CITIESINCHARGE

Fraunhofer IFAM

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR FERTIGUNGSTECHNIK UND ANGEWANDTE MATERIALFORSCHUNG IFAM

EMISSIONSMINDERUNG DURCH DEN AUSBAU VON LADEINFRASTRUKTUR FÜR BATTERIE-ELEKTRISCHE FAHRZEUGE

White Paper zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Referenzflotten

Ort: Bremen

Datum: 29.02.2024

Impressum

EMISSIONSMINDERUNG DURCH DEN AUSBAU VON LADEINFRASTRUKTUR FÜR BATTERIE-ELEKTRISCHE FAHRZEUGE

Autoren

Karin Jahn[1], Sönke Stührmann[1], Fabian Kühnel[2]

[1] Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM
Wiener Straße 12
28359 Bremen
Kontakt: karin.jahn@ifam.fraunhofer.de

[2] RWTH Aachen University
Lehrstuhl und Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr
Mies-van-der-Rohe-Straße 1
52074 Aachen
Kontakt: kuehnel@isb.rwth-aachen.de

Wir bedanken uns auch für die Mitwirkung von Adrian Mellentin, Uwe Büngener und Hannes Kuhlmann.

Bildnachweis
Deckblatt: © istock

Veröffentlicht
Februar 2024

DOI
10.24406/publica-2770

Zitierempfehlung
Jahn, K., Stührmann, S., Kühnel, F. (2023): Emissionsminderung durch den Ausbau der Ladeinfrastruktur - White Paper zur Untersuchung des Einflusses der Referenzflotte, Bremen: Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, doi: 10.24406/publica-2770.

Anmerkung
Dieser Beitrag basiert auf Forschungsergebnissen des Verbundprojekts „Cities in Charge", das im Rahmen der Förderlinie „Sofortprogramm Saubere Luft 2017 bis 2020" durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert wurde.

Hinweise

Dieses Werk ist lizenziert unter der Creative-Commons-Lizenz CC BY-NC-ND.

Die Informationen wurden nach bestem Wissen und Gewissen unter Beachtung der Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis zusammengestellt. Die Autorinnen und Autoren gehen davon aus, dass die Angaben in diesem Bericht korrekt, vollständig und aktuell sind, übernehmen jedoch für etwaige Fehler, ausdrücklich oder implizit, keine Gewähr. Für einen einfachen Lesefluss wird die männliche Form von Substantiven verwendet, bei der wie immer auch Frauen und Diverse eingeschlossen sind, falls nicht explizit anders hervorgehoben.

Inhalt

Executive Summary 6
1 Einleitung 7
2 Methodik zur Ermittlung der Emissionsminderung durch Ausbau von Ladeinfrastruktur 9
2.1 Zurücklegbare Strecke 9
2.1.1 DC- Ladeverfahren mit Daten über den Ladezustand der Batterie 10
2.1.2 DC-Ladevorgänge ohne SoC-Daten 11
2.1.3 AC-Ladevorgänge 11
2.2 Spezifischer Emissionsfaktor der Verbrennerreferenz 12
3 Einfluss der Wahl der Referenzflotte auf die Emissionsminderung 14
3.1 Definition der Referenzflotten 14
3.2 Einfluss der Emissionen in der Startphase 15
3.3 Einfluss des regionalen Bezugs der Referenzflotte 16
3.4 Einfluss des Alters der Referenzfahrzeuge 18
4 Fazit und Ausblick 21
Literatur 23

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Standorte der Ladestationen im Projekt "Cities in Charge" 7

Abbildung 2: Dash Board - Beispiel Bayern 05.07.2023 - 20.07.2023 8

Abbildung 3: Methode zur Ableitung des regionalen, spezifischen Emissionsfaktors von Verbrennungsfahrzeugen 12

Abbildung 4: Verringerung der NOx-Emissionen 2023 (Januar – August) 16

Abbildung 5: Relative Differenz der NOx-Reduktion für unterschiedliche regionale Referenzflotten 17

Abbildung 6: Zusammensetzung der Fahrzeugflotte in Deutschland nach Kraftstoffarten 18

Abbildung 7: Reduktion der NOx-Emissionen im Jahr 2023 für vier ICEV-Referenzen mit unterschiedlichem Fahrzeugalter (Beispielregionen).....19

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zuweisung von Batteriegrößen zu Batteriekapazitätsklassen 10

Tabelle 2: ICEV-Referenzfälle 14

Abkürzungsverzeichnis

AC	Wechselstrom (Alternating Current)
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BEV	Batterieelektrischer PKW
CO2	Kohlendioxid
DC	Gleichstrom (Direct current)
EV	Elektrofahrzeug / Elektrofahrzeuge
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs
ICEV	Internal combustion engine vehicle (Verbrennerfahrzeug)
KBA	Kraftfahrtbundesamt
kg	Kilogramm
kWh	Kilowattstunde
LV	Ladeverlust
MiD	Mobilität in Deutschland 2017
NO_x	Stickstoffoxide
PHEV	Plug-in-Hybrid-Pkw
PKW	Personenkraftwagen
SoC	State of Charge (Ladezustand der Batterie)
UBA	Umweltbundesamt
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure

Executive Summary

Mit der zunehmenden Zahl lokal emissionsfreier Elektrofahrzeuge (EV) verbindet sich die Hoffnung auf eine Reduzierung von Schadstoff- und Treibhausgasemissionen. Ziel des Projekts „Cities in Charge“, in dem in mehr als 30 Städten und deren Umland in elf Bundesländern öffentliche Hochleistungs-Ladeinfrastruktur errichtet wurden, war die Reduktion der NO_x-Emissionen in besonders belasteten Regionen.

Die Herausforderung bestand darin, dass die im Projekt errichteten Ladestationen öffentlich zugänglich sind. Daher standen als Basis für die Abschätzung der Emissionsreduktion nur die Daten zur Verfügung, die durch die Ladestationen erfasst und vom Betreiber der Stationen, der Comfortcharge GmbH, bereitgestellt wurden. Im Rahmen des Projekts wurde daher eine Methodik zur Abschätzung der Emissionsminderung entwickelt und untersucht, welchen Einfluss die Wahl unterschiedlicher Fahrzeugreferenzflotten hat.

Anhand des Beispiels der Reduktion der Stickstoffoxidemissionen (NO_x-Emissionen) wird aufgezeigt, dass die berechnete Emissionsreduktion stark von der Wahl der Referenzfahrzeugflotte abhängt. Ein relevanter Faktor ist dabei der regionale Bezug der Referenzflotte. Einen besonders starken Einfluss auf die Ergebnisse hat jedoch die Altersstruktur der gewählten Verbrennerreferenz. Die Ergebnisse zeigen, dass der Effekt der Emissionsminderung durch den Ausbau und die Nutzung von Ladeinfrastruktur drastisch abnimmt, wenn die EV anstelle jüngerer, emissionsärmerer Verbrennerfahrzeuge verwendet werden. Die Berechnungen mit einem fiktiven Fahrzeugbestand im Jahr 2030 verdeutlichen zudem, dass der Effekt des Ausbaus der Elektromobilität und der hierfür erforderlichen Ladeinfrastruktur auf die Emissionen aufgrund des steigenden Anteils emissionsarmer Fahrzeuge im Fahrzeugbestand in Zukunft abnehmen wird. Der Vergleich der Ergebnisse mehrerer Referenzflotten gibt Hinweise auf die Eignung und Grenzen verschiedener Ansätze für unterschiedliche Untersuchungsräume.

Die im Projekt entwickelte Methodik ermöglicht es Entscheidungsträgern, die Reduzierung verkehrsbedingter Emissionen auf der Grundlage von Nutzungsdaten der Ladeinfrastruktur und unter Berücksichtigung lokaler Rahmenbedingungen des Fahrzeugbestands zu bewerten. Die vorgestellte Methodik eignet sich dabei für die Abschätzung verschiedenster Emissionsarten – von Kohlendioxidemissionen (CO_2-Emissionen), Treibhausgasemissionen, NO_x-Emissionen bis hin zu Feinstaubemissionen. Es sollte jedoch berücksichtigt werden, dass die Emissionsreduktion, die auf Basis von Ladedaten von öffentlichen und halböffentlichen Ladestationen berechnet wird, nur einen Teil des Gesamteffekts darstellt. Effekte, die durch Ladungen an privaten Wallboxen oder Ladestationen bei Arbeitgebern erreicht werden, können hiermit nicht erfasst werden. Hierfür sind ergänzende methodische Ansätze erforderlich.

1 Einleitung

Im Verkehrssektor wurden in den letzten Jahren sowohl auf EU-Ebene als auch in Deutschland kaum Emissionsminderungen erreicht (EEA 2021; UBA 2023a). Dies gilt neben den Treibhausgasemissionen auch für die NO_x-Emissionsminderungsziele, die in Deutschland lange Zeit verfehlt wurden. Für 2020 hat die Europäische Umweltagentur festgestellt, dass Deutschland das 2010 gesetzte Ziel nicht erreicht hat (EEA 2020, 2013). Bis heute entfällt der größte Anteil an den NO_x-Emissionen (37%) auf den Verkehrssektor (UBA 2023b). Und knapp 20 % der Treibhausgase werden vom Verkehr emittiert, deutlich mehr als im Gebäudesektor (15%).

Im Jahr 2017 legte die Bundesregierung das "Sofortprogramm Saubere Luft 2017 bis 2022" (BMDV 2017) auf. Ziel des Programms war die kurzfristige Verbesserung der Luftqualität und die Reduzierung der NO_x-Emissionen in betroffenen Städten (BMDV 2017). Insbesondere der Ausbau der Ladeinfrastruktur sollte die Elektrifizierung des Verkehrs beschleunigen und damit zur Reduzierung der NO_x-Emissionen beitragen.

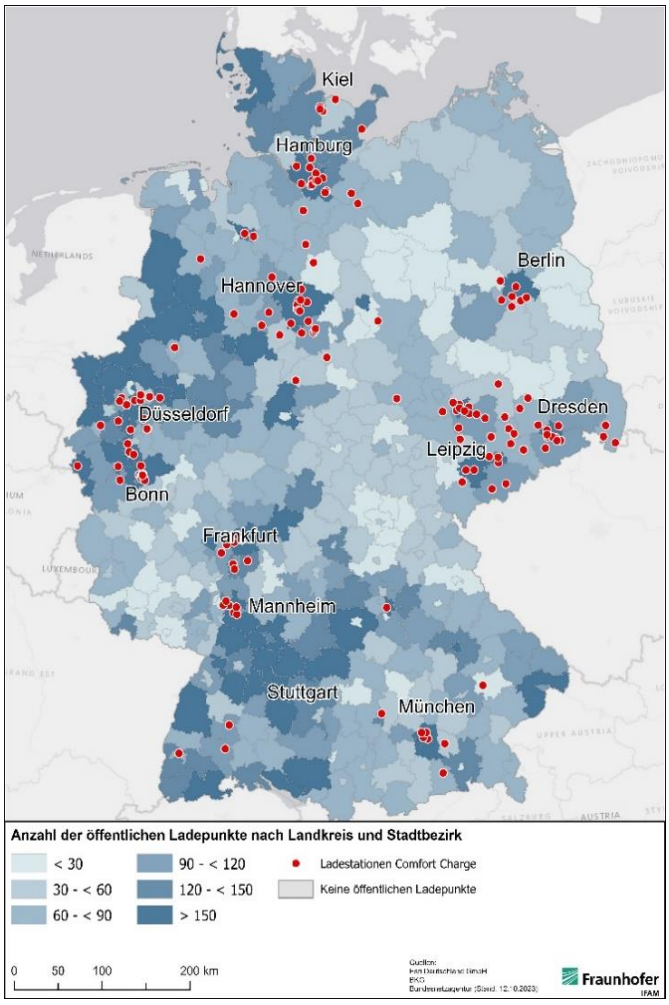

Abbildung 1: Standorte der Ladestationen im Projekt "Cities in Charge"

Eine wissenschaftliche Fragestellung im Rahmen des Projekts war, welchen Einfluss die Nutzung der neu installierten Ladestationen auf die Reduzierung der NO_x-Emissionen hat. Das Projekt "Cities in Charge" ist Teil dieses Programms.

Im Rahmen des Projekts hat die Comfortcharge GmbH, ein Tochterunternehmen der Telekom AG, in mehr als 30 Städten und deren Umland in elf Bundesländern öffentlich zugängliche Hochleistungsladeinfrastruktur auf Liegenschaften der Telekom installiert (siehe Abbildung 1). Im Zeitraum 2019 bis August 2023 hat die Comfortcharge GmbH die anonymisierten Daten von mehr als 350.000 Ladevorgängen an die begleitenden wissenschaftlichen Forschungseinrichtungen RWTH Aachen und Fraunhofer IFAM übermittelt.

In den letzten Jahren haben zahlreiche Studien den möglichen Beitrag von EV zur Emissionsminderung untersucht. Viele dieser Studien verglichen die einzelnen Modelle von EV mit ähnlichen Verbrennerfahrzeugen, um die theoretisch mögliche Emissionsreduktion zu ermitteln (Agora Verkehrswende 2019; Cerdas et al. 2018; Ellingsen et al. 2016; Helmers et al. 2020; Helms et al. 2016; Mayyas et al. 2017). Andere untersuchen den zukünftigen Beitrag von EV zur Emissionsminderung für bestimmte Regionen (Golovanov, Marinescu 2019; Kawamoto et al. 2019; Klötzke et al. 2015; Wietschel et al. 2019). Die meisten dieser Veröffentlichungen konzentrieren sich auf die Reduzierung von Treibhausgasen, einige Studien untersuchen jedoch auch andere Umweltauswirkungen (Bauer 2017; Cox et al. 2020; Helmers et al. 2020).

Bislang gibt es nur einen methodischen Ansatz, um die Reduktion von Emissionen aus der realen Nutzung der Ladeinfrastruktur abzuleiten (Eickels et al. 2020). Diese Methodik bildet das Verkehrsaufkommen in der Stadt Düren ab, einer der Kommunen in Deutschland, die in der Vergangenheit die höchsten Stickoxidemissionen aufgewiesen hat (LANUV 2019). Grundlage ist ein Verkehrsmodell, das die Pendlerbeziehungen zwischen Düren und dem Umland berücksichtigt.

Eine direkte Übertragung dieser Methodik auf das Projekt "Cities in Charge" ist nicht möglich. Zum einen unterscheidet sich die Art und Verfügbarkeit der Daten: Im Gegensatz zur Situation in Düren, wo überwiegend Mitarbeiter an den unternehmenseigenen Ladestationen ihre EV aufladen, wird die öffentliche Ladeinfrastruktur im Projekt "Cities in Charge" von Mitarbeitern, Kunden und Dritten gleichermaßen genutzt. Daher reicht es nicht aus, das Verkehrsaufkommen der Beschäftigten abzubilden, um die Emissionsminderung zu quantifizieren. Zum anderen ist die räumliche Ausdehnung des Untersuchungsgebietes deutlich größer - eine einzige Stadt gegenüber einer Vielzahl von Regionen in elf Bundesländern. Darüber hinaus sind Daten für die Abbildung des Verkehrs in diesen großen Gebieten nicht im erforderlichen Maßstab und Detaillierungsgrad verfügbar. Daher wurde im Projekt Cities in Charge ein Ansatz entwickelt, mit dem die Reduzierung der NO_x-Emissionen, aber auch anderer Emissionen, auf Basis der Ladedaten abgeschätzt und bewertet werden kann. Diese Methodik wird im Folgenden vorgestellt und die Ergebnisse am Beispiel der NO_x-Emissionen diskutiert. Im Laufe des Projektes wurde diese Methodik in ein Python-Modell überführt. Dies vereinfacht eine regelmäßige Aktualisierung und ermöglicht eine übersichtliche Visualisierung der umfangreichen Daten in einem Dashboard (Abbildung 2).

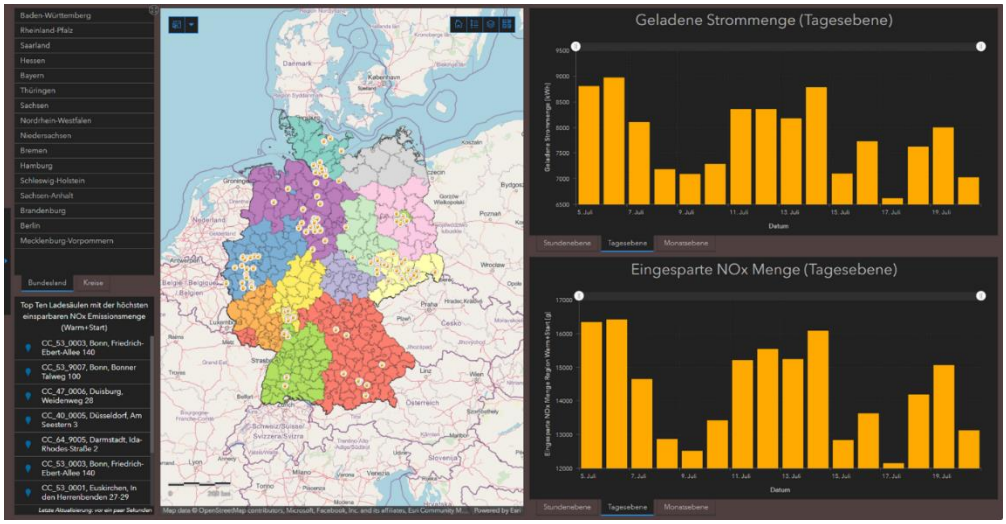

Abbildung 2: Dash Board - Beispiel Bayern 05.07.2023 - 20.07.2023

2
Methodik zur Ermittlung der Emissionsminderung durch Ausbau von Ladeinfrastruktur

Die Bestimmung der Emissionsminderung durch den Ausbau der öffentlichen und halböffentlichen Ladeinfrastruktur stellt eine Herausforderung dar. Ein direkter Zusammenhang zwischen der Installation von Ladeinfrastruktur und der Emissionsreduzierung besteht nicht: Das Aufladen von EV findet an der Ladestation statt, die Emissionsminderung ist jedoch nicht lokal verortet. Daten von bestehenden Immissionsmessstationen können allenfalls ein schwacher Indikator für eine Veränderung der Emissionen sein, lassen aber keine Rückschlüsse auf die Wirkung des Ausbaus der Ladeinfrastruktur zu. Zudem liegen keine konkreten Informationen vor, inwieweit Verbrennungsfahrzeuge durch EV ersetzt werden.

Daher wird in der von uns entwickelten Methodik der an den Ladestationen gelieferte Strom als Grundlage für die Ermittlung der Emissionsminderung herangezogen. Im Projekt "Cities in Charge" standen dabei die NO_x-Emissionen im Fokus. Allerdings ist die im Folgenden dargestellte Methodik auch geeignet, den Einfluss elektrischen Ladens auf andere Emissionen wie z. B. Treibhausgas oder Feinstaub zu untersuchen.

Die Methodik basiert auf folgenden, grundlegenden Annahmen:

- Die Strecke, die ein EV mit dem geladenen Strom zurücklegen kann, würde sonst mit einem Verbrennungsauto zurückgelegt werden.
- Die Ladestationen in einer Region werden überwiegend durch Fahrzeuge genutzt, die in der Region gemeldet sind.
- Die durch das Laden induzierte Reduktion der Emissionen M_{reg} ergibt sich nach Gleichung (1) durch Multiplikation der Strecke $S_{charged}$, die EVs mit dem in der Untersuchungsregion geladenen Strom fahren können, mit dem spezifischen Emissionsfaktor einer Verbrennerreferenz EM_{reg}.

$$(1)\ M_{reg} = S_{charged} * EM_{reg}$$

M_{reg}: *Menge der eingesparten Emissionen*
$S_{charged}$: *mit der elektrischen Ladung zurücklegbare Strecke*
EM_{reg}: *spezifischer Emissionsfaktor der Untersuchungsregion*

Zur Berechnung der Verringerung der Emissionen wird in einem ersten Schritt die Strecke ermittelt, die mit der geladenen Strommenge zurückgelegt werden kann. Der zweite Schritt besteht darin, den spezifischen Emissionsfaktor einer Verbrennungsreferenz EM_{reg} für die Untersuchungsregion zu bestimmen.

2.1
Zurücklegbare Strecke

Die Strecke, die mit der geladenen Strommenge ($S_{charged}$) zurückgelegt werden kann, wird aus dem Verhältnis zwischen der geladenen Strommenge und dem spezifischen Verbrauch der EV (in kWh je 100 km) berechnet. Im Falle des öffentlichen oder halböffentlichen Ladens enthalten die Ladedaten keine Informationen über das spezifische Fahrzeug und seinen Energieverbrauch pro Kilometer. Außerdem unterscheiden sich die Angaben zu den Ladedaten für die verschiedenen Arten des Ladens je nach Steckerart und

Ladeprotokoll. Daher unterscheidet die Methodik zur Ermittlung des spezifischen Verbrauchs nach dem jeweiligen Ladeverfahren.

2.1.1 DC- Ladeverfahren mit Daten über den Ladezustand der Batterie

Bei der Mehrzahl der Ladevorgänge mit Gleichstrom (DC) enthalten die Ladedaten Informationen über den Ladezustand der Batterie (State of Charge - SoC) vor und nach dem Ladevorgang. Für diese Ladevorgänge kann die Größe der Batterie des EV anhand der geladenen Energiemenge sowie der Ladezustände vor und nach dem Laden bestimmt werden. Hierbei müssen zusätzlich noch die Ladeverluste (LV) berücksichtigt werden. Diese betragen im Durchschnitt etwa 15 % (ADAC 2023a). Anschließend wird der Ladevorgang einer der vier Batterieklassen zugeordnet (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Zuweisung von Batteriegrößen zu Batteriekapazitätsklassen

Batterieklasse	Batteriekapazitätsklasse (kWh)	Batteriegröße von	bis
XS - Mini	20		≤ 20 kWh
S - Small	40	> 20 kWh	≤ 40 kWh
M - Medium	60	> 40 kWh	≤ 60 kWh
L - Large	90	> 60 kWh	

Für jede dieser Batterieklasse wird ein durchschnittlicher, gewichteter spezifischer Verbrauch $V_{spec,BKj}$ berechnet. Hierbei gehen Daten zum spezifischen Verbrauch ein. Dies können Herstellerangaben nach dem Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP) (EU, 2017) sein, aber auch Daten aus realen Fahrtests. Im Rahmen des Projekts wurden hierfür Daten des ADAC aus realen Fahrdaten herangezogen. (ADAC 2023a, ADAC 2023b) Diese werden mit der Anzahl der im Fahrzeugbestand laut Kraftfahrtbundesamt (KBA) gemeldeten EV-Modelle gewichtet (siehe Gleichung (2)) (KBA 2023).

$$(2)\ V_{spec,BKj} = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_{spec,i,BKj} * Z_{i,BKj}}{\sum_{i=1}^{n} Z_{i,BKj}}$$

$V_{spec,BKj}$: *gewichteter durchschnittlicher spezifischer Verbrauch der Batterieklasse BKj*
$V_{spec,i,\ BKj}$: *gewichteter spezifischer Verbrauch des Fahrzeugtyps i mit der Batterieklasse j*
$Z_{i,BKj}$: *Anzahl der Fahrzeuge des Fahrzeugtyps i mit der Batterieklasse j im Fahrzeugbestand*
BK_j: *Batterieklasse (j = XS, S, M oder L)*
i: *Fahrzeugtyp*

Bei der Berechnung wird auch berücksichtigt, dass Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge (PHEV) fast ausschließlich kleine Batterien (≤ 20 kWh) haben. Der spezifische Verbrauch der Batterieklasse XS ist somit der Durchschnitt aus dem spezifischen Verbrauch der batterieelektrischen Fahrzeuge (BEV) der Batterieklasse XS und dem gemittelten, durchschnittlichen spezifischen Stromverbrauch der PHEV. Mit diesen spezifischen Stromverbräuchen

nach Batterieklassen wird gemäß Gleichung (3) die Strecke $S_{charged,j}$ ermittelt, die mit der geladenen Energiemenge zurückgelegt werden kann.

$$(3)\ S_{charged,I} = \sum_{j=XS}^{L} \frac{E_{BKj} * (1 - LV)}{V_{spec,BKj}} * 100$$

$S_{charged,j}$: Strecke, die mit der geladenen Energiemenge zurückgelegt werden kann
E_{BKj}: Energie, die von einem EV mit Batterieklasse j geladen wird
LV: Ladeverluste
$V_{spec,BKj}$: gewichteter durchschnittlicher spezifischer Verbrauch der Batterieklasse BKj

Das skizzierte Vorgehen ist jedoch nur möglich, wenn die Daten eines Ladevorgangs sowohl Angaben zur geladenen Energiemenge als auch zum Ladezustand der Batterie vor und am Ende des Ladevorgangs enthalten. Dies ist nicht für alle Ladevorgänge gegeben.

2.1.2 DC-Ladevorgänge ohne SoC-Daten

Die Übermittlung der DC- Ladedaten ist bislang leider nicht einheitlich und teils fehlerbehaftet. Dabei lassen sich im Wesentlichen in zwei Kategorien unterscheiden. Zum einen wird nicht allen DC-Ladungen der Ladezustand der Batterie in den Ladeprotokollen mit übermittelt. In manchen Fällen gibt es zwar Angaben, mit denen sich jedoch unplausible, am Markt bislang nicht verfügbar Batteriegrößen ergeben. In beiden Fällen wird angenommen, dass die Fahrzeuge, die an DC-Ladesäulen ohne Informationen zum Ladezustand der Batterie laden, die gleiche Verteilung der Batteriegröße aufweisen wie jene Fahrzeuge, die an DC-Ladesäulen mit Angaben zu SoC laden. Daher wird mit den Daten der DC-Ladevorgängen mit SoC-Daten ein durchschnittlicher spezifischer Verbrauch $V_{spec,II}$ berechnet. Mit diesem sowie der geladenen Strommenge kann dann, analog zu Gleichung (3), die zurücklegbare Fahrstrecke $S_{charged,II}$ bestimmt werden.

2.1.3 AC-Ladevorgänge

Die Daten von Normalladevorgängen mit Wechselstrom (AC) enthalten keine Informationen zum Ladezustand der Batterie. Daher können auch in diesem Fällen die Batteriegröße und der spezifische Verbrauch nicht abgeleitet werden. Da sich die Verteilung der Batteriegröße der Fahrzeuge zwischen den AC- und DC-Ladestationen unterscheidet, ist die Anwendung des zuvor ermittelten durchschnittlichen spezifischen Verbrauchs $V_{spec,II}$ nicht sachgerecht. Dies ist dadurch bedingt, dass sich die Verteilung der Batteriegröße der Fahrzeuge, die an AC-Ladestationen laden, von der Verteilung bei DC-Ladungen unterscheiden kann. Ursache hierfür ist, dass alle EV, die mit Wechselstrom laden können, auch AC-Ladesäulen nutzen können. Dagegen haben viele PHEV und ältere BEV oft nur die Möglichkeit der AC-Ladung.

Aus diesem Grund wird für AC-Ladungen ein gewichteter, durchschnittlicher spezifischer Stromverbrauch $V_{spec,III}$ auf Basis der Daten des gesamten nationalen EV-Bestands ermittelt. Die Strecke $S_{charged,III}$, die mit dem an AC-Ladestationen geladenen Strom zurückgelegt werden kann, wird dann nach Gleichung (4) berechnet.

$$(4)\ S_{charged,III} = \frac{E_{III} * (1 - LV)}{V_{\mathrm{spec,III}}}$$

2.2 Spezifischer Emissionsfaktor der Verbrennerreferenz

Bei Ladungen an öffentlich zugänglichen Ladestationen gibt es weder Informationen zum Fahrzeugtyp des ladenden EV noch dazu, welches Verbrennungsfahrzeug ersetzt wurde. Daher wird als Referenz für die EV der Bestand an Verbrennerfahrzeugen (ICEV-Flotte) in der Region gewählt. Für diese wird ein regionsspezifischer Emissionsfaktor EM_{reg} bestimmt. Abbildung 3 veranschaulicht die Methode der Berechnung.

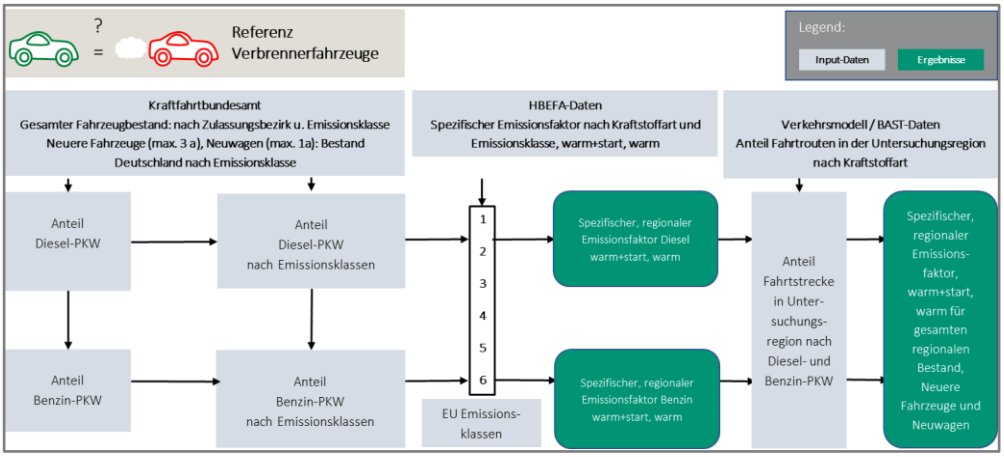

Abbildung 3: Methode zur Ableitung des regionalen, spezifischen Emissionsfaktors von Verbrennungsfahrzeugen

In die Berechnung des durchschnittlichen gewichteten spezifischen Emissionsfaktors EM_{reg} gehen folgende Faktoren ein:

- Anzahl der Fahrzeuge nach Antriebs- und Kraftstoffarten Diesel- und Benzinfahrzeuge und nach EU-Emissionsklassen
- Anteil der Fahrtrouten in der Region nach Antriebs- und Kraftstoffarten

Da sich die Emissionsfaktoren der beiden Antriebsarten deutlich unterscheiden, wird jeweils für beide ein durchschnittlicher, gewichteter spezifischer Emissionsfaktor $EM_{reg,F}$ bestimmt (siehe Gleichung 5).

$$(5)\ EM_{reg,F} = \frac{\sum_{m=1}^{6} EM_{F,EUK_m} * Z_{F,EUK_m}}{\sum_{m=1}^{6} Z_{F,EUK_m}}$$

$EM_{reg,F}$: Regionaler Emissionsfaktor nach Kraftstoffart
Z: Anzahl von Fahrzeugen
F: Kraftstoffart (Diesel: D, Benzin: B)
EUK_m: EU-Emissionsklassen mit m =1 bis 6

Das KBA stellt Informationen zum Fahrzeugbestand nach Antriebs-/Kraftstoffarten und EU-Emissionsklassen für Zulassungsbezirke, Bundesländer und für ganz Deutschland zur Verfügung (KBA 2023). In dieser Studie werden in der Referenzflotte nur Benzin- und Dieselpersonenkraftwagen (Diesel-PKW) berücksichtigt. Dieser Ansatz wird aus zwei Gründen gewählt. Zum einen kann man davon ausgehen, dass heutzutage ein EV nur in sehr wenigen Fälle durch ein EV ersetzt wird. Zum anderen liegen zu Gas- sowie Hybrid-

PKW keine öffentlich verfügbaren Daten zu den Emissionsklassen vor. Daher wurden die Fahrzeuge mit diesen beiden Antriebsarten, die zum 01.01.2023 einen Anteil von zusammen 4,7% am Bestand hatten (KBA 2023), bei der Berechnung der Emissionsfaktoren nicht berücksichtigt. Die Emissionsfaktoren für die EU-Emissionsklassen sind dem Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA) entnommen (UBA 2019). Mit diesen Daten wird der regionalspezifische Emissionsfaktor EM_{reg} gemäß Gleichung (6) bestimmt. Es wird zudem berücksichtigt, welchen Anteil die Fahrzeuge der verschiedenen Kraftstoffarten an der in der Region zurückgelegten Strecke haben ($X_{reg,B}$ für Benzin, $X_{reg,D}$ für Diesel).

$$(6)\ EM_{reg} = X_{reg,B} * EM_{reg,B} + X_{reg,D} * EM_{reg,D}$$

EM_{reg}: Regionaler Emissionsfaktor
$X_{reg,B}$: Anteil der Benzinfahrzeuge an der in der Region zurückgelegten Strecke
$X_{reg,D}$: Anteil der Benzinfahrzeuge an der in der Region zurückgelegten Strecke
$EM_{reg,B}$: regionaler Emissionsfaktor der Benzinfahrzeuge
$EM_{reg,B}$: regionaler Emissionsfaktor der Dieselfahrzeuge

Die Anteile der zurückgelegten Strecken wurden für jede im Projekt vertretenen Regionen gesondert berechnet. Hierbei gehen sowohl die innerstädtischen Fahrstrecken als auch die durch Pendler in der Untersuchungsregion zurückgelegten Strecken ein.

Erstere können aus der Studie "Mobilität in Deutschland 2017" (MiD) abgeleitet werden (Nobis, Kuhnimhof 2018). Dazu wurde die MiD ausgewertet, differenziert nach der regionalen statistischen Raumtopologie (RegioStaR7), wobei sich Region in diesem Fall auf die geografische Lage in Deutschland (Nord, Ost, Süd, West) bezieht.

Zur Abschätzung der von den Pendlern zurückgelegten Strecke wird die Methode von Eickels et al. 2020 verwendet. Zur Berechnung des Modal Split wird ein multinominales Logit-Modell für jede Wohnort-Arbeitsplatz-Beziehung angewendet. Als Entfernung einer Beziehung wird der kürzeste Weg im Straßennetz angesetzt und es wird angenommen, dass die Pendler dieselbe Strecke auf dem Heimweg zurücklegen und an diesem Tag keine anderen Fahrten unternehmen.
Unter Berücksichtigung des prozentualen Anteils der PKW-Nutzung, des prozentualen Anteils der Kraftstoffart und der Anzahl der täglich pendelnden PKW lässt sich auf Basis verschiedener Datenquellen die typische Fahrstrecke der pendelnden Fahrzeuge ableiten. (BMVI 2018; Bundesagentur für Arbeit 2019; destatis 2019; HERE Maps 2017; RWI, microm 2018).

Bei der Berechnung der beiden Streckenkomponenten – innerstädtische Strecken und innerhalb der Region durch Pendler zurückgelegten Strecken – wird nach den Kraftstoffarten differenziert, so dass hierdurch die entsprechenden Anteile $X_{reg,B}$ und $X_{reg,D}$ bestimmt sind. Hiermit kann gemäß Gleichung (6) der regionale Emissionsfaktor EM_{reg} berechnet werden. Zusammen mit dem Ergebnis für die Gesamtentfernung $S_{charged}$ kann nun die Reduktion der Emissionen M_{reg} für die Untersuchungsregion nach Gleichung (1) ermittelt werden. Im Folgenden wird am Beispiel der NO_x-Reduktion aufgezeigt, welche Auswirkungen die Wahl der Referenzfahrzeugflotte auf die Emissionsreduktion hat.

3
Einfluss der Wahl der Referenzflotte auf die Emissionsminderung

Gleichung (1) verdeutlicht, dass die berechnete Emissionsminderung vom regionalen Emissionsfaktor und damit von der Wahl der ICEV-Referenz abhängig sind. Dieser Einfluss wird am Beispiel der Ergebnisse der Auswertung der Ladevorgänge für das Jahr 2023 (Januar bis August) an den Ladestationen des Projekts Cities in Charge analysiert. Dabei werden folgende Aspekte untersucht:

- Einfluss des Fahrzeugzustands
    - Wie groß ist der Unterschied der Ergebnisse, wenn man neben den in HBEFA angegebenen Emissionen des Fahrzeugs im Warmbetrieb zusätzlich auch noch die Emissionen beim Start des Fahrzeugs berücksichtigt?
- Einfluss regionaler Differenzierung
    - Wie groß ist der Einfluss der unterschiedlichen Zusammensetzung der regionalen ICEV-Referenz im Vergleich zur Wahl des PKW-Bestands der gesamten Bundesrepublik?
    - In welchen Fällen lohnt es sich, die ICEV-Referenz der Region zu wählen?
    - Wann wäre es zielführender, einen überregionalen Ansatz zu wählen?
- Einfluss des Alters der Referenzfahrzeuge
    - Welchen Einfluss hat das Alter der ersetzten ICEV-Fahrzeuge bzw. der alternativ zu den EV benutzten Fahrzeugen?

3.1
Definition der Referenzflotten

Um diese verschiedenen Einflüsse zu untersuchen, wurden vier Referenzfälle definiert. Diese sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: ICEV-Referenzfälle

	Ladedaten	Räumliche Referenzflotte	Alter der Referenzflotte	Anteil der zurückgelegten Strecken nach Diesel und Benzinfahrzeugen
REF 1	Region	Region	Gesamter Bestand 01.01.2023	Regionales Verkehrsmodell RWTH Aachen
REF 2	Region	Deutschland	Gesamte Bestand 01.01.2023	Fahrleistungserhebung BAST (Bundesanstalt für Straßenwesen)
REF 3	Region	Deutschland	≤ 3 Jahre am 01.01.2023	Fahrleistungserhebung BAST (Bundesanstalt für Straßenwesen)
REF 4	Region	Deutschland	Gesamter Bestand 2030	Fahrleistungserhebung BAST (Bundesanstalt für Straßenwesen)

Einfluss der Wahl der Referenzflotte auf die Emissionsminderung

Im Referenzfall REF 1 wurde der gesamte Fahrbestand der jeweiligen Projektregionen am 01.01.2023 als Referenz gewählt. Dies repräsentiert den Fall, dass ein EV ein älteres Bestandsfahrzeug ersetzt. Zudem wird in diesem Referenzfall für jede Region ein individueller Emissionsfaktor angesetzt. Hierfür wurde für jede Projektregion ein eigenes Verkehrsmodell entwickelt, das Daten zu den mit Benzin und Diesel zurückgelegten Strecken innerhalb der Region liefert (siehe Kapitel 2.2). Für alle anderen Referenzen stammen die Daten zu den Fahrleistungen von Benzin- und Diesel-Fahrzeugen aus der Fahrleistungserhebung der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST 2014).

In den Referenzfällen REF 2 und REF 3 ist der regionale Bezug der Referenzflotte ganz Deutschland. Diese beiden Referenzflotten unterscheiden sich jedoch hinsichtlich des Alters der betrachteten Fahrzeuge: Während in REF 2 der gesamte deutsche Fahrzeugbestand als Referenzflotte angesetzt wird, sind es in REF 3 nur Fahrzeugen, die am 01.01.2023 nicht älter als drei Jahre waren. Damit entspricht REF 3 dem Fall, dass Personen ihr altes Fahrzeug durch einen Neuwagen bzw. jungen Gebrauchtwagen ersetzen. Wenn dieser elektrisch ist, werden nur die Emissionen eingespart, die durch die Fahrt mit einem konventionellen Neuwagen bzw. jungen Gebrauchtwagen entstehen.

REF 4 stellt ein Szenario für den PKW-Bestand im Jahr 2030 in Anlehnung an das 2019 beschlossene Klimaschutzprogramm 2030 dar. Für diesen fiktiven Fahrzeugbestand im Jahr 2030 wurden die Altersverteilung und die Anteile der Kraftstofftypen unter der Annahme von 10 Millionen EV im Jahr 2030 abgeleitet. Dabei wurde angesetzt, dass es sich je zur Hälfte um BEV und PHEV handelt.[1] Die Anteile der EU-Emissionsklassen und die zugehörigen Emissionsfaktoren wurden den HBEFA-Daten für 2030 entnommen (UBA 2019). Im Folgenden wird für den Referenzfall REF 1 aufgezeigt, welchen Einfluss die Berücksichtigung der Emissionen in der Startphase auf die Gesamtemissionsreduktion hat.

3.2 Einfluss der Emissionen in der Startphase

Zur Beantwortung der Frage, wie groß der Unterschied ist, wenn man neben den Emissionen des warmen Fahrzeugs auch die Emissionen beim Start des Fahrzeugs berücksichtigt, wurden die Ladedaten der Ladevorgänge von Januar bis August 2023 für die Projektregionen mit dem regionalen Fahrzeugbestand als Referenzflotte (REF 1; siehe Tabelle 2) ausgewertet und die NO_x-Reduktionen berechnet.

Die in Abbildung 4 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die NO_x-Reduktion nur geringfügig von der Wahl des Betriebszustands der Referenzflotte abhängt: Berücksichtigt man neben den Emissionen im Warmzustand des Fahrzeugs auch die Emissionen, die während der Startphase entstehen, fällt die Reduktion je nach Zusammensetzung der ICEV-Referenz mit 5 % - 9 % nur geringfügig höher aus (Durchschnitt: 6 %).

[1] Bei dem fiktiven Fahrzeugbestand in 2030 wurden nur die Plug-in-Hybride einzeln ausgewiesen. Hybridfahrzeuge, die keine externe elektrische Ladung zulassen, wurden bei den anderen Referenzfällen den Benzin-PKW zugerechnet, da es sich bei Hybridfahrzeugen fast ausnahmslos um Fahrzeuge mit Benzin als fossilem Treibstoff handelt (ADAC 2023b).

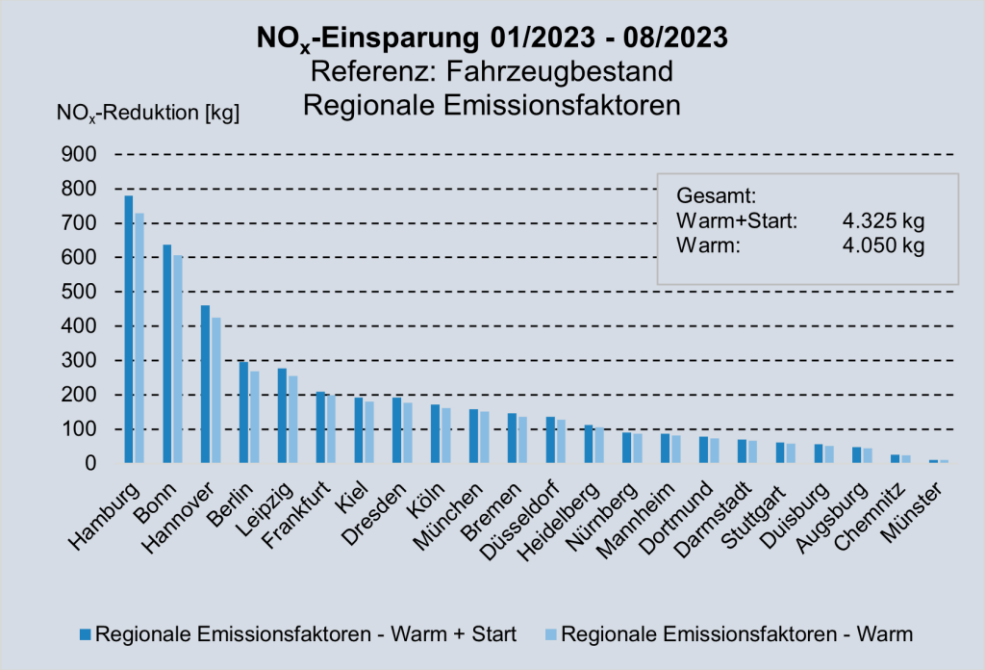

Abbildung 4: Verringerung der NO_x-Emissionen 2023 (Januar – August)

Die Höhe der durch Nutzung von EV erzielbaren Emissionseinsparungen hängen aber noch von weiteren Faktoren ab. Dies ist zum einen der regionale Bezug der zugrunde gelegten Referenzflotte und zum anderen das Alter der in der Referenzflotte berücksichtigen Fahrzeuge. Im Folgenden wird auf den Einfluss des regionalen Bezugs eingegangen.

3.3 Einfluss des regionalen Bezugs der Referenzflotte

Für die Untersuchung der Frage, ob der ICEV-Bestand der Region oder ein überregionaler PKW-Bestand der zielführende Ansatz ist, wird die Reduktion der NO_x-Emissionen in den Projektregionen mit zwei Referenzfälle berechnet: REF 1 (Fahrzeugbestand der jeweiligen Region am 01.01.2023) und REF 2 (Fahrzeugbestand Deutschlands am 01.01.2023). Die Berechnungen zeigen, dass die Summe der Emissionsreduktion aller Projektregionen nur geringfügig davon abhängt, ob der jeweilige regionale Fahrzeugbestand oder der bundesweite Fahrzeugbestand als Referenz gewählt wurde. Der Unterschied beträgt für die Auswertung der Ladevorgänge von Januar bis August 2023 nur 1,7 % - 4.325 kg NO_x für REF 1 bzw. 4.520 kg NO_x für REF 2.

Betrachtet man allerdings die Ergebnisse der einzelnen Regionen, zeigen sich deutliche Unterschiede. In Abbildung 5 ist hierfür der relative Unterschied der Ergebnisse der Emissionsreduktion für den Zeitraum Januar bis August 2023 mit dem regionalen Fahrzeugbestand (REF 1) im Vergleich zum bundesweiten Fahrzeugbestand (REF 2) dargestellt.

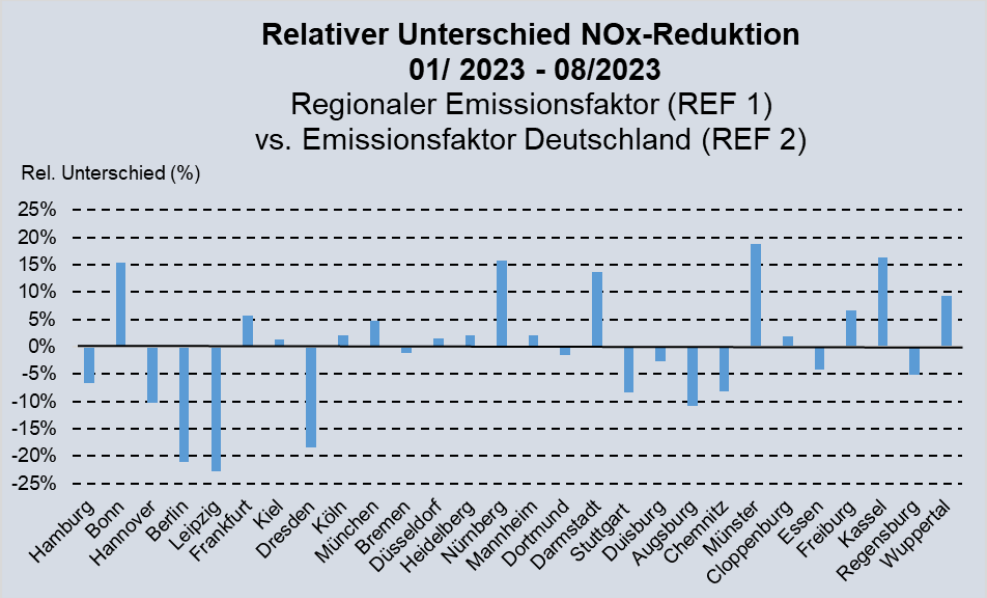

Abbildung 5: Relative Differenz der NO_x-Reduktion für unterschiedliche regionale Referenzflotten

Basisreferenz: REF 2:
Gesamter Bestand Deutschland am 01.01.2023, Fahrleistungserhebung BAST
Alternative Referenz: REF 1:
Gesamter regionaler Bestand am 01.01 2023, regionales Verkehrsmodell RWTH Aachen

Die Abbildung verdeutlicht, dass die Ergebnisse für einzelne Regionen aufgrund der Wahl der räumlichen Bezugsgröße der Referenzflotte erheblich voneinander abweichen können. In einigen Regionen sind die mit den jeweiligen Referenzflotten erzielten Ergebnisse sehr ähnlich, beispielsweise in Kiel, Köln oder Mannheim. In diesen Regionen unterscheidet sich die Zusammensetzung des Fahrzeugbestands kaum vom bundesweiten Fahrzeugbestand. In anderen Regionen ergeben sich mit der regionalen Referenz teils deutlich niedrigere Werte, beispielweise in Leipzig (-23%) oder Berlin (-21%). Ursache ist hierbei, dass in diesen Städten der Anteil der Dieselfahrzeuge geringer ist als im Bundesdurchschnitt. Ist dieser höher, ergeben sich mit der regionalen Referenz höhere Emissionsreduktionen, z. B. für Münster (+19%) oder Nürnberg (+16%).

Aus den in Abbildung 5 dargestellten Ergebnissen lassen sich folgende Schlussfolgerungen hinsichtlich des Einflusses der Referenzregion ableiten:

- Wenn keine sehr hohe Genauigkeit der Ergebnisse erforderlich ist, empfiehlt sich die Wahl des deutschen Fahrzeugbestands als Referenz. Dies hat den Vorteil, dass die Daten zur Berechnung der Emissionen der Referenzflotte und des Streckenanteils der verschiedenen Kraftstoffarten öffentlich verfügbar sind und keine regionales Verkehrsmodell erstellt werden muss.
- Werden spezifische Ergebnisse für Regionen benötigt, sollte man den regionalen Fahrzeugbestand als Referenz wählen und - im optimalen Fall - ein regionales Verkehrsmodell für die Bestimmung der regionalen Streckenanteile der Diesel- bzw. Benzinfahrzeuge anwenden, wie in Kapitel 2.2 beschrieben. Eine mögliche Vereinfachung stellt hier die Nutzung der öffentlich verfügbaren Daten zu Fahrtstrecken der verschiedenen Kraftstoffarten der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) zur Bestimmung der Streckenanteile dar.

Der Einfluss des regionalen Bezugs der Referenz auf die Emissionsreduktion ist im Vergleich zum nachfolgend dargestellten Einfluss der Alterszusammensetzung der Referenzflotte jedoch vernachlässigbar.

3.4 Einfluss des Alters der Referenzfahrzeuge

Bei den bisherigen Überlegungen wurde davon ausgegangen, dass als Referenz zur Nutzung eines EV immer der Fahrzeugbestand gewählt wird. Im Folgenden wird untersucht, wie sich eine unterschiedliche Altersstruktur der Referenzflotte auf die Ergebnisse der Emissionsreduktion auswirkt. Die Frage des Alters der Referenz ist von Bedeutung, da noch nicht geklärt ist, was in der Praxis die Alternative zur Nutzung eines EV ist. Dies könnte einerseits der Ersatz eines Verbrennerfahrzeugs aus dem Fahrzeugbestand sein. Andererseits könnte der Kauf eines Neuwagens oder jungen Gebrauchtwagens die Alternative zur Anschaffung bzw. Nutzung eines Elektroautos sein. Um den Einfluss auf die Emissionsreduktion dieser Alternativen abschätzen zu können, wurden Berechnungen mit drei Referenzfällen durchgeführt: REF 2 – Fahrzeugbestand Deutschland 2023, REF 3 – bundesweiter Bestand der jungen Gebrauchtwagen (max. 3 Jahre alt) und REF 4 – Fahrzeugbestand Deutschland 2030 (siehe Tabelle 2).

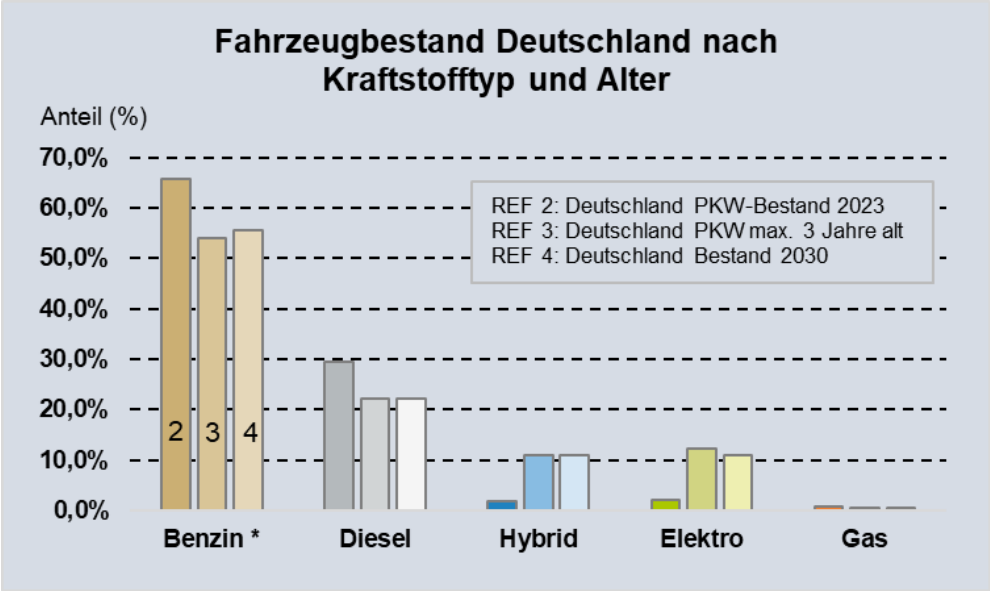

Abbildung 6: ***Zusammensetzung der Fahrzeugflotte in Deutschland nach Kraftstoffarten***

* inkl. Nicht-Plug-in-Hybrid

Die Zusammensetzung der drei Referenzfälle ist in Abbildung 6 nach Kraftstoffarten dargestellt. Während im bundesweiten PKW-Bestand am 01.01.2023 noch die reinen Verbrennerfahrzeuge (ohne Hybridfahrzeuge) mit gut 92% dominierten, lag ihr Anteil an der Flotte der jungen Gebrauchtwagen (max. 3 Jahre alt) nur noch bei rund 61%. Hybrid- und Elektro-PKW haben hier schon einen Anteil von 38%. Allerdings entfallen davon 15% auf Hybridfahrzeuge ohne externe elektrische Lademöglichkeit („Nicht-Plug-in-Hybrid"). Rechnet man diese Fahrzeuge, die den Großteil der Fahrleistung mit fossilen Treibstoffen – meist Benzin – zurücklegen, den Verbrennern zu, so betrug der Anteil der Verbrennerfahrzeuge am 01.01.2023 auch bei den jungen Gebrauchtwagen noch 76%. Hinsichtlich der Emissionsklassen unterscheiden sich die neueren Fahrzeuge aber deutlich

vom Gesamtbestand. Die Referenzflotte REF 3 besteht nur aus Verbrennungsfahrzeuge der emissionsarmen EU-6-Klassen und Fahrzeuge mit alternativen Antrieben, während im Gesamtbestand auch ältere Fahrzeuge mit höheren Emissionen noch einen signifikanten Anteil haben - 30% des Bestands mit EU-Emissionsklasse 1 bis 4.

Im fiktiven Fahrzeugbestand des Jahres 2030 dominieren mit einem Anteil von 78% immer noch die Verbrennerfahrzeuge (inkl. Nicht-Plug-in-Hybriden). Der Fahrzeugbestand in 2030 würde damit in etwa der Flotte der jungen Gebrauchtwagen (max. 3 Jahre alt) entsprechen. Dies ist insofern plausibel, da im Jahr 2030 viele der heute jungen Gebrauchtwagen noch im Bestand sein werden. Damit werden die ICEV-Fahrzeuge auch in 2030 dominieren, auch wenn dieser Anteil gegenüber 2023 deutlich abnehmen wird – in unserem Beispiel von 92% im Jahr 2022 auf 78% in 2030.

Um den Einfluss der Altersstruktur der Referenzfälle zu untersuchen, wird die NO_x-Reduktion für die drei Referenzfälle REF 2, REF 3 und REF 4 berechnet (siehe Tabelle 2). Für diese drei Referenzflotten wird jeweils der spezifische NO_x-Emissionsfaktor EM_{reg} ermittelt (siehe Kapitel 2.2). Mit der Gesamtstrecke $S_{charged}$, die mit der geladenen Strommenge im Jahr 2023 zurückgelegt werden kann, ergibt sich die Reduktion der NO_x-Emissionen, die durch das Laden an der Projektladestation im Jahr 2023 induziert wird (siehe Gleichung (1)). Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse für die drei Varianten der Referenzflotte.

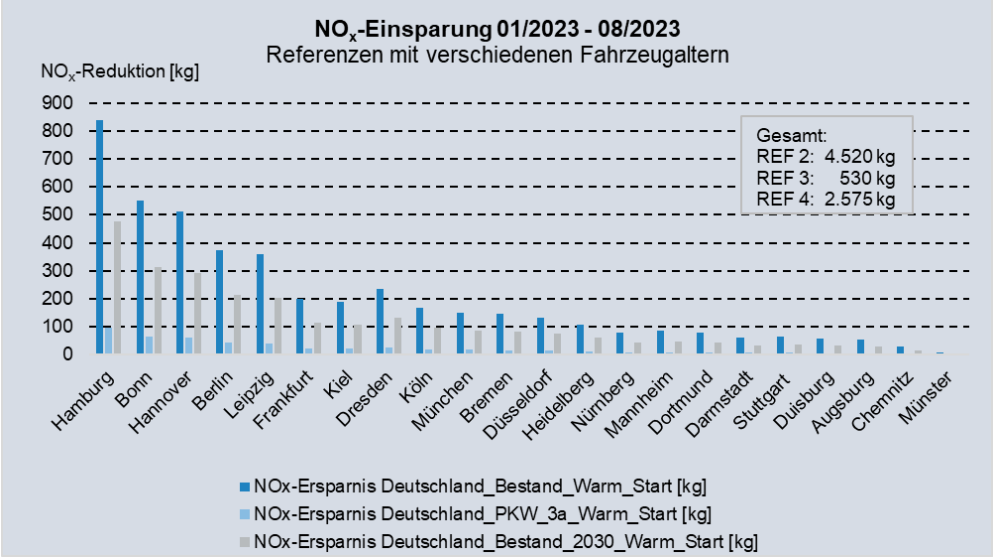

Abbildung 7: Reduktion der NO_x-Emissionen im Jahr 2023 für vier ICEV-Referenzen mit unterschiedlichem Fahrzeugalter (Beispielregionen)

Zunächst fällt auf, dass die Emissionsreduktion für die Referenzfälle REF 3 und REF 4 sehr unterschiedlich ist – und das, obwohl beide Fälle einen fast identischen Mix der Kraftstoffarten haben (siehe Abbildung 6). Die Ursache hierfür ist die unterschiedliche Zusammensetzung der beiden Referenzflotten hinsichtlich der Emissionsklassen der Fahrzeuge. Während REF 3 nur noch Fahrzeuge mit fossilem Antrieb der Emissionsklasse EU 6 aufweist, enthält der fiktive Fahrzeugbestand des Jahres 2030 noch Benzin- und Diesel-PKW in die Emissionskategorien EU 0 bis EU 5.

Deutlich größer ist der Unterschied in den Ergebnissen, wenn man davon ausgeht, dass ein junger Gebrauchtwagen die Alternative zum Kauf eines EV ist. Das zeigt der Vergleich der Ergebnisse mit den Referenzfällen REF 2 (Bestand Deutschland 2023) und REF 3 (Flotte der jungen Gebrauchtwagen, maximal 3 Jahre). Mit letzterer ergeben sich

Einfluss der Wahl der Referenzflotte auf die Emissionsminderung

Emissionsreduktionen, die um einen Faktor acht niedriger sind als mit dem gesamten Fahrzeugbestand als Referenz. Dies verdeutlicht, dass die Frage, was die Alternative zum Kauf bzw. zur Nutzung eines EV ist, enormen Einfluss auf die Reduktion von Emissionen durch Einsatz von EV hat. Die Frage, welche der hier gewählten Referenzen das Verhalten der Nutzer von EV widerspiegelt, ist allerding noch offen. Für die Klärung dieser Frage werden weitere Untersuchungen erforderlich sein.

Die Analyse zeigt auch, dass der Effekt des Ausbaus der Elektromobilität auf die Emissionen in Zukunft abnehmen wird. Dies ist dadurch bedingt, dass ältere Fahrzeug mit höheren Emissionen ohnehin nach und nach aus dem Fahrzeugbestand verschwinden werden. Hinzu kommt, dass zukünftig auch ältere Elektromodelle durch neuere E-Fahrzeuge ersetzt werden. Hiermit ist dann keinerlei Einsparung an Emissionen mehr verbunden. Mit fortschreitendem Ausbau der Elektromobilität wird also der Reduktionseffekt zunehmend geringer werden.

4
Fazit und Ausblick

Die in diesem Papier vorgestellte Methode eignet sich für die Abschätzung der Emissionsminderung durch die Nutzung von EV auf Basis von Ladedaten. Am Beispiel der NO_x-Emissionen wurde der Einfluss der Wahl der Referenz gezeigt. Hierfür wurden drei Aspekte untersucht:

Einfluss der Emissionen der Referenzflotte beim Start auf die Emissionsreduktion durch Nutzung von EV

- *Ergebnis:* Der Unterschied, der sich durch die Berücksichtigung der Startemissionen der Referenzflotte ergibt, ist klein im Vergleich zu anderen Einflüssen. Daher muss dieser Anteil der Emissionen nicht zwingend bei der Berechnung berücksichtigt werden.

Einfluss der Wahl des regionalen ICEV-Bestands im Vergleich zum Bestand der Bundesrepublik

- *Ergebnis:* Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Emissionsreduktion bei Berechnung mit dem regionalen Fahrzeugbestand und der bundesweiten Referenzflotte betragen im gezeigten Beispiel ca. +/- 20%. Die Abweichungen sind bedingt durch Unterschiede beim Anteil der Dieselfahrzeuge: Ist dieser in der regionalen Flotte höher als im Bundesdurchschnitt, fallen die Ergebnisse mit dem regionalen Referenzflotte höher aus, sind sie niedriger, ergeben sich geringere Emissionsreduktionen.

  Hier ist allerdings im Einzelfall zu prüfen, ob die regionale Flotte evtl. in nennenswertem Umfang Fahrzeuge enthält, die zwar in der Region gemeldet sind, aber in anderen Regionen eingesetzt werden. Dies kann z.B. der Fall sein, wenn in der Region große Mietwagenanbieter oder Unternehmen mit extern eingesetzten Fahrzeugflotten angesiedelt sind wie z.B. Logistikdienstleister.

In welchen Fällen lohnt es sich, die ICEV-Referenz der Region zu wählen und wann wäre es zielführender, einen überregionalen Ansatz zu wählen?

- *Empfehlung:* Wenn die absolute Höhe der Reduktion die zu untersuchende, relevante Größe ist und der Fahrzeugbestand deutlich vom Bundesdurchschnitt abweicht, dann empfiehlt sich die Nutzung der regionalen Referenzflotte.

  Es sollte jedoch berücksichtigt werden, dass die Emissionsreduktion, die man auf Basis von Ladedaten von öffentlichen und halböffentlichen Ladestationen berechnen kann, nur einen Teil des Gesamteffekts sind. Effekte, die durch Laden an privaten Wallboxen oder Ladestationen bei Arbeitgebern erreicht werden, können hierdurch nicht erfasst werden. Hierfür müssen andere, ergänzende methodische Ansätze gewählt werden.

Welchen Einfluss hat das Alter der ersetzten Fahrzeuge bzw. der alternativ zu den EV beschafften Fahrzeugen?

- *Ergebnis:* Das Alter der ersetzten bzw. der alternativ zu den EV beschafften Fahrzeugen hat einen sehr großen Einfluss auf die Emissionsreduktion. Sind Neuwagen oder junge Gebrauchtwagen die Alternative zu Nutzung oder Kauf eines

EV, fällt die mit dieser Referenz berechnete Reduktion erheblich kleiner aus als bei der Berechnung mit dem gesamten Fahrzeugbestand als Referenz.

Daher ist die Frage, welches Fahrzeug ein EV substituiert, relevant für die Einschätzung der Emissionsreduktion. Für die Klärung dieser Frage werden weitere Untersuchungen erforderlich sein.

Die Resultate zeigen auch, dass der Effekt des Ausbaus der Elektromobilität auf die Emissionen aufgrund des steigenden Anteils emissionsarmer Fahrzeuge im Fahrzeugbestand in Zukunft abnehmen wird.

Literatur

ADAC 2023a. Aktuelle Elektroautos im Test: So hoch ist der Stromverbrauch. https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/tests/stromverbrauch-elektroautos-adac-test/, abgerufen: 05.08.2023

ADAC 2023b. Plug-in-Hybrid: Modelle, Reichweiten, Kosten, Verbrauch. https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/auto/plug-in-hybrid/, abgerufen: 17.07.2023

Agora Verkehrswende 2019. Klimabilanz von strombasierten Antrieben und Kraftstoffen. https://www.agora-verkehrswende.de/veroeffentlichungen/klimabilanz-von-strombasierten-antrieben-und-kraftstoffen-1/, abgerufen: 16.11.2020

BAST 2014. Fahrleistungserhebung 2014 – Inländerfahrleistung, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik Heft V 290, ISSN 0943-9331, ISBN 978-3-95606-338-1, Bergisch Gladbach, August 2017, abgerufen: 08.02.2022.

Bauer 2017. Bauer, C. (Ed.), The environmental performance of current & future passenger vehicles: In Proceedings of the 21th ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles, Zurich, Switzerland. 19–22 June 2017.

BMDV 2017. Sofortprogramm Saubere Luft 2017 – 2020. Bundesministerium für Digitales und Verkehr. https://www.bmvi.de/DE/Themen/Mobilitaet/Urbane-Mobilitaet/Sofortprogramm-Saubere-Luft/sofortprogramm-saubere-luft.html abgerufen: 10.09.2020.

BMVI 2018. RegioStaR - Regional Statistical Spatial Typology for Mobility and Transport Research. Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/regiostar-raumtypologie-englisch.pdf.

Bundesagentur für Arbeit 2019. Pendlerverflechtungsmatrix. https://statistik.arbeitsagentur.de/DE/Navigation/Statistiken/Interaktive-Angebote/Pendleratlas/Pendleratlas-Nav.html, abgerufen: 12.09.2021.

Cerdas, F., Egede, P., Herrmann, C. 2018. LCA of Electromobility, in: Hauschild, M.Z., Rosenbaum, R.K., Olsen, S.I. (Eds.), Life cycle assessment: Theory and practice. Springer, Cham, pp. 669–693.

Cox, B., Bauer, C., Mendoza Beltran, A., van Vuuren, D.P., Mutel, C.L. 2020. Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios. Applied Energy 269, 115021. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115021.

destatis 2019. Gemeindeverzeichnis-Informationssystem GV-ISys. Statistisches Bundesamt. https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Regionales/Gemeindeverzeichnis/_inhalt.html#101366.

EEA 2013. NEC Directive status report 2012. European Environmental Agency. https://www.eea.europa.eu/publications/nec-directive-status-report-2012, abgerufen 16.11.2022.

EEA 2020. National Emission reduction Commitements Directiver reporting status 2020. European Environmental Agency. https://www.eea.europa.eu/publications/national-emission-reduction-commitments-directive, abgerufen 16.11.2022.

EEA 2021. Greenhouse gas emissions from transport in Europe. European Environment Agency. https://www.eea.europa.eu/ims/greenhouse-gas-emissions-from-transport, abgerufen: 03.05.2022.

Eickels, T., Kühnel, F., Theißen, A., Brost, W. (Eds.) 2020. Methodology for Estimating the NO_x Saving Potential by Building Charging Infrastructure for Electromobility: Proceedings of 8th Transport Research Arena TRA 2020, April 27-30, 2020, Helsinki, Finland.

Ellingsen, L.A.-W., Singh, B., Strømman, A.H. 2016. The size and range effect: lifecycle greenhouse gas emissions of electric vehicles. Environ. Res. Lett. 11, 54010. https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/5/054010.

Golovanov, N., Marinescu, A. 2019. Electromobility and Climate Change, in: Proceedings of 2019 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS): 21-23 May 2019, Cluj-Napoca, Romania. 2019 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS), Cluj Napoca, Romania. 5/21/2019 - 5/23/2019. IEEE, Piscataway, NJ, pp. 1–5.

Helmers, E., Dietz, J., Weiss, M. 2020. Sensitivity Analysis in the Life-Cycle Assessment of Electric vs. Combustion Engine Cars under Approximate Real-World Conditions. Sustainability 12, 1241. https://doi.org/10.3390/su12031241.

Helms, H., Jöhrens, J., Kämper, C., Giegrich, J., Liebich, A., Vogt, R., Lambrecht, U. 2016. Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/weiterentwicklung-vertiefte-analyse-der, abgerufen: 20.11.2020.

HERE Maps, 2017. Street Network.

Kawamoto, R., Mochizuki, H., Moriguchi, Y., Nakano, T., Motohashi, M., Sakai, Y., Inaba, A. 2019. Estimation of CO2 Emissions of Internal Combustion Engine Vehicle and Battery Electric Vehicle Using LCA. Sustainability 11, 2690. https://doi.org/10.3390/su11092690.

KBA 2023. Der Fahrzeugbestand am 1. Januar 2023, Pressemitteilung Nr. 08/2023, abgerufen: 02.03.2023, https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Fahrzeugbestand/2023/pm08_fz_bestand_pm_komplett.html, abgerufen: 09.10.2023

Klötzke, M., Frieske, B., Kreyenberg, D., Bienge, K., Hillebrand, P., Hüging, H., Koska, T., Monscheidt, J., Ritthoff, M., Soukup, O., Tenbergen, J. 2015. Begleitforschung zu Technologien, Perspektiven und Ökobilanzen der Elektromobilität: STROMbegleitung ; Abschlussbericht des Verbundvorhabens. Dt. Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Stuttgart, 433 pp. http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:wup4-opus-59663, abgerufen: 06.11.2020.

La Souza, L.P. de, Lora, E.E.S., Palacio, J.C.E., Rocha, M.H., Renó, M.L.G., Venturini, O.J. 2018. Comparative environmental life cycle assessment of conventional vehicles with different fuel options, plug-in hybrid and electric vehicles for a sustainable transportation system in Brazil. Journal of Cleaner Production 203, 444–468. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.236.

LANUV 2019. Bericht über die Luftqualität im Jahr 2018. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/luft/immissionen/ber_trend/2019-04-30_Bericht_%C3%BCber_die_Luftqualit%C3%A4t_im_Jahr_2018.pdf.

Mayyas, A., Omar, M., Hayajneh, M., Mayyas, A.R. 2017. Vehicle's lightweight design vs. electrification from life cycle assessment perspective. Journal of Cleaner Production 167, 687–701. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.145.

Nobis, C., Kuhnimhof, T. 2018. Mobilität in Deutschland - MiD Ergebnisbericht: Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur (FE-Nr. 70.904/15), Bonn, Berlin. www.mobilitaet-in-deutschland.de.

RWI, microm 2018. Sozioökonomische Daten auf Rasterebene (Welle 7). Kaufkraft.

UBA 2019. Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA), Version 4.1. Umweltbundesamt.

UBA 2023a. https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#nationale-und-europaische-klimaziele, abgerufen: 25.09.2023

UBA 2023b. Stickstoffoxid-Emissionen. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland/stickstoffoxid-emissionen, abgerufen: 25.09.2023

Wietschel, M., Kühnbach, M., Rüdiger, D., 2019. Die aktuelle Treibhausgasemissionsbilanz von Elektrofahrzeugen in Deutschland. Working Paper Sustainability and Innovation S02/2019, Karlsruhe. http://hdl.handle.net/10419/194563, abgerufen: 16.11.2022