

# Einfach laden an Rastanlagen

Auslegung des Netzanschlusses für E-Lkw-Lade-Hubs

Nationale  
**LEITSTELLE**  
Ladeinfrastruktur



Bundesministerium  
für Digitales  
und Verkehr



GESAMT-KONZEPT  
**KLIMAFREUNDLICHE  
NUTZFAHRZEUGE**



**Einfach laden an Rastanlagen**

<b>00</b>	<b>Management Summary</b>	<b>6</b>	<b>04</b>	<b>Netzanschlusskonzepte</b>	<b>28</b>
			4.1	Netzanschlusskonfiguration	28
			4.2	Gestaltungsoptionen	32
			4.2.1	Maßnahmen zur Vermeidung von HS-Anschlüssen	32
			4.2.2	Skalierung von Lade-Hubs	36
<b>01</b>	<b>Zielsetzung und Hintergrund der Studie</b>	<b>10</b>	<b>05</b>	<b>Herausforderungen der Bereitstellung von Netzanschlüssen</b>	<b>40</b>
<b>02</b>	<b>Modellierung und Annahmen</b>	<b>12</b>	<b>06</b>	<b>Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen</b>	<b>44</b>
			6.1	Schlussfolgerungen	44
			6.2	Handlungsempfehlungen	45
<b>03</b>	<b>Prototypen für Lade-Hubs an Autobahnen</b>	<b>20</b>	<b>07</b>	<b>Verzeichnisse und Anhang</b>	<b>48</b>
	3.1 Prototyp I – Lade-Hub an internationaler Infrastrukturachse	21		Quellenverzeichnis	48
	3.2 Prototyp II – Lade-Hub mit mittlerem Kundenaufkommen	24		Abkürzungsverzeichnis	49
	3.3 Prototyp III – Lade-Hub an einem bislang unbewirtschafteten Rastplatz	26		Anhang	50
				Ermittlung des Ladeinfrastrukturbedarfs	50
				Annahmen der Modellierung	57
				Kostenabschätzung Netzanschluss	58

## 00

## Management Summary

Um die Klimaschutzziele im Verkehrssektor zu erreichen, müssen die dort verwendeten fossilen Energieträger schnell durch klimafreundliche ersetzt werden. Für den Straßenverkehr – Pkw und Nutzfahrzeuge – ist die Elektrifizierung über batterieelektrische Fahrzeuge ein wesentlicher Lösungsansatz. Für den Einsatz batterieelektrischer Lkw im überregionalen Verkehr ist ein neu zu errichtendes Netz an bedarfsgerechter Ladeinfrastruktur erforderlich. Diese Ladeinfrastruktur sowie ihre Integration in die Stromnetze sind Gegenstand dieser Untersuchung.

Das Ziel dieses Gutachtens ist eine strukturierte Aufbereitung wesentlicher Kriterien und Aspekte, die mit Blick auf das Netz bei der Auswahl, Bewertung und Planung von Lade-Hubs entlang des Autobahnnetzes berücksichtigt werden müssen. Daraus werden Hinweise für die rechtzeitige Planung der Netzanschlüsse und die wirtschaftliche Gestaltung dieser Hubs abgeleitet. Dabei baut das Gutachten auf der Auslegung und Simulation dreier verschiedener Prototypen von Lade-Hubs entlang des deutschen Autobahnnetzes sowie auf Interviews mit fünf deutschen Verteilnetzbetreibern auf.

Auf den hier betrachteten Lade-Hubs werden drei unterschiedliche Typen von Ladeinfrastruktur angeboten: Für batterieelektrische Lkw stehen für das Zwischenladen während der regelmäßig notwendigen Lenkpausen Schnelllader entsprechend dem sich aktuell in der Entwicklung befindlichen MCS-Standard („Megawatt Charging System“) zur Verfügung. Diese weisen eine Leistung von bis zu 4,5 MW auf, wobei sich in der Untersuchung Leistungen bis 900 kW als ausreichend erwiesen. Während der täglichen bzw. meist nächtlichen Ruhezeit stehen spezielle Ladepunkte mit einer Leistung von 100 kW bereit („Night Charging System“ – NCS). Für Pkw werden HPC-Ladepunkte („High Power Charging“) mit Leistungen bis 350 kW berücksichtigt.

Für den Netzanschluss der Lade-Hubs kommen je nach erforderlicher Leistung und den örtlichen Gegebenheiten verschiedene Konfigurationen in Betracht. Sie lassen sich entweder in einem existierendem Mittelspannungsnetz, mit einer eigenen Verbindung zum nächstgelegenen Umspannwerk oder durch ein eigenes Umspannwerk in der Hochspannung anschließen. Netzbetriebsmittel

sind sehr langlebig – ein einmal gewähltes Anschlusskonzept sollte daher möglichst über Jahrzehnte Bestand haben.

Um die große Bandbreite der Verkehrsdichte im deutschen Autobahnnetz abzubilden, wird die benötigte Ausstattung von drei verschiedenen prototypischen Lade-Hubs sowie deren zeitliche Entwicklung von 2027 (Anteil batterieelektrischer Lkw: 7,5 %) bis 2035 (50 %) bestimmt. Hierbei zeigt sich, dass an besonders verkehrsreichen Strecken bereits 2030, spätestens aber 2035 Anschlusspunkte im Hochspannungsnetz notwendig werden. Für das Gros des Streckennetzes reichen Anschlüsse in der Mittelspannung bis 2035 i. d. R. aus, bei Anschluss beider Fahrrichtungen an einem Netzanschluss jedoch nur bis 2030. Lade-Hubs auf Nebenstrecken können unter günstigen Voraussetzungen bis 2035 in der Mittelspannung angeschlossen werden. Es gibt jedoch Gestaltungsmöglichkeiten: Statt einzelne Standorte über die Zeit immer stärker auszubauen, kann alternativ auch das Netz an Standorten dichter gestaltet werden. Dabei sollten zu kleine Standorte zugunsten einer höheren Wirtschaftlichkeit jedoch vermieden werden. Durch Einsatz von Lademanagement kann die Netzanschlussleistung deutlich reduziert werden, ohne dass es dabei zur Beeinträchtigung der Servicequalität kommt. Dem steht bei mehreren unabhängigen Anbietern an einem Standort jedoch die aktuelle Gestaltung von Netzanschlussverträgen entgegen. Der Einsatz von Pufferspeichern ist hingegen eine sehr kostspielige Alternative und bedarf einer laufenden Erweiterung des Speichers sowie eines zusätzlichen Stellplatzes am Standort.

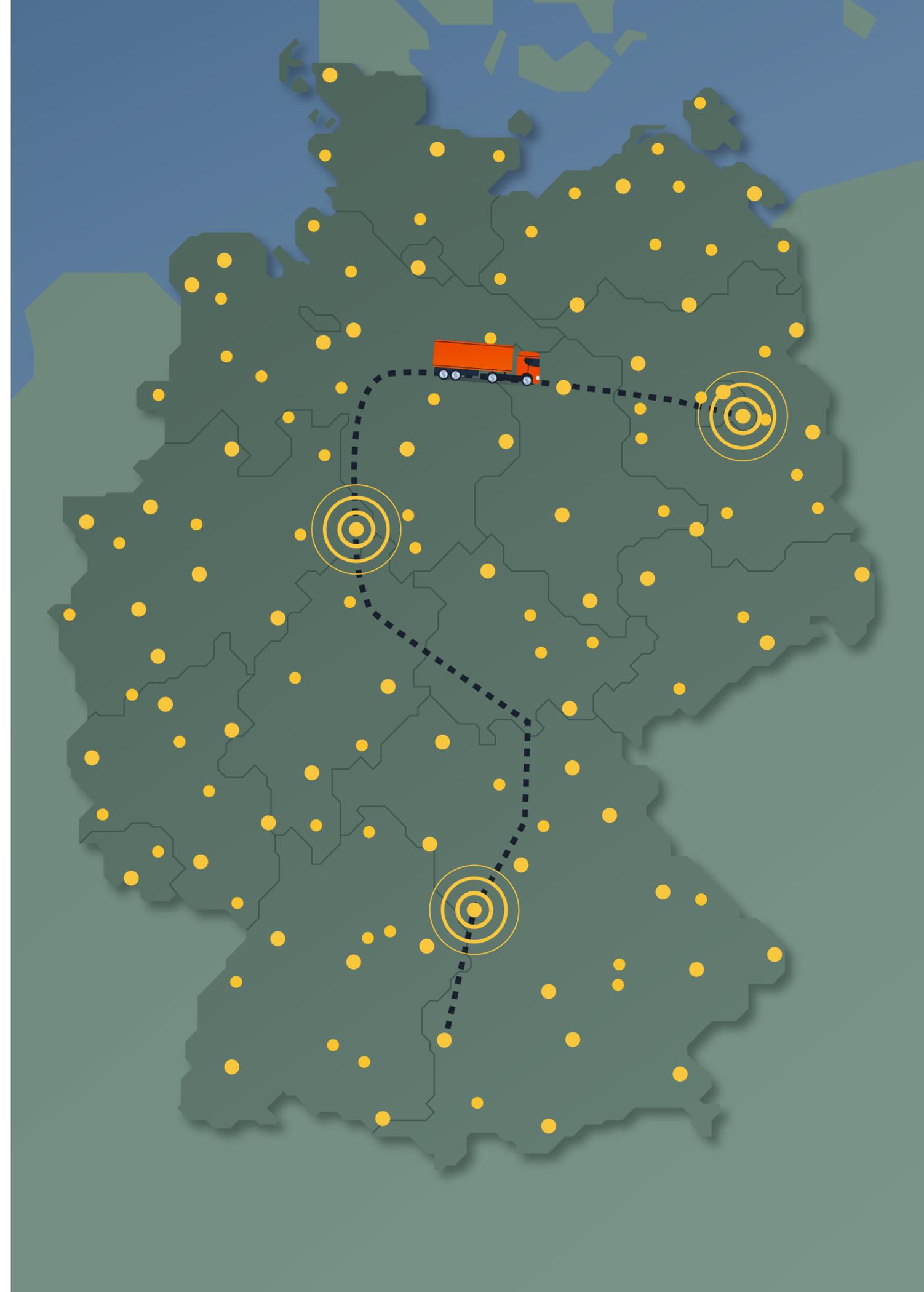
Die erzielten Ergebnisse wurden anschließend mit fünf deutschen Netzbetreibern diskutiert, die u. a. auch Hochspannungsnetze betreiben. Dabei waren sowohl städtische als auch Flächennetzbetreiber vertreten. Die Netzbetreiber berichteten, dass sie die Elektromobilität in ihrer langfristigen Ausbauplanung zwar für Pkw, nicht aber für Lkw berücksichtigen würden. Realisationszeiten für Anschlüsse in der Hochspannung liegen im Bereich von fünf bis zehn Jahren, es bedarf daher einer langfristigen Planung. In einigen Fällen dürfte bereits bei sofortigem Planungsbeginn keine rechtzeitige Bereitstellung eines Netzanschlusses in der Hochspannung möglich sein. Eine allgemeine Aussage ist kaum möglich und es kommt immer auf die individuellen Gegebenheiten vor

Ort an. Eine allgemeine Vorbereitung auf die Entwicklung ist ohne eine konkrete Verortung der Lade-Hubs daher nicht möglich.

Für eine rechtzeitige Bereitstellung der notwendigen Netzanschlüsse ist es deshalb notwendig, die Netzbetreiber der Hochspannung stärker in den Prozess der Netzplanung und Standortfindung für Lade-Hubs einzubinden. Dies gilt besonders für Standorte, die mittelfristig einen Anschluss in der Hochspannung benötigen werden. Aufgrund der langen Umsetzungszeiten sollten diese Schritte schnellstmöglich unternommen werden.

Hierzu ist es auch notwendig, die Planung eines Lade-Hub-Netztes für das gesamte Autobahnnetz voranzutreiben.

Neben den bereits erwähnten Aspekten wie Hochlaufzahlen oder dem Einsatz von Lademanagement spielen auch technische und gesetzliche Weiterentwicklungen (bspw. autonomes Fahren, neue Ladekonzepte, Bewegung von Lkw in Lenkzeitpausen) eine wichtige Rolle. Zudem bestehen starke Wechselwirkungen zwischen der Verfügbarkeit von Ladepunkten im Autobahnnetz und der in den Logistikbetrieben. Für letztere kann erwartet werden, dass ebenfalls hohe Netzanschlussleistungen erforderlich werden und somit mit ähnlichen Herausforderungen bzgl. des Netzanschlusses zu rechnen ist.



# 01 | Zielsetzung und Hintergrund der Studie

Die Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs ist eine Voraussetzung für die Erreichung der Klimaziele im Verkehrssektor. Batterieelektrische Nutzfahrzeuge (BE-Nfz, wie z. B. BEV-Lkw)<sup>1</sup> sind eine der aussichtsreichsten Optionen zur Erreichung dieses Ziels. Die Implementierung einer anforderungsgemäßen Ladeinfrastruktur entlang der Hauptverkehrsachsen ist Voraussetzung für den Hochlauf und die Akzeptanz von BE-Nfz.

Vorangegangene Untersuchungen haben sich mit den verschiedensten Kriterien für die Bewertung von Standorten für Lade-Hubs beschäftigt. Dabei wurde – aufbauend auf der gesetzlichen Pflicht der Netzbetreiber, Anschlussbegehren von Netzkunden grundsätzlich zu entsprechen – davon ausgegangen, dass für potenzielle Standorte ein Netzanschluss bereitgestellt werden kann. In diesem Vorhaben liegt der Fokus auf der Standortbewertung ausgehend von den Möglichkeiten und Herausforderungen der Netzbetreiber. Das Gutachten bringt die Perspektive auf das Netz als einen Aspekt bei der Entscheidungsfindung ein. Das Ergebnis ist eine strukturierte Aufbereitung wesentlicher Kriterien und Aspekte, die mit Blick auf das Netz bei der Auswahl, Bewertung und Planung von Lade-Hubs berücksichtigt werden müssen.

Für die Untersuchungen wurden konkrete Szenarien modelliert und quantitativ analysiert. Dies ist aus verschiedenen Gründen unumgänglich:

- Die tatsächlich erforderliche Netzanschlussleistung eines Lade-Hubs ist in der Regel niedriger als die Summenleistung der angeschlossenen Ladepunkte. Realistische Werte für die zu erwartenden Gleichzeitigkeiten lassen sich nur über eine Zeitreihenanalyse ermitteln.
- Die gegenseitige Beeinflussung von Ladepunkten für BE-Nfz und Pkw auf einem Lade-Hub sollte ausdrücklich berücksichtigt werden.<sup>2</sup> Dazu mussten quantitative Annahmen zu den Bedarfen der Pkw in den Analysen mit abgebildet werden.
- Während der Hochlaufphase wird es eine Wechselwirkung zwischen der bedarfsorientierten Auslegung der Ladepunkte einerseits und der Ausbauplanung auf der Zeitachse andererseits geben. Die Erweiterung von Lade-Hubs geht einher mit einer Verdichtung von Standorten. Eine einfache Extrapolation der Bedarfe für einen einmal definierten Standort entlang der Zeitachse würde zu Fehlschlüssen führen.
- Entscheidende Kriterien sind die Wirtschaftlichkeit der Lade-Hubs im Betrieb (hohe Auslastung) bei gleichzeitiger Erfüllung von Komfortexpectationen (Vermeidung von Wartezeiten und Ladedefiziten). Im Zusammenspiel bestimmen diese Kriterien die Momente, zu denen Kapazitätserweiterungen oder der Übergang auf eine höhere Spannungsebene anstehen. Für die Unterstützung solcher Abwägungen sind quantitative Methoden und Werkzeuge unerlässlich.

01 |

02

03

04

05

06

07

1 | „Battery Electric Vehicle“ (BEV) als Abgrenzung zu den ebenfalls elektrisch angetriebenen (Hybrid-)Oberleitungs-Lkw. Vereinfachend wird für BEV-Lkw auch der Begriff E-Lkw verwendet.

2 | Wegen des Fokus auf die Hauptverkehrsachsen wurden das Depotladen und das Zwischenladen während des Güterumschlags in der Modellierung hingegen bewusst nicht berücksichtigt.

## 02

## Modellierung und Annahmen

Die notwendige Netzanschlussleistung eines Lade-Hubs für Nutzfahrzeuge steht in direktem Zusammenhang mit der notwendigen Ladeinfrastruktur und deren Nutzung. Da solche Systeme aktuell nicht im hier betrachteten Maßstab existieren, können diese auch nicht aus Erfahrungswerten abgeleitet werden. Aus diesem Grund wird der Bedarf sowohl an Ladeinfrastruktur als auch an Netzanschlussleistung durch ein fundamentales Simulationsmodell ermittelt. Die hierfür getroffenen Annahmen sind im Folgenden beschrieben. Eine detailliertere Beschreibung des verwendeten Modells findet sich im Anhang dieses Dokumentes sowie in einer vorhergehenden Studie der Autoren (siehe [1]).



Quelle 1

### Verkehrsaufkommen und Verortung der Prototypen

Der Bedarf von Ladeinfrastruktur an Autobahnen wird zukünftig maßgeblich durch den Fernverkehr bestimmt werden. Für den Regional- und Lieferverkehr wird in dieser Untersuchung davon ausgegangen, dass die hierfür notwendige Ladeinfrastruktur, bedingt durch die geringe tägliche Fahrstrecke, an den eigenen Logistikhubs bereitgestellt wird. An Autobahnstandorten wird die notwendige Größe des Standortes somit maßgeblich durch das Aufkommen im Fernverkehr sowie die Dichte der Lade-Hubs bestimmt.



Quelle 2

Ausgehend von den aktuellen Zielen der EU-Kommission zur Errichtung von Ladeinfrastruktur für Nutzfahrzeuge [2] werden zunächst Stationsdichten von 60 km im Kernnetz der TEN-V (transeuropäische Verkehrsnetze) sowie 100 km im TEN-V-Gesamtnetz angenommen. Anschließend wurden mögliche, exemplarische Standorte für Lade-Hubs identifiziert und aus diesen eine Auswahl getroffen, die die gesamte Bandbreite möglicher Standorte abdeckt. Diese sind:

- **Lade-Hub an einer internationalen Infrastrukturachse (Prototyp I)**  
Dieser Lade-Hub repräsentiert die obere Grenze der möglichen Hub-Größen und weist einen hohen Anteil an internationalem Durchgangsverkehr auf.

- **Lade-Hub mit mittlerem Verkehrsaufkommen (Prototyp II)**  
Dieser Lade-Hub weist ein durchschnittliches Verkehrs- und Kundenaufkommen im TEN-V-Gesamtnetz auf. Ein Netzanschluss ist bereits vorhanden.
- **Lade-Hub an einem unbewirtschafteten Parkplatz (Prototyp III)**  
Ein Lade-Hub mit geringem Kundenaufkommen an einem bislang nicht bewirtschafteten Parkplatz.

Unter Verwendung der automatisierten Zählstellen der Bundesanstalt für Straßenwesen aus dem Jahr 2018 (BASt, siehe [3]) werden diese Prototypen einzelnen Zählstellen zugeordnet, wodurch zugleich stundengenaue Zählwerte für das Simulationstool e.mission genutzt werden können. Abbildung 1 zeigt die Verortung der Prototypen im deutschen Autobahnnetz sowie deren Einordnung entsprechend den TEN-V.

Dieses Vorgehen erlaubt es, einzelne repräsentative Standorte zu analysieren. Eine räumliche Optimierung eines Gesamtnetzes an Lade-Hubs findet hingegen nicht statt.



Quelle 3

01

02

03

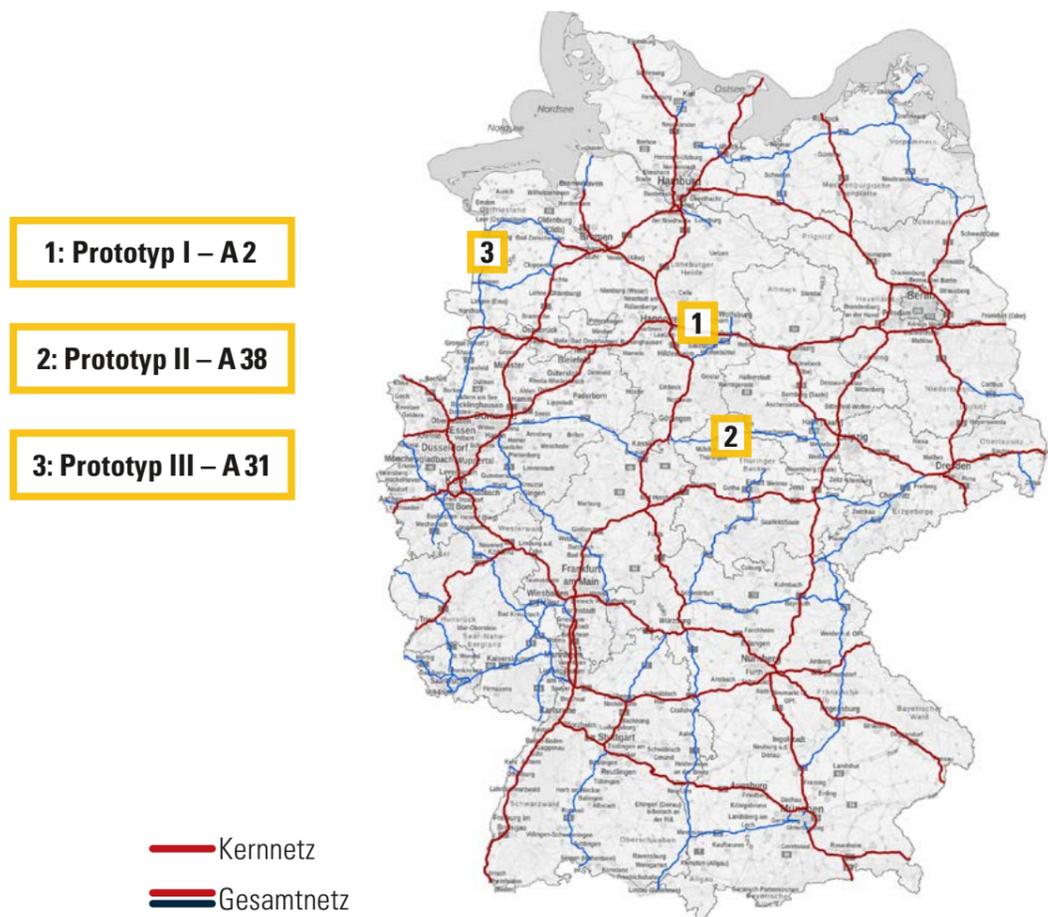
04

05

06

07

ABBILDUNG 1: VERORTUNG DER ENTWICKELTEN PROTOTYPEN IM DEUTSCHEN AUTOBAHNNETZ UND EINORDNUNG NACH TEN-V



**Spezifikation der Fahrzeuge**

Es werden vier Typen schwerer E-Lkw der Klasse N3 (Lkw ab 12 t) berücksichtigt (siehe Tabelle 1). Die berechneten Anteile am MCS-Kundenaufkommen berechnen sich dabei aus den jeweiligen Tagesstrecken, die sich zwischen den Fahrzeugklassen unterscheiden, und entsprechen nicht den Anteilen an der Fahrzeugflotte (Details siehe analoge Modellbeschreibung in [1]).



Quelle 1

01  
 02  
 03  
 04  
 05  
 06  
 07

TABELLE 1: SPEZIFIKATION DER BERÜCKSICHTIGTEN E-LKW

Nr.	Netto-Kapazität [kWh]	Reichweite [km]	Energiebedarf plug-to-wheel [kWh/km]	Anteil am Ladeaufkommen MCS
1	≈ 960	800	1,26	43 %
2	≈ 840	700	1,26	29 %
3	≈ 720	600	1,26	19 %
4	≈ 600	500	1,26	9 %

**Spezifikation der Ladepunkte**

Für das MCS-Laden wird davon ausgegangen, dass die in 2027 errichteten Ladepunkte über eine Ladeleistung von 700 kW verfügen und noch in 2030 bestehen. Die in 2030 und 2035 errichteten Ladepunkte verfügen über eine Ladeleistung von 900 kW. Ähnliches gilt für die HPC-Infrastruktur für Pkw. Hier wird bis 2030 von einer Netzanschlussleistung je Ladepunkt i. H. v. 200 kW ausgegangen. Ab 2035 erhöht sich dieser Wert auf 350 kW. Für die Lebensdauer eines Ladepunktes werden 8 Jahre angesetzt, so dass im Jahr 2035 alle Ladeeinrichtungen aus dem Jahr 2027 bereits durch leistungsstärkere Einheiten ersetzt sind.

**Fahr- und Ladeverhalten**

In der Simulation werden MCS-Ladepunkte nur von denjenigen passierenden Nutzfahrzeugen genutzt, die für ihre Fahrstrecke auf ein Nachladen angewiesen sind. Es wird eine Sicherheitsmarge von 20 % der Netto-Batteriekapazität unterstellt. Die dabei bezogene Ladeenergie wird als „notwendige Ladeenergie“ bezeichnet.

Das Verhalten der Nutzfahrzeuge am Lade-Hub hat dabei großen Einfluss auf die notwendige Anzahl von Ladepunkten, insbesondere für die MCS-Ladeinfrastruktur. Aktuelle gesetzliche Vorgaben verbieten es der Fahrerin oder dem Fahrer, das Fahrzeug innerhalb der Lenkzeitunterbrechung umzuparken. Entsprechend wird ein MCS-Ladepunkt stets 45 Minuten belegt, unabhängig davon, ob die notwendige Ladeenergie bereits bezogen wurde. Die darüber hinaus beziehbare Energie innerhalb der Pausenzeit wird als „zusätzliche Ladeenergie“ bezeichnet. Die Differenzierung zwischen notwendiger und zusätzlicher Ladeenergie erlaubt eine Form von Lademanagement, durch die

die notwendige Netzanschlussleistung des Lade-Hubs ggf. reduziert werden kann. Die notwendige Anzahl der Ladepunkte wurde so bestimmt, dass für 99 % der Ladevorgänge eine Wartezeit vor Ladebeginn von unter 15 min erreicht wird.

Die Anzahl der NCS-Lader wird, anders als bei MCS-Ladern, nicht über die Simulation des Verkehrsaufkommens ermittelt. Stattdessen wird ein Teil der vorhandenen Stellplätze am Standort mit NCS-Ladeeinrichtungen ausgestattet. Der Anteil richtet sich dabei nach der Dichte der heute vorhandenen Stellplätze an den jeweiligen Autobahnabschnitten. Für NCS-Ladeeinrichtungen wird eine Vollbelegung der Ladepunkte unterstellt, denn bereits heute ist die Anzahl der Stellplätze häufig unzureichend, so dass diese an Werktagen voll belegt sind.



Quelle 4

Für die HPC-Infrastruktur für Pkw wird in dieser Untersuchung keine dedizierte Simulation durchgeführt. Anzahl und Spezifikation der Ladepunkte ergibt sich aus den im Deutschlandnetz spezifizierten Hub-Größen [4] sowie einer Extrapolation entsprechend einem Hochlauf auf ca. 15 Mio. Elektrofahrzeuge bis 2035.<sup>3</sup>

### Netzanschlussleistung und Lademanagement

Die notwendige Netzanschlussleistung der Standorte ergibt sich grundsätzlich aus der Summenleistung der einzelnen Arten von Ladeinfrastruktur (MCS, NCS und HPC). Zusätzlich wird ein Wirkungsgrad der Ladeeinrichtungen von 95 % sowie ein Leistungsfaktor<sup>4</sup> von ebenfalls 95 % unterstellt. In Summe liegt die benötigte Netzanschlussleistung für die Ladeinfrastruktur wechselstromseitig somit ca. 11 % höher als die auf DC-Seite bereitgestellte Ladeleistung.

Eine Ausnahme bildet die Netzanschlussleistung für die MCS-Ladeeinrichtungen. Die Standzeit der Fahrzeuge (45 min) ist hier i. d. R. deutlich länger als die Zeit, die zum Bezug der notwendigen Ladeenergie benötigt wird. Durch Einsatz eines Lademanagements, das die vorhandene Gesamtladeleistung

bevorzugt Fahrzeugen zuweist, die ihre notwendige Ladeenergie noch nicht erreicht haben, kann die Netzanschlussleistung für die MCS-Ladeeinrichtungen deutlich reduziert werden. In allen untersuchten Fällen lag die benötigte Netzanschlussleistung der MCS-Ladeeinrichtungen bei 50 bis 60 % der installierten Leistung. Diese Form von Lademanagement wird bereits in der „Basis-Untersuchung“ berücksichtigt.

Angaben zum Leistungsbedarf von Lade-Hubs beziehen sich, soweit nicht anders beschrieben, auf eine Fahrtrichtung der jeweiligen Autobahn. Für Netzanschlüsse, die Lade-Hubs auf beiden Seiten der Autobahn versorgen, wird vereinfachend das Doppelte des Anschlusses einer Fahrtrichtung angenommen.

In Abschnitt 4.2.1 (Maßnahmen zur Vermeidung von HS-Anschlüssen) wird darüber hinaus eine weitere Form von Lademanagement betrachtet. Dabei werden Synergieeffekte zwischen den unterschiedlichen Nutzungsprofilen des MCS- und des NCS-Ladens berücksichtigt. Die hohe zeitliche Flexibilität der NCS-Ladevorgänge wird hier so genutzt, dass die NCS-Ladevorgänge während hoher Leistungsanforderungen des MCS reduziert werden. Im Ergebnis kann die Netzanschlussleistung der NCS-Ladeeinrichtungen in einigen Fällen vollständig vernachlässigt werden, ohne dass die Funktionalität und das Serviceniveau des Lade-Hubs beeinträchtigt werden.

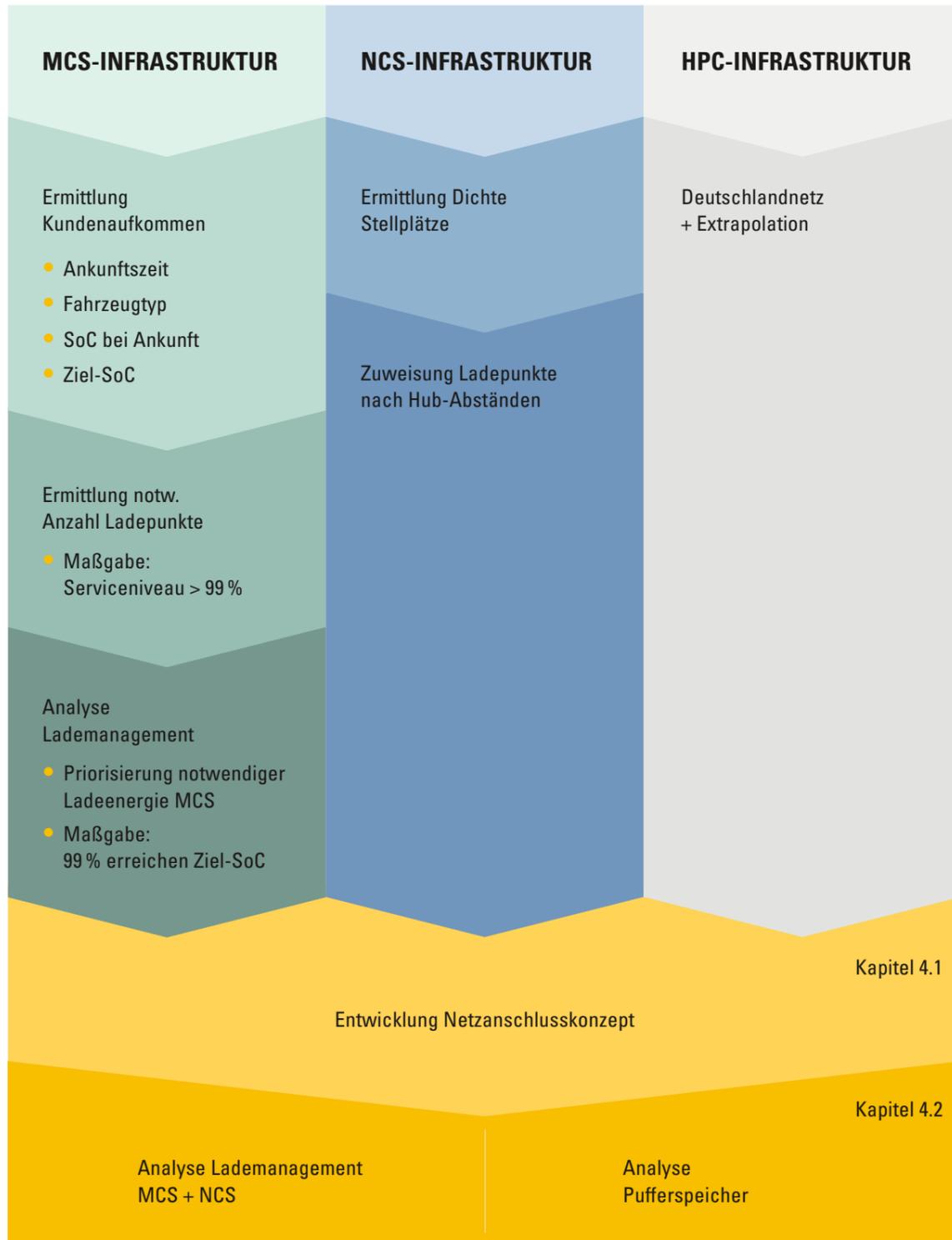
### Vorgehen zur Ermittlung der Standortkonfiguration

Abbildung 2 zeigt das Vorgehen zur Ermittlung der notwendigen Ladeinfrastruktur sowie der daraus resultierend notwendigen Netzanschlussleistungen. Eine nähere Erläuterung der Vorgehensweise zur Ermittlung der Standortkonfiguration und der hierfür verwendeten Methodik findet sich im Anhang dieses Gutachtens. Zusätzlich enthält der Anhang eine Zusammenfassung der hierfür getroffenen Annahmen.

<sup>3</sup> | Die im Koalitionsvertrag festgeschriebenen Ziele der Bundesregierung i. H. v. 15 Mio. Fahrzeugen bis 2030 waren zum Zeitpunkt der Durchführung dieses Analyseschrittes noch nicht bekannt.

<sup>4</sup> | Der Leistungsfaktor beschreibt das Verhältnis der genutzten Wirkleistung zur benötigten Scheinleistung bei Wechselstromsystemen.

ABBILDUNG 2: VORGEHEN ZUR ERMITTLUNG DES LADEINFRASTRUKTURBEDARFS UND DER BENÖTIGTEN NETZANSCHLUSSLEISTUNG



## 03

## Prototypen für Lade-Hubs an Autobahnen

Für die Bewertung von Netzanschlusskonzepten sowie deren Relevanz für die Standortwahl von Lade-Hubs für Nutzfahrzeuge und Pkw ist es zunächst notwendig, ein realistisches Bild von Anzahl, Spezifikation und zeitlichem Zusammenwirken der unterschiedlichen Typen von Ladepunkten zu zeichnen. Zu diesem Zweck werden zunächst drei Prototypen für Lade-Hubs an Autobahnstandorten entwickelt, die die gesamte Bandbreite an möglichen Dimensionen abdecken. In dieser Arbeit wird zwischen drei Typen von Ladeinfrastruktur unterschieden.

- Das Megawatt Charging System (MCS) übernimmt das Schnellladen von Nutzfahrzeugen während der obligatorischen Pausenzeiten nach einer Lenkzeit von i. d. R. 4,5 Stunden. Dabei wird in 2027 eine nominale Ladeleistung von 700 kW je Ladepunkt angenommen. Später errichtete Ladepunkte laden mit 900 kW je Ladepunkt.
- Das Übernachten (Night Charging System, NCS) von Nutzfahrzeugen findet während der täglichen Ruhezeit von mindestens 9 bis zu 11 Stunden statt und erfolgt mit einer Leistung von nominal 100 kW je Ladepunkt.
- Für Pkw werden Schnellladepunkte (High Power Charging, HPC) mit einer Ladeleistung von 200 kW je Ladepunkt (bis 2027) bzw. 350 kW (ab 2030) berücksichtigt.

Die Ermittlung der notwendigen Ladeinfrastruktur für Nutzfahrzeuge erfolgt mithilfe des Simulationstools e.mission der ef.Ruhr. Das Tool kombiniert ein Mobilitätsmodell mit einem Warteschlangenmodell sowie einem Energiemanagementsystem für Lade-Hubs. Dadurch lassen sich sowohl der Bedarf an verschiedenen Arten von Ladeinfrastruktur als auch die Potenziale von Maßnahmen wie Lademanagement, lokaler Erzeugung erneuerbarer Energien oder dem Einsatz von Pufferspeichern analysieren. Innerhalb des Tools werden sämtliche relevanten Vorgänge an einem Lade-Hub über ein Jahr und in einer zeitlichen Auflösung von 5 min simuliert. Eine Kurzbeschreibung des Modells findet sich im Anhang dieses Gutachtens. Die Ermittlung des Bedarfs an HPC-Infrastruktur für Pkw erfolgt anhand der aktuellen Planungen des Deutschlandnetzes sowie einer Extrapolation für 2030 und 2035.

Raststätten an Autobahnen sind häufig so angelegt, dass ähnliche Infrastrukturen in beiden Fahrrichtungen bestehen. In vielen Fällen liegen die nördliche und südliche bzw. östliche und westliche Raststätte dicht beieinander, so dass es sinnvoll sein kann, beide Raststätten über einen gemeinsamen Netzanschluss zu versorgen. Wir geben den jeweiligen Bedarf an Ladeinfrastruktur stets für eine Fahrrichtung an, wohingegen für den Netzanschluss die Werte für eine und zwei Fahrrichtungen jeweils getrennt angegeben werden.

### 3.1 Prototyp I – Lade-Hub an internationaler Infrastrukturachse

Prototyp I stellt einen hochbelasteten Lade-Hub an einer internationalen Infrastrukturachse dar und repräsentiert die am höchsten belasteten Standorte im deutschen Autobahnnetz (Top 1 % des Aufkommens an Schwerlastverkehr innerhalb der Zählstellen der BAST, Zählstelle Alleringersleben). Als Teil des TEN-V-Kernnetzes wird ein Stationsabstand von 60 km angenommen, was sich auf die Kundenzahl des MCS-Ladens wie auch die elektrifizierten Stellplätze für das NCS-Laden auswirkt. Für die Versorgung von Pkw wird zunächst von einem XL-Standort gemäß der Klassifizierung des Deutschlandnetzes ausgegangen, der über 2027 hinaus eine deutliche Erweiterung erfährt. Hinsichtlich des Netzanschlusses kann von einem vorhandenen Mittelspannungsanschluss ausgegangen werden. Ein Beispiel für die Dimension einer solchen Raststätte zeigt Abbildung 3.

ABBILDUNG 3: SATELLITENAUFNAHME DER RASTSTÄTTE RHYNERN NORD AN DER A 2 NAHE HAMM

Quelle: Google Earth



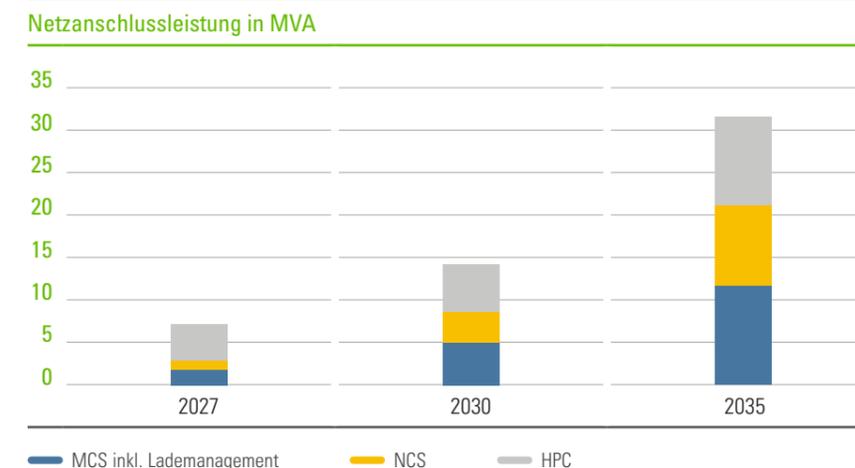
Entsprechend der Spezifikation des ersten Prototyps als hochbelastete Infrastruktur entsteht ein hoher Bedarf an MCS-, NCS- und HPC-Ladern. Die durchschnittliche tägliche Anzahl von MCS-Kunden entwickelt sich dabei von 22 in 2027 bis 150 in 2035, die maximale Anzahl von MCS-Kunden von 46 in 2027 bis 284 in 2035. Simuliert wird das Kundenaufkommen im Jahresverlauf. Unter der Annahme, dass bei 99 % der Kunden im Jahr eine Wartezeit von 15 min vor Beginn des Ladevorgangs nicht überschritten wird, werden 5 MCS-Ladepunkte in 2027 und 24 MCS-Ladepunkte in 2035 notwendig (siehe Tabelle 2). Dies geht mit einer hohen Netzanschlussleistung von 7,2 MVA<sup>5</sup> (eine Fahrtrichtung) bereits in 2027 einher, die sich bis 2035 auf 32 MVA erhöht.

TABELLE 2: ERMITTELTEN BEDARF AN LADEINFRASTRUKTUR FÜR PROTOTYP I – LADE-HUB AN INTERNATIONALER INFRASTRUKTURACHSE, EINE FAHRTRICHTUNG

Jahr		2027	2030	2035
Durchschnittliche tägliche Anzahl von MCS-Kunden für Prototyp I	#	22	60	150
Maximale tägliche Anzahl von MCS-Kunden für Prototyp I	#	46	114	284
Anzahl MCS 700 kW	#	5	5	0
Anzahl MCS 900 kW	#	0	6	24
Anzahl NCS 100 kW	#	12	33	81
Anzahl HPC 200 kW	#	16	24	8
Anzahl HPC 350 kW	#	0	0	24
Quote Lademanagement MCS	%	60	50	50
Summe Ladeleistung inkl. Lademanagement MCS	MW	6,5	12,6	28,9
Netzanschlussleistung eine Fahrtrichtung	MVA	7,2	13,9	32,0
Netzanschlussleistung zwei Fahrtrichtungen	MVA	14,4	27,8	64,0

Abbildung 4 zeigt die zeitliche Entwicklung sowie die Aufteilung der Netzanschlussleistung. Es wird deutlich, dass der Leistungsbedarf über den betrachteten Zeitraum stark ansteigt. Die Ladeinfrastruktur für Nutzfahrzeuge benötigt 2027 etwa die Hälfte der Anschlussleistung. Bis 2035 erhöht sich dieser Anteil auf 65 %. Da in der Analyse von einem Anteil elektrifizierter Nutzfahrzeuge von 50 % ausgegangen wird, ist damit zu rechnen, dass sich die notwendige Netzanschlussleistung nach 2035 weiter deutlich erhöht.

ABBILDUNG 4: ENTWICKLUNG DER NETZANSCHLUSSLEISTUNG VON PROTOTYP I, EINE FAHRTRICHTUNG



5 | Die Einheit MVA („Mega-Voltampere“) beinhaltet neben der Wirkleistung (gemessen in MW, „Megawatt“) auch die Blindleistung und ist in Wechselstromsystemen relevant für die Auslegung elektrischer Komponenten. Die Blindleistung wird dabei zum Aufbau elektrischer und magnetischer Felder benötigt und muss bei der Auslegung von Wechselstromsystemen stets mit berücksichtigt werden. Die Scheinleistung ist die geometrische Summe aus Wirk- und Blindleistung und repräsentiert die tatsächliche Belastung elektrischer Komponenten.

## 3.2 Prototyp II – Lade-Hub mit mittlerem Kundenaufkommen

Prototyp II repräsentiert einen Lade-Hub für Nutzfahrzeuge, der dem Mittelwert potenzieller Standorte im TEN-V-Gesamtnetz entspricht. Dabei wird von einem Stationsabstand von 100 km ausgegangen. Der Lade-Hub bietet für Nutzfahrzeuge MCS- und NCS-Lader an sowie HPC-Infrastruktur für Pkw. Standorte dieser Art verfügen typischerweise bereits heute über eine Infrastruktur mit Tankstelle und Gastronomie und einen Netzanschluss in der Mittelspannung. Ein Beispiel für die Dimension einer solchen Raststätte zeigt Abbildung 5.

ABBILDUNG 5: SATELLITENAUFNAHME DER RASTSTÄTTE ROHNETAL AN DER A 38 NAHE SANGERHAUSEN  
Quelle: Bing Maps



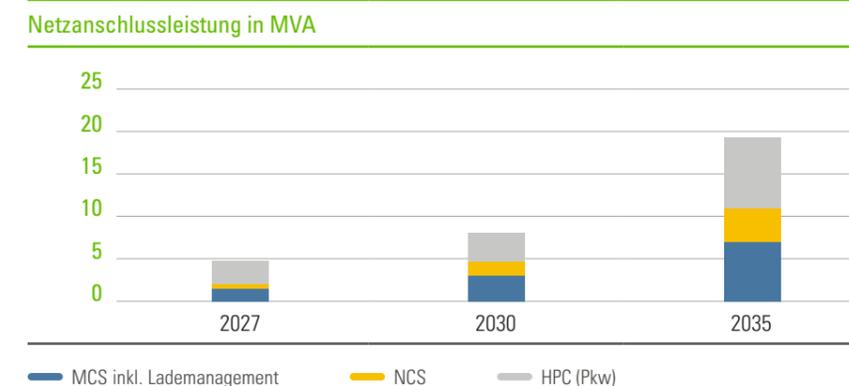
Mittels der Zählwerte der BAST an der A 38 (Zählstelle Röstebachtalbrücke), der jeweiligen Quote elektrifizierter Nutzfahrzeuge, der Stationsabstände und des unterstellten Fahrverhaltens im Schwerlastverkehr werden für diesen Standort Kundenzahlen von durchschnittlich 11 Kunden je Tag (2027) bis ca. 76 Kunden je Tag (2035) ermittelt. Zur Bedienung der Kundenzahlen in 2027 werden 4 MCS- sowie 5 Übernachtladepunkte und in 2035 14 MCS- sowie 35 Übernachtladepunkte benötigt. Tabelle 3 fasst die Auslegung sowie die ermittelten Netzanschlussleistungen für Prototyp II zusammen.

TABELLE 3: ERMITTELTEN BEDARF AN LADEINFRASTRUKTUR FÜR PROTOTYP II – LADE-HUB MIT MITTLEREM KUNDENAUFKOMMEN, EINE FAHRRICHTUNG

Jahr		2027	2030	2035
Durchschnittliche tägliche Anzahl von MCS-Kunden für Prototyp II	#	11	30	76
Maximale tägliche Anzahl von MCS-Kunden für Prototyp II	#	31	73	166
Anzahl MCS 700 kW	#	4	4	0
Anzahl MCS 900 kW	#	0	3	14
Anzahl NCS 100 kW	#	5	14	35
Anzahl HPC 200 kW	#	12	16	4
Anzahl HPC 350 kW	#	0	0	20
Quote Lademanagement MCS	%	50	50	50
Summe Ladeleistung inkl. Lademanagement MCS	MW	4,3	7,4	17,6
Netzanschlussleistung eine Fahrtrichtung	MVA	4,8	8,1	19,5
Netzanschlussleistung zwei Fahrtrichtungen	MVA	9,5	16,3	39,0

Die notwendige Netzanschlussleistung für eine Fahrtrichtung entwickelt sich von ca. 5 MVA in 2027 bis zu ca. 20 MVA in 2035 (siehe Abbildung 6). Bei beidseitigem Anschluss entspricht dies ca. 10 MVA in 2027 und ca. 40 MVA in 2035 (siehe Tabelle 3).

ABBILDUNG 6: ENTWICKLUNG DER NETZANSCHLUSSLEISTUNG VON PROTOTYP II, EINE FAHRRICHTUNG



### 3.3 Prototyp III – Lade-Hub an einem bislang unbewirtschafteten Rastplatz

Prototyp III repräsentiert einen Lade-Hub an einer Nebenstrecke des Autobahnnetzes und stellt somit die untere Schranke möglicher Hub-Dimensionen dar. Es wird davon ausgegangen, dass der Standort bislang über keine nennenswerte Infrastruktur und keinen (relevanten) Netzanschluss verfügt. Der Standort hat nur ein begrenztes Angebot an MCS-, NCS- und HPC-Infrastruktur. Abbildung 7 zeigt einen exemplarischen Standort an der A31, der der Definition dieses Prototyps entspricht.

ABBILDUNG 7: SATELLITENAUFNAHME DES RASTPLATZES BERGLER FELD OST AN DER A31 NAHE NORDHORN

Quelle: Google Earth



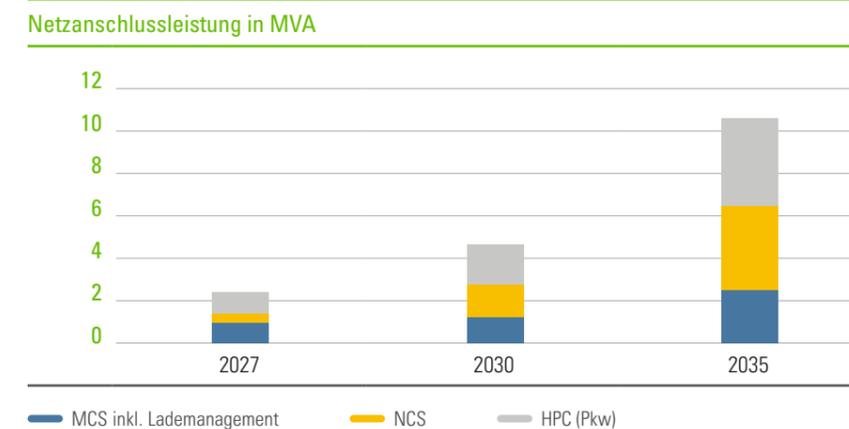
Als Referenz für diesen Standort wird das stündlich gezählte Verkehrsaufkommen an der A31 (Zählstelle Lathen) genutzt. Hieraus resultiert eine durchschnittliche tägliche Kundenzahl von 3 Nutzfahrzeugen in 2027 bis zu ca. 20 in 2035. Die notwendige Ladeinfrastruktur und die ermittelten Netzanschlussleistungen sind in Tabelle 4 dargestellt.

TABELLE 4: ERMITTELTEN BEDARF AN LADEINFRASTRUKTUR FÜR PROTOTYP III – LADE-HUB AN EINEM BISLANG UNBEWIRTSCHAFTETEN RASTPLATZ, EINE FAHRTRICHTUNG

Jahr		2027	2030	2035
Durchschnittliche tägliche Anzahl von MCS-Kunden für Prototyp III	#	3	8	20
Maximale tägliche Anzahl von MCS-Kunden für Prototyp III	#	9	18	43
Anzahl MCS 700 kW	#	2	2	0
Anzahl MCS 900 kW	#	0	1	5
Anzahl NCS 100 kW	#	5	14	36
Anzahl HPC 200 kW	#	4	8	4
Anzahl HPC 350 kW	#	0	0	8
Quote Lademanagement MCS	%	60	50	50
Summe Ladeleistung inkl. Lademanagement MCS	MW	2,1	4,2	9,5
Netzanschlussleistung eine Fahrtrichtung	MVA	2,4	4,6	10,5
Netzanschlussleistung zwei Fahrtrichtungen	MVA	4,7	9,2	20,9

Die für diesen Prototyp notwendige Netzanschlussleistung entwickelt sich von ca. 2 MVA (eine Fahrtrichtung) bzw. ca. 5 MVA (beide Fahrtrichtungen) in 2027 bis zu ca. 11 MVA bzw. 21 MVA in 2035 (siehe Abbildung 8).

ABBILDUNG 8: ENTWICKLUNG DER NETZANSCHLUSSLEISTUNG VON PROTOTYP III, EINE FAHRTRICHTUNG



01

02

03

04

05

06

07

## 04

## Netzanschlusskonzepte

## 4.1 Netzanschlusskonfiguration

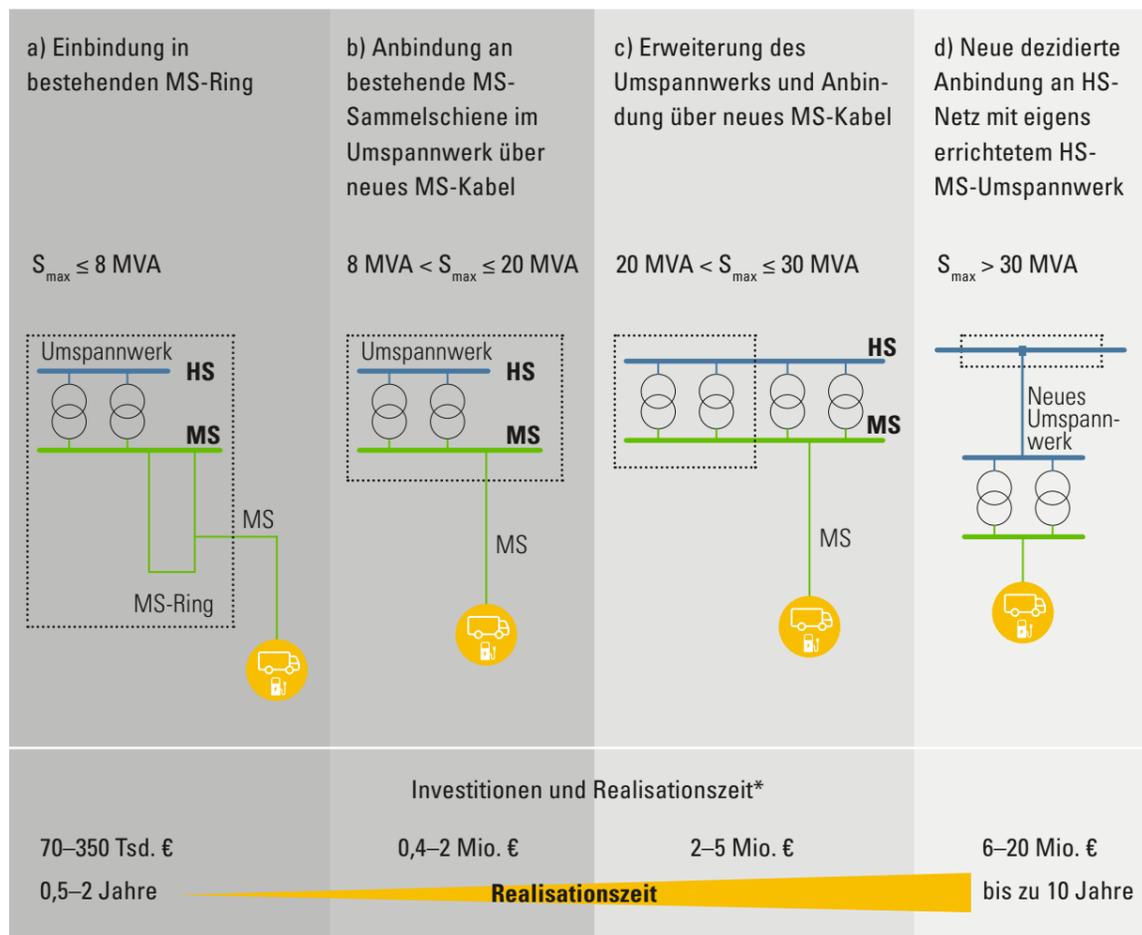
Für den Anschluss der Lade-Hubs kommen netzseitig verschiedene Konfigurationen in Betracht. Die geeignete Option wird vor allem bestimmt durch den Abgleich der jeweils geforderten kumulativen Netzanschlussleistung mit den Gegebenheiten der in Betracht kommenden Netzverknüpfungspunkte in der Umgebung. Grundsätzliche Konfigurationen für den Netzanschluss in Anlehnung an [1] sind in Abbildung 9 dargestellt.



Quelle 1

ABBILDUNG 9: MÖGLICHE NETZANSCHLUSSKONFIGURATIONEN FÜR LADE-HUBS

Quelle: Siehe [1]



— Hochspannung (110 kV)    — Sammelschiene    Transformator    Leistungsangaben sind nicht verallgemeinerbare Richtwerte für die Bewertung der Prototypen im Rahmen der Studie.  
— Mittelspannung (10–30 kV)    — Kabel/Freileitung    bereits vorhanden

\* Grundlage für die Investitionen und die Realisationszeit ist die Berechnung im Anhang (siehe Seite 59).

Einschränkend muss betont werden, dass die in Abbildung 9 angedeuteten Leistungen, die durch einen Anschluss bereitgestellt werden können, sowie die Realisationszeiten sich für individuelle Standorte extrem unterscheiden. In Deutschland werden je nach Region MS-Netze mit 10 kV und 20 kV betrieben. Die Übertragungskapazität beträgt im ersten Fall lediglich die Hälfte. Auch der Abstand zum Umspannwerk, d. h. die Länge der Kabel einschließlich aller Umwege, beeinflusst die realistisch übertragbare Leistung. Letztlich variiert die Vorbelastung von MS-Ringen. Es wird regelmäßig vorkommen, dass sich selbst vergleichsweise geringe zusätzliche Lasten nicht mehr in bestehende Netze integrieren lassen. Hieraus kann entweder ein zusätzlicher Verstärkungsbedarf in der überlagerten Netzebene oder die Wahl einer höheren Anschlussebene resultieren.

Abbildung 9 gibt zusätzlich einen groben Wertebereich für die notwendigen Investitionen zur Herstellung des Netzanschlusses an. Das Vorgehen zur Ermittlung dieser Werte findet sich im Anhang dieses Gutachtens. Die Investitionen werden i. d. R. jedoch nur z. T. durch den Anschlussnehmer getragen. Dieser ist für die Investitionen von Betriebsmitteln in seinem Eigentum verantwortlich. Zusätzlich kann er durch einen Baukostenzuschuss an den Investitionen des Netzbetreibers beteiligt werden. Aufwände für die Unterverteilung auf dem Lade-Hub sowie ggf. notwendige Erweiterungen höherer Netzebenen sind nicht enthalten.

Im vorigen Abschnitt wurde gezeigt, dass der Leistungsbedarf der prototypischen Lade-Hubs mit zunehmender Durchdringung mit BE-Nfz über die Jahre wächst. Daraus folgt, dass sich auch die geeignete Netzanschlusskonfiguration im Laufe der Zeit ändert. Das Prinzip veranschaulicht Abbildung 10.

01

02

03

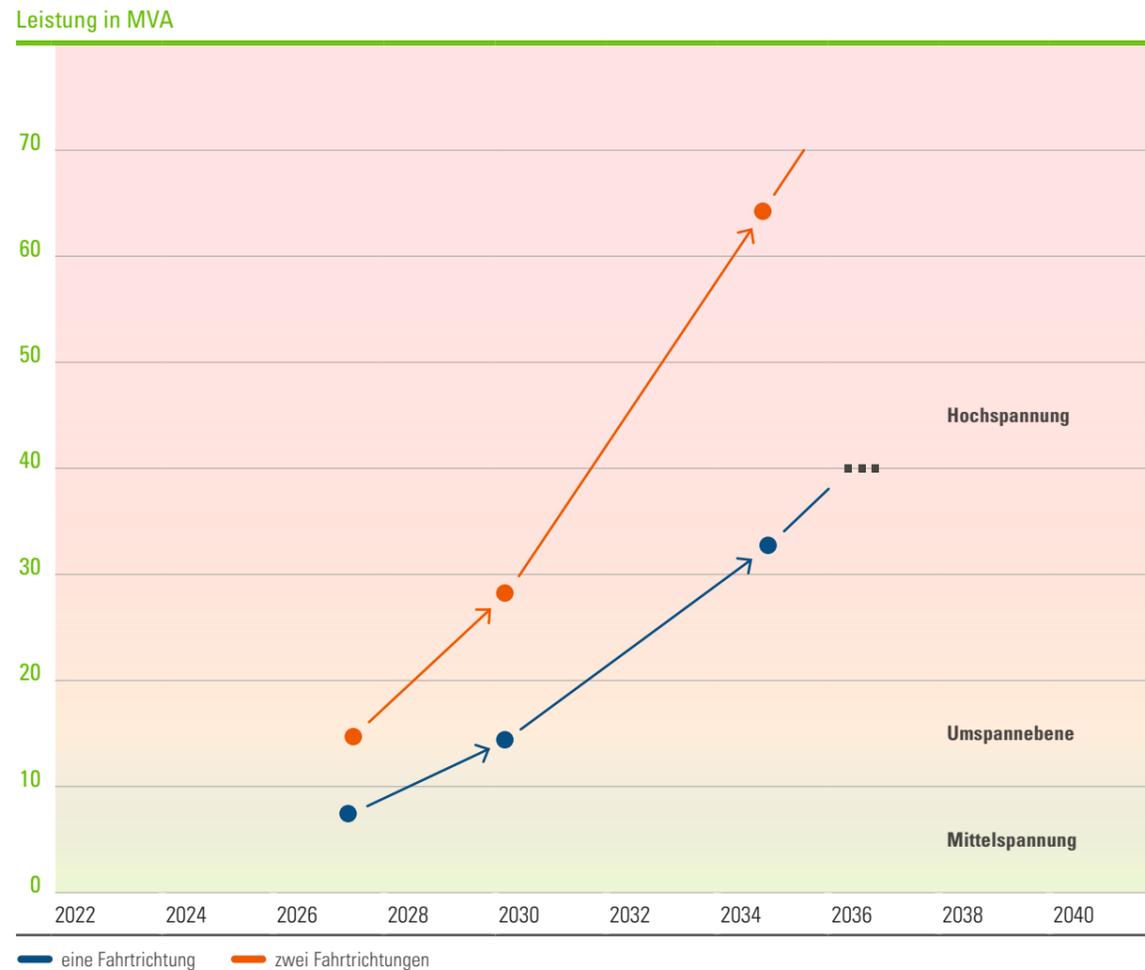
04

05

06

07

ABBILDUNG 10: PRINZIPIELLE DARSTELLUNG DER ERFORDERLICHEN NETZANSCHLUSSLEISTUNG FÜR PROTOTYP I ÜBER DIE ZEIT UND DIE DARAUS FOLGENDEN WECHSEL DER NETZANSCHLUSSEBENE



Damit ergeben sich zwei grundsätzliche Fragen:

- Lässt sich der Leistungsbedarf eines Lade-Hubs so beeinflussen, dass ein vorhandener Netzanschlusspunkt mit begrenzter Kapazität (länger) genutzt werden kann? (Dazu siehe nächsten Abschnitt.)
- Ist ein inkrementeller Ausbau des Netzanschlusses ggf. einschließlich eines Wechsels der Spannungsebene technisch und wirtschaftlich sinnvoll, oder sollte von vornherein der Zielzustand die Entwurfsgrundlage bilden?

In der Studie [1] wurde ermittelt, dass die Kosten für den Netzanschluss lediglich einen Bruchteil (Größenordnung 5 % bis 10 %) der spezifischen Kosten für die Bereitstellung der Ladeinfrastruktur darstellen. Den weitaus größten Teil repräsentieren die Ladepunkte auf dem Hub. An dem jeweiligen Standort scheint ein inkrementeller, bedarfsgemäßer Ausbau der Ladepunkte deshalb grundsätzlich denkbar. Die großen absoluten Investitionen beim Errichten von Netzanschlüssen sowie die komplexen und langwierigen Verfahren lassen ein derartiges Vorgehen auf der Netzseite dennoch wenig plausibel erscheinen. Das ist auch die Sicht der Netzbetreiber (siehe Abschnitt 5). Allerdings kann ein schrittweises Vorgehen aus zwei Gründen gerechtfertigt sein:

- Der Zeitraum, der für die Errichtung eines leistungsfähigen Anschlusses erforderlich ist, erzwingt auf kurze Frist temporäre Lösungen, um die erforderliche Infrastruktur überhaupt bereitzustellen.
- Die Unsicherheiten der mittelfristigen Entwicklung erlauben dem Errichter/Betreiber des Lade-Hubs nicht die substanziellen Vorabinvestitionen (z. B. Baukostenzuschuss bei der Errichtung eines HS-Anschlusses). Für die Finanzierbarkeit sind kalkulierbare Zahlungsflüsse und überschaubare Zwischenschritte Voraussetzung, auch wenn sie in der Summe über längere Zeit betrachtet höhere Aufwendungen nach sich ziehen.

In Bezug auf beide Gründe helfen verlässliche Prognosen zum Nutzeraufkommen, verbesserte Sicherheit bei Planung und Genehmigung sowie Abfederung von Finanzierungsrisiken, kurzfristige Zwischenschritte und deren Mehrkosten zu vermeiden. Solche flankierenden Maßnahmen erfordern ein Handeln auf politischer Ebene.



Quelle 1

## 4.2 Gestaltungsoptionen

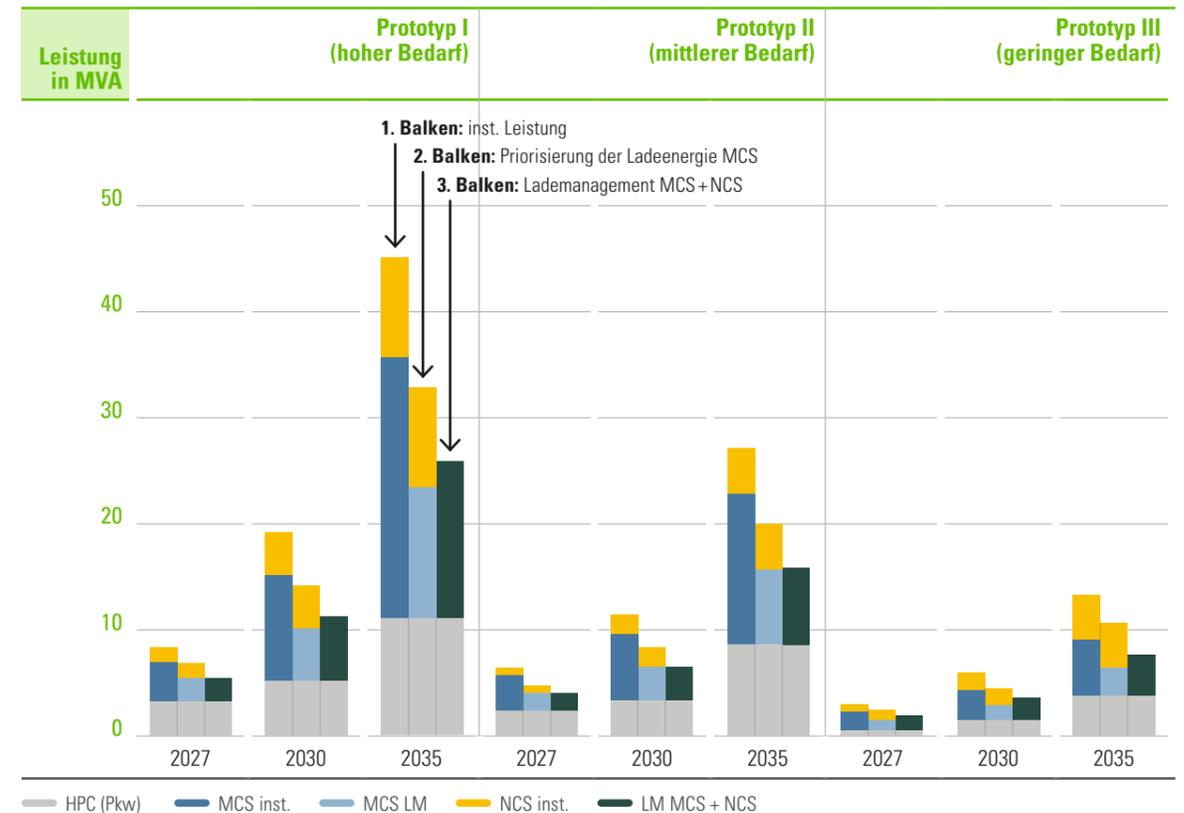
### 4.2.1 Maßnahmen zur Vermeidung von HS-Anschlüssen

In Abschnitt 4.1 wurde gezeigt, dass Lade-Hubs zumindest im Zuge des BE-Nfz-Markthochlaufs einen Anschluss an das HS-Netz erfordern können. Nur kleine, gering ausgelastete Ladepunkte an der Autobahn kommen potenziell auch langfristig mit einem MS-Anschluss aus. Es stellt sich daher die Frage, ob sich ein HS-Anschluss durch Maßnahmen des Lademanagements oder stationäre Pufferspeicher vermeiden lässt. Hierzu wurden zwei Strategien untersucht: Die erste ist der Einsatz von Lademanagement. Hierbei wird die notwendige Anschlussleistung durch eine zeitliche (und z. T. auch örtliche) Verschiebung der Ladevorgänge reduziert, ohne dass es dabei zu einer wesentlichen Reduktion des Serviceniveaus kommt. Als zweite Alternative wird der Einsatz von Pufferspeichern betrachtet.

#### Lademanagement

Innerhalb der MCS-Ladeinfrastruktur wurde im Rahmen der Modellierungen in Kapitel 2 bereits grundsätzlich ein Lademanagement innerhalb der MCS-Ladepunkte angenommen („Priorisierung der notwendigen Ladeenergie“). Ohne ein solches Lademanagement würden die erforderlichen Anschlussleistungen noch deutlich höher ausfallen. Dies verdeutlicht Abbildung 11: Hier sind die notwendigen Anschlussleistungen unter verschiedenen Stufen eines Lademanagements dargestellt. Der jeweils erste Balken einer Kombination von Szenario und Jahr repräsentiert den Leistungsbedarf, der aus der installierten Leistung der Ladeinfrastruktur hervorgeht. Der zweite Balken stellt den Leistungsbedarf dar, der aus der Priorisierung der Ladeenergie innerhalb der MCS-Lader resultiert. Dies stellt den Basis-Fall aus Kapitel 3 dar. Der dritte Balken stellt den Leistungsbedarf dar, der aus einem zusätzlichen Lademanagement zwischen MCS- und NCS-Infrastruktur hervorgeht. Hierbei werden die NCS-Ladevorgänge bei hohen Leistungsanforderungen der MCS-Lader reduziert. Durch die hohe zeitliche Flexibilität der NCS-Ladevorgänge verursachen diese dann keinen oder nur einen geringen Bedarf an zusätzlicher Netzanschlussleistung. Bezogen auf die Nfz-Ladeinfrastruktur kann hierdurch der Leistungsbedarf in etwa halbiert werden.

ABBILDUNG 11: EINFLUSS VERSCHIEDENER LADEMANAGEMENTANSÄTZE AUF DIE ERFORDERLICHE NETZANSCHLUSSKAPAZITÄT DER PROTOTYPISCHEN LADE-HUBS FÜR DIE VERSCHIEDENEN IN DEN SZENARIEN DEFINIERTEN ANFORDERUNGEN (AUSGEDRÜCKT IN ZIELJAHREN)



Die Ausweitung des Lademanagements auf die Pkw-Ladeinfrastruktur wurde in den Modellierungen nicht untersucht. Grundsätzlich nehmen die potenziellen Effizienzgewinne eines Lademanagements mit der Anzahl der Ladepunkte zu. Insofern ergibt sich die generelle Empfehlung, ein den gesamten Lade-Hub umfassendes Lademanagement zu organisieren, d. h. über beide Fahrbahnseiten und sowohl für Nfz als auch für Pkw. Dazu müssten voraussichtlich die Schnittstellen und Prozesse verschiedener Betreiber abgestimmt werden. Die erwartbaren wirtschaftlichen Vorteile dürften diesen Abgleich rechtfertigen. Aktuell steht dem jedoch zusätzlich entgegen, dass Netzbetreiber den einzelnen Anschlussnehmern eine Leistung zusichern, die nicht durch das Verhalten Dritter bedingt sein darf.

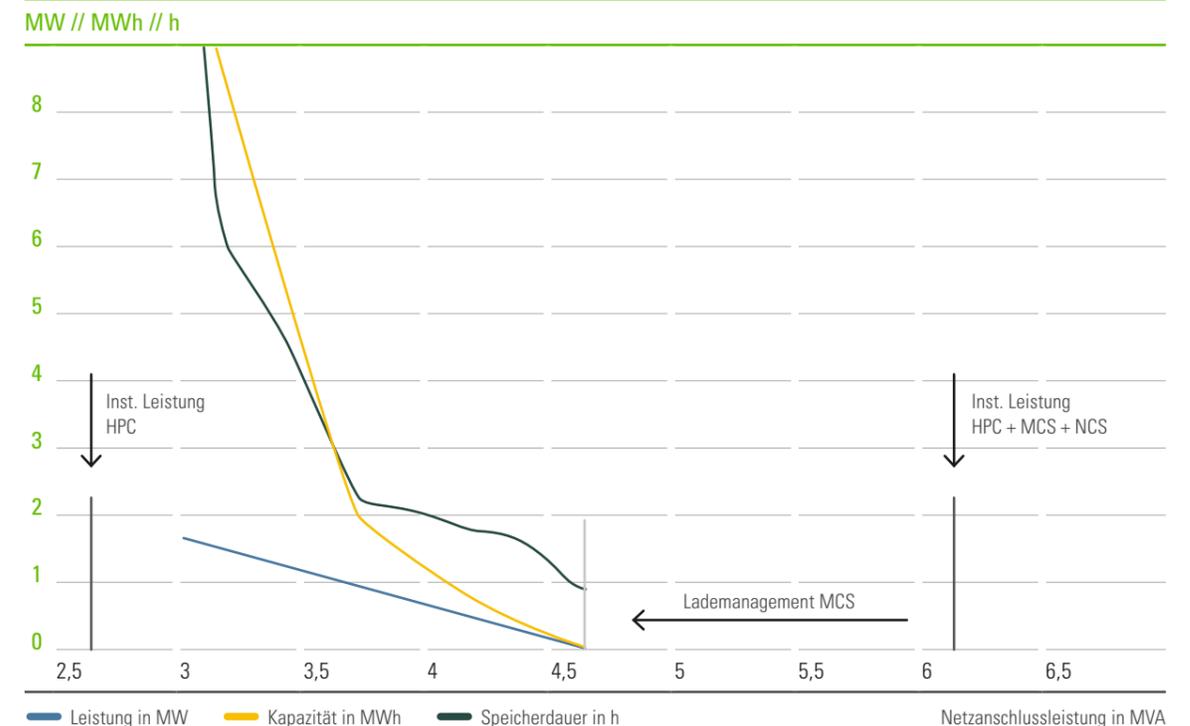
### Stationäre Pufferspeicher

Als Motivation für die Installation stationärer Pufferspeicher werden in der Literatur mögliche Reduktionen der Netzanschlussleistung und die wirtschaftliche Optimierung des Energiebezugs aus dem Netz angeführt. Hier wird nur auf das erste Motiv eingegangen. Allerdings ist auch in diesem Fall eine wirtschaftliche Optimierung Teil der Abwägungen, weil z. B. der Leistungsanteil der fälligen Netznutzungsentgelte für einen bestehenden Netzanschluss durch Pufferspeicher potenziell gesenkt werden kann. Für die hier betrachteten Lade-Hubs sind ausschließlich zentrale, vorzugsweise modular erweiterbare Pufferspeicher eine sinnvolle Option.<sup>6</sup>

Im Rahmen der Modellierungen wurde untersucht, inwiefern Speicher zur Begrenzung des Leistungsbezugs am Netzanschluss beitragen können. Dazu wurden entlang der Zeitreihen die Beiträge aus dem Pufferspeicher zu den Leistungsspitzen der Lader bewertet. Abbildung 12 zeigt exemplarisch die aggregierten Ergebnisse für Prototyp I und für die niedrigste angenommene BE-Nfz-Durchdringung (2027).

Die Grafik zeigt, dass durch das grundlegende MCS-Lademanagement bereits eine Absenkung der Leistung von ca. 6 MVA auf ca. 4,6 MVA gewährleistet wird. Um eine weitere Reduktion auf 4 MVA zu erreichen, wäre ein Pufferspeicher mit einer Leistung von 0,6 MW bei einer zugehörigen Speicherdauer von knapp 2 Stunden erforderlich (entspricht einer Kapazität von ca. 1,2 MWh). Eine darüber hinausgehende Absenkung der Leistung resultiert schnell in steil wachsende Anforderungen an die Speicherkapazität (Bereich der Netzanschlussleistung kleiner 3,7 MVA). Der Aufwand für die Speicherkapazität wächst im Verhältnis zur Absenkung der Netzanschlusskapazität somit überproportional.

ABBILDUNG 12: MÖGLICHE ABSENKUNG DER NETZANSCHLUSSLEISTUNG UND DAFÜR ERFORDERLICHE PARAMETER DER STATIONÄREN PUFFERSPEICHER, PROTOTYP I, ANFORDERUNGSPROFIL 2027



Für die anderen Prototypen und Zieljahre stellt sich das Bild bei abweichenden Parametern grundsätzlich ähnlich dar. Der Bereich, in dem Pufferspeicher mit vertretbarem Aufwand möglicherweise realistische, aber immer begrenzte Nutzeffekte eröffnen, ist sehr schmal. Damit ist die sinnvolle Auslegung und Anpassung der Speicher für eine konkrete Standortsituation eine schwierige Dimensionierungsaufgabe, bei der der wirtschaftlich sinnvolle Bereich leicht verfehlt wird. In der Hochlaufphase dürfte die Dimensionierung eines Speichers spätestens innerhalb von 3 Jahren hinfällig sein,<sup>7</sup> so dass Anpassungen erforderlich werden. Abgesehen davon sind die begrenzten Absenkungen des Leistungsbedarfs ungeeignet, den Ausbau des Netzanschlusses auf ein bedarfsgerechtes Niveau zu vermeiden.

<sup>6</sup> | Die Alternative wären dezentrale Pufferspeicher, die den einzelnen Ladepunkten fest zugeordnet sind. Diese Konfiguration erlaubt es aber nicht, die Synergien zu heben, die sich Ladepunkt-übergreifend erschließen lassen.

<sup>7</sup> | Im gezeigten Beispiel in Abbildung 12 ist eine Reduktion auf 4 MVA in 2030 technisch schon nicht mehr möglich – hier kann der Netzanschluss die benötigte Ladeenergie auch mit unbegrenzter Speicherkapazität nicht mehr bereitstellen, da der Netzanschluss selbst bei maximaler Auslastung die benötigte Energie nicht bereitstellen kann.

Geeignete Umstände vorausgesetzt, können stationäre Pufferspeicher eine sinnvolle Option im Umgang mit temporären Netzrestriktionen darstellen, indem sie helfen, Verzögerungen bei der Bereitstellung des Netzanschlusses zu überbrücken, wie sie sich z.B. durch langwierige Genehmigungsverfahren ergeben. Angesichts des zusätzlichen Platzbedarfs und der erforderlichen Investitionen in Gebäude/Einhausung und Infrastruktur liegt es allerdings nahe, diesen zeitweiligen Einsatz eher auf kleine Standorte und/oder frühe Phasen des Hochlaufs zu beschränken. Auch mobile Speicherlösungen, die nach ihrem Einsatz an einem Lade-Hub noch an anderen Standorten zum Einsatz kommen, sind dabei denkbar.

Darüber hinaus können die Speicher, wie auch beim Lademanagement, nur dann effizient genutzt werden, wenn ihre „Dienstleistung“ dem ganzen Lade-Hub zur Verfügung steht und nicht nur einzelnen Anschlussnehmern. Sollten MCS und NCS durch verschiedene Gesellschaften betrieben werden, muss die gemeinsame, abgestimmte Nutzung gesichert sein.

#### 4.2.2 Skalierung von Lade-Hubs

Es lassen sich zwei Strategien zur bedarfsgerechten Deckung des steigenden Bedarfs an Nfz-Lade-Hubs entlang der Hauptverkehrsachsen unterscheiden:<sup>8</sup>

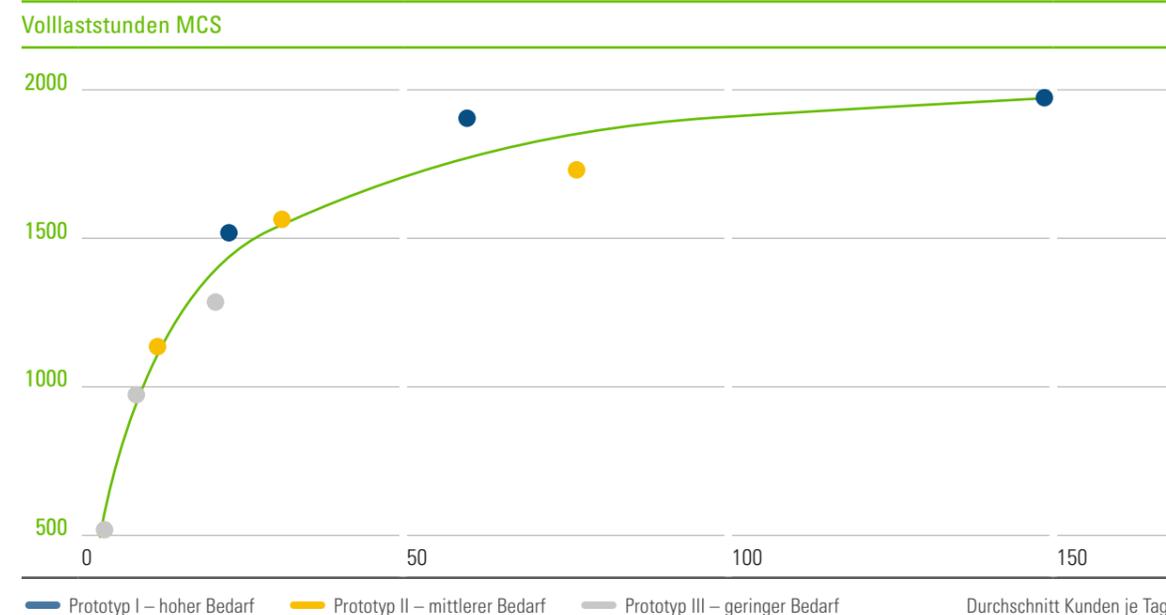
- Skalierung der Hub-Größe (wie in den bisherigen Analysen unterstellt)
- Skalierung der Hub-Dichte (viele mittelgroße statt wenige große Hubs)

Welche Strategie vorteilhaft ist, lässt sich nicht auf den Aspekt der notwendigen Netzinvestitionen begrenzen. In der Praxis werden Aspekte wie Platzverfügbarkeit, vorhandene Service-Infrastruktur, Entwicklung des Pkw-Aufkommens oder erwartbare Nfz-Auslastung eine bestimmende Rolle bei Investitionsentscheidungen und der Standortentwicklung spielen.

Da die spezifischen Kosten für die elektrische Infrastruktur bei hinreichender Auslastung weitgehend unabhängig von der Hub-Größe sind, gibt es keine grundsätzlichen monetären Argumente, eine Abwägung zwischen Hub-Größe und der Gestaltung des Netzanschlusses vorzunehmen. Einige netzseitige Faktoren, die eine sinnvolle Skalierung beeinflussen, können dennoch benannt werden.

Die Ladepunkte auf sehr kleinen Hubs mit einem geringen täglichen Kundenaufkommen erreichen nur eine niedrige Auslastung (siehe Abbildung 13).

ABBILDUNG 13: AUSLASTUNG DER MCS-INFRASTRUKTUR IN ABHÄNGIGKEIT VOM KUNDENAUFKOMMEN



Bezieht man in diese Überlegung auch die voraussichtlichen Kosten der MCS-Lader (siehe [1], ca. 300 €/kW) sowie weitere wirtschaftliche Parameter<sup>9</sup> ein, lassen sich hieraus die spezifischen Infrastrukturkosten berechnen, bezogen auf eine geladene Kilowattstunde. Abbildung 14 zeigt das Ergebnis dieser Betrachtung. Es wird deutlich, dass die geringe Auslastung unterhalb ca. 30 Kunden pro Tag sehr hohe spezifische Infrastrukturkosten zur Folge hat.



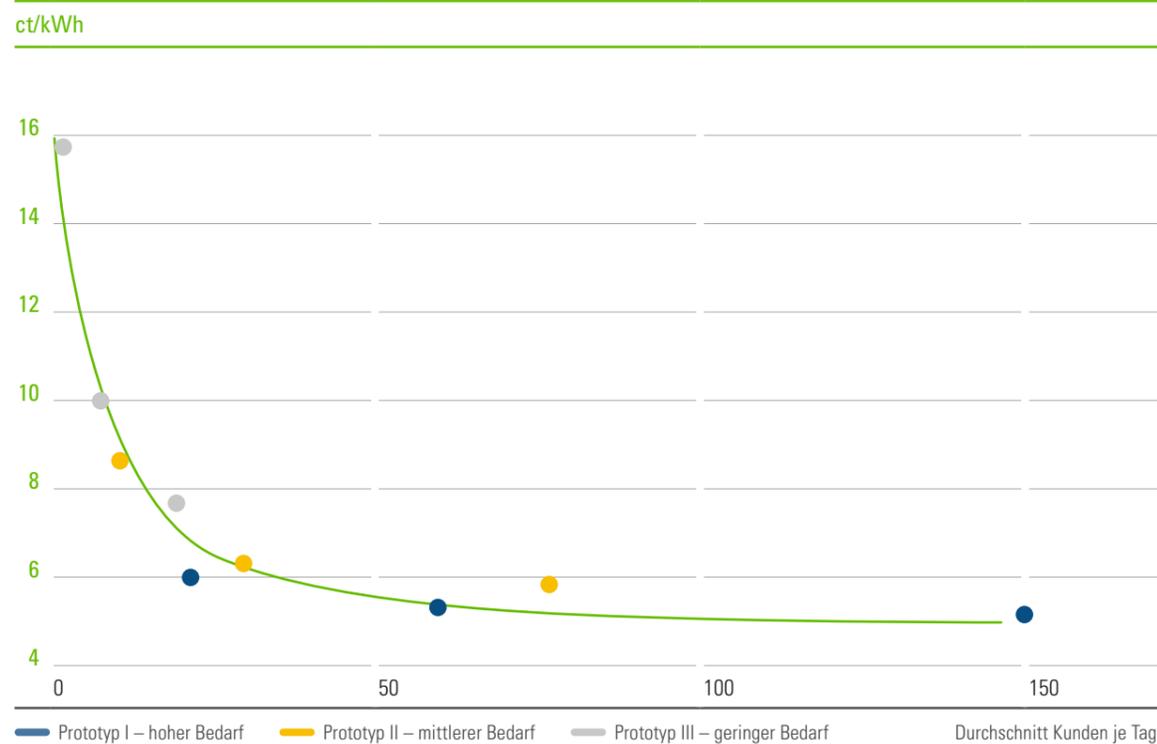
Quelle 1

<sup>8</sup> | Darüber hinaus hat das Ladeangebot an anderen Standorten jenseits der Autobahnen (Logistikzentren, Kundenstationen beim Güterumschlag) einen Einfluss auf die Mengengerüste. Wie bereits erwähnt, wurden derartige Wechselwirkungen in den Untersuchungen nicht adressiert.

<sup>9</sup> | Lebensdauer: 8 Jahre, OPEX: 1 %, Zins: 5 %. Die Betrachtung schließt die Investitionen in die benötigten MCS-Ladepunkte und deren Energieabsatz ein. NCS, HPC und die Kosten des Netzanschlusses werden nicht berücksichtigt.

Damit sind die spezifischen Abschreibungen für die Betriebsmittel hoch und das wirtschaftliche Ergebnis naheliegenderweise unbefriedigend. Daraus lässt sich das Streben ableiten, kleine Hubs zügig auszubauen und so weiterzuentwickeln, dass eine hinreichende Auslastung erreicht werden kann. Bis zu einem moderaten Auslastungsniveau des Hubs wird auch dann u. U. ein MS-Anschluss ausreichen, so dass Zusatzinvestitionen in den Netzanschluss nicht erforderlich werden.

ABBILDUNG 14: SPEZIFISCHE KOSTEN DER MCS-LADEINFRASTRUKTUR IN ABHÄNGIGKEIT VOM KUNDENAUFKOMMEN



Große, intensiv genutzte Lade-Hubs erfordern mittelfristig stets einen Anschluss an das HS-Netz. Da dies unumgänglich ist, können die erforderlichen Planungsschritte frühzeitig angestoßen werden. Ein HS-Anschluss erlaubt es, große Leistungsbedarfe zu bedienen, so dass die Hub-Größe aus netzseitigen Gründen in der Regel nicht begrenzt werden muss. Vielmehr besteht die Herausforderung in der Planungsphase darin, den Anschluss bedarfsgerecht zu dimensionieren.

Die zwischen diesen Extremen liegenden mittelgroßen Lade-Hubs mit einem moderaten Kundenaufkommen bedürfen einer Einzelfallbetrachtung. Grundsätzlich erbringt eine Steigerung des täglichen Kundenaufkommens auch hier noch eine nennenswerte Verbesserung der Auslastung der Betriebsmittel. Ob besser mehr Ladepunkte am Standort errichtet werden oder ob in näherem Umkreis weitere Ladepunkte an anderen Standorten angeboten werden sollten, hängt u. a. davon ab, ob durch das Wachstum ein (langfristiger) Übergang auf die höhere Netzebene erforderlich wird. Solange das vermieden werden kann, gibt es keine wirtschaftlichen Gründe, die Hub-Größe bei vorhandenem Bedarf zu begrenzen.

Eine flexible Abwägung von Hub-Größe und Hub-Dichte unter Abwägung der verschiedenen Faktoren wird möglich, wenn die Abstände zwischen den Standorten gering sind und mobile Buchungssysteme es den Fahrern ermöglichen, die Wartezeiten ohne Beeinträchtigung der Lenkzeiten und Erschöpfung der Akkuladung durch Ansteuern der vor ihnen liegenden Standorte zu optimieren. Die Bedeutung des Netzanschlusses und der damit verbundenen Aufwendungen spielt (eine rechtzeitige Planung vorausgesetzt) in einem solchen Szenario eine untergeordnete Rolle.

## 05

## Herausforderungen der Bereitstellung von Netzanschlüssen

Eine Kernfrage der Untersuchungen bestand darin, inwieweit die Verfahrensabläufe seitens der Entwickler und Betreiber von Ladeinfrastruktur mit denen der Netzbetreiber im Rahmen der Netzplanung abgestimmt werden können und sollten. Dazu wurde eine Reihe von Interviews mit Netzbetreibern durchgeführt.<sup>10</sup> Es wurde dabei sowohl mit Flächennetzbetreibern als auch mit Unternehmen mit eher städtischem Versorgungsgebiet gesprochen. Sie alle betreiben Netze bzw. Betriebsmittel von der Nieder- bis zur Hochspannung.

Die wesentlichen, übereinstimmenden Aussagen der Interviews lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der Einfluss von Ladeinfrastruktur für Nutzfahrzeuge wird bislang von keinem der interviewten Netzbetreiber in der eigenen Ausbauplanung berücksichtigt.
- Eine frühzeitige Planung ist wichtig, insbesondere wenn ein Anschluss an das HS-Netz erforderlich ist. Realistische Planungszeiträume für Leitungen betragen auf der HS-Ebene 10 Jahre und mehr, die für Umspannwerke 5 Jahre.
- Die Netzbetreiber sind bestrebt, in der Netzplanung langfristig vorzugehen. Insofern halten sie eine strategische Abstimmung von Netzausbauplänen und der Planung von Ladeinfrastruktur entlang der Hauptverkehrsachsen für sinnvoll. Eine detaillierte Zielnetzplanung ist allerdings nicht möglich, weil Standortentscheidungen für den VNB unbeeinflussbar bleiben. Der konkrete Standort ist entscheidend und wenige Kilometer Unterschied können eine Veränderung des geeigneten Netzverknüpfungspunktes und eine gänzlich andere Trassierung nach sich ziehen. Eine Verkürzung der erwähnten Planungszeiträume ist deshalb auch mit strategischen Planungsansätzen nur bedingt zu erreichen. Für die Planung und Genehmigung von Anschlüssen sind nicht die Bearbeitungszeiten der VNB bestimmend, sondern die jeweilige (nicht beeinflussbare) Verfahrensdauer bei den verschiedenen Genehmigungsbehörden.<sup>11</sup>

- Die städtischen Netzbetreiber sehen im Zusammenhang mit der Netzausbauplanung für Lade-Hubs weniger Herausforderungen als die Flächennetzbetreiber im ländlichen Raum. Das hat verschiedene Gründe. Die verfügbare Netzanschlusskapazität ist in den dichten urbanen Netzen regelmäßig höher, die Abstände zu geeigneten Netzverknüpfungspunkten sind kürzer, so dass auch für Netzausbaumaßnahmen kürzere Perioden anzusetzen sind, und die hier betrachteten Prototypen (Ladepunkte an der Autobahn) stellen im städtischen Raum auch perspektivisch die Ausnahme dar.
- Die aktuelle Anreizregulierung macht die regulierte Vergütung der Netzbetreiber vom Verhältnis zwischen der Versorgungsaufgabe und den entstehenden Kosten abhängig. Investitionen in Betriebsmittel, die nicht unmittelbar benötigt werden, können die regulierte Vergütung eines Netzbetreibers daher schmälern. Aus Sicht der Netzbetreiber kann die Vorratsplanung somit finanzielle Nachteile bedeuten. Die Schaffung zusätzlicher Netzkapazitäten an Standorten, an denen ein hoher Leistungsbedarf noch unsicher ist, kann für Netzbetreiber deshalb mit wirtschaftlichen Nachteilen verbunden sein.
- Neue 110-kV-Leitungen werden häufig als Erdkabel verlegt (§ 43h EnWG). Die Erfahrung lehrt allerdings, dass die damit erzielbaren Beschleunigungseffekte begrenzt sind. Darüber hinaus muss berücksichtigt werden, dass Erdkabel regelmäßig Umwege in der Trassenführung erfordern. (Letzteres gilt auch für die MS.)
- Anschlüsse auf der MS-Ebene dürften mit den in der Modellierung getroffenen Annahmen zu den maximalen Leistungen der Lade-Hubs regelmäßig nicht möglich sein. Einerseits sind die vorhandenen Netze vorbelastet. Pauschale Aussagen zu noch vorhandenen freien Kapazitäten sind angesichts der enormen Unterschiede zwischen den Standorten nicht möglich. Andererseits ist die übertragbare Leistung auch von der Entfernung zum nächsten Umspannwerk abhängig. Bei längeren Anbindungen sind demnach geringere Übertragungsleistungen zu erwarten. Dazu kommt, dass die MS-Netze einiger VNB nicht wie in der Modellierung mit 20 kV,

10 | E.ON edis gemeinsam mit Westnetz, Netze BW, Stromnetz Berlin, AVU Netz.

11 | Die in der VDE-AR-N 4110 beschriebenen Bearbeitungszeiten sind Richtwerte, die für Bezugsanlagen in der Nieder- und Mittelspannung typisch sind. (Die Fristen gelten nicht für EE-Anlagen.) Die Technischen Anschlussregeln (TAR) können Fristen allerdings nicht rechtlich verbindlich definieren. Verbindliche Fristen sind in der Netzanschlussverordnung (NAV) vorgegeben, die NAV gilt aber ausschließlich für die NS. Diese Netzebene ist im hier betrachteten Fall nicht relevant.

sondern mit 10 kV betrieben werden. In diesen Netzgebieten ist für die Kapazität der Betriebsmittel gegenüber den Ausführungen in Abschnitt 4.1 der halbe Wert sowie eine geringere tolerierbare Distanz anzusetzen.

- Eine Errichtung von zeitweiligen MS-Anschlüssen und ein späterer Rückbau, wenn ein HS-Anschluss erforderlich wird, werden durch die VNB als volkswirtschaftlich wenig sinnvoll gesehen. Die Vermeidung solcher „stranded investments“ erfordert daher eine langfristige und verkehrsmittelübergreifende (mindestens Nfz und Pkw) Planungsperspektive.
- Unter den gegenwärtigen Rahmenbedingungen kann ein Anschluss auf der HS-Ebene für den Lade-Hub-Betreiber gegenüber einem MS-Anschluss langfristig auch wirtschaftlich vorteilhaft sein. Während die vom Kunden zu erbringenden Baukostenzuschüsse in der HS höher sind, fallen auf der MS-Ebene dauerhaft deutlich höhere Netzentgelte an.
- Ein inkrementeller und unabgestimmter Ausbau von Lade-Hubs durch verschiedene Stakeholder erlaubt keine effiziente Planung durch den Netzbetreiber. Die Planung sollte gebündelt werden, andernfalls ergeben sich unnötig lange Zeiträume, vermeidbare Zwischenschritte und Mehrkosten. Eine solche Bündelung kann der Netzbetreiber nicht sicherstellen – sie ist eine politische Aufgabe. Die Netzbetreiber empfehlen, dass für jeden Standort ein Standortkonzeptverantwortlicher den Kontakt mit dem VNB unterhält und die Anliegen der auf dem Lade-Hub aktiven Akteure koordiniert vertritt. Dieser idealtypische Zustand ist nicht vollständig zu erreichen – je näher man ihm kommen kann, desto besser. Aus Netzbetreiber-sicht scheint es denkbar, dass ein lokaler Arealnetzbetreiber gegenüber dem Netzbetreiber als Vertragspartner auftritt und als Anbieter für die an dem Standort aktiven Akteure agiert. Ob die Akteure bereit sind, die damit verbundene Verlagerung des Risikos zu übernehmen, bleibt abzuwarten.
- Grundsätzlich ist es denkbar, dass der Anschluss (n-0)-sicher<sup>12</sup> ausgeführt wird. Dadurch lassen sich die Investitionen in Betriebsmittel senken bzw. höhere Leistungen erzielen als im (n-1)-sicheren Fall. Die Abwägung muss aber durch die Anschlusswilligen sehr sorgfältig getroffen werden.

Infolge regulärer Wartungsarbeiten ist mit wiederkehrenden Versorgungsunterbrechungen zu rechnen (jährlich 1 bis 2 Tage). Das hat nicht nur wirtschaftliche Auswirkungen für die Betreiber des Lade-Hubs, sondern auch Folgen für die gesichert verfügbare Dichte von Ladepunkten und die Wartezeiten entlang der Hauptverkehrsachsen und damit die Fahrzeugführerinnen und Fahrzeugführer.

- (Auch) aus Netzbetreibersicht ist eine Querung der Autobahn für einen beidseitigen Netzanschluss eine große genehmigungstechnische Herausforderung. Bei geeigneter Netztopologie können zwei separate Netzverknüpfungspunkte durchaus vorteilhaft sein.
- Anschlussnetzbetreiber ist immer zuerst der VNB, der im Versorgungsgebiet die Konzessionen hält. Betreibt dieser zuständige VNB ausschließlich MS-Netze, wird aber, wenn der Lade-Hub einen HS-Anschluss erfordert, das Anschlussbegehren an den überlagerten VNB weitergeleitet. Die Abstimmung sollte in der Regel reibungslos funktionieren. Ein Anschluss beim geografisch benachbarten Konzessionshalter ist nicht möglich, auch wenn dies einen günstigeren Anschluss verspräche.

12 | (n-0)-sicher bezeichnet in der Energietechnik einen nichtredundanten Anschluss. Betriebsmittelstörungen können dabei mit einem längerfristigen Ausfall (Stunden bis Tage) einhergehen. In der Regel werden Netzanschlüsse jedoch redundant bzw. (n-1)-sicher ausgelegt. Der Ausfall eines Betriebsmittels hat in diesem Fall keine Versorgungsunterbrechung zur Folge.

## 06

## Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

Aus den Ergebnissen lassen sich einige verallgemeinerbare Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen für die Fortentwicklung einer Ladeinfrastruktur für BE-Nfz entlang der Hauptverkehrsachsen ableiten.

### 6.1 Schlussfolgerungen

- Der Bedarf an Netzanschlüssen für Nutzfahrzeuge wird bislang von keinem der interviewten Netzbetreiber berücksichtigt. Angesichts der langen Realisationszeiten für Anschlüsse in der Hochspannung (bis zu 10 Jahre) sollten diese Netzanschlüsse schnellstmöglich in die Planung miteinbezogen werden.
- Ein standortübergreifendes Lademanagement ist immer sinnvoll. Insbesondere bei Kombinationen verschiedener Ladebedarfe (MCS-Laden vor allem tagsüber, NCS-Laden während der Nachtruhe) bieten sich Optimierungspotenziale, die eine substantielle Minderung der Netzanschlussleistung erlauben.
  - Angesichts der voraussichtlich dynamischen Entwicklung sowie der hohen Unsicherheit in der Bedarfsprognose bietet es sich jedoch an, das Potenzial des Lademanagements vor allem für die zeitweilige Überbrückung fehlender Netzkapazität zu nutzen.
- Ein Anschluss in der HS-Ebene kann selbst dann sinnvoll sein, wenn die im Planungshorizont erforderliche Leistung auch noch durch die Mittelspannung bereitgestellt werden könnte. Das gilt z. B., wenn ein HS-Anschluss in unmittelbarer Nähe vorhanden und die Errichtung eines Umspannwerkes ohne große genehmigungstechnische Hürden möglich ist.
- Speicher sind nur in Ausnahmefällen an kleinen Standorten und für eine begrenzte Dauer wirtschaftlich sinnvoll. Der Einsatz eines Lademanagements stellt i. d. R. die technisch-wirtschaftlich sinnvollere Alternative dar.
- Die entwickelten prototypischen Lade-Hubs decken nur den Bedarf unterwegs bzw. an der Autobahn ab. Der Gesamtbedarf wird auch beeinflusst von der Infrastruktur in den Depots und Umschlagzentren. Parallel zur In-

frastruktur entlang der Verkehrsachsen muss die Ladeinfrastruktur an Logistikknotenpunkten entwickelt werden.

### 6.2 Handlungsempfehlungen

- An Standorten mit einem hohen Bedarf an Ladeinfrastruktur wird mittelfristig ein Netzanschluss in der HS erforderlich sein. Angesichts der langen Planungs- und Genehmigungsdauern sollten für diese Standorte die dafür notwendigen Prozesse schnellstmöglich angestoßen werden.
- Eine koordinierte, auf den Zielbedarf ausgerichtete Planung und frühzeitige Abstimmung mit dem Netzbetreiber hilft allen Beteiligten, die Ladeinfrastruktur rechtzeitig und kosteneffizient zu errichten. Einige rechtliche Fragen sollten in diesem Zusammenhang frühzeitig berücksichtigt werden.
  - Fragen der effizienten und flexiblen Nutzung der Ladeinfrastruktur für BE-Nfz sollten bei der weiteren Ausgestaltung von § 14d EnWG („Netzausbaupläne“) oder ähnlich gelagerter rechtlicher Vorgaben ausdrücklich berücksichtigt werden.
  - Die Verteilnetzbetreiber sollten auf geeignete Weise (z. B. über ihre Branchenorganisationen) strategisch in die weitere Planung der Ladeinfrastruktur eingebunden werden. Sinnvoll scheint eine frühzeitige Vorsondierung einer möglichen Elektrifizierung potenzieller Autobahnstandorte. Ein erster Schritt seitens der Netzbetreiber kann hierbei bspw. eine Einschätzung der prinzipiellen Eignung existierender Rastanlagen zum Anschluss an das Hochspannungsnetz sein.
- Die Ergebnisse werden stark beeinflusst durch die Annahme, dass ein Umparken während der Lenkpause unmöglich ist. Wird eine Weitergabe des Laders an das nächste Fahrzeug während der Lenkpause ermöglicht, erhöht das die Flexibilität des Lademanagements und erlaubt bei gleichem Serviceniveau eine Reduktion der erforderlichen Netzanschlussleistung. Es sollte also untersucht werden, ob eine Weitergabe durch Anpassungen in der Fahrzeitenregulierung oder durch technische Maßnahmen (z. B. dynamische Zuweisung der Ladeleistung zwischen mehreren Ladepunkten, Laderoboter, autonomes Fahren) ermöglicht werden kann.

01

02

03

04

05

06

07

- Das Lademanagement sollte von Anfang an verbindlich Hub-übergreifend organisiert werden und alle Typen von Ladepunkten (Nfz: MCS, NCS; Pkw) einschließen. Andernfalls bleiben Synergiepotenziale unerschlossen. Das erfordert in erster Linie ein gegenüber der heutigen Praxis geändertes Vorgehen auf der institutionell-organisatorischen Ebene. Individuelle Netzanschlüsse werden seitens des Anschlussnetzbetreibers immer für eine gesicherte Leistung ausgelegt werden. Möglichkeiten für ein künftiges optimiertes Vorgehen bieten sich damit potenziell in zwei Richtungen, die der näheren Untersuchung – insbesondere der damit verbundenen rechtlichen Fragen – bedürfen:
  - Förderung und Anregung zu Konzepten mit standortbezogenen Arealnetzbetreibern, die zwischen Netzbetreiber und Anbietern am Standort vermittelnd agieren, sowie
  - flexiblere Gestaltung der Netzanschlussverträge für diesen speziellen Anwendungsfall, die es z. B. erlaubt, an einem Standort Kapazität an künftige Nutzer weiterzugeben und die Kosten zu wälzen.
- Leit- und Buchungssysteme beeinflussen die sinnvolle Skalierung (dichter gelegene mittlere oder wenige große Lade-Hubs). Diese zusätzliche Flexibilität in der Planung sollte frühzeitig berücksichtigt werden und integriert in die Planungen einfließen.
- Ein klares Infrastrukturkonzept gibt Netzbetreibern Sicherheit für eine langfristige Ausbauplanung.
- Gegenstand des Gutachtens sind Lade-Hubs entlang des Autobahnnetzes. Diese stellen nur einen Teil der benötigten Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Lkw dar. In Logistikzentren können ähnlich große Netzanschlussleistungen notwendig werden, die somit z. T. auch entsprechend hohe Investitionen und Realisationszeiten benötigen. Auch hier kann daher potenziell ein ähnlich hoher Handlungsdruck bestehen. Zudem besteht eine Wechselwirkung zwischen der Verfügbarkeit von „Depotladen“ und der notwendigen Ladeinfrastruktur im öffentlichen Raum, die in die Bedarfsplanung einbezogen werden sollte.



## 07

## Verzeichnisse und Anhang

### Quellenverzeichnis

- [1] K. Burges, S. Kippelt, „Grid-related challenges of high-power and megawatt charging stations for battery-electric long-haul trucks“, Study on behalf of Transport & Environment, 2021. Online verfügbar unter: [https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2022/01/2022\\_01\\_TE\\_grid\\_integration\\_long\\_haul\\_truck\\_charging\\_study\\_final.pdf](https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2022/01/2022_01_TE_grid_integration_long_haul_truck_charging_study_final.pdf).
- [2] Europäische Kommission, „Vorschlag für eine Verordnung des europäischen Parlaments und des Rates über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe“, 14.07.2021. Online verfügbar unter: [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:dbb134db-e575-11eb-a1a5-01aa75ed71a1.0008.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:dbb134db-e575-11eb-a1a5-01aa75ed71a1.0008.02/DOC_1&format=PDF).
- [3] Bundesamt für Straßenwesen, „Automatische Zählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen“, 01.06.2021. Online verfügbar unter: [https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/zaehl\\_node.html](https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/zaehl_node.html).
- [4] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, „Das Deutschlandnetz: Konzept der Ausschreibung von 1000 Schnellladestandorten auf Grundlage des Schnellladegesetzes“, 04.06.2021. Online verfügbar unter: [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/deutschlandnetz-schnellladestandorte.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/deutschlandnetz-schnellladestandorte.pdf?__blob=publicationFile).
- [5] ef.Ruhr GmbH, „Verteilnetzstudie für das Land Baden-Württemberg“, 2017, Studie für das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. Online verfügbar unter: <https://www.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/verteilnetzstudie-fuer-baden-wuerttemberg-veroeffentlicht-1/#:~:text=lm%20Auftrag%20des%20Ministeriums%20f%C3%BCr,der%20Verteilnetze%20im%20Land%20erstellt>.

### Abkürzungsverzeichnis

BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BE	batterieelektrisch
HPC	High Power Charging
HS	Hochspannung
kW	Kilowatt
LM	Lademanagement
LP	Ladepunkt
MCS	Megawatt Charging System
MS	Mittelspannung
MVA	Megavoltampere
MW	Megawatt
NCS	Night Charging System
Nfz	Nutzfahrzeuge
S	Scheinleistung
SoC	State of Charge
TEN-V	transeuropäische Verkehrsnetze
UW	Umspannwerk
VNB	Verteilnetzbetreiber

01

02

03

04

05

06

07

## Anhang

### Ermittlung des Ladeinfrastrukturbedarfs

#### Modellgrundlage

Der Ladebedarf von Elektrofahrzeugen ist so vielseitig wie die Menschen, die sie nutzen. Eine optimal geplante Ladeinfrastruktur muss sich deshalb an vielen Aspekten des Kunden- und Mobilitätsverhaltens orientieren. Dies beginnt etwa bei der Zielsetzung der Ladeinfrastruktur, die sich zwischen alleiniger Ladestromversorgung und Kunden-Incentive bewegen kann, der zu versorgenden Fahrzeugflotte und der verfügbaren Netzkapazität.

ABBILDUNG A-1: SKIZZE E.MISSION



Damit Ladeinfrastruktur optimal an die individuellen Bedürfnisse angepasst werden kann, hat die ef.Ruhr e.mission entwickelt. e.mission ist das digitale Abbild eines Lade-Hubs und bildet alle relevanten Vorgänge, wie Kundenverhalten, Ladevorgänge und Energiemanagement, ab. Dies beginnt bei der Zusammensetzung der Fahrzeugflotte und dem statistischen Mobilitätsverhalten. Zusätzlich werden kundenspezifische Faktoren wie eine begrenzte Wartebereitschaft sowie die minimale und maximale Aufenthaltsdauer in einem Warteschlangenmodell berücksichtigt. Anschließend werden die Ladevorgänge, auch in Abhängigkeit vom Ladezustand, abgebildet. Begleitet wird dies durch eine parallele Simulation des Energiemanagements. Bei begrenzten Netzkapazitäten werden Ladeleistungen reduziert, woraus sich wiederum Rückwirkungen auf die Warteschlangen und die Quote der versorgten Kunden ergeben können. Durch den Einsatz einer PV-Anlage oder eines Batteriespeichers kann hingegen die verfügbare Ladeleistung erhöht und der lokale Eigenverbrauch gesteigert werden. e.mission ermöglicht es hierdurch, das wirtschaftlichste Konzept für Ladeinfrastruktur zu ermitteln. Wichtige Fragen betreffen dabei die Anzahl und die Leistung von Ladepunkten, das Kosten-Nutzen-Verhältnis einer Erweiterung des Netzanschlusses, Nutzen und Notwendigkeit eines Lademanagements oder die optimale PV-Leistung.

In diesem komplexen Zusammenspiel ermittelt e.mission das optimale Ladeinfrastruktur-Konzept für Lade-Hubs.

e.mission wurde auch bereits für die Analyse von Ladeinfrastruktur für den Schwerlastverkehr eingesetzt. Dabei wurde die notwendige Anzahl und Leistung von MCS („Megawatt Charging System“) und Übernacht-Ladegelegenheiten dimensioniert und hinsichtlich der benötigten Netzinfrastruktur analysiert. Zusätzlich wurde untersucht, inwiefern sich die notwendige Netzanschlussleistung dauerhaft verringern lässt. Dazu wurde ein Lademanagement, insbesondere für die Übernacht-Ladegelegenheiten sowie den Einsatz von Batteriespeichern, analysiert.

## Modellierung von Mobilitätsverhalten und Ladebedarf

Die notwendige Ladeinfrastruktur eines Standortes wird primär durch das hier zu erwartende Aufkommen an E-Lkw mit Ladebedarf bestimmt. Zu Beginn der Modellierung wird daher ein Aufkommen von Fahrzeugen generiert, die am jeweils betrachteten Standort einen Ladebedarf aufweisen. Die Anzahl der täglich zu erwartenden E-Lkw ergibt sich dabei aus den Zählwerten des BAsT (siehe [3]), der Quote an E-Lkw im Lkw-Bestand sowie der Dichte des Lade-Hub-Netzes. Zusätzlich weisen nicht alle der so simulierten Lkw einen Ladebedarf auf (ein Teil der Lkw ist aufgrund des Verhältnisses zwischen unternommener Fahrstrecke und Reichweite nicht auf öffentliche Ladeinfrastruktur angewiesen und nutzen stattdessen Lademöglichkeiten am Streckenziel).



Quelle 3

Die zeitliche Verteilung ankommender E-Lkw im Tagesverlauf sowie die Verteilung des Ladebedarfs ist Ergebnis einer Modellierung des Mobilitätsverhaltens von E-Lkw. Eingangsdaten sind dabei die Abfahrtszeit, die unternommene Fahrstrecke und das Pausenverhalten. Eine detaillierte Beschreibung der Modellierung findet sich in einer Studie für Transport & Environment (siehe [1], Abschnitt 7.2). Diese Modellierung erlaubt es, ein stochastisches Kundenaufkommen für jeden der betrachteten Standorte zu simulieren.



Quelle 1

## Bestimmung der notwendigen Ladeinfrastruktur

Im nächsten Schritt wird analysiert, welche Ausstattung eines Lade-Hubs notwendig ist, um den so generierten Kundenstrom mit einem zufriedenstellenden Ergebnis bewältigen zu können. Hierzu wird eine Simulation einer gegebenen Ausstattung eines Lade-Hubs in Kombination mit dem zuvor ermittelten Kundenstrom durchgeführt. Abbildung A-2 zeigt das hierbei verwendete Vorgehen.

Ankommende Fahrzeuge prognostizieren anhand der ggf. bereits vorhandenen Warteschlangen die voraussichtliche Wartezeit sowie den für sie jeweils optimalen Ladepunkt (geringste Warte- und Ladezeit). Unterschreitet die prognostizierte Wartezeit eine maximal tolerierte Dauer, entscheidet sich das Fahrzeug zur Nutzung des Lade-Hubs. Andernfalls wird der Lade-Hub verlassen und das Fahrzeug für spätere Analysen als „verlorener“ Kunde gewertet.

ABBILDUNG A-2: VORGEHEN ZUR ERMITTLUNG DES LADEVERHALTENS  
E.MISSION – E-MOBILITY CHARGING INFRASTRUCTURE SIMULATION AND DIMENSIONING



Im hier simulierten Fall müssen die E-Lkw den Lade-Hub ungeachtet der Wartezeit nutzen, da es für sie keine (hier berücksichtigten) Alternativen gibt. Das Fahrzeug verbleibt somit im Warteschlangen-System, wird für die Auswertung aber als Kunde mit zu langer Wartezeit gewertet.

01

02

03

04

05

06

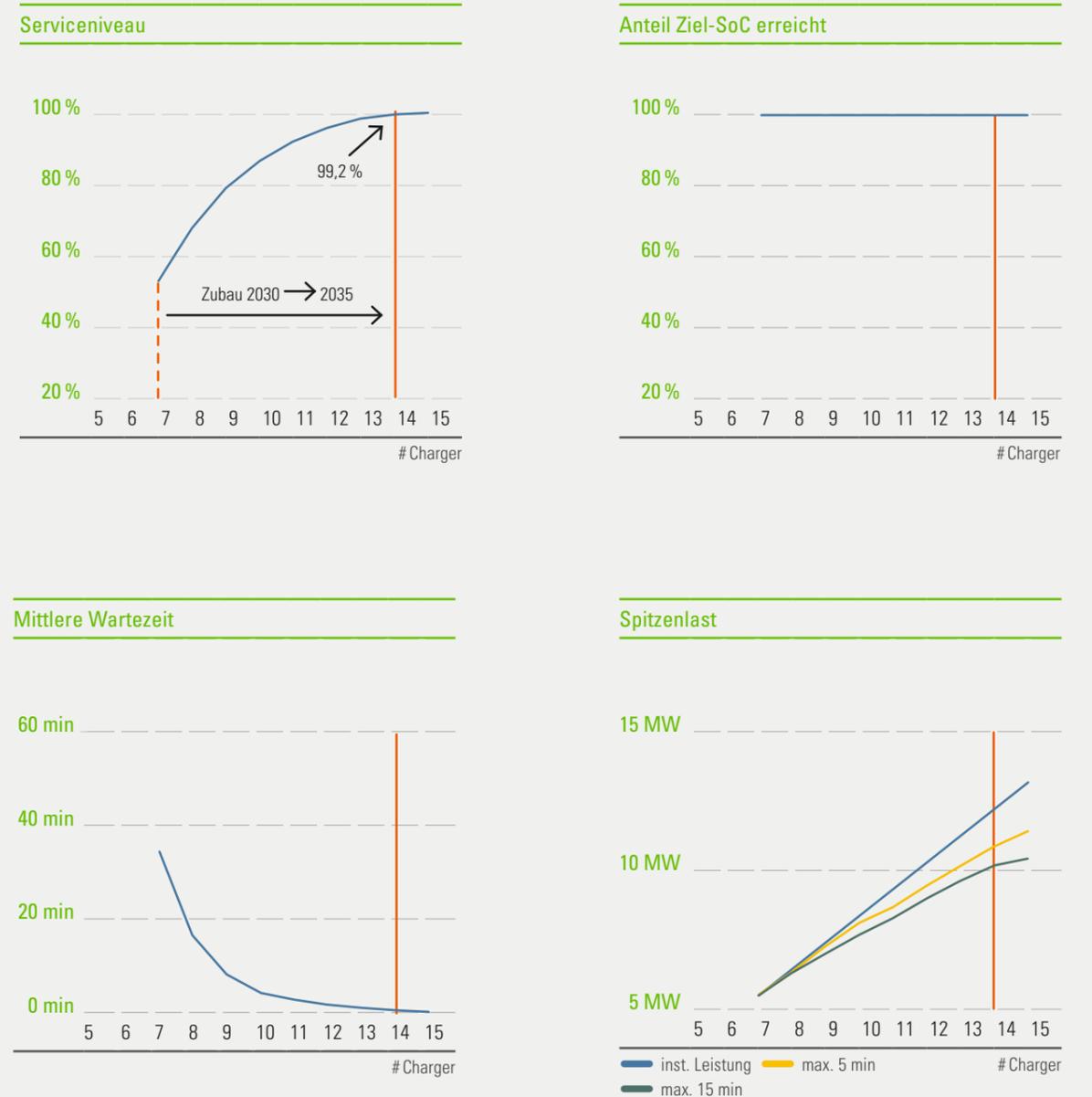
07 |

Anschließend werden die Ladevorgänge abgearbeitet. Kommt es dabei zu einer Überschreitung der vorhandenen Netzkapazität, wird die Leistung der Ladevorgänge reduziert. Für diese Untersuchung wurde der Mechanismus des Lademanagements so angepasst, dass hierbei Ladevorgänge priorisiert werden, bei denen die notwendige Ladeenergie (die Energie, die zum Erreichen des Streckenziels benötigt wird, inkl. 20 % Sicherheitsmarge) noch nicht erreicht wurde.

Mit dieser Methode werden alle Ladevorgänge im Verlauf eines Jahres und mit einer zeitlichen Auflösung von 5 min simuliert. Anschließend kann durch Betrachtung verschiedener Kenngrößen das Ladeergebnis bewertet werden. In dieser Untersuchung wird ein Serviceniveau von 95 % (= Anteil der E-Lkw, die innerhalb einer Wartezeit von 15 min mit dem Ladeprozess beginnen) angestrebt. Beim Einsatz von Lademanagement ist eine zusätzliche Zielgröße zu erfüllen: Bei mind. 95 % der Ladevorgänge muss der Ziel-SoC des Ladevorgangs innerhalb der Standzeit (MCS: 45 min, NCS: 9–11 h) erreicht werden.

Durch eine Variation der vorhandenen Anzahl von Ladepunkten kann nun analysiert werden, welche Anzahl von Ladepunkten die Qualitätsvorgaben des Lade-Hubs erfüllt. Abbildung A-3 verdeutlicht dieses Vorgehen am Beispiel des Prototyps II für das Jahr 2035: Im Jahr 2030 wurden zunächst 7 MCS-Ladepunkte installiert. Für die in 2035 erwarteten Kundenzahlen führt dies zu einem Serviceniveau von ca. 50 % (50 % der Kunden müssen länger als 15 min auf den Ladebeginn warten). Aus diesem Grund muss die Anzahl von Ladepunkten erhöht werden, bis das Serviceniveau 99 % überschreitet (14 Ladepunkte, orangefarbene Markierung).

ABBILDUNG A-3: ERMITTLUNG DER NOTWENDIGEN ANZAHL VON LADEPUNKTEN (PROTOTYP II, 2035)



01

02

03

04

05

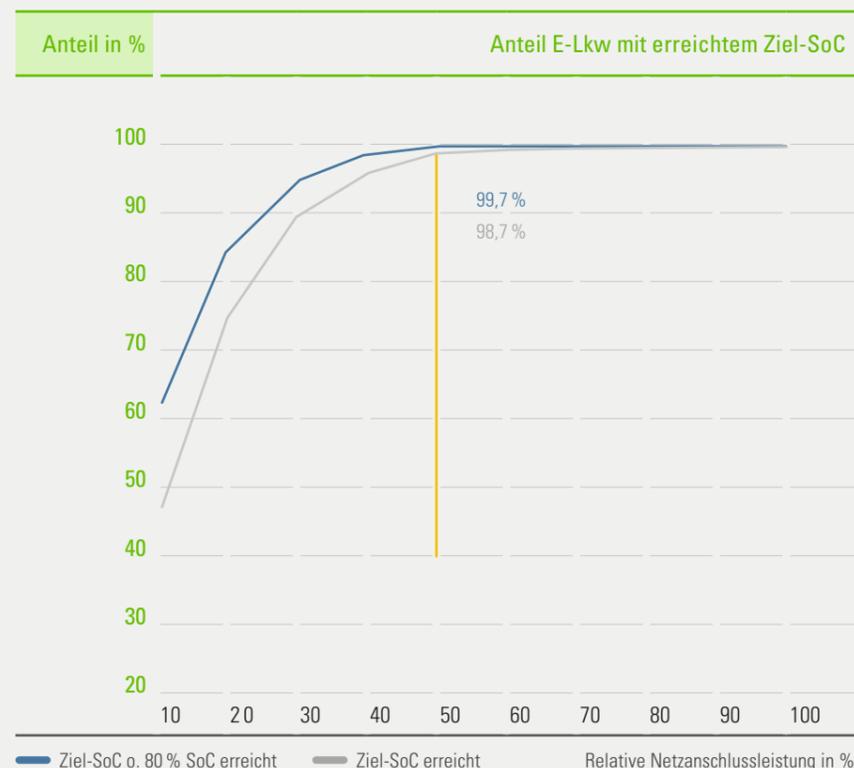
06

07

Für die MCS-Ladepunkte wird zusätzlich ermittelt, inwiefern sich deren Netzanschlussleistung reduzieren lässt, ohne dass es hierdurch zu einer Beeinträchtigung des Ladeergebnisses kommt (siehe Abbildung A-4). In diesem Beispiel kann die Anschlussleistung auf 50 % reduziert werden, ohne dass das Ladeergebnis wesentlich beeinträchtigt wird. In nur 1 % der Fälle kann der angestrebte SoC beim MCS-Laden nicht erreicht werden und nur in 0,3 % der Fälle liegt dieser Wert unter 80 % SoC.

Für die NCS-Infrastruktur wird ein anderes Vorgehen gewählt. Hier wird die Anzahl der Ladepunkte bereits durch die Quote der E-Lkw und der Liniendichte von Lkw-Stellplätzen vorgegeben. In Kapitel 4.2 („Gestaltungsoptionen“) wird jedoch das Potenzial eines gemeinsamen Lademanagements von MCS und NCS bewertet. Dies wird ermittelt, indem die verfügbare Netzkapazität für das NCS-Laden um die zeitgleich abgerufene MCS-Leistung reduziert wird.

ABBILDUNG A-4: ERMITTLUNG DER MÖGLICHEN QUOTE DES LADEMANAGEMENTS FÜR DAS MCS-LADEN („PRIORISIERUNG NOTWENDIGER LADEENERGIE“) (PROTOTYP II, 2035)



## Annahmen der Modellierung

Parameter	Wert
Anteil E-Lkw	7,5 % (2027) 20 % (2030) 50 % (2035)
Spezifikation E-Lkw	siehe Tabelle 1
Ladeleistung MCS	700 kW (2027) – 900 kW (ab 2030)
Ladeleistung NCS	100 kW
Ladeleistung HPC	200 kW (2027) – 350 kW (ab 2030)
Stationsabstand	100 km im TEN-V-Gesamtnetz, jedoch 60 km im TEN-V-Kernnetz
Wirkungsgrad Ladepunkte	95 %
Leistungsfaktor Ladepunkte	95 %
Tolerierte Wartezeit	15 min
Gefordertes Serviceniveau MCS (Anzahl Lkw mit Ladebeginn innerhalb der tolerierten Wartezeit)	> 99 %
Kundenzahl MCS	berechnet aus Zählung der BAST, der Dichte des Lade-Hub-Netzes sowie dem Anteil der auf MCS angewiesenen E-Lkw
Kundenzahl NCS	berechnet aus Quote an E-Lkw, Dichte des Hub-Netzes und heutiger Liniendichte von Stellplätzen am Autobahnnetz
Kosten für Netzinfrastruktur	siehe Tabelle A-1

## Kostenabschätzung Netzanschluss

Die Kosten für die Herstellung eines Netzanschlusses können auch bei gleichem Netzanschlusskonzept je nach den lokalen Gegebenheiten stark variieren und daher nicht pauschal angegeben werden. Wichtigen Einfluss auf die notwendigen Investitionen haben bspw.:

- die Distanz zum gewählten Netzverknüpfungspunkt
- konkrete Wahl des Netzanschlusskonzeptes (z. B. redundante Ausführung der ggf. benötigten HS/MS-Transformatoren)
- die spezifischen Kosten der Tiefbauarbeiten und Preise für Grund und Boden (z. B. städtisches vs. ländliches Umfeld)
- die spezifischen Kosten der Betriebsmittel



Quelle 5

Aus diesem Grund kann für die notwendigen Investitionen nur ein grober Wertebereich angegeben werden. Hierzu wurden die in [5] aufgeführten Kosten der einzelnen Betriebsmittel verwendet, zzgl. eines Aufschlags von 14,5 %, der allgemeinen Inflationsrate zwischen 2012 und 2021. Der Wertebereich basiert auf einer Variation der Anbindungslänge sowie einer redundanten vs. nichtredundanten Ausführung bei HS/MS-Transformatoren. Die folgende Grafik fasst die geschätzten Kosten für die in Abschnitt 4 vorgestellten Netzanschlusskonzepte zusammen.

Im Fall a) werden dabei Verbindungslängen zwischen 0,5 und 2 km, in den übrigen Fällen zwischen 2 und 10 km (HS: 15 km) angenommen. Die ermittelten Kosten beziehen sich lediglich auf den Netzanschluss (im Falle des HS-Anschlusses zzgl. der Umspannung auf MS-Niveau). Kosten für eine ggf. notwendige Verstärkung der übergeordneten Netzebene oder der Netzinfrastruktur für die lokale Verteilung auf dem Lade-Hub sind nicht enthalten.

TABELLE A-1: ABSCHÄTZUNG DER INVESTITIONEN FÜR DEN NETZANSCHLUSS

Anschlusskonzept		Geringe Kosten		Hohe Kosten	
Konzept a) MS-Ring	MS-Kabel	0,5 km	65.000 €	2 km	320.000 €
	Summe zzgl. Inflation		<b>70.525 €</b>		<b>347.200 €</b>
Konzept b) eigener MS-Abgang	MS-Kabel	2 km	260.000 €	10 km	1.600.000 €
	Abgangsfeld		90.000 €		90.000 €
	Summe zzgl. Inflation		<b>379.750 €</b>		<b>1.833.650 €</b>
Konzept c) eigener MS-Abgang mit Erweiterung des UW	MS-Kabel	2 km	260.000 €	10 km	1.600.000 €
	Abgangsfeld		90.000 €		90.000 €
	Zusätzlicher Transformator	1x	1.300.000 €	2x	2.600.000 €
	Summe zzgl. Inflation		<b>1.790.250 €</b>		<b>4.654.650 €</b>
Konzept d) HS-Anschluss	HS-Kabel	2 km	2.200.000 €	10 km	11.000.000 €
	Umspannwerk	1x	3.200.000 €	1x	3.200.000 €
	Zusätzlicher Transformator	–	– €	1x	1.300.000 €
	Summe zzgl. Inflation		<b>5.859.000 €</b>		<b>16.817.500 €</b>

Die notwendigen Investitionen werden, je nach Netzanschlusskonzept und Festlegung der Eigentumsgrenze, zum Teil vom Netzbetreiber und zum Teil vom Anschlussnehmer getragen. Zusätzlich wird der Anschlussnehmer i. d. R. durch einen Baukostenzuschuss an den Investitionen des Netzbetreibers beteiligt. Durch die hohe Lebens- bzw. Abschreibungsdauer der elektrischen Komponenten (von 25 bis über 40 Jahren) sind die hieraus hervorgehenden jährlichen Kosten des Netzanschlusses vergleichsweise gering (bspw. ggü. der Ladeinfrastruktur).

01

02

03

04

05

06

07

**IMPRESSUM****Herausgeber:**

Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur  
unter dem Dach der NOW GmbH, Fasanenstraße 5, 10623 Berlin  
ladeinfrastruktur@now-gmbh.de

**Gefördert durch:**

Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV)  
Invalidenstraße 44, 10115 Berlin

**Autoren:**

Dr.-Ing. Stefan Kippelt  
Felix Probst  
Dr.-Ing. Marco Greve  
ef.Ruhr GmbH, Emil-Figge-Straße 76, 44227 Dortmund  
www.efruhr.de  
info@efruhr.de



Dr.-Ing. Karsten Burges  
RE-xpertise, Bölschestraße 30, 12587 Berlin



**Gestaltung und Realisation:**  
waf.berlin

**Erscheinungsjahr:**  
09.2022

**Copyright:**  
Die Nutzungsrechte liegen – soweit nicht explizit genannt – bei der NOW GmbH und den Autoren.



Bundesministerium  
für Digitales  
und Verkehr



Die Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur wurde im Auftrag des BMDV und unter dem Dach der NOW GmbH gegründet.