Fahrzeugen als Überwachungsplattformen ein hohes Transferpotenzial auf und ermöglicht eine skalierbare Einführung ohne spezielles Inspektionsgerät.

Zu den zentralen Erkenntnissen zählen die Bedeutung von Datenqualität, schrittweiser Einführung und der Integration von Analysen in Instandhaltungsprozesse. Der Ansatz unterstützt die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft, indem er frühe Eingriffe ermöglicht, die Nutzungsdauer von Anlagen verlängert und die Ressourceneffizienz verbessert.

3.2.2. Pilotprojekt P.2: Optimierung von Infrastruktur und Fahrzeugen durch vorausschauende Instandhaltung (Bergamo, Italien)

Kurzbeschreibung des Pilotprojekts

Dieses Pilotprojekt konzentriert sich auf die vorausschauende Instandhaltung von Straßenbahninfrastruktur und Rollmaterial durch digitale Zustandsüberwachung und Simulationswerkzeuge. Es wurde von Azienda Trasporti Bergamo (ATB) in Zusammenarbeit mit KRUCH Railway Innovations umgesetzt und zielt darauf ab, die Zuverlässigkeit der Infrastruktur zu verbessern und den Energieeinsatz innerhalb des Netzes zu optimieren.

Ein im täglichen Betrieb eingesetztes Straßenbahnfahrzeug wurde mit einem modularen Sensorsystem ausgestattet, darunter GNSS-Module, Beschleunigungssensoren, Kameras, CAN-Bus-Schnittstellen und Edge-Computing-Geräte an Bord. Das System ermöglicht die kontinuierliche Überwachung der Interaktion zwischen Stromabnehmer und Oberleitung sowie die Erfassung von Echtzeitdaten. Parallel dazu wurde ein digitaler Zwilling des Stromversorgungsnetzes der Straßenbahn entwickelt, um Energieflüsse zu simulieren und unterschiedliche Betriebsszenarien zu analysieren.

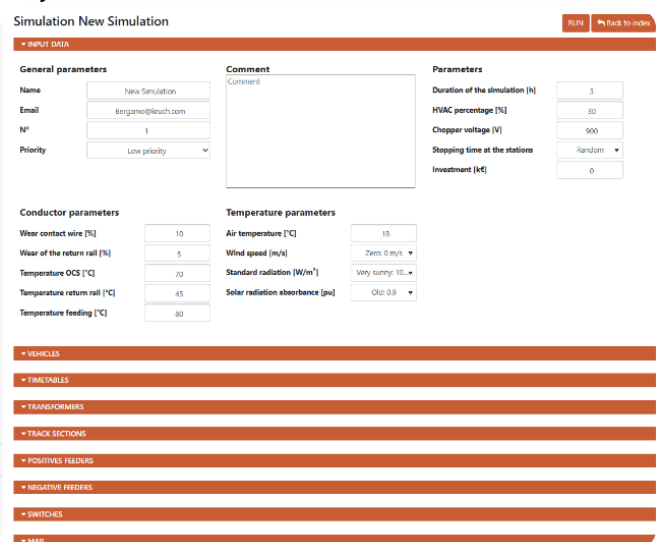
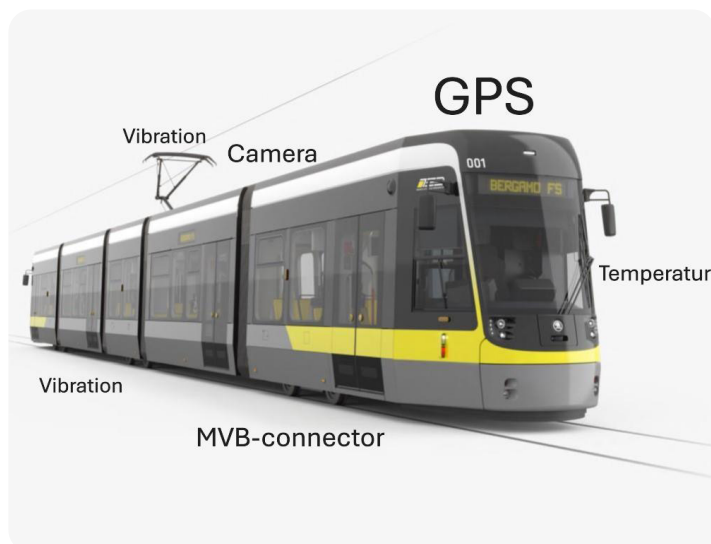


Abbildung 13: Sensorbasiertes Überwachungssystem und digitales Simulationswerkzeug im Pilotprojekt zur vorausschauenden Instandhaltung in Bergamo.

Erforderliche Ressourcen

Für die Umsetzung waren modulare Sensorsysteme, Onboard-Recheneinheiten, Kommunikationsinfrastruktur und Datenanalysetools erforderlich. Zusätzlich wurde eine Simulationsumgebung auf Basis von MATLAB und SIMULINK/SimPowerSystems entwickelt, um das

Straßenbahnnetz und dessen elektrische Versorgungssystem zu modellieren. Das Pilotprojekt erforderte außerdem die Koordination zwischen ATB, KRUCH und weiteren Akteuren, einschließlich Systemkalibrierung, Mitarbeiterschulungen und der Einbindung in Instandhaltungs- und Asset-Management-Prozesse.

KRUCH «On November 5, we installed the sensors and on-board computer on the tram and its pantograph:

- High precision GPS
- Camera
- Accelerometers
- Rail certified edge-computer and communication

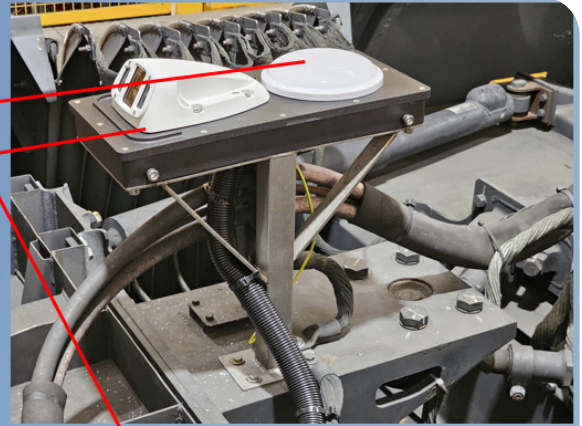
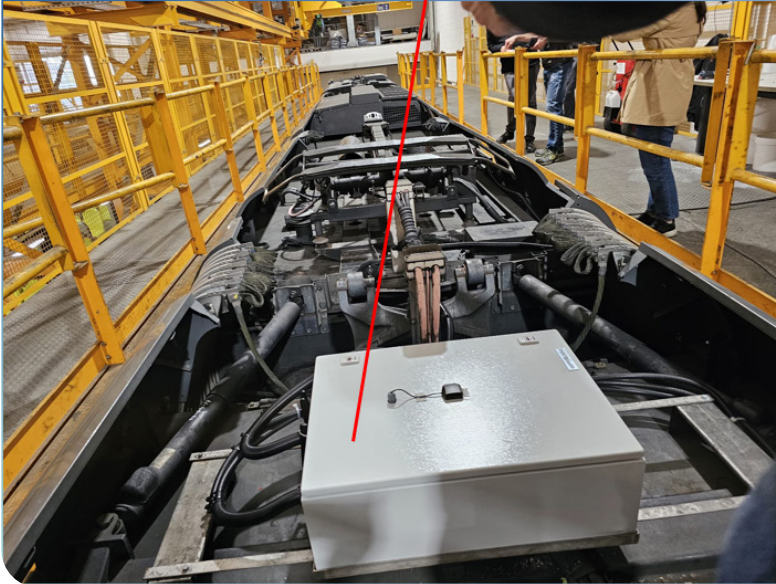
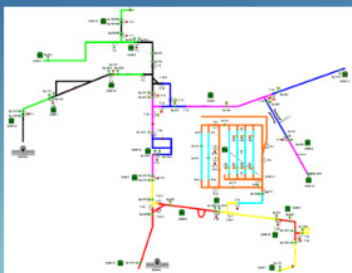


Abbildung 14: Am Stromabnehmer der Straßenbahn installiertes Sensorsystem zur Überwachung der Interaktion zwischen Fahrzeug und Fahrleitung.

DEVELOPING A DIGITAL TWIN: Energy Flow Simulation

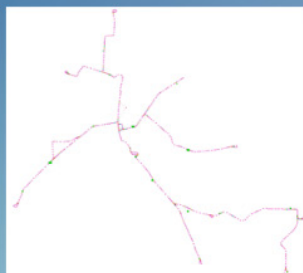
1

transport network



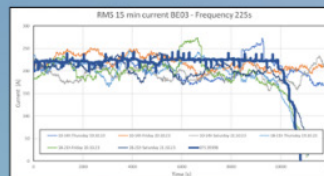
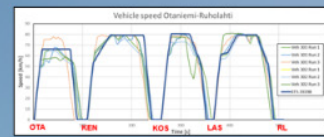
2

digital model



3

validation



4

dashboard



Abbildung 15: Modellierung des digitalen Zwillings und Energieflusssimulation zur Analyse betrieblicher und energetischer Szenarien im Straßenbahnnetz von Bergamo.

Erfolgsnachweise

Das Pilotprojekt bestätigte, dass die Kombination aus Echtzeitüberwachung und Simulation die vorausschauende Instandhaltung und die Energieoptimierung unterstützt. Das Überwachungssystem wurde an Straßenbahnfahrzeug Nr. 004 auf der Linie T1 installiert und ermöglichte eine kontinuierliche Datenerfassung im Abstand von 1 bis 3 Sekunden, einschließlich Position, Geschwindigkeit und Parametern des Energieverbrauchs.

Das System erkannte unregelmäßige Interaktionen zwischen Stromabnehmer und Oberleitung und

identifizierte Standorte mit erhöhtem Verschleißrisiko. Parallel dazu wurde ein digitaler Zwilling des Straßenbahnnetzes entwickelt und zur Simulation mehrerer Betriebsszenarien genutzt, wobei Energieverbrauch, Rekuperationspotenzial und Systemleistung analysiert wurden.

Insgesamt zeigte das Pilotprojekt, dass die Integration von Überwachungsdaten und Simulationswerkzeugen die Entscheidungsfindung verbessert und ein effizienteres Infrastruktur- und Energiemanagement unterstützt.

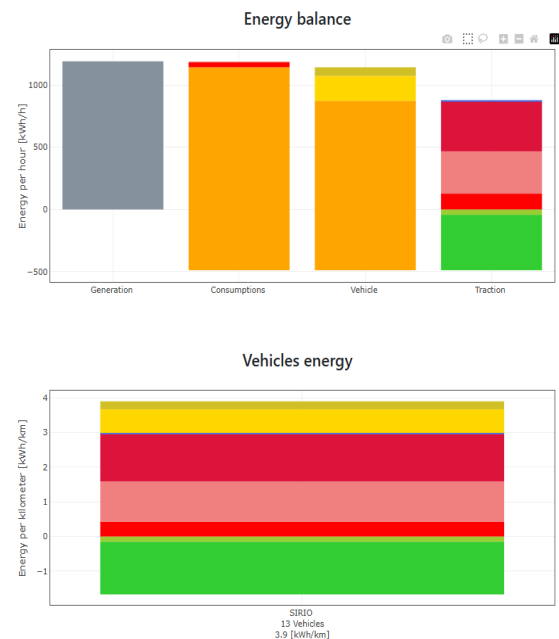
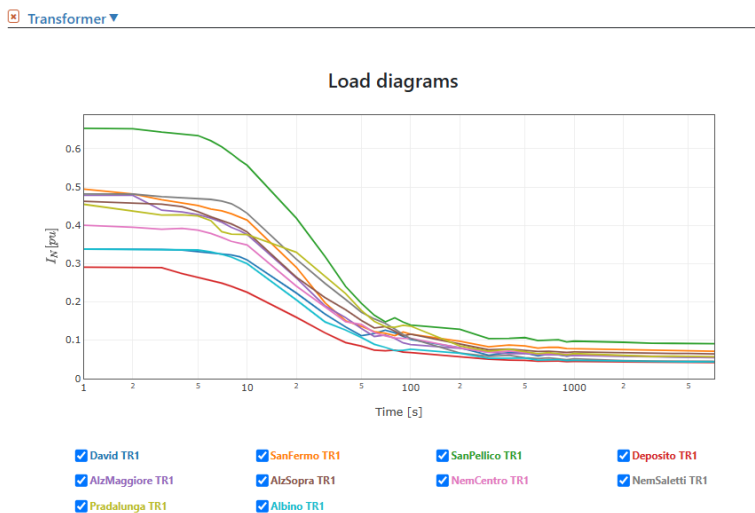


Abbildung 16: Ergebnisse der Energieflusssimulation zur Analyse von Transformatorlasten und zur Optimierung des Energieverbrauchs im Straßenbahnsystem von Bergamo.

Herausforderungen

Zu den Herausforderungen gehörten die Integration der Sensorsysteme in bestehende Fahrzeuge und die Sicherstellung einer zuverlässigen Datenübertragung in städtischen Umgebungen. Zur Verbesserung von Sensorpräzision und Kommunikationsstabilität waren Kalibrierungs- und Konfigurationsanpassungen erforderlich.

Zusätzliche Komplexität entstand durch die Verknüpfung realer Überwachungsdaten mit Simulationsmodellen, was eine kontinuierliche Validierung und enge Koordination zwischen den Projektpartnern erforderte.

Lern- und Transferpotenzial

3.2.3. Lösung S.3: Module für die vorausschauende Instandhaltung von Infrastruktur und Rollmaterial

Kurzbeschreibung des Pilotprojekts

Diese Lösung bietet einen modularen Rahmen für die vorausschauende Instandhaltung von Infrastruktur und Rollmaterial im öffentlichen Verkehr auf Basis kontinuierlicher, fahrzeuggestützter Zustandsüberwachung. Sie baut auf Pilotumsetzungen in Leipzig und Bergamo auf und kombiniert Infrastrukturmonitoring, Energiedatenanalyse und Simulation zu einem übertragbaren Ansatz.

Das Pilotprojekt weist ein hohes Transferpotenzial auf, insbesondere für kleine und mittlere Straßenbahnsysteme. Sein modulares Überwachungssetup und die Trennung von Datenerfassung, Analyse und Simulation ermöglichen eine flexible Anpassung an unterschiedliche Netze.

Zu den wichtigsten Erkenntnissen zählen die Bedeutung des Vorabtests modularer Systeme, die Kombination von Überwachung und Simulation sowie die enge Zusammenarbeit zwischen Betreibern und Technologieanbietern. Der Ansatz unterstützt die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft, indem er die Nutzungsdauer von Anlagen verlängert und die Ressourceneffizienz auf Systemebene verbessert.

Die Lösung unterstützt den Übergang von reaktiver und zeitbasierter Instandhaltung hin zu datenbasiertem Asset-Management und ermöglicht so eine frühere Erkennung von Defekten, gezieltere Eingriffe und eine höhere betriebliche Zuverlässigkeit.

Ziele der Lösung

Die Lösung soll eine kontinuierliche Überwachung des Zustands von Infrastruktur und Fahrzeugen ermöglichen, Defekte im Frühstadium erkennen und rechtzeitige Instandhaltungsmaßnahmen unterstützen.

Durch eine bessere Datenverfügbarkeit und Entscheidungsgrundlagen trägt sie dazu bei, die Nutzungsdauer von Anlagen zu verlängern, materialintensive Reparaturen zu verringern und die Ressourceneffizienz insgesamt zu steigern.

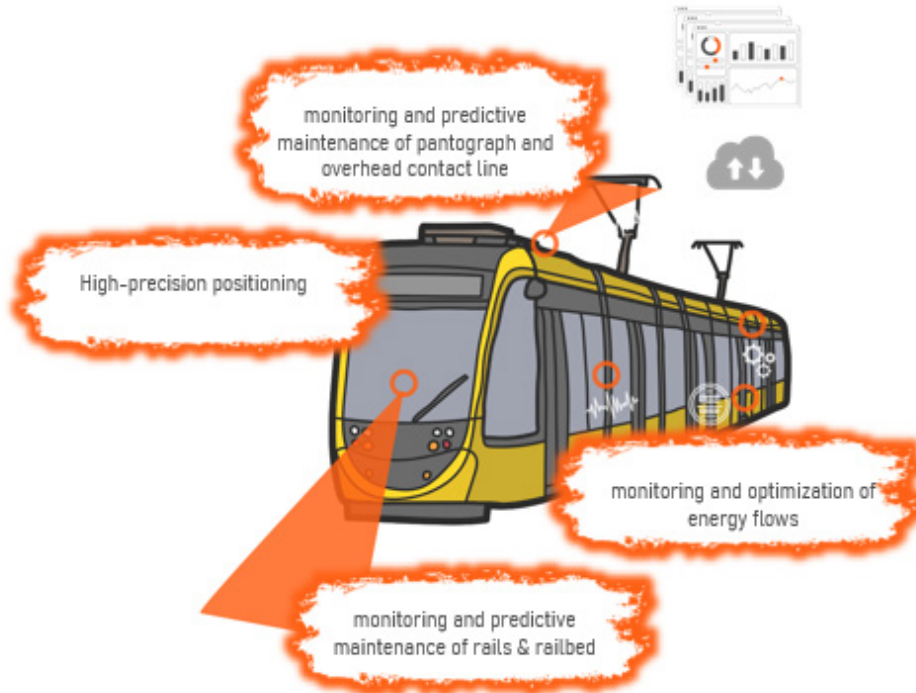


Abbildung 17: Anwendungsbereich der vorausschauenden Instandhaltung in Systemen des öffentlichen Verkehrs.

Kernkonzept der Lösung

Die Lösung basiert auf einer modularen Überwachungskette, die Datenerfassung, -verarbeitung und Entscheidungsunterstützung in bestehende Instandhaltungsabläufe integriert. An Fahrzeugen installierte Sensoren und Überwachungssysteme sammeln während des regulären Betriebs Daten, die verarbeitet und analysiert werden, um Anomalien zu erkennen und Verschleißmuster zu identifizieren.

Die Ergebnisse werden durch Georeferenzierung in Asset-Management-Systeme integriert und über Dashboards visualisiert, um die Priorisierung von Instandhaltungsmaßnahmen zu unterstützen. Das System arbeitet als kontinuierlicher Kreislauf, der Erkennung, Validierung und Intervention verknüpft und damit eine prädiktive, zustandsbasierte Instandhaltung ermöglicht.

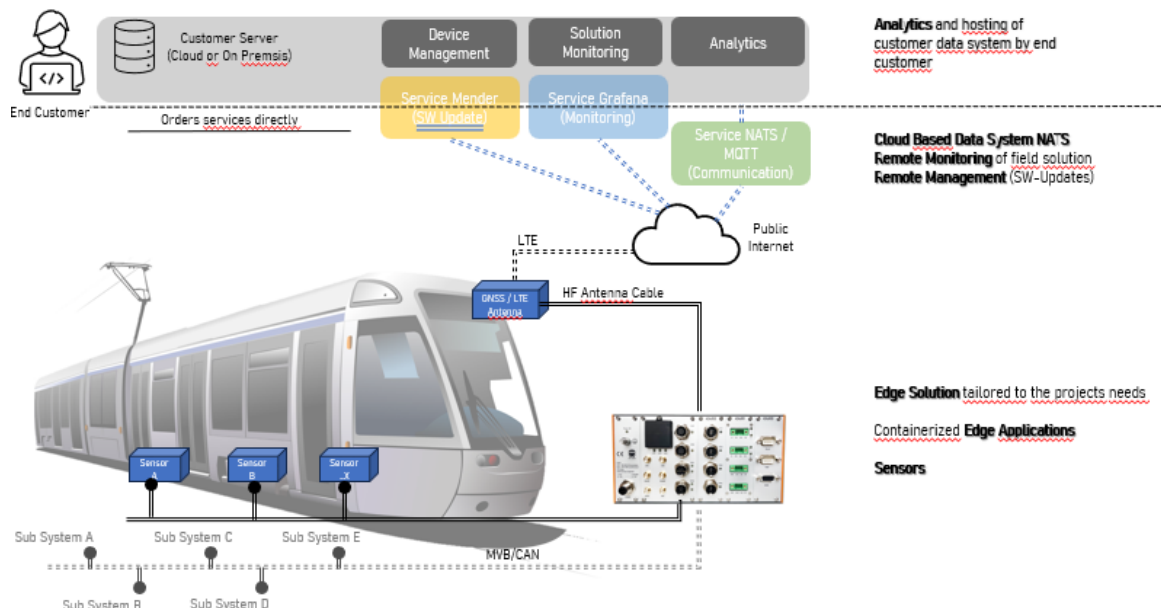


Abbildung 18: End-to-End-Architektur des Systems zur vorausschauenden Instandhaltung von der Datenerfassung bis zu Analyse und Monitoring.

Erkenntnisse aus der Umsetzung

Die Umsetzung hat gezeigt, dass Datenqualität, stabile Datenpipelines und Systemintegration entscheidend für nutzbare Ergebnisse sind. Automatisierte Erkennungen müssen durch Vor-Ort-Inspektionen validiert werden, während die modulare Architektur eine flexible Einführung in unterschiedlichen Systemen ermöglicht.

Auch die organisatorische Bereitschaft ist wesentlich, da vorausschauende Instandhaltung neue Arbeitsabläufe und Rollen mit sich bringt und ihr Nutzen steigt, wenn sie in bestehende Asset-Management- und Planungsprozesse integriert wird.

Übertragungspotenzial

Die Lösung weist ein hohes Transferpotenzial für Betreiber auf, die schienengebundene Infrastruktur

und Rollmaterial bewirtschaften. Ihr modularer Ansatz erlaubt eine schrittweise Einführung und Anpassung an unterschiedliche Netze, Fahrzeugtypen und organisatorische Kontexte.

Indem sie frühe Eingriffe und lebenszyklusorientiertes Asset-Management ermöglicht, unterstützt die Lösung die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft, insbesondere durch die Verlängerung der Nutzungsdauer von Anlagen und die Verbesserung der Ressourceneffizienz.

Die Lösung leistet in erster Linie einen Beitrag zum Handlungsfeld **EXTEND - Instandhaltung und Reparatur**, indem sie frühe Eingriffe ermöglicht und die Nutzungsdauer von Anlagen verlängert.

3.2.4. Pilotprojekt P.4: Simulation elektrifizierter Korridore des öffentlichen Verkehrs und von Energieflüssen (Gdynia, Polen)

Kurzbeschreibung des Pilotprojekts

Dieses Pilotprojekt konzentriert sich auf den Einsatz digitaler Modellierungs- und Simulationswerkzeuge zur Unterstützung einer zirkulären und ressourceneffizienten Elektrifizierungsplanung in Systemen des öffentlichen Verkehrs. Es wurde in Gdynia vom Betreiber des öffentlichen Verkehrs PKA Gdynia in Zusammenarbeit mit der Universität Gdańsk (UG) und dem Technologiepartner Kruch Railway Innovations umgesetzt und soll datenbasierte Entscheidungen zu

Infrastrukturinvestitionen, Fahrzeugtechnologien und Betriebsstrategien ermöglichen.

Mithilfe des Werkzeugs Energy Flow Simulation (EFS) wurde ein digitaler Zwilling des Western Corridor entwickelt. Das Modell integriert Betriebsdaten wie Flottenmerkmale, Taktfrequenzen und Energieverbrauch und ermöglicht die Simulation verschiedener Elektrifizierungsszenarien, darunter Batterieelektrobusse, Trolleybusse mit In-Motion Charging (IMC) und Hybridkonfigurationen.



Abbildung 19: Räumliche Anordnung des Western Corridor in Gdynia.

Erforderliche Ressourcen

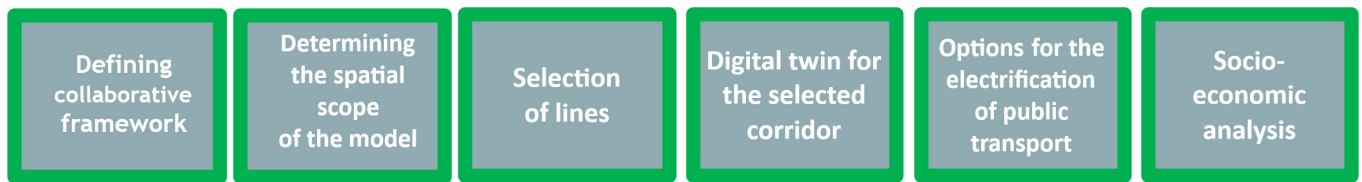
Für den Pilotversuch waren Modellierungswerkzeuge, Betriebsdaten und eine enge Zusammenarbeit zwischen Verkehrsbetreibern, Forschenden und Technologieanbietern erforderlich. Zu den wichtigsten Ressourcen gehörten die EFS-Simulationsumgebung sowie detaillierte Eingangsdaten wie

Fahrzeugumlaufpläne, Energieverbrauchsparameter und Verkehrsbedingungen.

Institutionelle Koordination war wesentlich, um realistische Modellannahmen und die Validierung der Ergebnisse sicherzustellen; dazu gehörte die Einbindung des Betreibers, kommunaler Behörden und von Infrastrukturakteuren.



Bus line	N departures	Electrified
147	69	N
190	57	Y
140	30	N
160	28	N



Sep. 2023



Dec. 2023-Oct. 2024

Line	IMC No extra OCS	IMC OCS Centrum	IMC OCS Kielecka	IMC OCS Chwarzno	IMC OCS Centrum + Kielecka	IMC OCS Centrum + Chwarzno	IMC OCS Kielecka + Chwarzno	IMC OCS Centrum + Kielecka + Chwarzno
121	X	X	X	X	X	X	X	X
140	X	X	X	X	X	X	X	X
147	X	X	X	X	X	X	X	X
160	X	✓	X	X	✓	✓	✓	✓
190	X	✓	X	✓	✓	✓	X	✓

Abbildung 20: Entwicklungsprozess des Energy-Flow-Simulation-(EFS)-Modells für den digitalen Zwilling von Gdynia.

Erfolgsnachweise

Das Pilotprojekt zeigte, dass digitale Simulationen die Elektrifizierungsplanung und Infrastrukturoptimierung wirksam unterstützen können. Ein digitaler Zwilling des Korridors wurde erfolgreich entwickelt und anhand realer Betriebsdaten der Buslinie 190 validiert.

gezielte Infrastrukturerweiterungen erfordert, während bestimmte Linien, etwa Linie 190, ohne zusätzliche Oberleitungsinfrastruktur betrieben werden können.

Es wurden mehr als 110 Elektrifizierungsszenarien simuliert, in denen Batterieelektrobusse, IMC-Trolleybusse und hybride Ansätze verglichen wurden. Die Analyse zeigte, dass der IMC-Betrieb

Die Ergebnisse zeigten zudem, dass der Betrieb mit Batterieelektrobusen im Vergleich zu IMC-Lösungen eine höhere Anzahl von Fahrzeugen erfordern kann, und bestätigten, dass Verkehrsbedingungen den Energieverbrauch, den Fahrzeugbedarf und die Systemkosten maßgeblich beeinflussen.

Line	E-bus base	E-bus extra	IMC No extra OCS	IMC OCS Centrum	IMC OCS Kielecka	IMC OCS Chwarzno	IMC OCS Centrum + Kielecka	IMC OCS Centrum + Chwarzno	IMC OCS Kielecka + Chwarzno	IMC OCS Centrum + Kielecka + Chwarzno
121	✓		X			✓			✓	✓
140	X	✓+2	X	X	X	✓	✓	✓	✓	✓
147	X	✓+3	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
160	X	✓+2	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
190 Loop	X	✓+3	✓	✓			✓	✓		✓
Total vehicles	26	36	26	26	26	26	26	26	26	26
Total chargers	7	7								
Extra Substations				1	1	2	2	3	3	4
Extra OCS km				1,51	1,54	3,12	3,05	4,63	4,66	6,17

Abbildung 21: Beispielhafte Simulationsergebnisse zum Vergleich verschiedener Elektrifizierungsszenarien; dargestellt sind Energiebilanz des Fahrzeugs und die Machbarkeit des Ladezustands nach 10 Betriebsstunden.

Line	Vehicles	IMC without OCS		IMC with extra OCS in Centrum		IMC with extra OCS in Chwarzno		IMC with extra OCS in Kielecka		IMC with extra OCS in Centrum and Chwarzno		IMC with extra OCS in Centrum and Kielecka		IMC with extra OCS in Chwarzno and Kielecka	
		SOC [%]	Battery [h]	SOC [%]	Battery [h]	SOC [%]	Battery [h]	SOC [%]	Battery [h]	SOC [%]	Battery [h]	SOC [%]	Battery [h]	SOC [%]	Battery [h]
121	3	20	1,4	20	1,4	49	>10	20	1,4	48,9	>10	20	1,4	49,1	>10
140	7	20	1	20	1	59,4	>10	20	2,7	59,8	>10	24,2	>10	64,2	>10
147	7	20	4	31,6	>10	66,4	>10	40,9	>10	68,8	>10	41,5	>10	71,1	>10
160	3	20	2	41	>10	67	>10	52	>10	68,8	>10	51,9	>10	78,8	>10
190Loop	6	54	>10	60,1	>10	54,7	>10	55,1	>10	60,3	>10	60,3	>10	56,1	>10

Abbildung 22: Vergleich von Elektrifizierungsszenarien zur betrieblichen Machbarkeit unterschiedlicher Fahrzeugtechnologien und Infrastrukturkonfigurationen.

Herausforderungen

Die Herausforderungen betrafen vor allem die Datenintegration und die Modellierung. Betriebsdaten aus verschiedenen Quellen (Verkehr, Betrieb und Energie) mussten harmonisiert werden, was den Modellierungsprozess zunächst verlangsamte.

Weitere Komplexität ergab sich bei der Modellierung der Batteriedegradation und der Lebenszyklusleistung sowie bei der genauen Abbildung der Verkehrsbedingungen; dies erforderte eine iterative Kalibrierung des Modells und die Einbeziehung von Elementen wie Lichtsignalanlagen.

Diese Herausforderungen wurden durch eine iterative Verfeinerung des Modells und eine Validierung auf Basis realer Daten bewältigt.

Lern- und Transferpotenzial

Das Pilotprojekt weist ein hohes Transferpotenzial für Städte auf, die die Elektrifizierung ihrer Systeme des öffentlichen Verkehrs planen. Der Ansatz des digitalen Zwillings ermöglicht den Vergleich mehrerer Szenarien, bevor Infrastrukturinvestitionen beschlossen werden, und unterstützt damit eine effizientere und fundiertere Entscheidungsfindung.

Seine modulare Struktur ermöglicht die Anpassung an unterschiedliche städtische Kontexte, sofern ausreichend Betriebsdaten verfügbar sind. Der Ansatz unterstützt eine kreislaforientierte Planung, indem er den Ressourceneinsatz optimiert, unnötige Investitionen vermeidet und die Effizienz auf Systemebene verbessert.

3.2.5. Lösung S.4: Geschäftsplanungstool für elektrifizierte Flotten und Infrastruktur des öffentlichen Verkehrs

Kurzbeschreibung der Lösung

Diese Lösung stellt ein strukturiertes Planungsinstrument bereit, das Betreiber und Aufgabenträger des öffentlichen Verkehrs bei der Gestaltung und dem Vergleich von Elektrifizierungsszenarien unter Anwendung von Prinzipien der Kreislaufwirtschaft unterstützt. Sie baut auf dem Pilotprojekt in Gdynia auf, in dem digitale Zwillinge und Energieflusssimulationen zur Bewertung unterschiedlicher Elektrifizierungsstrategien genutzt wurden. Die Lösung überführt diese Erfahrungen in einen übertragbaren, KPI-basierten Rahmen, der zirkuläre Zielsetzungen mit praktischen Planungs- und Investitionsentscheidungen verbindet.

Ziele der Lösung

Die Lösung soll eine evidenzbasierte Planung elektrifizierter Systeme des öffentlichen Verkehrs unterstützen und die Konsistenz bei der Bewertung von Szenarien verbessern. Indem Ziele der Kreislaufwirtschaft in messbare Indikatoren übersetzt werden, ermöglicht sie den Vergleich von Elektrifizierungsoptionen, erhöht die Transparenz von Annahmen und unterstützt die Integration von Flotten-, Infrastruktur- und Energieplanung.

Kernkonzept der Lösung

Die Lösung basiert auf einem KPI-gesteuerten Planungsworkflow, der durch einen strukturierten Auswahl- und Konfigurationsprozess unterstützt wird. Nutzerinnen und Nutzer können relevante Indikatoren definieren, Zielwerte festlegen und verschiedene Elektrifizierungsszenarien anhand eines konsistenten Rahmens vergleichen.

Der Ansatz betrachtet Flotten, Infrastruktur und Energiesysteme als integrierten Planungsbereich und verknüpft technische Leistungsfähigkeit, Energieeinsatz und Zirkularitätsergebnisse, um fundierte Entscheidungen zu unterstützen.

Im Betrieb unterstützt das Tool einen strukturierten Ablauf:

Auswahl → Konfiguration → Szenarioanalyse → Vergleich → Entscheidungsunterstützung

Die Lösung behandelt Flotten, Infrastruktur und Energiesysteme als einen einheitlichen Planungsbereich, in dem Energie als Rückgrat des Systems wirkt und Leistung, Kosten und Zirkularitätsergebnisse beeinflusst.

Erkenntnisse aus der Umsetzung

Die Umsetzung hat gezeigt, dass Datenverfügbarkeit und -qualität entscheidend sind und häufig die Zusammenführung mehrerer Quellen erfordern. Standardisierte KPI-Definitionen und klare Governance-Regeln, einschließlich Zuständigkeiten und Aktualisierungsverfahren, sind für eine konsistente Nutzung unerlässlich.

Empfohlen wird ein schrittweiser Ansatz, der mit einem Kernsatz von KPIs beginnt und im Zeitverlauf erweitert wird, wobei die Abstimmung mit bestehenden Planungs- und Berichterstattungsprozessen sichergestellt werden sollte.

Übertragungspotenzial

Die Lösung weist ein hohes Transferpotenzial für Betreiber des öffentlichen Verkehrs auf, die die Elektrifizierung ihrer Flotten planen. Sie kann in unterschiedlichen Systemtypen angewendet und an lokale Bedingungen angepasst werden,

darunter Energiemix, Infrastrukturgrenzen und betriebliche Anforderungen.

Durch die Unterstützung eines konsistenten Szenarienvergleichs und einer lebenszyklusorientierten Planung trägt die Lösung zu einem effizienteren

Ressourceneinsatz und fundierten Investitionsentscheidungen bei.

Die Lösung leistet in erster Linie einen Beitrag zur Stufe **AVOID - vorgelagerte Planung und Systemoptimierung**, indem sie fundiertere und konsistentere Entscheidungen ermöglicht.

3.3. Aktivität A.3: Entwicklung von Lösungen zur Werterhaltung und Abfallvermeidung bei der Infrastruktur des öffentlichen Verkehrs

Diese Aktivität konzentriert sich darauf, die Lebensdauer von Infrastrukturkomponenten des öffentlichen Verkehrs und energiebezogenen Assets durch Ansätze der Wiederverwendung und Umnutzung zu verlängern. Sie adressiert Prinzipien der Kreislaufwirtschaft auf Infrastrukturebene, indem untersucht wird, wie bestehende Komponenten und Materialien über ihren ursprünglichen betrieblichen Kontext hinaus im Einsatz bleiben können.

Innerhalb dieser Aktivität wurden zwei Pilotmaßnahmen umgesetzt. In Szeged untersuchte das Pilotprojekt die Machbarkeit der Wiederverwendung von Trolleybus-Oberleitungsweichen, um die Nutzungsdauer kritischer

Infrastrukturkomponenten zu verlängern und Materialabfälle zu verringern. In Maribor analysierte das Pilotprojekt die Umnutzung von Second-Life-Traktionsbatterien als stationäre Energiespeicher zur Unterstützung der Ladeinfrastruktur für Elektrobusse.

Gemeinsam zeigen diese Pilotprojekte praktische Ansätze zur Erhaltung des in der Infrastruktur des öffentlichen Verkehrs und in damit verbundenen Anlagen gebundenen Werts, während zugleich der Ressourcenverbrauch gesenkt und kreislauforientiertere Asset-Management-Praktiken unterstützt werden. Die in diesen Pilotprojekten gewonnenen Erfahrungen bilden die Grundlage für die Entwicklung der in den folgenden Abschnitten vorgestellten übertragbaren Lösungen.

3.3.1. Pilotprojekt P.5: Wiederverwendung von Trolleybus-Oberleitungsweichen (Szeged, Ungarn)

Kurzbeschreibung des Pilotprojekts

Dieses Pilotprojekt konzentriert sich auf die praktische Anwendung von Prinzipien der Kreislaufwirtschaft durch die Wiederverwendung von Trolleybus-Infrastrukturkomponenten. Es wurde von der Verkehrsgesellschaft Szeged (SZKT) umgesetzt und zeigt, wie Komponenten, die für einen Betrieb mit hoher Beanspruchung nicht mehr optimal sind, in Teilen des Systems mit geringerer betrieblicher Belastung

weiterverwendet werden können.

Im Rahmen des Pilotprojekts wurden vier Hochgeschwindigkeits-Oberleitungsweichen aus dem Betriebsnetz, die ursprünglich zwischen 2005 und 2014 installiert worden waren, durch neue Ausrüstung ersetzt und anschließend im Betriebshof wiederverwendet. Dieser Ansatz verlängerte die Nutzungsdauer bestehender Komponenten und verbesserte zugleich die Zuverlässigkeit sowohl im Netz als auch in der Betriebshofinfrastruktur.



Abbildung 23: Im Netz von Szeged eingesetzte Trolleybus-Oberleitungsweiche.

Erforderliche Ressourcen

Das Pilotprojekt erforderte vergleichsweise begrenzte technische Ressourcen, da die Arbeiten vor allem den Austausch und die Verlagerung bestehender Infrastrukturkomponenten innerhalb des Trolleybusystems umfassten. Die Umsetzung stützte sich auf interne Kapazitäten von SZKT, darunter

Instandhaltungsteams für die Infrastruktur, Verkehrssteuerung und Logistikeinheiten. Erforderlich waren Koordination zur Steuerung der Installationsarbeiten und vorübergehender Betriebsanpassungen sowie die Zusammenarbeit mit örtlichen Behörden bei kurzen Eingriffen in den Straßenraum.



Abbildung 24: Einbau einer Trolleybusweiche durch das Instandhaltungsteam von SZKT.

Erfolgsnachweise

Das Pilotprojekt hat erfolgreich gezeigt, dass die Wiederverwendung von Infrastrukturkomponenten die Zuverlässigkeit verbessern und zugleich den Investitionsbedarf verringern kann. Im Hauptnetz wurden vier neue Weichen installiert, während vier wiederverwendete Weichen im Betriebshof eingesetzt wurden, wodurch sich die Leistungsfähigkeit der Infrastruktur an acht Standorten verbesserte.

Der Austausch verringerte Störungen in Abschnitten mit hoher Taktfrequenz und beseitigte Probleme mit veralteten Betriebshofweichen, während gleichzeitig die unnötige Beschaffung zusätzlicher Ausrüstung vermieden und der Materialabfall reduziert wurde.

Das Pilotprojekt hat erfolgreich gezeigt, dass die kreislauforientierte Wiederverwendung von Infrastrukturkomponenten die betriebliche Zuverlässigkeit verbessern und gleichzeitig den Investitionsbedarf senken kann. Zu den während der Umsetzung erzielten wichtigsten Ergebnissen zählen:

Herausforderungen

Die Herausforderungen betrafen vor allem die Koordination und Integration innerhalb des bestehenden Infrastruktursystems. Unterschiede bei unterstützenden Elementen wie Masten und Fundamenten erforderten Anpassungen während des Einbaus. Zusätzlicher Aufwand war nötig, um vorübergehende Verkehrsregelungen zu organisieren und eine sichere Integration der wiederverwendeten Komponenten in das System zu gewährleisten.

Lern- und Transferpotenzial

Das Pilotprojekt zeigt einen einfachen und übertragbaren kreislauforientierten Ansatz, der auf viele Systeme des öffentlichen Verkehrs anwendbar ist. Infrastrukturkomponenten, die aus Netzabschnitten mit hoher Belastung ausgebaut werden, können häufig in Umgebungen mit geringerer Nachfrage wie Betriebshöfen weiterverwendet werden.

Durch die systematische Identifikation solcher Möglichkeiten können Betreiber die Nutzungsdauer von Anlagen verlängern, Investitionskosten senken und Materialabfälle minimieren und damit ein effizienteres und kreislauforientiertes Infrastrukturmanagement unterstützen.

3.3.2. Lösung S.5: Definition von Übernahmekriterien für die Wiederverwendung von Trolleybus-Oberleitungsweichen

Kurzbeschreibung der Lösung

Diese Lösung bietet einen übertragbaren Rahmen für die kreislaforientierte Wiederverwendung von Trolleybus-Oberleitungsweichen in Systemen des öffentlichen Verkehrs. Sie baut auf den Erfahrungen des Pilotprojekts in Szeged auf und überführt den praktischen Ansatz in eine Reihe von Übernahmekriterien, die von anderen Betreibern angewendet werden können.

Die Lösung führt ein Kaskadenmodell der Wiederverwendung ein, bei dem Infrastrukturkomponenten, die aus Netzabschnitten mit hoher Belastung entfernt werden, an Orten mit geringerer betrieblicher Beanspruchung - etwa in Betriebshöfen - erneut eingesetzt werden. Dieser Ansatz verlängert die Nutzungsdauer von Anlagen, reduziert Abfälle und verbessert die Kosteneffizienz bei der Erneuerung der Infrastruktur.

Ziele der Lösung

Die Lösung soll Betreiber des öffentlichen Verkehrs bei der Einführung kreislaforientierter Infrastrukturmanagementpraktiken unterstützen.

Sie konzentriert sich auf die Verlängerung der betrieblichen Lebensdauer von Infrastrukturkomponenten, die Verringerung des Materialverbrauchs, die Verbesserung der Investitionseffizienz sowie die Aufrechterhaltung von Zuverlässigkeit und Sicherheit durch strukturierte Wiederverwendungsansätze.

Kernkonzept der Lösung

Die Lösung basiert darauf, Infrastrukturkomponenten unterschiedlichen Stufen betrieblicher Intensität im Netz zuzuordnen. Komponenten, die aus hochfrequentierten Netzabschnitten entfernt werden, erfüllen strenge Zuverlässigkeitsanforderungen möglicherweise nicht mehr,

können aber in Umgebungen mit geringerer Nachfrage wie Betriebshöfen weiterhin wirksam eingesetzt werden. Daraus entsteht ein zweistufiger Infrastrukturansatz, der zwischen hochintensiven Betriebsbereichen und weniger intensiv genutzten Serviceumgebungen unterscheidet. Durch die Abstimmung des Zustands der Komponente auf die betrieblichen Anforderungen können Betreiber die Nutzungsdauer von Anlagen verlängern und gleichzeitig die Systemleistung aufrechterhalten.

Erkenntnisse aus der Umsetzung

Die Umsetzung zeigt, dass erfolgreiche Wiederverwendung von einer sachgerechten Zustandsbewertung und der Kompatibilität mit vorhandenen Infrastrukturelementen wie Masten, Verkabelung und Fundamenten abhängt. Während des Einbaus ist eine wirksame Koordination zwischen Instandhaltung und Betrieb erforderlich; entscheidend für die Skalierung des Ansatzes ist außerdem die systematische Identifizierung und Nachverfolgung wiederverwendbarer Komponenten.

Übertragungspotenzial

Die Lösung weist ein hohes Transferpotenzial für Betreiber auf, die Trolleybus- oder Straßenbahninfrastruktur verwalten. Vergleichbare Bedingungen bestehen in vielen Systemen, in denen Infrastruktur über Netze und Betriebshöfe hinweg unter unterschiedlichen Intensitätsniveaus betrieben wird.

Durch die Einbeziehung der betrieblichen Intensität in das Asset-Management können Betreiber systematisch Möglichkeiten zur Wiederverwendung identifizieren, Kosten senken und die Lebenszyklen von Infrastrukturen verlängern und damit die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft unterstützen.

Die Lösung leistet daher einen Beitrag zur Stufe **EXTEND - Wiederverwendung** des Kreislaufwirtschaftsrahmens für das Management der Infrastruktur des öffentlichen Verkehrs.

3.3.3. Pilotprojekt P.6: Second-Life-Nutzung von Traktionsbatterien als stationäre Energiespeicher für erneuerbar betriebene Schnellladung (Maribor, Slowenien)

Kurzbeschreibung des Pilotprojekts

Dieses Pilotprojekt untersucht den Einsatz von Second-Life-Lithium-Ionen-Batterien als stationäre Energiespeicher zur Unterstützung der Ladeinfrastruktur für Elektrobusse. Es wurde von der Stadtgemeinde Maribor mit Unterstützung der Universität Maribor umgesetzt und konzentriert sich auf die Verbesserung der Energieeffizienz bei gleichzeitiger Verlängerung des Lebenszyklus von Traktionsbatterien.

An der Endhaltestelle Vzpenjača unterstützt ein 150-kW-Schnelllader die Elektrobuslinie G6, die auf einer 7,7 km langen Strecke mit häufigen kurzen Ladevorgängen verkehrt. Zur Optimierung des Energieeinsatzes wurde ein Batterie-Energiespeichersystem (BESS) auf Basis umgenutzter Batterien in die Ladeinfrastruktur integriert und fungiert als Puffer zwischen Netz, erneuerbaren Energiequellen und Ladebedarf.

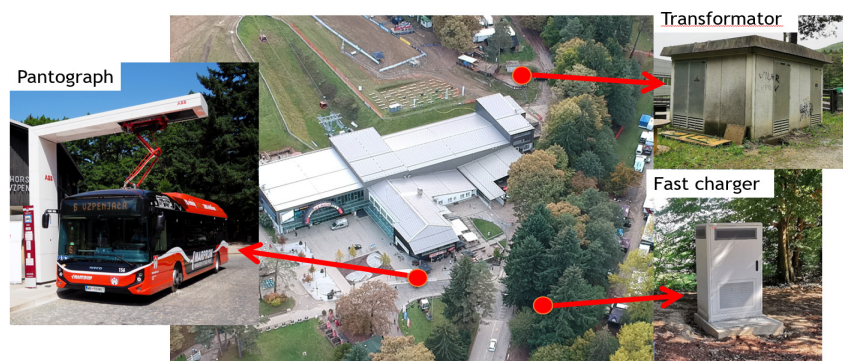


Abbildung 25: Aktuelle Ladeinfrastruktur an der Station Vzpenjača.

Erforderliche Ressourcen

Das Pilotprojekt erforderte die Integration eines Second-Life-Batteriespeichersystems mit einer Kapazität von 136 kWh, kombiniert mit einem 80-kW-Hybrid-Wechselrichter und der Einbindung in einen bestehenden 150-kW-Gleichstrom-Schnelllader. Das System umfasste außerdem Monitoring- und Steuerungskomponenten sowie eine kleine Photovoltaikanlage. Das BESS ist in einer **parallelen**

Hybridkonfiguration angeschlossen, sodass während der Ladevorgänge von Bussen eine gleichzeitige Stromversorgung aus dem Netz und dem Speichersystem möglich ist.

Die Umsetzung erforderte die Koordination zwischen kommunalen Behörden, Forschungspartnern und technischen Anbietern sowie die Einhaltung von Sicherheits- und Regulierungsanforderungen für Batteriesysteme.

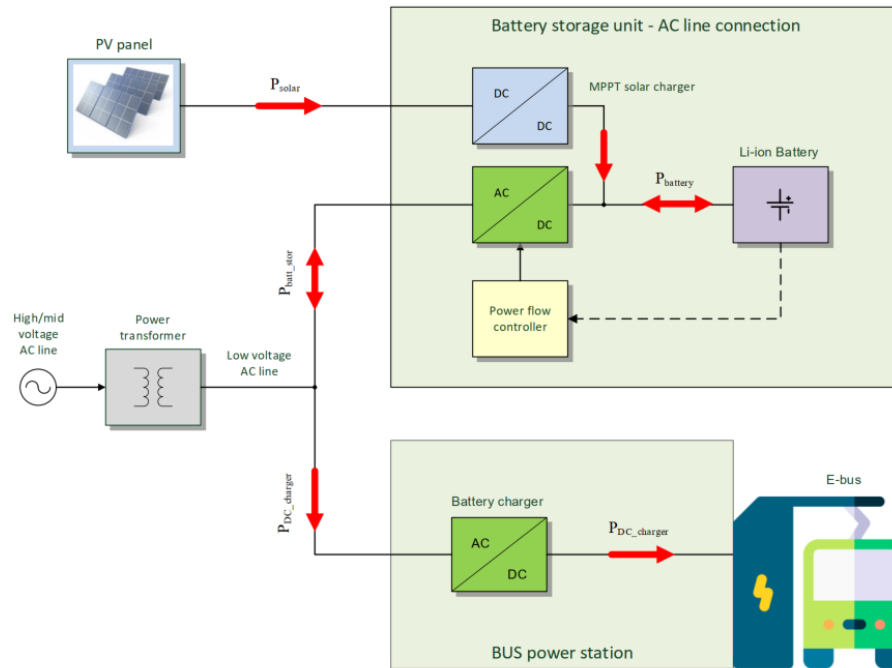


Abbildung 26: Technisches Diagramm der parallelen Konfiguration der BESS-Integration. Quelle: Universität Maribor.

Erfolgsnachweise

Das Pilotprojekt bestätigte die technische Machbarkeit der Integration von Second-Life-Batterien in die Ladeinfrastruktur. Das System unterstützt einen jährlichen Ladebedarf von etwa 145.000 kWh, bei einem täglichen Verbrauch von rund 400 kWh und Spitzenwerten von bis zu 650 kWh; einzelne Ladevorgänge dauern etwa 5 Minuten, wobei 8-14 kWh übertragen werden.

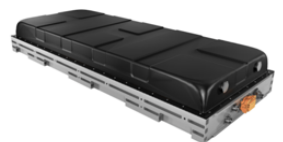
Das BESS ermöglichte eine Reduzierung der Lastspitzen um rund 25 kW und demonstrierte den Hybridbetrieb zwischen Netz und Speicher. Die Einbindung von Photovoltaikerzeugung unterstützte zusätzlich die Energieflexibilität und verringerte die Abhängigkeit vom Stromnetz.

Insgesamt zeigte das Pilotprojekt, dass Second-Life-Batteriespeicher das Energiemanagement verbessern und die Lebenszyklen von Batterien innerhalb von Systemen des öffentlichen Verkehrs verlängern können.



- Solar Panel (10 pcs. Array)**
350W Monocrystalline
- V_{mp} : 36,11V
 - I_{mp} : 9,69A
 - V_{oc} : 44,05V
 - I_{sc} : 10,37A
 - Cell Size: 156mm
 - Cells Quantity: 72 PCS
 - Cells Array: 6'12 PCS
 - Panel Size: 1950*992*40mm
 - Weight: 19,5 KG

- Energy Storage Battery Pack**
- FPT - Model eB5 69
 - Application: Bus
 - Nominal capacity: 107 Ah
 - Nominal energy: 69,3 kWh
 - Nominal voltage: 647,5 V
 - Voltage range: 525 - 735 V
 - C-rate: 1 C
 - Weight: 389 kg
 - Cathode technology: NMC
 - Cell configuration: 175S-2P
 - Cooling system: Glycol/Water



- Three Phase Hybrid Inverter DEYE SUN-80K**
- Max. charging/discharging current of 160A
 - Support storing energy from diesel generator
 - Max. 10 pcs parallel for on-grid and off-grid operation
 - Support multiple batteries parallel
 - AC couple to retrofit existing solar system
 - 6 time periods for battery charging/discharging
 - High voltage battery, higher efficiency
 - 100% unbalanced output

Abbildung 27: Schlüsselkomponenten des BESS-Systems: PV-Module, Wechselrichter und Second-Life-Batteriepack.

Herausforderungen

Zu den Herausforderungen gehörten die begrenzte Standardisierung bei der Integration von Second-Life-Batterien, die Kompatibilität zwischen Batteriemodulen und Wechselrichtersystemen sowie die Gewährleistung thermischer Stabilität und des Brandschutzes.

Weitere Aspekte im Zusammenhang mit der Beschaffung geeigneter Batterien, regulatorischen Anforderungen und begrenzter Markterfahrung wurden durch eine sorgfältige Systemauslegung und die Zusammenarbeit mit spezialisierten Fachleuten bewältigt.

3.3.4. Lösung S.6: Übertragbare Geschäftsmodelle für die Second-Life-Nutzung von Traktionsbatterien

Kurzbeschreibung der Lösung

Diese Lösung stellt einen übertragbaren Rahmen für den Einsatz von Second-Life-Traktionsbatterien als stationäre Energiespeicher in der Ladeinfrastruktur des öffentlichen Verkehrs bereit. Sie baut auf dem Pilotprojekt in Maribor auf und überführt dessen technische und betriebliche Erfahrungen in Geschäftsmodelle und Umsetzungsbedingungen, die in anderen Kontexten angewendet werden können.

Die Lösung unterstützt die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft, indem sie die Lebenszyklen von Batterien vor dem Recycling verlängert und zugleich das Energiemanagement verbessert, die Spitzenstromnachfrage senkt und die Integration erneuerbarer Energiequellen unterstützt.

Ziele der Lösung

Die Lösung soll Betreiber und Aufgabenträger des öffentlichen Verkehrs dabei unterstützen, Second-Life-Batteriespeicher als Bestandteil elektrifizierter Verkehrsinfrastruktur umzusetzen.

Sie konzentriert sich auf die Verlängerung von

Lern- und Transferpotenzial

Das Pilotprojekt weist ein hohes Transferpotenzial für Städte auf, die ihre Elektrobusinfrastruktur ausbauen. Second-Life-Batteriespeicher können das Lastspitzenmanagement unterstützen, die Energieflexibilität verbessern und die Integration erneuerbarer Energiequellen erleichtern.

Der modulare Charakter von BESS-Lösungen erlaubt die Anpassung an unterschiedliche Kontexte und unterstützt die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft durch die Verlängerung von Batterielebenszyklen und die Verbesserung der Ressourceneffizienz.

Batterielebenszyklen, die Verbesserung der Ladeflexibilität, die Verringerung von Lastspitzen, die Unterstützung der Integration erneuerbarer Energien und die Schaffung wirtschaftlich tragfähiger Ansätze für Second-Life-Batterieanwendungen.

Kernkonzept der Lösung

Die Lösung basiert auf der Integration von Second-Life-Batterie-Energiespeichersystemen zwischen Stromnetz, erneuerbaren Energiequellen und Ladebedarf. In dieser Rolle fungiert das Batteriesystem als flexibler Energiepuffer, der Lastspitzenkappung, Lastverschiebung und die Nutzung erneuerbarer Energie unterstützt.

Ihre praktische Anwendung hängt vom Zusammenspiel dreier Dimensionen ab: technische Integration, Energiemanagementstrategie sowie wirtschaftliche und regulatorische Rahmenbedingungen. Anstatt ein einziges starres Modell anzubieten, stellt die Lösung einen flexiblen Rahmen bereit, der an lokale Infrastruktur, Lastprofile und Marktbedingungen angepasst werden kann. Während die reine Lastspitzenkappung nur begrenzte Vorteile bietet, verbessert die Kombination von Speicher mit Tarifoptimierung und Integration erneuerbarer Energien die Gesamtleistung deutlich.

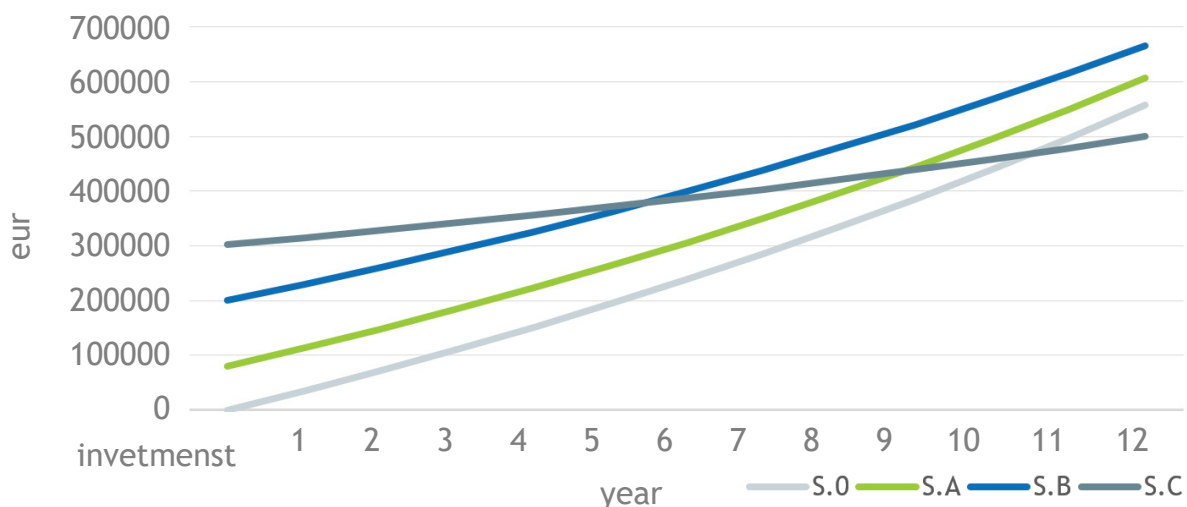


Abbildung 28: Vergleich der kumulierten Stromkosten in unterschiedlichen Energiemanagementszenarien.

- S.0: Basisfall (ohne Speicher): vollständige Abhängigkeit vom Stromnetz
- S.1: Lastspitzenkappung: Reduzierung kurzfristiger Leistungsspitzen bei begrenztem wirtschaftlichem Nutzen
- S.2: Tarifoptimierung: Verlagerung des Energieeinsatzes in kostengünstigere Zeiträume und Verbesserung der Kosteneffizienz
- S.3: Integration erneuerbarer Energien: Kombination von Speicher mit RES zur Verringerung der Netzabhängigkeit und Maximierung des langfristigen Nutzens

Erkenntnisse aus der Umsetzung

Die Umsetzung hat gezeigt, dass die Kompatibilität zwischen Batteriemodulen, Wechselrichtersystemen und Ladeinfrastruktur eine zentrale Voraussetzung für den Erfolg ist, während Sicherheitsanforderungen und Systemarchitektur von Anfang an berücksichtigt werden müssen.

Das Geschäftsmodell hängt stark von Systemgröße, Lastprofil, Stromtarifen und Netzrestriktionen ab. Eine reine Lastspitzenkappung bietet im kleinen Maßstab nur begrenzte Erträge, während die Kombination von Speicher

mit der Integration erneuerbarer Energien den langfristigen Nutzen erheblich steigert.

Übertragungspotenzial

Die Lösung weist ein hohes Transferpotenzial für Systeme des öffentlichen Verkehrs auf, die sich in der Elektrifizierung befinden. Viele Städte stehen vor ähnlichen Herausforderungen im Zusammenhang mit Ladebedarf, Netzrestriktionen und künftigem Batteriemangement.

Second-Life-Batteriespeicher bieten eine praktikable Möglichkeit, diese Themen gleichzeitig anzugehen, und können an Gelegenheitsladestationen, in Betriebshöfen oder Mobilitätshubs eingesetzt werden. Auf diese Weise unterstützt die Lösung sowohl Ziele der Kreislaufwirtschaft als auch ein flexibleres Energiemanagement in Systemen des öffentlichen Verkehrs.

Die Lösung leistet in erster Linie einen Beitrag zur Stufe **EXTEND - Umnutzung** in der Hierarchie der Kreislaufwirtschaft, indem sie die kaskadische Nutzung von Traktionsbatterien vor deren endgültigem Recycling ermöglicht.

3.4. Aktivität A.4: Förderung der Übernahme von Lösungen zur Werterhaltung und Abfallvermeidung bei Fahrzeugen und Rollmaterial

Diese Aktivität konzentriert sich auf die Verlängerung der Lebensdauer von Komponenten des rollenden Materials durch Instandsetzung, Wiederaufarbeitung und verbesserten Informationsaustausch im Sektor des öffentlichen Verkehrs.

Das in Szeged durchgeführte Pilotprojekt zeigt die Neugestaltung und Wiederaufarbeitung einer veralteten Türsteuerungseinheit für Straßenbahnen und ermöglicht so den Weiterbetrieb alternder Tatra-Straßenbahnfahrzeuge. Durch den Ersatz einer kritischen elektronischen Komponente, die am Markt nicht mehr

verfügbar ist, veranschaulicht das Pilotprojekt, wie eine gezielte Neugestaltung von Komponenten den betrieblichen Wert bestehenden rollenden Materials erhalten kann.

Die im Pilotprojekt gewonnenen Erfahrungen sind mit der Entwicklung einer digitalen Second-Hand- und Matchmaking-Plattform verknüpft, die den Informationsaustausch und die Zusammenarbeit zwischen Akteuren des öffentlichen Verkehrs unterstützt, um die Wiederverwendung und Wiederaufarbeitung von Fahrzeugkomponenten zu erleichtern.

3.4.1. Pilotprojekt P.7: Wiederaufarbeitung und Neugestaltung von Straßenbahn-Steuergeräten zur Ermöglichung der Wiederverwendung von Komponenten (Szeged, Ungarn)

Kurzbeschreibung des Pilotprojekts

Dieses Pilotprojekt konzentriert sich auf die Verlängerung der betrieblichen Lebensdauer von Straßenbahnfahrzeugen durch die Neugestaltung und Wiederaufarbeitung einer kritischen elektronischen Komponente. Es wurde von der Verkehrsgesellschaft Szeged (SZKT) umgesetzt und behandelt das Problem veralteter Türsteuergeräte in den Straßenbahnflotten Tatra T6A2 und KT4D-ME, die auf dem Ersatzteilmarkt nicht mehr verfügbar sind.

Um dieses Risiko zu mindern, wurde eine neue, parametrierbare und diagnosetaugliche Steuereinheit unter Einsatz moderner Komponenten entwickelt. Die Einheit wurde so ausgelegt, dass sie mit beiden Straßenbahntypen kompatibel ist und sich in bestehende Türsysteme integrieren lässt, wodurch der weitere Betrieb alternder Fahrzeuge ohne vorzeitigen Ersatz ermöglicht wird.



Abbildung 29: In Szeged eingesetzte Tatra-Straßenbahnfahrzeuge (Typen KT4D und T6A2).

Erforderliche Ressourcen

Die Umsetzung erforderte eine technische Analyse der bestehenden Systeme, die Entwicklung neuer Hardware und Diagnosesoftware sowie die Einrichtung einer kontrollierten Testumgebung.

Zu den zusätzlichen Aufwänden gehörten die Zertifizierung durch eine akkreditierte Stelle, die behördliche Zulassung für den Betrieb sowie die Herstellung einer ersten Serie von Ersatzeinheiten, unterstützt durch die enge Zusammenarbeit zwischen internen Teams und externen Partnern.



Abbildung 30: Kontrollierte Testumgebung für die Funktionsprüfung der neu entwickelten Türsteuerungseinheit.

Erfolgsnachweise

Das Pilotprojekt entwickelte und implementierte erfolgreich eine Ersatz-Steuereinheit, die mit zwei Straßenbahntypen kompatibel ist. Insgesamt wurden 99 Originaleinheiten in 28 Fahrzeugen als kritische Komponenten identifiziert, und eine erste Serie von 40 neuen Einheiten wurde hergestellt und installiert.

Die Lösung beseitigte die Ersatzteilobsoleszenz für eine Schlüsselkomponente, sicherte den Weiterbetrieb der Flotte und führte Diagnosefunktionen ein, die eine verbesserte Instandhaltung und Fehlererkennung unterstützen.



Abbildung 31: Neu gefertigte Türsteuerungseinheit, eingebaut in einem Straßenbahnfahrzeug.

Herausforderungen

Die größte Herausforderung war das Genehmigungsverfahren für eine neu entwickelte sicherheitskritische elektronische Komponente, da regulatorische Verfahren nicht klar definiert waren und eine umfangreiche Abstimmung mit Zertifizierungsstellen erforderten. Zusätzliche Komplexität bestand darin, die Kompatibilität mit unterschiedlichen Straßenbahnsystemen sicherzustellen und technische Spezifikationen für einen langfristigen Betrieb festzulegen.

Lern- und Transferpotenzial

Das Pilotprojekt zeigt einen übertragbaren Ansatz zur Bewältigung von Ersatzteilobsoleszenz bei alterndem Rollmaterial. Viele Städte betreiben ähnliche Straßenbahnflotten und stehen vor vergleichbaren Herausforderungen.

Die Methodik - kritische Komponenten identifizieren, Ersatzlösungen neu gestalten und zertifizieren - kann von anderen Betreibern repliziert werden und unterstützt damit kreislauforientierte Instandhaltungsstrategien sowie die Verlängerung der Fahrzeuglebensdauer.

Der Ansatz leistet in erster Linie einen Beitrag zur **EXTEND**-Dimension des AETE-Rahmens, insbesondere durch Instandsetzung und Wiederaufarbeitung von Komponenten des rollenden Materials.

4. Erkenntnisse

In den CE4CE-Pilotprojekten traten mehrere zentrale Themen hervor, die zeigen, wie zirkuläre Lösungen unter unterschiedlichen Betriebsbedingungen in der Praxis funktionieren.

Daten- und Systemintegration

Die Pilotprojekte zur vorausschauenden Instandhaltung zeigten, dass die Wirksamkeit digitaler Lösungen stark von Datenqualität und Systemintegration abhängt. In Leipzig ermöglichte eine kontinuierliche fahrzeugbasierte Überwachung die frühzeitige Erkennung von Infrastrukturdefekten, machte jedoch auch den Bedarf an stabilen Datenpipelines und einer Validierung durch Vor-Ort-Inspektionen deutlich. Ebenso zeigten simulationsbasierte Ansätze, dass die Harmonisierung von Daten aus unterschiedlichen Quellen eine Voraussetzung für verlässliche Modellierung und Entscheidungsunterstützung ist.

Verlängerung der Asset-Lebensdauer durch Wiederverwendung und Wiederaufarbeitung

Pilotprojekte mit Fokus auf die Wiederverwendung von Infrastruktur und Komponenten hoben das Potenzial zur Verlängerung von Asset-Lebensdauern hervor. In Szeged zeigte die Wiederverwendung von Trolleybusweichen, dass Komponenten aus Netzabschnitten mit hoher Belastung wirksam in Umgebungen mit geringerer Nachfrage wieder eingesetzt werden können. Ein ähnliches Prinzip wurde bei der Wiederaufarbeitung von Straßenbahn-Steuergeräten angewendet, bei der die Neugestaltung den Weiterbetrieb alternder Fahrzeuge trotz Ersatzteilobsoleszenz ermöglichte.

Systemintegration und Wertschöpfung in Energieanwendungen

Energiebezogene Pilotprojekte zeigten, dass der Wert zirkulärer Lösungen mit zunehmender Systemintegration steigt. In Maribor erwies sich der Second-Life-Batteriespeicher bei ausschließlicher Nutzung zur Lastspitzenkappung als nur begrenzt vorteilhaft, erzielte jedoch einen deutlich höheren Wert, wenn er mit der Integration erneuerbarer Energien und flexiblem Energiemanagement kombiniert wurde. Dies unterstreicht, wie wichtig es ist, zirkuläre Lösungen als Teil einer umfassenderen Systemoptimierung und nicht als isolierte Einzelmaßnahme zu betrachten.

Organisatorische Bereitschaft und Umsetzungsprozesse

Über alle Pilotprojekte hinweg hing eine erfolgreiche Umsetzung von der Koordination zwischen mehreren Stakeholdern und der Integration in bestehende betriebliche Strukturen ab. Phasenweise Umsetzungsansätze, beginnend mit Pilotversuchen und gefolgt von einer schrittweisen Skalierung, erwiesen sich als wirksam, um technische und organisatorische Komplexität zu bewältigen.

Diese Erkenntnisse sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

Bereich	Wichtige Erkenntnisse
Technik & Daten	<ul style="list-style-type: none"> • Erfolgreiche Lösungen hängen von der Kompatibilität mit bestehender Infrastruktur und bestehenden Systemen ab, insbesondere in Bestandsumgebungen. • Eine verlässliche Umsetzung erfordert hochwertige und harmonisierte Daten, unterstützt durch stabile Datenpipelines. • Modulares Systemdesign ermöglicht eine skalierbare Einführung und flexible Integration.
Operativ	<ul style="list-style-type: none"> • Die Umsetzung erfordert Koordination über organisatorische Funktionen hinweg und die Integration in bestehende Arbeitsabläufe. • Die frühzeitige Einbindung von Stakeholdern verringert Risiken deutlich und erleichtert die Umsetzung. • Phasenweise Ansätze ermöglichen Tests, Validierung und schrittweise Skalierung.
Wirtschaftlich	<ul style="list-style-type: none"> • Zirkuläre Lösungen erfordern typischerweise Anfangsinvestitionen, schaffen jedoch über längere Zeithorizonte Wert. • Die wirtschaftliche Leistung hängt von Systemgröße, Integrationsgrad und betrieblichem Kontext ab. • Ein erheblicher Anteil des Nutzens entsteht durch indirekte Vorteile wie Zuverlässigkeit und Effizienz.
Erkenntnisse zur Kreislaufwirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> • Das größte Potenzial liegt in der Verlängerung von Asset-Lebensdauern, der Wiederverwendung von Komponenten und der Umnutzung energiebezogener Assets. • Kreislauforientierte Strategien folgen häufig einer Kaskadenlogik über unterschiedliche Nutzungskontexte hinweg. • Eine Lebenszyklusperspektive ist wesentlich, um den vollen Wert zu erfassen.
Übertragbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Lösungen auf Basis modularer und anpassungsfähiger Ansätze weisen das höchste Transferpotenzial auf. • Der Transfer hängt von lokalen organisatorischen, technischen und regulatorischen Bedingungen ab. • Wissensaustausch und klare Dokumentation unterstützen die Replikation

Tabelle 7: Überblick über die bereichsübergreifenden Erkenntnisse.

5. Umsetzungscheckliste und zentrale Aspekte

Aufbauend auf den in Kapitel 4 dargestellten Erkenntnissen bietet dieses Kapitel praktische Leitlinien für die Umsetzung der CE4CE-Lösungen in unterschiedlichen lokalen Kontexten. Es übersetzt die identifizierten Erkenntnisse in umsetzbare Schritte, zentrale Erfolgsfaktoren und Risikobetrachtungen, um Stakeholder bei der Einführung von Ansätzen der Kreislaufwirtschaft in Systemen des öffentlichen Verkehrs zu unterstützen.

Die Leitlinien richten sich an Betreiber, Aufgabenträger und andere Stakeholder des öffentlichen Verkehrs, die CE4CE-Lösungen unter Berücksichtigung lokaler technischer, organisatorischer und wirtschaftlicher Bedingungen anpassen und umsetzen möchten.

5.1. Zentrale Aspekte für eine erfolgreiche Umsetzung

Die Umsetzung von CE4CE-Lösungen erfordert die Berücksichtigung einer Reihe zentraler Aspekte, die Machbarkeit, Wirksamkeit und Skalierbarkeit bestimmen. Diese Aspekte spiegeln praktische Anforderungen wider, die im Rahmen der Pilotmaßnahmen und der Lösungsentwicklung identifiziert wurden.

Eine erfolgreiche Umsetzung hängt davon ab, die Kompatibilität mit bestehenden Infrastrukturen und Systemen - insbesondere in Bestandsumgebungen - sicherzustellen sowie verlässliche und gut strukturierte Daten bereitzustellen. Gleichzeitig spielt die

organisatorische Bereitschaft eine wichtige Rolle, darunter die Koordination zwischen Abteilungen, die Einbindung von Stakeholdern und die Fähigkeit, neue Ansätze in bestehende Arbeitsabläufe zu integrieren.

Die wirtschaftliche Tragfähigkeit muss aus Lebenszyklusperspektive betrachtet werden, wobei sowohl direkte als auch indirekte Nutzen zu berücksichtigen sind. Zugleich können regulatorische Anforderungen und Genehmigungsverfahren den Zeitplan der Umsetzung und das Lösungsdesign beeinflussen. Darüber hinaus sollten Lösungen mit Blick auf Skalierbarkeit und Übertragbarkeit konzipiert werden, sodass sie an unterschiedliche betriebliche und institutionelle Kontexte angepasst werden können.

5.2. Umsetzungscheckliste

Tabelle 9 bietet einen strukturierten Schritt-für-Schritt-Ansatz zur Unterstützung der Umsetzung von Lösungen der Kreislaufwirtschaft in Systemen des öffentlichen Verkehrs - von der Erstbewertung bis zur Skalierung und Integration in den Regelbetrieb.

Schritt	Fokus
Schritt 1: Erstbewertung	<ul style="list-style-type: none"> • Chancen der Kreislaufwirtschaft in Infrastruktur, Fahrzeugen und Energiesystemen identifizieren • Aktuelle Praktiken des Lebenszyklus-Asset-Managements analysieren • Prioritäre Handlungsfelder definieren
Schritt 2: Machbarkeitsanalyse	<ul style="list-style-type: none"> • Technische Machbarkeit ausgewählter Lösungen bewerten • Datenverfügbarkeit und Systemanforderungen bewerten • Wirtschaftliche Tragfähigkeit und potenzielle Nutzen analysieren • Regulatorische Rahmenbedingungen identifizieren
Schritt 3: Lösungsdesign	<ul style="list-style-type: none"> • Technisches Konzept und Systemarchitektur festlegen • Geeignete Technologien und Partner auswählen • Umsetzungsplan und Zeitplan entwickeln • Leistungsindikatoren definieren
Schritt 4: Umsetzung	<ul style="list-style-type: none"> • Lösung in einer kontrollierten Pilotumgebung einführen • Leistung überwachen und Daten erfassen • Betriebspersonal und Stakeholder einbinden • System auf Basis von Rückmeldungen anpassen
Schritt 5: Bewertung und Optimierung	<ul style="list-style-type: none"> • Pilotergebnisse und Leistungsdaten analysieren • Verbesserungs- und Optimierungspotenziale identifizieren • Wirtschaftliche und betriebliche Nutzen validieren
Schritt 6: Skalierung und Transfer	<ul style="list-style-type: none"> • Skalierungsstrategie innerhalb der Organisation entwickeln • Lösung an andere Kontexte oder Standorte anpassen • Wissen und Erkenntnisse teilen • Lösung in den Regelbetrieb integrieren

Tabelle 9: Schritt-für-Schritt-Umsetzungscheckliste.

Häufige Risiken und Minderungsmaßnahmen

Die Umsetzung von Lösungen der Kreislaufwirtschaft in Systemen des öffentlichen Verkehrs bringt eine Reihe häufig auftretender Risiken mit sich, die mit Daten, Technologie, organisatorischen Kapazitäten und regulatorischen Rahmenbedingungen zusammenhängen.

Eine zentrale Herausforderung betrifft die Verfügbarkeit und Qualität von Daten, da unvollständige oder inkonsistente Daten die Wirksamkeit digitaler Werkzeuge und evidenzbasierter Entscheidungsfindung einschränken können. Dies erfordert eine frühzeitige Prüfung der Datenverfügbarkeit sowie Validierungsverfahren und den Aufbau verlässlicher Datenmanagementprozesse.

Auch technische Inkompatibilitäten mit bestehender Infrastruktur und Altsystemen können die Umsetzung beeinträchtigen. Diese Herausforderungen lassen sich durch modulare und flexible Systemdesigns bewältigen, die eine schrittweise Integration in bestehende Umgebungen ermöglichen, ohne umfangreiche Systemänderungen zu erfordern.

Regulatorische Anforderungen und Genehmigungsverfahren können die Umsetzungszeiträume beeinflussen, insbesondere bei

5.4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Das CE4CE-Handbuch zeigt, wie Prinzipien der Kreislaufwirtschaft in praktische Anwendungen innerhalb von Systemen des öffentlichen Verkehrs übersetzt werden können. Durch Pilotmaßnahmen in unterschiedlichen betrieblichen Kontexten hat das Projekt wertvolle Erfahrungen dazu gewonnen, wie Wert erhalten, Abfall reduziert und die Ressourceneffizienz über Infrastruktur, Fahrzeuge und Energiesysteme hinweg verbessert werden kann.

Die in diesem Handbuch vorgestellten Lösungen bauen auf diesen Erfahrungen auf und bieten strukturierte, übertragbare Ansätze, die Aufgabenträger und Betreiber des öffentlichen Verkehrs bei der Umsetzung kreislauforientierter Praktiken unterstützen können. Zusammen mit den bereichsübergreifenden Erkenntnissen bieten sie sowohl strategische Orientierung als auch praktische Leitlinien für den Übergang vom linearen zum kreislauforientierten Asset-Management.

innovativen oder sicherheitskritischen Lösungen. Daher ist eine frühzeitige Einbindung der Regulierungsbehörden wichtig, um Anforderungen zu klären und das Risiko von Verzögerungen zu verringern. Begrenzte organisatorische Kapazitäten, einschließlich begrenzter Expertise oder Ressourcen, können die Umsetzung zusätzlich beeinträchtigen. Diese Risiken lassen sich durch Kapazitätsaufbau, gezielte Schulungen und die Bereitstellung ausreichender Ressourcen zur Unterstützung von Umsetzung und Betrieb mindern.

Schließlich spielt die Einbindung von Stakeholdern eine entscheidende Rolle für eine erfolgreiche Umsetzung. Eine begrenzte Einbindung oder fehlende Abstimmung zwischen Stakeholdern kann den Fortschritt behindern, während kontinuierliche Kommunikation und frühzeitige Einbindung Koordination, Akzeptanz und eine wirksame Umsetzung unterstützen.

Risiken	Minderungsmaßnahmen
Mangelnde Datenverfügbarkeit oder geringe Datenqualität	Frühzeitige Datenprüfung und Validierung
Technische Inkompatibilität	Modulares Systemdesign
Regulatorische Verzögerungen	Frühzeitige Einbindung von Regulierungsbehörden
Begrenzte organisatorische Kapazitäten	Kapazitätsaufbau und Schulung
Geringe Stakeholder-Einbindung	Kontinuierliche Stakeholder-Kommunikation

Die in diesem Kapitel dargestellte Checkliste bietet einen strukturierten Ansatz, der an unterschiedliche Kontexte des öffentlichen Verkehrs und verschiedene kreislauforientierte Lösungen angepasst werden kann. Fortgesetzter Wissensaustausch, die Zusammenarbeit mit Stakeholdern und die weitere Entwicklung kreislauforientierter Geschäftsmodelle werden entscheidend sein, um diese Ansätze zu skalieren und den Übergang zu nachhaltigen und kreislauforientierten Systemen des öffentlichen Verkehrs zu unterstützen.

6. Quellenverzeichnis

Projektleistungen des CE4CE-Projekts:

- D.3.1.1 Der Public Transport Circularity Compass -
Ergebniszusammenfassung mit Hinweisen für die Übernahme.
- D.1.2.2 Bericht über Umsetzung, Erprobung, Evaluierung und Peer Review der CE4CE-Plattform zur Kreislaufwirtschaft im öffentlichen Verkehr.
- D.3.1.2 Bericht über die Entwicklung gemeinsamer digitaler Lösungen zur Ermöglichung und Beschleunigung der Kreislaufwirtschaft im öffentlichen Verkehr.
- D.3.2.1 Bericht über gemeinsame Anforderungen und den Plan für Vorbereitung, Umsetzung und Evaluierung der Pilotprojekte:
Wiederverwendung von Trolleybus-Oberleitungsweichen in Szeged und Wiederverwendung gebrauchter Batterien in Maribor.
- D.3.2.2 Bericht über die Entwicklung von Lösungen zur
Werterhaltung und Abfallvermeidung bei der Infrastruktur des öffentlichen Verkehrs.
- D.3.3.1 Bericht über gemeinsame Anforderungen und den Plan für Vorbereitung, Umsetzung und Evaluierung der Pilotprojekte.
- D.3.3.2 Bericht zur Förderung der Übernahme von Lösungen zur Werterhaltung und Abfallvermeidung bei Fahrzeugen und Rollmaterial.

Factsheets zu den Projektergebnissen des CE4CE-Projekts:

- O1.1 CE4CE Public Transport Circularity Compass
- O1.2 CE4CE-Wissensplattform zur Kreislaufwirtschaft im öffentlichen Verkehr
- O3.1 Digitale Optimierung von Infrastruktur und Fahrzeugen durch vorausschauende Instandhaltung
- O3.2 Module für die vorausschauende Instandhaltung von Infrastruktur und Rollmaterial
- O3.3 Simulation eines E-Korridors und von Energieflüssen zur Abbildung zirkulärer Szenarien für den Ausbau der Elektrifizierung.
- O3.4 Geschäftsplanungstool für elektrifizierte Flotten und Infrastruktur des öffentlichen Verkehrs.
- O3.5 Demonstration der Machbarkeit der Wiederverwendung von Trolleybus-Oberleitungsweichen.
- O3.6 Definition von Übernahmekriterien für die Wiederverwendung von Trolleybus-Oberleitungsweichen.
- O3.7 Analyse von Anwendungen gebrauchter Batterien zur Speicherung erneuerbarer Energie für den Betrieb eines Schnellladers als Beispiel für eine strategische Ausrichtung auf Kreislaufwirtschaft.
- O3.8 Entwicklung übertragbarer Geschäftsmodelle für die Wiederverwendung von Batterien zur Speicherung erneuerbarer Energie in Systemen des öffentlichen Verkehrs.
- O3.9 Konzept für Straßenbahn-Steuergeräte im Rahmen der Wiederaufarbeitung von Straßenbahnen.
- O3.10 Online-Second-Hand- und Matchmaking-Markt für gebrauchte Teile, Produkte und Informationsaustausch



Scan me for the project website

Copyright: Szeged Transport Company

Das CE4CE-Projekt (Infrastruktur des öffentlichen Verkehrs in Mitteleuropa - den Übergang zur Kreislaufwirtschaft erleichtern) stärkt das kreislaufwirtschaftliche Systemdenken bei Akteuren des öffentlichen Verkehrs in Mitteleuropa, um Abfälle zu reduzieren und entlang neuer Lebenszyklen von Infrastruktur und rollendem Material Wert zu schaffen.

KONTAKTIEREN SIE UNS

Leipziger Verkehrsbetriebe (LVB) Gmb

Projektkoordinator: Herr tefan Röll

E-mail: CE4CE.Verkehrsbetriebe@L.de

Projektwebsite: <https://www.interreg-central.eu/projects/ce4ce/>

LinkedIn: <https://www.linkedin.com/company/interreg-ce4ce/>

YouTube: <https://www.youtube.com/@InterregCE4CE>

Projektwissensplattform: <https://circularity4publictransport.eu/>

