

Mehrdimensionale Untersuchung von Verkehrsemissionen und Elektrobussen

Mina Eskander*, Felix Heider, Detlef Schulz

Professur für Elektrische Energiesysteme

Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

Hamburg, Deutschland

*mina.eskander@hsu-hh.de

Toralf Müller*, Christian Thoss, Florian Leunig

Abteilung für Elektromobilität

Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein GmbH

Hamburg, Deutschland

*toralf.mueller@vhhbus.de

Kurzfassung – Die Anzahl der Kraftfahrzeuge in Großstädten wächst jährlich. Das führt zu verschiedenen Problemen wie beispielsweise Umweltverschmutzung durch Fahrzeugabgase und Staus. Der Busverkehr ist eine Lösung für diese Probleme. Um die Umweltauswirkungen des öffentlichen Verkehrs zu verringern, fordern immer mehr Städte die Elektrifizierung ihrer Busflotten. Dies wird einen Beitrag dazu leisten, die Ziele zur Reduzierung der CO₂-Emissionen im Verkehrssektor zu erreichen. Diese Studie behandelt das Thema der Umweltbelastung durch den öffentlichen Busverkehr unter verschiedenen Aspekten. Dabei wird die Methode der Szenarioanalyse verwendet, um den Energieverbrauch, die CO₂-Emissionen, die Schadstoffemissionen des Verkehrssektors und die Lärmbelastung zu analysieren. Durch die Analyse werden die positiven Effekte auf Umwelt- und Lärmbelastung durch die Elektrifizierung sichtbar.

Stichworte – Busbetriebshof, Klimawandel, Lärmbelastung, Schadstoffemission

I. EINLEITUNG

Die Nutzung von Bussen kann die Höhe der Gesamtemissionen des Verkehrssektors massiv reduzieren. Dies geschieht aufgrund der höheren Beförderungskapazität von Bussen im Vergleich zu Autos oder Motorrädern, wodurch der absolute Schadstoffausstoß je beförderter Person abnimmt [1]. Bei der tatsächlichen Umstellung der konventionellen Busse auf Elektrobusse sind verschiedene Aspekte zu berücksichtigen, wobei sich diese Arbeit auf die Umweltauswirkungen fokussiert.

Die Klimaauswirkungen der Umstellung von Busflotten auf Elektrobusse lassen sich anhand der Emissionen in verschiedene Aspekte klassifizieren. Der Fokus liegt auf der Untersuchung der Emissionen der Diesel- und Elektrobussflotte in Hamburg. Drei unterschiedliche Emissionsherkünfte wurden berücksichtigt:

- Emissionen während der Batterie-Herstellung.
- Emissionen, die bei der Herstellung von Energieträgern entstehen (Well-to-Tank).
- Emissionen, die beim Befahren der Strecke selbst entstehen (Tank-to-Wheel).

Einerseits liegt der größte Anteil der CO₂-Emissionen von Elektrobussen in der Batterieherstellung. Im Durchschnitt, sind dafür 75 kg/kWh anzusetzen [2]. Andererseits erzeugt die Herstellung von Diesel- und Elektrobussen näherungsweise die gleichen Emissionen. Daher wurden nur die Emissionen während der Herstellung von Batterien berücksichtigt,

während diejenigen, die aus der Herstellung von Bussen resultieren, in dieser Studie vernachlässigt wurden. Die im Batterieherstellungsprozess verbrauchte elektrische Energie verursacht etwa die Hälfte der Emissionen im Zusammenhang mit der Batterieproduktion [2]. Demzufolge kann die Nutzung erneuerbarer Energien zu einem „saubereren“ Batterieherstellungs-Prozess führen. Es wird geplant, die CO₂-Intensität der Stromproduktion in den meisten Märkten bis 2030 um mehr als 55 % im Vergleich zum Jahr 1990 zu reduzieren. Zusätzlich sollen die Emissionen im Verkehrsbereich bis 2030 um 40% bis 42% im Vergleich zu 1990 reduziert werden [3]. Im Allgemeinen werden die Umweltauswirkungen in den folgenden Kategorien unterschieden:

- Auswirkungen auf die Gesundheit, insbesondere konzentriert auf:
 - Humantoxizität,
 - Auswirkungen der Luftqualität auf die Gesundheit mit Schwerpunkt auf Stickoxide (NO_x) und Feinstaub (PM).
- Auswirkungen auf das Ökosystem, einschließlich Wasserökotoxizität.

Die zukünftige Reduzierung der CO₂-Emissionen im Verkehr kann vor allem unter zwei Aspekten betrachtet werden. Auf der einen Seite kann die Verringerung des Anteils des CO₂-Straßenverkehrsumsatzes zur Erreichung von Energieeinsparungen und Emissionsreduzierungen im Verkehrsbereich beitragen. Auf der anderen Seite können Energieeinsparungen und Emissionsminderungen im Straßenverkehr durch eine Anpassung des Energiemixes erzielt werden [4]. Zusätzlich ist es erforderlich das Energiesystem zu verbessern und die Anwendung von netzdienlichen Technologien wie Vehicle to Grid (V2G) umzusetzen. Dabei wird die Speicherkapazität von den stationären Speichern basierend auf dem Ladebedarf der Elektrofahrzeuge bestimmt. Dadurch kann die weitere Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien gewährleistet werden, indem bei hoher regenerativer Energieproduktion bereits eine Speicherung erfolgt [5]. Im Allgemeinen spielt die Wahl des Transportmittels als Emissionsquelle eine wichtige Rolle. Verschiedene Transportmittel haben unterschiedliche CO₂-Emissionsniveaus.

II. SZENARIENBESCHREIBUNG UND ERGEBNISSE

A. Klimaauswirkungen der Umstellung von Busflotten auf Elektrobusse

Um die Klimaauswirkungen der Umstellung auf Elektrobusse abzubilden, sind die Well-to-Tank- und die Tank-to-Wheel-Emissionen zu berücksichtigen. Im Prinzip entstehen die Well-to-Tank-Emissionen während der Herstellung eines Energieträgers. Wobei die Tank-to-Wheel-Emissionen nur eine Teilmenge davon darstellen und sich nur auf die Nutzung eines Energieträgers während des Betriebs beziehen [6]. Im Allgemeinen erzeugt die Herstellung eines typischen Elektrofahrzeugs mehr CO₂-Emissionen im Vergleich zum Verbrenner. Dies liegt darin begründet, dass die Batterieherstellung eine Umweltbelastung mit sich bringt. Wird die gesamte Lebensdauer des Fahrzeuges betrachtet, sind die gesamten Treibhausgasemissionen (THG) eines Elektrofahrzeugs aus der Herstellung, dem Laden und dem Fahren geringer als bei Verbrennungsfahrzeugen [7].

Um die Effekte der Batterieherstellung zu reduzieren, arbeitet man an Lösungen, um die genutzten Batterien einer Zweitverwendung zuzuführen. Dadurch sinkt der Bedarf an neuen Materialien deutlich. Nach dem Ende der Zweitnutzung ist ein weiterer Lösungsansatz zur Reduzierung der Emissionen die Batterie-Materialien zu recyceln, wobei hier noch intensiver Forschungs- und Entwicklungsaufwand betrieben werden muss [8].

B. Emissionsvergleich von Diesel- und Elektrobusen

Für die Bewertung der Luftverschmutzung sind die beiden Busunternehmen in Hamburg, die VHH GmbH und die HOCHBAHN Hamburg AG berücksichtigt worden. Dabei wird die gesamte Fahrstrecke (S_G) basierend auf dem Mittelwert der Fahrstreckenlänge ($S_{\text{Mittelwert}}$) mithilfe der Gleichung (1) über alle Busdepots i berechnet. Damit werden die gesamten CO₂-Emissionen ermittelt.

$$S_G = \sum_i^{\text{Depots}} S_{i,\text{Mittelwert}} \cdot N_{i,\text{Busse}} \cdot 365 \quad (1)$$

Die HOCHBAHN AG verfügte laut dem Jahresbericht 2019 in diesem Jahr über 1090 Busse. Diese Busse sind rund 51,6 Mio. Nutzwagenkilometer gefahren [9]. Gleichzeitig betreibt die VHH GmbH 676 Busse, die rund 34 Mio. Nutzwagenkilometer gefahren sind [10]. Um den Einfluss der Anzahl der Busse stärker zu verdeutlichen, wird ein Vergleich zwischen der ausgestoßenen CO₂-Menge von Dieseln und von Elektrobusen gezogen. Wenn die Dieseln der Euro VI-Norm entsprechen, stoßen insgesamt 1766 Busse etwa 78,32 tCO₂ pro Jahr aus. Dabei wurde der CO₂-Ausstoß mit 915 g/km berechnet [11]. Zur Berechnung des CO₂-Ausstoßes während des Ladens von Elektrobusen wird angenommen, dass ein Bus etwa 1,6 kWh/km verbraucht [12]. Das bedeutet bei gleichen Nutzwagenkilometer einen Gesamtenergie-Verbrauch von 136,96 GWh.

C. Luftverschmutzung durch Aufladen von Elektrobusen

Trotz der Tatsache, dass Elektrobusse auf einem Null-Auspuffemissions-Standard basieren, erfordert der Batterieladevorgang eine Energieerzeugung und -übertragung. Dies erfordert eine Energieerzeugung aus noch immer größtenteils konventionellen Kraftwerken mit CO₂-

Emissionen. Dementsprechend sollten die Auswirkungen des Ladens berücksichtigt werden. Zum Laden von Elektrobusen wird laut der Busbetreiber möglichst Energie aus erneuerbaren Energiequellen verwendet, was den Schadstoffausstoß deutlich reduziert. Um die Klimarelevanz der Stromerzeugung darzustellen, werden die Emissionen in diesem Beitrag einheitlich in gCO₂ pro erzeugter kWh Strom ausgewiesen. Daher werden die durchschnittlichen Werte der CO₂-Belastung in g/kWh aus erneuerbaren Energiequellen und nicht erneuerbaren Energiequellen berücksichtigt. Laut des jährlichen Berichtes zum aktuellen Strommix in Deutschland, stammen rund 41,4% der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen [13]. Das führt bei der Energieversorgung zur 349 gCO₂/kWh CO₂-Ausstoß [14]. Das heißt, dass die Energieerzeugung der vorher genannten 136,96 GWh zum Ausstoß von 47.799 tCO₂ führen würde. Die Prognosen gehen davon aus, dass bis 2030 der Anteil erneuerbarer Energien in Deutschland 64% erreichen wird [15].

D. Luftverschmutzung durch Vorkonditionierung von Elektrobusen

Vor der Benutzung und Beförderung von Personen werden Businnenräume aufgeheizt. Dieser Energieaufwand für die Beheizung stellt eine zusätzliche Problemstellung dar. Elektrische Heizungen führen zu deutlich größeren Batterien und höheren Gewichten, die sich grob über das Gewichts- zu Energiegehalts-Verhältnis von 10 kg/kWh abschätzen lassen [16]. Da die Technologie der Kraftstoffheizung nicht emissionsfrei ist, muss auch deren Kraftstoffverbrauch bei der Umweltbelastung berücksichtigt werden [17]. Dabei wurde gezeigt, dass, wenn alle rund 27.000 Stadtbusse in Deutschland mit einer Wärmepumpe anstelle einer Dieselheizung beheizt würden, die Einsparung etwa 21.107 tCO₂ im Jahr beträgt. Basierend darauf, entstehen durch die Beheizung jedes Busses mittels einer Wärmepumpe jährlich etwa 0,782 tCO₂ je Bus. Wird die Heizsituation für das Hamburger Szenario P_{Vorkond} mit Dieselheizungen betrachtet, erzeugt die Beheizung aller 1766 Busse (N_{Busse}), unabhängig von ihrem Typ, nach Gleichung (2) etwa 1400 tCO₂ pro Jahr.

$$P_{\text{Vorkond}} = P_{\text{VorkondBus}} \cdot N_{\text{Busse}} \quad (2)$$

Da Elektrobusse bei ihrer Ladung und Vorkonditionierung die Umwelt belasten, wird der quantitative Vergleich der Indikatoren der Luftverschmutzung durch CO₂ mit Dieseln analysiert. Die Ergebnisse der Analyse weisen darauf hin, dass durch die Elektrifizierung des Betriebshofs eine Reduzierung der CO₂-Umweltbelastung aus dem öffentlichen Busverkehr über den gesamten Lebenszyklus um ca. 52% erreichbar ist [18]. Hinzu kommt, dass durch die Tendenz zum Umstieg auf Busheizungen mit Wärmepumpen und dem schrittweisen Umstieg auf erneuerbare Energiequellen die Vorteile der Elektrifizierung noch größer werden.

E. Gesamte NOx-Belastung durch Elektrobusse

Bei der Erstellung von emissionsarmen öffentlichen Verkehrsmitteln ist die NOx (Stickstoffoxid)-Belastung der Elektrobusse mit zu betrachten. Dabei machen die Stadtbusse etwa 25 % der vom Transportsektor emittierten Emissionen aus [19].

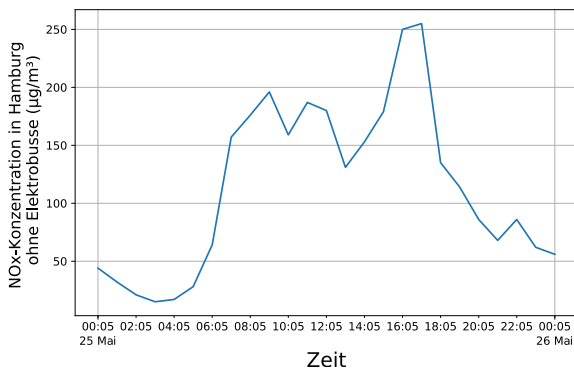


ABBILDUNG 1: NOx-KONZENTRATION IN DER HAMBURGER LUFT VOR DEM EINSATZ VON ELEKTROBUSSEN [20].

Die Emissionsdaten der Hamburger Meteorologischen Station in der Habichtstraße ermöglichen eine beispielhafte Betrachtung der möglichen Reduktion der NOx-Konzentration in die Luft. Wie in der ABBILDUNG 1 dargestellt, wird die NOx-Konzentration in Hamburg an einem bestimmten Tag zunächst ohne Berücksichtigung von Elektrobussen gemessen.

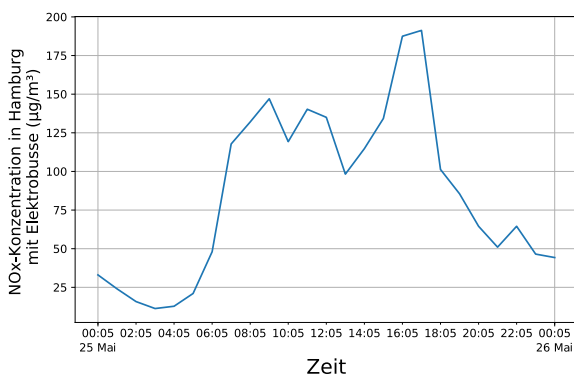


ABBILDUNG 2: REDUZIERUNG DER NOx-KONZENTRATION IN HAMBURG DURCH DEN EINSATZ VON ELEKTROBUSSEN [20].

Dies führte in der Spitze zu einer NOx-Konzentration in der Luft von $255 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [20].

TABELLE I: LUFTBELASTUNGEN DURCH KONVENTIONELLE BUSSE DER HOCHBAHN HAMBURG AG UND DER VHH GMBH PRO JAHR BASIEREND AUF DEN MESSERGEBNISSEN VON [11].

Betreiber	Anzahl der Busse	Zurückgelegte Strecke Mio. km/Jahr	CO ₂ pro Jahr (tCO ₂)	NOx pro Jahr (Tonne)	NO ₂ pro Jahr (Tonne)
HOCHBAHN	1090	51,6	47,21	21,16	4,13
VHH	676	34	31,11	13,94	2,72
Summe	1766	85,6	78,32	35,1	6,85

ABBILDUNG 2 zeigt die möglichen Ergebnisse der gleichen Messstation nach dem Einsatz von Elektrobussen durch die Reduzierung um die oben genannten 25% an den Emissionen des Transportsektors, die als maßgeblich angenommen werden. In der Spitze bedeutet diese eine NOx Konzentrationsreduzierung um $63,75 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die vielfältigen

Wirkungen aller Luftbelastungen durch Busse sind zusammenfassend in TABELLE I gezeigt [11].

F. Geräuschpegel durch Elektrobusse

Ein weiterer Aspekt bei der Umstellung der Busflotten auf Elektrobusse ist der Unterschied im Geräuschpegel zwischen verschiedenen Bus-Typen. Um die Geräuschpegel aller Typen zu vergleichen, wird als allgemeines Bezugs-kriterium die Busgeschwindigkeit gewählt. In diesem Vergleich werden konventionelle Verbrennungs-, Hybrid-Elektro-, Brennstoffzellen-Elektro- und Batteriebusse betrachtet. Aus diesem Grund werden verschiedene Geschwindigkeiten ausgewählt, beginnend bei 10 km/h bis zu 50 km/h. Wie in Gleichung (3) gezeigt, werden die Schallpegel (SP) in Dezibel dargestellt. Dabei stellt die Variable (N_{Busse}) die Anzahl von Bussen und die Variable (SP_i) die spezifische Lärmbelastung pro Bus-Typ dar. Wie in die ABBILDUNG 3 ersichtlich, steigt der Geräuschpegel bei der Betrachtung von einem Bus ($N_{\text{Busse}}=1$) mit zunehmender Busgeschwindigkeit [21] - [22]. Die Daten für konventionelle Brennstoffzellen- und Hybridbusse stammen aus [21], die Daten für batteriebetriebene Busse aus [22]. Somit sind Abweichungen z.B. durch unterschiedliche Messaufbauten und -entfernungen möglich, der Vergleich zeigt jedoch die grundsätzliche Tendenz. Um den Grad der Geräuschentwicklung besser bewertbar und vergleichbar zu machen, zeigt ABBILDUNG 4 den Geräuschpegel vergleichbarer Geräte des täglichen Gebrauchs [23].

$$SP = 10 \cdot \log_{10} \left(\sum_{i=1}^{N_{\text{Busse}}} 10^{\left(\frac{SP_i}{10}\right)} \right) \quad (3)$$

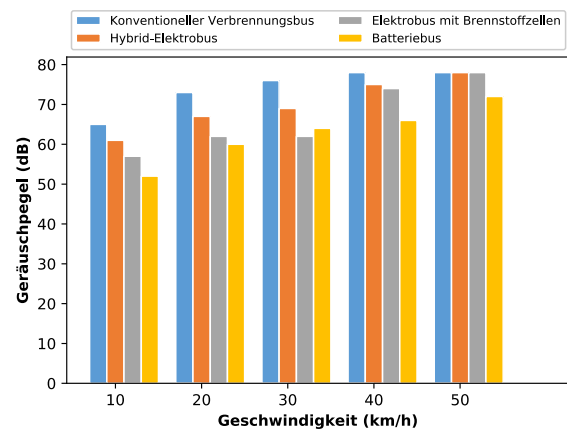


ABBILDUNG 3: GERÄUSCHPEGEL VON Bussen VERSCHIEDENER Typen ALS FUNKTION DER BUSGESCHWINDIGKEIT, ANGEPAßT AUS [21] - [22].

Die Batteriebusse weisen erwartungsgemäß von allen Typen die geringste Lärmemission auf, während konventionelle Busse den höchsten Geräuschpegel darstellen. Im Durchschnitt erzeugen sie rund 20 % mehr Lärm als Batteriebusse, wobei der Unterschied mit steigender Geschwindigkeit abnimmt.

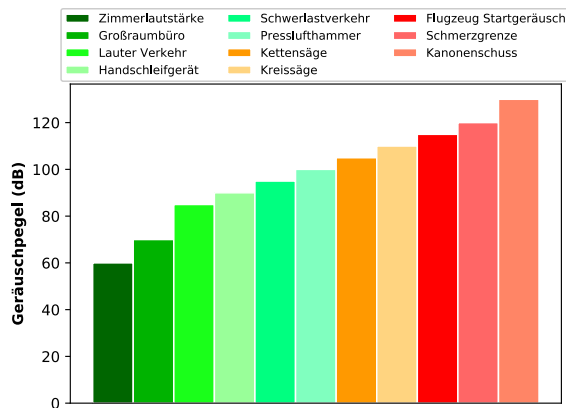


ABBILDUNG 4: GERÄUSCHPEGEL VON VERGLEICHBAREN GERÄTEN DES TÄGLICHEN GEBRAUCHS [23].

III. FAZIT

Dieser Beitrag beschreibt die Rolle des busgestützten öffentlichen Personennahverkehrs im Bereich der Luft- und Lärmemissionen. Dabei wurde gezeigt, wie sich die mögliche Veränderung durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen in der Zukunft auf Lärm- und Emissionsbilanzen auswirken kann. Zu Beginn wurden die verschiedenen Emissionsquellen aufgelistet. Anschließend wurde jede Emissionsart im Detail untersucht, um ihre Auswirkungen auf die Umgebung zu quantifizieren. Dazu wurden die CO₂-Emissionen sowohl für Diesel- als auch für Elektrobusse auf Basis der gefahrenen Streckenkilometer berechnet. Danach wurden die aus dem Laden der Elektrobusse resultierenden Emissionen ermittelt. In diesem Zusammenhang wurde der Energiebedarf zum Laden von Elektrobussen gemäß des deutschen Strommixes in einen erneuerbaren und einen nicht erneuerbaren Anteil untergliedert. Ein weiterer, der in diesem Papier betrachteten Hauptaspekte ist die benötigte Energie für die Vorkonditionierung von Bussen. Diese wird durch die Umsetzung der durchschnittlich benötigten Energie für die Vorkonditionierung für jeden Bus pro Jahr ermittelt. Zusätzlich wird die NO_x-Emission berücksichtigt. Dazu wurde ein Vergleich der über den Tag ermittelten NO_x-Konzentration mit Dieseln und, unter Annahme einer vollständigen Elektrifizierung der Busflotte, projiziert auf den gleichen Tag mit Elektrobussen, durchgeführt. Zusätzlich erfolgte eine Untersuchung zu den Lärmemissionen verschiedener Bus-Typen bei im Stadtverkehr üblichen Geschwindigkeiten. Dabei konnte gezeigt werden, dass durch die Elektrifizierung des Personennahverkehrs allgemein bekannte Risikofaktoren für Krankheiten, verursacht durch Luftverschmutzung und Lärm, reduziert werden können. Zur genaueren Quantifizierung der Vorteile von Elektrobussen, werden weitere Einflüsse auf die ökonomischen und ökologischen Aspekte in zukünftigen Arbeiten untersucht. Zum Beispiel die Zweit- (Second-Life) Nutzung von Batterien, die zu einem längeren Zeitraum führt, über den die Emissionen des Herstellungsprozesses verteilt werden. Weitere positive Effekte auf den bilanziellen Vergleich könnten sich aus zukünftigen Vehicle-to-Grid Anwendungen ergeben.

IV. DANKSAGUNG

Die Autoren danken der HOCHBAHN Hamburg AG und der Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein GmbH (VHH) ganz herzlich für die Unterstützung und die Informationen.

LITERATUR

- [1] W. Arasid und R. Yusuf, „Analysis of Bus Transportation as an Environmentally Friendly Transportation and Congestion Solution using Agent Based Modeling,“ in *6th International Conference on Interactive Digital Media (ICIDM)*, Bandung, Indonesia, 2020.
- [2] A. Hoekstra und M. Steinbuch, „Vergleich der lebenslangen Treibhausgasemissionen von Elektroautos mit den Emissionen von Fahrzeugen mit Benzin- oder Dieselmotoren,“ Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2020.
- [3] T. McPhie, V. Loonela, D. Ferrie und S. De Keersmaecker, „European Green Deal: Commission proposes transformation of EU economy and society to meet climate ambitions,“ The European Commission, Brussels, 2021.
- [4] M. Le und C. Haiyan, „Study on Transportation Energy Carbon Emission Based on System Dynamics,“ in *9th International Conference on Traffic and Logistic Engineering*, Macau, China, 2021.
- [5] Y. Xu, J. Liang, B. Cheng, W. He, J. Shu, K. Li und Y. Xie, „Research on the impact of re-electrication in the transportation sector on carbon emission and pollutant emission in Yunnan province,“ in *Power System and Green Energy Conference (PSGEC)*, Shanghai, China, 2021.
- [6] H. Helms, C. Kämper, K. Biemann, U. Lambrecht, J. Jöhrens und K. Meyer, „Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial,“ Agora Verkehrswende, Berlin, 2019.
- [7] G. Bieker, „A Global Comparison Of The Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions Of Combustion Engine And Electric Passenger Cars,“ ICCT – International Council on Clean Transportation Europe, Berlin, 2021.
- [8] Y. Kotak, C. Marchante Fernández, L. Canals Casals, B. Satishbhai Kotak, D. Koch, C. Geisbauer, L. Trilla, A. Gómez-Núñez und H.-G. Schweiger, „End of Electric Vehicle Batteries: Reuse vs. Recycle,“ *Energies*, Bd. 14, Nr. 8, p. 2217, 2021.
- [9] Hamburger Hochbahn AG, „Hochbahn Lagebericht und Jahresabschluss,“ Hamburg, 2019.
- [10] Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein GmbH, „VHH-Geschäftsbericht,“ Hamburg, 2019.
- [11] J. Speeren, W. Vonk und R. Vermeulen, „NO_x and PM emissions of a Mercedes Citaro Eorp VI bus in Urban operation,“ TNO, Delft, 2014.
- [12] M. Dietmannsberger, M. Meyer, M. Schumann und D. Schulz, Anforderungen an das Stromnetz durch Elektromobilität, insbesondere Elektrobusse, in Hamburg, Hamburg: Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, 2016.
- [13] EUPD Research, [Online]. Available: <https://www.eupd-research.com/en/using-renewable-energy-potentials-for-increasing-electricity-demand/>. [Zugriff am 24 Oktober 2022].
- [14] I. Tiseo, „Statista,“ [Online]. Available: www.statista.com. [Zugriff am 24 Oktober 24].
- [15] F. Chr. Matthes, H. Hermann, C. Loreck, R. Mendelvitsh und V. Cook, „Die deutsche Kohle-Verstromung bis 2030,“ Öko-Institut e.V., Berlin, 2019.
- [16] R. Langbein, „Lithium-Ionen-Batterie für Elektroautos im Fokus der Aktivitäten von Industrie und Forschung: Kriterien: Leistung, Gewicht, Preis,“ Konradin-Verlag Robert Kohlhammer GmbH, 2011.
- [17] R. Kratzing, „HEAT2GO - Entwicklung eines schnellladefähigen Latentwärmespeichers für die Beheizung von Elektrobussen,“ Fraunhofer Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI, Dresden, 2017.
- [18] K. W. Lie, T. A. Aynnevag, J. J. Lamb und K. M. Lien, „The Carbon Footprint of Electrified City Buses: A Case Study in Trondheim, Norway,“ *Energies*, Bd. 14, Nr. 3, p. 770, 2021.
- [19] United Nations Environment Programme (UNEP), „Tackling urban air quality improvement with zero emission buses,“ [Online]. Available: <https://www.unep.org/explore-topics/transport/what-we-do/electric-mobility/electric-buses>. [Zugriff am 12 Oktober 2022].

- [20] Hamburger Luftmessnetz, [Online]. Available: <http://luft.hamburg.de/clp/schadstoffe/clp1/station/68hb>. [Zugriff am 24 Oktober 2022].
- [21] F. Laib, A. Braun und W. Rid, „Modelling noise reductions using electric buses in urban traffic. A case study from Stuttgart, Germany.“, *Transportation Research Procedia*, Bd. 37, pp. 377-384, 2018.
- [22] J. Turcsany, „Noise Benefits with Electric Buses,“ VOLVO Buses VBC, 2016.
- [23] Variotherm Heizsysteme, „Variotherm,“ [Online]. Available: <https://www.variotherm.com/de/wissen/was-hoeren-wir-wie-laut.html>. [Zugriff am 24 Oktober 2022].