



Interreg
CENTRAL EUROPE



European Union
European Regional
Development Fund

EfficienCE



TRANSNATIONALES HANDBUCH FÜR DEN EINSATZ ENERGIEEFFIZIENTER ÖPNV-INFRASTRUKTUR- TECHNOLOGIEN

(3) Energiespeicherung in 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:

Anja Seyfert, Gabriele Grea (Redmint Impresa Sociale)

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. Einleitung.....	6
1.1 Einschlägige Technologien	6
1.2 Energiespeicherung und EfficienCE - die Pilotprojekte und internationale bewährte Verfahren	8
2. Die EfficienCE-Anwendungsfälle zur Energiespeicherung und Integration von erneuerbaren Energien	16
2.1 Energieeffizientes Depot.....	16
2.2 Lineare Infrastruktur	17
2.3 Intelligenter Knotenpunkt	18
3. Erkenntnisse und Schlussfolgerungen	19
4. Referenzen	20

Zusammenfassung



Foto: Stadt Leipzig

Die Europäische Union konzentriert sich darauf, die Dekarbonisierung des Verkehrssektors auf der Grundlage erneuerbarer Energiequellen zu beschleunigen. Elektrofahrzeuge, Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge und Energiespeicher können diese Bemühungen erheblich unterstützen und gleichzeitig auch die Kosteneffizienz und Netzstabilisierung der öffentlichen Verkehrsinfrastruktur fördern.

Die Rolle der Infrastruktur des öffentlichen Verkehrs (ÖPNV) hängt stark von ihrer Fähigkeit ab, die effiziente Nutzung von Elektrizität in den Netzen zu fördern und die Integration erneuerbarer Energiequellen (EE) zu ermöglichen. In diesem Prozess spielen Speichertechnologien eine sehr wichtige Rolle, die in Depots, Bahnhöfen und Haltestellen sowie entlang der Strecken, die die Verkehrsnetze bilden, eingesetzt werden.

Das EfficienCE-Handbuch zur Energiespeicherung in öffentlichen Verkehrsinfrastrukturen identifiziert die wichtigsten betriebsbereiten Funktionalitäten und Technologien zur Energiespeicherung, die in öffentlichen Verkehrsinfrastrukturen eingesetzt werden können, und untersucht deren Anwendung sowohl in Pilotprojekten als auch in international bewährten Verfahren. Die Ergebnisse werden in drei Anwendungsfällen zusammengefasst (energieeffizientes Depot, intelligenter Knotenpunkt, lineare Infrastruktur), beschreiben die typische Ausstattung, die entwickelt werden muss, um die Energieeffizienz der ÖPNV-Infrastruktur zu verbessern, und decken die wichtigsten beispielhaften Anwendungen ab, die eine höhere Energieeffizienz, eine stärkere Integration erneuerbarer Energiequellen und einen effektiveren Beitrag der ÖPNV-Infrastruktur zum Netz ermöglichen.

Die Anwendungsfälle sollen die wichtigsten Schlüsselemente, erwarteten Vorteile, Herausforderungen und Hindernisse hervorheben, die bei der Planung der Integration von Speichertechnologien in die ÖPNV-Infrastruktur zu berücksichtigen sind und bieten direkte Verweise auf die im Rahmen des Projekts analysierten Pilotprojekte und bewährten Verfahren für weitere Orientierungshilfen und Benchmarking.

1. Einleitung

Das Vorhandensein von elektrifizierten Fahrzeugen und Infrastrukturen im öffentlichen Verkehr stellt eine große Chance für den Dekarbonisierungsprozess im Verkehr dar und bildet gleichzeitig relevante technische Herausforderungen in Bezug auf die Stabilität des Stromnetzes, insbesondere in Anbetracht des wachsenden Anteils von erneuerbaren Energiequellen (EE), die integriert und genutzt werden müssen.

Energiespeicher können in der öffentlichen Verkehrsinfrastruktur je nach den jeweiligen Rahmenbedingungen und Bedürfnissen eine Vielzahl von Funktionen übernehmen.

Optimierung des Verbrauchs - Speichertechnologien können dazu beitragen, die Nachfragelasten zu minimieren, indem sie den Bedarf zwischen Spitzenzeiten und Zeiten geringer Nachfrage puffern, die Integration erneuerbarer Energien zur Maximierung des Eigenverbrauchs unterstützen, z. B. aus PV-Kraftwerken, oder die Energieeffizienz durch Rückgewinnung und Wiederverwendung der Bremsenergie von Fahrzeugen verbessern, die Netzstabilität bei kurzzeitigen Stromausfällen oder Schwankungen von Frequenz und Spannung gewährleisten.

Systembetrieb - Energiespeichersysteme können Hilfsdienste für das Netz erbringen: primäre Reaktion zur Stabilisierung von Frequenz- und Spannungsschwankungen im Netz, sekundäre Reaktion zum Ausgleich von Ungleichgewichten zwischen Last und Erzeugung und Ersatz von Spitzenlastkraftwerken zur Sicherstellung ausreichender Erzeugungskapazitäten in Spitzenbedarfszeiten.

Prosumerismus/Integration von erneuerbaren Energien -Energiespeichertechnologien können den Anteil erneuerbarer Energien besser integrieren und maximieren. Je nach den Kosten der Speicherung und den vorgeschlagenen Energie-/Kosteneinsparungen könnte es notwendig sein, andere Optionen wie die Bereitstellung von Ladeinfrastruktur auch für externe Parteien einzubeziehen und ein aktiver Akteur in lokalen Energienetzen für die Mobilität zu werden (Verbindungen mit Mehrzwecknutzung der Infrastruktur usw.). Als Prosumer mit verfügbaren Speicherkapazitäten ist auch Energie-Arbitrage möglich, also der Gewinn aus günstigen Energieeinkäufen, die in Hochpreisperioden verkauft werden können.

1.1 Einschlägige Technologien

Die für den Einsatz im öffentlichen Verkehr relevantesten Speichertechnologien wurden ausgewählt, um sie für die im Handbuch beschriebenen Anwendungsfälle zu analysieren und zu berücksichtigen. Die Technologien unterscheiden sich je nach Leistungskapazität, Energiedichte und Entladezeit (Abb. 1) und haben daher unterschiedliche Eignungsgrade, Funktionen und Anwendungsbereiche im öffentlichen Verkehr.

Batterien können entweder in Fahrzeugen für den Antrieb oder andere Dienste innerhalb des Fahrzeugs (als Hilfsaggregate, zur Rückgewinnung von Bremsenergie usw.) oder als stationäre Speicher verwendet werden. Für stationäre Batterien gelten geringere Anforderungen in Bezug auf geringes Gewicht und Sicherheit und sie ermöglichen eine breitere Palette von Batterietechnologien.

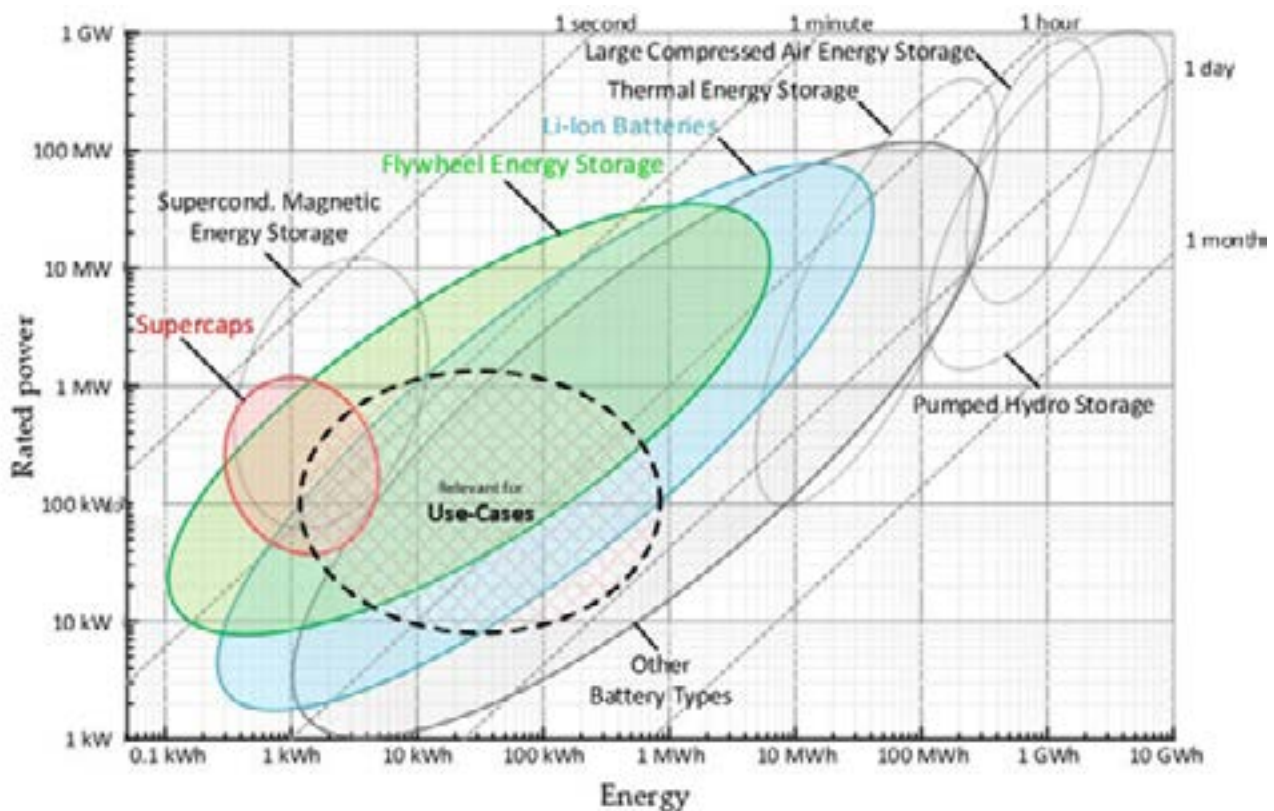


Abbildung 1: Leistung, Energiekapazität und Entladezeit verschiedener Energiespeichersysteme für stationäre und mobile Transportanwendungen. (Haidl et al. 2019)

Unter den Batterien ermöglichen Lithium-Ionen-Technologien eine hohe Energiedichte, niedrigere Kosten pro Leistungskapazität und eine geringe Selbstentladung, aber auch eine geringere Leistungsdichte und hohe Kosten pro Leistungskapazität und werden daher meist in gewichtssensiblen Anwendungen eingesetzt, die mehr Kapazität erfordern, z. B. in der Automobil- und Unterhaltungselektronik.

Wiederverwendete Batteriespeichersysteme können den Spitzenstromverbrauch und die damit verbundenen Kosten des Netzes für Schnellladungen reduzieren, das Laden in Gebieten mit Netzbeschränkungen ermöglichen und weitere Dienste unterstützen, z. B. die Integration erneuerbarer Energien. Die Nutzung von wiederverwendeten Batterien klingt vielversprechend, um das Netz besser zu unterstützen, erneuerbare Energien zu integrieren und Elemente der Kreislaufwirtschaft hinzuzufügen.

Superkondensatoren können in verschiedenen Größen für unterschiedliche Anwendungen hergestellt werden. Aufgrund der sehr kurzen Ladezeit ermöglichen Superkondensatoren die Versorgung von hohen und häufigen Strombedarfsspitzen. Hauptanwendungsgebiete sind die Wiederverwendung von Bremsenergie in Eisenbahnen und diversen Fahrzeugen, die Integration von erneuerbaren Energien und der Ersatz von Batterien in Elektrofahrzeugen.

Schwungrad-Energiespeichersysteme (Flywheel Energy Storage Systems, FESS) sind mechanische Vorrichtungen, die für kurze Zeit kinetische Energie speichern. Kleine Schwungräder können als Speicher in unterbrechungsfreien Stromversorgungen (USV) und in Fahrzeugen eingesetzt werden. Die wichtigsten Merkmale sind: lange Lebensdauer ohne Kapazitätsverluste (sehr hohe Anzahl von Lade- und Entladezyklen), hohe Leistungsqualität, keine Temperaturabhängigkeit, genaue Überprüfung des Ladezustands bzw. der Funktionsfähigkeit, keine Tiefentladungsprobleme, minimale Umweltbelastung.

Die folgende Tabelle fasst die wichtigsten erwarteten Vorteile und Hindernisse der untersuchten Technologien zusammen, um ihre Einsatzmöglichkeiten entsprechend den Anwendungsfällen des Handbuchs zu bewerten.

Technologie	Erwarteter Nutzen	Mögliche technische Hindernisse	Mögliche rechtliche Hindernisse
Li-Ion-Batterien	hohe Energiedichte, geringe Selbstentladung	Leistungseinbußen, temperaturempfindlich, Sicherheitsstandards	im Zusammenhang mit der Wiederverwendung
Wiederverwendete Batterien	Verlängerung der Lebensdauer von Batterien	fehlende Standardisierung, auch für die Restkapazität und das Laden	kein regulatorischer Rahmen, keine steuerlichen Vorschriften, keine Energiesteuern
Superkondensator	kein Kapazitätsverlust, lange Lebensdauer, sehr geringe Ladezeiten, hohe Spannung	hohe Investitionskosten, geringe Energiedichte, große und schwere Systeme für hohe Leistungskapazität	n. z.
Schwungräder	kein Kapazitätsverlust, lange Lebensdauer, geringe Ladezeiten, hohe Spannung, Nachrüstung	hohe Investitionskosten, geringe Energiedichte	mögliche Sicherheitsvorschriften

Abbildung 2: Speichertechnologien, Vorteile und Hindernisse (EfficienCE, 2021)

1.2 Energiespeicherung und EfficienCE - die Pilotprojekte und internationale bewährte Verfahren

In diesem Abschnitt werden die EfficienCE-Pilotprojekte und bewährte Praktiken vorgestellt, die sich auf verschiedene technologische Kategorien (Batterien, Schwungräder, Superkondensatoren) sowie auf stationäre und fahrzeugseitige Systeme verteilen. Die folgende Tabelle zeigt die Funktionskategorie (Verbrauchsoptimierung vs. Systembetrieb) sowie die wichtigsten beteiligten Energiequellen.

	Batterie	Schwungrad	Superkondensator	Stationär	An Bord	Systembetrieb	Verbrauchsoptimierung	Integration erneuerbarer Energien	Zurückgewinnung von Bremsenergie
London (UK) Bus2Grid	V2G				x	x		x	
London (UK) Waltham-Depot	x			x		x	x		
Sofingen (DE) Intelligentes Trolleybus-System	x			x	x		x	x	x
Hannover (DE) Gleichrichterunterwerk	WIEDERVERWENDUNG			x			x		x
Hamburg (DE) wind elektrisch	x				x		x	x	
Madrid (ES) einobster-Projekt	x			x		x			x
Los Angeles (US) Metro WESS		x		x			x		x
Graz (AT) FlyGrid-Forschungsprojekt									
Haifan, Jiangsu (CN) Superkondensatoren für den öffentlichen Verkehr			x		x		x		x
Warschau (PL) Straßenbahnen mit Superkondensatoren			x		x	x	x		x
La Spezia (IT) Smartbus			x		x		x		x
Nirxa (FR) Bimodale Straßenbahn			x		x		x		x
Gdynia (PL)*	WIEDERVERWENDUNG						x	x	x
Pilsen (CZ)*	x			x		x			
Wien (AT)*				x			x	x	

Abbildung 3: Klassifizierung von Pilotprojekten und bewährten Verfahren (EfficienCE, 2022)

1.2.1. Die EfficienCE-Pilotprojekte

Diese Beispiele sind zwar auf unterschiedliche Zwecke ausgerichtet (Rückgewinnung von Bremsenergie, Mehrzwecknutzung von Ladeinfrastruktur, Energiepufferung in Trolleybus-Netzen), sind aber alle durch den Einsatz von Speichertechnologien in Depots, entlang von Linien und in Bahnhöfen gekennzeichnet.

Maribor (SI) - Mehrzwecknutzung der öffentlichen Infrastruktur für das Laden von E-Bussen

Das Ziel der Pilotaktion in Maribor bestand darin, E-Bus-Schnellladegeräte in Mehrzweck-Ladeeinrichtungen an einer bestehenden Seilbahnstation und am Bahnhof zu installieren. Die Infrastrukturen für das Mehrzweck-Laden befinden sich an den Endhaltestellen der Buslinie.

Die Lösung, die für die untersuchte Strecke auf der Grundlage von Raumplanungs-, technischen Machbarkeits- und Wirtschaftlichkeitsanalysen ermittelt wurde, sieht die Installation von zwei Schnellladegeräten (150 kW und 300 kW) und die Anschaffung von zwei 12 Meter langen E-Bussen mit LTO-Batterien einer Kapazität von 73 kWh vor.

Die Modernisierung der Seilbahnstation umfasst die Integration eines Schnellladegeräts für die Mehrzwecknutzung der bestehenden Infrastruktur des öffentlichen Nahverkehrs (ÖPNV). Der für den Betrieb der Seilbahn genutzte Strom des Umspannwerks kann auch für das Aufladen eines E-Busses sowie von E-Autos genutzt werden. Das Umspannwerk hat eine Kapazität von 630 kVA, und angesichts der derzeitigen Belastung und der Kapazität einer Ladestation würden 230 kVA für den Bau von zwei Ladestationen ausreichen.



Abbildung 4: Schnellladegerät für E-Busse an der Seilbahnstation (Stadtverwaltung Maribor)

Pilsen (CZ) - Pufferspeicherstation im Oberleitungsnetz für Energieeffizienz

Der Einsatz einer großen Anzahl von In-Motion-Charging (IMC) Trolleybussen führt zu einem höheren Stromverbrauch in den Abschnitten, in denen die Fahrzeuge fahren und laden (bisher 8 Gelenk- und 22 12-Meter-Batteriefahrzeuge), was zu einem Spannungsabfall bei höheren Lasten und damit zu kurzzeitigen Netzausfällen oder sofortigen Ausfällen der Trolleybus-Antriebseinheiten führen kann.

Um hohe Investitionskosten und langfristige Vorbereitungen für den Bau eines neuen Umspannwerks oder die Verstärkung von Kabeln zu vermeiden, hat das Verkehrsunternehmen die Installation eines Pufferspeichers entlang der Strecke als mögliche technische Lösung ermittelt.

Die gewählte Pufferspeicherstation auf Basis von Hochleistungsbatterien und intelligenter Computersteuerung sowie eine galvanisch getrennte Einheit für den Fahrtrieb (DC 600 V / DC 600 V) gewährleisten eine sichere und zuverlässige Energieübertragung zum und vom Antrieb.



Abbildung 5: [Batterie-Pufferspeicherstation in Pilsen](#) (PMDP)

Mögliche künftige Erweiterungen könnten die Verwendung von Hochleistungsbatterien (gebraucht) und/oder die Integration einer kleinen Photovoltaikanlage zur Energieversorgung vor Ort umfassen.

Gdynia(PL) - Zurückgewonnene Bremsenergie und EE für den Betrieb des Trolleybus-Depots und die Anwendung eines Bahnstromversorgungssystems zum Laden von Elektroautos

Die Pilotaktion in Gdynia (Gdingen) konzentrierte sich auf die Optimierung der Energieressourcen im Gebäude des Trolleybus-Depots durch einen Mix aus technologischen Anwendungen.

Das Depot ist auf dem Dach mit einer Photovoltaikanlage mit 0,5 MW Spitzenleistung ausgestattet, die jährlich etwa 450 MWh erzeugt und direkt in das Trolleybus-Stromnetz eingespeist wird (5 % des Gesamtverbrauchs). Darüber hinaus wird die Bremsenergie der Busse dank eines Energie-Wechselrichters zurückgewonnen, so dass die ansonsten verschwendete Energie direkt in das Energiesystem des Gebäudes eingespeist werden kann.

Das Gerät kontrolliert auch den Energieverbrauch im Bahnstromnetz, erkennt ungenutzte Energie und kontrolliert genau den Energieverbrauch des Depotgebäudes, wodurch das bereits bestehende Energieüberwachungssystem weiter verbessert wird.

Das Wechselrichtersystem ist mit einem innovativen Energiespeichersystem ausgestattet, das zurückgewonnene, ungenutzte Rückgewinnungsenergie akkumulieren kann, wenn am AC-Ausgang keine Last anliegt. Zu diesem Zweck wird ein Batteriemodul aus einer Trolleybus-Antriebsbatterie verwendet (wiederverwendet).

Eine mobile Ladestation für Elektroautos, die im Rahmen des Projekts CAR (Creating Automotive Renewal - INTERREG South Baltic, Erneuerung im Automobilbereich - INTERREG Südliches Baltikum) von der Stadt Gdynia eingerichtet wurde und das Aufladen mit verschiedenen Leistungsbereichen und Stromstärken ermöglicht, kann überall in der Stadt an das Bahnstromnetz der Trolleybusse angeschlossen werden und ermöglicht Synergien zwischen den beiden Projekten.

Die Vorteile des kombinierten Systems gegenüber herkömmlichen Lösungen sind:

- der Anschluss der Station erfordert keine zusätzlichen Installationskosten und verkürzt die Investitionszeit
- kein langwieriger formaler Prozess im Zusammenhang mit seiner Erstellung,
- das Bahnstromnetz mit seiner großen räumlichen Ausdehnung und seiner guten Zugänglichkeit ermöglicht den Einsatz der Ladestation auch dort, wo der Anschluss an das Wechselstromnetz problematisch ist, z. B. aufgrund von Bauarbeiten.

Im Rahmen des Pilotprojekts in Gdynia wurde ein mobiles Ladegerät für Elektrofahrzeuge angeschlossen, um zu prüfen, wie sich das Aufladen von Elektroautos auf die Stabilität des Netzes, seine Parameter oder den regulären Linienbetrieb der Trolleybusse auswirkt.

Wien (AT) - In die U-Bahn-Station integrierte PV-Anlage zur Versorgung von Nebengebäuden mit EE

Die Wiener Linien GmbH & Co KG testete auf der U-Bahn-Station Ottakring eine neuartige Folien-Photovoltaikanlage, die fünfmal leichter ist als herkömmliche PV-Anlagen und die Installation auf bestehenden Stationen ermöglicht, ohne das zusätzliche Gewicht herkömmlicher PV-Anlagen in Kauf zu nehmen.



Abbildung 6: Mobile Ladestation für Elektroautos, die über das Trolleybus-Netz betrieben werden (PKT)



Abbildung 7: Eröffnungsveranstaltung mit Vertretern der Kommune, November 2019 (Wiener Linien)



Foto: Stadt Leipzig

Eine weitere Besonderheit war der Parallelbetrieb von Gleichstrombahn und PV-Stromerzeugung, für den die gewählten PV-Module besondere technische Anforderungen erfüllen mussten (und zusätzlich t). Eine der größten Herausforderungen bestand darin, die technische Ausrüstung wie z. B. einen Frequenzumrichter an einem geeigneten Ort innerhalb der Station zu platzieren und die Kabelführung genau zu planen, um die Entfernung zwischen dem Technikraum und dem Niederspannungshauptverteilteraum zu verkürzen. Die PV-Module werden auf das Dach geklebt und die Kabel in Kanälen verlegt. Nachdem der Niederspannungshauptverteiler im Technikraum angeschlossen war, wurden die Messkomponenten schließlich am Netzschalter installiert.

Technische Einzelheiten: Die Photovoltaikanlage hat eine Größe von 360 m², eine Nennleistung von 60,3 kW in der Spitze und einen Jahresertrag von ca. 60.000 kWh, was einem Energieanteil von 6 % des jährlichen Energieverbrauchs des gesamten U-Bahnhofs (einschließlich einer Abstellhalle für U-Bahnzüge) entspricht. Der maximale Energieanteil pro Monat betrug 13 % des Verbrauchs, an einem sonnigen Sommertag werden bis zu 50 % des Strombedarfs der Station durch die PV-Anlage gedeckt. Die Messungen werden in Abständen von 15 Minuten durchgeführt. Als Messgerät kommt der Siemens PAC 3200 zum Einsatz und die gewonnenen Daten werden automatisch an unser Energiekontrollsystem übertragen.



Abbildung 8: PV-Folien auf dem Dach der U-Bahn-Station (Wiener Linien)

1.2.2. Energiespeicheranwendungen in der ÖPNV-Infrastruktur – bewährte Verfahren

In diesem Abschnitt schlagen wir eine Prüfung bewährter Praktiken für Energiespeicheranwendungen in der Infrastruktur des öffentlichen Verkehrs vor, wobei in einigen Fällen die bereits überprüften Ansätze mit Funktionen wie Vehicle-to-Grid (Fahrzeug-zu-Netz, V2G), Rückgewinnungssysteme für Bremsenergie und Integration erneuerbarer Energien kombiniert werden.

London - Bus2Grid

Bus2Grid bezieht sich auf ein ehrgeiziges Projekt, bei dem 28 Doppeldeckerbusse an das Stromnetz angeschlossen werden, um V2G-Tests durchzuführen. Die mit 382-kWh-Lithium-Eisenphosphat-Batterien ausgestatteten Busse werden in Zeiten geringer Nachfrage über Nacht aufgeladen und sind in der Lage, bei hoher Nachfrage 1,1 MW in das Londoner Netz einzuspeisen, um Ausgleichsleistungen zu erbringen.

Das Depot ist mit Wechselstrom ausgestattet, der mit 2 x 40-kW-Ladegeräten an Bord geladen wird, sowie mit einer mobilen Entladeeinrichtung. Sehr wichtig: Die meisten V2G-Projekte verwenden Gleichstromladung (CHAdeMO), so dass nur die Ladestation und der dazugehörige Wechselrichter - der sich nicht bewegt - zertifiziert werden müssen und nicht das Fahrzeug. Natürlich sind die Kosten für die Infrastruktur geringer.

Abellio London, Walworth-Depot

Abellio plante den Einsatz von 34 Elektrobussen für die TfL-Strecken von ihrem Depot in Walworth. Sie benötigten eine Finanzierung der Batterien und Ladeinfrastruktur-Dienstleistungen sowie eine Lösung für die begrenzte Importkapazität des Netzes und die Platzbeschränkungen. Zenobē finanzierte die 34 E-Bus-Batterien mit einem Managed Service und installierte eine stationäre Batterie zur Unterstützung des Netzes beim Aufladen der E-Busse zu Spitzenzeiten. Die Batterie, die tagsüber Dienstleistungen für National Grid erbringt, generiert zusätzliche Einnahmen und senkt die Kosten für Abellio. Die Ladeinfrastruktur umfasst mehrere Gleichstrom-Ladegeräte, die Fahrzeuge mit mehr als 80 kW aufladen können. Dabei wird die Energienutzung von Zenobē eigener Software überwacht. Aus wirtschaftlicher Sicht ist dies ein einzigartiger Ansatz, der zeigt, dass Batteriespeicherung in Verbindung mit ÖPNV-Infrastruktur zu einem interessanten Geschäftsmodell werden könnte, wenn spezialisierte Dritte wie Zenobē daran beteiligt werden.



Abbildung 9: [Abellio London Bus-Depot](#) (Zenobe)

Solingen - Projekt BOB

BOB ist Teil des intelligenten Trolleybus-Systems und der Weiterentwicklung des bestehenden Oberleitungsnetzes zu einer intelligenten Infrastruktur, die in das Stromnetz der Stadt integriert ist. Das Oberleitungsnetz ist mit dem Mittelspannungsnetz gekoppelt, und Bremsenergie kann zurückgespeist werden. Photovoltaikanlagen entlang der Oberleitung können direkt und verlustfrei ins Netz einspeisen. In Umspannwerken installierte Batterien können Strom speichern und bei Bedarf abgeben. Ladestationen für Elektroautos werden integriert.



Abbildung 10: <https://www.bob-solingen.de/>

Hannover - Gleichrichterunterwerk mit wiederverwendeten Batterien

In Hannover versorgen zwanzig wiederverwendete Bus-Batteriesysteme mit einer Kapazität von ca. 500 kWh am neuen Gleichrichterunterwerk die Elektrobusse und Straßenbahnen der ÜSTRA Hannoversche Verkehrsbetriebe AG. Die Energiespeichereinheiten dienen als Puffer zur effizienten Nutzung der zurückgewonnenen Energie im Straßenbahnbetrieb, zur Netzstabilisierung, insbesondere zum Ausgleich von Lastspitzen, sowie zur Unterstützung bei Stromausfällen und zur Bereitstellung von elektrischer Energie für die öffentliche Ladeinfrastruktur.



Abbildung 11: [NACHHALTIGER BUS](#)

Hamburg wird elektrisch

Im Betriebshof Hamburg Alsterdorf wurden zwei der sechs Carports mit einer intelligenten Ladeinfrastruktur für E-Busse ausgestattet, die 96 Ladestationen und 240 Stellplätze umfasst.

Das Ladekonzept ist modular und damit skalierbar, die Stromversorgung ist über ein Umspannwerk an das Hamburger Stromnetz angeschlossen. Modulare Standardtransformatoren (1.600 kVA) liefern Strom für bis zu 16 Busse.

Die Busse werden über Nacht mit einer maximalen Ladeleistung von 150 kW pro Bus und einer durchschnittlichen Ladezeit von 4-5 Stunden aufgeladen, wobei auch überschüssige Windenergie genutzt wird, um die Integration erneuerbarer Energiequellen in das Netz zu verbessern.



Abbildung 12: Quelle: © INIT | Ulrike Kabel

Madrid - eLobster (H2020)

Das eLobster-Projekt zielt darauf ab, die Synergien zwischen der Stadtbahninfrastruktur und den Stromverteilungsnetzen zu verbessern, um Stromverluste zu reduzieren und die Netzstabilität zu erhöhen, insbesondere in Szenarien, in denen eine hohe Integration erneuerbarer Energien möglich ist.

Die Lösung basiert auf einem integrierten Bahn- und Netzmanagementsystem, das ausgehend von der Echtzeitanalyse der Energieverluste den Stromaustausch zwischen den Netzen optimieren und den lokalen Eigenverbrauch von EE maximieren kann.

Der Demonstrationsstandort von E-LOBSTER ist die Metro de Madrid, deren U-Bahn an ein lokales Stromverteilungsnetz mit einem hohen Anteil an EE angeschlossen ist.



Los Angeles, Vereinigte Staaten - Energiespeichersystem für Bremsenergie (WESS)

Im Rahmen des Projekts Way Side Energy Storage System („Energiespeichersystem für Bremsenergie“, WESS) wurde das schwungradbasierte System von VYCON REGEN an der Station Westlake/McArthur Park in die Traction Power Substation (Bahnstromumspannwerk, TPSS) der Red und Purple Line integriert.

Das System nimmt die Bremsenergie der U-Bahnen in Kurven oder bei der Einfahrt in den Personenbahnhof in der Nähe von WESS TPSS auf, speichert diese Energie und stellt sie dem nächsten Zug zur Verfügung, der sie benötigt. Dadurch wird der Spitzenstrombedarf gesenkt und eine Verringerung der Bahnstromenergie um 10-18 % erreicht. Das System ist seit August 2014 im täglichen Vollbetrieb. Die jährlichen Einsparungen werden auf rund 541 MWh geschätzt, was der Energieversorgung von 100 durchschnittlichen kalifornischen Haushalten entspricht.



Abbildung 13: Copyright © 2022 | Metro - Los Angeles County Metropolitan Transportation Authority; [The Source](#), von Dave Sotero, 3. Oktober 2014

Forschungsprojekt „FlyGrid“, Österreich

Ein FESS (Flywheel Energy Storage System, Schwungrad-Energiespeichersystem) wird für eine vollautomatische Ladestation für Elektrofahrzeuge entwickelt, um in einem Niederspannungs-Verteilungsnetz eine hohe Ladeleistung zu erreichen und gleichzeitig das Netz zu stabilisieren. Das System eignet sich für die Integration lokaler erneuerbarer Energiequellen und trägt dazu bei, den Anteil sauberer Energie am Strommix zu erhöhen. Eine hohe Lebensdauer des Energiespeichers, die Fähigkeit zur Rückspeisung hoher Leistungen ins Netz sowie die leichte Transportierbarkeit in Form einer mobilen „Schnellladebox“ (für elektrische Baumaschinen o. ä.) sind weitere Merkmale des FlyGrid-Konzepts. Ein Modul dieses Prototyps wird als Referenzfall verwendet und liefert 5 kWh bei 100 kW Spitzenleistung. (Haidl et al. 2019).

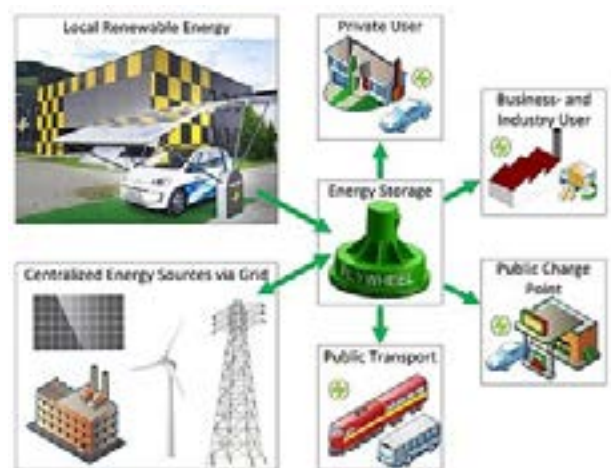


Abbildung 14: [TU Graz](#)

Huai'an, Jiangsu: Superkondensatortechnologie als Wegbereiter für den öffentlichen Verkehr

Superkondensatoren werden im öffentlichen Verkehr hauptsächlich in Fahrzeugen eingesetzt.

Mit einer 20 km langen Strecke und 23 Haltestellen hat Huai'an die längste mit Superkondensatoren betriebene elektrische Straßenbahn eingeführt.

Die Superkondensatortechnologie mit sehr kurzen Ladezeiten von etwa 30 Sekunden und einer langen Lebensdauer ersetzt 30 % der Privatfahrzeuge und spart jährlich mit der Beförderung von 7 Millionen Passagiere in einem dicht befahrenen Gebiet 4.900 Tonnen CO₂-Emissionen.

Warschau



Abbildung 15: sustainable-bus.com/

Ein ähnlicher Ansatz wurde in Warschau verfolgt, wo die in Estland von Skeleton Technologies hergestellten Ultrakondensatorsysteme die Bremsenergie zurückgewinnen und für die Beschleunigung wiederverwenden, wodurch der Gesamtenergieverbrauch erheblich gesenkt und Stromspitzen vermieden werden, was die Netzinfrastruktur in Warschau stabilisiert und somit die Energieeffizienz erheblich steigert. Mit 1 Million Ladezyklen stellen Superkondensatoren im Vergleich zu Li-Ionen-Batterien für bestimmte Anwendungen eine technisch bessere Lösung dar.

La Spezia (IT) SmartBUS



Abbildung 16: [Nachhaltiger Bus](#)

In La Spezia wurden mit Ultrakondensatoren (32 kWh) ausgestattete Busse auf einer 17 km langen Strecke mit einer AC/DC-Ladestation (150 kW) am Busbahnhof getestet. Die Ladezeit des SmartBUS beträgt 5 bis 7 Minuten. Die Innovation liegt vor allem im geringeren Gewicht und der geringeren Größe des Busses sowie in der Möglichkeit, bis zu 40 % der Bremsenergie zurückzugewinnen.

Das Joint Venture von E-CO, Chariot, Prometeon und Politecnico Milano hat gezeigt, dass Ultrakondensatoren verschiedener Kapazitäten in SmartBUS-Modellen (8, 12 und 18 Meter), die anstelle von Batterien eingesetzt werden, mit einer einzigen Ladung Entfernungen von über 40 km ermöglichen.

2. Die EfficienCE-Anwendungsfälle zur Energiespeicherung und Integration von erneuerbaren Energien

In diesem Kapitel werden drei relevante Anwendungsfälle auf der Grundlage der Analyse von Funktionalitäten und Technologien sowie der Überprüfung bewährter Verfahren in den vorangegangenen Kapiteln ermittelt. Es handelt sich um Konzepte für a) energieeffiziente Depots, b) intelligente Knotenpunkte und c) lineare Infrastrukturen, bei denen der Einsatz von Energiespeichertechnologien die Integration erneuerbarer Energiequellen und die Unterstützung des Systembetriebs ermöglicht. Die drei Anwendungsfälle fassen die typische Ausstattung zusammen, die zur Verbesserung der Energieeffizienz der ÖPNV-Infrastruktur entwickelt werden muss.

	Energie-effizientes Depot	Intelligenter Knotenpunkt	Lineare Infrastruktur
London (UK) Bus2Grid	x		
London (UK) Waiworth-Depot	x		
Solingen (DE) Intelligentes Obus-System			x
Hannover (DE) Gleichrichterunterwerk			x
Hamburg (DE) wird elektrisch	x		
Madrid (ES) eLobster-Projekt		x	
Los Angeles (US) Metro WESS		x	
Graz (AT) FlyGrid-Forschungsprojekt		x	
Huai'an, Jiangsu (CN) Superkondensatoren für den öffentlichen Verkehr			x
Warschau (PL) Straßenbahnen mit Superkondensatoren			x
La Spezia (IT) Smartbus			x
Maribor (SI)* Mehrzwecknutzung der öffentlichen Infrastruktur		x	
(Gdynia) (PL)* Zurückgewonnene Bremsenergie und EE	x	x	x
Pilsen (CZ)* Pufferspeicherstation im Obus-Netz			x
Wien (AT)* In U-Bahnhof integrierte PV-Anlage	x	x	

*EfficienCE-Pilotprojekte

Abbildung 17: Pilotprojekte, internationale bewährte Verfahren und Anwendungsfälle (EfficienCE, 2022)

Der Rahmenentwurf wird durch den Kontext der Stadt Bergamo repräsentiert, wo die SUMP-Umsetzung die Renovierung eines wichtigen Mobilitätsknotens für das Verkehrsnetz, den Bau neuer Stadtbahn- und elektrischer Busschnell-Linien (eBRT, electric bus rapid transit) sowie die Entwicklung eines Mehrzweck-Ladenetzes für Elektrofahrzeuge vorsieht.

Der Fall von Bergamo, wo im Rahmen des EfficienCE-Projekts ein Aktionsplan für eine bessere Integration von erneuerbaren Energien und Speichersystemen in die öffentliche Verkehrsinfrastruktur entwickelt wird, stellt einen geeigneten Rahmen dar, der einen Modellkontext für die Zuweisung von Speichermöglichkeiten für verschiedene Zwecke und verschiedene Arten von Infrastrukturen repräsentiert.

2.1 Energieeffizientes Depot

Der Anwendungsfall konzentriert sich auf die Verbesserung der energetischen Leistung eines (renovierten oder neu konzipierten) ÖPNV-Depots durch eine bessere Nutzung erneuerbarer Energiequellen (einschließlich Bremsen) sowie einen effizienteren Verbrauch, und auf den Beitrag zur Energieautonomie und zum Netz (z. B. vom Bus ins Netz).

An der Planung eines energieeffizienten Depots kann ein breites Spektrum von Akteuren beteiligt sein, z. B. die Kommune, Betreiber öffentlicher Verkehrsmittel und andere Anbieter (z. B. E-Carsharing), Übertragungs- und Verteilnetzbetreiber (ÜNB und VNB) sowie die Bürger.

Gemäß dem Hintergrund des Anwendungsfalls basieren die Konzeption und Umsetzung von Energieeffizienzlösungen für Depots auf Basis von Speichern hauptsächlich auf Batteriespeichern (neu und wie-

derverwendet), und die Investitionen umfassen auch PV-Systeme und andere Lösungen zur Erzeugung erneuerbarer Energien, Ladeeinrichtungen (auch V2G), Überwachungssysteme usw.

Die wichtigsten erwarteten Auswirkungen stehen im Zusammenhang mit einer höheren Energieeffizienz durch Selbsterzeugung und Verringerung der Verluste, einer besseren Integration erneuerbarer Energiequellen und den damit verbundenen ökologischen und wirtschaftlichen Vorteilen.

Herausforderungen/Hindernisse

Die Umsetzung von Speicherlösungen für energieeffiziente Depots kann verschiedenen Herausforderungen und in einigen Fällen Hindernissen begegnen, insbesondere in Bezug auf die Rechtslage, wenn es um V2G und Energieverteilung geht, und im Zusammenhang mit der Bewertung von Kosten und Nutzen der erforderlichen Investitionen. Darüber hinaus ist die soziale Akzeptanz ein wichtiges Element, das bei der Planung neuer Infrastrukturen in dicht besiedelten Stadtvierteln in Betracht kommt, und die Herausforderungen in Bezug auf Speicherung und V2G können Vorteile mit sich bringen, die es zu berücksichtigen gilt.

Referenzen:

London (UK) Bus2Grid
London (UK) Walworth-Depot
Hamburg (DE) wird elektrisch
Gdynia (PL)* Zurückgewonnene Bremsenergie und EE
Pilsen (CZ)* Pufferspeicherstation im Trolleybus-Netz
Wien (AT)* In U-Bahnhof integrierte PV-Anlage

2.2 Lineare Infrastruktur

In diesem Anwendungsfall werden mögliche Anwendungen von Speichertechnologien für die lineare Infrastruktur analysiert, hauptsächlich zum Zweck von Netzunterstützung und -ausgleich, wobei sowohl stationäre als auch bewegliche Ansätze berücksichtigt werden.

Anwendungen wie stationäre und bewegliche Batterien sowie Schwungräder und Superkondensatoren sollen berücksichtigt werden, um die Bandbreite der Vorteile, die durch den Einsatz von Speichertechnologien für das Netz erzielt werden können, sowie deren Vorteile und Grenzen zu untersuchen.

Die Einbeziehung der Interessengruppen soll sich insbesondere auf die technische Seite konzentrieren, sowohl im Bereich der Mobilität (Betreiber öffentlicher Verkehrsmittel und andere Anbieter) als auch im Bereich der Energie (ÜNB und VNB).

Die wichtigsten erwarteten Auswirkungen beziehen sich auf die Unterstützung des Netzes, um die betriebliche Effizienz zu verbessern und somit die ökologische und wirtschaftliche Leistung der Infrastruktur durch wirtschaftlich tragfähige Lösungen zu steigern. Der Anwendungsbereich variiert je nach Art der bestehenden oder zu entwickelnden Infrastruktur: Aus diesem Grund enthalten die Referenzen Beispiele für Trolleybusse, Busse und Straßenbahnen.

Herausforderungen/Hindernisse

Die Einführung von Speicherlösungen für lineare Infrastrukturen kann insbesondere wirtschaftliche Herausforderungen bezüglich der erforderlichen Investitionen mit sich bringen, aber gleichzeitig auch Chancen für die Zurückstellung relevanter Investitionen ins Netz und für flexiblere Lösungen zur Stabilisierung des Netzes bieten. In einigen Fällen können für verschiedene technologische Anwendungen spezifische rechtliche Hindernisse bestehen (z. B. Sicherheitsvorschriften für Schwungräder).

Referenzen:

Solingen (DE) Intelligentes Trolleybus-System
Hannover (DE) Gleichrichterunterwerk
Huai'an, Jiangsu (CN) Superkondensatoren für den öffentlichen Verkehr
Warschau (PL) Straßenbahnen mit Superkondensatoren
La Spezia (IT) Smartbus
Gdynia (PL)* Zurückgewonnene Bremsenergie und EE
Pilsen (CZ)* Pufferspeicherstation im Trolleybus-Netz

2.3 Intelligenter Knotenpunkt

Der letzte Anwendungsfall konzentriert sich auf die Gestaltung eines intelligenten Knotenpunkts als Station, Haltestelle oder multimodale Drehscheibe, an dem Speicher eingesetzt werden können, um die effiziente Nutzung erneuerbarer Energiequellen sowie die Mehrzwecknutzung der Ladeinfrastruktur zu ermöglichen. Es können verschiedene Ansätze in Betracht gezogen werden, von der reinen Verbesserung der Energieeffizienz und der Leistung der Infrastruktur bis hin zum aktiven Beitrag von Fahrzeugen und Stromerzeugung zur Netzstabilität.

Die Einbeziehung der Interessengruppen soll sich insbesondere auf die technische Seite konzentrieren, sowohl im Bereich der Mobilität (Betreiber öffentlicher Verkehrsmittel und andere Anbieter) als auch im Bereich der Energie (ÜNB und VNB).

Bei der Auswahl von Lösungen für intelligente Knotenpunkte auf Basis von Speichertechnologien werden verschiedene technologische Optionen wie Batterien, Schwungräder und Superkondensatoren in Betracht gezogen und ihr Potenzial entsprechend den Merkmalen der Knotenpunkte und Systeme bewertet.

Die wichtigsten erwarteten Auswirkungen beziehen sich auf die Integration erneuerbarer Energiequellen, die Unterstützung des Netzes und der Energieeffizienz, um die betriebliche Effizienz und damit die ökologische und wirtschaftliche Leistung der Infrastruktur zu verbessern. Die Ermittlung einer optimalen Größenordnung für die Integration von Speichertechnologien und Technologien für erneuerbare Energien auf Knotenebene unter Berücksichtigung der Koexistenz und der Wechselwirkungen zwischen verschiedenen (linearen und Knoten-)Infrastrukturen ist von entscheidender Bedeutung, um die Effizienz und wirtschaftliche Nachhaltigkeit der Anwendungen zu gewährleisten.

Herausforderungen/Hindernisse

Die Umsetzung von Speicherlösungen für intelligente Knotenpunkte kann aufgrund der Komplexität und der Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Systemen mit besonderen Herausforderungen und technischen Hindernissen verbunden sein. Insbesondere die Einführung von Mehrzweck-Ladesystemen und der Energieaustausch zwischen verschiedenen Diensten kann eine eingehende Analyse der Rechtsvorschriften und Geschäftsmodelle erfordern.

Referenzen:

Madrid (ES) eLobster-Projekt
Los Angeles (US) Metro WESS
Graz (AT) FlyGrid-Forschungsprojekt
Maribor (SI)* Mehrzwecknutzung der öffentlichen Infrastruktur
Gdynia (PL)* Zurückgewonnene Bremsenergie und EE
Wien (AT)* In U-Bahnhof integrierte PV-Anlage

3. Erkenntnisse und Schlussfolgerungen

Die Kombination aus energieeffizienten Depots, intelligenten Knotenpunkten und linearer Infrastruktur für den öffentlichen Verkehr zeigt das Potenzial der Entwicklung innovativer Lösungen zur Optimierung der Beziehung zwischen Mobilität und Energienetz.

Was das effiziente Depot betrifft, so hat die Analyse gezeigt, dass die Größe der EE-Infrastruktur entscheidend ist, um die Möglichkeiten für Speicheranwendungen zu bestimmen. Es könnte sich zum Beispiel lohnen, die Rolle des ÖPNV-Netzes als Stromabnehmer verschiedener EE-Quellen auf Stadtteilebene in Betracht zu ziehen, um die Wiederverwendung von Energieströmen effizient und wirtschaftlich tragfähig zu machen.

Der Einsatz von Speichersystemen in der linearen Infrastruktur könnte im Hinblick auf die Integration von EE als unzureichend angesehen werden, bietet jedoch gute und flexible Lösungen für Nebenfunktionen wie z. B. die Spannungsregelung. Darüber hinaus kann die Nutzung von Speichern in einigen Fällen eine Möglichkeit sein, relevante Investitionen in das Stromnetz aufzuschieben.

Die wichtigste Erkenntnis aus dem Anwendungsfall des intelligenten Knotenpunkts ergänzt die vorangegangenen: Der Planungsprozess muss die Komplexität und die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Systemen berücksichtigen; insbesondere die Einführung von Mehrzweck-Ladesystemen und der Energieaustausch zwischen verschiedenen Diensten kann eine eingehende Analyse der Regulierungs- und Geschäftsmodelle erfordern.

4. Referenzen

- Ahmad Arabkoohsar, Meisam Sadi, 2021: Flywheel energy storage, in Mechanical Energy Storage Technologies, (<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/gyrobus>)
- BloombergNEF, 2020: Battery Price Survey <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/>
- Jimena Castro-Gutiérrez, Alain Celzard and Vanessa Fierro, 2020: Energy Storage in Supercapacitors: Focus on Tannin-Derived Carbon Electrodes, *Front. Mater.*, 22 July 2020 <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00217>
- Circular Energy Storage, research and consulting, 2021: Prices for used batteries are higher than for new batteries - this is why <https://circularenergystorage.com/articles/2021/1/15/prices-for-used-batteries-are-higher-than-for-new-batteries-this-is-why>
- Circular Energy Storage, research and consulting, 2021: The lithium-ion battery life cycle report <https://static1.squarespace.com/static/587657ddbe659497fb46664c/t/5fdaa991dc2ddb6396c30fa6/1608165783527/The+lithium-ion+battery+life+cycle+report+sample.pdf>
- EASE European Association for Storage of Energy, 2020: Energy Storage and Transport: What's the Connection? <https://ease-storage.eu/news/energy-storage-and-transport-whats-the-connection/>
- Sarah George, 2021: 'UK's first' grid-scale battery storage system comes online in Oxford <https://www.euractiv.com/section/electricity/news/uks-first-grid-scale-battery-storage-system-comes-online-in-oxford/>
- Philipp Glücker, Klaus Kivekäs, Jari Vepsäläinen, Panagiotis Mouratidis, Maximilian Schneider, Stephan Rinderknecht, Kari Tammi: Prolongation of Battery Lifetime for Electric Buses through Flywheel Integration; *Energies* 2021, 14, 899. <http://doi.org/10.3390/en14040899>
- M.A. Guerrero, E. Romero, F. Barrero, M. I. Milanés, E. González Supercapacitors: Alternative Energy Storage Systems <http://peandes.unex.es/archives%5CP126.pdf>
- Peter Haidl, Armin Buchroithner, Bernhard Schweighofer, Michael Bader, Hannes Wegleiter, 2019: Lifetime Analysis of Energy Storage Systems for Sustainable Transportation, sustainability file:///C:/Users/user/AppData/Local/Temp/sustainability-11-06731-v2.pdf
- IEA 2021: Prospects for electric vehicle deployment, Global EV Outlook 2021 <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021/prospects-for-electric-vehicle-deployment>
- Fabian Meishner, Dirk Uwe Sauer, 2019: Wayside energy recovery systems in DC urban railway grids. Elsevier, *eTransportation* 1 (2019) <https://d-nb.info/1226855962/34>
- Craig Morris, 2015: how batteries can stabilize the grid; Energy Transition - The global Energiewende, <https://energytransition.org/2015/06/batteries-stabilize-the-grid/#menuopen>
- Kaushik Patowary, 2019: Gyrobus: The Flywheel-Powered Public Transportation <https://www.amusingplanet.com/2019/02/gyrobus-flywheel-powered-public.html>
- Abraham Alem Kebede, Thierry Coosemans, Maarten Messagie, Towfik Jemal, Henok Ayele Behabtu, Joeri Van Mierlo, Maitane Berecibar, 2021: Techno-economic analysis of lithium-ion and lead-acid batteries in stationary energy storage application, *Journal of Energy Storage* Volume 40, August 2021, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X21004783#!>
- Robert Rapier, 2020: Why Vanadium Flow Batteries may be the future of utility - scale energy storage, *Forbes*, <https://www.forbes.com/sites/rrapier/2020/10/24/why-vanadium-flow-batteries-may-be-the-future-of-utility-scale-energy-storage/?sh=6faaca6f2305>
- Schmidt et al., 2019: Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies, *Joule* 3, 81-100 January 16, 2019, 2018 Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.12.008>

Octavio Solis, Frank Castro, Leonid Bukhin, Kinh Pham, David Turner, Gary Thompson, 2015: SAVING MONEY EVERY DAY: LA METRO SUBWAY WAYSIDE ENERGY STORAGE SUBSTATION, Proceedings of JRC 2015 Joint Rail Conference <https://vyconenergy.com//wp-content/uploads/2018/06/Saving-Money-Every-Day-LA-Metro-Subway-Wayside-Energy-Storage-Substation-March-2015.pdf>

Xiaojun Li, Alan Palazzolo, 2021: A review of flywheel energy storage systems: state of the art and opportunities (arXiv:2103.05224v3 [eess.SY] 13 Jun 2021) <https://arxiv.org/pdf/2103.05224.pdf>

Referenzen zu den Projekten

eLobster - H2020 <https://www.e-lobster.eu/project-brief/>

BOB - Solingen (DE) <https://www.bob-solingen.de/>

BUS2GRID - London (UK) <https://www.sseenergysolutions.co.uk/distributed-energy-infrastructure/our-solutions/bus2grid>

ENTDECKEN SIE MEHR EfficienCE



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

Kontaktieren Sie uns



+49 341 123 59 10



Projektmanager:

Sebastian Graetz
sebastian.graetz2@leipzig.de

Marlene Damerau
m.damerau@rupprecht-consult.eu

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

f www.facebook.com/Interreg.EfficienCE/



@Int_EfficienCE



GDAŃSK UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY

Leipziger
Verkehrsbetriebe



WIENER LINIEN

Plzeňské městské
dopravní podniky

PMDP



Faculty of Civil Engineering,
Transportation Engineering
and Architecture



COMUNE DI BERGAMO

