



Interreg
CENTRAL EUROPE



European Union
European Regional
Development Fund

EfficienCE



TRANSNATIONALES HANDBUCH FÜR DEN EINSATZ ENERGIEEFFIZIENTER ÖPNV- INFRASTRUKTURTECHNOLOGIEN

(2) Mehrzwecknutzung der ÖPNV-Infrastruktur

IMPRESSUM

Projektnummer:

CE1537 EfficienCE, Energieeffizienz für ÖPNV-Infrastruktur in Mitteleuropa.

Finanziert von:

Interreg Central Europe (<http://interreg-central.eu/Content.Node/home.html>)

Titel:

D.T2.3.2 Transnationale Handbücher für den Einsatz energieeffizienter ÖPNV-Infrastrukturtechnologien

Herausgeber:

EfficienCE-Konsortium

Autoren:

Mitja Klemenčič, Marijan Španer, Matej Moharić, Vlasta Rodošek (Universität Maribor)

Layout und Design:

Levent Saran (Rupprecht Consult GmbH)

Datum:

Juni 2022

Über das EfficienCE-Projekt

EfficienCE ist ein vom Interreg CENTRAL EUROPE Programm finanziertes Kooperationsprojekt, das darauf abzielt, die CO₂-Bilanz in der Region zu verringern. Die meisten mitteleuropäischen Städte verfügen über umfangreiche öffentliche Verkehrssysteme, die die Grundlage für emissionsarme Mobilitätsdienste bilden können. Mehr als 63 % der Pendler in der Region nutzen öffentliche Verkehrsmittel. Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und des Anteils erneuerbarer Energien in der ÖPNV-Infrastruktur können daher besonders große Auswirkungen auf die Reduzierung von CO₂ haben.

Erreicht wurde dies durch die Unterstützung von lokalen Behörden und öffentlichen Verkehrsunternehmen bei der Entwicklung von Planungsstrategien und Aktionsplänen, der Durchführung von Pilotmaßnahmen, der Entwicklung von Instrumenten und Schulungen zur Planung und zum Betrieb von emissionsarmen Infrastrukturen sowie durch den Transfer von Wissen und bewährten Verfahren zu energieeffizienten Maßnahmen in den mitteleuropäischen Regionen.

Zwölf Partner, darunter sieben Verkehrsbehörden/-unternehmen aus sieben Ländern, arbeiteten drei Jahre lang zusammen, um die ungenutzten Potenziale in diesem Sektor zu nutzen und einen Beitrag zu den Zielen des Weißbuchs der EU zu leisten, die Verkehrsemissionen bis 2050 um 60 Prozent zu senken und den Einsatz von konventionell angetriebenen Fahrzeugen im Stadtverkehr bis 2030 zu halbieren.

Inhalt

Zusammenfassung	5
1. Mehrzwecknutzung der ÖPNV-Infrastruktur	6
1.1 Zusammenfassung einschlägiger Technologien	6
1.1.1 Technologie A - Multimodale Nutzung der ÖPNV-Infrastruktur	7
1.1.2 Technologie B - Multifunktionale Nutzung der ÖPNV-Infrastruktur	10
1.1.3 Technologie C - Innovatives In-Motion-Charging für ÖPNV	14
1.2 Mehrzweck-ÖPNV-Infrastrukturen in aller Welt	17
2. Anwendungsfall Maribor - Anpassung der Seilbahnstation an eine Mehrzweck-ÖPNV-Infrastruktur	23
3. Schlussfolgerungen	27
Referenzen	28

Zusammenfassung



Foto: Stadt Leipzig

Die zunehmende Urbanisierung stellt die Verkehrssysteme vor große Herausforderungen. Die alternde Verkehrsinfrastruktur kann den heutigen Anforderungen kaum noch gerecht werden, während sich die persönlichen Entscheidungen in Bezug auf den Stadtverkehr so entwickelt haben, dass die autoorientierte Verkehrspolitik der Vergangenheit nicht mehr ausreicht.

Dieses Handbuch bietet eine Einführung in die Mehrzwecknutzung der ÖPNV-Infrastruktur für Städte, in denen die ÖPNV-Infrastruktur keine Planungspriorität darstellt, und für Städte mit einer fortgeschrittenen Planungskultur für die ÖPNV-Infrastruktur.

Die Mehrzwecknutzung der ÖPNV-Infrastruktur integriert Energie-, Mobilitäts- und Logistikaspekte, um die CO₂-Emissionen zu minimieren und den Verkehrsbetrieb durch verschiedene Technologien energieeffizienter zu gestalten.

Energieeffiziente Mehrzweck-Infrastrukturstechnologien für den öffentlichen Verkehr sind im Allgemeinen in Lösungen für die multimodale Nutzung, die multifunktionale Nutzung und innovative Ansätze für die in der Entwicklung befindlichen IMC-Ladetechnologien gegliedert.

Jede dieser Technologien hat mehrere Vorteile und Nutzen. Diese können technischer, finanzieller oder sicherheitsrelevanter Natur sein.

Jede der vorgestellten Technologien weist jedoch auch technische und rechtliche Hindernisse auf, z. B. fehlende technische Normen, Kompatibilität zwischen verschiedenen Herstellern, Sicherheits Einschränkungen, geringe Energieeffizienz, zusätzliche Kosten, Standardisierung von Infrastruktur und Systemen.

Ein Überblick über aktuelle Praktiken im Zusammenhang mit verschiedenen Lösungen für die multimodale Nutzung des ÖPNV und eine Fallstudie aus dem EfficienCE-Pilotprojekt stellen neue Technologien im Einsatz mit ihren Vorteilen, Erfahrungen und Übertragungsmöglichkeiten vor.

1. Mehrzwecknutzung der ÖPNV-Infrastruktur

Elektromobilität ist ein immer wichtigeres Thema für den öffentlichen Nahverkehr (ÖPNV) in den Städten geworden. Elektrizität ist die Energiequelle für den Antrieb verschiedener Elektrofahrzeuge.

Der Hauptunterschied zwischen den Technologien für die Nutzung von Mehrzweck-ÖPNV-Infrastrukturen besteht darin, dass sie je nach Bedarf eingesetzt werden:

- Die Verkehrsträger, für die die Mehrzwecknutzung relevant sind (basierend auf der vorhandenen ÖPNV-Infrastruktur) und
- Die Funktionalität der Energieübertragung zwischen Energiequelle, ÖPNV-Infrastruktur und elektrischen ÖPNV-Fahrzeugen.

1.1 Zusammenfassung einschlägiger Technologien

Die Klassifizierung der Mehrzweck-Infrastrukturtechnologien für den ÖPNV basiert auf der bestehenden multimodalen und multifunktionalen Nutzung der ÖPNV-Infrastruktur.

Technologie A - Die multimodale Nutzung bestehender ÖPNV-Infrastrukturen wie U-Bahn, Straßenbahn, Eisenbahn oder Seilbahn, wo zusätzliche Ladevorgänge stattfinden für: E-Busse, (Hybrid-)Trolleybusse und andere E-Modelle (E-Autos, E-Bikes, E-Lieferungen).

Technologie B - Die multifunktionale Nutzung der ÖPNV-Infrastruktur, wobei die vorhandene ÖPNV-Infrastruktur für eine effizientere Nutzung der zurückgewonnenen Bremsenergie, des bidirektionalen Ladens (intelligentes Stromnetz) und der lokal erzeugten Energie aus EE (PV, Wind) genutzt wird.

Technologie C - Innovatives straßenbasiertes, multimodales und multifunktionales IMC (In-Motion-Charging): Induktive Bodenaufladung, direkte Oberflächenaufladung auf Autobahnen und direkte Bodenaufladung.

1.1.1 Technologie A - Multimodale Nutzung der ÖPNV-Infrastruktur

Technologie A bezieht sich auf das Konzept des Aufladens verschiedener Elektrofahrzeuge über das bestehende ÖPNV-Netz wie U-Bahn, Straßenbahn, Eisenbahn oder Seilbahn.

Lösung 1 - Strom aus den bestehenden ÖPNV-Netzen zur Versorgung von E-Bus-Ladestationen

Die Technologie bezieht sich auf das Konzept der Aufladung von Elektrobussen mit Energie aus bestehenden ÖPNV-Netzen wie U-Bahn, Straßenbahn, Trolleybus, Eisenbahn oder Seilbahn.

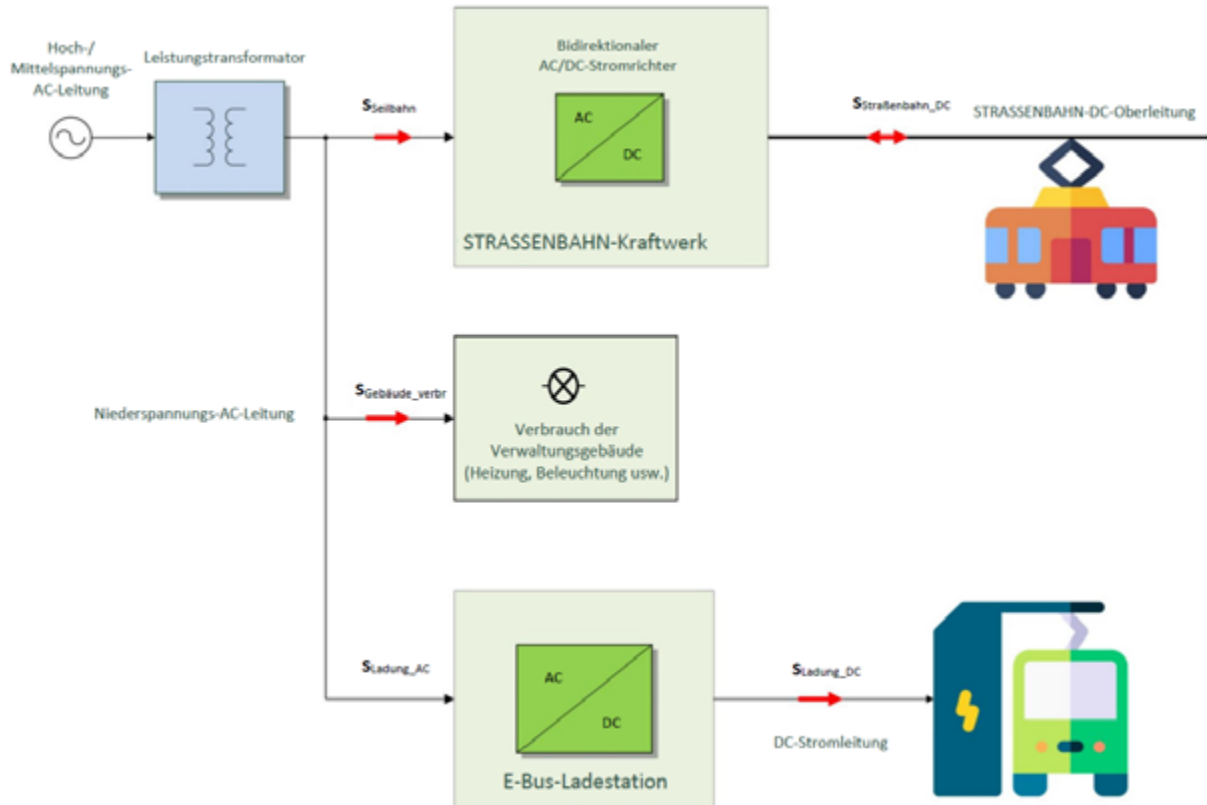


Abbildung 1: Anbindung der Ladestationen für Elektrofahrzeuge an die bestehende ÖPNV-Infrastruktur

Erwarteter Nutzen:

Der Hauptnutzen dieses Technologiekonzepts besteht darin, die schnelle, effiziente und kostengünstige Elektrifizierung des öffentlichen Busverkehrs durch die Bereitstellung einer Infrastrukturgrundlage zu unterstützen.

Durch die Integration der robusten Infrastruktur (Netz) der Straßenbahn/U-Bahn mit der Elektrifizierung von E-Bus-Flotten besteht die Möglichkeit, die Elektrifizierung von E-Bus-Flotten zu beschleunigen. Das Straßenbahn-/U-Bahn-Netz ist eine praktikable Alternative zum öffentlichen Stromverteilungsnetz, da keine zusätzlichen Umspannwerke für die Stromversorgung der E-Busse erforderlich sind.

Die wichtigsten technischen Vorteile liegen in den Bereichen:

- Standort- und Zeitverantwortung, Zuverlässigkeit bei Stromunterbrechungen,
- Effiziente und ausgewogene Stromverteilung

Das ist der wichtigste finanzielle Vorteil:

- Erzielung eines niedrigeren Energiebezugspreises (gemeinsames Volumen von U-Bahn/Straßenbahn und E-Bus).

Lösung 2 - Strom aus dem bestehenden ÖPNV-Netz (Straßenbahn oder U-Bahn) zum Betrieb von Elektrofahrzeugen und Hybrid-Trolleybussen

Die Verbindungen zwischen dem bestehenden Eisenbahn-, Straßenbahn- oder U-Bahnnetz und dem Trolleybusnetz könnten verbessert werden, indem die Trolleybusse mit einer zusätzlichen Antriebsbatterie ausgestattet werden, die sowohl einen Betrieb unter der Oberleitung als auch einen Betrieb ohne Anschluss an die Oberleitung (autonom) ermöglicht. Das Hauptziel dieses Clusters besteht darin, innerstädtische und regionale Elektrobuslinien zu erweitern und damit die derzeitigen Dieselfahrgastlinien zu ersetzen, ohne dass eine zusätzliche Oberleitungsinfrastruktur gebaut werden muss. Um die Implementierungskosten zu senken, könnte das (Hybrid-) Trolleybusnetz mit einem Schienensystem kombiniert werden.

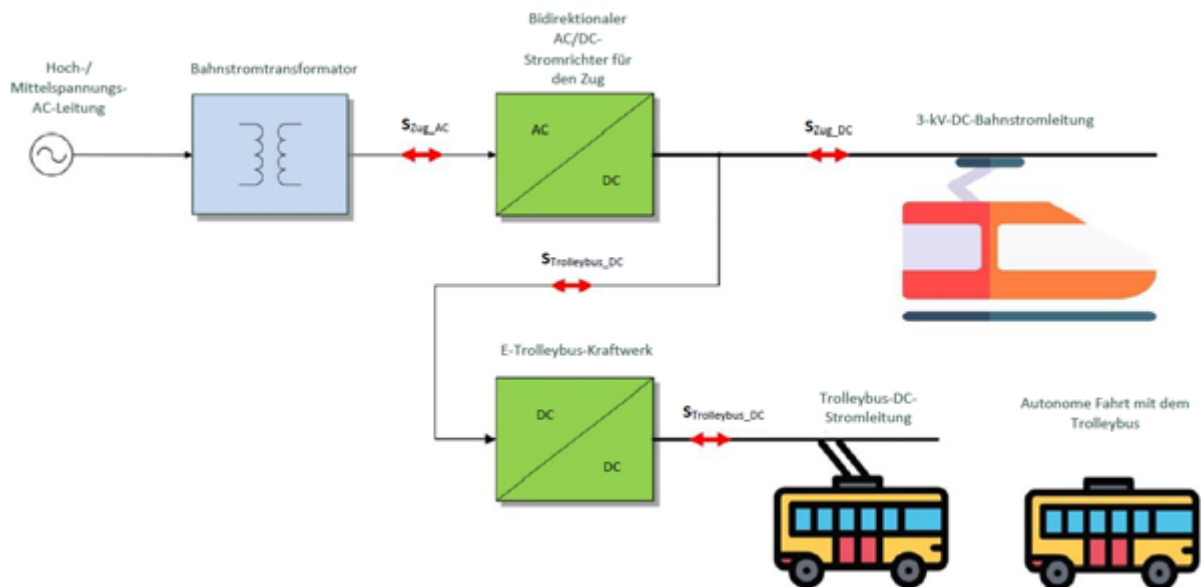


Abbildung 2: Kombination von In-Motion-Charging-Trolleybussen mit einem Schienensystem

Erwarteter Nutzen:

Die Hybrid-Trolleybus-Technologie ist ausgereift genug und kommerziell verfügbar, um eingesetzt zu werden. Darüber hinaus sind Elektrofahrzeuge Dieselfahrzeugen in Bezug auf Verfügbarkeit, Effizienz und Zuverlässigkeit ebenbürtig oder sogar überlegen, während sie weniger Wartung benötigen. Geringfügige Schwächen wurden bei Handhabung, Dimensionierung und Kompatibilität von Lithium-Ionen-Batterien in älteren Fahrzeugen festgestellt, die jedoch im Zuge der Weiterentwicklung der Batterietechnologie bald behoben werden könnten.

Lösung 3 - Strom aus dem bestehenden ÖPNV-Netz (Straßenbahn oder U-Bahn) zur Versorgung des multimodalen Ladezentrums

Bezieht sich auf ein technologisches Konzept, das die Mehrzwecknutzung von elektrischen ÖPNV-Netzen (U-Bahn, Straßenbahn oder Trolleybus) für den Antrieb anderer Arten von Elektrofahrzeugen ermöglicht, z. B. für Nutzfahrzeuge, Pkws und Taxis. Die in dieser Lösung berücksichtigten Elektrofahrzeuge variieren je nach Anwendungsfall und umfassen Elektroautos, -fahrräder und -transporter.

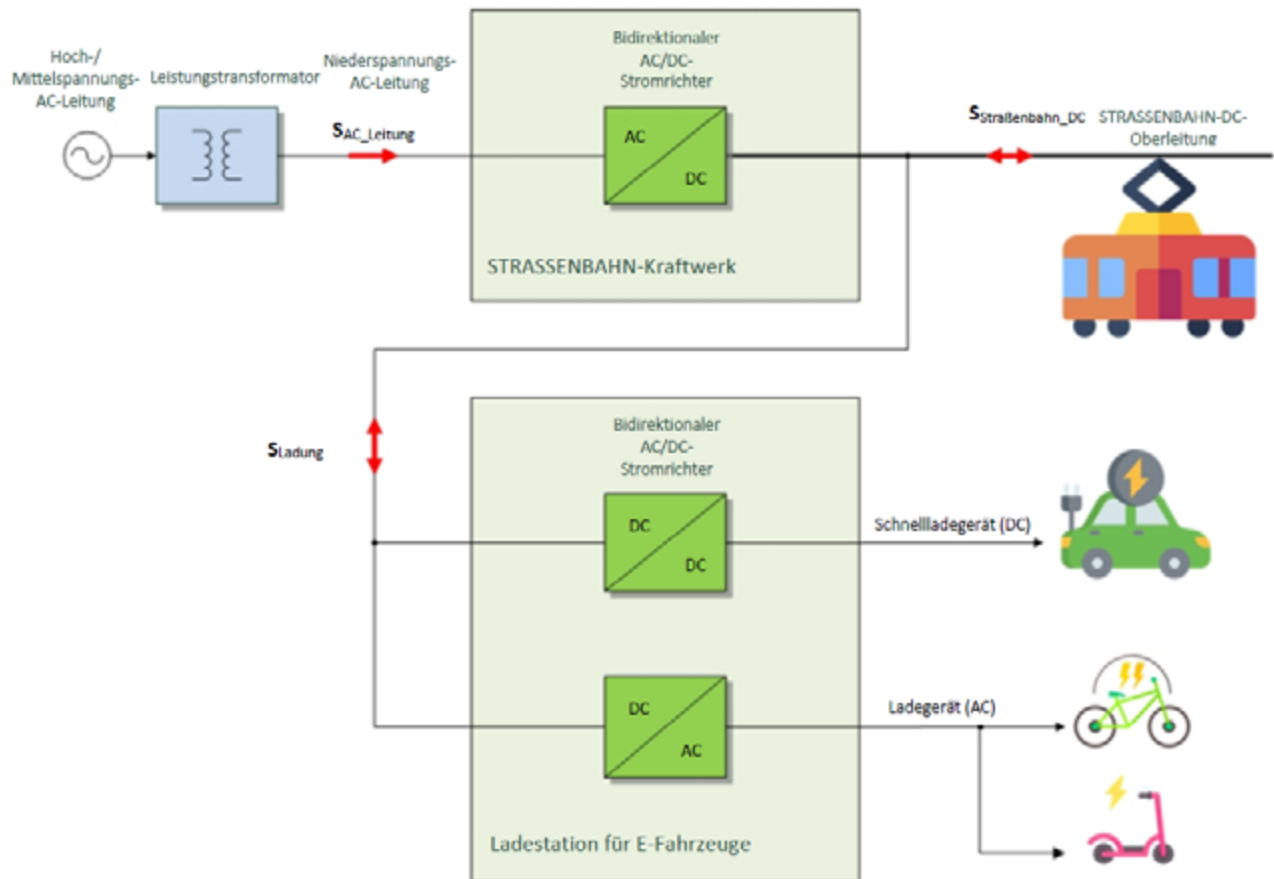


Abbildung 3: Schnelles Aufladen von E-Fahrzeugen an der Oberleitung der Straßenbahn

Erwarteter Nutzen:

Zunächst muss geklärt werden, ob es möglich ist, den Strombedarf der Ladeinfrastruktur über das Stromnetz zu decken, insbesondere an Standorten, die an das reguläre Stromnetz angeschlossen sind.

Technologie A	Technische Hindernisse	Rechtliche Hindernisse
Multimodale Nutzung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fehlende technische Normen für den Zwischenladebetrieb ▪ Kompatibilität zwischen verschiedenen Herstellern ▪ Erforderliche Änderungen am derzeitigen Zeitplan ▪ Belastung des Netzes - begrenzte Lademöglichkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verkauf oder Verteilung von Energie an Drittbetreiber (Busunternehmen) ▪ Nutzung von Umweltvorteilen für den Ausbau von Oberleitungen (nicht einfach)

1.1.2 Technologie B – Multifunktionale Nutzung der ÖPNV-Infrastruktur

Technologie bezieht sich auf die effizientere Nutzung der Ladeinfrastruktur des bestehenden ÖPNV-Netzes wie U-Bahn, Straßenbahn, Trolleybus, Eisenbahn oder Seilbahn.

Lösung 4 - Integrierte zurückgewonnene Bremsenergie

Unter Technologie werden die verschiedenen Maßnahmen und technischen Systeme zusammengefasst, die die Nutzung der zurückgewonnenen Bremsenergie in Schienenfahrzeugen (U-Bahn, Straßenbahn) und Bussen (Trolleybus) erhöhen. Das Hauptziel dieses Clusters ist die Steigerung der Energieeffizienz des öffentlichen Verkehrssystems durch eine effizientere Nutzung der zurückgewonnenen Bremsenergie der Fahrzeuge.

Es können drei Arten von Anwendungen definiert werden:

- Mobile Speicheranwendungen
- Stationäre Speicheranwendungen
- Stationäre Rückspeisungsanwendungen

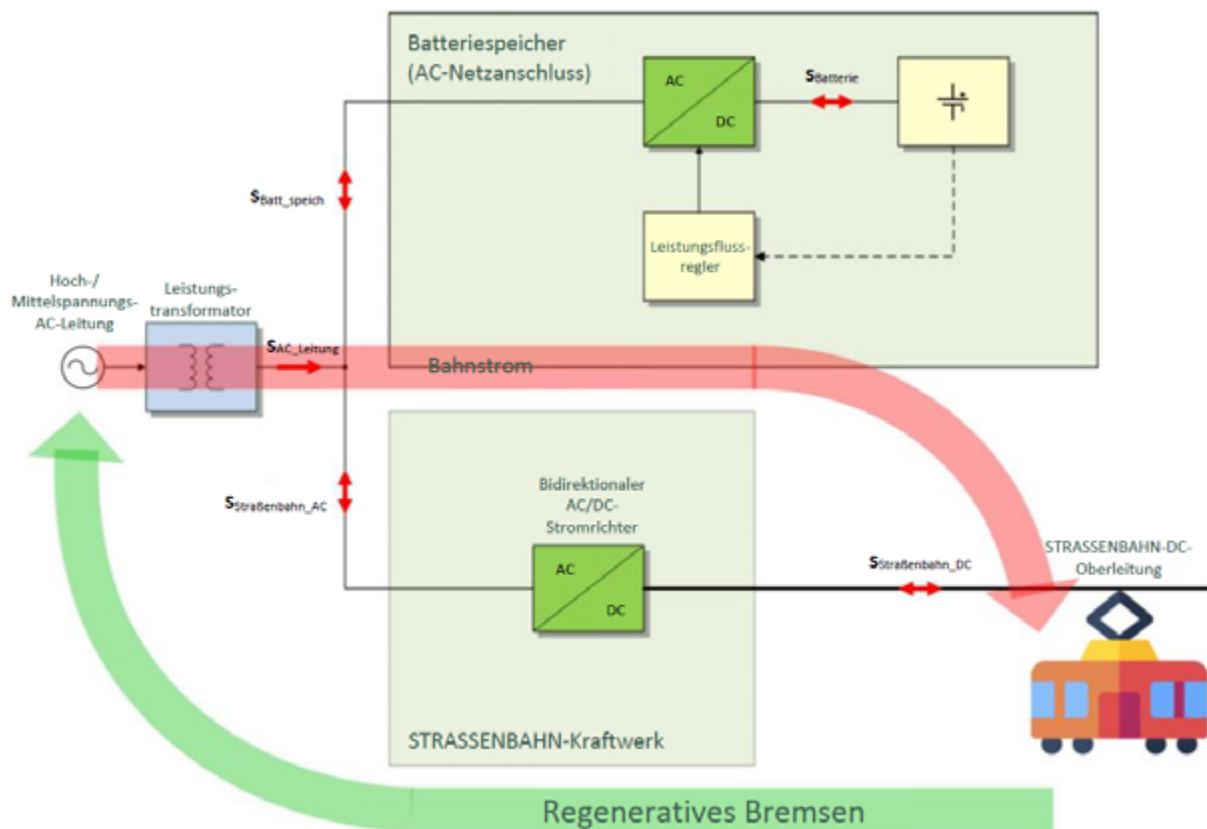


Abbildung 4: Stationäre Speicheranwendungen

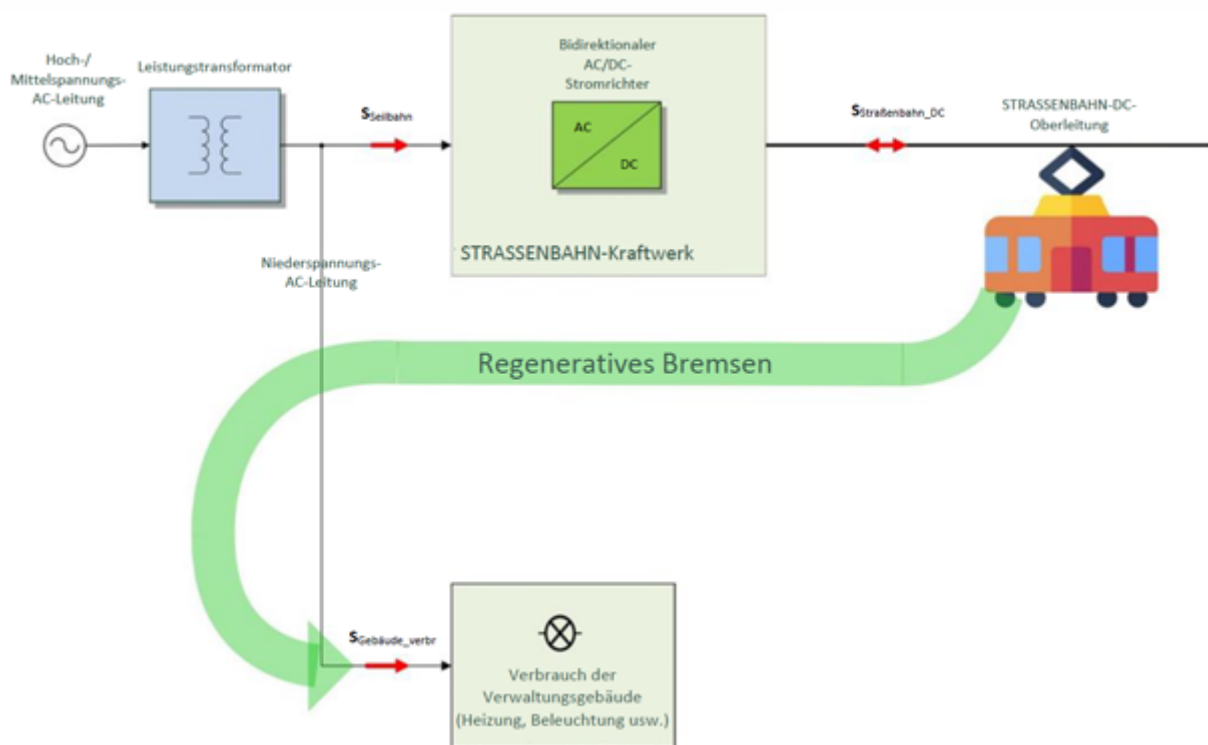


Abbildung 5: Stationäre Rückspeisungsanwendungen

Erwarteter Nutzen:

Die Vorteile, die von den Anträgen erwartet werden, können in den folgenden Punkten aufgezeigt werden (François-Olivier Devaux (STIB), März 2011):

Mobile Speicherung:

- Hohe Effizienz durch geringere Oberleitungsverluste, da die Speicherung im Fahrzeug erfolgt
- Möglichkeit, das Fahrzeug auf bestimmten Streckenabschnitten ohne Oberleitung zu betreiben
- Spannungsstabilisierung durch Verringerung von Spannungseinbrüchen
- Verringerung des Spitzenstrombedarfs durch Mittelung der Lasten über einen bestimmten Zeitraum
- Mögliche Verringerung der Bremswiderstände des Fahrzeugs

Stationäre Speichieranwendungen:

- Kann von allen auf der Strecke verkehrenden Fahrzeugen genutzt werden, Spannungsstabilisierung durch Verringerung von Spannungseinbrüchen
- Verringerung des Spitzenstrombedarfs durch Mittelung der Lasten über einen bestimmten Zeitraum
- Verringerung der Anzahl der Bahnstromunterwerke oder Möglichkeit, dass Fahrzeugen ohne Ausbau des Stromnetzes hinzugefügt werden können
- Verringerung der Abwärme, Vermeidung der Beheizung von Tunneln und Bahnhöfen
- Mögliche Verringerung der streckenseitigen Bremswiderstände
- Geringere Sicherheitseinschränkungen im Vergleich zu fahrzeugeigenen Systemen
- Implementierung, Wartung und Reparatur haben keinen Einfluss auf den Betrieb (Abschaltmodus)

Stationäre Rückspeisungsanwendungen:

- Kann von allen Fahrzeugen auf der Strecke verwendet werden
- Sehr energieeffizient, da weniger Umwandlungsverluste als bei Speichieranwendungen
- Reduzierung der Abwärme (Vermeidung von Wärmetunneln...) im Vergleich zu Speichieranwendungen
- Mögliche Verringerung der streckenseitigen Bremswiderstände
- Geringere Sicherheitsanforderungen im Vergleich zu fahrzeugeigenen Systemen
- Implementierung, Wartung und Reparatur haben keinen Einfluss auf den Betrieb (Abschaltmodus)

Lösung 5 - Intelligentes Stromnetz (PV, EE, Mobility 2 Grid, Vehicle 2 Grid)

Erneuerbare Energien und Elektromobilität für eine intelligente städtische Umwelt. Mit Hilfe der zunehmenden Elektromobilität besteht die Möglichkeit, ein integriertes Energie- und Verkehrssystem zu entwickeln. Entwicklung und Umsetzung innovativer Lösungen zur Gewährleistung einer erschwinglichen und sicheren Strom-, Wärme- und Verkehrsversorgung, die vollständig auf erneuerbaren Energien basiert.

Erwarteter Nutzen (Massink, 14. Januar 2019):

- Senkung der Gesamtbetriebskosten von Flotten, Batterien, PV etc.
- Auto-OEM (Hersteller) sind in der Lage, Fahrzeuge mit einem Mehrwert zu verkaufen
- Energiemarktteilnehmer können handeln und ihre Bilanz optimieren
- Netzbetreiber können Investitionen optimieren und das Netz stabilisieren

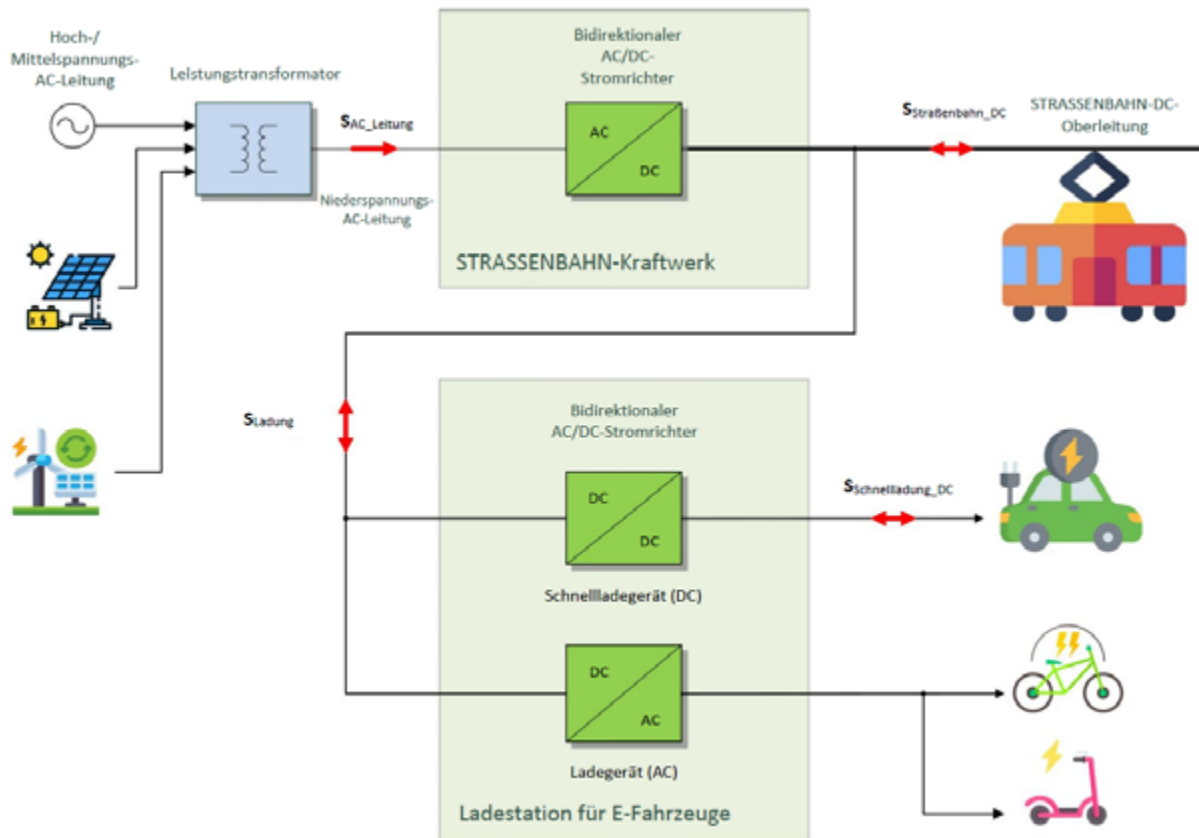


Abbildung 6: Anbindung der Ladestationen für Elektrofahrzeuge an die bestehende ÖPNV-Infrastruktur



Foto: Stadt Leipzig

Technologie B	Technische Hindernisse	Rechtliche Hindernisse
Multimodale Nutzung	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Sicherheitsanforderungen für mobile Speicheranwendungen (Fahrgäste an Bord) Oberleitungsverluste (aufgrund großer Abstände zwischen Fahrzeugen/Stationen) Keine Spannungsstabilisierung für Rückspeisungssysteme 	<ul style="list-style-type: none"> Strengere Vorschriften und deren Durchsetzung können zu höheren Kosten oder zur Aufgabe des Projekts führen Standards für die bidirektionale Leistungsübertragung zwischen verschiedenen Betriebsarten unter Verwendung der Norm ISO 15118-20

1.1.3 Technologie C – Innovatives In-Motion-Charging für ÖPNV

Die Technologie bezieht sich auf das Konzept des Aufladens von ÖPNV-Fahrzeugen während der Fahrt auf der Straße („in motion“), wobei neue innovative Lösungen möglich sind, um eine multimodale und vielseitige Nutzung des künftigen ÖPNV zu ermöglichen.

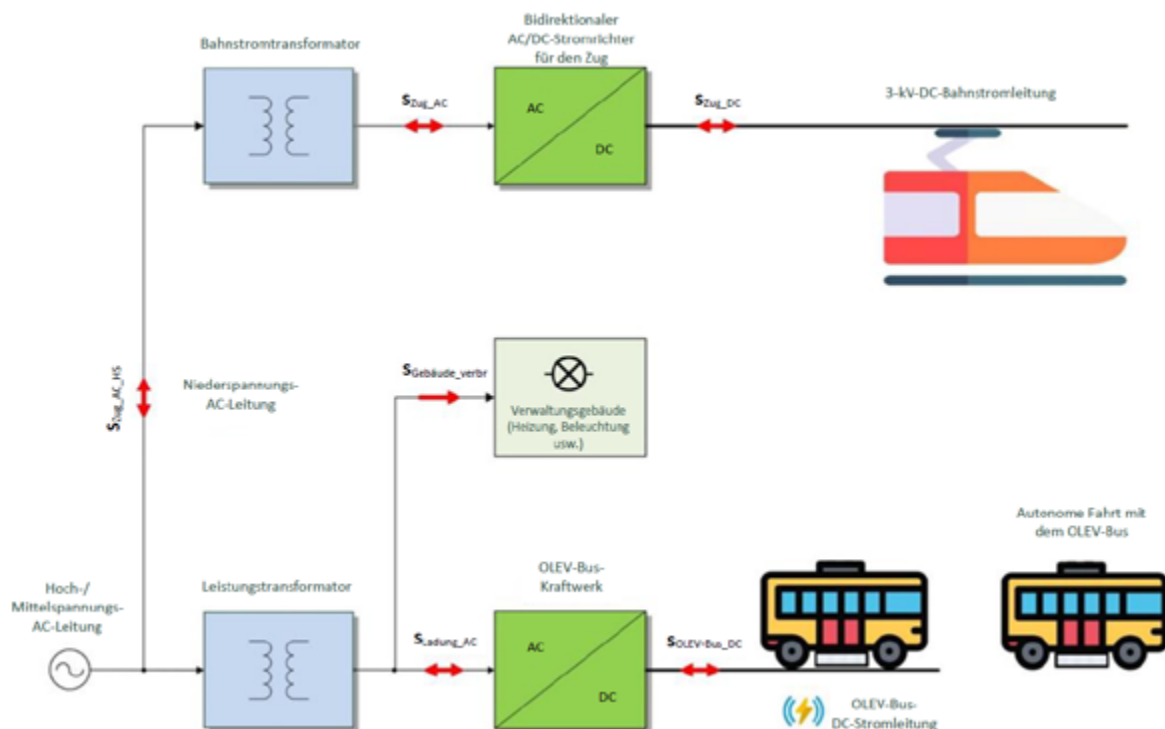
Lösung 6 - Induktives In-Motion-Charging am Boden (OLEV, On-Line Electric Vehicle)

Für den Bau elektrifizierter Straßen gibt es verschiedene Methoden. Bei der induktiven Technik wird magnetische Energie übertragen.

Es ist festzustellen, dass alle entwickelten OLEV-Konzepte mit einer Frequenz von 20 kHz zu arbeiten scheinen.

Es wird darauf hingewiesen, dass derzeit eine 6. Generation der Technologie entwickelt wird. Das Hauptziel besteht darin, die Einhaltung der neuen Norm SAE J2954 für das stationäre induktive Laden von Elektrofahrzeugen zu gewährleisten. So wird darauf hingewiesen, dass eine 6. Generation der OLEV-Technologie auf kabellosen Bahnen ohne starre magnetische Struktur in der Straße basieren wird.

Abbildung 7: Induktives In-Motion-Charging am Boden



Erwarteter Nutzen:

Es wird erwartet, dass die Systeme zur stationären und dynamischen induktiven Energieübertragung auf elektrische Straßenfahrzeuge kompatibel sein werden. Die Norm für stationäres induktives Laden sieht eine Betriebsfrequenz von 85 kHz vor, was im Vergleich zu den bestehenden OLEV-Systemen, die mit 20 kHz arbeiten, auch schwierige Überlegungen und Kompromisse erfordert.

Lösung 7 - Direktes In-Motion-Charging auf Autobahnen (E-Autobahnen)

Die auf Oberleitungen basierende Technologie kann als die ausgereifteste angesehen werden, da sie auf den Erfahrungen mit dem Betrieb von Oberleitungen zur Stromversorgung von Zügen, Straßenbahnen oder Trolleybussen beruht.

Der Hauptunterschied zwischen der Infrastruktur für Straßenfahrzeuge im Vergleich zu Zügen oder Straßenbahnen besteht darin, dass für Schienensysteme nur ein Leiter mit Schleifkontakt erforderlich ist, da die Schienen in der Regel den Rückweg für den Strom darstellen, während für die dynamische leitende Energieübertragung auf Straßenfahrzeuge zwei separate Leiter erforderlich sind. Die Schlüsselkomponente des Systems ist der neu entwickelte Stromabnehmer. Er gewährleistet die Sicherheit beim An- und Abkuppeln an der Oberleitung im Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 90 km/h (Akerman, 2015).

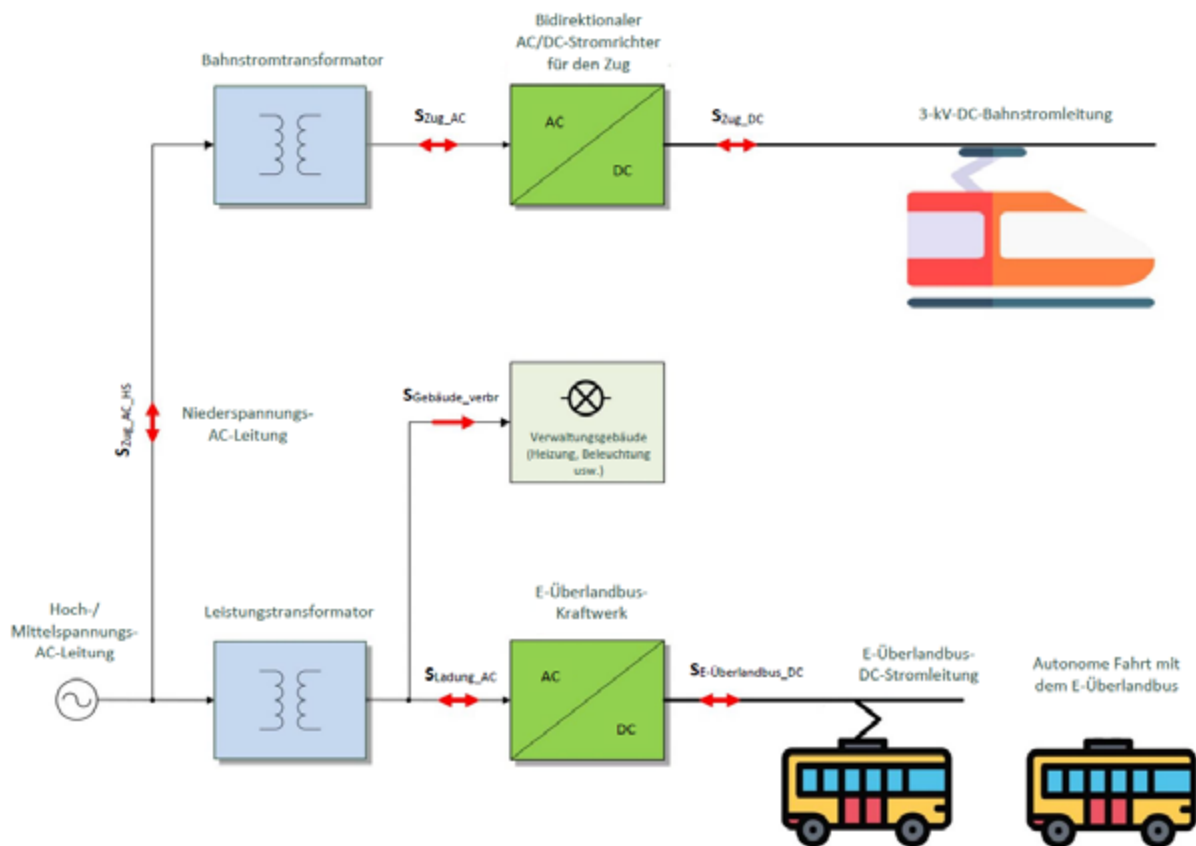


Abbildung 8: Direktes In-Motion-Charging auf Autobahnen

Erwarteter Nutzen:

Es wird erwartet, dass Lkw und möglicherweise auch Busse, die Oberleitungen benutzen, sehr ähnliche Schnittstellen zwischen dem Stromabnehmersystem und dem fahrzeugeigenen Antriebssystem haben werden, wenn auch mit einigen herstellerabhängigen Anpassungen. Voraussichtlich werden die Fahrzeuge über einen eingebauten Batteriespeicher mit einer Nennspannung zwischen 400 und 900 V verfügen. Höchstwahrscheinlich wird ein Gleichstromwandler die Schnittstelle zum Antriebssystem sein, der die Spannungsanpassung und die Steuerung des Stroms aus den Oberleitungen übernimmt.

Lösung 8 - Direktes In-Motion-Charging vom Boden (multimodal)

Die zweite leitfähige Technologie ermöglicht die Stromversorgung von unten über Leitungen in der Straße. Solche Systeme wurden bereits für Straßenbahnen in der Stadt eingeführt, um die optische Beeinträchtigung durch Masten und Oberleitungen zu vermeiden, die für Oberleitungssysteme erforderlich sind. Eines der in Entwicklung befindlichen Konzepte basiert auf der Anpassung der Technologie für Straßenbahnen, während andere Systeme speziell für Straßenfahrzeuge entwickelt werden.

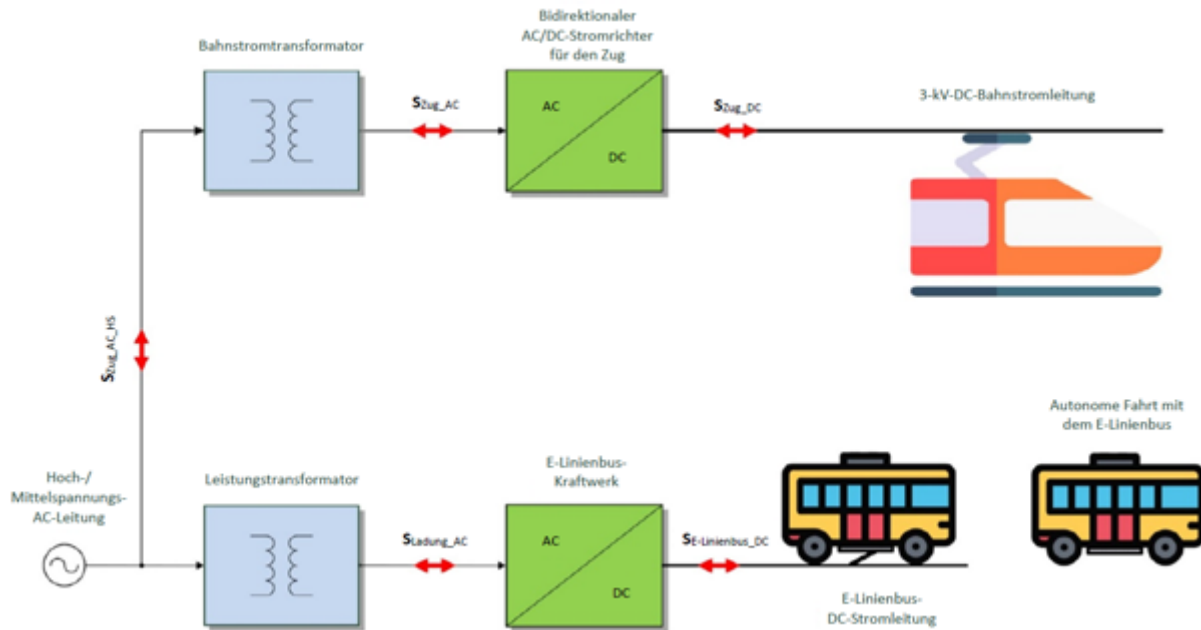


Abbildung 9: Direktes In-Motion-Charging vom Boden

Erwarteter Nutzen:

- Möglichkeit der Nutzung der Infrastruktur für Fahrzeuge unterschiedlicher Größe
- Vermeidung der Verlegung von Oberleitungen und der damit verbundenen visuellen Auswirkungen

Technologie C	Technische Hindernisse	Rechtliche Hindernisse
Innovatives In-Motion-Charging	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schlechte Effizienz der Leistungsübertragung unter realen Bedingungen ▪ Das kabellose Laden erfordert ein zusätzliches Ladegerät, das in das Fahrzeug integriert werden muss (zusätzliche Kosten) ▪ Aufbau, Betrieb und Kosten von Stromverteilungssystemen ▪ Keine klare Vorstellung von Multimodalität 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Standardisierung der fahrzeugeigenen Infrastruktur und Systeme ▪ Interoperabilität zwischen verschiedenen Konzepten

1.2 Mehrzweck-ÖPNV-Infrastrukturen in aller Welt

Oberhausen: Technologie A (Lösung 1) - Nutzung der Straßenbahn für E-Bus-Schnellladung

Dieselfahrzeuge wurden vor allem in städtischen Bussystemen eingesetzt. In der Stadt wurden Elektrobusse eingeführt, um die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu verringern und die Stickoxid-, Feinstaub- und Lärmbelastung im Stadtgebiet zu reduzieren. Die Ladeenergie wird aus der Oberleitung der Straßenbahn an der Haltestelle umgewandelt oder aus dem Umspannwerk an der Haltestelle entnommen, so dass die Elektrobusse im regulären Betrieb nicht im Busdepot aufgeladen werden müssen.

Leipzig: Technologie A (Lösung 1) - Nutzung der Straßenbahn zum Aufladen von E-Bussen in der gesamten Stadt

Strom aus bestehenden ÖPNV-Netzen (Straßenbahn oder U-Bahn) zur Versorgung des multimodalen Ladezentrums. Nutzung des Straßenbahnnetzes zum (Wieder-)Aufladen von E-Fahrzeugen. Das Hauptziel bestand darin, die rechtlichen Hindernisse und den rechtlichen Hintergrund im Zusammenhang mit der Mehrzwecknutzung der bestehenden Straßenbahninfrastruktur für den Verkauf von Energie aus dem Straßenbahnnetz an Dritte zu ermitteln.

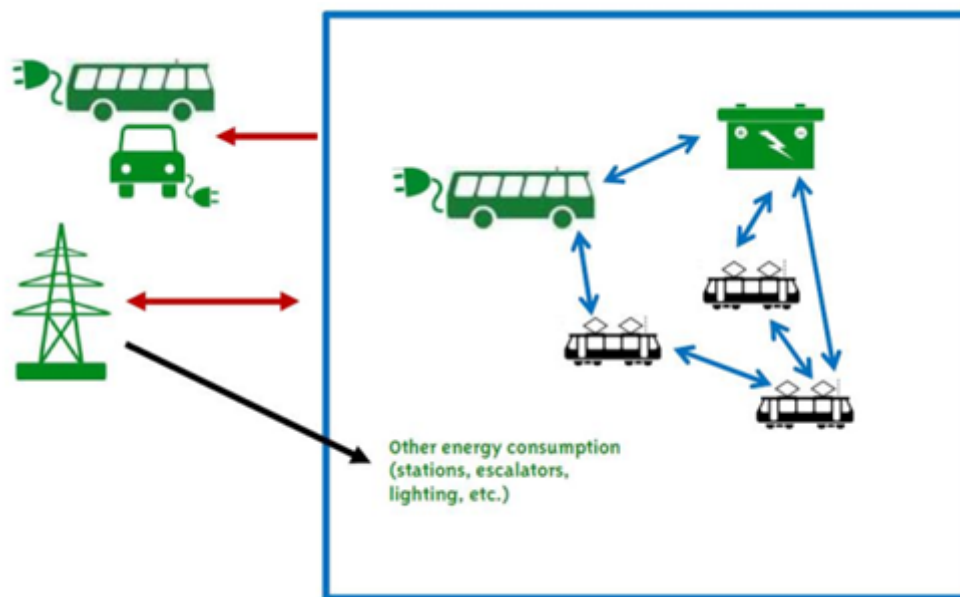


Abbildung 10: Säule A Eine (Wieder-)Zwischenladung von E-Bussen unter Nutzung der Straßenbahninfrastruktur

Barcelona: Technologie A (Lösung 1) - Nutzung der U-Bahn für die Schnellladung von 18 m langen E-Bussen

Schnellzwischenladestation in Barcelona - zwei Elektrobusse verrichten ihren Dienst mit diesem Betriebsmodell. Diese Fahrzeuge haben eine Batteriekapazität von 125 kWh und sind 18 m lang. Grundsätzlich gilt: Weniger Kapazität bedeutet weniger Zeit und Energie pro Aufladung, aber mehr Aufladungen.



Abbildung 11: Stromabnehmeraufladung in Barcelona als Teil eines ehrgeizigen Elektrifizierungsplans. Quelle: TMB.

Szeged: Technologie A (Lösung 2) - Strom aus dem bestehenden ÖPNV-Netz zum Betrieb von Hybrid-Trolleybussen

- Aufladen von E-Bussen „unterwegs“
- Ausbau des Trolleybusnetzes mit Batteriebussen
- Automatische Verdrahtung/Entdrahtung
- Vorteile auch für Bürger
- Finanzielle und rechtliche Machbarkeit
- Nicht relevante Technologie für geringe Verkehrsdichte/peripheren Verkehr (E-Gelenkbusse)

Eberswalde: Technologie A (Lösung 2) - Einsatz von Hybrid-Trolleybussen

Laden den Energiespeicher auf, während die Busse unter der Oberleitung fahren. Sobald die Busse das Oberleitungsnetz verlassen, wird die gesamte elektrische Energie und Leistung ausschließlich von den Energiespeichern der Fahrzeuge bereitgestellt. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, die Energiespeicherung zu minimieren und Verluste bei der Fahrgastkapazität zu vermeiden.

Oberhausen: Technologie A (Lösung 3) - Multimodale Drehscheiben

Strom aus bestehenden ÖPNV-Netzen (Straßenbahn oder U-Bahn) zur Versorgung eines multimodalen Ladezentrums. Die bestehende Gleichstrom-Straßenbahninfrastruktur kann auch für das Schnellladen anderer Elektrofahrzeuge wie privater E-Autos und emissionsarmer Fahrzeuge genutzt werden.

- Strom aus bestehenden öffentlichen Netzen zur Versorgung multimodaler Ladezentren
- Straßenbahn-Oberleitung für E-Bus-Schnellladung und E-Autos (Oberhausen)
- Der Strom aus der Straßenbahn-Oberleitung mit 750 V Gleichstrom wird für eine Schnellladestation mit 50 kW umgewandelt, der von Autos und emissionsarmen Fahrzeugen genutzt werden kann

- Mit Überspannungsschutzsystem
- Unklarer rechtlicher Rahmen und Risiken für das Geschäftsmodell

Barcelona: Technologie A (Lösung 3) - Nutzung der Eisenbahn für multimodale Ladevorgänge

Die aus dem Stromnetz der Bahnanlagen gelieferte Energie, die nicht vom elektrischen Antrieb verbraucht wird, kann zum Aufladen der Elektrofahrzeugflotte von Barcelona genutzt werden.

- Identifizierung von Zeitfenstern, verfügbaren Parkplätzen und Stromnetzen der Eisenbahninfrastruktur (Straßenbahn, U-Bahn) für die Einrichtung von Ladestationen
- Nutzung der nicht verbrauchten Energie, die in das Stromnetz eingespeist wird
- Beteiligte Stakeholder: ÖPNV-Betreiber, Parkplatzbetreiber und Endnutzer
- Unterschiedliche Entgeltregelungen für Privatfahrzeuge und öffentliche Flotten:
- ÖPNV-Betreiber an Parkplatzbetreiber für öffentliche Flotte, ÖPNV-Betreiber an Elektrofahrzeug für private Nutzer, ÖPNV-Betreiber an Parkplatzbetreiber für öffentliche/private Flotte
- Rechtliche Hindernisse

Rotterdam: Technologie B (Lösung 4) - ÖPNV-Infrastruktur mit integrierter zurückgewonnener Bremsenergie

Alle im Rotterdamer Streckennetz eingesetzten U-Bahn-Züge verfügten über die Möglichkeit, mit Hilfe regenerativer Bremstechniken elektrisch zu bremsen. Die Rückgewinnung von Bremsenergie kann eine große Chance sein, den Energieverbrauch des U-Bahn-Systems zu senken.

- Die beim Bremsen zurückgewonnene kinetische Energie wird für den Antrieb der Nebenaggregate des Fahrzeugs genutzt, die verbleibende Energie wird in das Stromnetz eingespeist, um die Züge in der Nähe zu beschleunigen
- Ist dies nicht der Fall, steigt die Netzspannung aufgrund des Energieüberschusses an und diese zusätzliche Energie wird in Bremswiderständen abgeleitet
- Getestete Lösungen: Speichersysteme mit Superkondensatoren entlang des Straßenbahnnetzes - keine signifikanten Vorteile, Schwungräder?
- Es werden keine Speicher benötigt, nur Wechselrichter
- Simulation für den optimalen Standort (an 2 Unterwerken)

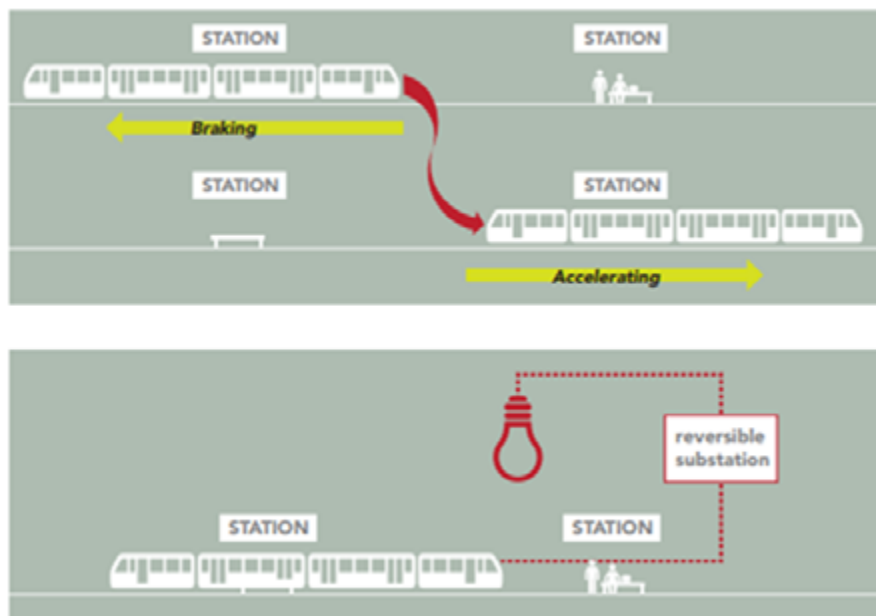


Abbildung 12: Rückgewinnungssystem für Bremsenergie im U-Bahn-Netz von Rotterdam (Quelle: Virgil Grot, Regie & Ontwikkeling, 2014)

Turin: Technologie B (Lösung 5) - „Vehicle 2 Grid“-Technologie mit integrierter EE

Bidirektionale Technologie - die sowohl das Auto auflädt als auch Strom in das Netz einspeist.

- Automobilindustrie (FCA) + Anbieter von E-Mobilität und Technologie (ENGIE EPS) und Netzbetreiber (TERNA)
- Bidirektionale Technologie - die sowohl das Auto auflädt als auch Strom in das Netz einspeist.
- Einsatz von Batterien zur Netzstabilisierung - Optimierung der Betriebskosten der Autonutzer
- Installation von 32 V2G-Säulen, die 64 Fahrzeuge anschließen können (Ziel: 700 Fahrzeuge)
- 5 MW Solarzellenkapazität (für 8500 Haushalte)

Arnheim: Technologie B (Lösung 5) - Vielseitiger Einsatz von intelligenten Trolley-Netzen

Das multifunktionale Aufladen von anderen Elektrofahrzeugen über Ihr Trolley-Stromnetz:

- Die Infrastruktur von Trolleybus-Bahnstromnetzen könnte eine kostengünstige Lösung darstellen
- Ein flexibler Abrufdienst zur Ergänzung und Erweiterung des regulären öffentlichen Verkehrsangebots
- Das installierte Schnellladegerät für Fahrzeuge wird über das Gleichstromnetz von Trolleybus und Straßenbahn betrieben. Da es sich um ein Gleichstromsystem handelt, ist der Energieverlust geringer als bei herkömmlichen Ladesystemen
- Die Ladestation benötigt keinen Anschluss an das herkömmliche Stromnetz, wenn sie an das Trolleybus-Straßenbahnnetz angeschlossen ist
- Das Trolleybus-Straßenbahnnetz kann sich positiv auf die Nutzung erneuerbarer Energiequellen auswirken, indem es eine Grundlast für die erneuerbare Energiequelle schafft, anstatt sie ins Netz einzuspeisen

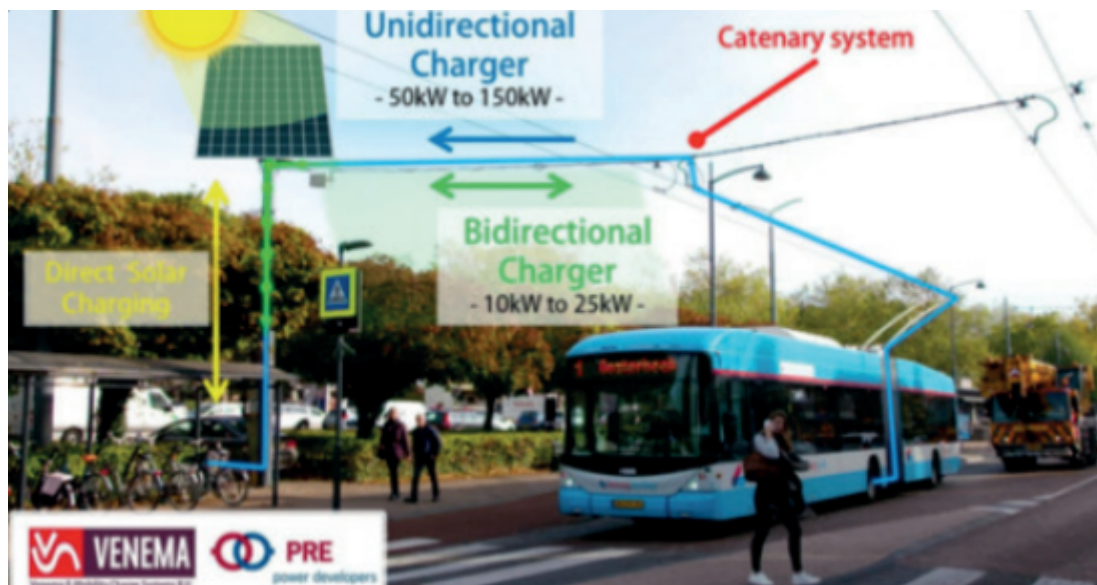


Abbildung 14: Konzeptzeichnung eines Mehrzweck-Ladegeräts (Quelle: VENEMA/PRE Power; Trolleybus:2.0)

Lösung für die Industrie: Technologie C (Lösung 6)

Die Hauptanwendung ist das stationäre Zwischenladen von öffentlichen Verkehrsmitteln wie Straßenbahnen, Bussen und Lastwagen (800 m Strecke in Augsburg von Bombardier).

- Übertragung von 200 kW auf das Fahrzeug
- Luftspalt 6 cm (Straßenbahnen), 10 cm bei Lastwagen
- Mögliche Integration mit der stationären (Zwischen-)Ladung von Bussen



Abbildung 15: E-Bus mit induktivem Laden in Braunschweig. Quelle: Rupprecht Consult.

Land Hessen, Deutschland: Technologie C (Lösung 7) - Innovativer ÖPNV-Infrastrukturansatz zur Versorgung von E-Straßen (Autobahnen)

Ziel des ELISA-Projekts ist es, die Vision des klimaneutralen Fahrens als Teil logistischer Wertschöpfungsketten bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der Transportkapazität proaktiv zu unterstützen. Das Ziel der Projektpartner ist die Realisierung eines elektrischen Verkehrssystems mit Oberleitungsinfrastruktur.

- Der e-Highway Hessen wurde auf einer Strecke von rund zehn Kilometern auf der Autobahn A5 gebaut.
- Es wurde innerhalb von nur zwei Jahren genehmigt und gebaut. Damit wurde bewiesen, dass diese Art von elektrischer Straße in kurzer Zeit errichtet werden kann, selbst auf stark befahrenen Straßen.
- Interoperabilität mit ÖPNV?



Abbildung 16: E-Highway-Teststrecke ELISA 2020. Quelle: M. Werner (TU Dresden)

Schweden: Technologie C (Lösung 8) - e-Road ARLANDA-SE

Innovatives IMC von ÖPNV; leitfähige Schleifkontakte am Boden. Die innovativen Techniken basieren auf einer leitfähigen Technologie, bei der eine in der Straße verlegte Stromschiene die Fahrzeuge während der Fahrt mit Strom versorgt und auflädt. Das System ist so konzipiert, dass es auch für den Schwerlastverkehr, wie z. B. Lkws, geeignet ist, funktioniert aber auch für Pkws und Busse. Es kann auch beim Bergauffahren helfen.

- Leittechnik, bei der elektrische Schienen in Straßen verlegt werden, um Fahrzeuge während der Fahrt mit Strom zu versorgen und aufzuladen
- Aufladen mit „beweglichem Arm“
- „Agenda 2030“-Ziel Schwedens für einen Verkehr ohne fossile Brennstoffe
- Ursprünglich für Lkws gebaut, aber auch für Pkws und Busse geeignet
- 10 km Teststrecke - 18 t Lastwagen, 2 km elektrifiziert

2. Anwendungsfall Maribor - Anpassung der Seilbahnstation an eine Mehrzweck-ÖPNV-Infrastruktur

Im Rahmen des Pilotprojekts wurde die Technologie A eingesetzt. Der Schwerpunkt des Pilotprojekts liegt auf dem Schnellladen von E-Bussen, wobei das Unterwerk derzeit als Ladestation für Seilbahnen und E-Carsharing dient. Da die Elektrifizierung der Buslinie 6 geplant ist, befindet sich die E-Bus-Schnellladestation am Bahnhof Vzpenjača, wo sich auch die Seilbahnstation befindet. Die Hauptherausforderung des Pilotprojekts bestand darin, ein E-Bus-Schnellladegerät für den Mehrzweckeeinsatz zu installieren und die Netzstabilität unter verschiedenen Bedingungen zu messen. Bei den Messungen der Netzstabilität vor und nach der Einführung des E-Bus-Ladegeräts wurde der Energieverbrauch der bestehenden Verbraucher (Seilbahnstation, E-Carsharing), anderer gelegentlicher Verbraucher (Verbraucher bei Großveranstaltungen - z. B. Camper während der Bike-Downhill- und Wintersaison) und des neuen innovativen E-Bus-Ladegeräts (entsprechend der unterschiedlichen täglichen Ladesituation) gemessen.

Es wurde eine Auswahl des Ladekonzepts vorbereitet, die in drei Schritten erfolgte. Zunächst haben wir die Strecke ermittelt, auf der die Elektrifizierung die größten Auswirkungen auf die Lärmbelastungs- und Emissionsreduzierung für die Bevölkerung haben würde und die an die bereits bestehende ÖPNV-Infrastruktur angrenzt und sich in Zukunft nicht wesentlich verändern würde. Anschließend analysierten wir verschiedene Gebührenoptionen für die ausgewählte Strecke und ermittelten, welche Optionen technisch machbar waren. Auf der Grundlage der technischen Lösungen haben wir dann das Ladekonzept auf Basis der Lebenszykluskostenanalyse ausgewählt.

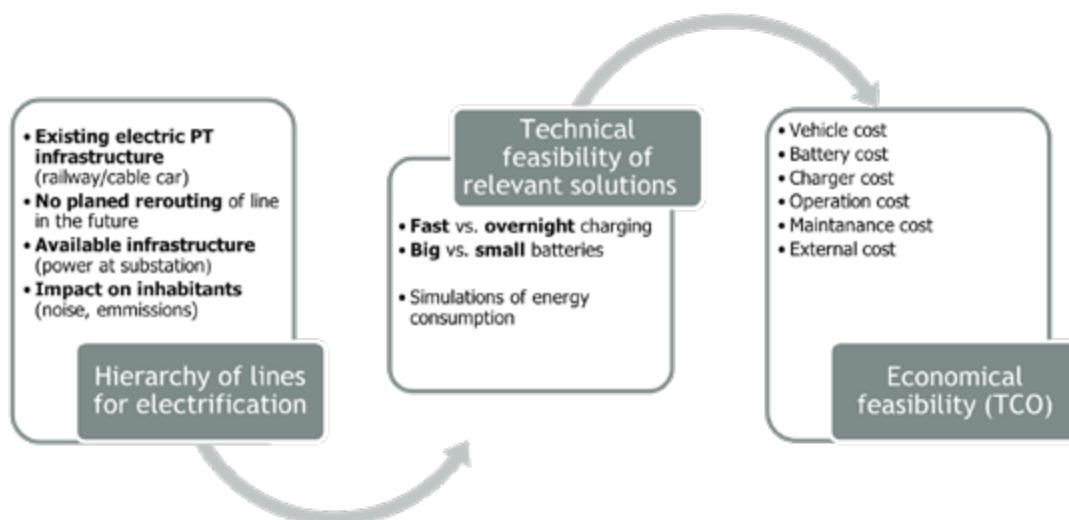


Abbildung 17: Methodik für die Elektrifizierung des ÖPNV in Maribor

Die Implementierung und Installation des Messgeräts im Unterwerk Vzpenjača wurde Ende September 2020 abgeschlossen. Das Messgerät wird zur Messung von Leistung, Strom, Temperatur und anderen Parametern im Unterwerk verwendet. Es ist so konfiguriert, dass es den Gesamtverbrauch der Pohorje-Seilbahn überwacht. Nachdem die Schnellladestation in Betrieb genommen wurde, wird es zwei Zähler geben: einen für die Ladestation und einen für alle anderen Verbraucher zusammen. Die Summe ihrer Leistungsabgaben entspricht jedoch der Gesamtlast des Unterwerks. Die lokale Aufzeichnung der Verbrauchsdaten wird über ein LTE-Netz an einen Server der Universität Maribor übertragen. Die nachstehende Grafik zeigt den Stromverbrauch in VA zwischen September 2020 und Mai 2022.

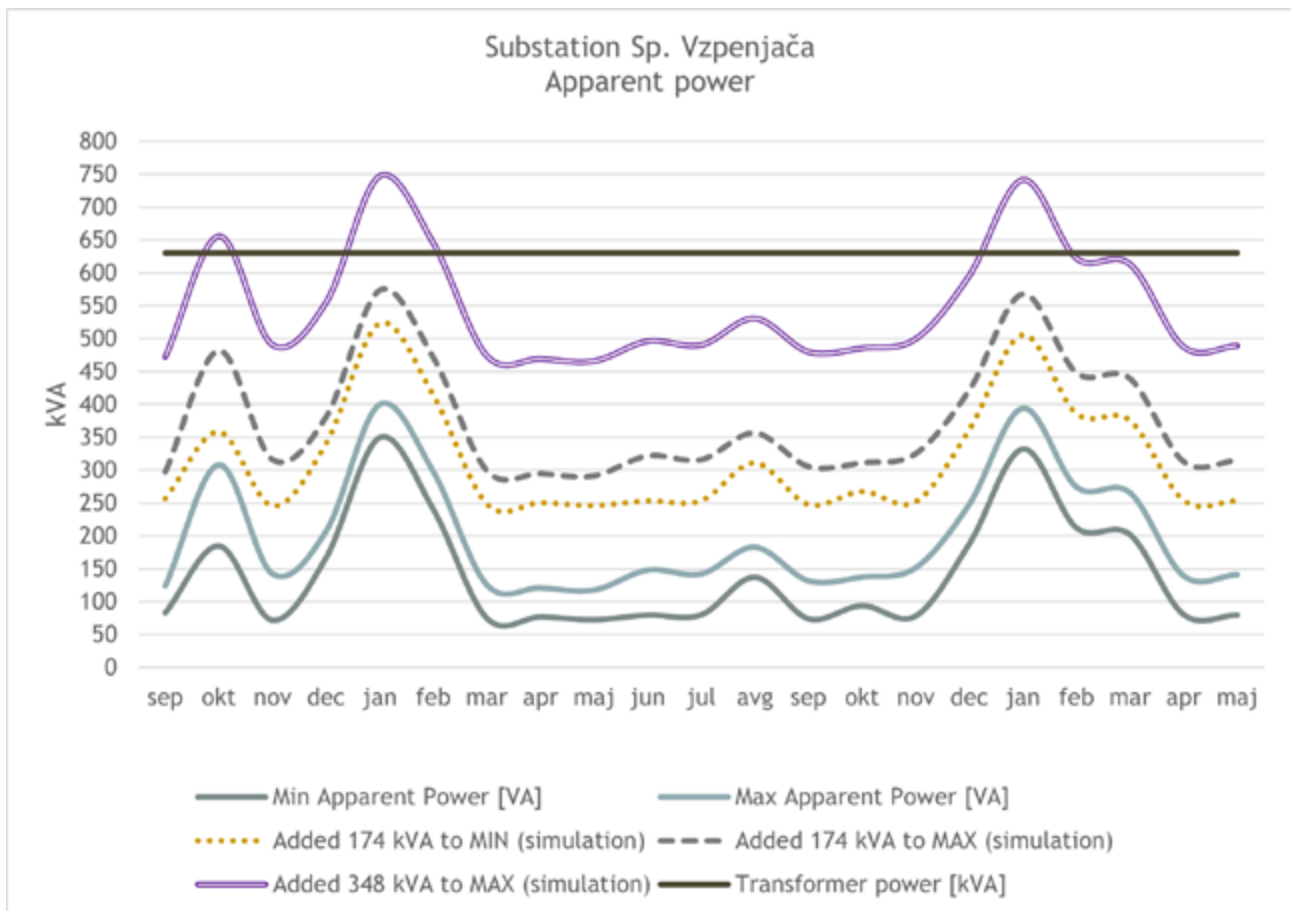


Abbildung 18: Scheinbare Leistung

Die maximale Spitzenlast in diesem Zeitraum betrug 399 kVA im Januar 2021 und hatte im Januar 2022 eine ähnliche Spitze. In dieser Zeit (Wochenende) hat das Pohorje Ski Center die Schneekanonen in Betrieb genommen, um für die neue Wintersaison gerüstet zu sein. Unter Berücksichtigung der maximalen Spitzenlast auf Grundlage der Grafik oben und der 150-kW-Ladestation (174 kVA) ergibt sich eine Scheinleistung von 573 kVA, was dem vorhandenen 630-kVA-Transformator entspricht. Wenn die Kapazität der Ladestation um 300 kW erhöht werden soll, d. h. auf die maximale Scheinkapazität der Ladestation von 348 kVA, könnte die Spitzenlast 747 kVA betragen. Der bestehende 630-kVA-Transformator wäre unzureichend und müsste durch einen neuen 1000-kVA-Transformator ersetzt werden.

In Anbetracht der auf dem Markt verfügbaren technischen Lösungen entschied sich die Gemeinde für zwei Schnellladegeräte und eine Reihe von LTO-Batterien. Die Stadtverwaltung von Maribor hat eine öffentliche Ausschreibung für die Erstellung von Projektunterlagen für Schnellladestationen unter der „Pohorje-Seilbahn“, am Hauptbusbahnhof und in der Marprom-Werkstatt in Maribor durchgeführt. Im September 2020 fand eine Koordinierungssitzung mit dem ausgewählten Bieter statt. Vertreter der Stadtverwaltung Maribor und der Universität Maribor stellten das Projekt EfficienCE und die Projektbedingungen für die Erstellung einer professionellen Dokumentation im Detail vor.

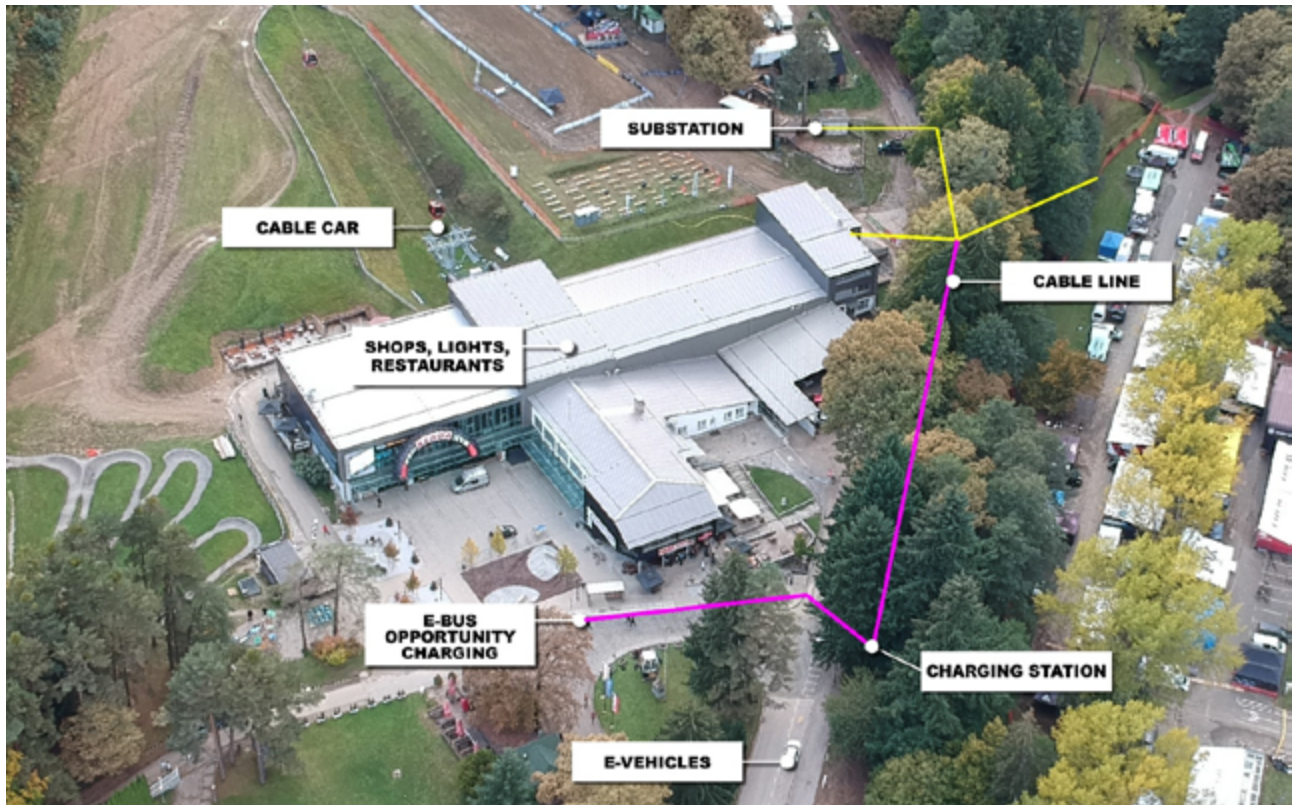


Abbildung 19: Luftaufnahme eines Schnellladegeräts am Bahnhof Vzpenjača

Anfang Februar 2022 wurde der erste Stromabnehmer mit einer Leistung von 300 kW für die Schnellladung von Elektrobussen in Maribor erfolgreich am Hauptbusbahnhof installiert. Der zweite Stromabnehmer mit einer Leistung von 150 kW wurde Mitte Februar 2022 an der Seilbahnstation installiert, wo die Integration des Ladens für andere E-Fahrzeuge und Seilbahnen umgesetzt wurde.



Abbildung 20: Installation eines Stromabnehmers mit einem Schnellladegerät an der Seilbahnstation in Maribor



Abbildung 21: Der installierte Stromabnehmer wird mit dem gekauften Bus getestet



Abbildung 22: Demonstration der Funktionsweise des Stromabnehmers

3. Schlussfolgerungen

Technologien, die für die Nutzung der ÖPNV-Mehrzweckinfrastruktur relevant sind, zeigen eine breite Palette von Optionen und Lösungen, die von Anbietern verfügbar sind und in verschiedenen Städten eingesetzt werden. Während sich die Technologien weiterentwickeln, sind ihre Auswirkungen noch im Anfangsstadium (insbesondere die Mehrzwecknutzung des dynamischen/beweglichen ÖPNV). In einem ersten Schritt wurden die 8 technischen Lösungen vorgestellt, mit einer Beschreibung für jede Technologie, gefolgt von den wichtigsten Vorteilen, allgemeinen Investitionen und technischen und rechtlichen Hindernissen. In einem zweiten Schritt wurden für jede Technologie bewährte Verfahren vorgestellt, wobei nach Beschreibung des Stands der Technik der Umsetzungsstand dargestellt wurde, gefolgt von einem Potenzial für die Ausweitung der Nutzung. Jede Technologie hat sowohl Nachteile als auch Vorteile, wobei die Umsetzung auf die örtlichen Gegebenheiten zugeschnitten ist. Aus dem Bericht geht hervor, dass Städte und Zulieferer die bestehende lokale ÖPNV-Infrastruktur für die Mehrzwecknutzung aufrüsten, während sich neue (insbesondere) mobile Ladetechnologien noch im Anfangsstadium befinden.

Hinsichtlich der Integration von Energie, Mobilität und Logistik in die Mehrzwecknutzung von ÖPNV-Infrastrukturen können wir schlussfolgern, dass die Integration mit der Nachfrage und den verfügbaren Standorten und der Energie zusammenhängt, während Mobilitäts- und Logistiknotenpunkte aus räumlicher Sicht in der Regel keine integrierten Standorte ihrer Verteilungsnetze haben und daher die Integration schwierig ist, aber in Zukunft in Betracht gezogen werden sollte.

Referenzen

- Akerman, P., (2015). Ppmc-transport. Von eHighway - Electrifying Heavy Duty Road Freight Transport: <http://www.ppmc-transport.org/ehighway-electrifying-heavy-duty-road-freight-transport/> abgerufen
- Arriaga D.S., (Siemens), D. G. (1 June 2015). ELIPTIC; Deliverable 3.5 - Technological Viability Evaluation. EU: ELIPTIC Electrification of public transport in cities. Abgerufen am EBRUARY 2021 von <http://www.eliptic-project.eu/>
- Bloomberg, (14. September 2020). Bloomberg - The Vehicle-to-Grid Pilot Project Has Been Inaugurated at Mirafiori. Von www.bloomberg.com/: <https://www.bloomberg.com/press-releases/2020-09-14/the-vehicle-to-grid-pilot-project-has-been-inaugurated-at-mirafiori> abgerufen
- Bode, A. (MAY 2014). Ticket to KYOTO Bielefeld. Von INVESTMENT SHEETS Bielefeld: <https://www.stib-mivb.be/irj/go/km/docs/resource/tickettokyoto/en/full-story.html> abgerufen
- CENIT, T. a., & SM/CENIT. (25-11-15). Barcelona Use case set up report. ELIPTIC.
- Devaux F.O., (STIB), X. T. (March 2011). T2K - Overview of braking energy recovery technologies in the public transport field. The "TICKET TO KYOTO" project - www.tickettokyoto.eu.
- eHighway, (2021). Field trial eHighway Schleswig-Holstein. Von eHighway.SH: <https://www.ehighway-sh.de/de/projektbeschreibung.html> abgerufen
- eRoadArlanda, (February 2021). eRoadArlanda -SE. Von eroadarlanda.com: <https://eroadarlanda.com/the-technology/> abgerufen
- Freudenberg B., (BBG), T. K., (June 2015). Eberswalde Final Use Case Report. Von www.eliptic-project.eu: <https://www.eliptic-project.eu/results> abgerufen
- Greater, A. L., (May 2012). Ticket to Kyoto - Economic Expertise in the Carbon Market - Optimising policies and regulations for CO2 reduction in the public transport sector.
- Grot V., (May 2014). Regie & Ontwikkeling, R., T2K Rotterdam - Braking energy recovery. Von Ticket to KYOTO Investment sheet: <https://www.stib-mivb.be/irj/go/km/docs/resource/tickettokyoto/en/full-story.html> abgerufen
- Hegazy O., V. C.-O., (June 2015). Brussels Final Use Case Report. Von [eliptic-project.eu](http://www.eliptic-project.eu): <https://www.eliptic-project.eu/results> abgerufen
- House, T. M., (2019). White paper: Smart Charging for Electric Buses. The Mobility House GmbH.
- Hub, V., V2G - A Global Roadtrip. Von Vehicle to grid Hub: <https://www.v2g-hub.com/report> abgerufen
- Klemenčič M., A. I., (2017). Review of electric e-bus technologies. University of Maribor.
- Knote T.(Fraunhofer), E. N., (11/2015). Leipzig Use Case set-up Report. Thoralf Knote, F. A. (15/06/2018). Leipzig Final Use Case Report.
- Mackinger G., L. E., (May 2019). UITP My Libry. Von <https://mylibrary.uitp.org/>: <https://mylibrary.uitp.org/> abgerufen
- Massink, R., (January 14, 2019). Integrated and Replicable Solutions for CoCreation in Sustainable Cities, FINAL PROJECT FACT SHEET. EUROPEAN UNION CO-FUNDED PROJECT; IRIS project HORIZION 2020.
- Náday A., S. D., (June 2015). Szeged Final Use Cases Report. Von <http://www.eliptic-project.eu>: <http://www.eliptic-project.eu> abgerufen
- Reh, S., (22. June 2016). Siemens World's first eHighway opens in Sweden. Von SIEMENS Press Release: <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/worlds-first-ehighway-opens-sweden> abgerufen
- Roca J., C. F., (22/06/2018). Barcelona Final Use Case Report. ELIPTIC.

- Sue, D. A., (28.10.2020). Decarbonisation of Heavy Goods Vehicles with a Catenary System: The „eHighway“. Von ec.europa.eu: https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/20201028_eu-hgv-workshop_sue_public.pdf abgerufen
- Suul J.A., G. G., (2018). Technology for dynamic on-road power transfer to electric vehicles. Electric Infrastructure for Goods Transport. Von www.elingo.no abgerufen
- T2K, (May 2014). T2K Brussels, Braking energy recovery on the metro network. Von www.tickettokyoto.eu: <https://www.stib-mivb.be/irj/go/km/docs/resource/tickettokyoto/en/full-story.html> abgerufen
- Talbot D., T. D., (1. June 2015). London Final Use Case Report. Von <http://www.eliptic-project.eu/>: <https://www.eliptic-project.eu/results> abgerufen
- Thurm S., S. J., (15/06/2018). Oberhausen Final Use Case Report.
- Waldeyer, L., (January 2017). Project ELISA - electrified, innovative heavy traffic on highways. Von Interreg Europe: <https://www.interregeurope.eu/policylearning/good-practices/item/3455/project-elisa-electrified-innovative-heavy-traffic-on-highways/> abgerufen

ENTDECKEN SIE MEHR EfficienCE



Besuchen Sie unsere
Webseite:
<https://www.interreg-central.eu/efficiency>

Kontaktieren Sie uns



+49 341 123 59 10

Federführender Partner: Stadt Leipzig, Deutschland



Projektmanager:

Sebastian Graetz
sebastian.graetz2@leipzig.de

Marlene Damerau
m.damerau@rupprecht-consult.eu



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



www.facebook.com/Interreg.EfficienCE/



[@Int_EfficienCE](https://twitter.com/Int_EfficienCE)

TAKING
COOPERATION
FORWARD



BUDAPESTI
KÖZLEKEDÉSI
KÖZPONT



redmint



GDAŃSK UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY



Leipziger
Verkehrsbetriebe



WIENER LINIEN

Plzeňské městské
dopravní podniky

PMDP



City of Leipzig



University of Maribor
Faculty of Civil Engineering,
Transportation Engineering
and Architecture



COMUNE DI BERGAMO

