



Hochleistungsschnellladenetz für Elektro-Lkw

Kurzstudie im Auftrag des Verbandes der Automobilindustrie (VDA)

Ort: Karlsruhe
Datum: 29.05.2020

Final

Impressum

Hochleistungsschnellladenetz für Elektro-Lkw

Projektleitung

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe
Dr. Patrick Plötz, patrick.ploetz@isi.fraunhofer.de

Autoren

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe
Dr. Patrick Plötz, patrick.ploetz@isi.fraunhofer.de
Daniel Speth, daniel.speth@isi.fraunhofer.de
Philipp Rose, philipp.rose@isi.fraunhofer.de

Beteiligte Institute

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe
Dr. Patrick Plötz, patrick.ploetz@isi.fraunhofer.de

Auftraggeber

Verband der Automobilindustrie e.V.
Behrenstraße 35, 10117 Berlin

Bildnachweis

Deckblatt: Eigene Darstellung

Zitierempfehlung

Plötz, P.; Speth, D.; Rose, P. (2020): Hochleistungsschnellladenetz für Elektro-Lkw. Kurzstudie im Auftrag des Verbandes der Automobilindustrie (VDA). Karlsruhe: Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)

Veröffentlicht

Mai 2020

Hinweise

Dieser Bericht einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. 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. Die Darstellungen in diesem Dokument spiegeln nicht notwendigerweise die Meinung des Auftraggebers wider.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	5
2	Executive Summary	6
3	Einführung und Zielsetzung	7
4	Daten und Methodik	9
4.1	Daten	9
4.1.1	Verkehrsaufkommen.....	9
4.1.2	Techno-ökonomische Parameter: Rahmenbedingungen zum Aufbau und zur Auslegung der Infrastruktur	11
4.2	Szenarien und Rahmendaten	12
4.3	Methodik	14
4.3.1	Vorgehensweise regionale Verteilung.....	14
4.3.2	Auslegung der Stationen	16
5	Ergebnisse	21
5.1	Ladestandorte in Deutschland	21
5.2	Ladepunkte	24
5.3	Diskussion	27
5.3.1	Energiewirtschaftliche Fragen	27
5.3.2	Kosten.....	27
5.3.3	Sensitivitäten	28
6	Abbildungsverzeichnis	31
7	Tabellenverzeichnis	32
8	Literaturverzeichnis	33

1 Zusammenfassung

Eine erhebliche Reduktion der Treibhausgasemissionen schwerer Lkw kann durch den Einsatz von Batterie-Lkw erfolgen. Aufgrund der hohen Tagesfahrleistungen vieler schwerer Lkw ist ein regelmäßiges Nachladen solcher Batterie-Lkw im öffentlichen Raum, bspw. an Bundesautobahnen, notwendig. Der vorliegende Bericht entwirft in zwei Betrachtungen ein Netz an Hochleistungsschnellladen mit 350 kW bzw. mit ca. 720 kW Dauerleistung zum Nachladen von Batterie-Lkw entlang der deutschen Autobahn. Es wird dabei sowohl die räumliche Verteilung der Standorte entlang der Autobahn als auch die Auslegung der Standorte vorgestellt.

Es werden zwei Szenarien mit 5 % bzw. 15 % Batterie-Lkw im Bestand betrachtet sowie ein enges Netz mit 50 km Abstand zwischen den Ladeorten und ein weites Netz mit 100 km Abstand zwischen den Orten. Unter Verwendung von 350 kW Dauerleistung wären in einem engen Netz ca. 260 Ladestandorte notwendig mit insgesamt ca. 1.020 Ladepunkten bei 5 % BEV bzw. 2.300 Ladepunkte bei 15 % BEV im Bestand bei Auslegung der Standorte auf fünf Minuten mittlere Wartezeit im Peak-Verkehr (vgl. Tabelle 1). Bei Verwendung von ca. 720 kW Dauerleistung sinkt die Anzahl der erforderlichen Ladepunkte auf ca. 630 für 5% und auf 1.200 für 15% BEV Anteil im Bestand bei einer identischen Verteilung der Ladestandorte. Bei einem weiten Netz mit 100 km Abstand der Ladestandorte entlang der Autobahn wären ca. 140 Ladestandorte notwendig. Diese umfassen bei 350 kW Dauerleistung insgesamt ca. 850 Ladepunkte bei 5 % BEV im Bestand bzw. 2.240 Ladepunkte bei 15 % BEV im Bestand notwendig. Bei einer Dauerleistung von 720 kW wären es ca. 470 Ladepunkte bei 5 % BEV im Bestand bzw. 1.100 Ladepunkte bei 15 % BEV im Bestand bei Auslegung auf fünf Minuten mittlere Wartezeit im Peak-Verkehr.

Tabelle 1: Anzahl Ladestandorte und Ladepunkte in Deutschland in den Szenarien in 2030

Für verschiedene Bestandsanteile und Entfernungen zwischen den Ladeorten bei Auslegung auf fünf Minuten mittlere Wartezeit im Peak-Verkehr.

Szenario	50 km: 262 Orte	100 km: 142 Orte
5 % BEV	1.020 Ladepunkte bei 350 kW 630 Ladepunkte mit 720 kW	850 Ladepunkte mit 350 kW 470 Ladepunkte mit 720 kW
15 % BEV	2.300 Ladepunkte bei 350 kW 1.200 Ladepunkte mit 720 kW	2.240 Ladepunkte bei 350 kW 1.100 Ladepunkte mit 720 kW

Für die langfristige Ausbaufähigkeit des Systems erscheint es sinnvoll ein Netz mit 50 km Abstand zu planen, da dieses langfristiges Ausbaupotenzial für einen Markthochlauf auch über 15 % Bestandsanteil bietet. Im Aufbau eines solchen Netzes sollte mit 350 kW Ladeleistung nach dem derzeit verfügbaren CCS-Standard begonnen werden, da ein Standard mit höherer Ladeleistung noch in der Entwicklung ist und die grundsätzliche Erschließung der Standorte auch von späteren Ladeeinheiten genutzt werden kann.¹ Sobald ein Standard mit höherer Leistung definiert wurden und entsprechende Ladehardware entwickelt sowie auf dem Markt verfügbar ist, kann dieser flächendeckend installiert werden.

Zentrale Annahmen sind hierbei, dass 50 % des Stromes von BEV-Lkw an der Autobahn geladen werden und eine mittlere Wartezeit von 5 min bis zum Freiwerden eines Ladepunktes für Lkw vorgesehen sind. Wird weniger Strom an der Autobahn geladen oder werden höhere mittlere Wartezeiten akzeptiert, dann sind weniger Ladepunkte ausreichend. Die Zahl der Ladestandorte ist davon aber unabhängig.

¹ Vgl. <https://www.electrive.com/2019/07/11/charin-is-working-on-truck-charging-with-up-to-3-mw/> sowie <https://www.vda.de/de/presse/Presse-meldungen/2001214-VDA-NA-Automobil-und-VDE-DKE-bauen-strategische-Partnerschaft-zur-E-Mobility-Standardisierung-aus-.html>

2 Executive Summary

A significant reduction in greenhouse gas emissions from heavy trucks can be achieved by using battery trucks. Due to the high daily mileage of many heavy trucks, regular recharging of such battery trucks is necessary in public areas, e.g. on federal motorways. This report outlines a network of high performance rapid charging with 350 kW and 720 kW continuous power for recharging battery trucks along the German motorway. The spatial distribution of the locations along the motorway as well as the design of the locations is presented.

Two scenarios with 5% and 15% battery trucks stock share are considered as well as a dense network with 50 km distance between the charging locations and a wider network with 100 km distance between the locations. Using 350 kW charging power, a dense network would require approx. 260 charging locations with a total of approx. 1,020 charging points at 5% BEV stock share or 2,300 charging points at 15% BEV for an average of five minutes waiting time in peak traffic (see Table 1). If approx. 720 kW charging power is used, the number of required charging points decreases to approx. 630 for 5% BEV and to 1,200 for 15% BEV stock share with the same charging locations. For a wider network with 100 km distance between the charging locations along the motorway, approx. 140 charging locations would be necessary. With 350 kW charging power, these comprise a total of approx. 850 charging points at 5% BEV stock share or 2,240 charging points at 15% BEV stock share. With a power of 720 kW, this would require approx. 470 charging points at 5% BEV stock share or 1,100 charging points at 15% BEV stock share.

Table 2: Number of charging locations and charging points in different scenarios

For different stock shares and distance between locations in Germany for peak traffic and an average waiting time of five minutes.

Scenario	50 km: 262 locations	100 km: 142 locations
5 % BEV	1.020 charging points at 350 kW 630 charging points at 720 kW	850 charging points at 350 kW 470 charging points at 720 kW
15 % BEV	2.300 charging points at 350 kW 1.200 charging points at 720 kW	2. 240 charging points at 350 kW 1.100 charging points at 720 kW

For the long-term expandability of the system, it seems reasonable to plan a network with a distance of 50 km, since this offers long-term expansion potential for a market ramp-up beyond 15 % BEV stock share. The construction of such a network could start with 350 kW charging power with the currently available CCS standard, as a standard with higher charging power is still under development.² As soon as a standard with higher power is available, it can be installed nationwide.

Central assumptions of the present results are that 50 % of the electricity of BEV trucks are charged at the motorway and a mean waiting time of 5 minutes until a charging point for trucks is available. If less electricity is charged on the motorway or if higher average waiting times are acceptable then fewer charging points would be sufficient. However, the number of charging locations is independent of this.

² Cf. <https://www.electrive.com/2019/07/11/charin-is-working-on-truck-charging-with-up-to-3-mw/> and <https://www.vda.de/de/presse/Pressemeldungen/2001214-VDA-NA-Automobil-und-VDE-DKE-bauen-strategische-Partnerschaft-zur-E-Mobility-Standardisierung-aus-.html>

3 Einführung und Zielsetzung

Die CO₂-Flottengrenzwerte der Europäischen Union für schwere Nutzfahrzeuge EU (Verordnung (EU) 2019/1242) erfordert eine Reduktion der mittleren CO₂-Emissionen der Lkw-Neuwagenflotte der Hersteller um 30% bis 2030 gegenüber 2019. Diese Vorgabe und die langfristige Notwendigkeit zu Reduktion von Treibhausgasemissionen im Verkehr zur Einhaltung nationaler und europäischer Klimaschutzziele erfordern den Einsatz emissionsarmer Antriebe im schweren Straßengüterverkehr.

Batterieelektrische Lkw verfügen über einen lokal CO₂-freien Antrieb für den alle großen Hersteller Modelle für die kommenden Jahre angekündigt haben. Die Reichweite ist gegenüber heutigen konventionellen Lkws allerdings limitiert. Batterie-Lkw profitieren von den großen Stückzahlen im Bereich batterieelektrischer Pkw und könnten schon in absehbarer Zeit für Nutzer ökonomisch attraktiv werden. Die Fernverkehrseinsätze im Bereich schwerer Lkw bedingen allerdings den Einsatz von Hochleistungs-Ladesystemen und Hochleistungs-Ladestandorten, da die heutigen installierten Ladeleistungen für Pkw (max. 350 – 450 kW) nicht ausreichen, um Lkw innerhalb der gesetzlichen Pausenzeiten von 45 min zwischen zwei Fahreinsätzen ausreichend zu laden.

Ziel dieses Projektes ist es, ein mögliches Netz von Schnellladeorten für eine Basisversorgung von Elektro-Lkw in Deutschland zu entwerfen und die notwendige Auslegung einzelner Stationen zu definieren. Es wird ein Zeitraum bis ca. 2030 betrachtet sowie schwere Nutzfahrzeuge mit mehr als 12 t zGG untersucht.

Der vorliegende Bericht ist wie folgt gegliedert. Kapitel 2 stellt die Datengrundlage zum Verkehrsaufkommen schwerer Lkw entlang der Bundesautobahnen (BAB) sowie die Methodik zur Berechnung der Standorte und ihrer Auslegung gemäß eines Wartschlangenmodells dar. Die Ergebnisse für ein Netzwerk mit Hochleistungs-Ladeinfrastruktur finden sich in Kapitel 3, gefolgt von einer Zusammenfassung und Diskussion in Kapitel 4.

4 Daten und Methodik

4.1 Daten

4.1.1 Verkehrsaufkommen

Zum Entwurf eines deutschlandweiten Schnellladenetzes an Autobahnen für Lkw werden Daten zum deutschlandweiten Verkehrsaufkommen sowie Daten zum lokalen Verkehrsaufkommen für alle deutschen Autobahnen benötigt. Die deutschlandweiten Daten werden benötigt, um die Gesamtnachfrage nach elektrischer Energie im schweren Güterverkehr abzuschätzen. Lokale Daten dienen zur Positionierung sowie Auslegung einzelner Ladestandorte.

4.1.1.1 Das deutschlandweite Schwerverkehrsaufkommen zur Abschätzung der Gesamtnachfrage

In der vorliegenden Studie wird die Fahrleistung schwerer Nutzfahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht von über 12 t betrachtet. Hierbei handelt es sich um Lkw, Lkw-Gespanne sowie Sattelzugmaschinen, die primär im Fernverkehr eingesetzt werden. Ihre Fahrleistung betrug im Jahr 2015 insgesamt 31,3 Mrd. Fzg.-km, wovon 75 % auf Autobahnen erfolgte (Wietschel et al. 2017). Es wird daher von einer deutschlandweiten Fahrleistung in Höhe von 23,475 Mrd. Fzg.-km auf Autobahnen ausgegangen. Da an dieser Stelle eine Infrastruktur im Jahr 2030 betrachtet wird, wird zusätzlich ein Wachstum von 30 % von 2015 bis 2030 unterstellt (BMVI 2016). Für Nutzfahrzeuge über 12 t zulässigem Gesamtgewicht ergibt sich 2030 ein deutschlandweites jährliches Schwerverkehrsaufkommen auf Autobahnen von 30,5 Mrd. Fzg.-km.

4.1.1.2 Manuelle und automatische Verkehrszählung als Grundlage des lokalen Verkehrsaufkommens

Zur Bestimmung des lokalen abschnittsscharfen Verkehrsaufkommens auf allen deutschen Autobahnen stehen zwei Datenquellen zur Verfügung: Die manuelle Straßenverkehrszählung (BAST 2017) sowie die automatische Straßenverkehrszählung (BAST 2019) der Bundesanstalt für Straßenwesen.

Die manuelle Straßenverkehrszählung wird in der Regel alle fünf Jahre durchgeführt. Die aktuellsten Daten stammen aus dem Jahr 2015. Dabei wurden an 2.549 Zählstellen Lkw über 3,5 t zGG (und Pkw) händisch für unterschiedliche Tage gezählt, um unterschiedliche Verkehrssituationen, abhängig vom Wochentag sowie Ferientagen und der Fahrtrichtung, abbilden zu können. Aufgrund der hohen Zählstellendichte, bei 13.000 km Autobahn beträgt der Abstand durchschnittlich fünf Kilometer, ergibt sich die durchschnittliche tägliche Verkehrsbelastung für nahezu jeden Autobahnabschnitt zwischen zwei Abfahrten. Die Ergebnisse der Zählung werden tabellarisch für jeden Autobahnabschnitt, für unterschiedliche Wochentage, durch die BAST zur Verfügung gestellt.

Die automatische Straßenverkehrszählung erfolgt kontinuierlich an derzeit 1.124 Zählstellen. Für die hier durchgeführte Auswertung lagen für 846 Zählstellen vollständige Daten vor. Je nach eingesetzter Technologie können bis zu acht Fahrzeugtypen unterschieden werden. An dieser Stelle relevant sind Sattelzugmaschinen sowie Gespanne (Lkw > 3,5 t zGG mit Anhänger), die separat ausgewiesen werden (BAST 2015). Für jede Zählstelle stehen die Stundenwerte eines Jahres für jede Richtung und jeden Fahrzeugtyp zur Verfügung. Zusätzlich ist zu jeder Zählstelle die exakte Position als Geokoordinate verfügbar.

Tabelle 3 fasst die wesentlichen Merkmale beider Zählung zusammen.

Tabelle 3: Vergleich manueller und automatischer Straßenverkehrszählungsdaten

	Manuelle Straßenverkehrszählung	Automatische Straßenverkehrszählung
Jahr der Erhebung	2015	2018
Anzahl Zählstellen	2.549	846
Zeitliche Auflösung	Jährliche Tagesdurchschnittswerte	Stundenwerte
Detailgrad Nutzfahrzeuge	Fahrzeuge > 3,5 t zGG	Sattelzüge und Gespanne
Abschnittsbeschreibung	Beginn und Ende	Beginn und Ende
Geokoordinaten	Nicht enthalten	Enthalten

Quellen: (BAST 2017, 2019)

Im Rahmen der vorliegenden Studie werden beide Datensätze verwendet. Aufgrund der höheren Zählstellendichte wird die manuelle Straßenverkehrszählung zur Standortbestimmung der Ladestationen verwendet. Geokoordinaten wurden dabei aus der automatischen Straßenverkehrszählung übernommen beziehungsweise softwareunterstützt (QGIS[®], GoogleMaps[®]) händisch anhand der Abschnittsbeschreibung ergänzt. Abbildung 1 zeigt die Zählstellen der manuellen Verkehrszählung in Deutschland, die zur Standortbestimmung verwendet werden. Auch das tägliche Verkehrsaufkommen an den Zählstellen wird der manuellen Zählung entnommen. Um die Verteilung der Fahrzeuge über den Tag und die daraus resultierende Peakbelastung zu bestimmen, wird die automatische Verkehrszählung verwendet.

Abbildung 1: Zählstellen der manuellen Verkehrszählung in Deutschland

Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf BAST (2017) und Kartenquelle: OpenStreetMap

4.1.2 Techno-ökonomische Parameter: Rahmenbedingungen zum Aufbau und zur Auslegung der Infrastruktur

Für eine Abschätzung der technischen Auslegung der Infrastruktur werden Rahmenannahmen hinsichtlich der Fahrzeuge sowie der Infrastruktur selbst benötigt. Die technischen Parameter der Fahrzeuge sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Die Batterie ist dabei so ausgelegt, dass die typische Lenkzeit von 4,5 Stunden ohne Pause zurückgelegt werden kann. Für die durchschnittliche Ladeleistung wird als untere Grenze die heutige Leistungsfähigkeit von Pkw-Infrastruktur, ca. 350 kW, angenommen. Dies entspricht, bei einer angenommenen Fahrleistung von 300 km in 4,5 Stunden, einer Ladedauer von einer Stunde. Da eine Verlängerung der Tank- und damit Standzeit von Spediteuren in der Regel nicht akzeptiert wird (Kluschke et al. 2019), wird in weiteren Szenarien eine Ladedauer von 30 Minuten, bei einer durchschnittlichen Ladeleistung von 720 kW, unterstellt. Dies ermöglicht, inklusive Wartezeiten, das Nachladen innerhalb der gesetzlichen Pause von 45 Minuten.

Tabelle 4: Technische Parameter Fahrzeuge

Merkmal	Wert
Elektrischer Endenergiebedarf [kWh/km]	1,2
Reichweite [km]	333
Nutzbare Batteriegröße [kWh]	400
Angenommene Fahrleistung in 4,5 h [km]	300
Durchschnittliche Ladeleistung [kW]	360 – 720 kW, szenario-abhängig

Quellen: Eigene Annahmen basierend auf Wietschel et al. (2017), Kühnel et al. (2018) sowie Expertenschätzungen

Für die Ladeinfrastruktur wird, basierend auf der durchschnittlichen Ladeleistung der Fahrzeuge, eine Peakleistung zwischen 500 kW und 1000 kW angenommen. Für eine erste Kostenkalkulation der Infrastruktur werden Kosten in Höhe von 400.000 €/MW Peakleistung unterstellt. Darin enthalten sind die Installation der Ladestation, der Netzanschluss sowie der Transformator (Kühnel et al., 2018). Es handelt sich dabei um eine Kostenschätzung für eine Serienproduktion, erste Prototypen können zu deutlich höheren Kosten führen (heute ca. 1 Mio. €/Ladepunkt). Zusätzlich fallen Kosten für den Erwerb geeigneter Flächen an. Diese sind jedoch deutlich standortabhängig und können an dieser Stelle nicht berücksichtigt werden. Da die Netzanschlusskosten von den örtlichen Gegebenheiten teilweise abhängig sind, unterliegen auch sie deutlichen Schwankungen.

Tabelle 5: Techno-ökonomische Parameter Ladeinfrastruktur

Merkmal	Wert
Durchschnittliche Leistung [kW]	360 – 720 kW, szenarioabhängig
Peakleistung [kW]	500 – 1.000 kW, szenarioabhängig
Kosten [€/MW]	400.000

Quellen: Eigene Annahmen basierend auf Wietschel et al. (2017), Kühnel et al. (2018), NPE (2015), Gnann (2017) sowie Expertenschätzungen

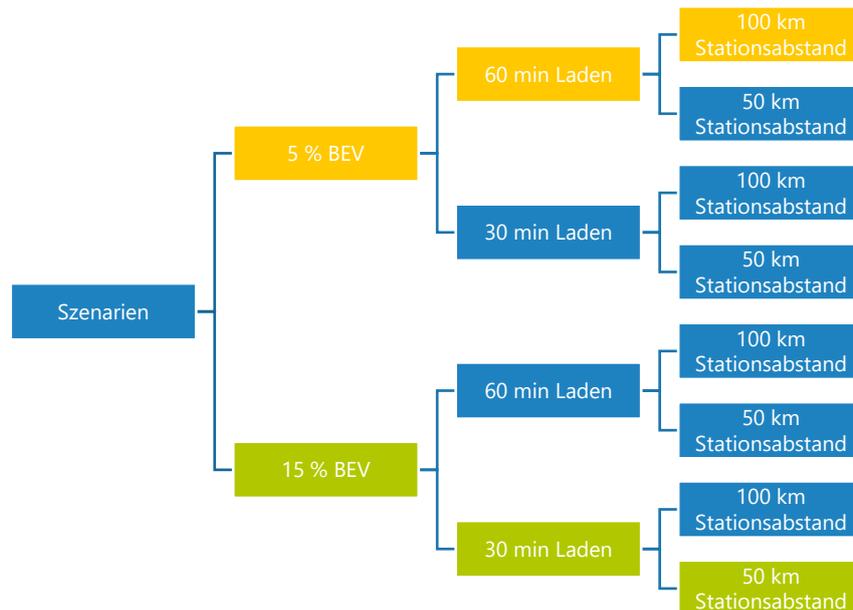
4.2 Szenarien und Rahmendaten

Für die vorliegende Studie wird davon ausgegangen, dass sich die gesamte Fahrleistung schwerer Nutzfahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 12 t zGG im Wesentlichen auf die Werktage eines Jahres verteilt. Es ergibt sich die Tagesfahrleistung der Flotte von 97,5 Millionen Fzg.-km.

Des Weiteren werden insgesamt acht Szenarien unterschieden. Dabei werden zunächst zwei Diffusions-szenarien unterstellt. Im ersten Fall wird von einem elektrischen Fahrzeugbestand in Höhe von 5 % des Gesamtbestandes 2030 ausgegangen. Das heißt 5 % der Fahrleistung wird von batterieelektrischen Lkw erbracht. Im zweiten Fall wird davon ausgegangen, dass 15 % der Fahrleistung batterieelektrisch erbracht wird. Zusätzlich wird für beide Fälle die durchschnittliche Ladedauer variiert. Dabei wird einmal von Schnellladen mit durchschnittlich 360 kW (Peak: 500 kW) und einmal von Ultraschnellladen mit durchschnittlich 720 kW (Peak: 1.000 kW) ausgegangen. Des Weiteren wird der Abstand zwischen zwei Ladestationen sowohl mit 50 km als auch mit 100 km gerechnet. Es ergeben sich insgesamt acht Szenarien. Davon werden im Folgenden insbesondere zwei Szenarien besonders diskutiert. Das Szenario *Minimalnetz* geht von 5 % batterieelektrischen Fahrzeugen in 2030, einer Ladedauer von 60 min sowie einem Stationsabstand von 100 km aus. Das Szenario *Ausbaunetz* geht von 15 % batterieelektrischen Fahrzeugen, einer Ladedauer von 30 min und einem Stationsabstand von 50 km aus. Die beiden gesondert betrachteten Szenarien zeigen damit die Bandbreite der hier vorgestellten Szenarien auf.

Abbildung 2: Übersicht der Szenarien

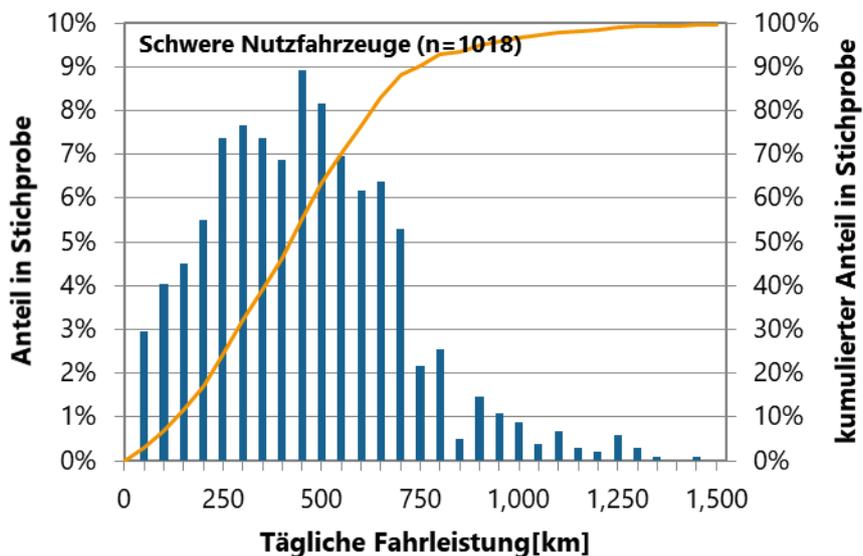
Gelb: Szenario *Minimalnetz*; Grün: Szenario *Ausbaunetz*



Abschließend wird, in Übereinstimmung mit Kühnel et al. (2018), davon ausgegangen, dass Fahrzeuge über Nacht am heimischen Standort geladen werden können. Bei typischen Fahrleistungen von ca. 500 km täglich (vgl. Abbildung 3), wird von einem verbleibenden Ladevorgang täglich an der öffentlichen Ladeinfrastruktur ausgegangen. Das heißt die Hälfte der Ladevorgänge findet an der öffentlichen Infrastruktur statt.

Abbildung 3: Verteilung der täglichen Fahrleistung schwerer Nutzfahrzeuge

Linke Achse: Anteil an der untersuchten Stichprobe; rechte Achse: Kumulierter Anteil.



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus KiD (2010)

4.3 Methodik

4.3.1 Vorgehensweise regionale Verteilung

Grundsätzlich sind zur Gestaltung von Ladenetzwerken zwei Ansätze bekannt: heuristische geographische Mindestabdeckung mit ergänzendem Warteschlangenmodell (vgl. zum Beispiel Funke (2018)) sowie optimierende Flow Refueling Location Models (FRLM) (vergleiche zum Beispiel Jochem et al. (2016)). Vergleichende Arbeiten zeigen, dass beide Ansätze gute Ergebnisse liefern (Reuter-Oppermann et al. 2017). Allerdings ist das Flow Refueling Location Model auf geographisch aufgelöste Fahrprofile angewiesen und daher sehr datenintensiv. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle auf die heuristische geographische Mindestabdeckung zurückgegriffen. Die grundlegende Idee dabei ist, dass das gesamte Autobahnnetz in regelmäßigen Abständen mit Ladeinfrastruktur ausgestattet werden muss, um die Möglichkeit des Nachladens flächendeckend sicherzustellen.

In einem ersten Schritt wird daher ein durchschnittlicher Abstand zwischen zwei Ladestandorten an einer Autobahn definiert (vgl. 4.2). Anschließend werden für jede Autobahn Standorte für Ladestandorte bestimmt. Dazu werden die Zählstellen entlang des Autobahnverlaufes betrachtet. Für jede Zählstelle wird der Abstand zum Beginn der jeweiligen Autobahn, bzw. zur davorliegenden Ladestation bestimmt (Funke 2018). Überschreitet diese Länge den definierten Abstand, so wird an dieser Zählstelle ein Ladestandort angenommen³. Formel (1) fasst dieses Vorgehen zusammen.

$$LS_L = \begin{cases} 1, & \text{wenn } d_{LS,L} \geq d_{avg} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (1)$$

LS_L	Ladestandort am Standort L
$d_{LS,L}$	Abstand zwischen letztem positionierten Ladestandort bzw. Beginn der Autobahn und Standort L
d_{avg}	Definierter Abstand zwischen zwei Ladestandorten

Um Übergänge zwischen Autobahnen sowie einen grenzüberschreitenden Infrastrukturhochlauf abzubilden, wird die erste Station einer Autobahn jeweils nach der Hälfte des vorgegebenen Abstands positioniert. Die letzte Station wird immer die Hälfte des vorgegebenen Abstands vor dem Ende der jeweiligen Autobahn bzw. an der jeweils nächstgelegenen Zählstelle positioniert. Dadurch wird ein flächendeckendes Netz auch bei einem Autobahnwechsel und im Grenzverkehr erreicht. Autobahnen unter einer Mindestlänge von 25 km werden an dieser Stelle für die Elektrifizierung nicht berücksichtigt.

Anschließend wird die Anzahl erwarteter Ladevorgänge für jeden definierten Ladestandort bestimmt. Dafür wird die insgesamt erwartete Anzahl an Ladevorgängen im deutschen Autobahnnetz nach Formel (2) berechnet. Alle Berechnungen finden für das Jahr 2030 statt.

$$LV_D = \frac{BEV_{Anteil} * (JFL_{Lkw>12t,D}/313)}{Reichweite_{BEV}} * LV_{Anteil \text{ öffentliche Infra}} \quad (2)$$

LV_D	Tägliche Ladevorgänge in Deutschland
BEV_{Anteil}	Anteil Elektrofahrzeuge an Flotte [%]
$JFL_{Lkw>12t,D}$	Jahresfahrleistung Lkw (zGG > 12 t) in Deutschland [km]
313	Jährliche Fahrtage (Sonntag ausgenommen)
$Reichweite_{BEV}$	Angenommene Fahrleistung in 4,5h [km]
$LV_{Anteil \text{ öffentliche Infra}}$	Anteil der Ladevorgänge an der öffentlichen Infrastruktur [%]

³ Zählstellen liegen in der Regel an Autobahnkreuzen sowie Abfahrten. Für eine konkrete Standortauswahl müssen zusätzlich unter anderem Flächenverfügbarkeiten, der benötigte Anschluss an das Stromnetz sowie eventuell bereits vorhandene Infrastruktur berücksichtigt werden. Das Modell errechnet lediglich eine flächendeckende Infrastrukturverteilung, keine konkreten Standorte.

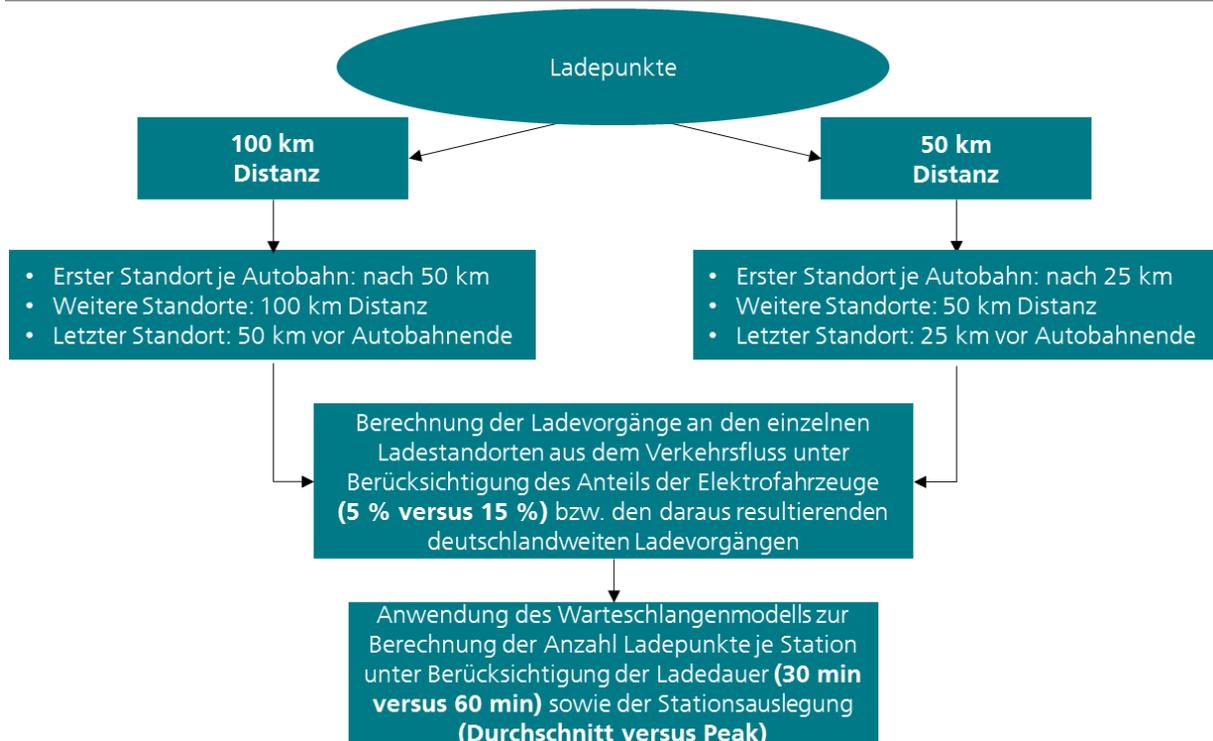
Die Ladevorgänge werden dann anhand des Verkehrsaufkommens auf die einzelnen Ladestandorte verteilt. Dafür wird für jeden Ladestandort das maximale Verkehrsaufkommen in dem von ihm bedienten Autobahnabschnitt ermittelt. Anschließend wird dieses zum Aufkommen der anderen Ladestandorte ins Verhältnis gesetzt.

$$LV_{Lr_i} = LV_D * \frac{MAX_{Lr_{i-1}}^{Lr_i}(VA_j)}{\sum_{Lr} MAX_{Lr-1}^{Lr}(VA_j)} \quad (3)$$

- LV_{Lr_i} Tägliche Ladevorgänge am realisierten Ladestandort i
- LV_D Tägliche Ladevorgänge in Deutschland
- $MAX_{Lr_{i-1}}^{Lr_i}(VA_j)$ Maximales tägliches Verkehrsaufkommen (beide Richtungen) auf einem der Abschnitte j zwischen dem realisierten Ladestandort i (Lr_i) und dem davor liegenden realisierten Ladestandort ($Lr_i - 1$)
- $\sum_{Lr} MAX_{Lr-1}^{Lr}(VA_j)$ Summe über die maximalen täglichen Verkehrsaufkommen aller realisierten Ladestandorte

Abbildung 4 fasst das Vorgehen für die betrachteten Fälle zusammen.

Abbildung 4: Zusammenfassung Vorgehensweise Standortbestimmung und Stationsauslegung



Quelle: Eigene Darstellung

4.3.2 Auslegung der Stationen

Aus der Verteilung der Ladevorgänge auf die einzelnen Ladestandorte ergibt sich die Gesamtzahl der Ladevorgänge pro Ort und Tag. Für die Anzahl der Ladepunkte pro Ladestandort sind Überlegungen notwendig, wie sich diese Ladevorgänge auf den Tag verteilen und welche typische Wartezeit an einem Ladestandort für Lkw mit der Absicht zu Laden entsteht.

4.3.2.1 Typisches und maximales Verkehrsaufkommen

Für die Auslegung der Ladestation muss entschieden werden, ob die mittlere Verkehrsmenge eines Tages oder die maximale tägliche Verkehrsmenge bedient werden soll. In den Zähldaten liegt die mittlere Zahl der schweren Lkw pro Tag an den Zählstellen der manuellen Verkehrszählung vor. Diese können anhand der Stundendaten der automatischen Verkehrszählung über den Tag verteilt werden. Die automatische Verkehrszählung enthält die Zahl der schweren Lkw pro Stunde für alle Stunden eines Jahres. Im Folgenden wird dargestellt welcher prozentuale Anteil der Lkw insgesamt pro Stunde im Mittel und maximal auf den BAB fährt.

Abbildung 5 zeigt den Tagesgang schwerer Lkw⁴ als Anteil der Lkw pro Stunde nach Wochentagen im Vergleich zur Gesamtzahl der Lkw eines Dienstages für die BAB A1 – A9.⁵ Die gesamte absolute Verkehrsmenge entlang der Zählstellen ist Dienstag bis Donnerstag am höchsten, etwas niedriger am Montag und Freitag sowie am geringsten am Wochenende, besonders am Sonntag. Da für das Modell zu Berechnung verschiedener BEV-Szenarien ein prozentualer Anteil notwendig ist, wird hier der Anteil des mittleren Verkehrsaufkommens betrachtet. Genauer gesagt, wird der Jahresmittelwert der Tagesverkehrsmenge aller Dienstage in Lkw/Tag mit der mittleren Zahl der Lkw pro Stunde und Wochentag verglichen. Dabei wird pro BAB über alle Zählstellen der Einsteller-BAB gemittelt.

Man erkennt an allen BAB ein deutlich erhöhtes Aufkommen, besonders an den Tagen Dienstag bis Donnerstag, sowie einen Morgen- und Nachmittagspeak. Zudem geht die Verkehrsmenge an Werktagen auch nachts nicht gegen Null, sondern sinkt im Vergleich zum Tagespeak auf die Hälfte oder ein Fünftel ab.

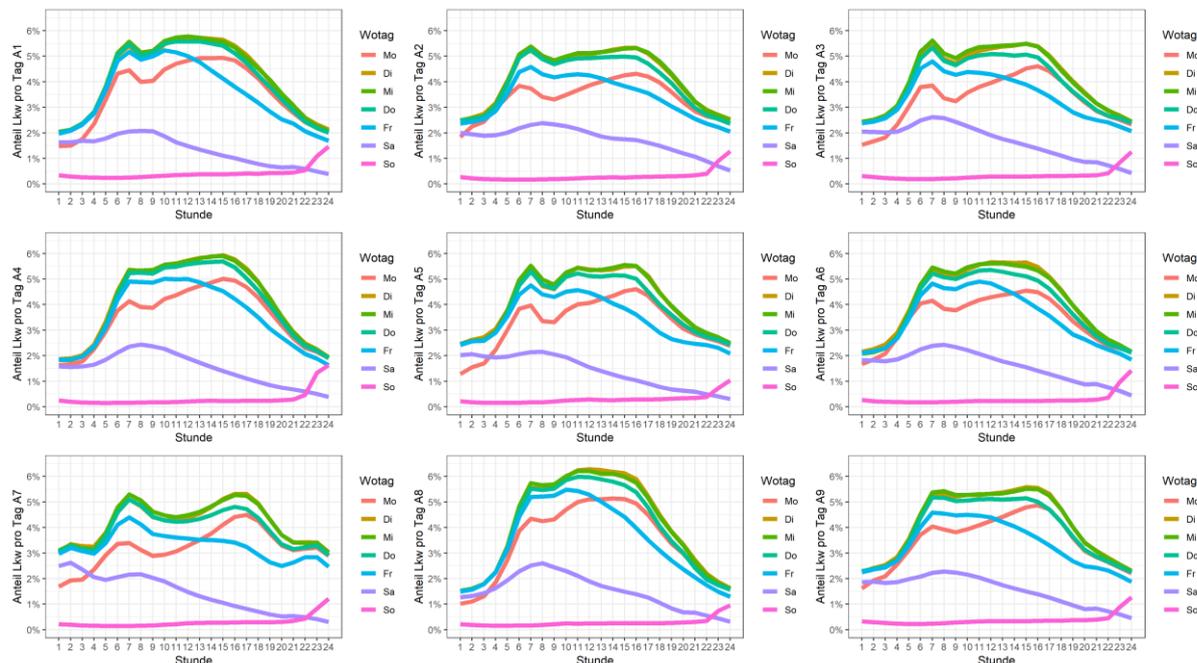
Aufgrund der Anteile der Tages-Verkehrsmengen in den Stunden werden für das Tagesmittel und die Peakstunde folgende Annahmen für die Auslegung der Stationen getroffen. Der Peak liegt über die Einsteller-BAB hinweg bei ca. 6 % der Tagesverkehrsmenge und wird als Peakanteil für die Auslegung der Stationen verwendet. Für das Tagesmittel wird eine Gleichverteilung auf alle Stunden des Tages angenommen, d.h. $1/24 = 4,2$ % der Tagesverkehrsmenge. Dieses Tagesmittel liegt damit etwas unter dem Peakwert und über dem Minimum an Werktagen. Beide Werte, der Peakanteil und das Tagesmittel, werden unten für die Auslegung der Stationen gemäß Warteschlangenmodell verwendet.

⁴ Aufgrund der Datenverfügbarkeit sind dies hier Lkw > 3,5t zGG mit Anhänger und Sattelzüge in beiden Richtung zusammen.

⁵ Ein Anteil von 5% um 6 Uhr an einem Donnerstag heißt, dass von donnerstags 6 – 7 Uhr 5% der gesamten Lkw eines Dienstages durchfahren.

Abbildung 5: Tagesaufkommen schwerer Lkw

Tagesgang Anteil der Lkw eines mittleren Dienstags pro Stunde für die BAB A1 – A9 nach Wochentagen.



Quelle: Eigene Darstellung

4.3.2.2 Warteschlangenmodell

Die Auslegung der Ladeorte, d.h. die Anzahl der Ladepunkte pro Ladeort, erfolgt mittels der mathematischen Warteschlangentheorie (vgl. Adan & Resing 2017). Die Warteschlangentheorie ist ein etabliertes Gebiet der Mathematik, das angibt wie viele Schalter in einem System notwendig sind, um bei gegebenen Ankunftsrate und gegebenen Bedienzeiten eine vorgegebene mittlere Wartezeit einzuhalten. Im hier vorliegenden Anwendungsfall soll eine mittlere Wartezeit von fünf Minuten eingehalten werden, die Anzahl der Schalter zur Bedienung entspricht der Anzahl der Ladepunkte pro Standort. Die Ankunftsrate ergibt sich aus dem Tagesgang des BEV-Verkehrs und die Bedienzeit aus der Ladedauer.

Ein Warteschlangensystem ist durch drei Komponenten gekennzeichnet: Ankunftsprozess, Bedienmechanismus und Wartemechanismus (Salazar 2020):

- Der Ankunftsprozess beschreibt, wie die Kunden im System ankommen, und die Verteilung der Ankunft der Kunden.
- Der Servicemechanismus wird durch die Anzahl der Schalter bestimmt, und ob jeder Schalter seine eigene Warteschlange hat oder ob es eine Warteschlange gibt, die alle Schalter versorgt, und die Verteilung der Bedienzeiten des Kunden.
- Der Wartemechanismus bezieht sich auf die Regel, die ein Schalter verwendet, um den nächsten Kunden aus der Warteschlange auszuwählen, wenn der Schalter den Dienst des aktuellen Kunden abschließt. Wir gehen im Folgenden hierbei davon aus, dass die Kunden in der Reihenfolge ihrer Ankunft bedient werden ("first-in, first-out").

Es gibt für Warteschlangenmodelle eine festgelegte Notation. Die wichtigsten Eingangsgrößen sind die durchschnittliche Anzahl der Ankünfte pro Zeitperiode (d.h. durchschnittliche Ankunftsrate) λ sowie die durchschnittliche Anzahl der pro Zeitraum bedienten Kunden (d.h. durchschnittliche Servicerate) μ .

Das Standard-Notationssystem zur Klassifizierung eines Warteschlangensystems ist $A/B/c/k/m$. Dabei sind

- A die Wahrscheinlichkeitsverteilung für den Ankunftsprozess
- B die Wahrscheinlichkeitsverteilung für den Dienstprozess
- c die Anzahl der Schalter
- k steht für die maximal zulässige Anzahl von Kunden im Warteschlangensystem
- m steht für die maximale Anzahl von Kunden insgesamt

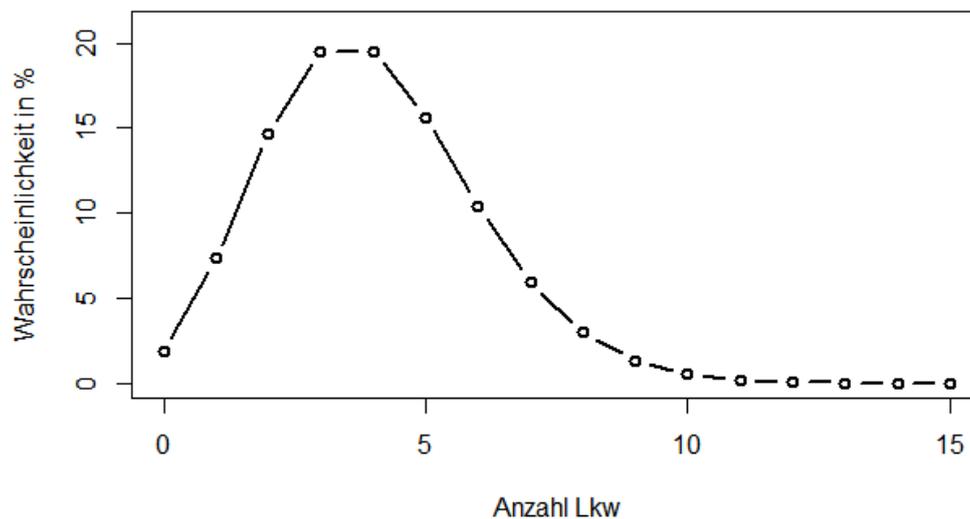
In unserem Fall können k und m als unendlich angenommen werden und werden nicht weiter angegeben. Möglichkeiten für A und B sind unter anderem

- M für Poisson-verteilte Ankünfte (d.h. exponentielle Intra-Ankunftsverteilung) oder eine exponentielle Dienstzeitverteilung,
- G für eine allgemeine Verteilung mit bekanntem Mittelwert und Varianz

Für den vorliegenden Fall des Schnellladens von Lkw ist es plausibel, Poisson-verteilte Ankünfte anzunehmen, wobei sich die mittlere Ankunftsrate direkt aus dem Aufkommen der Batterie-Lkw ergibt. Eine Poisson-Verteilung beschreibt die Anzahl von Ereignissen, die bei konstanter Rate in einem festen Zeitintervall eintreten (Johnson et al., 2005). Bspw. bedeutet eine mittlere Ankunftsrate von $\lambda = 4$ Lkw/Stunde, das im Mittel vier Lkw pro Stunde ankommen, aber manchmal etwas weniger und teilweise auch mehr (vgl. Abbildung 6).

Abbildung 6: Beispielhafte Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Anzahl ankommender Lkw

Gezeigt ist die hier angenommene Wahrscheinlichkeitsverteilung (Poisson-Verteilung) für die Anzahl ankommender Lkw pro Stunde bei einer beispielhaften mittleren Ankunftsrate von $\lambda = 4$ Lkw/Stunde.



Quelle: Eigene Darstellung nach (Salazar, 2020).

Die Bedienzeiten sind im Falle des Ladens schwerer Lkw näherungsweise normalverteilt, d.h. es gibt eine typische Ladedauer mit Schwankungen darum. In der typischen Warteschlangennotation verwenden wir damit ein $M/G/c$ -Warteschlangensystem. In der Literatur werden für das Schnellladen zum Teil auch $M/M/c$ -Warteschlangen verwendet, aber Funke (2018) und Gnann et al. (2018) zeigen, dass $M/G/c$ -Systeme der realen Verteilung von Bedienzeiten besser entsprechen.

Exakte Lösungen für die mittlere Wartezeit von M/G/c-Systemen sind derzeit nicht bekannt, aber eine Näherungsformel ist verfügbar, eine Erweiterung der Pollaczek-Khinchine-Formel (vgl. Funke 2018). Dabei ist die mittlere Wartezeit $W_q^{M|G|c}$ eines M/G/c-Systems näherungsweise durch die mittlere Wartezeit $W_q^{M|M|c}$ eines vergleichbaren M/M/c-Systems bestimmbar (Funke, 2018)

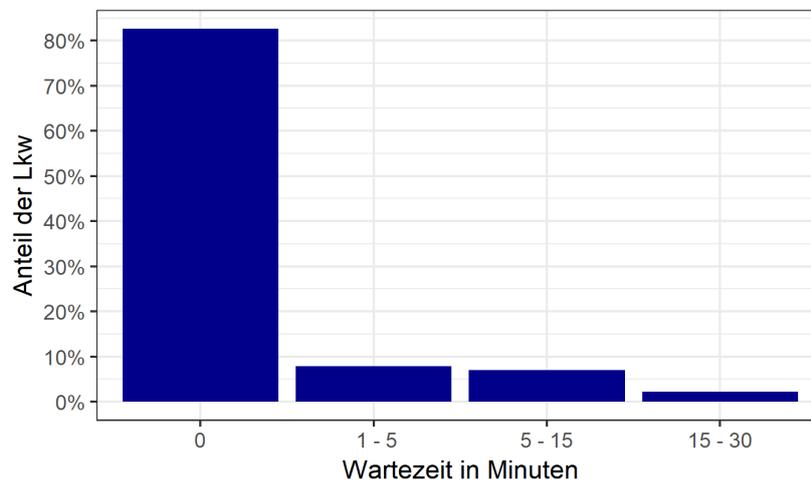
$$W_q^{M|G|c} = \frac{C^2 + 1}{2} W_q^{M|M|c}.$$

Dabei ist C der Variationskoeffizient der Verteilung der Bedienzeiten, d.h. der Quotient aus Standardabweichung und Mittelwert der Bedienzeitenverteilung. Da wir normalverteilte Bedienzeiten mit einem ausgeprägten Peak verwenden, ist $C < 1$ und die mittlere Wartezeit im M/G/c-System ist kürzer als im M/M/c-System.⁶ Diese Näherungsformel wird zusammen mit den exakten Ergebnissen für die mittlere Wartezeit von M/M/c-Systemen⁷ für Auslegung der Ladeorte verwendet.

Die mittlere Wartezeit von 5 min bedeutet nicht, dass alle Nutzer genau 5 min warten. Tatsächlich ergibt sich eine Verteilung der Wartezeiten. Für das oben angenommene Beispiel einer mittleren Ankunftsrate von $\lambda = 4$ Lkw/Stunde und eine Ladedauer von 30 min, d.h. eine mittlere Bedienrate von $\mu = 2$ Lkw/Stunde werden $c = 4$ Ladepunkte benötigt um unter 5 min mittlere Wartezeit zu kommen. Bei $c = 4$ sind es 1,3 min und bei $c = 3$ sind es 6,6 min. Die Verteilung der Wartezeiten für den für dieses Beispiel im Ladeinfrastrukturmodell verwendeten Fall von $c = 4$ ist die Verteilung der Wartezeiten in Abbildung 7 gezeigt. Die mittlere Wartezeit von unter 5 min wird dadurch erreicht, dass die allermeisten Lkw (ca. 83 %) gar nicht warten müssen, wenige (8 %) bis zu 5 min oder 5 – 15 min (7 %) und sehr weniger (2 %) länger als 15 min warten müssen.

Abbildung 7: Verteilung der Wartezeiten für ein Wartschlangenbeispiel

Gezeigt ist die prozentuale Verteilung der Wartezeiten für ein M/G/c-Modell, das durch ein M/M/c-Modell angenähert wurde (mit Variationskoeffizient $C = 1/6$) mit einer mittleren Ankunftsrate von $\lambda = 4$ Lkw/Stunde und Bedienrate von $\mu = 2$ Lkw/Stunde pro Ladepunkt und $c = 4$ Ladepunkte.



Quelle: Eigene Darstellung.

Das Vorgehen für die Auslegung der Stationen ist das folgende: Gemäß dem Vorgehen aus Abschnitt 4.3.1 wird die täglichen Ladevorgänge an einem realisierten Ladestandort bestimmt. Aus dieser Zahl der BEV-Lkw pro Tag ergibt sich für die Peakstunde oder das Tagesmittel die mittlere Ankunftsrate λ in Lkw/Stunde zu 6,0 % oder 4,2 % der täglichen Ladevorgänge. Die mittlere Bedienrate beträgt $\mu = 2$ Lkw/Stunde bei 30 min mittlerer Ladedauer, d.h. ca. 350 kW mittlerer Ladeleistung, und $\mu = 1$

⁶ Es wird im Folgenden $C = 1/6$ angenommen.

⁷ Es ist $W_q^{M|M|c} = \frac{1}{1-\rho} \frac{1}{c\mu} \frac{(c\rho)^c}{c!} \left((1-\rho) \sum_{n=0}^{c-1} \frac{(c\rho)^n}{n!} + \frac{(c\rho)^c}{c!} \right)^{-1}$ nach (Adan & Resing 2017).

Lkw/Stunde bei 60 min mittlerer Ladedauer bzw. ca. 750 kW mittlerer Ladeleistung. Für jeden Ladestandort liegen damit μ und λ vor und es wird gemäß obiger Formel das kleinste c berechnet, d.h. die kleinste Zahl an Ladepunkte am gegebenen Ladestandort, so dass die mittlere Wartezeit kleiner als 5 min ist. Aufgrund des großen Flächenbedarfs von Ladestandorten mit vielen Stationen wird in der Auslegung zudem angenommen, dass maximal acht Ladepunkte einen gemeinsamen Wartebereich haben können. Werden zur Einhaltung der mittleren Wartezeit von fünf Minuten mehr als acht Ladepunkte an einem Ort benötigt, wird davon ausgegangen, dass an einem Ort mehrere getrennte Ladeparks mit bis zu acht Ladepunkten entstehen.

5 Ergebnisse

5.1 Ladestandorte in Deutschland

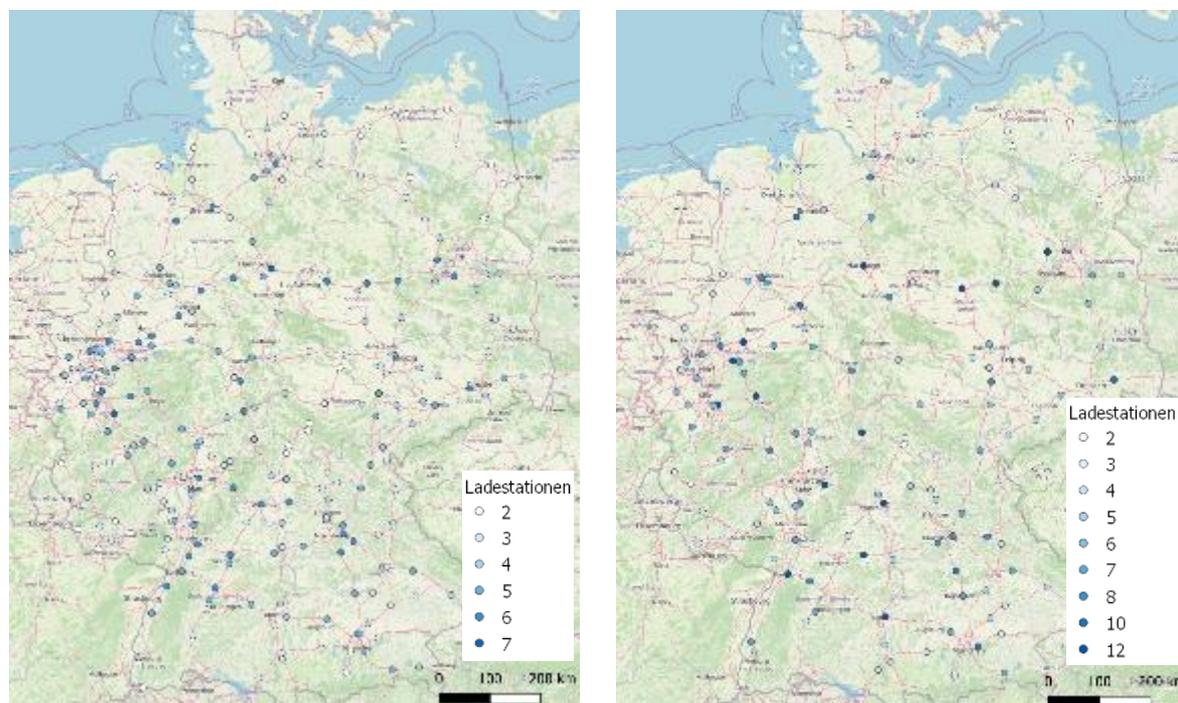
Für alle Szenarien mit einem Abstand von 100 km ergeben sich insgesamt 142 Ladestandorte, die in Abbildung 9 dargestellt sind. Für Szenarien mit einem Abstand von 50 km ergeben sich 262 Ladestandorte, wie in Abbildung 10 dargestellt. Zudem zeigt Abbildung 8 die Größe der Ladestationen in beiden Varianten.

Man erkennt eine breite Verteilung der Ladestandorte über Deutschland. Aufgrund des gewählten Algorithmus zur Positionierung finden sich keine Ladestandorte direkt an den Landesgrenzen, aber mehrere Ladestandorte können nah beieinander sein, wenn sich zwei BAB kreuzen, da die BAB im Modell isoliert betrachtet werden.

Man beachte, dass die Karten mögliche Standorte entlang den BAB im gewünschten Abstand von 50 bzw. 100 km zeigen. Das Modell ist aber nicht geeignet, Aussagen über den genauen Standort von Ladeinfrastruktur zu machen, da hierfür lokale Besonderheiten wie Verfügbarkeit von Stellflächen für Lkw oder Netzanschlussmöglichkeiten berücksichtigt werden müssen. Dieser Detailgrad kann im vorliegenden Modell nicht direkt integriert werden. Die Karten zeigen daher eine plausible und realistische Verteilung der Ladestandorte über Deutschland, aber die genaue Position der Ladestandorte kann unter Berücksichtigung lokaler Bedingungen auch etwas anders sein, bspw. ein oder zwei Ausfahrten in jede Richtung verschoben oder auf Flächen, die in der Nähe aber nicht direkt an der BAB sind.

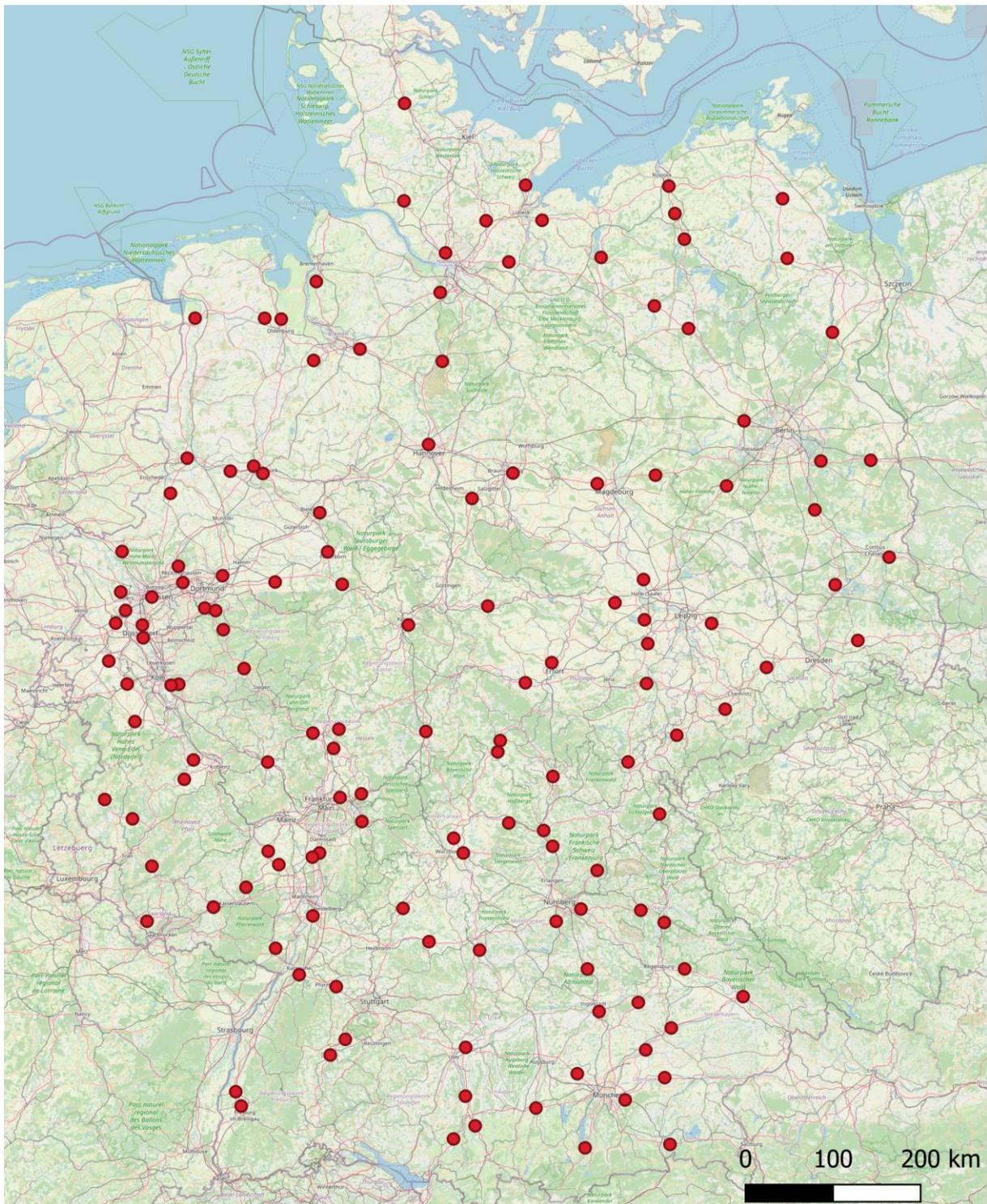
Abbildung 8: Verteilung der Ladepunkte bei 5 % BEV im Bestand und 60 Minuten Ladedauer

Ergebnisse für Peakauslegung (links: 50 km, rechts: 100 km), Standorte unabhängig von Bev-Anteil.



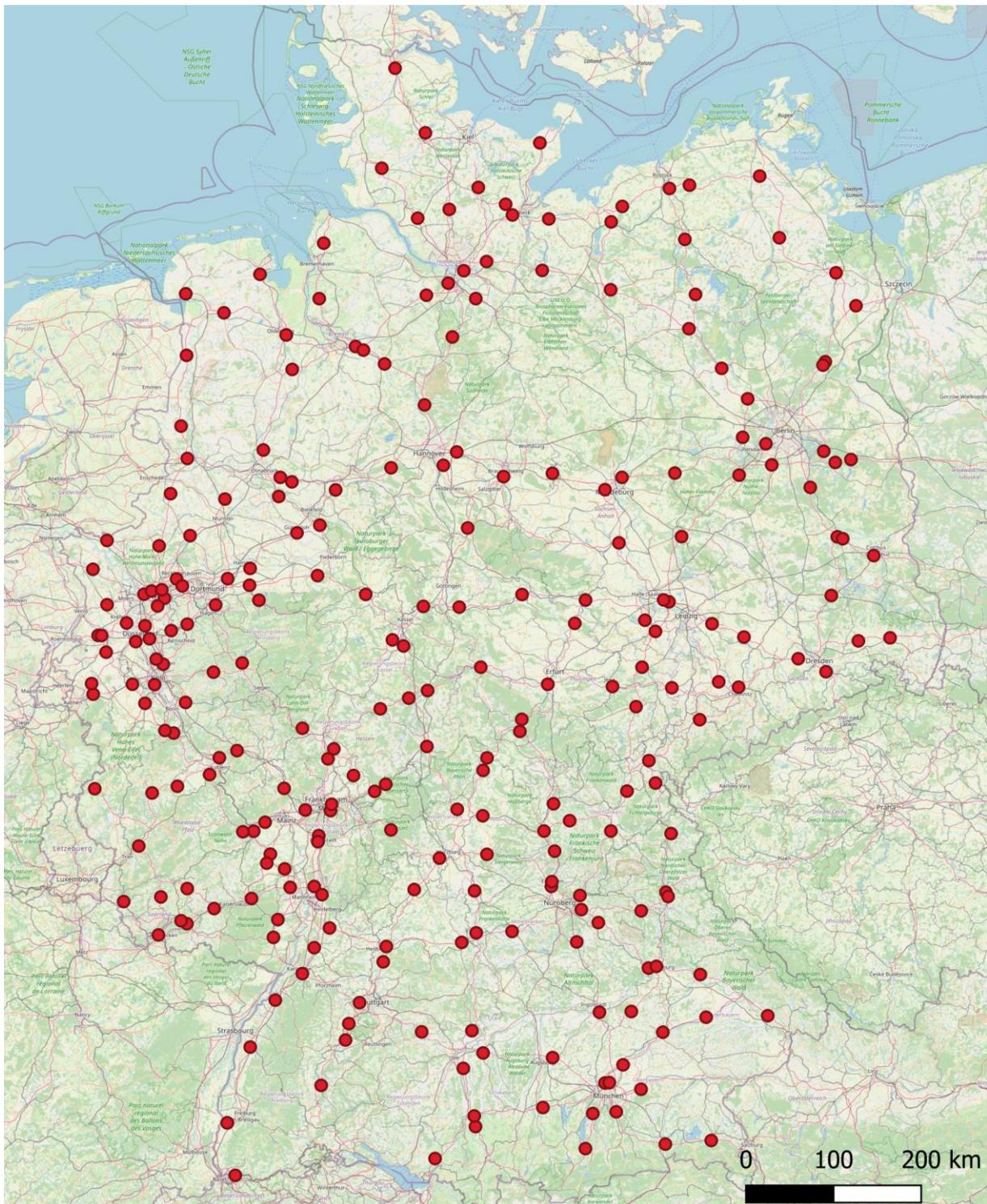
Quelle: Eigene Darstellung und Karten nach OpenStreetMap

Abbildung 9: Ladestandorte Deutschland 100 km



Quelle: Eigene Darstellung und Karten nach OpenStreetMap

Abbildung 10: Ladestandorte Deutschland 50 km



Quelle: Eigene Darstellung und Karten nach OpenStreetMap

5.2 Ladepunkte

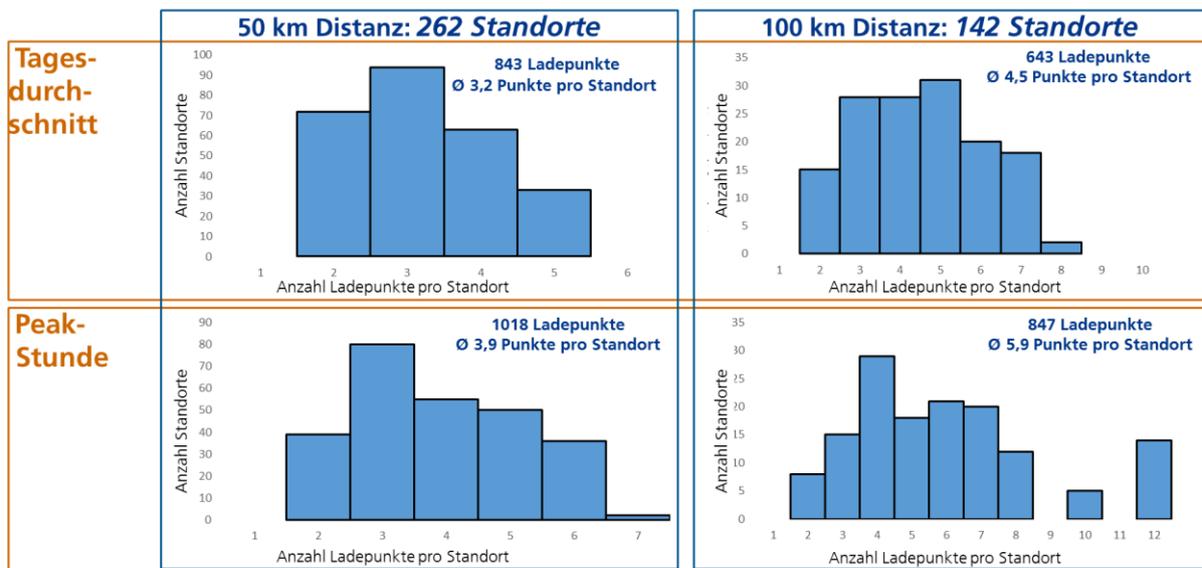
Die Anzahl der Ladepunkte je Station hängt vom Anteil der elektrischen Fahrzeuge in der Flotte, der angenommenen Ladedauer sowie der Auslegung der Stationen auf den täglichen Durchschnittsverkehr bzw. die Peakstunde eines Tages ab.

Im Szenario *Minimalnetz* (5 % BEV, 60 min Ladedauer, 100 km Abstand) werden bei Auslegung auf das durchschnittliche Verkehrsaufkommen insgesamt 643 Ladepunkte, verteilt auf 142 Standorte, benötigt. Im Durchschnitt besitzt jeder Standort 4,5 Ladepunkte. Die größten Standorte umfassen in diesem Fall acht Ladepunkte. Erfolgt die Stationsauslegung auf die Peakstunde, so steigt die Anzahl benötigter Ladepunkte um ca. 30 %. Durchschnittlich entfallen dann 5,9 Ladepunkte auf einen Standort. Gleichzeitig ergeben sich für große Standorte bis zu zwölf Ladepunkte.

Wird der Abstand auf 50 km reduziert, so ergeben sich 262 Standorte, die bei Auslegung auf den Tagesdurchschnitt im Mittel 3,2 Ladepunkte besitzen. Bei Auslegung auf die Peakstunde erfolgt ein Anstieg der Ladepunkte um 20 %. Die Anzahl der Ladepunkte je Standort beträgt dann durchschnittlich 3,9.

Eine Übersicht der beschriebenen Ladepunktverteilungen befindet sich in Abbildung 11. Abbildung 8 zeigt beispielhaft die Verteilung der Ladepunkte für die beschriebene Peakauslegung.

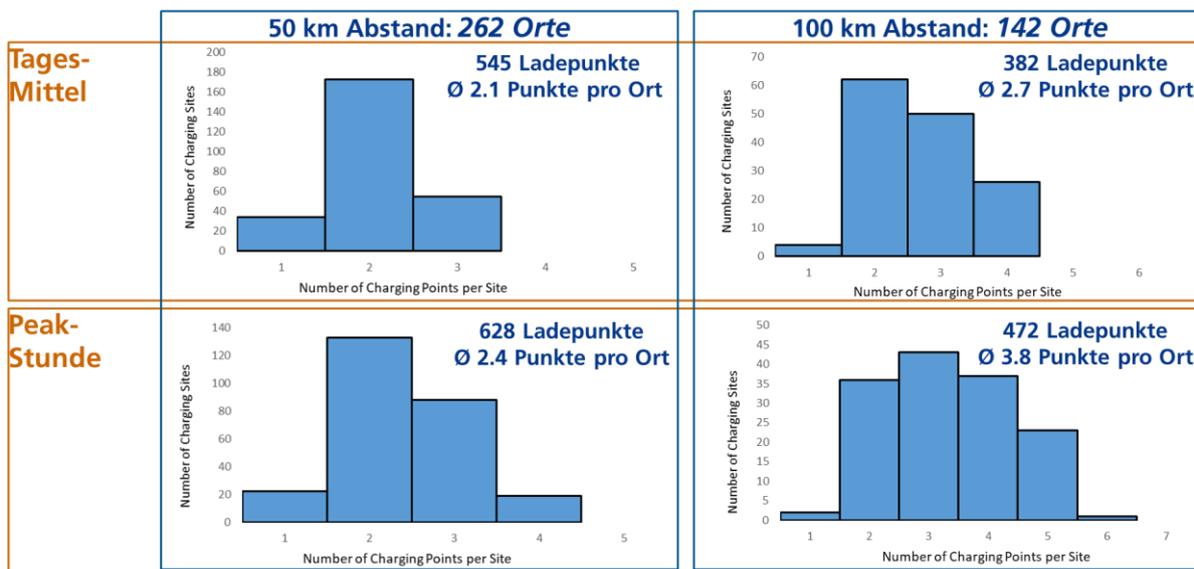
Abbildung 11: Anzahl Ladepunkte bei 5 % BEV und 60 Minuten Ladedauer



Quelle: Eigene Berechnung

Wird die Ladedauer auf 30 Minuten halbiert, so reduziert sich auch die Anzahl benötigter Ladepunkte. Die Reduktion findet allerdings unterproportional statt. Ausgehend vom Szenario *Minimalnetz* führt die Verdopplung der durchschnittlichen Ladeleistung bei Peakauslegung zu einer Reduktion von 847 Ladepunkte auf 472 Ladepunkte. Eine vollständige Übersicht für die Anzahl der Ladepunkte bei 5 % BEV und 30 min durchschnittlicher Ladedauer findet sich in Abbildung 12.

Abbildung 12: Anzahl Ladepunkte bei 5 % BEV und 30 Minuten Ladedauer



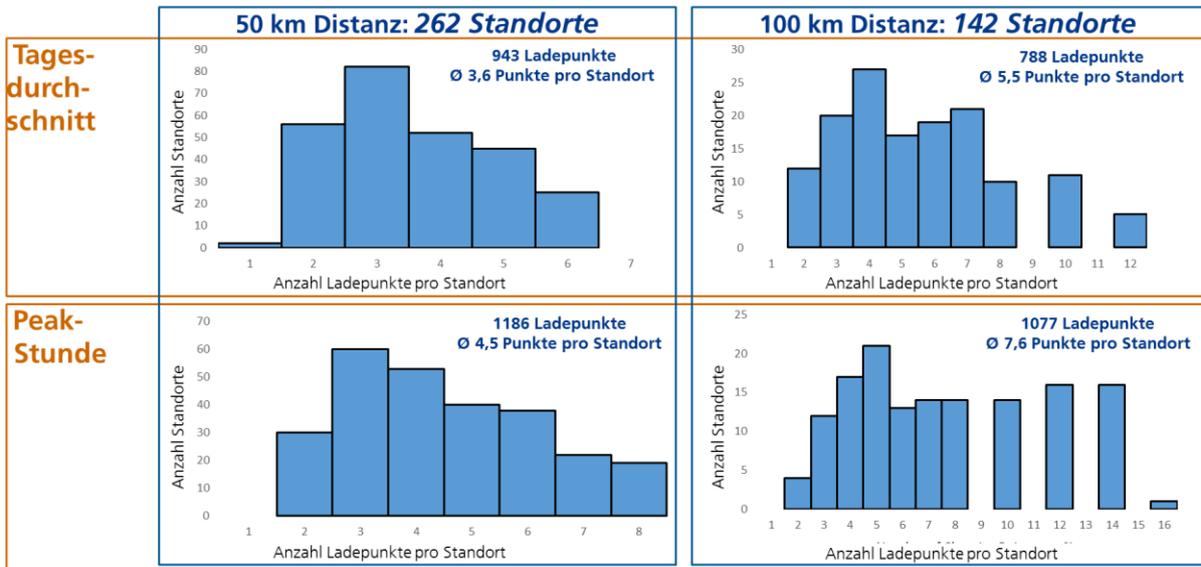
Quelle: Eigene Berechnung

Im Szenario *Ausbaunetz* (15 % BEV, 30 min Ladedauer, 50 km Abstand) werden bei Auslegung auf den Tagesdurchschnitt 943 Ladepunkte, wiederum verteilt auf 262 Standorte, benötigt. Dies entspricht 3,6 Ladepunkten pro Standort. Bei Peakstundenauslegung werden 1.186 Ladepunkte, durchschnittlich 4,5 Ladepunkte pro Standort, benötigt.

Wird der Abstand der Standorte auf 100 km verdoppelt, so werden für die Auslegung auf den Tagesdurchschnitt 788 Ladepunkte benötigt. Soll zusätzlich das Verkehrsaufkommen auch in den Peakstunden innerhalb der Vorgaben abgefertigt werden können, so werden 1.077 Ladepunkte benötigt. Damit führt eine Verdopplung des Abstandes zu einem leichten Rückgang der benötigten Ladepunkte. Allerdings verdoppelt sich in diesem Fall die maximale Anzahl Ladepunkte je Standort von sechs auf zwölf (Tagesdurchschnittsauslegung) bzw. acht auf 16 (Peakauslegung). Damit werden an den einzelnen Standorten deutlich höhere Leistungen benötigt.

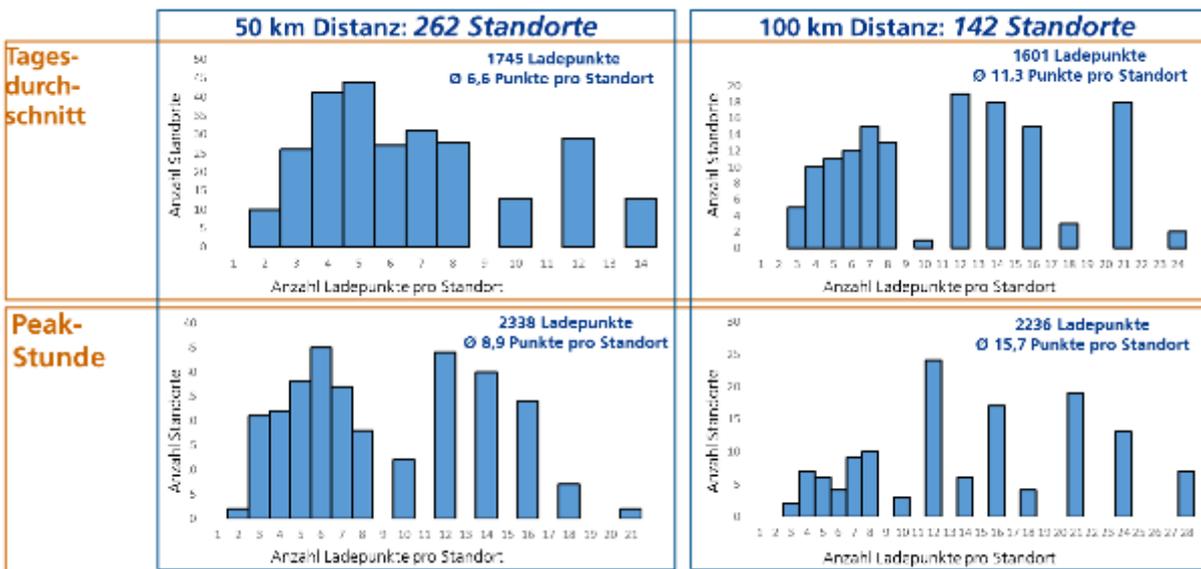
Abbildung 13 fasst die Ladepunktverteilung bei 15 % BEV und einer durchschnittlichen Ladedauer von 30 Minuten zusammen. Wird die durchschnittliche Ladedauer von 30 min auf 60 min verdoppelt, so steigt auch die Anzahl der Ladepunkte an, allerdings wiederum unterproportional. Die Peakauslegung des in Abbildung 14 dargestellten Szenarios mit einer Ladedauer von 60 Minuten und einer BEV-Anteil von 15 % stellt damit das Maximum der Ladepunkte innerhalb der aufgespannten Szenarien dar. Bei einem Abstand von 50 km werden hier 2.338 Ladepunkte benötigt, bei einem Abstand von 100 km werden 2.236 Ladepunkte benötigt. Allerdings liegt die Peakleistung hier bei ca. 500 kW je Ladepunkt während sie in einem Szenario mit einer durchschnittlichen Ladedauer von 30 min bei 1.000 kW liegt. Daher können die benötigte Anschlussleistung sowie die Kosten der Infrastruktur nicht unmittelbar mit der Anzahl der Ladepunkte gleichgesetzt werden.

Abbildung 13: Anzahl Ladepunkte bei 15 % BEV und 30 Minuten Ladedauer



Quelle: Eigene Berechnung

Abbildung 14: Anzahl Ladepunkte bei 15 % BEV und 60 Minuten Ladedauer



Quelle: Eigene Berechnung

5.3 Diskussion

Die gezeigten Modellergebnisse sind mit Unsicherheiten und verschiedenen Auswirkungen behaftet. In diesem Abschnitt werden erste Überlegungen zu energiewirtschaftlichen Fragen (Abschnitt 5.3.1), den Gesamtkosten eines solchen Systems (Abschnitt 5.3.2) sowie der Sensitivität der Ergebnisse gegenüber Variation der Annahmen (5.3.3) vorgestellt.

5.3.1 Energiewirtschaftliche Fragen

Die Hochleistungsladestationen sind an das Stromnetz anzuschließen. Für die Netzbetreiber sind dabei die Spitzenlasten relevant. Tabelle 6 gibt einen Überblick über die minimale, mittlere und maximale Peakleistung pro Ladestandort in den acht Szenarien.

Tabelle 6: Vergleich der energiewirtschaftlichen Aspekte der Szenarien

Anteil BEV	Szenarien							
	5 %				15 %			
	60		30		60		30	
Ladedauer [min]	60		30		60		30	
Abstand [km]	50	100	50	100	50	100	50	100
Peakleistung [GW]	0,5	0,42	0,62	0,47	1,15	1,11	1,18	1,07
Ø Peakleistung pro Ort [MW]	1,94	2,98	2,4	3,3	4,46	7,9	4,5	7,5
Niedrigste Peakleistung pro Ort [MW]	1	1	1	1	1	1,5	2	2
Höchste Peakleistung pro Ort [MW]	3,5	6	4	6	10,5	16	8	16

Quelle: Eigene Berechnung

Je nach Marktdurchdringung und Ladedauer liegt die benötigte Gesamtleistung im Bereich von 0,4 – 1,2 GW für die gesamten BAB. Die mittlere Peakleistung liegt zwischen ca. 2 und 8 MW pro Ladestandort und die maximale Peakleistung pro Ort reicht je nach Szenario von 3,5 – 16 MW. Besonders hohe Peakleistungen entstehen in Szenarien mit hoher Marktdurchdringung der BEV-Lkw und wenigen Ladeorten, d.h. einem Netz mit 100 km Abstand auf den BAB. Energiewirtschaftlich bedeutet ein engeres Netz kleinere Anschlussleistungen, da weniger Ladepunkte pro Ladestandort zur Verfügung gestellt werden müssen.

5.3.2 Kosten

Ein Gesamtnetz von Hochleistungsladeinfrastruktur für BEV-Lkw ist mit erheblichen Investitionen verbunden. Langfristig erscheint eine Ladedauer von 30 min besser mit der Praxis der Logistik, insbesondere den 45 min Pausenzeiten beim Lenken, vereinbar zu sein. Zudem bedeutet kürzere Ladedauer geringeren Platzbedarf entlang der BAB zum Laden von Lkw. Für die Betrachtung der möglichen Kosten eines solchen Systems wird daher von ca. 720 kW mittlerer Ladeleistung bzw. knapp 1 MW Peak-Leistung ausgegangen.

In der Literatur wird von Investitionen von ca. 0,4 Mio. € pro MW-Peak-Leistung-Ladepunkt ausgegangen (Gnann, 2017), NPE, 2015), Kühnel et al., 2018). Darin sind mittelfristige Kostensenkungen aufgrund von Skaleneffekten enthalten. Derzeit liegen die Kosten nach Auskunft von Herstellern eher im Bereich von 1 Mio. € pro Ladepunkt. Die genannten Kosten umfassen dabei Aufbau, Installation und Netzanschluss der Ladepunkte sowie Ausbau von Umspannwerken für die höheren Anschlussleistungen.

Anhand dieser Kostenannahmen stellt Tabelle 7 die möglichen mittelfristigen Investitionen inkl. Kostensenkungsannahmen für eine Auslegung auf fünf Minuten mittlere Wartezeit in der Peakstunde der Verkehrsmenge dar. Heute liegen die Kosten pro Ladepunkte im Bereich von ca. 1 Mio. Euro.

Tabelle 7: Gesamtkosten Ladenetzes

Szenario	50 km: 262 Orte	100 km: 142 Orte
5 % BEV	628 Ladepunkte; 250 Mio. €	472 Ladepunkte; 190 Mio. €
15 % BEV	1186 Ladepunkte; 475 Mio. €	1077 Ladepunkte; 430 Mio. €

Die Gesamtkosten für den Ausbau eines Systems öffentlicher Hochleistungs-ladesäulen entlang der Autobahnen könnte sich im Bereich 200 – 500 Mio. € bewegen, je nach Dichte des Ladenetzes und Marktdurchdringung der BEV-Lkw. Zudem kann ein höherer Bestandsanteil als 15 % BEV-Lkw mit einem solchen System abgedeckt werden, wenn weniger als die angenommenen 50 % des Stroms für den Antrieb von schweren BEV-Lkw an der BAB geladen werden. Der Einfluss dieser und weiterer Annahmen wird im folgenden Abschnitt untersucht.

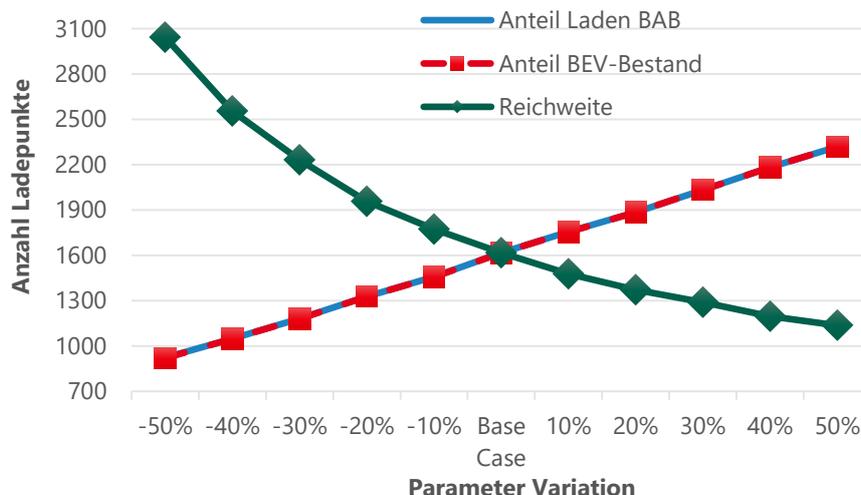
Die Gesamtkosten eines solchen Systems liegen bei angenommenen Kosten von 400.000 € pro Ladepunkte (inkl. Aufbau, Anschluss und ggf. Ertüchtigung von Umspannwerken und Berücksichtigung von zukünftigen Kostensenkungspotentialen) im Bereich 200 – 250 Mio. € für 5% BEV-Bestand sowie 400 – 500 Mio. € für 15 % BEV-Bestand. Legt man diese Investition auf 30 Jahre bei 5% Verzinsung um, erhält man bspw. eine Annuität 32,5 Mio. € bei 500 Mio. € Investition. Bei zusätzlich jährlichen Wartungskosten von 10 % ergeben sich insgesamt 36 Mio. € pro Jahr. Wenn durch 15 % BEV-Lkw im Bestand circa 15 % einer Gesamtfahrleistung von 30,5 Milliarden Fzg.-km zurückgelegt werden, könnten die Kosten auf 4,575 Mrd. Fzg.-km umgelegt werden. Da nach obiger Annahme in der Auslegung der Ladinfrastruktur die Hälfte davon öffentlich nachgeladen wird, ergeben sich Kosten für die öffentliche Ladinfrastruktur von 0,016 €/km bzw. 1,6 Cent/km und damit bspw. klar unter den aktuellen Mautsätzen. BEV-Lkw sind derzeit von der Maut befreit, aber da die Kosten pro km klar unter den Mautsätzen liegen bleibt den BEV-Lkw ein nennenswerter Kostenvorteil pro km.

5.3.3 Sensitivitäten

Die vorgestellten Ergebnisse zur Anzahl der Ladepunkte und der damit verbundenen Kosten sind auch unsicher aufgrund einiger Modellannahmen. Die Abhängigkeit von drei zentralen Annahmen wird in diesem Abschnitt kurz vorgestellt.

Abbildung 15 zeigt beispielhaft den Einfluss der drei Parameter auf die gesamte Anzahl der Ladepunkte für das Szenario mit 15 % BEV-Bestand und 60 min Ladedauer. Die Abhängigkeiten sind vollkommen analog für die anderen Szenarien. Man erkennt deutlich, dass die Gesamtzahl der Ladepunkte linear von Anteil des BEV-Bestands sowie dem Anteil des Ladens an der BAB abhängt (beide Kurven liegen im Diagramm direkt übereinander). Wird nur halb so viel öffentlich geladen werden auch nur halb so viele Ladepunkte benötigt. Umgekehrt ist es bei der angenommenen Reichweite: haben die Fahrzeuge eine deutlich kleinere Reichweite, muss deutlich öfter geladen werden und mehr Ladepunkte werden gebraucht.

Abbildung 15: Sensitivität zentraler Eingangsgrößen

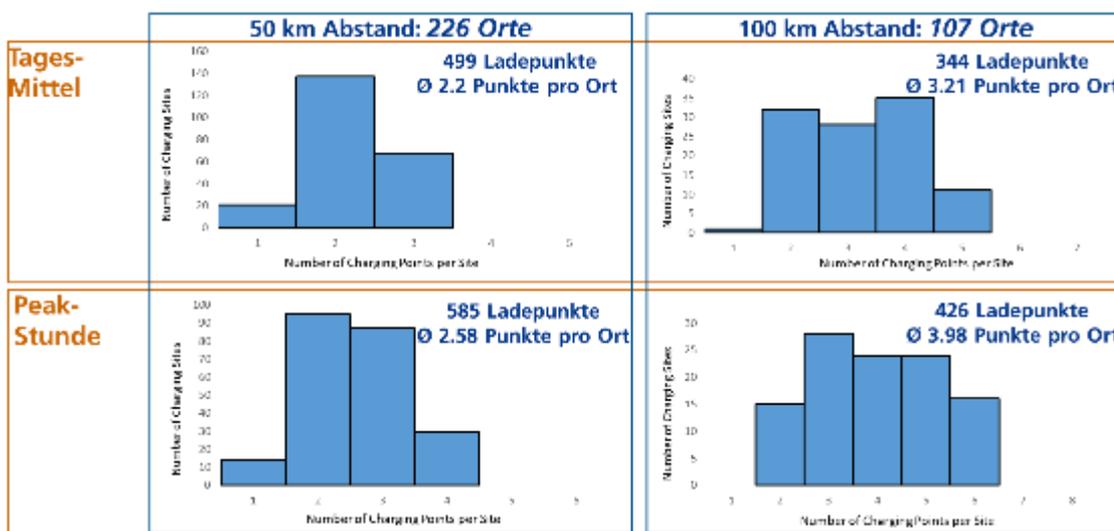


Quelle: Eigene Darstellung.

Im Modell wird bei der Auswahl der Ladestandorte zudem angenommen, dass die erste und letzte Station einen gewissen Abstand von Anfang bzw. Ende der BAB haben, um Stationen nicht direkt an die Landesgrenzen bzw. kurz vor die Mündung in eine andere BAB zu setzen. Es wurde oben dafür die Hälfte des mittleren Abstandes im Netz angenommen. Wenn man stattdessen drei Viertel des mittleren Abstandes zulässt werden etwas weniger Ladepunkt benötigt wie die die nachstehenden Abbildungen für zwei Szenarien zeigen.

Abbildung 16: Sensitivität Anzahl Ladepunkte bei 5 % BEV und 30 Minuten Ladedauer

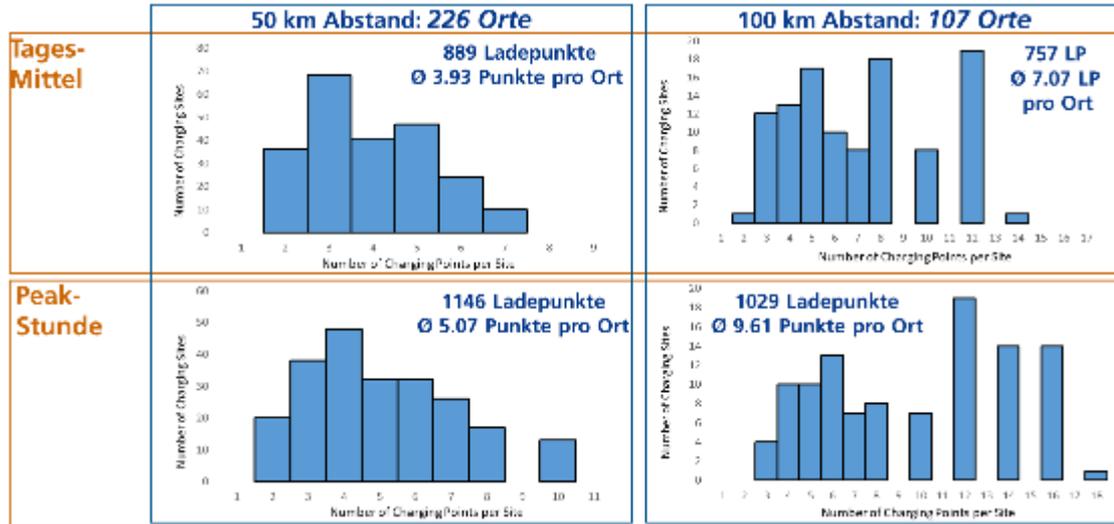
Die Anzahl der Ladepunkte ist leicht anders als in den Hauptergebnissen, da ein größerer Abstand zu Beginn und Ende der BAB in der Positionierung der Ladestandorte zugelassen wurde.



Quelle: Eigene Berechnung

Abbildung 17: Sensitivität Anzahl Ladepunkte bei 15 % BEV und 30 Minuten Ladedauer

Die Anzahl der Ladepunkte ist leicht anders als in den Hauptergebnissen, da ein größerer Abstand zu Beginn und Ende der BAB in der Positionierung der Ladestandorte zugelassen wurde.



Quelle: Eigene Berechnung

Insgesamt ist die Zahl der Ladepunkte und Ladestandorte im Rahmen des Modells also unsicher und hängt nicht unerheblich von den Modellannahmen ab. Diese Unsicherheit ist in der Interpretation der Modellergebnisse zu berücksichtigen.

6 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1:	Zählstellen der manuellen Verkehrszählung in Deutschland	10
Abbildung 2:	Übersicht der Szenarien	12
Abbildung 3:	Verteilung der täglichen Fahrleistung schwerer Nutzfahrzeuge	13
Abbildung 4:	Zusammenfassung Vorgehensweise Standortbestimmung und Stationsauslegung	15
Abbildung 5:	Tagesaufkommen schwerer Lkw	17
Abbildung 6:	Beispielhafte Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Anzahl ankommender Lkw	18
Abbildung 7:	Verteilung der Wartezeiten für ein Warteschlangenbeispiel	19
Abbildung 8:	Verteilung der Ladepunkte bei 5 % BEV im Bestand und 60 Minuten Ladedauer	21
Abbildung 9:	Ladestandorte Deutschland 100 km	22
Abbildung 10:	Ladestandorte Deutschland 50 km	23
Abbildung 11:	Anzahl Ladepunkte bei 5 % BEV und 60 Minuten Ladedauer	24
Abbildung 12:	Anzahl Ladepunkte bei 5 % BEV und 30 Minuten Ladedauer	25
Abbildung 13:	Anzahl Ladepunkte bei 15 % BEV und 30 Minuten Ladedauer	26
Abbildung 14:	Anzahl Ladepunkte bei 15 % BEV und 60 Minuten Ladedauer	26
Abbildung 15:	Sensitivität zentraler Eingangsgrößen	29
Abbildung 16:	Sensitivität Anzahl Ladepunkte bei 5 % BEV und 30 Minuten Ladedauer	29
Abbildung 17:	Sensitivität Anzahl Ladepunkte bei 15 % BEV und 30 Minuten Ladedauer	30

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Anzahl Ladestandorte und Ladepunkte in Deutschland in den Szenarien in 2030.....	5
Table 2:	Number of charging locations and charging points in different scenarios.....	6
Tabelle 3:	Vergleich manueller und automatischer Straßenverkehrszählungsdaten.....	10
Tabelle 4:	Technische Parameter Fahrzeuge.....	11
Tabelle 5:	Techno-ökonomische Parameter Ladeinfrastruktur	11
Tabelle 6:	Vergleich der energiewirtschaftlichen Aspekte der Szenarien	27
Tabelle 7:	Gesamtkosten Ladenetzes	28

8 Literaturverzeichnis

- Adan, I. J. B. F., & Resing, J. A. C. (2017): Queueing Systems: Lecture Notes. Eindhoven University of Technology.
- BAST (2015): Datensatzbeschreibung für richtungsbezogene Verkehrsmengendaten. Zeitintervall: Tageswerte oder Stundenwerte. Bergisch Gladbach.
- BAST (2017): Manuelle Straßenverkehrszählung 2015 - Ergebnisse auf Bundesautobahnen. Stand: 26.01.2017. Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach.
- BAST (2019): Automatische Zählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen. Stundendaten. Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach. Online verfügbar unter https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Stundenwerte.html, zuletzt geprüft am 14.12.2019.
- BMVI (2016): Bundesverkehrswegeplan 2030. Stand: August 2016. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.
- Funke, Simon Árpád (2018): Techno-ökonomische Gesamtbewertung heterogener Maßnahmen zur Verlängerung der Tagesreichweite von batterieelektrischen Fahrzeugen. Dissertation an der Universität Kassel zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) im Fachbereich 16 Elektrotechnik und Informatik. Kassel: Universitätsbibliothek Kassel.
- Gnann, Till; Wietschel, Martin; Kühn, André; Thielmann, Axel; Sauer, Andreas; Plötz, Patrick et al. (2017): Teilstudie „Brennstoffzellen-Lkw: kritische Entwicklungshemmnisse, Forschungsbedarf und Marktpotential“. Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Fraunhofer ISI; Fraunhofer IML; PTV Transport Consult. Karlsruhe
- Gnann, T., Funke, S., Jakobsson, N., Plötz, P., Sprei, F., & Bennehag, A. (2018). Fast charging infrastructure for electric vehicles: Today's situation and future needs. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 62, 314-329.
- Jochem, Patrick; Brendel, Carsten; Reuter-Oppermann, Melanie; Fichtner, Wolf; Nickel, Stefan (2016): Optimizing the allocation of fast charging infrastructure along the German autobahn. In: *J Bus Econ* 86 (5), S. 513–535. DOI: 10.1007/s11573-015-0781-5.
- Johnson, N. L., Kemp, A. W., & Kotz, S. (2005). *Univariate discrete distributions* (Vol. 444). John Wiley & Sons.
- KiD (2010): Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010. WVI Prof. Dr. Wermuth Verkehrsforschung und Infrastrukturplanung GmbH; Institut für angewandte Verkehrs- und Tourismusforschung e.V.; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - Institut für Verkehrsforschung; Kraftfahrt-Bundesamt. Braunschweig, Heilbronn, Berlin, Flensburg.
- Kluschke, Philipp; Uebel, Maren; Wietschel, Martin (2019): Alternative Antriebe im straßengebundenen Schwerlastverkehr: eine quantitative Ermittlung der Nutzeranforderungen an schwere Lkw und deren Infrastruktur. In: *Working Paper Sustainability and Innovation (S 05)*, zuletzt geprüft am 18.11.2019.
- Kühnel, Sven; Hacker, Florian; Görz, Wolf (2018): Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterverkehr. Ein Technologie- und Wirtschaftlichkeitsvergleich. Erster Teilbericht des Forschungsvorhabens „StratON – Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge“. Öko-Institut. Berlin.
- NPE (2015): Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland. Statusbericht und Handlungsempfehlungen 2015. AG 3 - Ladeinfrastruktur und Netzintegration. Nationale Plattform Elektromobilität. Berlin.
- Salazar, Roberto (2020): Queueing Models with R - Exploring the "queueing" R package. online verfügbar <https://towardsdatascience.com/queueing-models-with-r-a794c78e6820>

Wietschel, Martin; Gnann, Till; Kühn, André; Plötz, Patrick; Moll, Cornelius; Speth, Daniel et al. (2017):
Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI). Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung; Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik; PTV Group; MFIVE; Technische Universität Hamburg-Harburg. Karlsruhe.