

Aufbau und Optimierung von Ladeinfrastrukturen auf Busbetriebshöfen

Mina Eskander*, Amra Jahic, Detlef Schulz
Professur für Elektrische Energiesysteme
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr
 Hamburg
 Hamburg, Deutschland
 *mina.eskander@hsu-hh.de

Toralf Müller*, Nina Zeun, Ole Hoffmann
Abteilung für Elektromobilität
Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein GmbH
 Hamburg, Deutschland
 *toralf.mueller@vhhbus.de

Kurzfassung – Zur nachhaltigen Senkung von Treibhausgasemissionen hat der Senat der Freien und Hansestadt Hamburg den Hamburger Busverkehrsunternehmen vorgegeben, ab 2020 nur noch emissionsfreie Busse zu beschaffen. Eine Umstellung des Verkehrs auf emissionsfreie Antriebe ist ein wichtiger Schritt auf dem Weg zur Erfüllung der Klimaschutzziele der Bundesregierung. Dieser Beitrag fokussiert sich auf die Umstellung der Hamburger Nahverkehrsbusse auf Elektrobusse. Insgesamt sind bis 2030 neun elektrische Busbetriebshöfe geplant. Das Hamburger Busverkehrsunternehmen Hamburger Hochbahn AG (HOCHBAHN) beginnt die Umstellung mit dem Bau eines komplett neuen Busbetriebshofs in Alsterdorf. Die Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein GmbH (VHH) starten hingegen mit der Um- bzw. Ausrüstung eines bestehenden Busbetriebshofs in Bergedorf. Die Wissenschaftliche Begleitforschung „WiBeFo“ als Ergänzung zu den Vorhaben der zwei Industriepartner HOCHBAHN und VHH erfolgte durch die Professur für Elektrische Energiesysteme der Helmut-Schmidt-Universität (HSU) Hamburg. Dieser Beitrag beschäftigt sich mit mehreren Möglichkeiten, um eine optimierte Auslegung der Ladeinfrastruktur zu erreichen. Dabei bestehen die Ziele der Optimierung darin, die Gesamtkosten des Systems unter Sicherstellung des Betriebs zu reduzieren und die Betriebskosten zu minimieren.

Stichworte – *Ladeinfrastrukturkonzepte, E-Busse, technische Bewertung, Übertragbarkeit, Busbetriebshöfe, Wirtschaftlichkeit*

NOMENKLATUR

E-Bus	Elektrobus
FIFO	First In, First Out
HOCHBAHN	Hamburger Hochbahn AG
HSU	Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
VHH	Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein GmbH
TCO	Total Cost of Ownership
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen
DWD	Deutschen Wetterdienstes
MIQP	Mixed Integer Quadratic Programming

BMVI Bundesministeriums für Verkehr und
Digitale Infrastruktur

I. EINLEITUNG

Eine Elektrifizierung der Busflotten bringt viele Herausforderungen unterschiedlicher Natur mit sich. Auf der technischen Seite muss die entsprechende Ladeinfrastruktur ausgelegt werden. Dabei sind verschiedene Aspekte zu berücksichtigen, wie z. B. Planung und Auslegung der elektrischen Komponenten aber auch die Sicherung der Zuverlässigkeit und Ausfallsicherheit. Andererseits muss auch das entsprechende Managementsystem entwickelt werden, wie z. B. das Last- und Lademanagement, die Disposition sowie die Umlaufplanung. Dies soll dazu dienen, einen sicheren und zuverlässigen Betrieb sicherzustellen. Zusätzlich soll die gesamte Umstellung kostenoptimiert erfolgen.

Im Zuge der Umstellung auf Elektrobusse in Hamburg beschäftigt sich dieser Beitrag mit der Erforschung von verschiedenen Aspekten, die eine Umstellung effizienter und optimaler gestalten. Dabei werden die zwei unterschiedlichen Ladeinfrastrukturkonzepte der HOCHBAHN und der VHH bezüglich ihrer Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz erforscht. Die technische Betrachtung der beiden Konzepte und die Umsetzung der Optimierungsvorschläge können zu einer konzeptionellen Sicherung der Übertragbarkeit der Lösungen auf andere Busbetriebshöfe beitragen. Außerdem ermöglichen die Erfahrungen und die gesammelten Erkenntnisse von der Umstellung auf Elektrobusse in Hamburg die Abschätzung der Auswirkungen einer deutschlandweiten Umstellung auf Elektrobusse auf das Energieversorgungssystem. Dieser Beitrag beschäftigt sich prinzipiell mit der Konzepterstellung von Busbetriebshöfen. Die hier gezeigten Ergebnisse werden sich auf Basis der Endplanung von Umläufen anpassen. Die wissenschaftlichen und technischen Ziele der Begleitforschung wurden wie folgt definiert:

- Ziel 1: Untersuchung und technische Bewertung des Ladeinfrastrukturkonzeptes.
- Ziel 2: Modellbildung und Simulation des Ladeinfrastrukturkonzeptes zur Ermittlung von Kenngrößen für übertragbare technische Konzepte.
- Ziel 3: Bewertung der erreichten Lösungen hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit und Effizienz sowie der Klimaschutzwirkungen.

- Ziel 4: Sicherung der Übertragbarkeit auf andere Nutzer.
- Ziel 5: Abschätzung der Auswirkungen auf das deutsche Energiesystem.

In Kapitel II werden zunächst die zwei Konzepte der Busbetriebshöfe in Alsterdorf und Bergedorf vorgestellt. Anschließend werden die Ergebnisse für die einzelnen oben genannten Ziele des Projekts gezeigt. Dabei haben die vorgeschlagenen Algorithmen dazu beigetragen, das System zu optimieren.

II. UNTERSCHIEDLICHER ASPEKTE UND FORSCHUNGSERGEBNISSEN

Zunächst werden die technischen Konzepte der Busbetriebshöfe in Alsterdorf und in Bergedorf betrachtet. **ABBILDUNG 1** stellt das Ladeinfrastrukturkonzept des Busbetriebshofs in Alsterdorf dar. Der Busbetriebshof wird durch einen 110 kV-Anschluss versorgt. Die Spannung wird durch die 110/20 kV- und 20/0,4 kV-Transformatoren umgewandelt. Insgesamt besteht der Busbetriebshof aus sechs Carports. Eine Reserveverbindung mit dem benachbarten U-Bahnnetz zur Notstromversorgung sorgt für höhere Zuverlässigkeit des Systems bei möglichen Ausfällen [1].

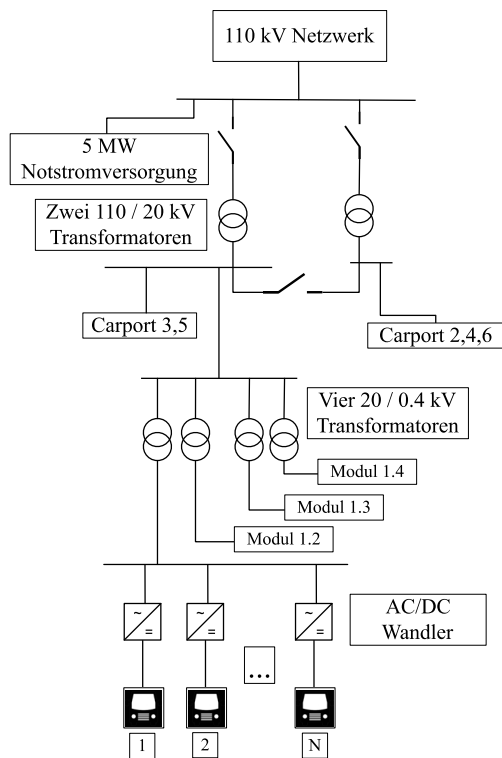


ABBILDUNG 1: KONZEPT DER LADEINFRASTRUKTUR DER HOCHBAHN IN ALSTERDORF [2].

Der Aufbau des Ladeinfrastrukturkonzepts des Busbetriebshofs Bergedorf ist in **ABBILDUNG 2** aufgezeigt. Dieses besteht aus acht Kompaktstationen. Die Kompaktstation stellt das Prinzip der zentralen Umwandlung dar. Die Station besteht aus einem Transformator, zwei Umrichter-Stationen und den Ladegeräten für 16 Busse. Wie gezeigt, sind die Transformatoren miteinander im Ring verschaltet. Der stationäre Batteriespeicher (495 kWh) kann für die Notstromversorgung dienen. Für eine gewisse Redundanz sind zwei Wandler pro Kompaktstation für die Spannungsumwandlung eingeplant.

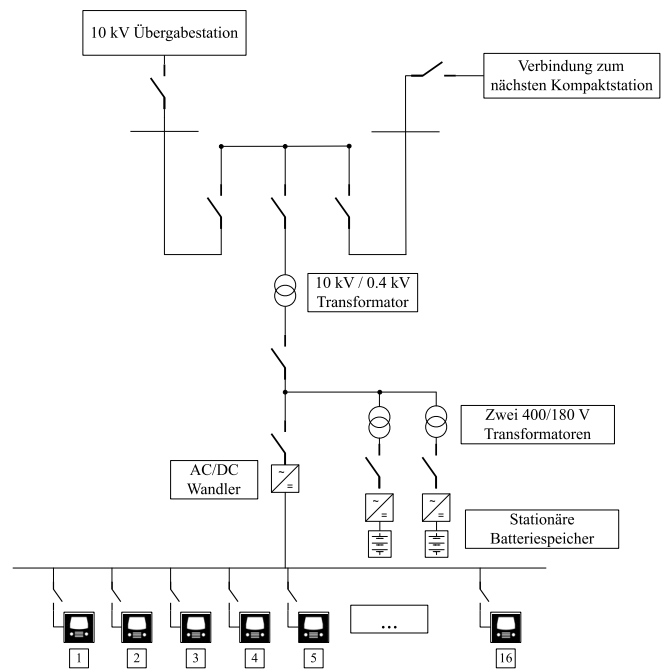


ABBILDUNG 2: KONZEPT DER LADEINFRASTRUKTUR DER VHH IN BERGEDORF [2].

A. Untersuchung und technische Bewertung des Ladeinfrastrukturkonzepts

Der Fokus der Analyse liegt auf der Ausfallsicherheit und der Notstromversorgung der Busbetriebshöfe. Als Methode wird die „N-1-Zuverlässigkeit“ umgesetzt. Dabei wurde die Methodik auf verschiedenen Ebenen erforscht. Erstens wird die Konsequenz einer ausgefallenen Ladesäule auf den zwei Busbetriebshöfen in Hamburg betrachtet. Anschließend wurde diese Betrachtung auf andere Komponenten erweitert, um die N-1-Ausfallszenarien der Transformatoren, Umrichter, Busse usw. zu bewerten. Die Autoren in [3] haben bei der Zuverlässigkeit von elektrischen Bussen zwischen verschiedenen Herstellern unterschieden, dies wurde hier nicht betrachtet. In [4] haben die Autoren zwei Optimierungsmodelle zur Berechnung der Worst-Case-Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Ausfalls in einem Kraftübertragungssystem entwickelt.

Im vorliegenden Beitrag wurden unterschiedlichen Ausfallszenarien untersucht. Dabei wurden die Fehler durch die ansteigende Anzahl von ausgefallenen Ladesäulen abgebildet. Das simuliert nicht nur den Ausfall einer Ladesäule, sondern auch den Ausfall von mehreren Ladesäulen, der z. B. durch einen Transformator-Fehler entstehen könnte. Als Resultat wird die Relation zwischen der Anzahl der ausgefallenen Ladesäulen und der Anzahl der ausgefallenen Busse bzw. Strecken ermittelt. Anschließend wurden die Berechnungen für Ausfallszenarien der Transformatoren, Umrichter und Kabel in Verbindung mit dem Ausfall von mehreren Ladesäulen durchgeführt. Wie in **ABBILDUNG 3** gezeigt, ist die Anzahl der ausgefallenen Busse im Verhältnis zu den Ladesäulen kontinuierlich gestiegen. Die Ursache des ungleichmäßigen Anstiegs ist, dass die Busse unterschiedliche Routen fahren und dementsprechend unterschiedliche Ladezeiten belegen. In **ABBILDUNG 4** wird auch die Anzahl der betroffenen Busse sowie der Schweregrad des Ausfalls gezeigt. Der Schweregrad ist als das Verhältnis zwischen der Anzahl der ausgefallenen Ladesäulen und der Anzahl der betroffenen Busse definiert. Es ist in der

Abbildung zu erkennen, dass der Schweregrad mit der Anzahl der ausgefallenen Ladesäulen ansteigt. Der Busbetriebshof der HOCHBAHN verfügt über eine Notstromversorgung durch das 10-kV-Netz, das das naheliegende U-Bahn-Unterwerk mit einer Leistung von bis zu 5 MW versorgt. Es können noch weitere 5 MW zur Verfügung gestellt werden, aber mit negativen Effekten auf den Betrieb des U-Bahn-Netzes. Demgemäß wurde die verfügbare Ladeleistung für das System auf 5 MW limitiert. Beim Einsatz der Notstromversorgung bzw. der Leistungsbegrenzung werden beim Laden diejenigen Busse bevorzugt, die das Laden für die geplanten Strecken unbedingt benötigen.

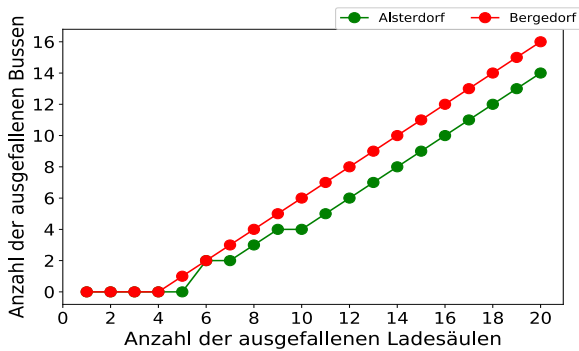


ABBILDUNG 3: ANZAHL DER AUSGEFALLENEN LADESÄULEN IM VERHÄLTNIS ZU DER ANZAHL DER AUSGEFALLENEN BUSSE [2].

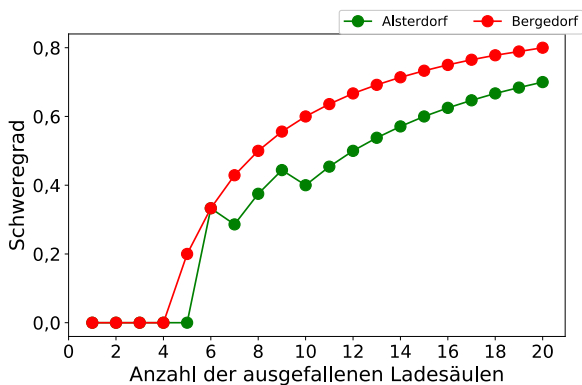


ABBILDUNG 4: ANZAHL DER AUSGEFALLENEN LADESÄULEN IM VERHÄLTNIS ZUM SCHWEREGRAD [2].

Wie in der ABBILDUNG 5 gezeigt, ist das Lastprofil am Netzanschlusspunkt berechnet. Bei der VHH, wurde ein 2nd-Life-Batteriespeicher eingesetzt. Die Batterie kann eine Gesamtleistung von $2 \times 420 \text{ kW}$ und eine Kapazität von 495 kWh liefern. Wie in ABBILDUNG 6 gezeigt, konnten die Ladevorgänge für eine gewisse Zeit ohne Fehler durchgeführt werden [2]. Dabei konnten sich die Ladevorgänge über die Zeit, mithilfe der 5 MW des U-Bahn-Netzes ohne den Betrieb zu beeinflussen, verschieben. Beim Einsatz der stationären Batterie konnten die Busse trotz ausgefallener Ladesäulen für gewisse Zeit geladen werden. Dabei reichte die Kapazität der Batterie für eine Ladezeit von 28 Minuten bis 2,5 Stunden. Eine detaillierte Analyse elektrischer Busbetriebshöfe benötigt die Entwicklung von geeigneten Simulationsmodellen. Die Modelle müssen unterschiedliche technische und betriebliche Aspekte eines Busbetriebshofs realistisch simulieren können.

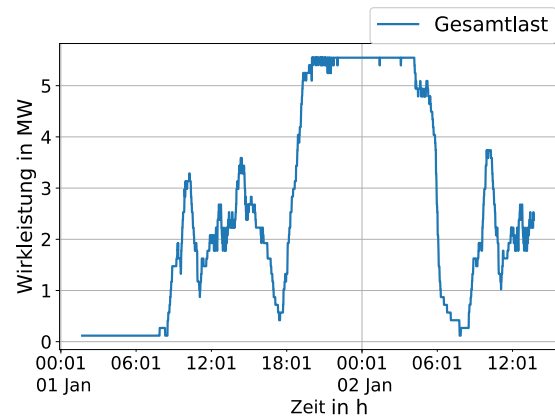


ABBILDUNG 5: LASTPROFIL AM NETZANSCHLUSSPUNKT FÜR DEN BUSBETRIEBSHOF ALSTERDORF IM FALL DER ALLEINIGEN VERSORGUNG VON DER U-BAHN-NOTSTROMVERSORGUNG [2].

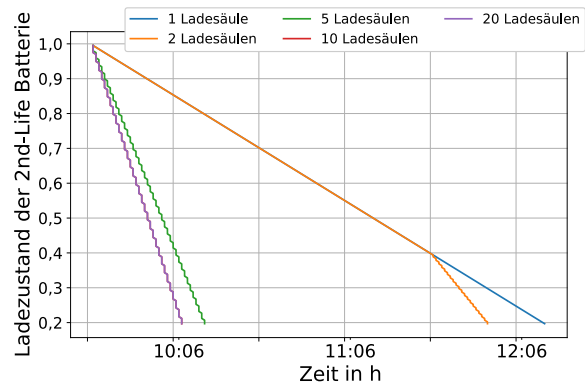


ABBILDUNG 6: LADEZUSTAND DER 2-ND-LIFE-BATTERIE AUF DEM BUSBETRIEBSHOF BERGEDORF FÜR UNTERSCHIEDLICHE ANZAHL DER AUSGEFALLENEN LADESÄULEN [2].

B. Modellbildung und Simulation der Ladeinfrastrukturkonzepte

Hierfür wurde an der HSU eine Co-Simulationsplattform unter dem Namen „Bus-Depot-Simulator“ entwickelt. Die Plattform basiert auf den Softwarepaketen PowerFactory und Python und ermöglicht Modellierungen und Simulationen von unterschiedlichen Modulen, wie z. B. Elektrobussen, elektrischer Infrastruktur, Betrieben (Umläufen), Abläufen auf dem Busbetriebshof, Umgebungen (Wetter, Verkehr) und Managementsystemen (Disposition, Last- und Lademanagement oder Umlaufzuweisung) [5]. Die ABBILDUNG 7 zeigt das Simulationskonzept in einem Flussdiagramm und die Interaktion zwischen den zwei Softwarepaketen.

Mithilfe der unterschiedlichen Module ist es möglich, den ganzen Betrieb auf einem elektrischen Busbetriebshof zu simulieren und dadurch verschiedene Analysen durchzuführen. Dabei sind technische Analysen möglich, wie z. B. eine Analyse der elektrischen Komponenten hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit, Ausfallsicherheit und Notstromversorgung oder Worst-Case-Analysen wie extreme Wetterbedingungen, Verspätungen oder Ausfälle und deren Einfluss auf den Busbetrieb. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Möglichkeit zur Analyse unterschiedlicher Last- und Lademanagementsysteme und ihrer Auswirkung auf die Ladeinfrastruktur, den Netzbetrieb und die Verfügbarkeit der Busflotte. Last- und Lademanagement spielt eine sehr wichtige Rolle. Einerseits ist

das Management sehr wichtig für die Integration der Busbetriebshöfe in das elektrische Netz, da unkontrolliertes Laden zu einer hohen Gleichzeitigkeit bei den Ladevorgängen und dadurch zur möglichen Überlastung des Netzes führen kann. Andererseits ist das Management auch für den Betrieb und die Komponenten auf dem Busbetriebshof selbst wichtig. Mit dem Last- und Lademanagement kann gewährleistet werden, dass alle Busse genügend Energie für die geplanten Umläufe haben, dass die Komponenten auf dem Busbetriebshof nicht überlastet werden, oder dass die Ladeprozesse zusätzlich noch batterieschonend sind.

Mit dem „Bus-Depot-Simulator“ kann unter anderem das Lastreduzierungspotenzial der analysierten Busbetriebshöfe untersucht werden. Dabei werden unterschiedliche Algorithmen und Ansätze berücksichtigt. Die ABBILDUNG 8 zeigt die Lastprofile für die zwei analysierten Busbetriebshöfe beim sofortigen Laden und bei der Anwendung zweier unterschiedlicher Steuerungsalgorithmen für die Reduzierung der Lastspitze. Für den Busbetriebshof Alsterdorf wird durch die Optimierung ein Lastreduzierungspotenzial von bis zu 27,1 % möglich. Dies entspricht einem Gleichzeitigkeitsfaktor von 28,18 %. Für den Busbetriebshof Bergedorf wird andererseits bei einem Gleichzeitigkeitsfaktor von bis zu 18,29 % ein Lastreduzierungspotenzial von bis zu 50,43 % möglich [6]. Der große Unterschied im Potenzial für die Lastreduzierung zwischen den Busbetriebshöfen Bergedorf und Alsterdorf liegt an der Art der Vorkonditionierung. Während in Alsterdorf die Busse elektrisch vorkonditioniert werden, sind in Bergedorf fossile Heizungssysteme im Einsatz.

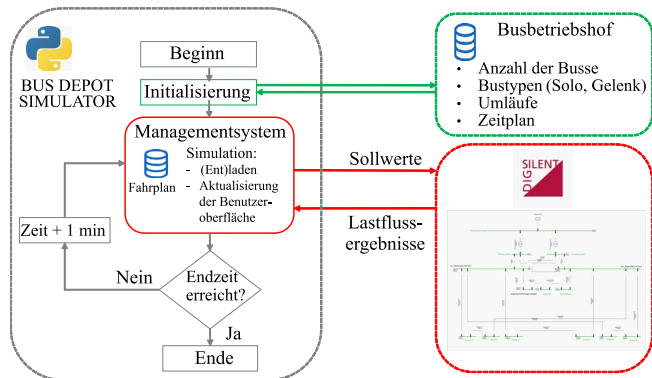


ABBILDUNG 7: FLUSSDIAGRAMM DER CO-SIMULATION DES BUS DEPOT SIMULATORS MIT DER DIGSILENT-PYTHON SCHNITTSTELLE.

Zusätzlich werden, basierend auf der Dauer des Ladevorgangs, drei unterschiedliche Konzepte für das Laden untersucht: nicht-unterbrechbare, quasi-unterbrechbare und unterbrechbare Ladevorgänge werden für den Busbetriebshof Alsterdorf in ABBILDUNG 9 gezeigt. Bei dem quasi-unterbrechbaren Konzept darf der Ladevorgang abgekürzt aber nicht unterbrochen werden. Der Bus wird in diesem Fall nicht vollgeladen, muss aber trotzdem genug Energie für den nächsten geplanten Umlauf haben. Bei dem unterbrechbaren Konzept darf der Ladevorgang in zwei Zeitfenster geteilt werden. Die Analyse zeigt, dass die beiden Konzepte zu einer weiteren Lastspitzenreduzierung führen können.

C. Bewertung der erreichten Lösungen hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit

Die Elektrifizierung der Busflotten benötigt Investitionen. Eine Analyse der Wirtschaftlichkeit und der gesamten Kosten (engl. Total Cost of Ownership, TCO) hilft den Betreibern der Busflotten, diese Umstellung zu planen – technisch und finanziell. Dabei können unterschiedliche Flottenkompositionen oder Ladeinfrastrukturkonzepte wirtschaftlich verglichen werden, um die optimale Auslegung der Flotte und der Busbetriebshöfe zu erreichen. Die Gesamtkosten der elektrischen Busflotten wurden bereits in mehreren Studien untersucht [8, 9, 10]. Bei der Analyse ist es wichtig, den Betrieb der Busse inklusive der Umlaufzuweisung und des Last- und Lademanagements zu berücksichtigen, da diese einen Einfluss auf die Gesamtkosten haben [11].

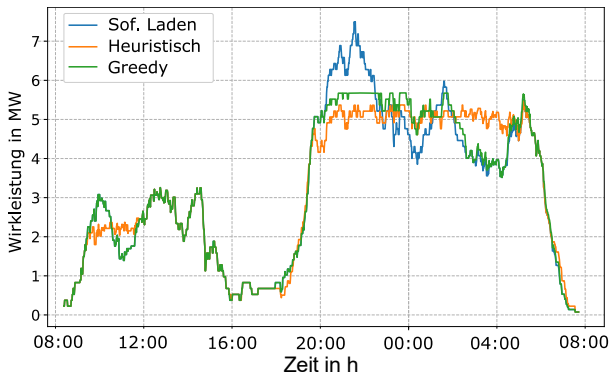
Die ABBILDUNG 10 zeigt die Gesamtkosten in €/km pro Bus für die Busbetriebshöfe Alsterdorf und Bergedorf. Die Streckenzuweisung wurde zunächst nach dem Prinzip First In – First Out (FIFO) durchgeführt, d. h. der Bus fährt zuerst heraus, der sich am längsten auf dem Betriebshof befindet. Anschließend wurde die Streckenzuweisung optimiert. Fünf unterschiedliche Szenarien wurden dabei untersucht:

- E_FN – Elektrobusse, Streckenzuweisung nach FIFO (der erste zurück gekommenen Bus, verlässt den Busbetriebshof zuerst) ohne Lademanagement
- E_FO – Elektrobusse, Streckenzuweisung nach FIFO mit Lademanagement
- E_OO – Elektrobusse, optimale Streckenzuweisung mit Lademanagement
- D_N – Dieselsebusse, Entwicklung der Dieselpreise ohne Berücksichtigung der CO₂-Steuer
- D_C – Dieselsebusse, Entwicklung der Dieselpreise

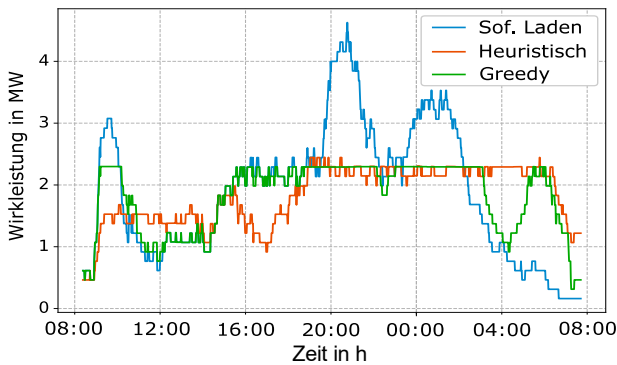
Der größte Anteil der Gesamtkosten für beide Busbetriebshöfe, sind mit 43 bis 57 % die Personalkosten. Die Elektrobusse haben höhere Gesamtkosten als Dieselsebusse, da die Fahrzeugkosten bei den Elektrobusen höher sind. Bei Elektrobusen entfallen bis zu 34 % der Gesamtkosten auf die Fahrzeuge, was ein deutlich höherer Anteil als bei den Dieselsebussen, wo nur bis zu 13 % der Gesamtkosten auf die Fahrzeuge entfallen. Die Kosten für die Ladeinfrastruktur stellen hingegen mit nur 3 % einen sehr kleinen Anteil der Gesamtkosten dar.

D. Sicherung der Übertragbarkeit auf andere Nutzer

Um eine gute Übertragbarkeit der technischen Konzepte zu erreichen, werden zuerst die relevanten Hilfsgrößen des Busbetriebshofs (z. B. Energieverbrauch, Spannungsebene, usw.) sowie der Systemkomponenten (Transformator, Kabel, Umrichter usw.) bestimmt. Hierfür wurde eine Simulation entwickelt, die die unterschiedlichen Hilfsgrößen miteinander verbindet und deren gegenseitige Wechselwirkung abbildet. Zusätzlich werden die Systeme der beiden unterschiedlichen Konzepte für die Ladeinfrastruktur auf den Busbetriebshöfen Alsterdorf und Bergedorf bewertet. Mithilfe dieser Bewertung, kann das Design einer Bus-Depot-Ladeinfrastruktur standardisiert werden, um ein optimales, übertragbares Design vorzuschlagen.



a)



b)

ABBILDUNG 8: LASTPROFILE FÜR UNTERSCHIEDLICHE STEUERUNG-ALGORITHMEN FÜR DIE REDUZIERUNG DER LASTSPITZE FÜR A) ALSTERDORF UND B) BERGEDORF.

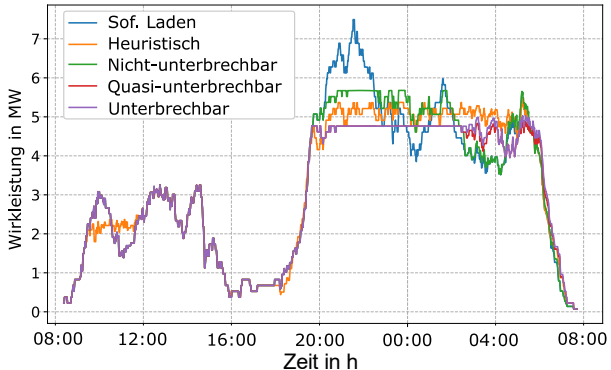


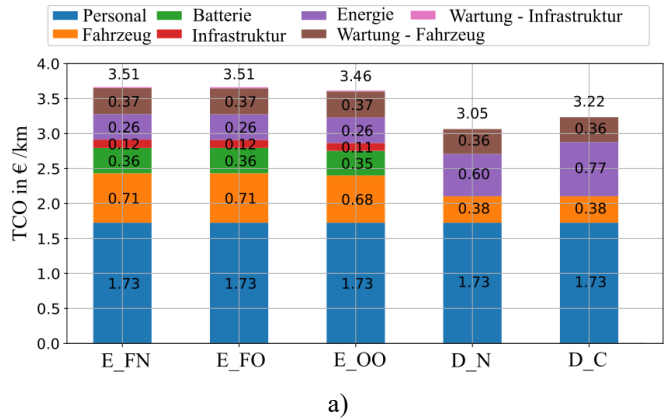
ABBILDUNG 9: LASTPROFILE FÜR UNTERSCHIEDLICHE LADEKONZEPTE, MIT NICHT-UNTERBRECHBAREN, QUASI-UNTERBRECHBAREN UND UNTERBRECHBAREN LADEVORGÄNGEN [7].

In ABBILDUNG 11 ist der Verlauf der dafür genutzten Simulation gezeigt. Die Algorithmen wurden mittels der gemischt-ganzzahligen quadratischen Programmierung (MIQP) erstellt. Die Zielsetzung der Optimierung besteht darin, die technische Zuverlässigkeit zu erhöhen und gleichzeitig die Systemkosten zu minimieren. Dazu gehört auch die optimale Benutzung der zur Verfügung stehenden Flächen.

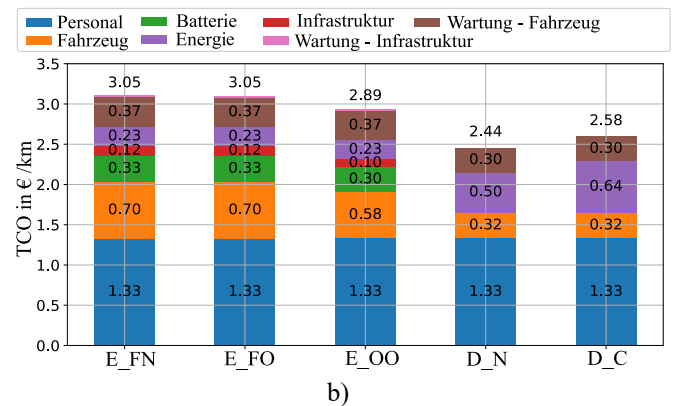
E. Abschätzung der Auswirkungen auf das deutsche Energiesystem

Die Förderungen der Bundesregierung, der begonnene Markthochlauf, eine steigende Marktverfügbarkeit von Elektrobussen (E-Bussen), privatwirtschaftliche Investitionen

sowie das Ziel vieler Unternehmen, eine emissionsfreie Flotte zu betreiben, haben zu steigenden Zahlen von E-Bussen in Deutschland geführt. Die Umstellung auf Elektrobusse stellt aber gleichzeitig eine Herausforderung für das elektrische Netz dar. Bei einer hohen Gleichzeitigkeit kann das Laden der E-Busse zu hohen Lastspitzen und Auslastungen im Netz führen [12]. Eine Analyse der zu erwartenden Lastspitzen durch E-Busse in Deutschland ist für die Analyse der Netzauslastung und des Netzausbaus in den kommenden Jahren daher sehr wichtig. Die bereits vorhandenen elektrischen Busbetriebshöfe in Hamburg können als Grundlage dieser Analyse dienen.



a)



b)

ABBILDUNG 10: GESAMTKOSTEN IN €/KM PRO BUS FÜR DEN BUSBETRIEBSHOF A) ALSTERDORF UND B) BERGEDORF FÜR DIE ELEKTRO- UND DIESELBUSSE [11].

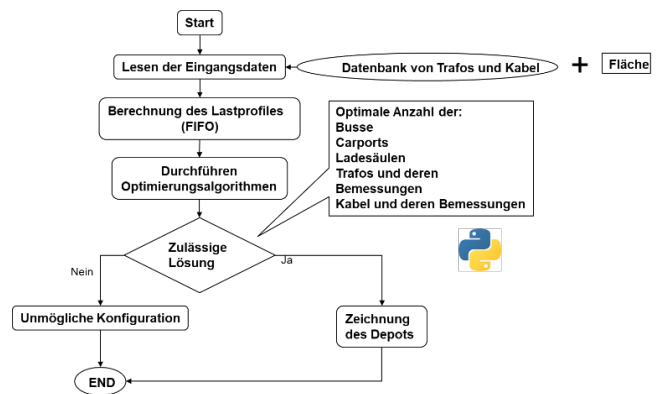


ABBILDUNG 11: FLUSSDIAGRAMM DER SIMULATION AB DEM EINGANG DER EINGELESENEN INFORMATIONEN BIS ZUR ZEICHNUNG DER LADEINFRASTRUKTUR.

Mithilfe von realen Umläufen von 13 Busbetriebshöfen der VHH und mit Hilfe von Infrastrukturdaten von zwei vorhandenen elektrischen Busbetriebshöfen der VHH und der HOCHBAHN in Hamburg wurde eine solche Analyse durchgeführt.

Die Lastprofile aller dieser Busbetriebshöfe werden hierbei für einen typischen Werktag unter der Annahme berechnet, dass alle Dieselbusse durch E-Busse ersetzt wurden. Um das ganze Lastprofil für ein Jahr darzustellen, werden Temperaturprofile in allen Bundesländern berücksichtigt. Dafür werden die verfügbaren Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) mit einer minimalen, maximalen sowie durchschnittlichen täglichen Temperatur für das Jahr 2019 genutzt. Basierend auf den Lastprofilen von diesen Busbetriebshöfen wurde ein durchschnittliches Lastprofil normalisiert, für einen einzelnen E-Bus und für unterschiedliche Temperaturbedingungen, berechnet. Mit der Hochskalierung auf eine gewünschte Anzahl der Elektrobusse und unter der Berücksichtigung des Temperaturverlaufs in einer anderen Stadt, kann dadurch einfach das zu erwartende Lastprofil auf anderen Busbetriebshöfen berechnet werden. Dafür wurde zusätzlich eine Analyse der geplanten Anzahl der E-Busse in den kommenden Jahren in unterschiedlichen Städten in Deutschland durchgeführt. Die Grundlage für den Überblick sind die Datenbank des Verbands Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) [13] sowie die Projektübersicht des Bundesministeriums für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI) [14].

Bei der Berechnung der Lastprofile für andere Busbetriebshöfe wurden die folgenden Annahmen getroffen:

- Alle Busse laden mit 150 kW.
- Alle Busse sind elektrisch vorkonditioniert.
- Die Busse laden auf zentralen Busbetriebshöfen. Das „Unterwegsladen“ an den Haltestellen (engl. Opportunity Charging) wurde nicht berücksichtigt.
- Alle Busse in der emissionsfreien Flotte sind batteriebetrieben.

Die ABBILDUNG 12 zeigt den Verlauf der durch die E-Busse entstehenden Lastspitze in Deutschland für die Jahre 2025 und 2030. Es ist ein Anstieg der Lastspitze um ungefähr 140 MW erkennbar. Ein weiterer wichtiger Aspekt für das Energiesystem ist der gesamte Energieverbrauch. Die ABBILDUNG 13 zeigt den Energieverbrauch in den analysierten Bundesländern im Jahr 2025 sowie im Jahr 2030. Hamburg (HH), Berlin (B) und Nordrhein-Westfalen (NRW) zeigen den größten Energieverbrauch durch die E-Busse, da diese Regionen auch die größte Anzahl von E-Bussen planen. In 2025 beträgt der Energieverbrauch in diesen drei Bundesländern jeweils 132,5 GWh (HH), 120,8 GWh (B) und 64,2 GWh (NRW). In 2030 beträgt der Energieverbrauch hingegen jeweils 264,9 GWh, 241,8 GWh und 231,5 GWh. Unter Berücksichtigung aller Städte, die in diesem Beitrag untersucht wurden, und aller Annahmen, die bei der Analyse getroffen wurden, ist in 2025 ein deutschlandweiter Energieverbrauch der E-Busse von 514,5 GWh und in 2030 von 1124,7 GWh zu erwarten [15].

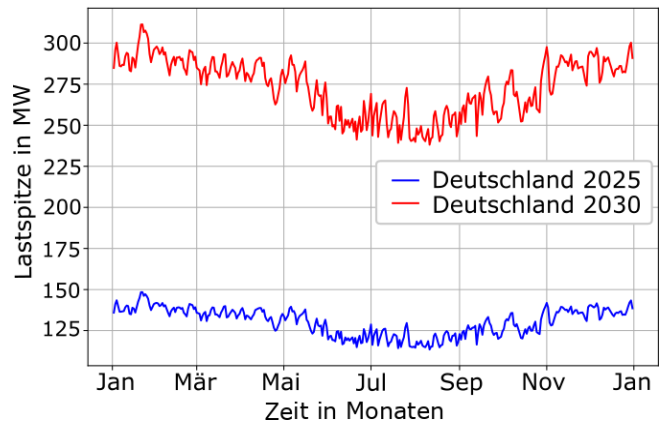


ABBILDUNG 12: VERLAUF DER DURCH DIE E-BUSSE ENTSTEHENDEN LASTSPITZE IN DEUTSCHLAND FÜR DIE JAHRE 2025 UND 2030.

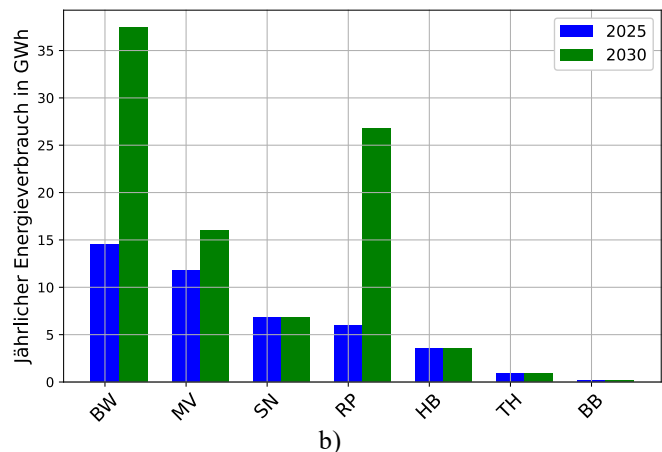
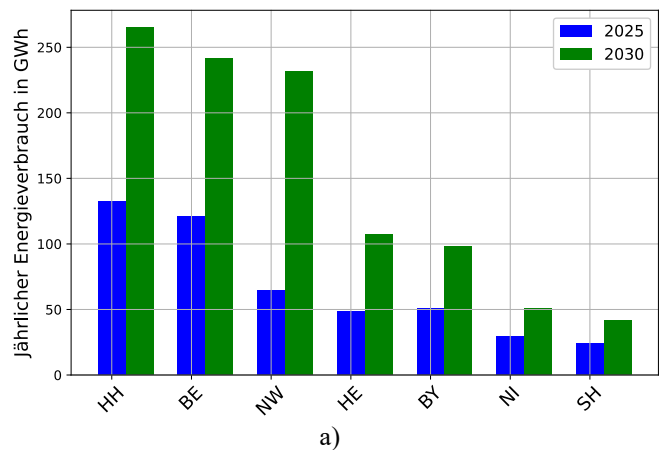


ABBILDUNG 13: ENERGIEVERBRAUCH FÜR UNTERSCHIEDLICHE BUNDESLÄNDER FÜR DIE JAHRE 2025 UND 2030 IN A) HAMBURG (HH), BERLIN (B), NORDRHEIN-WESTFALEN (NRW), HESSEN (HE), BAYERN (BY), NIEDERSACHSEN (NI) UND SCHLESWIG-HOLSTEIN (SH) UND B) BADEN-WÜRTTEMBERG (BW), MECKLENBURG-VORPOMMERN (MV), SACHSEN (SN), RHEINLAND-PFALZ (RP), BREMEN (HB), THÜRINGEN (TH) UND BRANDENBURG (BB).

III. ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag wurden unterschiedliche Aspekte des Aufbaus und Betriebs elektrischer Busbetriebshöfe analysiert. Die Auslegung von Busbetriebshöfen kann durch die Beeinflussung von mehreren Parametern optimiert werden. Zunächst wurde das Verhalten der schon geplanten Busbetriebshöfe hinsichtlich deren Zuverlässigkeit unter

Berücksichtigung von unterschiedlichen Fehlerszenarien analysiert. Hierbei hat die vorgesehene Bereitstellung einer Notstromversorgung den möglichen Einfluss von bestimmten Fehlern reduziert. Danach wurde die Reduzierung der Lastenspitze untersucht. Mittels der beiden vorgestellten Optimierungsmethoden „Greedy“ und „heuristisch“ konnte die Lastenspitzenminimierung erfolgen. Anschließend wurde eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt, die die Gesamtkosten des Busbetriebshofs berechnet.

Mithilfe der Berechnung wurden mehrere Optimierungsansätze verdeutlicht. Demzufolge konnte ein Prozess zur Standardisierung für die Auslegung der Busbetriebshöfe entwickelt werden. Das Resultat des Prozesses erfasst die Optimierung der Komponenten der Ladeinfrastruktur und der entsprechenden Gesamtkosten. Darauf aufbauend wurde die Analyse erweitert, um den Einfluss des geplanten Aufbaus von Ladeinfrastrukturen abzuschätzen. Dabei wurde die Auswirkung dieser Umstellung auf das deutsche Energiesystem mitberechnet. Die Berechnung umfasst den Energieverbrauch pro Bundesland. Anschließend kann die Auslegung der Busbetriebshöfe mithilfe der oben genannten Methoden effizienter und kostenoptimierter umgesetzt werden.

DANKSAGUNG

Diese Arbeit ist Teil des Projektes “Wissenschaftliche Begleitforschung zum Aufbau von Ladeinfrastrukturen auf Busbetriebshöfen” und wird vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur gefördert (AKZ G20/3552.1/3).

LITERATUR

- [1] M. Eskander et al., Beeinflussung der Übertragbarkeit der Ladeinfrastruktur von Busbetriebshöfen in Hamburg auf andere Städte, *Hamburger Beiträge zum technischen Klimaschutz 2019*, D. Schulz, Hrsg., Bd. 1. Hamburg, Germany, Helmut-Schmidt-Universität, 2020.
- [2] M. Eskander, A. Jahic und D. Schulz, „Reliability Analysis of Large-Scale Electric Bus Depots Based on Different Failure Scenarios,“ in *IEEE Electric Power and Energy Conference (EPEC)*, Edmonton, AB, Canada, 2020.
- [3] J. Rymarz, A. Niewczas und J. Stoklosa, „Reliability Evaluation of the City Transport Buses under Actual Conditions,“ *Transport and Telecommunication*, Bd. 4, Nr. 16, S. 259-266, 2015.
- [4] A. Bagheri und C. Zhao, „Distributionally Robust Reliability Assessment for Transmission System Hardening Plan Under N – k Security Criterion,“ *IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY*, Bd. 2, Nr. 68, S. 653-662, 2019.
- [5] A. Jahic, M. Eskander und D. Schulz, „Bus Depot Simulator: Steady-State Python and DigSilent Co-simulation for Large-Scale Electric Bus Depots,“ in *Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems*, Hamburg, Germany, 2019.
- [6] A. Jahic, M. Eskander und D. Schulz, „Charging Schedule for Load Peak Minimization on Large-Scale Electric Bus Depots,“ *Applied Sciences*, Bd. 9, Nr. 9, S. 1748, 2019.
- [7] A. Jahic, M. Eskander und D. Schulz, „Preemptive vs. non-preemptive charging scheduling for large scale electric bus depots,“ in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe*, Bucharest, Romania, 2019.
- [8] D. Jefferies und D. Göhlich, „A Comprehensive TCO Evaluation Method for Electric Bus Systems Based on Discrete-Event Simulation Including Bus Scheduling and Charging Infrastructure,“ *World Electric Vehicle Journal*, Bd. 11, Nr. 3, S. 56, 2020.
- [9] A. Grauers, S. Boren und O. Enerbäck, „Total Cost of Ownership Model and Significant Cost Parameters for the Design of Electric Bus Systems,“ *Energies*, Bd. 13, Nr. 12, S. 3262, 2020.
- [10] N. Quarles, K. M. Kockelman und M. Mohamed, „Costs and Benefits of Electrifying and Automating Bus Transit Fleets,“ *Sustainability*, Bd. 12, Nr. 10, S. 3977, 2020.
- [11] A. Jahic, M. Plenz and D. Schulz, „Impact of route and charging scheduling on the total cost of ownership for electric bus depots,“ in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe*, Espoo, Finland (In Druck), 2021.
- [12] M. Dietmannsberger, M. Meyer, M. Schumann und D. Schulz, „Anforderungen an das Stromnetz durch Elektromobilität, insbesondere Elektrobusse, in Hamburg,“ Hamburg, Germany, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, 2016.
- [13] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, „E-Bus-Projekte in Deutschland,“ [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vdv.de/e-bus-projekt.aspx>. [Zugriff am 12. Oktober 2020].
- [14] M. Faltenbacher, A. Hendrich und S. Kupferschmid, „Projektübersicht 2019/2020 Zero Emission Busse in Deutschland, Im Rahmen der Programmbegleitforschung Innovative Antriebe im straßengebundenen ÖPNV,“ Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin, Deutschland, 2020.
- [15] A. Jahic, M. Eskander, E. Avdevious und D. Schulz, Abschätzung der Auswirkungen einer Umstellung auf Elektro-Busse auf das deutsche Energiesystem, *Hamburger Beiträge zum technischen Klimaschutz 2020*, D. Schulz, Hrsg., Bd. 2. Hamburg, Germany, Helmut-Schmidt-Universität, 2021.