



**Interreg**  
CENTRAL EUROPE



European Union  
European Regional  
Development Fund

**EfficienCE**



# TRANSNATIONALES HANDBUCH FÜR DEN EINSATZ ENERGIEEFFIZIENTER ÖPNV-INFRASTRUKTUR- TECHNOLOGIEN

(1) Energieeffizienz für Depots

## 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:**

Marcin Wolek (Technische Universität Danzig)

**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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub> 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 Literaturüberblick .....	6
1.2 Auswahlverfahren für Fallstudien .....	7
2. Anwendungsfall .....	8
2.1 DPMB Brno (Brünn).....	8
2.2 DPO Ostrava .....	8
2.3 MPK Wrocław .....	9
2.4 MZA Warszawa.....	9
2.5 PKT Gdynia .....	10
2.6 SZKT Szeged .....	10
2.7 Allgemeine Merkmale der Depots .....	11
3. Analyse der Anwendungsfälle.....	13
3.1 Gebäude.....	14
3.1.1 Isolierung .....	14
3.1.2 Intelligente Verbrauchsmessung .....	14
3.1.3 Kleinere bauliche Verbesserungen .....	15
3.1.4 Andere kleinere Maßnahmen .....	15
3.2 Heizung.....	16
3.3 Erneuerbare Energieträger .....	16
3.4 Beleuchtung .....	18
3.5 Lackiererei.....	19
4. Schlussfolgerungen.....	20
Referenzen .....	21

# Zusammenfassung



Foto: Stadt Leipzig

Obwohl die Energie, die nicht für den Antrieb gebraucht wird, ein geringer Kostenfaktor ist, liefert der umwelt- und geopolitische Druck zur Energiewende Argumente, um nach Verbesserungen in den Depots zu suchen.

Das Depot verbraucht elektrische Energie, aber auch Gas, Öl und Fernwärme. Die Struktur hängt vom jeweiligen Fall ab und die Nutzung richtet sich nach Faktoren wie dem technischen Zustand der Gebäude, der Verfügbarkeit erneuerbarer Energiequellen, der Ausstattung (Lackieranlagen, Beleuchtung) sowie den umgesetzten Verfahren zur Energieeinsparung.

Der Literaturüberblick brachte nur teilweise Antworten zum Thema der Energieeffizienz für Depots. Die Mehrzahl der Beiträge befasste sich mit der Nutzung erneuerbarer Energiequellen. Das Thema der Energie- und Wärmeeffizienz der technischen Anlagen von öffentlichen Verkehrsbetrieben wird in der Literatur kaum behandelt.

Anhand von sechs ausgewählten Fallstudien verschiedener öffentlicher Verkehrsbetriebe aus Mitteleuropa wurde eine gründliche Analyse durchgeführt. Es zeigte sich, dass es eine Vielzahl unterschiedlicher Maßnahmen gibt, die sich auf die Steigerung der Energieeffizienz von Depots konzentrieren. Ihr Ausmaß hängt nicht nur von der Größe des Betreibers, sondern auch von den örtlichen Gegebenheiten und dem nationalen Rechtsrahmen ab.

Da sie sehr spezifische Bereiche der täglichen Nutzung darstellen, wurden diese Maßnahmen in fünf Hauptgruppen zusammengefasst: Gebäude, Heizung, erneuerbare Energiequellen, Beleuchtung und Lackierereien.

Die Optimierung des Energieeinsatzes ist ein wesentlicher Bestandteil der Verbesserung von Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit öffentlicher Verkehrsbetriebe. Dies ist besonders wichtig, wenn die Preise für fossile Brennstoffe und Strom in die Höhe schnellen und so unvorhersehbar sind wie nie zuvor.

# 1. Einleitung

Viele Jahre lang war die Energieeffizienz von Depots für die meisten Betreiber eine zweit- oder dritrangige Anforderung. In den letzten Jahren wurden unter dem Vorzeichen der Elektrifizierung massenhaft moderne Fahrzeuge angeschafft. Heute sind weltweit über eine halbe Million Elektrofahrzeuge im Stadtverkehr im Einsatz, und die Elektrifizierung nimmt weiter zu. Schätzungen zufolge könnten Elektrobusse bis 2040 weltweit mehr als 2/3 des städtischen Fuhrparks ausmachen. Ein paralleler Trend ist die wachsende Bedeutung von Wasserstofffahrzeugen, die 2040 6 % der Fahrzeuge im Stadtverkehr ausmachen könnten<sup>1</sup>. Das Hauptaugenmerk lag auf Energiespeichersystemen in Fahrzeugen. Unter den drei verfügbaren Technologien (Batterie, Superkondensator, Schwungrad)<sup>2</sup> scheint die Batterie die führende Technologie zu sein und lässt damit Superkondensatoren und Schwungräder hinter sich. Die Technologie für In-Motion-Charging (IMC) wird als neue Möglichkeit für den Einsatz von Trolleybussen angesehen, auch aufgrund ihrer technologischen Reife<sup>3</sup>.

Obwohl die Energie, die nicht für den Antrieb gebraucht wird, ein geringer Kostenfaktor ist<sup>4</sup>, liefert der umwelt- und geopolitische Druck zur Energiewende Argumente, um nach Verbesserungen in den Depots zu suchen.

Das Depot verbraucht elektrische Energie, aber auch Gas, Öl und Fernwärme. Die Struktur ist von Fall zu Fall unterschiedlich und die Nutzung hängt von Faktoren wie dem technischen Zustand der Gebäude, der Verfügbarkeit erneuerbarer Energiequellen, der Ausstattung (Lackieranlagen, Beleuchtung) sowie den eingesetzten Verfahren zur Energieeinsparung ab.

## 1.1 Literaturüberblick

Gegenwärtig konzentriert sich der technologische Fortschritt vor allem auf Stromspeicherung in Form verschiedener Generationen von Batterien<sup>5</sup>.

In der Arbeit von M. Bartłomiejczyk wurde das erste PV-System zur Energieversorgung des Trolleybus-Systems in Gdynia (Gdingen, Polen) vorgeschlagen. Die ungleichmäßige Belastung der Fahrstromversorgung, die sich aus der unterschiedlichen Sonneneinstrahlung und dem ungleichmäßigen Empfang der Energie von Trolleybussen (Straßenüberlastung) ergibt, ermöglicht es, mehr als 70 % der Energie zu nutzen, die von der PV-Anlage mit 500 kW erzeugt werden kann. Die Einführung einer zweiseitigen Stromversorgung erhöht die Fähigkeit, Energie einzusetzen. Die optimale Leistung der Solaranlage hängt weitreichend von der lokalen Struktur des Stromnetzes und den Verkehrsbedingungen ab. Für große Unterwerke wird empfohlen, PV-Anlagen mit einer Leistung von 400-500 kW zu entwickeln, für kleinere Anlagen 100 bis 150 kW. Für PV-Anlagen, die an Schwachstellen der Oberleitung angeschlossen werden, wird eine maximale PV-Leistung von 50 kW empfohlen<sup>6</sup>.

In „einem kosteneffizienten Energiemanagementsystem“, das in einem anderen Beitrag analysiert wurde, wurde die durch PV erzeugte Energie mit Unterstützung eines Energiespeichersystems erwogen. Die Haupthindernisse für eine solche Lösung waren die im Vorfeld nötigen hohen Investitionskosten, die besonderen technischen Anforderungen (d. h. die erforderliche große Fläche und die entsprechende Konstruktion) und die Unterbrechung der Energieversorgung, die als das Hauptproblem der PV-Anlage hervorgehoben wurde. Andererseits kann die „effektive Integration und das Energiemanagement von PV und ESS in das Ökosystem der Ladestationen zu einer Abfederung der Auswirkungen von Unterbrechungen führen“<sup>7</sup>, für eine Reduzierung der Spitzenlast im Verteilungsnetz sorgen<sup>8</sup> und die Energiekosten für den Eigentümer des Depots senken<sup>9</sup>.

1 Electric Vehicle Council. Electric Vehicle Outlook 2020. Executive Summary; Electric Vehicle Council: Sydney, Australia, 2020

2 Deliverable D.T2.3.1 State of the art & peer review for energy-efficient PT infrastructure technologies deployment. Energy storage in public transport infrastructure. Redmint, prepared within EfficienCE project, 2022

3 Wolek M. et. al.: Ensuring sustainable development of urban public transport: A case study of the trolleybus system in Gdynia and Sopot (Poland). "Journal of Cleaner Production" 2021 nr 279

4 For instance, the non-traction energy bought in 2017 by one of PT operators in Poland was about 5 percent of the overall bought energy. Still, it was worth more than 1M PLN (ca. 213 thous. EUR as of 12.05.2022)

5 Wolek M., Szmelter-Jarosz A., Koniak M., Golejewska A.: Transformation of Trolleybus Transport in Poland. Does In-Motion Charging (Technology) Matter? "Sustainability" 2020 nr 12

6 Bartłomiejczyk M.: Potential application of solar energy systems for electrified urban transportation systems. "Energies" 2018 nr 11(4)

7 Dai Q., Liu J., Wei Q.: Optimal photovoltaic/battery energy storage/electric vehicle charging station design based on multi-agent particle swarm optimization algorithm. "Sustainability" 2019 nr 11 (7) 1973.

8 W. Khan, F. Ahmad, M.S. Alam, Fast EV charging station integration with grid ensuring optimal and quality power exchange, "Engineering Science and Technology, an International Journal" 2019 nr 22 (1)

9 Zahedmanesh A., Muttaqi K.M., Sutanto D.: A Consecutive Energy Management Approach for a VPP Comprising Commercial Loads and Electric Vehicle Parking Lots Integrated with Solar PV Units and Energy Storage Systems. [In:]: 2019 1st Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), IEEE, 2019

Auf Grundlage der für Shanghai durchgeführten Simulation wurde nachgewiesen, dass das Photovoltaik-Batterie-Energiespeichersystem die kostengünstigste Lösung ist<sup>10</sup>. Andererseits wurde basierend auf einer Fallstudie in Singapur eine Analyse zur Minderung von Änderungen bei Nachfragespitzen an Busendhaltestellen durchgeführt, die mit Schnellladestationen ausgestattet sind, die durch stationäre Energiespeicher unterstützt werden. Die Studie zeigte, dass das Kostensenkungspotenzial mit zunehmendem Elektrifizierungsgrad der Buslinien abnimmt<sup>11</sup>. Eine weitere Studie befasst sich mit der Hybridisierung von Energiespeichersystemen unter Verwendung von Batterien und Superkondensatoren, die in verschiedenen erneuerbaren Energiesystemen, insbesondere PV-Systemen, eingesetzt werden können<sup>12</sup>.

In dem kürzlich veröffentlichten Papier, das auf den im Rahmen des Projekts TROLLEY 2.0 durchgeführten Forschungsarbeiten basiert, wurde ein Missverhältnis zwischen der Energieerzeugung aus erneuerbaren Quellen und den Unterbrechungen im Busfahrplan festgestellt. Dies hat zur Folge, dass ein erheblicher Energieüberschuss das gesamte System aus wirtschaftlicher Sicht unrentabel macht. Eine Studie über PV- und Windenergie wurde anhand einer Fallstudie der Stadt Arnheim (der einzigen Stadt in den Niederlanden, die ein Trolleybus-System betreibt) modelliert. Die beste Empfehlung war, die Erzeugung aus dem gesamten Netz zu aggregieren. Das beste Ergebnis wurde mit einer Hybridlösung (53% PV und 47% Wind) erzielt, die durch die Installation eines Energiespeichersystems unterstützt wurde. Der Grund dafür ist, dass die Windkraftenerzeugung dem jährlichen Trend der Busnachfrage besser folgt<sup>13</sup>.

Der Literaturüberblick brachte nur teilweise Antworten zum Thema der Energieeffizienz für Depots. Die Mehrzahl der Beiträge befasste sich mit der Nutzung erneuerbarer Energiequellen. Das Thema der Energie- und Wärmeeffizienz der technischen Anlagen von öffentlichen Verkehrsbetrieben wird in der Literatur kaum behandelt.

## 1.2 Auswahlverfahren für Fallstudien

Die Fallstudienmethode wurde gewählt, um die im Literaturüberblick festgestellten Forschungslücken zu schließen. Die Auswahl bestimmter Fallstudien erfolgte nach der Größe der Stadt, der Größe des Betreibers, den verschiedenen Verkehrsmitteln und den Fortschritten bei der Nutzung erneuerbarer Energiequellen. Tabelle 1 enthält ausgewählte Fallstudien für die weitere Analyse. Die Studie konzentrierte sich auf mitteleuropäische Verkehrsunternehmen und nicht auf die gesamten öffentlichen Verkehrssysteme. Dies ermöglichte eine präzisere Datenerfassung und weitere Untersuchungen in Form von Einzelgesprächen mit Vertretern der betreffenden Betreiber.

Tabelle 1. Hauptmerkmale der für die Analyse ausgewählten Fallstudien

Betreiber	Land	Busse	Oberleitungsbusse	Straßenbahnen	Angebot [Mio. Fahrzeugkilometer]	PV
DPMB Brno (Brünn)	Tschechische Republik	334	142	340	37,2	N
DPO Ostrava	Tschechische Republik	298	68	239	30,7	N
MPK Wrocław	Polen	328	0	285	22,2	J
MZA Warszawa	Polen	1422	0	0	89	J
PKT Gdynia	Polen	0	100	0	5,3	G
SZKT Szeged	Ungarn	0	61	43	Keine Daten	G

J – Ja, N – Nein, G – Geplant

10 Dai Q., Liu J., Wei Q.: Optimal photovoltaic/battery energy storage/electric vehicle charging station design based on multi-agent particle swarm optimization algorithm. "Sustainability" 2019 nr 11 (7) 1973.

11 Trocker F. et. al.: City-scale assessment of stationary energy storage supporting end-station fast charging for different bus-fleet electrification levels. "Journal of Energy Storage" 2020 nr 32

12 Z. Cabrane, J. Kim, K. Yoo, M. Ouassaid: HESS-based photovoltaic/batteries/supercapacitors: Energy management strategy and DC bus voltage stabilization. "Solar Energy" 2021 nr 216

13 I. Diab, B. Scheurwater, A. Saffirio, G. R. Chandra-Mouli, P. Bauer: Placement and sizing of solar PV and Wind systems in trolleybus grids. "Journal of Cleaner Production" 2022 nr 352



## 2. Anwendungsfall

### 2.1 DPMB Brno (Brünn)

Die Stadt Brno (Brünn) ist alleiniger Eigentümer der DPMB. Die jährlichen Fahrgastzahlen überstiegen 272 Mio. Fahrten im Jahr 2020 und sanken im Vergleich zu 2019 um 25 %<sup>14</sup>. Insgesamt betrug im Jahr 2020 der Elektroantrieb 52 % des öffentlichen Verkehrsangebots in Brno. Die DPMB plant die Entwicklung des Trolleybus-Teilsystems, um die Vorteile des In-Motion-Charging (IMC) besser nutzen zu können<sup>15</sup>.



Abbildung 1: Skoda Solaris Trolleybus im zweistöckigen Trolleybus-Depot in Brno (Foto von Marcin Wolek)

### 2.2 DPO Ostrava

Dopravní Podnik Ostravy a.s. ist der Betreiber des öffentlichen Nahverkehrs in Ostrava (Ostrau) und befindet sich im Besitz der Stadt. Das Angebot der DPO umfasste 30,7 Mio. Fahrzeugkilometer. Insgesamt macht der elektrische Antrieb im Jahr 2020 46 % des öffentlichen Verkehrs in Ostrava aus<sup>16</sup>, dieser Anteil wird sich jedoch aufgrund der erwarteten Einführung von Elektrobussen ab 2022 noch erhöhen. Außerdem ist in Ostrava der Bau einer Wasserstofftankstelle im Depot Hranecnik geplant.



Abbildung 2: Das Trolleybus-System in Ostrava deckt einen Teil der Stadt ab und hat einen Anteil von 10 % am gesamten öffentlichen Verkehrsangebot (Foto: Marcin Wolek)

<sup>14</sup> Výroční Zpráva Dopravní Podnik Města Brna, A. S. 2020. Brno 2021

<sup>15</sup> <https://ceetransport.com/40-sor-trolleybus-kits-to-be-assembled-by-brno-carrier-637/>

<sup>16</sup> Dopravní Podnik Ostrava, Výroční Zpráva 2020. Ostrava 2021



## 2.3 MPK Wrocław



Abbildung 3: Die MPK Wrocław betreibt eine große Straßenbahnflotte (Foto von Marcin Wolek)

Die MPK Wrocław wurde 1995 gegründet und befindet sich vollständig im Besitz der Stadt Wrocław (Breslau, 640.000 Einwohner). Die MPK hat im Jahr 2019 22,2 Millionen Fahrzeugkilometer zurückgelegt. Im Jahr 2022 wurde eine Ausschreibung für die Lieferung von Elektrobussen durchgeführt, und in Folge werden 11 Gelenkbusse Mercedes e-Citaro G geliefert werden. Im Depot in der Obornicka-Straße werden Hybrid-Ladegeräte mit 5 x 60 kW und 6 x 60 kW sowie ein Hochleistungsladegerät (400 kW) an der Schleife installiert.

## 2.4 MZA Warszawa

MZA ist das wichtigste öffentliche Verkehrsunternehmen in Polen und beschäftigt ca. 4500 Mitarbeiter. Die MZA-Fahrzeuge haben im Jahr 2019 rund 89 Millionen Fahrzeugkilometer zurückgelegt und die MZA verfügt über 1422 Fahrzeuge, darunter 160 Elektrobusse. Damit ist Warschau mit einem Anteil von 11 % an der Elektroflotte führend in der Elektromobilität in Polen.



Abbildung 4: MZA Warszawa betreibt die größte Busflotte in Polen (Foto von Marcin Wolek)

## 2.5 PKT Gdynia

PKT Gdynia ist der städtische Trolleybus-Betreiber, der Gdynia und die benachbarte Stadt Sopot bedient. Im Jahr 2020 haben die Trolleybusse ca. 5,3 Mio. Fahrzeugkilometer zurückgelegt und die Flotte bestand aus fast 100 Fahrzeugen. In jüngster Zeit wurden zwei Dieselbuslinien durch Trolleybusse ersetzt, die in der Bewegung aufgeladen werden. Außerdem erweitert der Betreiber das Modell des In-Motion-Charging (IMC) ständig auf weitere Linien. Im Jahr 2019 wurden fast 10 % der Trolleybus-Fahrzeugkilometer ohne Oberleitung gefahren<sup>17</sup>. Dieser Trend ist sehr vielversprechend, da die Ölpreise hoch und unbeständig sind.



Abbildung 5: Ein Trolleybus der PKT Gdynia beim In-Motion-Charging (IMC) in Gdynia (Foto von Marcin Wolek)

## 2.6 SZKT Szeged



Abbildung 6: Ein umgebauter Trolleybus der SZKT in Szeged [Foto von SZKT Szeged]

Die Trolleybusse und Straßenbahnen werden von der Szegedi Közlekedési Kft. (SZKT) betrieben, die sich zu 100 Prozent im Besitz der Stadtverwaltung von Szeged befindet. Sie ist eine von vier ungarischen Städten mit Straßenbahnen und eine von nur drei, die Trolleybusse betreiben. Die Planung des öffentlichen Verkehrs in Szeged zielt darauf ab, die bestehende elektrische Verkehrsinfrastruktur weiter auszubauen, um möglichst viele Bereiche des öffentlichen Nahverkehrs abzudecken. Die derzeitigen Dieselbusse sollen in Zukunft ersetzt werden. Die Oberleitungsinfrastruktur in Szeged besteht seit 1979 und wurde seither kontinuierlich ausgebaut.

<sup>17</sup> Wolek M. et. al.: Ensuring sustainable development of urban public transport: A case study of the trolleybus system in Gdynia and Sopot (Poland). "Journal of Cleaner Production" 2021 nr 279





Foto: Stadt Leipzig

## 2.7 Allgemeine Merkmale der Depots

Die allgemeinen Merkmale der Depots von öffentlichen Verkehrsmitteln sind wie folgt:

- das Depotgebäude ist in der Regel groß, mit hohen Toren, die oft geöffnet werden;

- die Depots verfügen über unterschiedliche technische Ausstattungen und zusätzliche Einrichtungen (d. h. eine Lackieranlage);

- im Inneren des Gebäudes muss eine große Fläche beheizt werden und es wird viel Licht benötigt;

- die Depots arbeiten praktisch rund um die Uhr und stellen besondere Anforderungen an den Komfort und die Sicherheit der Mitarbeiter;

- die Heizsysteme variieren von Depot zu Depot;

- das Stromversorgungssystem muss aus den oben genannten Gründen leicht zu warten sein.

Die Struktur des Gesamtenergieverbrauchs der PKT Gdynia (Polen) zeigt, dass das Depot ca. 9,3 % der vom Betreiber insgesamt verbrauchten Energie (Strom, Kraftstoffe und Heizung) verbraucht. Die Lackiererei selbst hat einen geringen Anteil am Gesamtenergieverbrauch (Abb. 7).

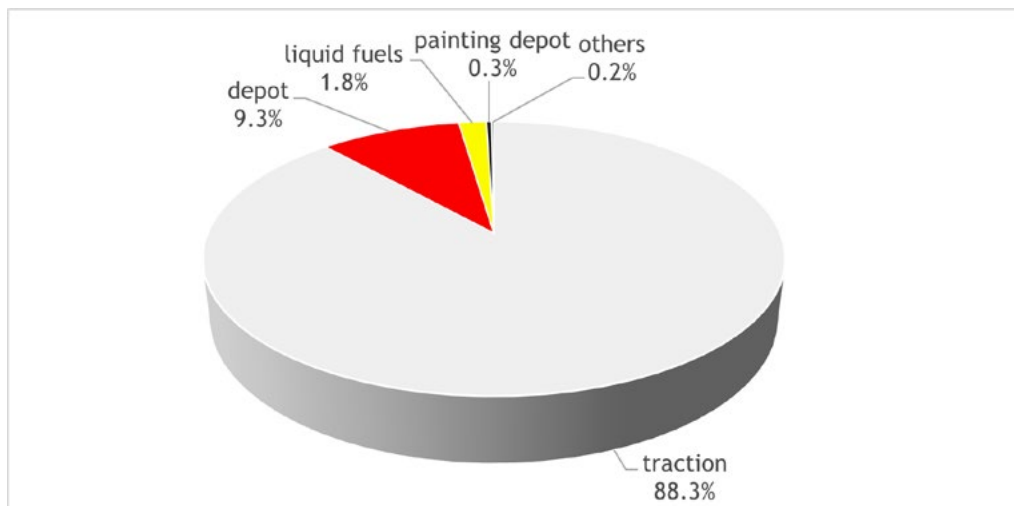


Abbildung 7: Gesamtenergieverbrauch von PKT Gdynia im Jahr 2020

Quelle: auf Grundlage des Energieaudits für die PKT Gdynia



### 3. Analyse der Anwendungsfälle

Eine gründliche Analyse der ausgewählten Anwendungsfälle, unterstützt durch die mit den relevanten Akteuren durchgeführten Interviews, ermöglichte die Auswahl der häufigsten Maßnahmen, die zu einer gesteigerten Energieeffizienz führen. Grundsätzlich konnten alle ermittelten Maßnahmen in mehrere allgemeine Gruppen eingeteilt werden (Abb. 8). Die Ladeinfrastruktur für Fahrzeuge, die sich in bestimmten Depots befinden, wurde von der Analyse ausgeschlossen.

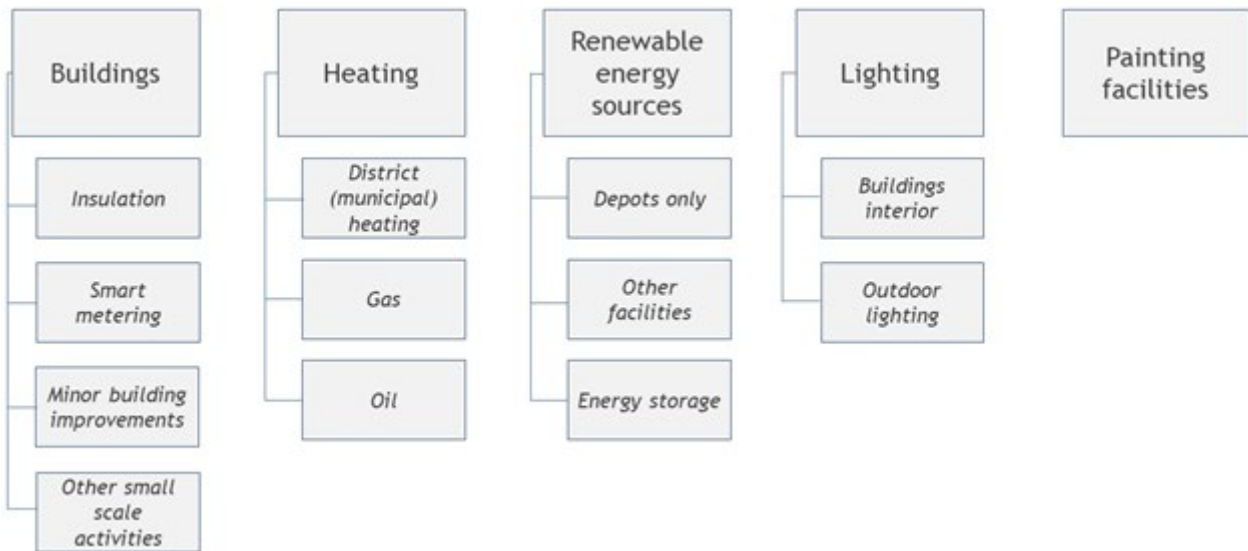


Abbildung 8: Bündelung der Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz in den Depots des öffentlichen Verkehrs



Foto: Rupprecht Consult

## 3.1 Gebäude

### 3.1.1 Isolierung

Viele Depotgebäude wurden im letzten Jahrhundert gebaut, einige stammen sogar aus dem frühen 20. Jahrhundert. Daher gibt es eine Vielzahl von technischen Bedingungen, die jeden Fall spezifisch und unterschiedlich machen. Die komplexe Isolierung von Gebäuden ist eine recht häufige Aktion, die durch kleinere Maßnahmen unterstützt wird. In Ostrava (Tschechische Republik) beispielsweise basierte das Projekt zur Modernisierung des Trolleybus-Depotgebäudes auf der Empfehlung, Arbeiten für Dämmung, die Dachkonstruktion, den Austausch der Oberlichter und der Erneuerung des Beleuchtungssystems im Innenbereich durchzuführen. Die Umsetzung der oben genannten Maßnahmen würde im Vergleich zum Ausgangszustand ca. 37 % Heizenergie einsparen.

### 3.1.2 Intelligente Verbrauchsmessung

Alle Einrichtungen, die der DPO Ostrava zur Verfügung stehen, haben einen Zähler für den Verbrauch aller Versorgungsleistungen (Strom, Wärme, Wasser). Die Software des tschechischen Unternehmens AYISIS ermöglicht die Echtzeitüberwachung aller Versorgungseinrichtungen an einem bestimmten Standort. Dazu gehört zum Beispiel die Erstellung von stündlichen Stromverbrauchsprofilen. Es ermöglicht unter anderem die Steuerung der Temperatur im Inneren der Gebäude unter Berücksichtigung der aktuellen Wetterbedingungen (die Daten werden von der Wetterstation des Unternehmens bezogen).

Im Depotgebäude von PKT Gdynia wurde ein BMS (Building Management System) installiert. Das Unternehmen ermittelte, welche Versorgungsleistungen in der ersten Phase von dem System erfasst werden sollten. Bei PKT wurde der Wärmeenergie Vorrang eingeräumt und die Schaltanlagen und 13 Heizungen sowie die Verkabelung und das Steuersystem wurden ersetzt. Die Heizungen sind mit Temperatursensoren in jeder der drei Depotzonen (Inspektion, Reinigung, Wartung) verbunden.

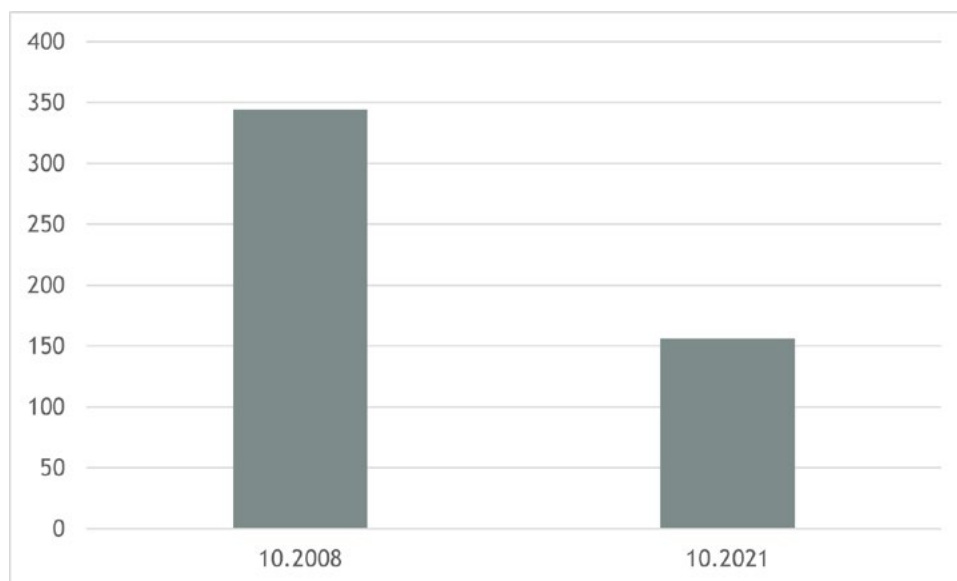


Abbildung 9: Wärmeverbrauch des Trolleybus-Depots der PKT Gdynia im Oktober 2008 und Oktober 2021 [GJ]

*Quelle: auf der Grundlage der von der PKT Gdynia sp. z o. o. bereitgestellten Daten.*

Nach der Installation des BMS betrug der Unterschied im Wärmeverbrauch während der Wintermonate etwa 200 GJ, was einer Einsparung von etwa 12.000 PLN entspricht. Der Wärmeverbrauch belief sich im Oktober 2008 auf 344 GJ und ging im Oktober 2021 deutlich auf 156 GJ zurück (Abb. 9). Das System wird durch die externe Temperaturüberwachung unterstützt.

Dadurch konnte auch der bestellte Strom reduziert werden, was zu Einsparungen von rund 18.000 PLN (3840 EUR) pro Jahr führte.



### 3.1.3 Kleinere bauliche Verbesserungen

Das Depotgebäude von PKT Gdynia (Polen) wurde mit Oberlichtern und Fenstern für die Oberleitung ausgestattet, was eine Standardlösung für Straßenbahn- und Trolleybus-Depots ist. Im Depot gibt es eine Steuerung der Wärmezentrale, um die Wärmeenergie des Gebäudes optimal zu nutzen. Durch den Austausch der Dämmschichten auf dem Dach konnte die Wärmedämmung des Daches sofort verbessert werden.



Abbildung 10: Trolleybus-Depot von PKT Gdynia (Foto von Marcin Wolek)

Bei der Erneuerung der Oberlichter im Depot der PKT Gdynia wurde deren Fläche vergrößert. Sie nehmen nun ein Drittel der Dachfläche ein (Abb. 11). Die neuen Oberlichter haben auch eine höhere Feuerbeständigkeit und höhere Wärmedämmungsparameter.



Abbildung 11: Erneuerung der Dachoberlichter im Depot von PKT Gdynia (Foto von Marcin Wolek)

### 3.1.4 Andere kleinere Maßnahmen

In den Hallen für den täglichen Betrieb sollte aufgrund der besonderen Betriebsbedingungen (u. a. häufiges Öffnen von großflächigen Türen) die Installation von Luftmischvorrichtungen (Entstaubern) in Betracht gezogen werden. An kalten Tagen steigt die erwärmte Luft nach oben und sammelt sich unter dem Dach, so dass die vom Arbeiter am Boden wahrgenommene Temperatur niedriger ist. Um die Lufttemperatur in diesen Räumen gleichmäßig zu verteilen, werden Luftmischvorrichtungen eingesetzt, deren Hauptaufgabe darin besteht, die Lufttemperatur unter dem Dach und am Boden des Gebäudes ausgeglichen zu halten. Auf diese Weise können die Heizkosten gesenkt werden. Eine solche Lösung wurde in einem der Depots von MZA Warszawa (Polen) erfolgreich umgesetzt.

Die Wärmedämmung von Armaturen und Flanschverbindungen zur Verringerung von Wärmeverlusten kann ebenfalls eine kostengünstige Maßnahme mit kurzer Amortisationszeit sein. Im Falle des MPK Wrocław belaufen sich die geschätzten Kosten für diese Maßnahme auf ca. 1.300 PLN, bei einer jährlichen Einsparung von 4.841 kWh. Dies ergibt eine Amortisierung in weniger als zwei Jahren.

DPMB Brno (Tschechien) hat die internationale Energiemanagementnorm ISO 50001 eingeführt. Die Normbestimmungen sollen die Energieeffizienz von Unternehmen unabhängig von deren Größe, Branche oder Mitarbeiterzahl verbessern. Die DPMB muss bei der Umsetzung dieser Norm kein Energieaudit durchführen. Zu den weiteren Vorteilen gehören u. a. die Ermittlung und das Management von Risiken im Zusammenhang mit der künftigen Energieversorgung, die Messung und Überwachung des Energieverbrauchs zur Ermittlung von Bereichen, in denen Effizienzsteigerungen möglich sind, und der Nachweis des Umweltschutzes zur Erfüllung von Ausschreibungsanforderungen.

### 3.2 Heizung

Drei Depots der MZA Warschau sind an die Fernwärme (Veolia) angeschlossen. Ein Depot wird mit Gas betrieben. MZA verfügt über eine neue, vor einigen Jahren fertiggestellte Lackiererei, die mit einem doppelten Belüftungssystem und einer Staubabsaugung ausgestattet ist. Beide Lackieranlagen sind in das Energiesystem des Depots integriert.

Alle Depots von MPK Wrocław sind an Fernwärme angeschlossen. Die Installation von Wärmepumpen war nicht vorgesehen, da die Gebäude zu unterschiedlichen Zeiten gebaut wurden und es keinen Grund gibt, sie für eine mögliche Installation von Wärmepumpen umzubauen.

Im Falle von SZKT bieten die Gebäude des Unternehmens ein eher gemischtes Bild. Es gibt 100 Jahre alte Gebäude, die kaum instandgehalten werden und nicht mehr den aktuellen Standards entsprechen, aber auch moderne Neubauten, die den neuesten architektonischen und energetischen Anforderungen entsprechen. Die meisten Gebäude sind für den jeweiligen Zweck konzipiert, d. h. große Hallen, kleine kompakte Bahnhofsgebäude und Servicegebäude, beheizte und unbeheizte Gebäude sowie klimatisierte Gebäude.

Daher sind auch die Gebäudeheizungen sehr unterschiedlich. Die meisten Werkshallen sind mit Strahlungsheizungen oder Thermoventilatoren ausgestattet. In den größeren Gebäuden wird eine Warmwasser-Zentralheizung eingesetzt, teilweise mit Brennwertkesseln. In den älteren und auffälligeren kleinen Gebäuden wird mit einzelnen Gaskonvektoren geheizt, aber es gibt auch Räume mit Elektroheizungen. Die Warmwasserversorgung ist in den Straßenbahn- und Trolleybus-Depots zentralisiert und verfügt über eine ausreichende Speicherkapazität, während in den anderen Gebäuden überwiegend elektrische Durchlauferhitzer eingesetzt werden<sup>18</sup>.

### 3.3 Erneuerbare Energieträger

Warszawa (Warschau) war der erste Ort in Polen, an dem Busse in großem Rahmen mit Photovoltaikanlagen auf den Dächern ausgestattet wurden. Sie ermöglichen es, die Energiebilanz von Fahrzeugen zu verbessern und bis zu fünf Prozent Kraftstoff zu sparen. Außerdem konnte durch die Installation einer Solaranlage auf dem Dach des „Woronicza“-Depots der Bedarf für den normalen Betrieb der Anlage gedeckt werden. Die Energieeffizienz wird auch dadurch erhöht, dass mehrere hundert Lampenmasten auf den Depots durch energiesparende LEDs ersetzt werden.

Auf der Halle für tägliche Wartung der MZA Warszawa in der Włociańska-Straße 52 wurden Photovoltaikmodule mit einer Leistung von ca. 65 kW installiert. Dazu mussten mehrere Verpflichtungen erfüllt werden. Nach der Einführung von Elektrobussen ist der Stromverbrauch so stark gestiegen, dass de facto keine Energie mehr nach außen verkauft wird. Eine weitere PV-Anlage befindet sich am Depot in der Woronicza-Straße (74 kW).

Auf zwei Bus-Depots (Straßenbahn-Depot in der Powstańców-Śląskich-Straße und Bus-Depot in der Obornicka-Straße), die MPK Wrocław gehören, wurden in den letzten Jahren Photovoltaikanlagen mit einer Leistung von jeweils ca. 50 kW installiert. Dadurch wird eine der Hallen, in der unter anderem Busse gewaschen und repariert werden, weitgehend autark sein. Die Solaranlage auf dem Dach wird die Hälfte des Bedarfs der Halle decken, wodurch jährlich 30.000 PLN eingespart werden können. Die Investitionskosten betrugen 212.000 PLN netto (45.211 Euro). MPK schätzt, dass sich das Geld innerhalb von 8 Jahren energetisch amortisieren wird.

---

<sup>18</sup> Energy audit for the SZKT, Szeged 2019

Der weitere Ausbau der Photovoltaik ist auf allen Dächern der Gebäude von MPK Wrocław sp. z o.o. geplant. Derzeit wird eine weitere Photovoltaikanlage mit 50 kW im Depot in der Obornicka-Straße errichtet (Abb. 12).

Da das MPK Wrocław über keine überdachten Parkplätze verfügt, ist die Photovoltaikenergie aus den Anlagen auf dem Gelände des Betreibers für Antriebszwecke nicht von Bedeutung.

Eine längere Amortisationszeit ergaben die Berechnungen für eine Photovoltaikanlage für eines der Depots von SZKT Szeged (Ungarn) mit einer geplanten Leistung von 150 kW. Die jährliche Stromerzeugung wurde auf 174.000 kWh geschätzt. Ohne externe Kofinanzierung betrug die Amortisationszeit 12,7 Jahre, bei einer 30-prozentigen Kofinanzierung der Investitionskosten waren es knapp 9 Jahre. Durch den Anstieg der Energiepreise aufgrund von Krieg und Instabilität wird die erwartete Amortisation verkürzt.



Abbildung 12: Die PV-Anlage auf dem Dach des Straßenbahn-Depots von MPK Wrocław  
(Foto: Marcin Wolek)

Auf einem der Trolleybus-Depots im Zentrum von Brno gibt es einen PV-Park, aber der Pächter (d. h. die Stadt) erhebt nur eine Gebühr für die Nutzung der Infrastruktur für den Park.

PKT Gdynia (Polen) plant die Errichtung einer Photovoltaikanlage (ca. 500 kW) auf dem Dach seines Depots (ca. 5000 m<sup>2</sup>), die bis zu 5 % des Energieverbrauchs der Trolleybusse decken soll. Käme ein Energiespeichersystem hinzu, würde dies den Anteil erhöhen. Durch die Verwendung von monokristallinen Photovoltaikmodulen mit hohem Wirkungsgrad wurde die maximale Leistung der Anlage auf 499,8 kWp geschätzt. Basierend auf detaillierten Daten einer Photovoltaikanlage mit ähnlichen Parametern hat PKT Sp. z o.o. Berechnungen zum Solarstromertrag durchgeführt. Der geschätzte Jahresertrag betrug: 431.391 kWh/Jahr<sup>19</sup>.

<sup>19</sup> Energy audit of the PKT Gdynia, PKT Gdynia September 2021



Geht man davon aus, dass die Photovoltaikanlage an das Umspannwerk Grabówek angeschlossen wird, kann sie den jährlichen Energiebedarf zu mehr als 22,5 % decken, wobei es allerdings sehr starke monatliche Schwankungen geben wird (Abb. 13). Die durchschnittliche jährliche Primärenergieeinsparung wird 431,39 MWh betragen, d.h. 37,09 t RÖE/Jahr. Es wäre also möglich, den gesamten Stromverbrauch des Depots (406,7 MWh) zu decken. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, Module auf anderen Anlagen von PKT Gdynia zu installieren, was zu einer zusätzlichen Produktion von 99,5 MWh führen könnte<sup>20</sup>.

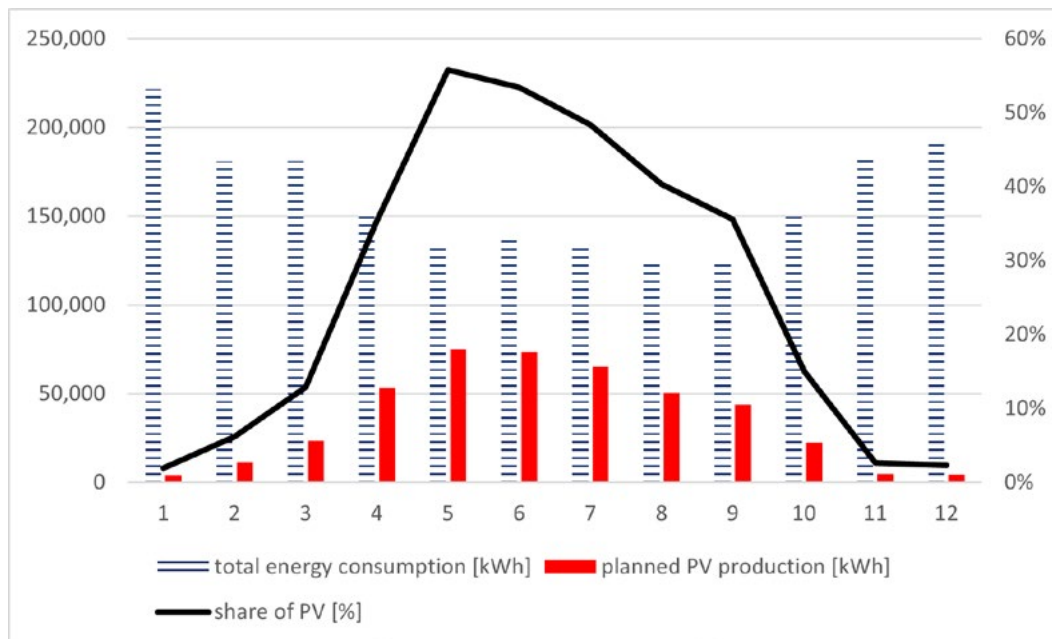


Abbildung 13: Monatlicher Energieverbrauch und geplante Energie aus der PV für das Umspannwerk von Grabówek, PKT Gdynia (Polen)

Quelle: basierend auf dem Energieaudit des PKT Gdynia, September 2021

### 3.4 Beleuchtung

Die modernen LED-Lampen benötigen nicht nur weniger Energie, ihre geschätzte Lebensdauer ist auch viel länger als die einer Glühlampe oder sogar einer Leuchtstofflampe (Abb. 14).

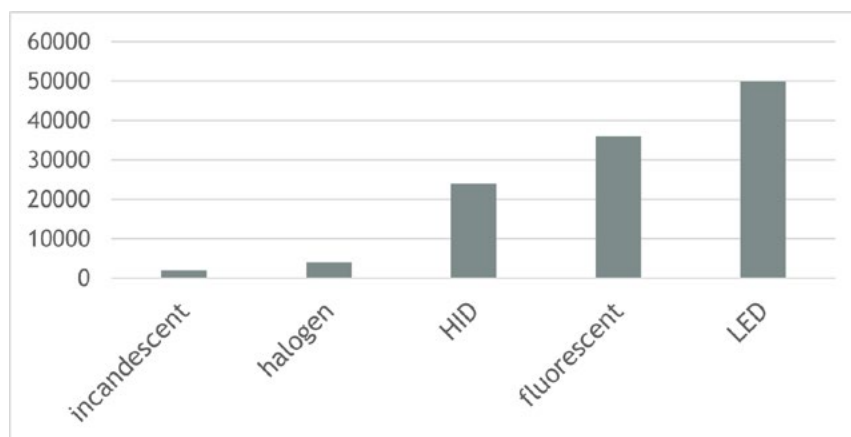


Abbildung 14: Typische durchschnittliche Lebensdauer für verschiedene Glühlampentypen [Stunden]

<sup>20</sup> Energy audit of the PKT Gdynia, PKT Gdynia September 2021

Ein umfassender Austausch von Leuchten bringt eine schnelle Amortisierung der Investition. Sie können separat oder als Teil eines Gebäudesanierungs- und Dämmungsprojekts durchgeführt werden.



Abbildung 15: Beleuchtung des Platzes vor der Halle in MPK Wrocław sp. o. o.

Die Kosten für die Modernisierung der Beleuchtung beliefen sich auf 314.000 PLN. Die jährlichen Strom-einsparungen beliefen sich auf 258.939 kWh, was zu Einsparungen von 112.000 PLN und einer Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 186 Tonnen führte. In diesem Fall wird die Amortisierung nach weniger als 3 Jahren erreicht<sup>21</sup>. Die Modernisierung der Beleuchtung wurde auch im Außenbereich umgesetzt (Abb. 15).

Das Energieaudit des SZKT Szeged (Ungarn) enthält ähnliche Schlussfolgerungen. Mit der Investition für den Austausch der Beleuchtung durch LED (5,12 Mio. HUF = 13.600 EUR) beträgt die Amortisationszeit weniger als 3 Jahre<sup>22</sup>.

### 3.5 Lackiererei

In der Lackiererei von PKT Gdynia sp. z o.o. wird Heizöl verwendet, da vorübergehend eine hohe Wärme-energie benötigt wird. Wegen der hohen Kosten für den beim Wärmeversorger bestellten Strom wurde die Fernwärme zugunsten von Flüssigkraftstoff aufgegeben. Der Jahresverbrauch des Kraftstoffs beträgt ca. 3.440 Liter Öl<sup>23</sup>.

MZA Warszawa verfügt über eine neue Lackiererei, die vor einigen Jahren fertig gestellt wurde und mit einem doppelten Belüftungssystem und einer Staubabsaugung ausgestattet ist. Beide Lackieranlagen sind in das Energiesystem des Depots integriert.

21 Energy Audit for the MPK Wrocław sp. z o.o. Attachement 2: Buildings. Audytel, Wrocław 2021, p. 89 and next

22 Energy audit for the SZKT, Szeged 2019

23 Energy audit of the PKT Gdynia, PKT Gdynia September 2021

## 4. Schlussfolgerungen

Obwohl der meiste Strom für den Antrieb verwendet wird, verbrauchen die Depots auch Strom und Wärmeenergie. Die Optimierung des Energieverbrauchs im Depot ist ein wesentlicher Faktor für die Verbesserung der Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit der öffentlichen Verkehrsbetriebe.

Die Depots der öffentlichen Verkehrsbetriebe können sehr unterschiedlich sein. Sie unterscheiden sich durch das Baujahr, die eingesetzten Verkehrsmittel und den Umfang der Modernisierung und Ausstattung. All dies wirkt sich auf den Energieverbrauch und andere Versorgungsleistungen (z. B. Wasser) aus.

Die Übersicht von ausgewählten Beispielen zeigt gewisse Regelmäßigkeiten bei der Suche der Betreiber nach Möglichkeiten zur Verbesserung der Energieeffizienz von Anlagen.

Zu den grundlegenden Investitionsmaßnahmen gehört häufig die Modernisierung von Gebäuden zur Verbesserung ihrer thermischen Parameter. Solche Maßnahmen werden häufig durch die Messung der Gebäudkosten begleitet. Sie kann vollständig sein und alle Versorgungsleistungen (Energie, Wärme und Wasser) umfassen oder schrittweise eingeführt werden und auf die Versorgungsleistungen mit den höchsten Kosten abzielen. Der Umfang der technischen Modernisierung des Gebäudes kann auch Maßnahmen umfassen, die nur geringe Auswirkungen haben, aber den Arbeitskomfort in der Fahrzeughalle verbessern und gleichzeitig die Brandsicherheit erhöhen (z. B. Austausch und Vergrößerung der Dachoberlichter).

Eine gute Möglichkeit ist die Installation von PV-Anlagen auf den Dächern von Depots. Der so erzeugte Strom wird in der Regel für den Eigenbedarf des Depots genutzt. Die Installation von Stromspeichern sollte mit der Installation von Photovoltaikanlagen einhergehen.

Als Teil eines größeren Ganzen spielen kostengünstige Maßnahmen eine wesentliche Rolle. Die Investition in die Umrüstung der Beleuchtung hat eine kurze Amortisationszeit, auch wenn sie nicht zu erheblichen Einsparungen für das gesamte Unternehmen führt. Sie kann schrittweise umgesetzt werden, auch ohne wesentliche Investitionsmittel.



## Referenzen

- Arif S. M., Lie T. T., Seet B. Ch., Ayyadi S.: A novel and cost-efficient energy management system for plug-in electric bus charging depot owners. "Electric Power Systems Research" 2021 nr 199
- Bartłomiejczyk M.: Potential application of solar energy systems for electrified urban transportation systems. "Energies" 2018 nr 11(4)
- Bartłomiejczyk M., Połom M.: Multiaspect measurement analysis of breaking energy recovery. "Energy Conversion Management" 2016 nr 127
- Cabrane Z., Kim J., Yoo K., Ouassaid M.: HESS-based photovoltaic/batteries/supercapacitors: Energy management strategy and DC bus voltage stabilization. "Solar Energy" 2021 nr 216
- Deliverable D.T2.3.1 State of the art & peer review for energy-efficient PT infrastructure technologies deployment. Energy storage in public transport infrastructure. Redmint, prepared within EfficienCE project, 2022
- Dai Q., Liu J., Wei Q.: Optimal photovoltaic/battery energy storage/electric vehicle charging station design based on multi-agent particle swarm optimization algorithm. "Sustainability" 2019 nr 11 (7) 1973.
- Diab I., Scheurwater B., Saffirio A., Chandra-Mouli G. R., Bauer P.: Placement and sizing of solar PV and Wind systems in trolleybus grids. "Journal of Cleaner Production" 2022 nr 352
- Electric Vehicle Council. Electric Vehicle Outlook 2020. Executive Summary; Electric Vehicle Council: Sydney, Australia, 2020
- Energy Audit for the MPK Wrocław sp. z o.o. Attachment 2: Buildings. Audytel, Wrocław 2021
- Energy audit of the PKT Gdynia, PKT Gdynia September 2021
- Energy audit for the SZKT, Szeged 2019
- Gao Z. et. al.: Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service. "Energy" 2017 nr 122
- Hamacek S., Bartłomiejczyk M., Hrbac R., Misak S., Stýskala V.: Energy recovery effectiveness in trolleybus transport. "Electric Power Systems Research" 2014 nr 112
- Khan W., Ahmad F., Alam M.S.: Fast EV charging station integration with grid ensuring optimal and quality power exchange, "Engineering Science and Technology, an International Journal" 2019 nr 22 (1)
- Kratz S. et. al.: Expansion of a Trolleybus Infrastructure towards a 100% Renewable Energy Usage. 2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference
- Munoz P. et. al.: Comparative analysis of cost, emissions and fuel consumption of diesel, natural gas, electric and hydrogen urban buses. "Energy Conversion and Management" 2022 nr 257
- Rogge M., van der Hurk E., Larsen A., Sauer D. U.: Electric bus fleet size and mix problem with optimization of charging infrastructure. "Applied Energy" 2018 nr 211
- Trocker F. et. al.: City-scale assessment of stationary energy storage supporting end-station fast charging for different bus-fleet electrification levels. "Journal of Energy Storage" 2020 nr 32
- Výroční Zpráva 2020. Dopravní Podnik Města Brna, Brno 2021
- Výroční Zpráva 2020. Dopravní Podnik Ostrava, Ostrava 2021
- Wołek M. et. al.: Ensuring sustainable development of urban public transport: A case study of the trolleybus system in Gdynia and Sopot (Poland). "Journal of Cleaner Production" 2021 nr 279
- Wołek M. et. al.: Ensuring sustainable development of urban public transport: A case study of the trolleybus system in Gdynia and Sopot (Poland). "Journal of Cleaner Production" 2021 nr 279
- Wołek M., Szmelter-Jarosz A., Koniak M., Golejewska A.: Transformation of Trolleybus Transport in Poland. Does In-Motion Charging (Technology) Matter? "Sustainability" 2020 nr 12

Zahedmanesh A., Muttaqi K.M., Sutanto D.: A Consecutive Energy Management Approach for a VPP Comprising Commercial Loads and Electric Vehicle Parking Lots Integrated with Solar PV Units and Energy Storage Systems. [In:]: 2019 1st Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), IEEE, 2019

Internet-Links:

<https://ceetransport.com/40-sor-trolleybus-kits-to-be-assembled-by-brno-carrier-637/>

<https://www.smartcitiesworld.net/news/news/czech-city-of-ostrava-expands-electric-bus-fleet-6345>

[https://www.bsigroup.com/pl-PL/ISO-50001-Zarzadzanie-](https://www.bsigroup.com/pl-PL/ISO-50001-Zarzadzanie-Energia/?creative=406745263368&keyword=iso%2050001&matchtype=e&network=g&device=c&gclid=EAlaIQobChMIw8HZw7Ti9wIVAtiyCh1TEA4-CEAAYASAAEgJ1SPD_BwE)

[Energia/?creative=406745263368&keyword=iso%20](https://www.bsigroup.com/pl-PL/ISO-50001-Zarzadzanie-Energia/?creative=406745263368&keyword=iso%2050001&matchtype=e&network=g&device=c&gclid=EAlaIQobChMIw8HZw7Ti9wIVAtiyCh1TEA4-CEAAYASAAEgJ1SPD_BwE)

[50001&matchtype=e&network=g&device=c&gclid=EAlaIQobChMIw8HZw7Ti9wIVAtiyCh1TEA4-CEAAYASAAEgJ1SPD\\_BwE](https://www.bsigroup.com/pl-PL/ISO-50001-Zarzadzanie-Energia/?creative=406745263368&keyword=iso%2050001&matchtype=e&network=g&device=c&gclid=EAlaIQobChMIw8HZw7Ti9wIVAtiyCh1TEA4-CEAAYASAAEgJ1SPD_BwE)



# 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](mailto:sebastian.graetz2@leipzig.de)

Marlene Damerau  
[m.damerau@rupprecht-consult.eu](mailto:m.damerau@rupprecht-consult.eu)



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



[www.facebook.com/Interreg.EfficienCE/](https://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

