

Optimierung der Technologie-Auswahl für ein elektrisches Linienbusnetz

Nathalie Frieß (*), Ulrich Pferschy

Institut für Operations und Information Systems, Karl-Franzens-Universität Graz,
Universitätsstraße 15/E3, 8010 Graz, <https://operations.uni-graz.at/>,
Tel.: +43 316 380 – 3401, nathalie.friess@uni-graz.at,
Tel.: +43 316 380 – 3496, ulrich.pferschy@uni-graz.at

Kurzfassung: Der folgende Beitrag ist Teil des Projekts move2zero, das auf die Entwicklung eines ganzheitlichen Konzepts für ein vollständig dekarbonisiertes städtisches Busverkehrssystem in Graz abzielt. Nachdem die Europäische Strategie für emissionsarme Mobilität eine schrittweise Einführung von emissionsfreien Technologien für Stadtbusse vorsieht [1], setzt sich move2zero die Einführung einer vollelektrischen Busflotte bis 2030 zum Ziel. Die Energieversorgung soll dabei ausschließlich auf erneuerbaren Energieträgern beruhen. Darüber hinaus werden Komponenten mit niedrigen Emissionsfaktoren und hoher Wiederverwendungs- und Recyclingfähigkeit in Fahrzeugen und Infrastruktur gefördert. Nachdem die Auslegung eines solchen elektrifizierten Linienbusnetzes die Frage nach der optimalen Technologie-Entscheidung aufwirft und verschiedene technologische Lösungen zur Auswahl stehen, soll mithilfe eines Optimierungsmodells eine optimale Kombination an Technologien für die Fahrzeugflotte ermittelt werden, welche die gesamten Lebenszykluskosten des Systems über einen Zeitraum von 20 Jahren minimiert. Die Ergebnisse des Modells liefern eine wichtige Entscheidungsgrundlage für die Umstellung des städtischen Linienbusnetzes.

Keywords: öffentlicher Verkehr, elektrische Busse, Technologie-Auswahl, Overnight Charging, Opportunity Charging, Integer Linear Program

1 Einleitung

Der Einsatz von Elektrobussen in Linienbusnetzen hat in den vergangenen Jahren erhöhte Aufmerksamkeit erfahren. Die hohe Laufleistung der Fahrzeuge, die vorgegebene Streckenführung mit vielen Start- und Stopvorgängen und minütlich geplante An- und Abfahrtszeiten in Form von Fahrplänen, die die Fahrzeugnutzung vorhersehbar machen, machen Linienbusnetze zu einem besonderen Anwendungsfall, der gut für die Umstellung auf elektrische Antriebe geeignet ist. In den vergangenen Jahren hat eine wachsende Zahl an Städten damit begonnen, Elektrobusse bestimmter Technologien auf einzelnen Linien in Test- oder Demonstrationsphasen einzusetzen. Erfahrungen im Hinblick auf eine vollständige Umstellung der Flotte und dafür geeignete Technologien sind jedoch rar. Im Rahmen des Projekts move2zero, koordiniert von der Holding Graz und beauftragt durch den Österreichischen Klima- und Energiefonds, wird in diesem Kontext ein Konzept für die vollständige Dekarbonisierung des Bustransportsystems in der Stadt Graz entwickelt.

2 Technologien

Am Markt sind Busse mit verschiedenen elektrischen Antriebskonzepten erhältlich. Jedes dieser Konzepte hat spezifische Vor- und Nachteile in Bezug auf Reichweiten, Betankungs- und Ladeanforderungen oder Kosten. Im Folgenden werden die wichtigsten Technologien, die im Rahmen des Projekts berücksichtigt werden, vorgestellt:

2.1 Fuel Cells (FC)

Brennstoffzellenbusse nutzen elektrische Energie, die durch eine elektrochemische Reaktion von Wasserstoff und Luft erzeugt wird. Hierfür wird Wasserstoff unter hohem Druck in H₂-Tanks gespeichert. Da die Tankkapazität keine praktische Einschränkung darstellt, weisen Brennstoffzellenbusse eine hohe Flexibilität in Bezug auf die Reichweite auf und der operative Einsatz kann ähnlich gestaltet werden, wie der von herkömmlichen Diesel-Bussen. Im Hinblick auf die Infrastruktur erfordern die Busse eine Wasserstofftankstelle vor Ort und die regelmäßige Versorgung mit Wasserstoff. Letzteres kann je nach Anzahl der eingesetzten Brennstoffzellenbusse durch eine externe Wasserstoffproduktionsanlage und anschließende Anlieferung oder durch eine Elektrolyseanlage vor Ort realisiert werden. Da die SEVESO-III-Richtlinie spezielle Anforderungen an Betriebe stellt, die über 5 Tonnen Wasserstoff lagern [2], und der Wasserstoffbedarf einer gesamten Flotte diesen Wert überschreitet, sind Technologie-Konzepte, die den Wasserstoffverbrauch der Busse reduzieren, von Interesse. Aus diesem Grund wurden sogenannte FC-REX Busse als weitere Alternative im Modell berücksichtigt. FC-REX Busse sind Fahrzeuge, die ähnlich zu regulären FC-Bussen eine Brennstoffzelle, eine Batterie und einen Wasserstofftank besitzen. Der Unterschied der beiden Technologien ergibt sich aus der Dimensionierung dieser Komponenten. Während FC-Busse nur kleine Batterien haben, die hauptsächlich der Pufferung und Rekuperation dienen, verfügen FC-REX Busse über größere Batterien, die nachts über externe Stromversorgung aufgeladen werden. Tagsüber sorgt die kleiner dimensionierte Brennstoffzelle für eine kontinuierliche Nachladung der Batterie, wodurch sich auch der bezeichnende Name *fuel cell as a range extender* – FC-REX, ergibt [3].

2.2 Overnight Charging (ONC)

Bei der Übernachtladung (ONC) erfolgt das Laden hauptsächlich nachts, während ein Großteil der Fahrzeuge nicht im Einsatz ist. Die Nutzung dieser längeren freien Zeitfenster auf dem Betriebshof bietet vor allem den Vorteil, geringe Ladeleistungen von 50 bis maximal 100 kW zur Aufladung eines Buses einsetzen zu können. Bei großflächigem Einsatz ist jedoch zu berücksichtigen, dass das simultane Laden der gesamten Fahrzeugflotte hohe Anforderungen an das Stromnetz stellt. Wenn die bestehende Infrastruktur nicht genügend Ladeleistung bereitstellen kann, führt die notwendige Aufrüstung der elektrischen Infrastruktur zu Grabungsarbeiten und hohen Investitionskosten. Werden hingegen nur Teile der Busflotte über Nacht geladen und bestimmte Schwellen nicht überschritten, beschränkt sich die Investition auf die variablen Kosten der Ladepunkte. Da in Testphasen überwiegend einzelne Linien auf den elektrischen Betrieb umgestellt werden, ist ONC die bisher am weitesten verbreitete Technologie [15].

Eine weitere Herausforderung stellt die begrenzte Reichweite der Fahrzeuge dar. Mit Batteriekapazitäten von 300 bis 650 kWh erzielen ONC Busse unter guten Bedingungen Reichweiten von bis zu 300 Kilometer. Der Energieverbrauch von Nebenaggregaten, in unseren Breiten insbesondere der Verbrauch der Heizung, reduziert die Reichweite der Fahrzeuge jedoch erheblich. Da der problemlose Betrieb auch an einem typischen Wintertag sichergestellt sein muss, ist bei der Auslegung des Systems mit dem „worst-case“ Energieverbrauch eines Wintertags zu kalkulieren. Durch diese Einschränkung ist es in der Regel nicht möglich, einen konventionell betriebenen Bus durch einen Elektrobus zu ersetzen. Die Umlaufplanung der Fahrzeuge erfordert entsprechende Anpassungen und muss kürzere Umläufe sowie tagsüber stattfindende Nachladungen berücksichtigen. Die dadurch entstehenden zusätzlichen Leerfahrten reduzieren die Verfügbarkeit der Fahrzeuge weiter und können in einem relevanten Mehrbedarf an Fahrzeugen zum Ausgleich dieser Verfügbarkeit resultieren. Die damit steigende Anzahl an nachladenden Fahrzeugen hat wiederum Auswirkungen auf die erforderliche Ladeleistung am Depot.

2.3 Opportunity Charging (OPC)

Die Gelegenheitsladung (OPC) basiert auf der Idee, Busse während regelmäßiger kurzer Stehzeiten an Haltestellen zu laden. Um einen Betrieb nach diesem Konzept zu ermöglichen, müssen Schnellladestationen entlang der Linien errichtet werden. Bei entsprechender Auswahl der Standorte und geeigneter Ladeplanung können durch Mehrfachnutzung (mehrere Busse oder Linien teilen sich eine Ladestation) Synergien gewonnen und Spitzen im Strombedarf reduziert werden. Strategische Ladeentscheidungen wie *Welche Linien mit welchem Takt laden an welchen Haltestellen?* müssen dafür gut aufeinander abgestimmt sein.

Regelmäßige Nachladungen mit hohen Ladeleistungen machen den Einsatz von Schnellladebatterien erforderlich. Grundsätzlich sind für den OPC-Betrieb sowohl herkömmliche Traktionsbatterien als auch Superkondensatoren denkbar, aufgrund der verschiedenen Nennkapazitäten erfordern die beiden Typen jedoch unterschiedliche betriebliche Überlegungen. Während Busse mit Superkondensatoren (OPC+supercaps) sehr geringe Kapazitäten und damit wenig Speicherpuffer bieten und Fahrzeuge nach wenigen Kilometern geladen werden müssen, gewähren Batterie-Busse (OPC+batteries) größere Flexibilität. Gerade morgens, wenn während der Frühspitze viele Fahrzeuge im Einsatz sind, kann ein kurzzeitiger Verzicht auf Nachladung erhebliche Vorteile bringen und die Zahl der notwendigen Ladepunkte reduzieren. Die beschriebenen Zusammenhänge werden in Abbildungen 1 und 2 veranschaulicht.



Abbildung 1: Anzahl durchzuführender Fahrgastfahrten nach Tageszeit

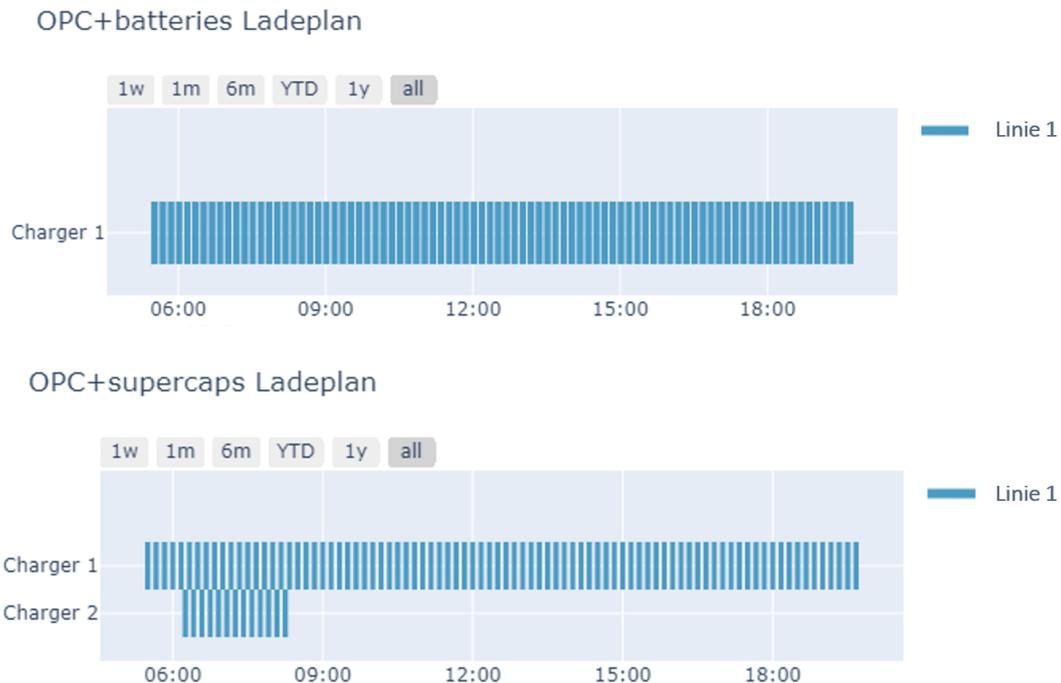


Abbildung 2: Vergleich eines OPC+supercaps vs. OPC+batteries Ladeplans

Aufgrund der hohen Leistungsdichte können Superkondensatoren sehr schnell geladen werden. Auch Traktionsbatterien der neueren Generation können unter hoher Ladeleistung geladen werden, erreichen aber nicht dasselbe Niveau und leiden stärker unter Degradation. In beiden Fällen wirkt sich die hohe Ladeleistung positiv auf die Dauer der Ladevorgänge und somit auf die Verfügbarkeit und Anzahl der erforderlichen Busse aus. Obwohl die Kosten pro Kilowattstunde hoch sind, sind OPC-Busse aufgrund der geringer dimensionierten Akku-Kapazitäten im Absolut-Vergleich billiger. Des Weiteren ergeben sich wesentliche Gewichtsvorteile, die den Energieverbrauch der Fahrzeuge positiv beeinflussen.

2.4 Problemstellung

Jede der vorgestellten Technologieoptionen birgt gewisse Vor- und Nachteile und steht in Wechselwirkung mit einer Vielzahl an betrieblichen Faktoren, die in eine optimale Technologie-Entscheidung miteinbezogen werden müssen. Der städtische Kontext eines Busnetzes fügt individuelle Komponenten zur optimalen Technologiewahl hinzu. Routen und Fahrpläne beeinflussen Umlauf- und Wendezeiten und damit den möglichen Standort von Ladestationen. Die Anschlussmöglichkeiten an die bestehende Netzinfrastruktur müssen neben anderen infrastrukturellen Faktoren ebenso in die Betrachtung miteinbezogen werden. In einigen Fällen können einzelne Buslinien nicht nach bestimmten Technologie-Konzepten betrieben werden, während andere Linien ausgezeichnet dafür geeignet wären. Die daraus entstehende Frage nach dem besten Technologiemix, also einer individuelle Technologieentscheidung für jede Linie, wurde durch ein komplexes Optimierungsmodell gelöst und in ein Decision-Support System integriert.

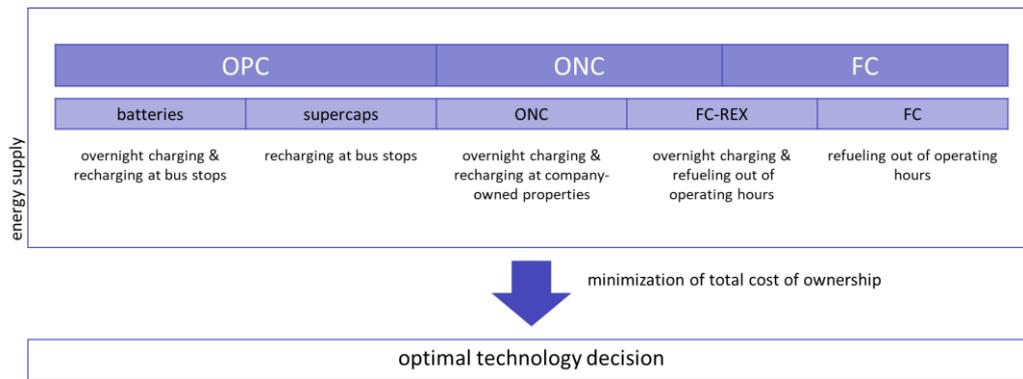


Abbildung 3: Übersicht der potentiellen Technologien

3 Literatur

Frühe Studien, die sich mit verwandten Themenstellungen befassen, sind als Probleme der Fahrzeugeinsatzplanung bzw. Vehicle Scheduling Problem (VSP) bekannt. Beim VSP werden durchführbare Abfolgen an Fahrten, sogenannte Umläufe, definiert, die alle täglich durchzuführenden Fahrgastfahrten abdecken. Neben den strategisch geplanten Fahrgastfahrten setzen sich Umläufe auch aus Leerfahrten zusammen. Leerfahrten sind Fahrten entlang von Strecken, die das Depot sowie Endstationen von Buslinien miteinander verbinden und in der Regel ohne Passagiere durchgeführt werden. Ziel des VSP ist es, Umläufe so zu konstruieren, dass die durch sie bedingten Kosten minimal sind. In der Optimierung wird dieses Problem der operativen Planung häufig als Mehrgüterflussproblem modelliert [4].

Das VSPT ist eine Variante des VSP, in der zusätzliche Beschränkungen für die maximale Zeit, die Fahrzeuge außerhalb des Depots verbringen, berücksichtigt werden. [5] und [6] waren die ersten Arbeiten, die sich mit effizienten Methoden zur Lösung dieses Problems auseinandersetzten. In den darauffolgenden Jahren wurden weitere Varianten des VSP untersucht, die immer besser zur Beschreibung der praktischen Problemstellung mit elektrischen Bussen geeignet waren. Für eine detaillierte Beschreibung wird auf die Werke [7], [8], [9] und [10] verwiesen.

Der optimale Standort oder die begrenzte Kapazität von Ladestationen wurde in keiner der oben erwähnten Studien berücksichtigt und meist als gegeben oder unlimitiert angenommen. Die Einbindung von solchen strategischen Elementen in die operative Planung, bzw. die Berücksichtigung des operativen Betriebs bei strategischen Entscheidungen bietet jedoch großes Potential und wird in jüngeren Studien vermehrt untersucht. [11] und [12] widmeten sich dieser Themenstellungen und untersuchten die Umlaufplanung elektrischer Busse in Zusammenhang mit der dafür notwendigen Infrastruktur. [13], [14] und [15] fokussierten die Optimierung der beiden in Wechselwirkung stehenden Aspekte.

Bei der Berücksichtigung der benötigten Infrastruktur gilt es zudem die Auswirkungen auf das Elektrizitätsnetz in Betracht zu ziehen. [16] verglichen die Effekte einer reinen OPC Flotte mit denen einer reinen ONC Flotte und konnten zeigen, dass OPC unter Einhaltung der bestehenden Umlaufpläne einen wesentlichen Nachteil für Netzbetreiber mit sich bringt. Auch [11] analysierten die Lastprofile von Stationen unter dem Schnellladekonzept und leiteten

Empfehlungen für die Ladeplanung der Busflotte ab. Die Anpassung der Umlaufpläne zur Minimierung der notwendigen Ladeleistung wurde als weiterführende Forschungsfrage in den Raum gestellt. Als Alternative wurde *Peak Shaving*, eine Methode zur Reduktion von Lastspitzen, zum Beispiel durch die Verwendung stationärer Energiespeichersysteme, thematisiert. [17] unterstellten einen zeitabhängigen Tarif bei der Verrechnung der Energiekosten, den Energieversorgungsunternehmen einsetzen, um Zeiten des Energieverbrauchs besser steuern zu können. Unter Berücksichtigung der betrieblichen Anforderungen entwickelten die Autoren ein Modell, das tagsüber stattfindende Nachladevorgänge in Zeitfenster mit geringer Stromnachfrage verschiebt und die Energiekosten für den Busbetreiber wesentlich reduzierten.

4 Decision-Support System

Um eine optimale Technologieauswahl zu treffen, ist eine umfassende Bewertung der Optionen inklusive strategischen und betrieblichen Überlegungen erforderlich. Diese komplexe Aufgabe lässt sich gut mit Methoden der mathematischen Modellierung, insbesondere der ganzzahligen linearen Programmierung (ILP), lösen. Im Rahmen des Projekts wurde ein Modell entwickelt, das den optimalen Technologie-Mix für ein gegebenes Busnetz bestimmt und die dabei entstehenden Kosten über einen Zeithorizont von 20 Jahren minimiert [18]. In Betracht gezogen wurden dabei die Auswahl und Dimensionierung von Ladestationen am Depot und im Netzwerk, die Dimensionierung der H2-Infrastruktur, Lade- und Umlaufpläne der Fahrzeuge und die sich daraus ergebende Flottengröße. Die praktische Umsetzung des Modells erfolgte in Python, die ILPs wurden unter Verwendung des GUROBI Solvers optimiert. In Verbindung mit einer umfangreichen, aber einfach zu handhabenden Datenschnittstelle dient das Modell nun als Entscheidungshilfe für das Grazer Linienbusnetz.

Die Ergebnisse des untersuchten Optimierungsmodells hängen von einer umfangreichen Aufstellung unterschiedlicher Eingangsdaten ab. Im Folgenden wird näher auf einen Teilbereich, die potentiellen Standorte und Kosten für Ladestationen, eingegangen. Ausgehend von einer Liste der in Graz befindlichen Haltestellen wurden Endstationen, sowie durch mehrere Linien geteilte Halte- und Wendestellen identifiziert. Letztere bilden Knotenpunkte und gelten als Voraussetzung für die Realisierung von Synergien, da durch sie die Anzahl an zu errichtenden Ladestationen reduziert werden kann. Im nächsten Schritt wurden die lokalen Gegebenheiten, insbesondere der verfügbare Platz an den Standorten, untersucht und eine Obergrenze für die Anzahl möglicher Ladepunkte festgelegt. Des Weiteren wurde eine Einteilung in verschiedene Stadtgebiete und Schutzzonen vorgenommen, da mit der Errichtung im öffentlichen Raum viele genehmigungsrechtliche Vorgänge und die Einhaltung von Bauauflagen einhergeht. Die Kosten der Ladestationen setzen sich zusammen aus Grundstücks-, Netzanschluss- und Stationskosten und variieren je nach benötigter Anzahl an Ladepunkten und der erforderlichen Gesamtleistung. Für verschiedene Technologien und Szenarien wurden Kostenschätzungen zu Ladeleistungen von 50, 100, 150, 300, 450, 600 und 800 kW pro Ladepunkt erhoben. Zusammen mit den laufenden Kosten für Wartung und Betrieb ergeben diese Werte die in Abbildung 4 dargestellten Lebenszykluskosten (LCC) der potentiellen Systemkomponenten. Eine Anbindung von Leistungen über 1 MW wurde für die meisten betriebsfremden Standorte ausgeschlossen. Die so aufbereitete Liste potentieller Ladestationen sowie die damit

verbundenen Kosten dienen als Eingangsgröße für das entwickelte Modell. Im Rahmen der Optimierung wird eine Teilmenge an Standorten und Ladepunkten ausgewählt, die für den kostenoptimalen Betrieb des Bussystems erforderlich ist.



Abbildung 4: Stationskosten nach Anzahl und Leistung der Ladepunkte

Grundsätzlich lassen sich die erforderlichen Eingangsdaten in technische Parameter, wie Ladeleistungen oder Batteriekapazitäten, Systemparameter, wie Streckeninformationen von Buslinien oder die Liste potentieller Ladeplätze, und Kostenparameter einteilen. Letztere umfassen abgezinste Infrastruktur- und Fahrzeuginvestitionen sowie Energie- und Personalkosten über den gesamten Planungshorizont. Die Werte vieler dieser Parameter sind aufgrund der noch in Entwicklung befindlichen Technologien und des langen Nutzungszeitraums schwer prognostizierbar. Daher wurde in einer Szenarioanalyse eine breite Palette an Faktorkombinationen mit verschiedenen Ausprägungen untersucht (z.B. Batteriekapazität: gering, mittel, hoch).

5 Ergebnisse

Die Ergebnisse unserer Berechnungen legen nahe, dass der Einsatz einer gemischten Flotte tatsächlich zu monetären Vorteilen gegenüber einer einheitlich betriebenen Flotte führen kann. Neben der optimalen Technologieentscheidung pro Linie stehen für jedes Szenario sowohl Fahrzeug- als auch Ladepläne und eine detaillierte Kostenaufschlüsselung in einzelne Systemkomponenten zur Verfügung. Darüber hinaus werden dem Entscheidungsträger zum Vergleich Lösungen mit einer homogenen Busflotte je Technologie zur Verfügung gestellt.

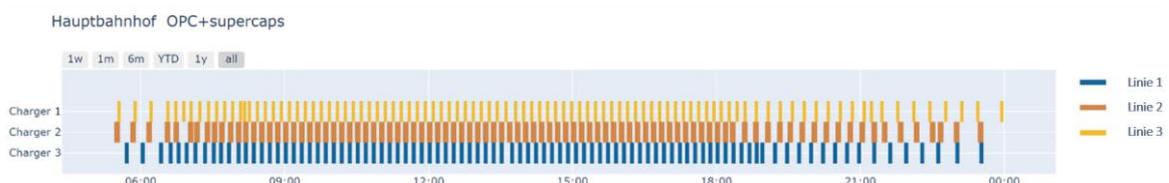


Abbildung 5: Ladeplan einer ausgewählten Ladestation

In Abbildung 6 ist der optimale Technologie-Mix des Basisszenarios dargestellt. Gelb gekennzeichnete Linien werden mit OPC+supercaps betrieben, blaue Linien mit ONC. Die Knoten stellen die Standorte der dazugehörigen Ladestationen dar. In Abbildung 5 sind Ladepunkte sowie die Belegung einer exemplarisch ausgewählten Ladestation abgebildet. Die notwendigen Nachladungen und zusätzlichen Leerfahrten erhöhen den gesamten Fahrzeugbedarf um 16%. Etwa zwei Drittel der Flotte bestehen aus OPC+supercaps, ein Drittel aus ONC Fahrzeugen.

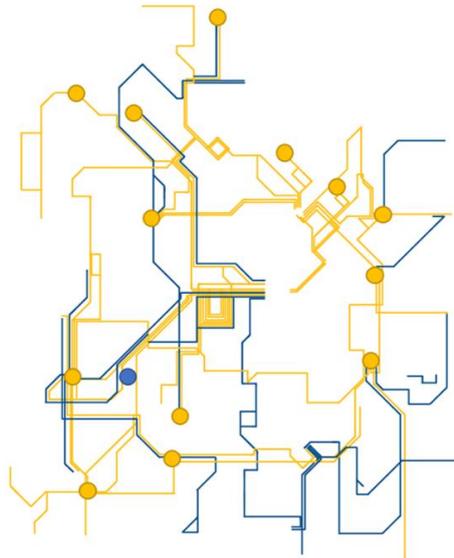


Abbildung 6: Optimierte Technologieauswahl Basisszenario

Generell haben sich die Kosten des täglichen Betriebs als größter Kostentreiber herausgestellt. Mehr als die Hälfte davon entfällt auf die Kosten für Fahrpersonal, die nur bedingt beeinflusst werden können. Der andere Teil entfällt auf Energiekosten, die sich aus dem Energieverbrauch der Umläufe ergeben. Da die Energiekosten von Batterie- und Wasserstoffbussen sehr unterschiedlich ausfallen können, haben sie sich als einer der entscheidendsten Faktoren erwiesen. Die Investitionen in Infrastruktur spielen im Hinblick auf die Lebenszykluskosten (LCC) eines Bussystems hingegen eine untergeordnete Rolle.

Obwohl das übergeordnete Ziel in der Minimierung der LCC liegt, sind hohe Anfangsinvestitionen und andere Kennzahlen, wie Flottengröße oder die notwendige Gesamtleistung am Depot, einflussreiche Ergebnisgrößen. Ein Bussystem, das ausschließlich mit ONC-Bussen betrieben wird, kann die anfänglichen Infrastrukturkosten erheblich senken. Die LCC eines reinen ONC-Systems sind jedoch um knapp über 5 % höher und die Anzahl der Fahrzeuge steigt im Vergleich zur bestehenden Flotte um ein Drittel. Da Fahrzeuge größtenteils über Nacht geladen werden, wirkt sich das auf die erforderlichere Anschlussleistung am Betriebshof aus. Während der optimale Mix 12 – 14 MW Gesamtleistung erfordert, beansprucht eine reine ONC-Lösung in etwa 20 MW. Bei wasserstoffbasierten Technologien bleibt die Flottengröße konstant, die LCC der Bussysteme sind aus aktueller Sicht jedoch nicht konkurrenzfähig.

Die Unterstützung durch den profilbildenden Bereich COLIBRI der Universität Graz wird dankend erwähnt.

6 Referenzen

- [1] European Commission (2016), Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. A European Strategy for Low-Emission Mobility; <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX:52016DC0501> (Accessed: November 26, 2021).
- [2] Directive 2012/18/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on the control of major-accident hazards involving dangerous substances, amending and subsequently repealing Council Directive 96/82/EC Text with EEA relevance. ELI: <http://data.europa.eu/eli/dir/2012/18/oj>.
- [3] Kupferschmid, S. und Faltenbacher, M. (2018). Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV. Fahrzeuge, Infrastruktur und betriebliche Aspekte. Im Auftrag der NOW GmbH. Verfügbar unter: https://www.nowgmbh.de/wp-content/uploads/2018/12/NOW-Broschuere_Wasserstoffbusse-im-OePNV.pdf (besucht am 19.01.2022).
- [4] Borndörfer, R., M. Grötschel und U. Jäger (2008). Planung von öffentlichem Personenverkehr. Hrsg. von Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin.
- [5] Freling, R. and Paixão, J. M. P. (1993). Vehicle Scheduling with Time Constraint. In: Springer Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, pp. 130-144.
- [6] Haghani A. and Banihashemi M. (2002). Heuristic approaches for solving large-scale bus transit vehicle scheduling problem with route time constraints. In: Transportation Research Part A 36, pp. 309 - 333.
- [7] Wang, H. and Shen J. (2007). Heuristic approaches for solving transit vehicle scheduling problem with route and fueling time constraints. In: Applied Mathematics and Computation 190, pp. 1237–1249.
- [8] Bunte, S. and Kliewer, N. (2009). An overview on vehicle scheduling models. In: Public Transportation 1(4), pp. 299–317.
- [9] Li, J. (2014). Transit Bus Scheduling with Limited Energy. In: Transportation Science 48(4), pp. 521-539.
- [10] Van Kooten Niekerk, M. E., van den Akker, J. M. and Hoogeveen, J. A. (2017). Scheduling electric vehicles. In: Public Transport 9, pp. 155-176.
- [11] Rogge, M., van der Hurk, E., Larsen, A. and Sauer, D. U. (2018). Electric bus fleet size and mix problem with optimization of charging infrastructure. In: Applied Energy 211, pp. 282-295.
- [12] Kunith, A. (2017). Elektrifizierung des urbanen öffentlichen Busverkehrs: Technologiebewertung für den kosteneffizienten Betrieb emissionsfreier Bussysteme. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- [13] Janovec, M. and Koháni, M. (2019). Exact approach to the electric bus fleet scheduling. In: Transportation Research Procedia 40, pp. 1380-1387.
- [14] Wang, Y., Y. Huang et al. (2017). Optimal recharging scheduling for urban electric buses: A case study in Davis. In: Transportation Research 100, pp. 115–132.
- [15] Xylia, M., S. Leduc et al. (2017). Locating charging infrastructure for electric buses in Stockholm. In: Transportation Research 78, pp. 183–200.
- [16] Mohamed, M. u. a. (2017). Simulation of electric buses on a full transit network: Operational feasibility and grid impact analysis. In: Electric Power Systems Research.
- [17] Leou, R. und J. Hung (2017). Optimal Charging Schedule Planning and Economic Analysis for Electric Bus Charging Stations. In: Energies 10, doi: 10.3390/en10040483.
- [18] Frieß, N. and Pferschy, U. (2021). Decision-Support System for the Optimal Technology Split of a Decarbonized Bus Network, in *2021 IEEE 45th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC)*, Madrid, Spain, pp. 1279-1284. doi: 10.1109/COMPSAC51774.2021.00178.