

Abschätzung der Auswirkungen einer Umstellung auf Elektro-Busse auf das deutsche Energiesystem

Amra Jahic*, Mina Eskander, Edvard Avdevicius und Detlef Schulz

Fakultät für Elektrotechnik

Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

Hamburg, Germany

*amra.jahic@hsu-hh.de

Kurzfassung – Mit dem Ziel der Reduzierung von schädlichen Emissionen im öffentlichen Personennahverkehr setzen viele deutsche Städte auf Elektromobilität. In einigen Städten hat die Umstellung auf Elektro-Busse längst begonnen und andere zeigen sehr ambitionierte Ziele für den Zeitraum bis 2030. Die steigende Anzahl von Elektro-Bussen bringt aber auch viele Herausforderungen mit sich, wie bspw. der Ausbau von passenden Ladeinfrastrukturen, aber auch die Auswirkungen auf die elektrischen Netze und das gesamte Energiesystem. Für die Planung der zukünftigen Energiesysteme ist es daher sehr wichtig, die von den Elektro-Bussen zu erwartenden Lastprofile und ihren Energieverbrauch zu analysieren. Während die Lastprofile den Ausbau der elektrischen Netze stark beeinflussen können, ist der gesamte Energieverbrauch für die Planung der Stromerzeugung in der Zukunft entscheidend. Aus diesem Grund wird in diesem Beitrag die geplante Umstellung auf Elektro-Busse deutschlandweit analysiert, und zwar für die Zeiträume 2020, 2025 und 2030. Weiterhin wurden die zu erwartenden Lastprofile und der Energieverbrauch in allen Bundesländern untersucht.

Stichworte – *Elektrobusse, Ladeinfrastruktur, deutsches Energiesystem, Lastprofile, Energieverbrauch*

NOMENKLATUR

BMVI	Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur
E-Busse	Elektro-Busse
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen

I. EINLEITUNG

Die Anschaffung von elektrischen Bussen wurde in den vergangenen Jahren durch unterschiedliche Programme der Bundesregierung gefördert. Diese Förderungen, der Markthochlauf, eine steigende Marktverfügbarkeit von Elektro-Bussen (E-Bussen) sowie eigene Investitionen und das Ziel vieler Unternehmen, eine emissionsfreie Flotte zu betreiben, haben zu steigenden Zahlen von E-Bussen, geführt. Die Umstellung auf E-Busse hat viele Vorteile für die Lebensqualität und die Gesundheit der Einwohner in den Städten und trägt zur Umsetzung der von der Bundesregierung beschlossenen Klima- und Umweltschutzziele bei. Die Elektrifizierung der Busflotten stellt aber gleichzeitig auch eine große Herausforderung dar. Zunächst muss die passende Ladeinfrastruktur aufgebaut werden. Das Laden der Busse kann zu höheren Lastspitzen und zu einer höheren Auslastung des elektrischen Netzes führen [1, 2]. Je nach Auslastung müssen die Netzbetreiber die Kapazitäten des Netzes

erweitern. Die E-Busse sind auch große Stromverbraucher und ihre weitere Entwicklung in Deutschland ist ein wichtiger Faktor für die Planung der Stromerzeugungskapazitäten in der Zukunft [3].

Dieser Beitrag untersucht die Umstellung auf E-Busse in Deutschland und fokussiert sich auf die Analyse der zu erwartenden Lastprofile und des gesamten Energieverbrauchs in allen Bundesländern. Dabei wird der Stand im Jahr 2020 untersucht, sowie die geplante Entwicklung in den Jahren 2025 und 2030. Nach einer kurzen Einleitung ist die Umstellung auf E-Busse in Deutschland im Kapitel II dargestellt. Dabei wurden die Anzahl der Busse, welche schon im Betrieb sind, und die geplante Anzahl der Busse in den Jahren 2025 und 2030 für mehrere Städte in unterschiedlichen Bundesländern untersucht. Die für die Analyse genutzte Vorgehensweise ist im Kapitel III beschrieben. Hierfür wurde zuerst die Berechnung eines durchschnittlichen Lastprofils, basierend auf den bisherigen Erkenntnissen der Umstellung auf E-Busse in Hamburg, durchgeführt. Anschließend wird die Übertragung der Lastprofile auf Busbetriebshöfe in anderen Städten erklärt. Die Ergebnisse der Analyse, aufgeteilt in die Auswirkungen auf das Lastprofil und die Auswirkungen auf den Energieverbrauch, werden im Kapitel IV dargestellt. Zuletzt wird eine kurze Zusammenfassung der Analyse im Kapitel V gegeben.

II. UMSTELLUNG AUF E-BUSSE IN DEUTSCHLAND

Die TABELLE I zeigt den Überblick der E-Busse in Deutschland heute, sowie die geplante Anzahl in 2025 und 2030 für die Städte, die mehr als 20 E-Busse haben oder planen. Andere Städte, die 20 oder weniger Busse haben, bzw. planen, sind gemäß ihrer Bundesländer in der TABELLE II zusammengefasst. Die Grundlage für den Überblick sind die Datenbank des Verbands Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) [4] sowie die Projektübersicht des Bundesministeriums für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI) [5]. Weitere Informationen kommen von den Internetseiten der einzelnen Verkehrsunternehmen und anderen Quellen [6-24]. In dieser Arbeit werden nur die Städte analysiert, die in [4] und [5] berücksichtigt wurden, wie in der TABELLE I und TABELLE II gezeigt. Für den Fall, dass die Antriebstechnologie (Brennstoffzellen, Batterien oder Hybrid) für die geplanten emissionsfreien Busse noch nicht festgelegt ist, wurde angenommen, dass diese Busse batteriebetrieben sind. Zwei Städte haben sich bisher als Vorreiter beim Thema E-Mobilität im öffentlichen Personennahverkehr profiliert, Berlin und Hamburg. Mit der kompletten Elektrifizierung der Busflotten, werden im Jahr 2030 etwa 3000 E-Busse in diesen

Städten fahren. Laut den Plänen und Zielen der deutschen Verkehrsunternehmen könnten deutschlandweit im Jahr 2025 insgesamt 2964 E-Busse und im Jahr 2030 etwa 6210 E-Busse fahren.

Die Bundesländer Saarland und Sachsen-Anhalt werden in dieser Analyse nicht berücksichtigt, da die Recherche der Autoren bis zur Erstellung dieses Beitrags keine konkreten Daten über die geplante Anschaffung von E-Bussen in der Zukunft ergab.

III. VORGEHENSWEISE

A. Berechnung eines durchschnittlichen Lastprofils

Für die Berechnung der zu erwartenden Lastprofile auf elektrischen Busbetriebshöfen deutschlandweit wurde zuerst ein durchschnittliches Lastprofil berechnet.

TABELLE I: ÜBERBLICK DER ANZAHL VON E-BUSSEN IN DEUTSCHEN STÄDTEN IN 2020, SOWIE DER PLAN FÜR DIE JAHRE 2025 UND 2030.

Bundesland	Stadt	Quelle	Anzahl der E-Busse		
			2020	2025	2030
BE	Berlin	[6, 5]	108	700	1400
NW	Bonn	[7]	7	100	200
NI	Braunschweig	[4, 8]	6	48	48
HE	Darmstadt	[5]	2	80	80
NW	Düsseldorf	[5, 9]	14	24	32
NW	Essen	[4, 10]	5	5	283
HE	Frankfurt	[5, 11, 12, 23]	3	24	370
BW	Freiburg	[5, 24]	2	17	65
HH	Hamburg	[5]	74	765	1530
NI	Hannover	[5, 13, 14]	29	58	178
SH	Kiel	[5]	30	36	36
NW	Köln	[5]	10	101	363
MV	Schwerin	[5]	0	45	45
SN	Leipzig	[5]	25	38	38
SH	Lübeck	[15]	2	100	200
RP	Mainz	[5]	4	27	140
BW	Mannheim/Heidelberg /Ludwigshafen	[5]	6	36	120
BY	München	[5, 16]	6	191	382
NW	Münster	[17, 4]	5	100	200
BY	Nürnberg	[5]	7	80	160
HE	Offenbach	[4, 18]	7	36	36
NI	Osnabrück	[5]	13	62	62
MV	Rostock	[19]	0	23	47
HE	Wiesbaden	[5]	56	120	120
Andere Städte		[4, 5]	98	167	175

TABELLE II: ÜBERBLICK DER DEUTSCHEN STÄDTE, DIE 20 ODER WENIGER E-BUSSE FÜR DIE JAHRE 2025 UND 2030 PLANEN.

Bundesland	Stadt	Quelle
BY	Bad Neustadt an der Saale, Bad Wörishofen, Burghausen, Fürth, Regensburg und Würzburg	[4, 5]
BW	Aalen, Esslingen, Heidenheim an der Brenz, Künzelsau/Öhringen, Lahr, Ludwigsburg, Reutlingen, Rottweil und Waiblingen	[4, 5]
HB	Bremen	[20]
BB	Eberswalde	[4]
NW	Aachen, Bocholt, Bottrop, Duisburg, Extertal, Herten, Oberhausen, Bochum/Gelsenkirchen, Solingen	[4, 5, 22]
NI	Borkum	[4]
RP	Trier	[4]
TH	Bad Langensalza und Suhl/Zella	[4]
SN	Dresden	[5, 21]
SH	Pinneberg und Westerland	[4, 5]

Hierfür wurden die realen Umläufe der heutigen Dieselbusse von 13 Busbetriebshöfen der Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein GmbH in Hamburg genutzt: Ahrensburg, Bergedorf, Billbrook, Elmshorn, Geesthacht, Glinde, Lauenburg, Mölln, Norderstedt, Rahlstedt, Ratzeburg, Schenefeld und Quickborn. Die Lastprofile aller Busbetriebshöfe wurden für einen typischen Arbeitstag unter der Annahme berechnet, dass alle Dieselbusse durch E-Busse ersetzt wurden. Zur Vereinfachung der Analyse wurden weitere Annahmen getroffen:

- Alle Busse laden mit einer konstanten Leistung von 150 kW.
- Der Verbrauch der Busse ist typ- und temperaturabhängig, wie in der ABBILDUNG 1 gezeigt. Es handelt sich um Annahmen, da der tatsächliche Verbrauch von vielen weiteren Faktoren abhängig ist, wie z.B. Anzahl der Passagiere, Strecke, Verkehrsbedingungen usw.
- Wenn ein Bus länger als zwei Stunden auf dem Busbetriebshof steht, wird er vor der Abfahrt für eine Stunde lang vorkonditioniert. Die notwendige Leistung für die Vorkonditionierung ist temperaturabhängig, siehe ABBILDUNG 1. Die Vorkonditionierung oberhalb von 20 °C wurde in diesem Beitrag nicht berücksichtigt.
- Die Busse laden sofort nach ihrer Rückkehr zum Busbetriebshof. Es gibt kein intelligentes Lade-managementsystem.
- Bei der Zuweisung der Umläufe wird das sogenannte FIFO Prinzip (engl. First In First Out) verfolgt, unter der Bedingung, dass der Bus einen ausreichenden Ladezustand für den vorgesehenen Umlauf hat.
- Die Busse haben eine Reichweite bzw. Batteriekapazität, die dem Verbrauch des längsten Umlaufs für den entsprechenden Bustyp entspricht, zuzüglich einer Reserve von 20 %.
- Umläufe basieren auf typischen Werktagen. Die Unterschiede zu den Wochenenden und Feiertagen wurden nicht berücksichtigt.

Eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise bei der Berechnung der Lastprofile für einen bestimmten Busbetriebshof wurde in [25] dargestellt.

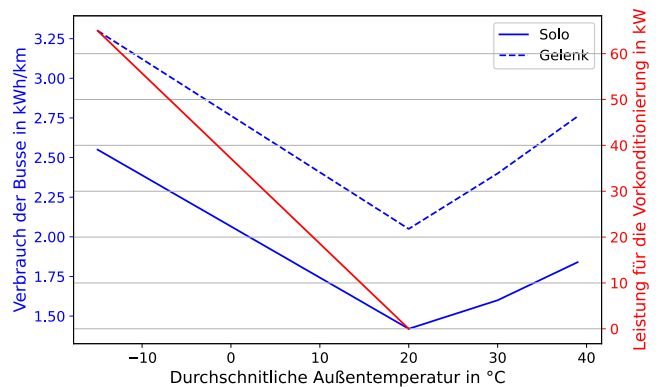


ABBILDUNG 1: TEMPERATURABHÄNGIGER VERBRAUCH DER SOLO- UND GELENKBUSSE (BLAU) UND DIE TEMPERATURABHÄNGIGE LEISTUNG FÜR DIE VORKONDITIONIERUNG (ROT).

Die ABILDUNG 2 zeigt das resultierende durchschnittliche Lastprofil eines Busses für einen typischen Tag im Winter mit einer Außentemperatur von 0 °C.

Die Gleichung 1 zeigt das Vorgehen bei der Berechnung. Die durchschnittliche Leistung $\bar{P}_{t,T}$ wird für jede einzelne Minute in einem Tag analysiert.

$$\bar{P}_{t,T} = \frac{\sum_{i \in LBH} P_{t,T,i}}{N_{ges}} \quad (1)$$

Dabei sind $P_{t,T,i}$ die Leistung für die Minute t und die Temperatur T auf dem Busbetriebshof i , LBH die Liste der 13 untersuchten Busbetriebshöfe und N_{ges} die gesamte Anzahl der Busse auf allen 13 Busbetriebshöfen. $\bar{P}_{t,T}$ wird für einen ganzen Tag von 00:00 Uhr bis 23:59 Uhr und für jede Temperatur -15 °C bis 42 °C berechnet.

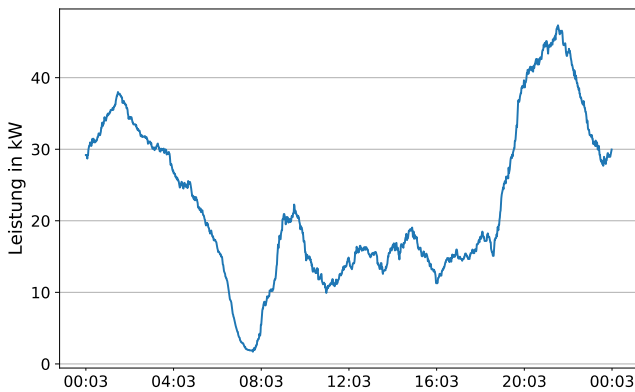
B. Berechnung der Lastprofile auf weiteren Busbetriebshöfen

Da die durchschnittliche Leistung mit N_{ges} normalisiert wurde, ist eine Skalierung auf eine geplante Anzahl von Bussen $N_{Busse,BH}$ und die Berechnung der entsprechenden Leistungen $P_{t,T,BH}$ auf einem anderen Busbetriebshof BH möglich, wie in Gleichung 2 gezeigt.

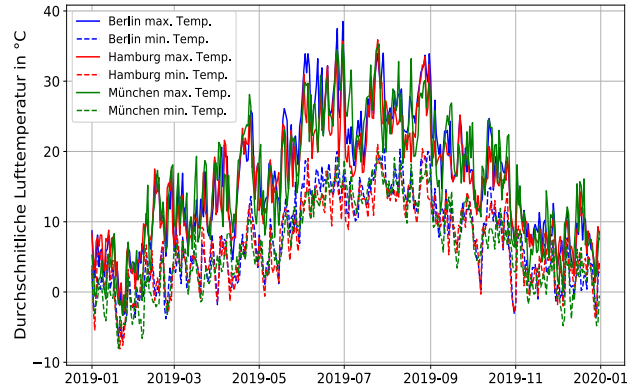
$$P_{t,T,BH} = \bar{P}_{t,T} \times N_{Busse,BH} \quad (2)$$

Die Anzahl der Busse auf anderen Busbetriebshöfen ist damit die einzige für die Berechnung notwendige Variable. Diese Vereinfachung ist erforderlich, da die Daten, wie z. B. Umläufe, Reichweiten und Bustypen, noch nicht deutschlandweit für alle einzelnen in der Zukunft bestehenden Busflotten und Busbetriebshöfe bekannt sind.

Die Größe $P_{t,T,BH}$ ist die Leistung für eine bestimmte Minute t sowie eine bestimmte Temperatur T . Um das ganze Lastprofil für ein Jahr darzustellen, wurden Temperaturprofile in allen Bundesländern berücksichtigt. Dafür wurden die verfügbaren Daten des Deutschen Wetterdienstes mit einer minimalen, maximalen und durchschnittlichen täglichen Temperatur für ein ganzes Jahr genutzt [20]. Für die Vereinfachung der Analyse wurde angenommen, dass alle Städte in einem Bundesland den gleichen Temperaturverlauf haben. Die ABILDUNG 3 zeigt den Verlauf der maximalen und minimalen täglichen Temperatur in den drei größten Städten Deutschlands, in Hamburg, München und Berlin für das Jahr 2019 [26].



ABILDUNG 2: DURCHSCHNITTLICHES LASTPROFIL EINES BUSES FÜR EINEN TYPISCHEN TAG IM WINTER MIT EINER AUßENTEMPERATUR VON 0 °C.



ABILDUNG 3: DURCHSCHNITTLICHE TÄGLICHE LUFTTEMPERATUR GEMESSEN IN DEN DREI GRÖßTEN STÄDTEN DEUTSCHLANDS IN 2019 [26].

Bei der Berechnung der $P_{t,T,BH}$ wurden immer die folgenden Randbedingungen berücksichtigt. Für die Vorkonditionierung gilt die minimale gemessene Temperatur, da sie zum größeren Verbrauch führt. Für den Verbrauch der Busse ist ein Vergleich zwischen dem Energieverbrauch der Busse bei minimaler Temperatur $E_{T,min}$ und bei maximaler Temperatur $E_{T,max}$ entscheidend, wie gezeigt in Gleichung 3. Es wurde immer die Temperatur mit dem größeren Verbrauch berücksichtigt.

$$T_{\text{Verbrauch}} = \begin{cases} T_{\max}, & \text{wenn } E_{T,\max} \geq E_{T,\min} \\ T_{\min}, & \text{wenn } E_{T,\max} < E_{T,\min} \end{cases} \quad (3)$$

Wenn beide Temperaturen definiert sind, kann das durchschnittliche Lastprofil für den analysierten Tag entsprechend ausgewählt werden.

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. „Unterwegsladen“ auf den Haltestellen (engl. Opportunity Charging) ist nicht berücksichtigt.
- Die Temperaturentwicklung in den kommenden Jahren bis 2030 wurde nicht berücksichtigt, Temperaturverläufe von 2019 gelten bis 2030.
- Alle Busse in der emissionsfreien Flotte sind batteriebetrieben.

IV. AUSWIRKUNGEN AUF DAS ENERGIESYSTEM

A. Auswirkung auf das Lastprofil

Die ABILDUNG 4 zeigt die durch E-Busse verursachten Lastprofile in Berlin und Hamburg, die Städte mit der größten geplanten Anzahl von E-Bussen, für einen typischen Werktag im Winter mit der Außentemperatur von 0 °C für die Jahre 2020, 2025 und 2030. In Hamburg wird so in 2025 eine Lastspitze von 36,2 MW und in 2030 von 72,4 MW erwartet. In Berlin hingegen könnte man in 2025 eine Lastspitze von 33,1 MW und in 2030 von 66,2 MW erwarten. Da die Last von der Temperatur abhängig ist, kann es zu starken Abweichungen bei der Lastspitze im Winter und im Sommer kommen, wie gezeigt in der ABILDUNG 5 für Berlin und Hamburg in den Jahren 2025 und 2030.

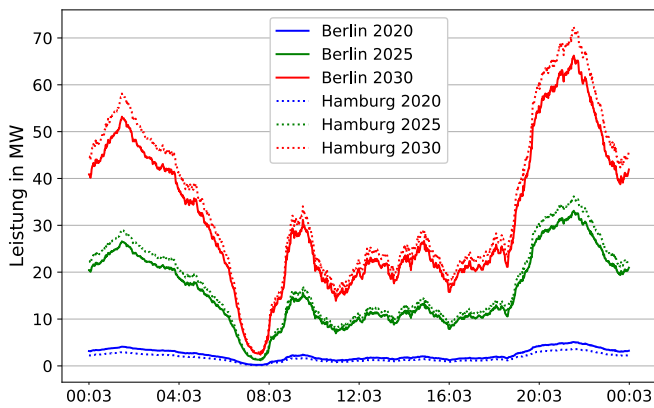


ABBILDUNG 4: DURCH E-BUSSE ENTSTEHENDE LASTPROFILE IN HAMBURG UND BERLIN FÜR EINEN TYPISCHEN WERKTAG IM WINTER FÜR DIE JAHRE 2020, 2025 UND 2030.

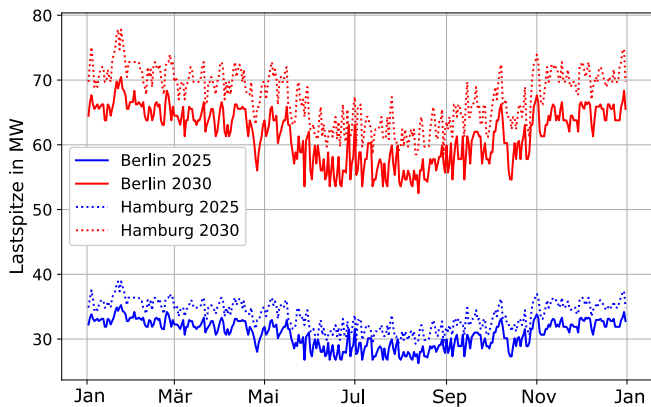
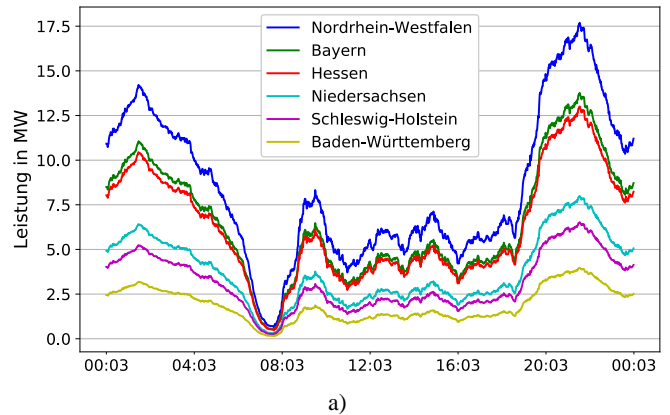


ABBILDUNG 5: VERLAUF DER LASTSPITZEN IN BERLIN UND HAMBURG FÜR DIE JAHRE 2025 UND 2030 IN ABHÄNGIGKEIT DER JAHRESZEITEN.

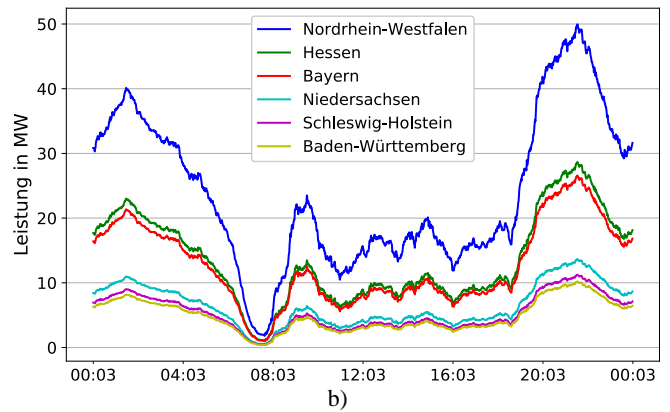
Da beide Städte geographisch nah beieinanderliegen und ähnliche Temperaturverläufe haben, zeigen sie ähnliche Verläufe der Lastspitze in einem Jahr. Unter der Annahme, dass sich der Temperaturverlauf im Jahr 2025 und 2030 nicht vom analysierten Temperaturverlauf in 2019 unterscheidet, kann man z.B. in 2025 in Hamburg eine maximale Lastspitze von 38,9 MW erwarten. Die minimale Lastspitze hingegen beträgt 29,1 MW. Das ergibt einen Unterschied von 9,8 MW oder 25,2 % des Maximalwertes. In 2030 ist eine maximale Lastspitze von 77,8 MW und eine minimale Lastspitze von 58,1 MW zu erwarten. Das macht einen Unterschied von 19,7 MW oder 25,3 % des Maximalwertes aus.

Die Entwicklung der Lastprofile auf den E-Busbetriebshöfen in anderen Bundesländern (außer Hamburg und Berlin) ist für das Jahr 2025 auf der ABBILDUNG 6 und für das Jahr 2030 in der ABBILDUNG 7 dargestellt. Alle Lastprofile stellen einen typischen Werktag im Winter mit der Temperatur von 0 °C dar. Im Vergleich zu den anderen Bundesländern zeigen hier Nordrhein-Westfalen, Bayern und Hessen einen Vorsprung bei der Umstellung auf E-Busse und dementsprechend auch bei den dadurch entstehenden Lasten. In Nordrhein-Westfalen, Bayern und Hessen zeigen sich jeweils die Lastspitzen von 17,7 MW, 13,8 MW und 13,0 MW in 2025 und von 49,9 MW, 26,6 MW und 28,7 MW in 2030.

Die ABBILDUNG 8 zeigt den Verlauf der Lastspitzen in Deutschland für die Jahre 2025 und 2030.

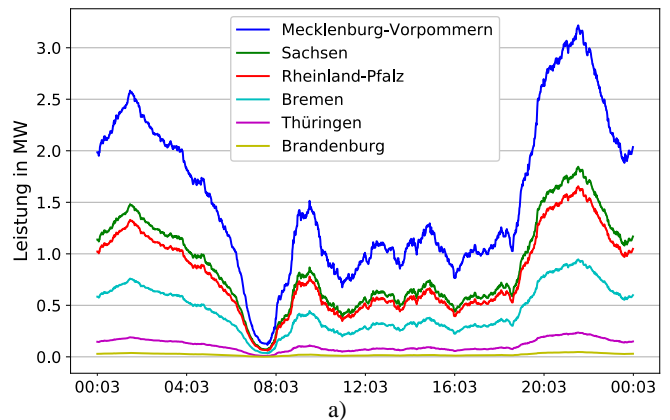


a)

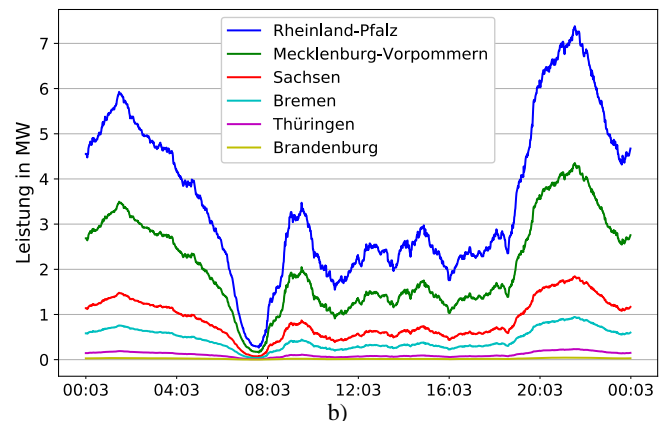


b)

ABBILDUNG 6: DURCH E-BUSSE ENTSTEHENDE LASTPROFILE IN NORDRHEIN-WESTFALEN, BAYERN, HESSEN, NIEDERSACHSEN, SCHLESWIG-HOLSTEIN UND BADEN-WÜRTEMBERG IN A) 2025 UND B) 2030.



a)



b)

ABBILDUNG 7: DURCH E-BUSSE ENTSTEHENDE LASTPROFILE IN MECKLENBURG-VORPOMMERN, SACHSEN, RHEINLAND-PFALZ, BREMEN, THÜRINGEN UND BRANDENBURG IN A) 2025 UND B) 2030.

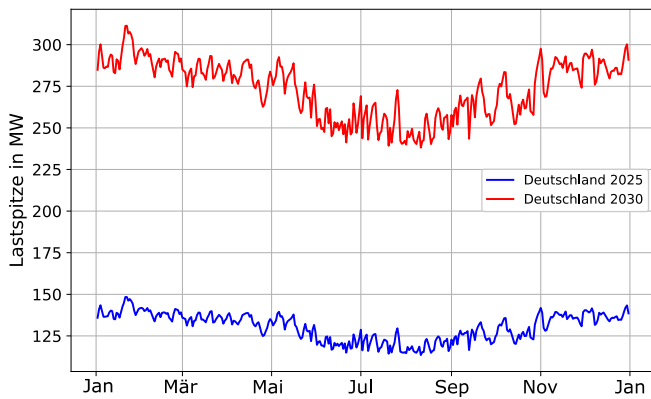


ABBILDUNG 8: VERLAUF DER LASTSPITZEN IN DEUTSCHLAND FÜR DIE JAHRE 2025 UND 2030.

Genauso wie für Berlin und Hamburg wurde für alle anderen Bundesländer angenommen, dass sich der Temperaturverlauf im Jahr 2025 und 2030 nicht von dem analysierten Verlauf in 2019 unterscheidet. Die Analyse zeigt eine maximale Lastspitze von 148,4 MW und eine minimale von 113,5 MW für das Jahr 2025 in Deutschland. Das ergibt einen Unterschied von 23,5 % des Maximalwertes. In 2030 hingegen ist eine maximale Lastspitze von 311,3 MW und eine minimale von 238,1 MW zu erwarten, mit einem entsprechenden Unterschied von ebenfalls 23,5 % des Maximalwertes.

B. Auswirkung auf den Energieverbrauch

Ein weiterer wichtiger Aspekt für das Energiesystem ist der gesamte Energieverbrauch. Die ABBILDUNG 9 zeigt den Energieverbrauch in den analysierten Bundesländern im Jahr 2025 sowie im Jahr 2030. Hamburg, Berlin und Nordrhein-Westfalen 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 Bundesländer jeweils 132,5 GWh, 120,8 GWh und 64,2 GWh. 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 deutschlandweit in 2025 ein Energieverbrauch der E-Busse von 514,5 GWh und in 2030 von 1124,7 GWh zu erwarten.

V. FAZIT

In diesem Beitrag wurde die Umstellung auf E-Busse deutschlandweit mit dem Ziel der Abschätzung der Auswirkungen auf das gesamte deutsche Energiesystem untersucht. Die Analyse wurde auf drei Ebenen durchgeführt: Für jede analysierte Stadt, für die Bundesländer und letztendlich für ganz Deutschland. Es wurde analysiert, welche von den E-Bussen verursachten Lastprofile für die Jahre 2020, 2025 und 2030 zu erwarten sind. Zusätzlich wurde der gesamte Energieverbrauch der E-Busse in den gleichen Jahresscheiben untersucht.

Mithilfe der Informationen des VDV und BMVI wurde die geplante Umstellung auf E-Busse in über 50 Städten in 14 Bundesländern analysiert. Laut den Plänen und Zielen der Verkehrsunternehmen in diesen Städten könnten im Jahr 2025 insgesamt 2964 E-Busse und im Jahr 2030 etwa 6210 E-Busse deutschlandweit fahren.

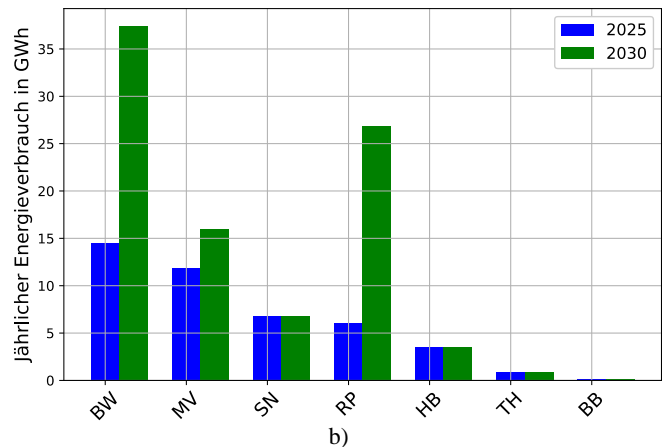
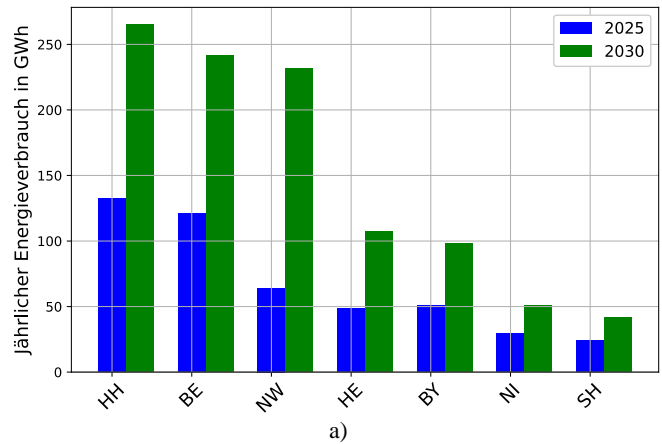


ABBILDUNG 9: ENERGIEVERBRAUCH FÜR UNTERSCHIEDLICHE BUNDESLÄNDER FÜR DIE JAHRE 2025 UND 2030 IN A) HAMBURG, BERLIN, NORDRHEIN-WESTFALEN, HESSEN, BAYERN, NIEDERSACHSEN UND SCHLESWIG-HOLSTEIN UND B) BADEN-WÜRTTEMBERG, MECKLENBURG-VORPOMMERN, SACHSEN, RHEINLAND-PFALZ, BREMEN, THÜRINGEN UND BRANDENBURG.

Die Städte Berlin und Hamburg zeigen einen Vorsprung bei der Elektrifizierung ihrer Flotten und erwarten dementsprechend einen höheren Energieverbrauch in den kommenden Jahren. Weitere Bundesländer, die größere Lastspitzen und Energieverbräuche aufgrund ihrer Umstellung auf E-Busse erwarten können, sind Nordrhein-Westfalen, Bayern und Hessen.

Die Analyse zeigt, dass deutschlandweit aufgrund der E-Busse im Jahr 2025 eine maximale Lastspitze von 148,4 MW und in 2030 von 311,3 MW entstehen kann. Der durch Elektrobusse verursachte Energieverbrauch in Deutschland wurde für das Jahr 2025 mit 514,5 GWh und für das Jahr 2030 mit 1124,7 GWh abgeschätzt.

Die Ergebnisse dieser Analyse können bei der Planung der zukünftigen Energiesysteme helfen, wie z.B. bei der Planung des Ausbaus der elektrischen Netze oder bei der Gestaltung der Stromerzeugungskapazitäten in der Zukunft.

VI. 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). Weiterhin gilt unser Dank unseren beiden Projektpartnern Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein GmbH und Hamburger Hochbahn AG für die enge Zusammenarbeit.

LITERATUR

- [1] M. Dietmannsberger, M. Meyer, M. Schumann und D. Schulz, „Anforderungen an das Stromnetz durch Elektromobilität, insbesondere Elektrobusse, in Hamburg,“ Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, [Online]. Available: <https://edoc.sub.uni-hamburg.de/hsu/volltexte/2017/3156/>.
- [2] H. Vennegeerts, J. Tran, F. Rudolph und P. Pfeifer, „Metastudie Forschungsüberblick, Netzintegration Elektro-mobilität; Eine Studie im Auftrag von VDE (FNN) und BDEW,“ 12 2018. [Online]. Available: https://www.bdew.de/media/documents/20181210_Metastudie/Forschungsueberblick-Netzintegration-Elektromobilitaet.pdf. [Zugriff am 15 10 2020].
- [3] „Das „BEE-Szenario 2030“ 65% Erneuerbare Energien bis 2030 – Ein Szenario des Bundesverbands Erneuerbare Energie e.V. (BEE),“ 05 2019. [Online]. Available: https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Positionen-papiere_Stellungnahmen/BEE/20190606_BEE_Szenario_2030_online.pdf. [Zugriff am 15 10 2020].
- [4] „E-Bus-Projekte in Deutschland,“ Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), [Online]. Available: <https://www.vdv.de/e-bus-liste.aspx>. [Zugriff am 12 10 2020].
- [5] 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.
- [6] Berliner Vekehrsbetriebe (BVG), 27 03 2019. [Online]. Available: https://www.bvg.de/images/content/presse-mitteilungen/2019/20190327_PM_Alle_Wege_fuehren_nach_Strom.pdf. [Zugriff am 12 10 2020].
- [7] Stadtwerke Bonn Verkehrs GmbH (SWB Bus und Bahn), 12 2019. [Online]. Available: https://www.swb-busundbahn.de/fileadmin/dokumente/Leistungsqualitaet/Leistungsqualitaet_2019.pdf. [Zugriff am 12 10 2020].
- [8] Kraftwerkgesellschaft mbH Braunschweig (KVG), [Online]. Available: <https://www.kvg-braunschweig.de/Aktuelles/Pressemitteilungen/Archiv/details.htm?recordid=162B96DDEF0>. [Zugriff am 13 10 2020].
- [9] „Elektromobilität bei der Rheinbahn nimmt erste Formen an,“ Rheinbahn AG, [Online]. Available: <https://blog.rheinbahn.de/2019/12/19/elektromobilitaet-bei-der-rheinbahn-nimmt-erste-formen-an/>. [Zugriff am 13 10 2020].
- [10] „Sauber durch die Stadt,“ Ruhrbahn GmbH, [Online]. Available: <https://www.ruhrbahn.de/muelheim/aktuelles/meldung/artikel/sauber-durch-die-stadt.html>. [Zugriff am 13 10 2020].
- [11] T. Reinhold, T. Schreiber und C. Wagner, „Elektrifizierung des städtischen Busverkehrs - Das Frankfurter Konzept,“ *Internationales Verkehrswesen*, Bd. 2, p. 71, 2019.
- [12] „Ebusco liefert Ende 2020 13 Elektrobusse nach Frankfurt/Main,“ Ebusco, [Online]. Available: <https://www.ebusco.com/de-frankfurt-transdev/>. [Zugriff am 13 10 2020].
- [13] „Beschluss des Aufsichtsrats: ÜSTRA bereitet Verkehrswende vor,“ United News Network GmbH, [Online]. Available: <https://www.lifepr.de/inaktiv/uestra-hannoverscheverkehrs-betriebe-ag/Beschluss-des-Aufsichtsrats-UeSTRA-bereitet-Verkehrswende-vor/boxid/779651>. [Zugriff am 13 10 2020].
- [14] „Initiative für bessere Luft – regiobus setzt auf E-Mobilität,“ regiobus Hannover GmbH, [Online]. Available: <https://www.regiobus.de/unternehmen/presse/aktuelles/news/initiative-fuer-bessere-luft-regiobus-setzt-auf-e-mobilitaet/>. [Zugriff am 13 10 2020].
- [15] „Erstmals reine Elektrofahrzeuge für Stadtverkehr und LVG,“ Stadtverkehr Lübeck GmbH, [Online]. Available: <https://www.sv-luebeck.de/de/aktuelles/pressemitteilungen/845-erstmal-reine-elektrofahrzeuge-f%C3%BCrstadt-verkehr-und-lvg.html>. [Zugriff am 13 10 2020].
- [16] „Mehr Elektrobusse für München: MVG bekommt bis zu 40 weitere E-Fahrzeuge,“ Münchner Verkehrsgesellschaft mbH (MVG), [Online]. Available: <https://www.mvg.de/ueber/presse-print/pressemitteilungen/2018/oktober/2018-10-09-40-E-Busse-bestellt.html>.
- [17] „Für neue E-Busse wird der Betriebshof elektrisch,“ Stadtwerke Münster GmbH, [Online]. Available: <https://www.stadtwerke-muenster.de/blog/verkehr/fuer-neue-e-busse-wird-der-betriebshof-elektrisch/>. [Zugriff am 13 10 2020].
- [18] „Sieben Elektrobusse kommen zum Fahrplanwechsel 2020,“ Stadt Offenbach am Main, [Online]. Available: https://www.offenbach.de/stadtwerke/mobilitaet/aktuelles/Aktuelles_aus_dem_Geschaeftsfeld_Mobilitaet/sieben-elektrobusse-zum-fahrplanwechsel-2020-08.11.2019.php. [Zugriff am 13 10 2020].
- [19] „Zeitalter der Elektrobusse in Rostock beginnt - RSAG erhält Förderbescheid für zwei E-Busse,“ Rostocker Straßenbahn AG, [Online]. Available: <https://www.rsag-online.de/unternehmen/presse/pressemitteilungen/2019/zeitalter-der-elektrobusse-in-rostock-beginnt/>. [Zugriff am 13 10 2020].
- [20] „Umstieg auf Elektrobusse: BSAG bestellt 20 Modelle,“ WESER-KURIER Mediengruppe, Bremer Tageszeitungen AG, [Online]. Available: https://www.weser-kurier.de/bremen/bremen-stadt_artikel-umstieg-auf-elektrobusse-bsag-bestellt-20-modelle-_arid,1919792.html. [Zugriff am 13 10 2020].
- [21] „Dresden bekommt 20 neue Elektrobusse auf zwei Linien,“ Mitteldeutscher Rundfunk (mdr), [Online]. Available: <https://www.mdr.de/sachsen/dresden/dresden-radebeul/dresden-bekommt-zwanzig-neue-elektrobusse-auf-zwei-linien-100.html>. [Zugriff am 13 10 2020].
- [22] „DVG erhält Fördermittel für Elektrobusse,“ Duisburger Verkehrsgesellschaft AG (DVG), [Online]. Available: <https://www.dvg-duisburg.de/die-dvg/presse/pressemitteilungen/detailseite/dvg-erhaelt-foerdermittel-fuer-elektrobusse/>. [Zugriff am 13 10 2020].
- [23] „Transdev-Gruppe gewinnt bundesweit größte Ausschreibung für den Einsatz von E-Bussen in Frankfurt/Main,“ Transdev GmbH, [Online]. Available: <https://www.transdev.de/de/neu-igkeiten/transdev-gruppe-gewinnt-bundesweit-groesste-aus-schreibung-fuer-den-einsatz-von-e-bussen>. [Zugriff am 13 10 2020].
- [24] „100 Tage E-Busse: Eine erste Bilanz,“ Freiburger Verkehrs AG (VAG), [Online]. Available: <https://www.vag-freiburg.de/aktuelles/meldung/100-tage-e-busse-eine-erste-bilanz>. [Zugriff am 13 10 2020].
- [25] 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, 1748, 2019.
- [26] „Historische tägliche Stationsbeobachtungen (Temperatur, Druck, Niederschlag, Sonnenscheindauer, etc.) für Deutschland,“ Deutscher Wetterdienst, [Online]. Available: <https://opendata.dwd.de/>. [Zugriff am 06 10 2020].