



Interreg
CENTRAL EUROPE



European Union
European Regional
Development Fund

EfficienCE



MIĘDZYNARODOWY PODRĘCZNIK WDRAŻANIA ENERGOOSZCZĘDNYCH TECHNOLOGII DLA INFRASTRUKTURY TRANSPORTU PUBLICZNEGO

(3) Magazynowanie energii w infrastrukturze
transportu publicznego

IMPRINT

Numer projektu:

CE1537 EfficienCE – Efektywność energetyczna dla infrastruktury transportu publicznego w Europie Środkowej.

Finansowanie:

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

Tytuł dokumentu:

D.T2.3.2 Międzynarodowy podręcznik wdrażania energooszczędnych technologii dla infrastruktury transportu publicznego

Redakcja:

Konsorcjum EfficienCE

Autorzy:

Anja Seyfert, Gabriele Grea (Redmint Impresa Sociale)

Układ i projekt:

Levent Saran (Rupprecht Consult GmbH)

Data:

czerwiec 2022 r.

O projekcie EfficienCE

EfficienCE to projekt współpracy finansowany z programu Interreg EUROPA ŚRODKOWA, którego celem było zmniejszenie śladu węglowego w regionie. Większość miast Europy Środkowej posiada rozbudowane systemy transportu publicznego, które mogą stanowić podstawę dla usług niskoemisyjnej mobilności. Ponad 63% osób dojeżdżających do pracy w regionie korzysta z transportu publicznego. Przedsięwzięcia mające na celu zwiększenie efektywności energetycznej i udziału odnawialnych źródeł energii w infrastrukturze transportu publicznego mogą zatem mieć szczególnie duży wpływ na zmniejszenie emisji CO₂.

Osiągnięto to dzięki wspieraniu władz lokalnych, zarządów transportu publicznego i operatorów poprzez opracowywanie strategii planowania i planów działania, wdrażanie działań pilotażowych, rozwijanie narzędzi i szkoleń w zakresie planowania i obsługi infrastruktury niskoemisyjnej, a także poprzez transfer wiedzy i najlepszych praktyk w zakresie energooszczędnych przedsięwzięć w regionach Europy Środkowej.

Dwunastu partnerów, w tym siedem zarządów/firm transportu publicznego z siedmiu krajów, współpracowało przez trzy lata, aby zużytkować niewykorzystany potencjał w tym sektorze i przyczynić się do realizacji celów „Białej Księgi” UE dotyczących ograniczenia emisji z transportu o 60% do 2050 r. i zmniejszenia o połowę liczby samochodów napędzanych paliwem konwencjonalnym, z jakich korzysta transport miejski, do 2030 r.

Spis treści

Streszczenie	5
1. Wprowadzenie	6
1.1 Istotne technologie	6
1.2 Magazynowanie energii a EfficienCE – projekty pilotażowe i międzynarodowe dobre praktyki.....	8
2. Przykłady zastosowania EfficienCE w zakresie magazynowania energii i integracji energii odnawialnej	16
2.1 Efektywna energetycznie zajezdnia	16
2.2 Infrastruktura liniowa	17
2.3 Inteligentny węzeł	18
3. Wyciągnięte wnioski i doświadczenia	19
4. Referencje.....	20

Streszczenie



Zdjęcie dostarczone przez miasto Lipsk

Unia Europejska koncentruje się na przyspieszeniu dekarbonizacji sektora transportu w oparciu o odnawialne źródła energii. Pojazdy elektryczne (EV), pojazdy elektryczne z ogniwami paliwowymi (FCEV) i magazynowanie energii mogą znacznie wspomóc ten wysiłek, a jednocześnie sprzyjać rentowności i stabilizacji sieci w infrastrukturze transportu publicznego.

Rola infrastruktury transportu publicznego w dużej mierze zależy od jej zdolności do wspierania wydajnego wykorzystania energii elektrycznej w sieciach, jak również od umożliwienia przez nią integracji odnawialnych źródeł energii (OZE). W procesie tym bardzo ważną rolę odgrywają technologie magazynowania, które znajdują zastosowanie w zajezdniach, stacjach i przystankach oraz wzdłuż linii tworzących sieci transportu.

Podręcznik EfficienCE dotyczący magazynowania energii w infrastrukturze transportu publicznego określa główne możliwe funkcje i technologie magazynowania energii, które można zastosować w infrastrukturze transportu publicznego, oraz analizuje ich zastosowanie zarówno w działaniach pilotażowych projektu, jak i międzynarodowych dobrych praktykach. Wyniki podsumowano w formie trzech przykładów zastosowania (efektywna energetycznie zajezdnia, inteligentny węzeł, infrastruktura liniowa), opisując typowe wyposażenie, które trzeba opracować w celu poprawy wydajności energetycznej infrastruktury transportu publicznego. Opis ten obejmuje główne przykładowe zastosowania umożliwiające wyższą efektywność energetyczną, większą integrację źródeł odnawialnych i skuteczniejszy wkład dla sieci ze strony infrastruktury transportu publicznego.

Przykłady zastosowania mają na celu podkreślenie głównych kluczowych elementów, oczekiwanych korzyści, wyzwań i barier, które należy wziąć pod uwagę podczas planowania integracji technologii magazynowania w infrastrukturze transportu publicznego, i przedstawienie bezpośrednich odniesień do programów pilotażowych i dobrych praktyk analizowanych w ramach projektu w celu uzyskania dalszych wskazówek i porównań.

1. Wprowadzenie

Obecność zelektryfikowanych pojazdów i infrastruktury w transporcie publicznym stanowi istotną szansę dla procesu dekarbonizacji w transporcie, a jednocześnie stawia istotne wyzwania techniczne związane ze stabilnością sieci, w szczególności z powodu obecności rosnącego udziału odnawialnych źródeł energii (OZE), które trzeba zintegrować i wykorzystać.

Magazynowanie energii może mieć różne funkcjonalności w infrastrukturze transportu publicznego w zależności od odpowiednich warunków ramowych i potrzeb.

Optymalizacja zużycia – Technologie magazynowania mogą przyczynić się do zmniejszenia opłat wynikających z zapotrzebowania dzięki buforowaniu potrzeb między godzinami szczytu a okresami niskiego zapotrzebowania, wspomagać integrację energii odnawialnej w celu maksymalizacji własnego zużycia, na przykład z elektrowni fotowoltaicznych lub poprawić efektywność energetyczną dzięki odzyskiwaniu i ponownemu wykorzystaniu energii hamowania pojazdów, a także zapewnić stabilność sieci w przypadku krótkotrwałej utraty mocy lub zmian częstotliwości i napięcia.

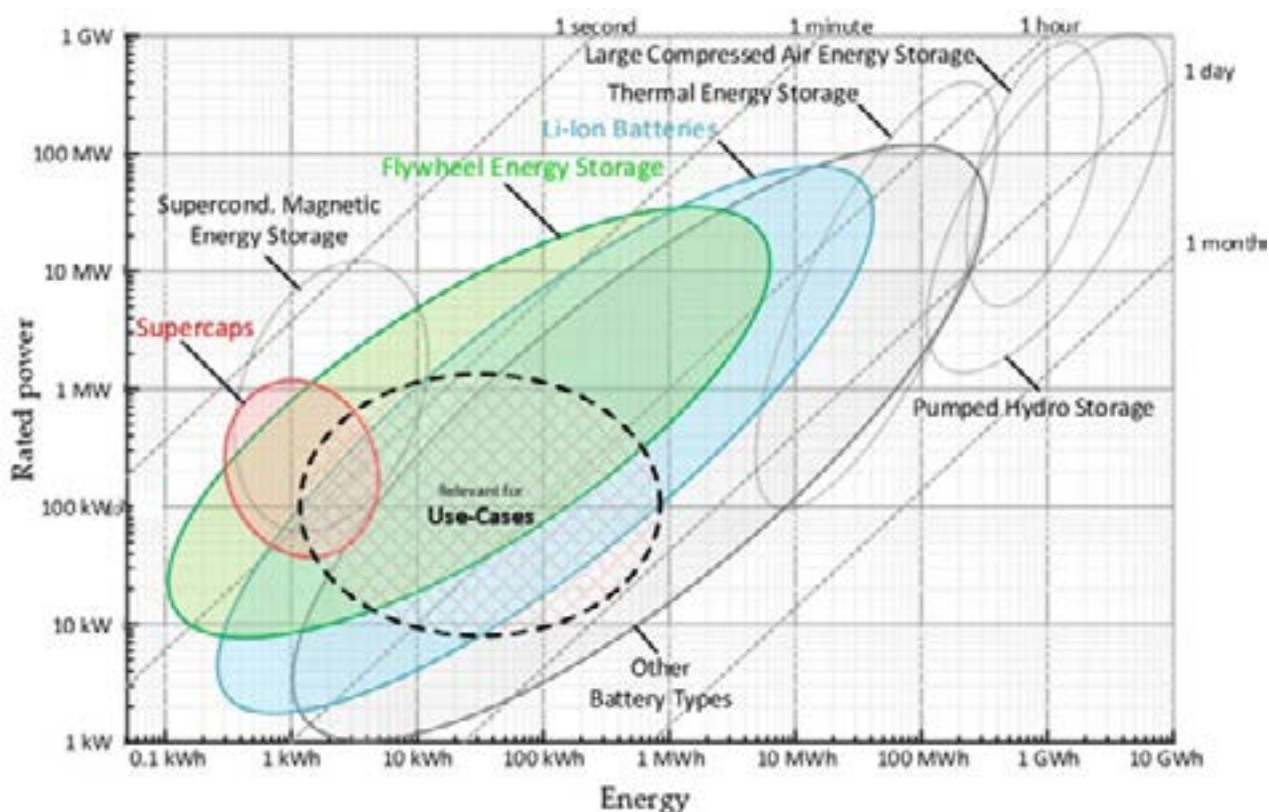
Działanie systemu – Systemy magazynowania energii mogą zapewniać usługi pomocnicze w zakresie pierwotnej reakcji sieci, aby ustabilizować zmiany częstotliwości i napięcia w sieci; w zakresie wtórnej reakcji, aby skorygować niezrównoważenie między obciążeniem a wytwarzaniem oraz w zakresie wymiany elektrowni szczytowych, aby zapewnić wystarczającą moc wytwórczą w okresach szczytowego zapotrzebowania

Prosumeryzm / integracja energii odnawialnych -Technologie magazynowania energii mogą lepiej integrować i maksymalizować udział wykorzystywanych odnawialnych źródeł energii; w zależności od kosztów magazynowania i proponowanych oszczędności energii/kosztów może być konieczne uwzględnienie innych opcji, takich jak zapewnienie infrastruktury ładowania również stronom zewnętrznym oraz zostanie aktywnym graczem w lokalnych sieciach energetycznych na rzecz mobilności (połączenia z wielofunkcyjnym wykorzystaniem infrastruktury itp.); W przypadku prosumenta dysponującego dostępnymi możliwościami magazynowania możliwy jest również arbitraż energetyczny, a co za tym idzie czerpanie korzyści z zakupu energii po niskich cenach, którą można sprzedać w okresach wysokich cen.

1.1 Istotne technologie

W celu przeanalizowania i rozważenia przykładów zastosowania opisanych w tym podręczniku wybrano najbardziej odpowiednie technologie magazynowania do wykorzystania w transporcie publicznym. Technologie różnią się w zależności od mocy, gęstości energii i czasu rozładowania (rys. 1), a zatem mają różne poziomy przydatności, funkcji i obszarów zastosowań w transporcie publicznym.

Akumulatory mogą być używane w pojazdach do napędu lub innych usług związanych z pojazdem (jako urządzenia pomocnicze, do odzyskiwania energii hamowania itp.) lub jako magazyny stacjonarne. W przypadku akumulatorów stacjonarnych wymagania dotyczące lekkości i bezpieczeństwa są mniejsze, co pozwala na szerszy zakres technologii akumulatorów.



Rysunek 1: Moc znamionowa, pojemność energetyczna i czas rozładowania różnych systemów magazynowania energii do stacjonarnych i mobilnych zastosowań transportowych. (Haidl et al. 2019)

Wśród akumulatorów technologie litowo-jonowe umożliwiają wysoką gęstość energii, niższy koszt w przeliczeniu na pojemność energetyczną i niskie samorozładowanie, ale też mniejszą gęstość mocy i wysokie koszty w przeliczeniu na moc znamionową, dlatego są najczęściej wykorzystywane w zastosowaniach wrażliwych na masę, wymagających większej mocy, np. w elektronice motoryzacyjnej i konsumenckiej.

Systemy magazynowania akumulatorów w ramach drugiego życia mogą zmniejszyć szczytowe zużycie energii i powiązane koszty z sieci związane z szybkim ładowaniem, umożliwić ładowanie w obszarach z ograniczeniami sieci i wspierać dalsze usługi, na przykład integrację energii odnawialnych. Wykorzystanie akumulatorów w ramach drugiego życia wydaje się obiecujące, aby lepiej wspierać sieć, integrować odnawialne źródła energii i dodawać elementy obiegu zamkniętego.

Superkondensatory mogą być produkowane w różnych rozmiarach do różnych zastosowań. Ze względu na bardzo krótki czas ponownego ładowania superkondensatory pozwalają na zaspokojenie wysokich i częstych szczytów zapotrzebowania na moc. Główne zastosowania związane są z ponownym wykorzystaniem energii hamowania w kolejnictwie i różnych pojazdach, integracją energii odnawialnych i wymianą akumulatorów w pojazdach elektrycznych.

Systemy magazynowania energii w kołach zamachowych (ang. Flywheel Energy Storage Systems, FESS) to mechaniczne urządzenia do magazynowania energii kinetycznej przez krótki czas. Niewielkie koła zamachowe mogą być używane jako urządzenia magazynujące w zasilaczach bezprzerwowych (ang. uninterruptible power supplies, UPS), a także w pojazdach. Główne cechy to długa żywotność bez utraty mocy (bardzo duża liczba cykli ładowania i rozładowania), wysoka jakość energii, zero zależności od temperatury, precyzyjna weryfikacja stanu naładowania/sprawności, brak problemów z dużym rozładowaniem, minimalny wpływ na środowisko.

W poniższej tabeli podsumowano główne oczekiwane korzyści i bariery analizowanych technologii, aby ocenić ich możliwości zastosowania zgodnie z przykładami zastosowania podanymi w podręczniku.

Technologia	Oczekiwane korzyści	Możliwe bariery techniczne	Możliwe bariery regulacyjne
Akumulatory litowo-jonowe (Li-Ion)	wysoka gęstość energii, niskie samorozładowanie	degradacja, wrażliwość na temperaturę, standardy bezpieczeństwa	związane z wykorzystaniem w ramach drugiego życia
Akumulatory wykorzystywane w ramach drugiego życia	rozszerzenie czasu eksploatacji akumulatorów	brak standaryzacji, także dla pozostałej mocy i ładowania	brak ram regulacyjnych, reguł fiskalnych, opłat energetycznych
Superkondensator	brak utraty mocy, długa żywotność, bardzo krótki czas ładowania, wysokie napięcie	wysokie koszty inwestycyjne, niska gęstość energii, duże i ciężkie systemy o dużej mocy	n.d.
Koła zamachowe	brak utraty mocy, długa żywotność, krótki czas ładowania, wysokie napięcie, modernizacja	wysokie koszty inwestycyjne, niska gęstość energii	możliwe przepisy bezpieczeństwa

Rysunek 2: Technologie magazynowania energii – korzyści i bariery (EfficienCE, 2021)

1.2 Magazynowanie energii a EfficienCE – projekty pilotażowe i międzynarodowe dobre praktyki

W tym rozdziale omówiono projekty pilotażowe i dobre praktyki EfficienCE, w podziale na różne kategorie technologiczne zastosowania (akumulatory, koła zamachowe, superkondensatory), a także zastosowanie stacjonarne i pokładowe. W poniższej tabeli przedstawiono kategorię funkcjonalności (optymalizacja zużycia a działanie systemu) oraz główne źródło energii.

	Akumulator	Koło zamachowe	Superkondensator	Stacjonarne	Pokładowe	Działanie systemu	Optymalizacja zużycia	Integracja odnawialnych źródeł energii	Odrzucanie energii hamowania
Londyn (UK) Bus2Grid	V2G				x	x		x	
Londyn (UK) Zajezdnia Waltham	x			x		x	x		
Sollingen (DE) System inteligentnych trolejbusów	x			x	x		x	x	x
Hanower (DE) Podstacja przelotowa	WTÓRNE WYKORZYSTANIE			x			x		x
Hamburg (Niemcy) stacja na elektryczność	x				x		x	x	
Madryt (ES) Projekt e-tobler	x			x		x			x
Los Angeles (US) Metro WISS		x		x			x		x
Graz (AT) Projekt badawczy FlyGrid									
Huailian, Rangun (CN) Superkondensatory dla transportu publicznego			x		x		x		x
Warszawa (PL) Tramwaje z superkondensatorami			x		x	x	x		x
La Spezia (IT) SmartBUS			x		x		x		x
Nicea (FR) Tramwaj z podwójnym trybem			x		x		x		x
Gdynia (PL)*	WTÓRNE WYKORZYSTANIE						x	x	x
Pilzno (CZ)*	x			x		x			
Wiedeń (AT)*				x			x	x	

Rysunek 3: Klasyfikacja projektów pilotażowych i dobrych praktyk (EfficienCE, 2022)

1.2.1. Projekty pilotażowe EfficienCE

Chociaż te przykłady skupiają się na różnych konkretnych celach (odzyskiwanie energii hamowania, wielofunkcyjne wykorzystanie infrastruktury ładowania, buforowanie energii w sieciach trolejbusowych), każdy z nich charakteryzuje się wykorzystaniem technologii magazynowania w zajezdniach, wzdłuż linii i na stacjach.

Maribor (SI) – Wielofunkcyjne wykorzystanie infrastruktury publicznej do ładowania autobusów elektrycznych

Celem akcji pilotażowej w Mariborze było wdrożenie stacji szybkiego ładowania dla autobusów elektrycznych w wielofunkcyjnych obiektach ładowania zlokalizowanych przy istniejącej stacji kolejki linowej oraz przy dworcu kolejowym. Infrastruktury do ładowania wielofunkcyjnego są umieszczone na końcowych przystankach linii autobusowej.

Rozwiązanie ustalone dla analizowanej trasy na podstawie analiz planowania przestrzennego, wykonalności technicznej i opłacalności ekonomicznej przewiduje instalację dwóch stacji szybkiego ładowania (150 kW i 300 kW) oraz zakup dwóch 12-metrowych autobusów elektrycznych z akumulatorami litowo-tytanowymi 73 kWh.

Modernizacja koncentruje się na stacji kolejki linowej i polega na integracji stacji szybkiego ładowania do wielofunkcyjnego wykorzystania w ramach istniejącej infrastruktury transportu publicznego. Moc stacji energetycznej kolejki linowej wykorzystywanej do obsługi kolejki linowej może być również udostępniana na ładowanie autobusów elektrycznych oraz samochodów elektrycznych. Stacja energetyczna ma moc 630 kVA, a przy aktualnym obciążeniu i mocy jednej stacji ładowania 230 kVA wystarczyłoby na zbudowanie dwóch stacji ładowania.



Rysunek 4: Stacja szybkiego ładowania dla autobusów elektrycznych na stacji kolejki linowej (gmina miejska Maribor)

Pilzno (CZ) – Stacja przechowywania buforowego w sieci trolejbusowej w celu uzyskania efektywności energetycznej

Wprowadzenie dużej liczby trolejbusów ładujących w ruchu skutkuje wyższym zużyciem energii elektrycznej na odcinkach, na których pojazdy poruszają się i ładują (dotychczas 8 pojazdów przegubowych i 22 pojazdy akumulatorowe o długości 12 metrów), co może generować obniżenie napięcia przy wyższych obciążeniach a tym samym powodować krótkotrwałe awarie sieci lub chwilowe awarie jednostek napędowych trolejbusów.

W celu uniknięcia wysokich kosztów inwestycyjnych i długotrwałych działań przygotowawczych koniecznych do budowy nowej stacji energetycznej lub wzmocnienia kabli, operator transportu publicznego uznał, że instalacja stacji przechowywania buforowego wzdłuż linii jest możliwym rozwiązaniem technicznym.

Wybrana stacja przechowywania buforowego opierająca się na akumulatorach dużej mocy i inteligentnym sterowaniu komputerowym oraz odseparowanym galwanicznie napędzie trakcyjnym (DC 600 V / DC 600 V) zapewnia bezpieczny i niezawodny transfer energii do trakcji i z powrotem.



Rysunek 5: [Akumulator stacji przechowywania buforowego w Pilźnie](#) (PMDP)

Możliwe przyszłe modernizacje mogą obejmować wykorzystanie akumulatorów o dużej pojemności (i z drugiej ręki) i/lub integrację małej elektrowni fotowoltaicznej w celu dostarczania energii na miejscu.

Gdynia(PL) – Odzyskana energia hamowania i OZE do zasilania budynku zajezdni trolejbusowej oraz zastosowanie systemu zasilania trakcyjnego do ładowania samochodów elektrycznych

Akcja pilotażowa w Gdyni skupiła się na optymalizacji zasobów energetycznych w budynku zajezdni trolejbusów dzięki połączeniu różnych zastosowań technologicznych.

Zajezdnia jest wyposażona w elektrownię fotowoltaiczną o mocy szczytowej 0,5 MW na dachu, generującą około 450 MWh rocznie, które są dostarczane bezpośrednio do sieci trolejbusowej (5% całkowitego zużycia). Co więcej, energia hamowania autobusów jest odzyskiwana dzięki falownikowi energii, który pozwala wprowadzać marnowaną w przeciwnym razie energię bezpośrednio do systemu energetycznego budynku.

Urządzenie zapewnia również kontrolę poziomu zużycia energii w sieci trakcyjnej, wykrywa niewykorzystaną energię oraz dokładnie kontroluje zużycie energii w budynku zajezdni dzięki udoskonaleniu istniejącego już systemu monitorowania energii (ang. energy monitoring system, EMS).

System falownika jest wyposażony w innowacyjny system magazynowania energii, który może gromadzić odzyskaną niewykorzystaną energię rekuperacji w przypadku braku obciążenia na wyjściu prądu AC. W tym celu wykorzystuje się jeden moduł akumulatorowy z akumulatora trakcyjnego trolejbusu (wykorzystanie w ramach drugiego życia).

Mobilna stacja ładowania samochodów elektrycznych zrealizowana w ramach projektu CAR (Creating Automotive Renewal – INTERREG Południowy Bałtyk) przez miasto Gdynię, umożliwiającą ładowanie różnymi zakresami mocy i prądu elektrycznego, może być podłączona do sieci trakcyjnej trolejbusów w dowolnym miejscu w mieście i pozwala na synergie pomiędzy dwoma projektami.

Przewagi połączonego systemu nad tradycyjnymi rozwiązaniami są następujące:

- podłączenie stacji nie wymaga dodatkowych kosztów instalacji oraz skraca czas inwestycji,
- brak długiego procesu formalnego związanego z jego budową,
- sieć trakcyjna o dużym zasięgu przestrzennym i szerokiej dostępności umożliwia zastosowanie stacji ładowania tam, gdzie występuje problem z podłączeniem do linii prądu przemiennego, np. ze względu na konieczność prowadzenia prac budowlanych.

W ramach gdyńskiego projektu pilotażowego podłączono mobilną stację ładowania dla pojazdów elektrycznych, aby sprawdzić, jak ładowanie samochodów elektrycznych wpływa na stabilność sieci, jej parametry czy regularną pracę linii trolejbusów.

Wiedeń (AT) – System fotowoltaiczny zintegrowany w stacjach metra w celu zasilania zapleczy budowlanych za pomocą OZE

Spółka Wiener Linien GmbH & Co KG przetestowała na stacji metra Ottakring nowy rodzaj systemu folii fotowoltaicznych, który jest pięć razy lżejszy od konwencjonalnych systemów fotowoltaicznych, co umożliwiło jego instalację na istniejących stacjach, bez konieczności wytrzymywania dodatkowego ciężaru konwencjonalnych systemów fotowoltaicznych.

Kolejną szczególną cechą była równoległa operacja systemu kolejowego DC (prądu stałego) i wytwarzania energii fotowoltaicznej, dla której wybrane moduły fotowoltaiczne musiały spełniać specjalne wymagania



Rysunek 6: Mobilna stacja ładowania samochodów elektrycznych zasilana z sieci trolejbusowej (PKT)



Rysunek 7: Wydarzenie inauguracyjne z udziałem władz lokalnych, listopad 2019 r. (Wiener Linien)



Zdjęcie dostarczone przez miasto Lipsk

techniczne (i obejmować dodatkowo t). Jedno z głównych wyzwań wiązało się z umieszczeniem sprzętu technicznego, takiego jak np. przetwornica częstotliwości, w odpowiednim miejscu w stacji, oraz z precyzyjnym zaplanowaniem przeprowadzenia kabli, aby skrócić odległość między pomieszczeniem technicznym a pomieszczeniem rozdzielni sieci niskiego napięcia. Moduły fotowoltaiczne są przyklejane na dachu, a kable mocowane w kanale rurowym. Po podłączeniu głównego rozdzielacza niskiego napięcia do pomieszczenia technicznego elementy pomiarowe ostatecznie zainstalowano w przetłaczniku mocy.

Dane techniczne: elektrownia fotowoltaiczna ma powierzchnię 360 m², moc znamionową 60,3 kWp i charakteryzuje się roczną produkcją wynoszącą około 60 000 kWh, co pokrywa udział energii wynoszący 6% rocznego zużycia energii całej stacji metra (łącznie z halą parkingową dla pociągów metra). Osiągnięty maksymalny miesięczny udział energii wyniósł 13% zużycia, a w słoneczny letni dzień do 50% zapotrzebowania stacji na energię pokrywa system fotowoltaiczny. Pomiary przeprowadzane są w odstępach 15-minutowych. Do wykonywania pomiarów stosowany jest miernik Siemens PAC 3200, a uzyskane dane są automatycznie przesyłane do systemu kontroli energii.



Rysunek 8: Folie fotowoltaiczne na dachu stacji metra (Wiener Linien)

1.2.2. Zastosowanie magazynowania energii w infrastrukturze transportu publicznego – dobre praktyki

W tym rozdziale przedstawiamy przegląd dobrych praktyk w zakresie zastosowania magazynowania energii w infrastrukturze transportu publicznego. Niektóre przykłady łączą już sprawdzone podejścia z funkcjami takimi jak pojazd do sieci, przydrożne systemy odzyskiwania energii czy integracja energii odnawialnych.

Londyn – Bus2Grid

Bus2Grid to nazwa ambitnego projektu łączącego 28 autobusów piętrowych z siecią w celu przeprowadzenia testów V2G. Autobusy wyposażone w akumulatory litowo-żelazowo-fosforanowe o mocy 382 kWh ładują się przez noc w okresach niskiego zapotrzebowania i są w stanie dostarczyć z powrotem 1,1 MW do londyńskiej sieci, gdy zapotrzebowanie jest wysokie, aby zapewnić usługi bilansowania.

Zajezdnia wyposażona jest w mobilną stację rozładunkową zasilaną prądem zmiennym za pomocą 2 ładowarek pokładowych o mocy 40 kW. Bardzo ważne: większość projektów V2G wykorzystuje ładowanie DC (CHAdeMO), dlatego wymaga certyfikacji tylko dla punktu ładowania (ChargePoint) i związanego z nim falownika – który nie porusza się – a nie dla pojazdu. Oczywiście koszty infrastruktury są niższe.

Abellio Londyn, Zajezdnia Walworth

Spółka Abellio planowała wprowadzić do ruchu 34 autobusy elektryczne na trasach TfL z zajezdni w Walworth. Wymagało to sfinansowania akumulatorów i usług infrastruktury ładowania, a także rozwiązania problemu ograniczonej zdolności transferu sieci i ograniczeń przestrzennych. Spółka Zenobē sfinansowała 34 akumulatory do autobusów elektrycznych z odpowiednią usługą i zainstalowała akumulator stacjonarny, aby wspomagać sieć podczas ładowania autobusów elektrycznych w okresach szczytu. Akumulator, który w ciągu dnia świadczy usługi dla sieci krajowej, generuje dodatkowy dochód i zapewnia obniżenie opłat spółce Abellio. Infrastruktura ładowania obejmuje wiele ładowarek DC zdolnych do ładowania pojazdów z mocą >80 kW, przy czym zużycie energii jest monitorowane przez oprogramowanie należące do spółki Zenobē. Z ekonomicznego punktu widzenia jest to wyjątkowe podejście, które pokazuje, że magazynowanie energii w akumulatorach połączone z infrastrukturą transportową może stać się interesującym argumentem biznesowym w przypadku współpracy z wyspecjalizowanymi stronami trzecimi, takimi jak Zenobē.



Rysunek 9: [Abellio Londyn – zajezdnia autobusowa](#) (Zenobe)

Solingen – projekt BOB

BOB jest częścią systemu inteligentnych trolejbusów i dalszego rozwoju istniejącej sieci trakcyjnej w inteligentną infrastrukturę zintegrowaną z miejską siecią elektryczną. Sieć napowietrzna jest połączona z siecią średniego napięcia, a energia hamowania może być oddawana. Systemy fotowoltaiczne wzdłuż linii napowietrznej mogą bez strat zasilać bezpośrednio sieć. Akumulatory zainstalowane w stacjach energetycznych mogą magazynować energię elektryczną i dostarczać ją w razie potrzeby. Zintegrowane zostaną punkty ładowania samochodów elektrycznych.



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

Hanower – podstacja prostownikowa z wtórnie wykorzystywanymi akumulatorami

W Hanowerze dwadzieścia systemów wtórnie wykorzystanych akumulatorów autobusowych dostarcza około 500 kWh mocy, łączących się z nową podstacją prostownicową, aby zasilać autobusy elektryczne i tramwaje obsługiwane przez ÜSTRA Hannoversche Verkehrsbetriebe AG. Magazyny energii służą jako bufor umożliwiający wydajne wykorzystanie odzyskanej energii w ruchu tramwajowym, do stabilizacji sieci, w szczególności do kompensacji szczytów obciążenia, a także jako wsparcie w przypadku przerw w dostawie prądu oraz dostarczania energii elektrycznej do publicznej infrastruktury ładowania.



Rysunek 11: [Zrównoważony autobus](#)

Hamburg stawia na elektryczność

W zajezdni Alsterdorf w Hamburgu dwie z sześciu wiat garażowych wyposażono w inteligentną infrastrukturę do ładowania autobusów elektrycznych, składającą się z 96 punktów ładowania i 240 miejsc parkingowych.

Koncepcja ładowania jest modułowa, a zatem możliwa do skalowania, zaś zasilanie elektryczne jest podłączone do sieci energetycznej w Hamburgu za pośrednictwem stacji energetycznej. Standardowe transformatory modułowe (1600 kVA) zasilają do 16 autobusów.

Autobusy będą ładowane nocą, z maksymalną mocą ładowania 150 kW na autobus i średnim czasem ładowania wynoszącym 4-5 godzin, wykorzystując również nadwyżkę wytworzonej energii wiatrowej, co zwiększa integrację źródeł odnawialnych z siecią.



Rysunek 12: Źródło: © INIT I Ulrike Kabel

Madryt – eLobster (H2020)

Projekt eLobster ma na celu poprawę synergii między infrastrukturą lekkiej kolei a sieciami dystrybucji energii elektrycznej, aby zmniejszyć straty energii elektrycznej i zwiększyć stabilność sieci, szczególnie w scenariuszach, w których możliwa jest wysoka integracja energii odnawialnych.

Rozwiązanie opiera się na zintegrowanym systemie zarządzania koleją i siecią, który, poczynawszy od analizy strat energii w czasie rzeczywistym, będzie w stanie zoptymalizować wymianę energii elektrycznej pomiędzy sieciami, zwiększając lokalne zużycie własne OZE.

Miejscem pokazowym dla E-LOBSTER jest metro w Madrycie, ponieważ jego podziemna kolej jest połączona z lokalną siecią dystrybucji energii o wysokiej penetracji OZE.



Zdjęcie dostarczone przez miasto Lipsk

Los Angeles, Stany Zjednoczone – przydrożny system magazynowania energii (ang. Way Side Energy Storage System, WESS)

W ramach projektu WESS zintegrowano system oparty na kole zamachowym VYCON REGEN w stacji energetycznej (ang. Traction Power Substation, TPSS) czerwonej i fioletowej linii, na stacji Westlake/McArthur Park.

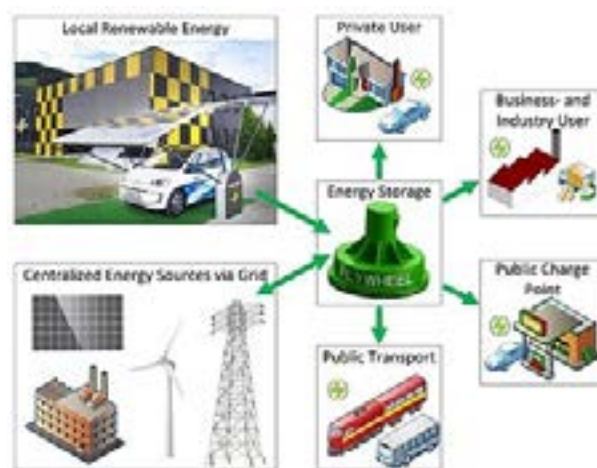
System gromadzi energię hamowania metra na zakrętach lub przy wjeździe na stację pasażerską w pobliżu stacji energetycznej TPSS systemu WESS. A następnie magazynuje tę energię i dostarcza ją kolejnemu pociągowi metra, który jej potrzebuje. W związku z tym obniża szczytowe zapotrzebowanie na moc i zapewnia redukcję energii trakcyjnej o 10-18%. System działa w codziennej pełnej eksploatacji od sierpnia 2014 roku. Roczne oszczędności szacuje się na około 541 MWh, co odpowiada dostawom energii dla 100 przeciętnych domów w Kalifornii.



Rysunek 13: Prawa autorskie © 2022 | Metro – Metropolitalny Urząd Transportu Hrabstwa Los Angeles (ang. Los Angeles County Metropolitan Transportation Authority); [Źródło](#), autorstwa Dave Sotero, 3 października 2014 r.

Projekt badawczy FlyGrid, Austria

Systemy magazynowania energii w kołach zamachowych (FESS) opracowano dla w pełni zautomatyzowanej stacji ładowania pojazdów elektrycznych, aby umożliwić w niskonapięciowej sieci dystrybucyjnej osiągnięcie wysokiej mocy ładowania przy jednoczesnej stabilizacji sieci. System nadaje się do integracji lokalnych źródeł odnawialnych, przyczyniając się do zwiększenia udziału czystej energii w miksie elektroenergetycznym. Dłuższy cykl życia urządzenia magazynującego energię, możliwość oddawania dużej mocy z powrotem do sieci, a także łatwa przenośność w postaci mobilnej „skrzynki do szybkiego ładowania” (dla elektrycznych maszyn budowlanych lub podobnych) to kolejne cechy koncepcji FlyGrid. Jeden moduł tego prototypu zostanie wykorzystany jako przykład odniesienia i dostarczy 5 kWh przy mocy szczytowej 100 kW. (Haidl et al. 2019).



Rysunek 14: [TU Graz](#)

Huai'an, Jiangsu technologia superkondensatorów zapewniająca ładowanie dla transportu publicznego

Zastosowanie superkondensatorów w transporcie publicznym ma miejsce głównie na pokładzie pojazdów.

Na 20-kilometrowej trasie obejmującej 23 przystanki miasto Huai'an wprowadziło najdłużej kursujący tramwaj elektryczny wykorzystujący superkondensatory.

Technologia superkondensatorów o bardzo krótkim czasie ponownego ładowania wynoszącym około 30 sekund i długim okresie eksploatacji, zastępująca 30% pojazdów prywatnych i przewożąca 7 milionów pasażerów w gęstym ruchu drogowym, pozwala zaoszczędzić 4 900 ton emisji CO₂ rocznie.

Warszawa



Rysunek 15: sustainable-bus.com/

Podobne podejście przyjęto w Warszawie, gdzie systemy ultrakondensatorów produkowane w Estonii przez Skeleton Technologies odzyskują energię hamowania i ponownie wykorzystują ją do przyspieszania, znacznie zmniejszając całkowite zużycie energii. Niwelują również szczyty mocy, stabilizując infrastrukturę sieci w Warszawie, a tym samym znacznie zwiększają efektywność energetyczną. Przy 1 milionie cykli ładowania superkondensatory stanowią technicznie ulepszone rozwiązanie w porównaniu z akumulatorami litowo-jonowymi do konkretnych zastosowań.

La Spezia (IT) SmartBUS



Rysunek 16: [zrównoważony autobus](#)

W La Spezii testowano autobusy wyposażone w ultrakondensatory (32 kWh) na 17-kilometrowej linii ze stacją ładowania AC/DC 150 kW na terminalu autobusowym. Czas ładowania SmartBUSu wynosi od 5 do 7 minut. Innowacja polega głównie na zmniejszeniu masy i wielkości autobusu oraz możliwości odzyskania energii hamowania do 40%.

Wspólne przedsięwzięcie firm E-CO, Chariot, Prometeon i Politecnico Milano pokazało, że ultrakondensatory o różnej mocy w modelach SmartBUSów (8, 12 i 18-metrowych), stosowane zamiast akumulatorów, mogą po jednym ładowaniu pozwalać na pokonywanie dystansów wynoszących ponad 40 km.

2. Przykłady zastosowania EfficienCE w zakresie magazynowania energii i integracji energii odnawialnej

W tym rozdziale przedstawiono trzy istotne przykłady zastosowania, zidentyfikowane na podstawie analizy funkcjonalności i technologii oraz przeglądu dobrych praktyk, przeprowadzonego w poprzednich rozdziałach. Przykłady obejmują następujące koncepcje: a) efektywna energetycznie zajezdnia, b) inteligentny węzeł oraz c) infrastruktura liniowa, w której wdrażane są technologie magazynowania energii umożliwiające integrację odnawialnych źródeł energii oraz wsparcie pracy systemu. Trzy przykłady zastosowania przedstawiają typowe wyposażenie, które należy opracować w celu poprawy efektywności energetycznej infrastruktury transportu publicznego.

	Efektywna energetycznie zajezdnia	Inteligentny węzeł	Infrastruktura liniowa
Londyn (UK) Bus2Grid	x		
Londyn (UK) Zajezdnia Walworth	x		
Solingen (DE) System inteligentnych trolejbusów			x
Hanower (DE) Podstacja prostownikowa			x
Hamburg (Niemcy) stawia na elektryczność	x		
Madryt (ES) Projekt eLobster		x	
Los Angeles (US) Metro WESS		x	
Graz (AT) Projekt badawczy FlyGrid		x	
Huai'an, Jiangsu (CN) Superkondensatory dla transportu publicznego			x
Warszawa (PL) Tramwaje z superkondensatorami			x
La Spezia (IT) SmartBUS			x
Maribor (SI)* Wielofunkcyjne wykorzystanie infrastruktury publicznej		x	
Gdynia (PL)* Odzyskana energia hamowania i OZE	x	x	x
Pilzno (CZ)* Stacja przechowywania buforowego w sieci trolejbusowej			x
Wiedeń (AT)* System fotowoltaiczny zintegrowany na stacji metra	x	x	

*EfficienCE – Projekty pilotażowe

Rysunek 17: Projekty pilotażowe, międzynarodowe dobre praktyki i przykłady zastosowania (EfficienCE, 2022)

Plan ramowy jest reprezentowany przez kontekst miasta Bergamo, gdzie wdrożenie SUMP przewiduje renowację ważnego węzła mobilności dla sieci transportowej, budowę nowych linii lekkiej kolei i eBRT oraz rozwój wielofunkcyjnej sieci ładowania dla pojazdów elektrycznych.

Przykład z Bergamo, gdzie plan działania na rzecz lepszej integracji energii odnawialnej i systemów magazynowania z infrastrukturą transportu publicznego jest opracowywany w ramach projektu EfficienCE, stanowi odpowiednie ramy reprezentujące modelowy kontekst dla alokacji obiektów magazynowych do różnych celów i różnych typów infrastruktury.

2.1 Efektywna energetycznie zajezdnia

Przykład zastosowania skupia się na zwiększeniu wydajności energetycznej zajezdni transportu publicznego (odnowionej lub nowo zaprojektowanej) dzięki lepszemu wykorzystaniu źródeł odnawialnych, jeśli są dostępne (w tym hamowania), i bardziej wydajnemu zużyciu. Koncentruje się też na wkładzie w autonomię energetyczną i w sieć (np. udostępnianie energii przez autobusy do sieci).

Planowanie efektywnej energetycznie zajezdni może szeroko angażować różne zainteresowane strony, takie jak władze lokalne, operatorzy transportu publicznego i inni usługodawcy (np. usługi udostępniania samochodów elektrycznych), operatorzy systemów przesyłowych energii (OSP) i operatorzy systemów dystrybucyjnych (OSD), a także obywatele.

Zgodnie z kontekstem przykładu zastosowania, projekt i wdrażanie rozwiązań efektywności energetycznej dla zajezdni opartych na magazynowaniu opierają się głównie na magazynowaniu

w akumulatorach (nowych i wykorzystywanych w ramach drugiego życia), a inwestycje obejmują również systemy fotowoltaiczne oraz inne rozwiązania w zakresie wytwarzania energii odnawialnej, obiekty do ładowania (także V2G), systemy monitorowania itp.

Główne oczekiwane skutki są związane z wyższą efektywnością energetyczną dzięki własnej produkcji i zmniejszeniu strat, lepszą integracją źródeł odnawialnych oraz związanymi z tym korzyściami środowiskowymi i ekonomicznymi.

Wyzwania/bariery

Wdrażanie rozwiązań magazynowych dla efektywnych energetycznie zajezdni może napotkać różne rodzaje wyzwań, a w niektórych przypadkach nawet bariery, które są w szczególności związane z kontekstem regulacyjnym w odniesieniu do V2G i dyspozytorni energii, a także z oceną kosztów i korzyści potrzebnych inwestycji. Ponadto akceptacja społeczna stanowi istotny element, który należy wziąć pod uwagę przy planowaniu nowej infrastruktury w gęsto zaludnionej okolicy i wyzwania związane z przechowywaniem energii i V2G mogą przynieść korzyści, które warto rozważyć.

Referencje:

Londyn (UK) Bus2Grid
Londyn (UK) Zajezdnia Walworth
Hamburg (Niemcy) stawia na elektryczność
Gdynia (PL)* Odzyskana energia hamowania i OZE
Pilzno (CZ)* Stacja przechowywania buforowego w sieci trolejbusowej
Wiedeń (AT)* System fotowoltaiczny zintegrowany na stacji metra

2.2 Infrastruktura liniowa

Ten przykład zastosowania analizuje możliwe wykorzystanie technologii magazynowania w infrastrukturze liniowej, głównie w celu wspomagania i równoważenia sieci, z uwzględnieniem zarówno podejścia stacjonarnego, jak i w ruchu.

Należy rozważyć zastosowania, takie jak akumulatory stacjonarne i w ruchu, a także koła zamachowe i superkondensatory, w celu zbadania zakresu korzyści, jakie mogą powstać dla sieci dzięki zastosowaniu technologii magazynowania oraz ich korzyści i ograniczenia.

Zaangażowanie zainteresowanych stron skupi się w szczególności na stronie technicznej dotyczącej zarówno mobilności (operatorzy transportu publicznego i inni usługodawcy), jak i energii (OSP i OSD).

Główne oczekiwane skutki są związane ze wsparciem dla sieci w celu poprawy wydajności operacyjnej, a tym samym poprawy efektywności środowiskowej i ekonomicznej infrastruktury dzięki ekonomicznie opłacalnym rozwiązaniom. Zakres zastosowania różni się w zależności od rodzaju istniejącej lub planowanej infrastruktury: z tego powodu w odniesieniach znajdują się przykłady trolejbusów, autobusów i tramwajów.

Wyzwania/bariery

Wdrożenie rozwiązań w zakresie magazynowania energii dla infrastruktury liniowej może wiązać się w szczególności z wyzwaniami ekonomicznymi związanymi z niezbędnymi inwestycjami, ale jednocześnie może to stanowić okazję do odroczenia odpowiednich inwestycji w sieć i wypracowanie bardziej elastycznych rozwiązań w celu ustabilizowania sieci. W niektórych przypadkach mogą istnieć określone bariery regulacyjne dla różnych zastosowań technologicznych (np. przepisy bezpieczeństwa dotyczące kół zamachowych).

Referencje:

Solingen (DE) System inteligentnych trolejbusów
Hanower (DE) Podstacja prostownikowa
Huai'an, Jiangsu (CN) Superkondensatory dla transportu publicznego
Warszawa (PL) Tramwaje z superkondensatorami
La Spezia (IT) SmartBUS
Gdynia (PL)* Odzyskana energia hamowania i OZE
Pilzno (CZ)* Stacja przechowywania buforowego w sieci trolejbusowej

2.3 Inteligentny węzeł

Ostatni przykład zastosowania skupia się na projekcie inteligentnego węzła, takiego jak stacja, przystanek lub węzeł multimodalny, w którym można zastosować magazynowanie, aby umożliwić wydajne wykorzystanie źródeł odnawialnych, a także wielofunkcyjne wykorzystanie infrastruktury ładowania. Można rozważyć różne podejścia, od prostej poprawy efektywności energetycznej i wydajności infrastruktury po aktywny wkład pojazdów i przyczynienie się do stabilności sieci.

Zaangażowanie zainteresowanych stron skupi się w szczególności na stronie technicznej dotyczącej zarówno mobilności (operatorzy transportu publicznego i inni usługodawcy), jak i energii (OSP i OSD).

Wybór rozwiązań dla inteligentnych węzłów opartych na magazynowaniu będzie uwzględniał różnorodne opcje technologiczne, w tym akumulatory, koła zamachowe i superkondensatory, a także ocenę ich potencjału zależnie od cech węzłów i systemów.

Główne oczekiwane skutki są związane z integracją źródeł odnawialnych, wsparciem dla sieci i efektywnością energetyczną w celu poprawy wydajności operacyjnej, a tym samym poprawy efektywności środowiskowej i ekonomicznej infrastruktury. Określenie optymalnej skali integracji technologii magazynowania i energii odnawialnej na poziomie węzła, uwzględniając współistnienie i interakcje między różnymi infrastrukturami (liniowymi i węzłowymi), ma kluczowe znaczenie dla zagwarantowania skuteczności i zrównoważonego rozwoju gospodarczego takiego zastosowania.

Wyzwania/bariery

Wdrażanie rozwiązań magazynowania dla inteligentnych węzłów może napotkać w szczególności trudności i bariery techniczne ze względu na złożoność i interakcje między różnymi systemami. W szczególności wdrożenie wielofunkcyjnych systemów ładowania i wymiana energii między różnymi usługami może wymagać dogłębnej analizy modeli regulacyjnych i biznesowych.

Referencje:

Madryt (ES) Projekt eLobster
Los Angeles (US) Metro WESS
Graz (AT) Projekt badawczy FlyGrid
Maribor (SI)* Wielofunkcyjne wykorzystanie infrastruktury publicznej
Gdynia (PL)* Odzyskana energia hamowania i OZE
Wiedeń (AT)* System fotowoltaiczny zintegrowany na stacji metra

3. Wyciągnięte wnioski i doświadczenia

Połączenie efektywnych energetycznie zajezdni, inteligentnych węzłów i infrastruktury liniowej dla transportu publicznego podkreśla potencjał rozwoju innowacyjnych rozwiązań w optymalizacji relacji między mobilnością a siecią energetyczną.

W odniesieniu do efektywnej energetycznie zajezdni, jednym z wniosków wyciągniętych z tej analizy jest to, że skala infrastruktury OZE ma kluczowe znaczenie dla określenia możliwości zastosowania magazynowania energii. Być może warto rozważyć na przykład rolę sieci transportu publicznego jako kolektora różnych źródeł OZE na poziomie sąsiedztwa, aby ponowne wykorzystanie przepływów energii było wydajne i opłacalne ekonomicznie.

Zastosowanie magazynowania energii w infrastrukturze liniowej może być uważane za rezydualne pod względem integracji OZE, ale zapewnia dobre i elastyczne odpowiedzi w przypadku funkcji pomocniczych, np. kontroli napięcia. Ponadto w niektórych przypadkach korzystanie z magazynu może być okazją do odroczenia znaczących inwestycji w sieć.

Główny wniosek wyciągnięty z przykładu zastosowania inteligentnego węzła uzupełnia poprzednie: proces planowania musi uwzględniać złożoność i interakcje między różnymi systemami; a wdrożenie wielofunkcyjnych systemów ładowania i wymiany energii między różnymi usługami może w szczególności wymagać dogłębnej analizy modeli regulacyjnych i biznesowych.

4. Referencje

- 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>

Odniesienia do projektów

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

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

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

DOWIEDZ SIĘ WIĘCEJ NA TEMAT EfficienCE



Odwiedź naszą stronę internetową:
<https://www.interreg-central.eu/efficiency>

Skontaktuj się z nami



+49 341 123 59 10



Kierownicy projektu:

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)



City of Leipzig



Faculty of Civil Engineering,
Transportation Engineering
and Architecture



COMUNE DI BERGAMO

