

Potentialanalyse Synergieeffekte dynamischer und stationärer Ladesysteme entlang von Fernstraßen

Christian R. Hein¹, Dr.-Ing. Danny Wauri¹, Barbara Först, Alexander Hepp, Sahil Khan, Ingo Köhler, David Petermann, Ömer Turgut

¹ Autoren:

Christian R. Hein, e-netz-Südhessen - christian.hein@e-netz-suedhessen.de

Christian R. Hein, h-da Promotionszentrum Nachhaltigkeitswissenschaften - christian.b.hein@stud.h-da.de

Dr.-Ing. Danny Wauri Siemens Mobility - danny.wauri@siemens.com

Abstract

Die Verbreitung von Elektrofahrzeugen im Transportsektor wird zweifellos einen positiven Einfluss auf die Reduzierung verkehrsbedingter CO₂-Emissionen und den Übergang zu einem nachhaltigen Güterverkehr haben. Allerdings birgt eine Anpassung der Ladeinfrastrukturen an die steigende Nachfrage bei bislang fehlenden Netzkapazitäten Herausforderungen, insbesondere in der Planung von stationären Ladesystemen und der Auslegung batterieelektrischer Fahrzeuge. Eine Analyse der Herausforderungen ist unerlässlich, um innovative Lösungen zu entwickeln und die Integration von Elektrofahrzeugen im Transportsektor voranzutreiben. Es eröffnen sich wegweisende Möglichkeiten zur Reduktion verkehrsbedingter CO₂-Emissionen, wenn Lkw ihre Energiespeicher auch während der Fahrt laden können. Durch die Kombination dynamischer Ladesysteme mit stationären Ladesystemen werden auftretende Leistungsspitzen und fehlende Netzkapazitäten kompensiert und die Ladeleistung verteilt. Eine Kombination wird zur Entlastung stationärer Ladesysteme führen.

In diesem Artikel werden einige der zentralen Probleme im Zusammenhang mit stationären Ladesystemen, wie beispielsweise fehlende Stellplätze auf Park- und Rastanlagen sowie niedrige Netzkapazitäten entlang von Fernstraßen, untersucht und die einschlägigen Vorteile einer Kombination herausgestellt. Ziel ist es zu zeigen, wie es gelingt, den Aufbau und Betrieb von stationären Ladeinfrastrukturen durch die Integration dynamischer Ladeinfrastrukturen entscheidend zu verbessern. Dabei wird dargelegt, inwieweit das Ladeinfrastrukturnetz mit Blick auf den Flächenbedarf und mit Blick auf Netzanschlusskapazitäten im Verteilnetz entlastet werden kann.

Einleitung

Der Straßengüterverkehr ist für die meisten Volkswirtschaften unverzichtbar, verursacht gleichzeitig aber einen großen Teil der Treibhausgasemissionen und anderer Schadstoffe, die dem Güterverkehrssektor zugerechnet werden. Nach einer Studie der OECD hat das International Transport Forum eine Prognose zur Entwicklung des globalen Güterverkehrs herausgegeben, die eine etwa vierfache Zunahme des Straßengüterverkehrs von 6,4 Billionen tkm im Jahr 2010 auf 30,9 Billionen tkm im Jahr 2050 voraussagt. Unter der Annahme, dass konventionelle Lkw bis dahin noch immer die überwiegende Mehrheit der schweren Nutzfahrzeuge ausmachen, würde diese Zunahme mit einem Anstieg der CO₂-Emissionen um rund 300 % einhergehen [1], [2]. Auch in Deutschland hat das Güterverkehrsaufkommen in den letzten Jahren stetig und erheblich zugenommen. Betrachtungen gegenwärtiger Zahlen zur Entwicklung des Klimas und deren Ursachen zeigen, dass der Straßengüterverkehr für 35 %

der straßenverkehrsbedingten Treibhausgasemissionen und für mehr als 6 % der gesamten CO₂-Emissionen verantwortlich ist [3]. Trotz eines qualitativ und quantitativ überdurchschnittlich ausgebauten Schienennetzes und zahlreichen Bestrebungen, Transporte auf den Verkehrsträger Schiene zu verlagern, wird von einem kontinuierlichen Wachstum der Straßengüterverkehrsleistung ausgegangen. Der hohe und unentwegt steigende Beitrag schwerer Nutzfahrzeuge zu den Treibhausgasemissionen sowie die kaum nennenswerten Verlagerungen auf den Verkehrsträger Schiene erfordern eine rasche Umsetzung unterschiedlicher Maßnahmen, die einen weitgehend emissionsfreien und somit klimaverträglichen Straßengüterverkehr ermöglichen. Die zunehmende Verbreitung von Elektrofahrzeugen, auch im Schwerverkehrssektor, hat zweifellos einen positiven Einfluss auf die Reduzierung von CO₂-Emissionen und den Übergang zu einem nachhaltigen Güterverkehr [4].

Es sind Ladeinfrastrukturen anzupassen und zu errichten, um den steigenden Bedarf an effizienten und zuverlässigen Ladesystemen zu decken. So treten bereits bei der Planung stationärer Ladesysteme Probleme auf, die sowohl die Nutzererfahrung als auch die allgemeine Akzeptanz elektrischer Antriebe beeinflussen können. Es sind anfänglich fehlende Netzkapazitäten und ein stockender Ausbau dieser (beispielsweise bedingt durch Fachkräftemangel oder dem Mangel an Systemkomponenten) zu berücksichtigen. Eine Analyse dieser und weiterer Herausforderungen ist daher unerlässlich, um innovative Lösungen zu entwickeln und die Integration von Elektrofahrzeugen weiter voranzutreiben.

Mit dem Masterplan Ladeinfrastruktur II [5] entwickelte die Bundesregierung eine Gesamtstrategie für den vorauslaufenden Aufbau von flächendeckenden, bedarfsgerechten und nutzerfreundlichen stationären Ladeinfrastrukturen zur Minderung verkehrsbedingter Treibhausgasemissionen. Im Regional- und Fernverkehr gestaltet sich die erfolgreiche Umsetzung von batterie-elektrisch angetriebenen Lkw mit stationärer Ladeinfrastruktur aus einer Vielzahl von Gründen bisher als schwierig. So ist u. a. die Abhängigkeit von geopolitisch kritischen Rohstoffen nicht gelöst, die Reichweite der Fahrzeuge begrenzt, die operative Flexibilität durch Ladevorgänge eingeschränkt und der Aufbau der erforderlichen Infrastruktur durch den Bedarf an Flächen und Netzanschlussleistung gehemmt. Dazu kommt der im Vergleich zum konventionellen Verbrenner höhere Anschaffungspreis eines vollelektrischen Nutzfahrzeugs. Das Laden großer Energiespeicher gestaltet sich oft als schwierig und zeitaufwändig, da es in der Regel an stationären Ladestationen erfolgen muss [6]. Aufgrund der hohen Gesamtzahl zurückgelegter Strecken und den hohen Verkehrsleistungen im Regional- und Fernverkehr lassen sich erhebliche Emissionsminderungspotentiale erschließen, wenn Nutzfahrzeuge dynamisch elektrifiziert werden [7], [8]. Gleichzeitig soll die Attraktivität von Ladeinfrastrukturen als Geschäftsmodell gesteigert werden, um stärkere Investitionen der Privatwirtschaft zu mobilisieren. Die Flexibilität in der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und die Integration neuer Verbraucher sind entscheidende Elemente der Energiewende. Hohe Erzeugungspotentiale erneuerbarer Energien, hervorzuheben Photovoltaikanlagen, lassen sich vor allem in der Mittagszeit identifizieren.

Zentrales Verkehrsaufkommen an stark befahrenen Infrastrukturen ist ebenfalls in den Mittagszeiten zu belegen [9]. Um die Elektrifizierung des Verkehrssektors nachhaltig zu gestalten, ist eine koordinierte Entwicklung der Ladeinfrastruktur im Einklang mit den Anforderungen der Energiewende und den Fortschritten im Stromnetzausbau unabdingbar. Insbesondere das intelligente Laden¹ eröffnet Chancen, die Stromnetze effizienter zu nutzen und gleichzeitig Mehrwerte für die Nutzer zu generieren. Durch eine Kombination von dynamischen Ladesystemen mit stationären Ladesystemen, u. a. angepasst an die Lenk- und Ruhezeiten der Lkw-Fahrenden, können auftretende Leistungsspitzen und fehlende Netzkapazitäten kompensiert und die Ladeleistung lokal und temporal verteilt werden.

Das Prinzip des dynamischen Ladens beruht auf der Energieversorgung elektrisch angetriebener Lkw an einer Fahrleitung über dem rechten Fahrstreifen einer Fernstraße. Die zu errichtende Oberleitungsanlage kann ohne einen wesentlichen Eingriff in die bestehende Straßeninfrastruktur integriert werden. Die rein elektrischen (oder hybriden) Fahrzeuge (O-Lkw) sind neben einem Elektromotor (und Verbrennungsmotor) mit einem Energiespeicher und einem Stromabnehmer ausgestattet. Dieser ermöglicht es, elektrische Energie von der Oberleitungsanlage zum elektrischen Antriebssystem des Fahrzeugs zu übertragen [4]. Die O-Lkw können bei jeder Geschwindigkeit an die Fahrleitung an- und abbügeln, was die übliche Fahrflexibilität gewährleistet. Überholvorgänge sind somit auch problemlos möglich.

Dieser Artikel beleuchtet einige der zentralen Probleme in Zusammenhang mit stationären Ladesystemen und stellt die einschlägigen Vorteile einer Kombination von dynamischen und stationären Ladesystemen heraus. Ziel ist es, herauszuarbeiten, dass die Integration dynamischer Ladesysteme eine Erleichterung für stationäre Ladeinfrastruktur darstellt. Es wird dargestellt, inwieweit das Ladeinfrastrukturnetz mit Blick auf den Flächenbedarf und Netzanschlusskapazitäten im Verteilnetz entlastet werden kann. Im Vordergrund stehen Betrachtungen hinsichtlich der Planbarkeit des Gleichzeitigkeitsfaktors und zum Umgang mit Überkapazitäten aufgrund von Rückhaltekapazitäten. Zudem wird die Kompatibilität mit bestehender Stromnetz- und Straßeninfrastruktur in Zusammenhang mit einer den Anforderungen und der Nachfrage entsprechenden Ausbaugeschwindigkeit gestellt.

¹ Im Kontext der betrachtenden Szenarien im Rahmen der Studie ist hierbei das gezielte Ausgleichen von Überlastsituationen durch strategisches Steuern, sowohl mechanisch mittels Steuereinheit als auch administrativ mittels marktlichen Anreizen und Technologiekombinationen, gemeint.

Ausdrücklich findet hier keine Berücksichtigung von Bidirektionalen Laden und dem Rückspeisen von Energie in das vorgelagerte Mittelspannungsnetz statt.

Studien zur Netzintegration

Betrachtungen der Potentiale des Zusammenspiels dynamischer und stationärer Ladesysteme entlang von Fernstraßen in Abhängigkeit zukünftiger Entwicklungsstufen und Elektrifizierungsgrade schwerer Nutzfahrzeuge liegen national sowie international vor und zeigen die Potenziale einer Kombination beider Technologien auf.

Ein **Gutachten zum „Einfach Laden an Rastanlagen – Auslegung des Netzanschlusses für E-Lkw-Lade-Hubs“**, der Nationalen Leitstelle Ladeinfrastruktur analysiert die systematische Aufbereitung von Kriterien und Aspekten zur Auswahl, Bewertung und Planung von Ladestationen entlang des Autobahnnetzes für Lkw und Pkw. Es zeigt die Notwendigkeit auf, fossile Energieträger im Verkehrssektor durch klimafreundliche Alternativen zu ersetzen. Gerade für den Einsatz von batterieelektrischen Lkw im überregionalen Verkehr ist dabei der Aufbau einer bedarfsgerechten Ladeinfrastruktur unerlässlich, die in die Stromnetze integriert werden muss. Die forcierten Ladestationen bieten unterschiedliche Ladeinfrastrukturen für Pkw und Lkw. Das „Megawatt Charging System (MCS)“, das „Night Charging System (NCS)“ und ausschließlich für Pkw das „High Power Charging (HPC)“ sind an unterschiedlichen Standorttypen (Lade-Hubs) zu finden. Je nach benötigter Leistung und örtlichen Gegebenheiten werden verschiedene Netzanschlusskonfigurationen ermöglicht. Das Gutachten zeigt, dass insbesondere stark befahrene Strecken bis 2030 bzw. 2035 Hochspannungsnetzanschlüsse benötigen, während für den Großteil des Streckennetzes Mittelspannungsnetzanschlüsse bis 2035 ausreichen sollten [10].

Tabelle 1: Ermittelte Bedarf an Ladeinfrastruktur für Lade-Hub an internationale Infrastrukturachse (je Fahrtrichtung) [10]

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

² Der Gleichzeitigkeitsfaktor ist ein Richtwert für die Netzplanung. Er berücksichtigt, dass nie zeitgleich alle Verbrauch- oder Erzeugereinheiten mit voller Leistung in das Niederspannungsnetz beziehen oder einspeisen. Hierbei steht ein Gleichzeitigkeitsfaktor zw. 0,8 und 1 für ein hohes gleichgerichtetes Verhalten, wie es exemplarisch bei Photovoltaikanlagen entsteht, wenn die Sonne in einem Verteilnetzabschnitt scheint, da dann alle

So geht das Gutachten für einen Lade-Hub an einer internationalen Infrastrukturachse (Stationsabstand Ø60 km) von einer durchschnittlichen täglichen Anzahl von MCS-Kunden von 22 im Jahr 2027 bis 150 im Jahr 2035 (2027: max. 46 | 2035: max. 284) aus (bei Annahme 50 % elektrifizierter Fahrzeuge). Daraus resultiert eine Ladepunkt-Anzahl von 5 MCS (2027) bzw. 24 MCS (2035), einhergehend mit einer Netzanschlussleistung von 7,2 MVA (je Fahrtrichtung) im Jahr 2027 und 32 MVA im Jahr 2035. Der Leistungsbedarf steigt und entsprechend die notwendige Netzanschlussleistung[10].

Während der Hochlaufphase interagieren bedarfsorientierte Ladepunktauslegung und Ausbauplanung. Die Erweiterung von Lade-Hubs führt zu verdichteten Standorten, daher ist eine einfache Bedarfsextrapolation nicht ausreichend. Die Wirtschaftlichkeit der Lade-Hubs (hohe Auslastung) und Komfortexpectationen (Vermeidung von Wartezeiten und Ladedefiziten) sind entscheidende Kriterien für die Betreibenden von Nutzfahrzeugen. Kapazitätserweiterungen hängen davon ab. Zudem beeinflusst das Nutzerverhalten von Nutzfahrzeugen die Ladepunktzahl für MCS-Ladeinfrastruktur. Die Gesetzeslage erlaubt keine Fahrzeugverlagerung während der Lenkzeitunterbrechung, daher wird ein MCS-Ladepunkt immer für 45 Minuten belegt, unabhängig vom Energiebedarf [10]. Die erforderliche Netzanschlussleistung eines Lade-Hubs ist normalerweise geringer als die Gesamtleistung der angeschlossenen Ladepunkte. Entsprechend wird bei voller Auslastung der Stellplatzanzahl die Leistung an den Ladesäulen reduziert. Realistische Werte für die gleichzeitige Nutzung erfordern eine Zeitreihenanalyse. Es ist die Wechselwirkung zwischen den Ladepunkten für Elektrofahrzeuge (Lkw und Pkw) auf einem Lade-Hub zu berücksichtigen. Dies erfordert quantitative Annahmen über den Bedarf der Elektrofahrzeuge. Die hier beschriebene Kenngröße wird in der Netzplanung als Gleichzeitigkeitsfaktor² definiert.

Eine Studie zur **Entwicklung von Bedarfsfaktoren für Ladepunkte von Elektrofahrzeugen für unterschiedliche Ladeleistung und unterschiedliche Gebiete** (übersetzt a. d. engl.) modelliert Bedarfsfaktoren unter Berücksichtigung verschiedener Ladeleistungen und unterschiedlicher Anwendungsregionen (Fähigkeit zur strategischen Netzplanung).

Anlagen gleichzeitig Leistung erzeugen. Im Falle der Elektromobilität kann der Gleichzeitigkeitsfaktor entweder von einem Experten geschätzt werden oder anhand von Feldstudien oder tangierenden Langzeitdaten berechnet werden. Je besser der Gleichzeitigkeitsfaktor bestimmt werden kann, desto resilienter und ressourcenschonender kann die Netzplanung ausgelegt werden [11;12].

Die Studie bezieht sich einzig auf Ladestationen für Pkw. Eine Studie für schwere Nutzfahrzeuge ist aktuell vakant. Dabei ist der Bedarfsfaktor definiert als Zahlenwert oder das als Prozentsatz ausgedrückte Verhältnis zwischen der maximalen Nachfrage einer Anlage oder einer Gruppe von Anlagen innerhalb eines bestimmten Zeitraums und der entsprechenden Gesamtanschlussleistung der Anlage(n). Die Bedarfsfaktoren basieren auf Analysen zum Verkehrsverhalten der Verkehrsteilnehmenden und der Generierung von wöchentlichen Ladeprofilen [13].

Diese erfolgt in Abhängigkeit der verfügbaren Ladeleistung und der vorgegebenen Ladetypen sowie unter der Annahme, dass das Ladeverhalten chaotisch, zeit- und ortsabhängig ist. Die Bedarfsfaktoren bilden die Grundlage zur Entwicklung der Bedarfsfaktoren-Kurve und der anschließenden Implementierung eines Kurvenanpassungsalgorithmus für Ladeleistungen von 3,7 kW bis 350 kW mit einer Schrittweite von 1 kW. Ziel der Modellierung ist es, mittels der Bedarfsfaktoren-Kurve den entsprechenden Leistungsbedarf in Abhängigkeit der Nennladeleistung der Infrastruktur und dem spezifischen Netzgebiet zu berechnen. Der Fokus liegt nicht auf der Frage, wie viele Elektrofahrzeuge mit einer begrenzten Anzahl an Ladepunkten geladen werden können, sondern wie viele Ladepunkte gleichzeitig genutzt werden, wenn ein unbegrenzter Zugang zu Ladepunkten besteht [13].

Im Ergebnis sind die Bedarfsfaktoren-Werte für die Ladestationen mit 150 kW und 350 kW in allen Anwendungsgebieten nahezu gleich. Folglich können die Bedarfsfaktoren-Werte für Ladeleistungen ab 150 kW generell angewendet werden, ohne die explizite Ladeleistung oder das Anwendungsgebiet zu berücksichtigen. Im Falle kleinerer Ladeleistungen von 3,7 kW bis 11 kW zeigt die Bedarfsfaktoren-Kurve die Notwendigkeit der Implementierung von unterschiedlichen Bedarfsfaktoren, basierend auf dem Anwendungsraum. Abbildung 1 stellt die Bedarfsfaktoren-Kurve für unterschiedliche Leistungsbedürfnisse in Abhängigkeit der Ladepunkte in einer urbanen Region (mittelgroße Stadt) dar [13].

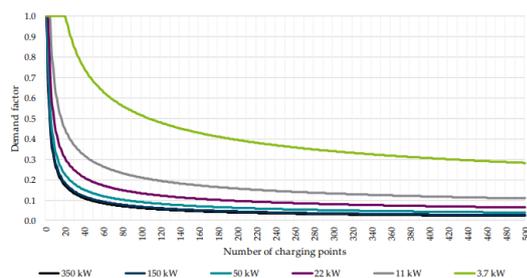


Abbildung 1: Bedarfsfaktoren-Kurve für unterschiedliche Leistungsbedürfnisse, Urbane Region: mittelgroße Stadt [13]

Die Bedarfsfaktoren-Kurve dient als praktische Überlegung im Rahmen der strategischen Netzplanung unter Berücksichtigung eines breiten Spektrums von Ladeleistungen zwischen 3,7 kW und 350 kW sowie der spezifischen Anwendungsgebiete. Die Bedarfsfaktoren-Kurven werden für bis zu 500 Ladepunkte abgebildet, können aber für größere Mengen an Ladepunkten angewendet werden und vereinfachen die Planungsprozesse [13].

Eine Studie über netztechnische Herausforderungen von Hochleistungs- und Megawatt-Ladestationen für batterieelektrische Langstrecken-Lkw (übersetzt a. d. engl.) betrachtet ebenfalls die drei Ladestationen MCS, NCS und HPC und adressiert dabei das Vorhaben, den zukünftigen Übergang zu batterieelektrischen Langstrecken-Lkw zu unterstützen. Auch hierbei werden stark frequentierte Strecken sowie weniger belastete Abschnitte betrachtet. Die Studie analysiert dabei verschiedene Durchdringungstiefen von batterieelektrischen Lkw über die Zeiträume 2027, 2030 und 2040. Abbildung 2 stellt die Durchdringungstiefen in Bezug zu den durchschnittlichen räumlichen Abständen der Ladeinfrastrukturen dar [14].

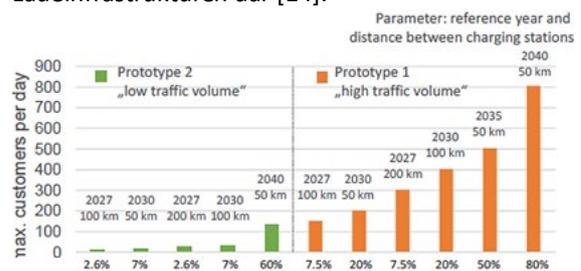


Abbildung 2: Maximales tägliches MCS-Kundenvolumen [14]

Die ermittelten Abstände ähneln den bisherigen durchschnittlichen Abständen der Tank- und Rastanlagen in Abhängigkeit der Verkehrsstärke auf dem Autobahnabschnitt. Auch hier werden bei den Ergebnissen die Zeiten für Nachtladesysteme durch die vorgeschriebenen Lenk- und Ruhezeiten bestimmt. Dabei konnten Synergieeffekte zwischen NCS und MCS identifiziert werden. Demnach benötigt es eine MCS-Ladestation für ca. 50 Kunden. Sofern die Anzahl der Kunden einen Wert >100 pro Tag übersteigt, steigt die Anzahl der NCS-Ladestationen proportional im Verhältnis 15:1 (in Abhängigkeit der Spitzenlast am Netzanschlusspunkt) [14].

Die Betrachtungen zeigen, dass auf Tank- und Rastanlagen der zukünftige Verkehr zahlreiche Ladestationen benötigen wird. Dies bestätigt eine Untersuchung elektrischer Autobahnen zur Beschleunigung und Optimierung des Einsatzes von Schnellladesystemen für emissionsfreien (Güter)Transport, bei der ein zukünftiger Bedarf von mehr als 20 MCS pro Standort vorhergesagt wird [15].

Ferner ist mit einem deutlichen Anstieg des Strombedarfs im Vergleich zur derzeitigen Nutzung zu rechnen. Die Ladestationen werden hohe elektrische Lasten verursachen, die die Kapazität der Netzan-schlüsse überschreiten könnten. Bis 2035 könnte der Strombedarf an Standorten für Lkw dem einer Kleinstadt entsprechen. Während sich im Bereich der leichten Nutzfahrzeuge zunächst die Lasten erhöhen, wird die Elektrifizierung der schweren Nutzfahrzeuge den Bedarf folglich mittel- bis langfristig stark ansteigen lassen [15]. Einer frühzeitigen Planung der Ladeinfrastrukturen, um die Bedürfnisse der kommenden Jahre zu erfüllen und Marktsicherheit für Hersteller und Flottenbetreiber zu schaffen, kommt dabei eine sehr hohe Bedeutung zu. Es ist zwingend erforderlich, frühzeitig geeignete Standorte auszuwählen und Anpassungen vorzunehmen, um die steigende Nachfrage nach geeigneten Ladestationen zu bewältigen.

Eine Studie des Fraunhofer ISI, des Öko-Instituts und des ifeu belegt dies. Demnach wird erwartet, dass alle 50 km eine Ladeinfrastruktur zur Verfügung steht. Dies betrifft auch Streckenabschnitte mit bestehendem dynamischen Ladesystem, so dass Fahrzeugen ohne entsprechenden Stromabnehmer die Möglichkeit zum Laden geboten wird. Ein Ausbau auf 2.000 km würde auf den ausgebauten Streckenabschnitten eine Reduktion der stationären Ladesysteme ermöglichen. Mit der Verbreitung batterieelektrischer Oberleitungs-Lkw können Oberleitungen noch gezielter positioniert und der Ausbau optimiert werden. Folglich reduziert sich das Hochleistungsnetz. Der Ausbau von 2.000 km Oberleitung würde zu einer Reduktion der Ladepunkte von bis zu 30 % führen [16].

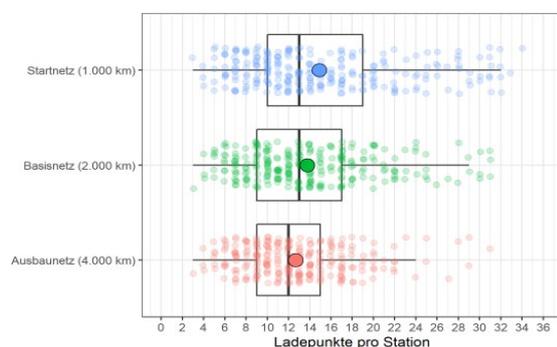


Abbildung 3: Ladepunkte pro Station bei verschiedenen Stufen des Oberleitungsnetzausbaus [16]

Um bis 2035 eine praxistaugliche Elektrifizierung des schweren Güterverkehrs zu ermöglichen, ist es sinnvoll, dass sich dynamische und stationäre Ladesysteme ergänzen, insbesondere auf hochfrequentierten Streckenabschnitten, auf denen ein hoher Energiebedarf und damit eine leistungsfähige Infrastruktur benötigt wird. Studien zeigen dies [16].

Modell Streckenabschnitt/Netzabschnitt

Um die Synergiepotentiale dynamischer und stationärer Ladeinfrastruktur aufzuzeigen, eignet sich eine explorative Szenariomethodik³ [17;18]. Mittels technischer Stammdaten der Oberleitungstechnologie und stationärer Ladesäulen sowie den Netzdaten werden realistische Netzintegrationsszenarien simuliert. Die Anwendung dieser Methodik kann einen signifikanten Beitrag zur Erweiterung der Fachexpertise im Mobilitätsbereich und planungspraktischen Relevanz für die Politik bieten. Im Vordergrund stehen Synergiebetrachtungen und Vergleiche energetischer Lastgänge im Tagesverlauf. Anhand von zwei Szenarien wird auf die bestehenden Netzanschlusspotentiale ein ausgewählter Streckenabschnitt bzw. Netzabschnitt aufgebaut und basierend darauf werden Hochlaufsznarien simuliert. Dabei wird zunächst der Streckenabschnitt durch ein reines Netz an stationären Ladeinfrastrukturen (**Basis-Szenario**) abgebildet. Anhand der gewonnenen Kennwerte wird in einem anschließenden **Synergie-Szenario** dieses Netz durch ein zusätzliches Netz aus dynamischer Ladeinfrastruktur erweitert. Dabei wird die Oberleitungstechnologie und die damit zusammenhängenden Netzurückwirkungen in den Netzabschnitt implementiert. Aufgrund der energietechnischen Verbindung der Oberleitung werden beide Fahrtrichtungen synchron evaluiert.

Für die Modellierung des Streckenabschnitts wird ein 100 km langer Autobahnabschnitt der A5/A67 herangezogen. Wesentlicher Auswahlsschwerpunkt ist, dass sich entlang des Streckenabschnitts mindestens zwei Tank- und Rastanlagen sowie mehrere Parkplätze befinden, die für eine mögliche Ausstattung von stationären Ladeinfrastrukturen in Betracht gezogen werden können. Die (verfügbare) Fläche der Tank- und Rastanlagen wird vernachlässigt. Die bestehende Oberleitungsanlage entlang der A5 wird mit integriert.

³ Als methodische Grundlage kommt hier die explorative Szenariomethodik zum Einsatz, die die Basis für eine Dialogplattform bildet, auf der die Synergiepotentiale zwischen dynamischem und stationärem Laden kritisch bewertet werden. Die explorative Szenariokonstruktion ist eine Methode der "Futures Studies", die darauf abzielt, verschiedene mögliche Zukunftsszenarien systematisch zu entwickeln. Hierbei können alle

Szenarien auf aktuelle reale nicht prognostizierte, sondern erhobene Primärdaten entlang der A5 zurückgreifen. Dies inkludiert eine integrative Auswertung von Messdaten auf der Verkehrsstrecke, den Subeinheiten der jeweiligen Ladeinfrastrukturen (stationär und dynamisch), den Parkplätzen, den Transformatorstationen und den vorgelagerten Mittelspannungsnetzen [17;18].

Der Streckenverlauf weist eine Längsneigung zwischen 0,2 % und 0,5 % auf. Wenngleich diese Längsneigung keine Begrenzung für das dynamische Ladesystem darstellt, ist sie für die nachfolgende Betrachtung als vernachlässigbar anzusehen. Basierend auf einer täglichen Verkehrsbelastung je Fahrtrichtung von 42.500 Kfz [19], werden die folgenden Eingangswerte zugrunde gelegt:

- 42.500 Kfz/t je Fahrtrichtung $\approx \varnothing$ 1.770 Kfz/h
 - \varnothing 2.400Kfz/h (06:00 Uhr – 21:00 Uhr)
 - \varnothing 500 Kfz/h (21:01 Uhr – 05:59 Uhr)

Für die Betrachtungen ist der Zeitraum zwischen 06:00 Uhr und 21:00 Uhr mit einer Verkehrsbelastung von 2.400 Kfz/h von Bedeutung. Bei einem Schwerververkehrsanteil von $b_{sv} = 15\%$ ergeben sich demnach stündlich etwa 360 Lkw/h. Der Anteil elektrischer Lkw beträgt 30 % \approx 108 e-Lkw/h. Der Anteil O-Lkw an e-Lkw wird auf 50 % festgesetzt.

Dies entspricht \approx 54 O-Lkw/h. Basierend auf diesen Werten kann ein mittlerer zeitlicher Abstand (Zeitlücke) der O-Lkw von etwa 60 s ermittelt werden. Bezogen auf einen jeweils 20 km langen Streckenabschnitt entspricht dies in etwa einem O-Lkw je Streckenkilometer Oberleitung und Fahrtrichtung. Die Durchschnittsgeschwindigkeit konventioneller Lkw und elektrischer Lkw (e-Lkw) beträgt 80 km/h. Die Durchschnittsgeschwindigkeit der O-Lkw liegt ebenfalls bei 80 km/h. Die mittlere batterieelektrische Reichweite der e-Lkw beträgt 320 km. Die O-Lkw verfügen über eine Leistungsaufnahme von 300 kW (Traktion und Laden) und über eine Batteriekapazität von 125 Ah, 1500 V – 187.5 kWh. Unter der Annahme eines Elektrifizierungsgrads der e-Lkw von 30 % des DTV_{SV} wird in Anlehnung an die Abbildung 1 ein durchschnittlicher Abstand der Ladeparks von 80 km angenommen.

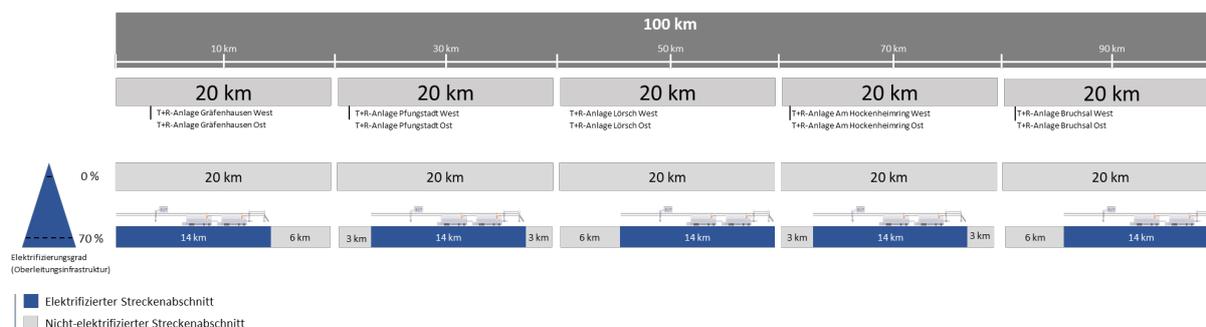


Abbildung 4: Veranschaulichung Elektrifizierung des Streckenabschnitts A5/A67 (Beispiel Elektrifizierungsgrad 70%)

Technikfolgeabschätzung im Fallbeispiel

Den Szenarien gehen grundlegende Annahmen voraus. Im Zuge des Masterplans Ladeinfrastruktur II wird eine umfangreiche Elektrifizierung des Mobilitätssektors angestrebt. Besonders hervorzuheben sind hier die Integration von großflächigen stationären Ladesäulen im Verteilnetz. Eine nicht intendierte Folge sind die umfangreichen Netzbelastungen und benötigten Ausbaupkapazitäten im Nieder- und Mittelspannungsnetz. Im Rahmen des Basis-Szenarios, werden hierfür die benötigten Lademöglichkeiten im zuvor dargelegten Korridor der A5 installiert. Hierfür wird dargestellt, wie viele Ladesäulen aus dem Masterplan Ladeinfrastruktur abzuleiten sind. Im folgenden Synergieszenario werden die mögliche Potenziale für eine Kombination des stationären und dynamischen Ladens evaluiert.

Basis-Szenario

Für das **Basis-Szenario**, bei dem der Anteil der dynamischen Ladesysteme Null ist (keine O-Lkw), werden unter Berücksichtigung der mittleren batterie-

elektrischen Reichweite der e-Lkw und dem Abstand der Ladeparks etwa 25 stationäre Ladestationen je Fahrtrichtung entlang des Streckenabschnitts erforderlich. Die Aufteilung auf den Tank- und Rastanlagen sowie auf den Parkplätzen erfolgt anhand verfügbarer Netzkapazitäten.

Insgesamt befinden sich in diesem Streckenabschnitt 50 Ladesäulen (25 je Fahrtrichtung) mit 300 kW Ladeleistung und einer fair Share Funktion, die in unmittelbarer Autobahnnähe zu implementieren sind. Nicht berücksichtigt sind Stellplatzblockierungen, ohne zu laden. Im ersten Schritt werden auf Basis der Geoinformationssysteme (GIS) die vorhandenen Netzanschlusskapazitäten im Mittelspannungsnetz an der Strecke bewertet. Dabei werden die Tank- und Rastanlagen sowie die Parkplätze, die bereits ausgebaut sind, genutzt und in den Abbildungen 5 bis 8 markiert.

Um bestehende Netzkapazitäten aufzuzeigen, wird zunächst der aktuelle Zustand in Form einer Heatmap entlang der Autobahn aufgearbeitet. Hierbei ist ausdrücklich darauf hinzuweisen, dass

Leistungsangaben zeitlichen Schwankungen unterliegend und somit innerhalb kürzester Zeit schon zu hoch dargestellt sein können. Vor allem durch die bereits ausgeschriebenen Ladestandorte im Pkw-Verkehr kann dies unmittelbar der Fall sein.

Verteilnetzbetreiber müssen im Rahmen der Bedarfsplanung in der Regulierung eine Prognose für etwaigen Netzausbau darlegen. Als Orientierungsrahmen kann hier die Niederspannungsanschlussverordnung dienen, da es in der Mittelspannung keine gesetzlichen Vorgaben gibt. Um Überkapazitäten zu vermeiden, werden Stromnetze in der Regel nur nach einem erfolgreichen Netzanschlussgesuch ausgebaut und die benötigten Netzkapazitäten und die tangierende Bedarfsplanung des Verteilnetzes in den Ausbauplan aufgenommen. Diese Anschlüsse werden dann wiederum gem. §17 EnWG angeschlossen. Aktuelle gesellschaftliche Hochlaufszenerarien finden hier keine unmittelbare Berücksichtigung, sondern erst in der jeweiligen nächsten Bedarfsplanung.

Die bestehenden Mittelspannungskapazitäten entlang der Autobahn werden durch die Ladeinfrastruktur der Pkw-Elektromobilität, wie auch für die Nachhaltigkeitsgestaltung von Industrieparks bereits eminent beansprucht. Diese These erhärtet sich, da die Ladeinfrastruktur für Nutzfahrzeuge noch in keiner Netzstudie ausreichend bewertet wurde. Aktuell befindet sich die strukturelle Integration von schweren Nutzfahrzeugen entlang der Autobahn, und hervorzuhebend die benötigten Netzkapazitäten zur Stromnetzintegration, noch in der Anfangsphase. Wie bereits im Masterplan Ladeinfrastruktur II erwähnt, möchte man mit bestehenden Potentialen möglichst ökonomisch, ökologisch und effizient die Elektrifizierung des Verkehrswesens vorantreiben. Im betrachteten Korridor wurden hierbei schrittweise bestehende Potentiale evaluiert und entlang der Autobahn und einem vorhandenen Parkplatz die 25 benötigten Ladesäulen platziert. Im Rahmen des Modells werden hier 15 MVA benötigte Anschlussleistung angesetzt. Daraus abzuleiten ist der Gleichzeitigkeitsfaktor von 1. Aufgrund der hohen Auslastung in Verbindung mit den aufgezeigten Fahrzeugparametern, aber auch der hohen Fahrleistung, ist im Rahmen des Szenarios kein niedrigerer Gleichzeitigkeitsfaktor realistisch, ohne eine etwaige Leistungsreduzierung je Ladepunkt in Betracht zu ziehen. In den Abbildungen 5 bis 8 werden keine Kreuzungspunkte mit bestehenden Mittelspannungsleitungen detailliert

gekennzeichnet. Jedoch werden bestehende Netzanschlusskapazitäten in Nähe der Autobahn je Sektor klassifiziert. Zudem wurde ein Ungenauigkeitsfaktor von 10 %, sowohl was die Höhe der Netzanschlusskapazitäten betrifft, als auch was den genauen Standort selbst angeht, in das Variantenmodell integriert. Die Abbildungen 5 bis 8 zeigen hier die normierten⁴ Anschlussleistungen je Netzabschnitt im Verhältnis zum Gesamtabschnitt. Im ersten zu betrachtenden Abschnitt sind hohe Anschlussleistungen verfügbar. Aus Gründen der Übersicht werden einzig die Raststätten und Parkplätze in Fahrtrichtung Nord dargestellt. Die benötigten Netzanschlusskapazitäten werden für beide Fahrtrichtungen bewertet. Eine hervorzuhebende Kritikalität in diesem Sektor sind etwaige Industrieparks in der Nähe, welche unter denselben Einspeisebereich fallen. Aufgrund dessen könnten sich aktuell noch verfügbare Reservekapazitäten in naher Zukunft reduzieren.

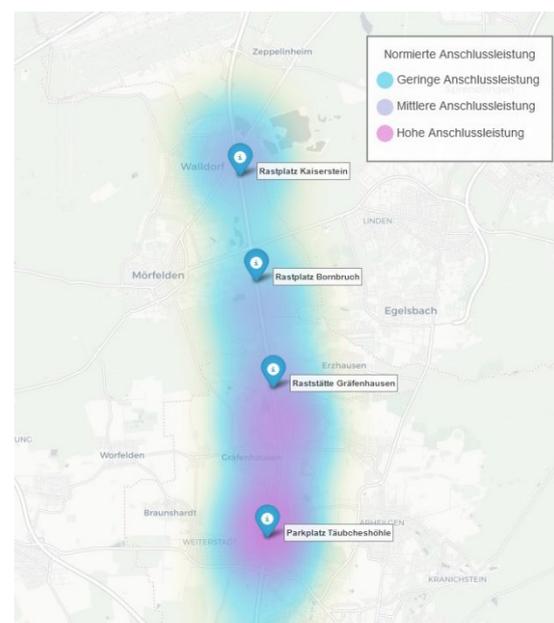


Abbildung 5: Abschnitt 1 mit normierten Mittelspannungsnetzanschlusskapazitäten (Darstellung e-netz Südhessen AG)

Die Standorte Kaiserstein, Steingrund und Bornbruch teilen sich hier die aktuell mögliche Anschlussleistung. Grundsätzlich kann hier jeder Netzverknüpfungspunkt bedarfsgerecht verstärkt werden. Als gemittelte zeitliche Planungsgröße können für eine Verstärkungen rund 2 Jahre Bauzeit angenommen werden [20;21].

⁴ Normierte Anschlussleistungen betrachten ausschließlich die Kapazitäten im Planungsbereich, ohne Bezug auf umliegende Kapazitäten.

Die Lokale Kapazität wird auf die gesamte Anschlussleistung entlang der Autobahn standardisiert.

Die hier angegebenen Planungsgrößen setzen sich aus Erfahrungswerten in der Planung und Durchführung von Netzausbauten im Verteilnetz zusammen. Grundsätzlich geben diese aber nur einen etwaigen Richtwert an, da die tatsächliche Bearbeitungszeit stark variieren kann. Faktoren, die einen Ausbau zeitlich beeinflussen, belaufen sich unter anderem auf Genehmigungen und behördliche Prozesse, Umwelteinflüsse, Standortbedingungen, technische Komplexität sowie den allgemeinen Projektumfang. Vor allem Planfeststellungs- oder Anzeigeverfahren mit allen dazugehörigen Prozessen stellen meist einen Großteil der tatsächlichen Durchführungszeit dar.

Die Stellplätze je Standort an den Rastplätzen Steingrund, Tank- und Rastanlagen Gräfenhausen West, Rastplatz Brühlgraben (Fahrtrichtung Süd), Rastplatz Kaiserstein, Tank- und Rastanlage Gräfenhausen Ost, Parkplatz Täubcheshöhle (Fahrtrichtung Nord) werden vernachlässigt, um zunächst isoliert die Netzanschlusskapazitäten zu betrachten.

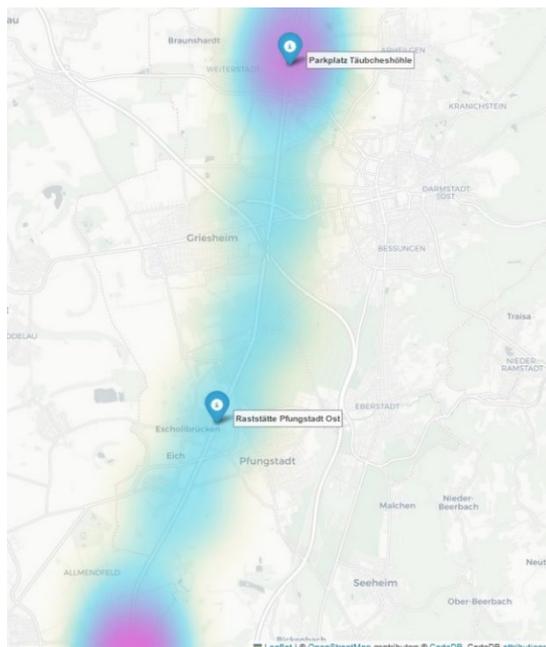


Abbildung 6: Abschnitt 2 mit normierten Mittelspannungsnetzanschlusskapazitäten (Darstellung e-netz Süd Hessen AG)

Wie aus dem in Abbildung 6 dargestellten Abschnitt hervorgeht, sind die Netzanschlusskapazitäten in der Mittelspannung bereits jetzt stark beansprucht. Historisch größere Verbraucher sind in diesem Bereich nicht vorhanden, weshalb ein Netzausbau nicht nötig war. Wie aus der Grafik hervorgeht, sind die Netzanschlusskapazitäten ein starker limitierender Faktor für die stationäre Elektrifizierung an den Parkplätzen Pfungstadt West und Ost. Um hier Netzanschlusskapazitäten zu erschließen, müsste die Energieinfrastruktur grundlegend erweitert werden. Hierfür müsste ein Umspannwerk und die

zugehörigen Anschlusskomponenten sowie etwaige Kabeltrassen integriert werden. Darüber hinaus muss neben einer Erweiterung der Kabel auch punktuell ein erweitertes Schaltfeld für die zugehörige Umspannanlage aufgebaut werden. Dies muss individuell geplant, sowie ausgebaut werden und kann mehrere Jahre in Anspruch nehmen [20;21].

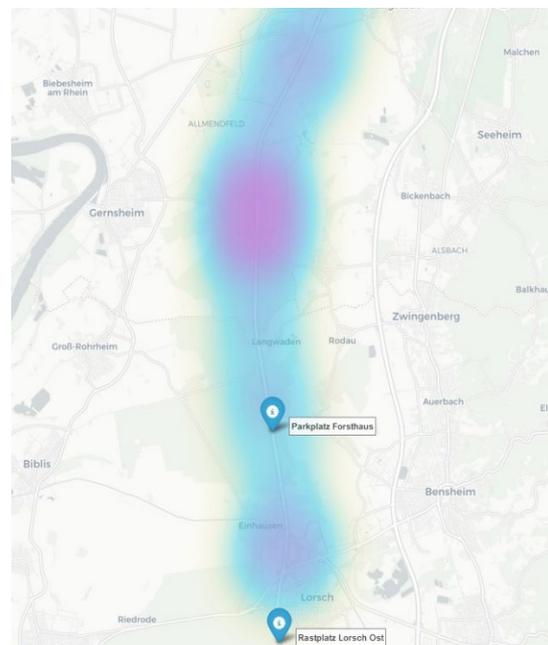


Abbildung 7: Abschnitt 3 mit Mittelspannungsnetzanschlusskapazitäten (Darstellung e-netz Süd Hessen AG)

Im dritten zu betrachtenden Sektor sind Kapazitäten auf der Höhe von Gernsheim und Lorsch vorhanden. Am Standort Gernsheim ergibt sich jedoch dasselbe Bedarfsszenario wie in der Nähe von Arheilgen. Bestehende Reservekapazitäten ergeben sich hier durch nahe gelegene Industrieparks. Zudem wird im Industriesektor ebenfalls eine umfangreiche Elektrifizierung angestrebt, was die aktuell verfügbaren Netzanschlusskapazitäten weiter reduzieren könnte. Nachdem im ersten Schritt die allgemein verfügbaren Netzkapazitäten betrachtet wurden, fand hierauf aufbauend eine partielle Analyse kleinerer Segmente statt. Wie dargestellt, werden hierzu die vorhandenen und benötigten Netzkapazitäten sowie nahegelegene Raststätten in Relation gesetzt, um eine effiziente und ideale Ausnutzung der vorhandenen Netzanschlusskapazitäten zu gewährleisten.

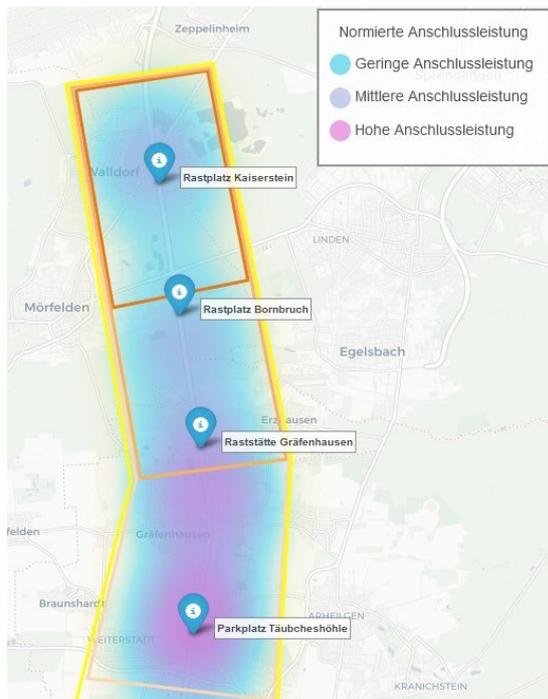


Abbildung 8: Abschnitt 1 mit Ladesäulen-Korridoren (Darstellung e-netz Süd Hessen AG)

Im Rahmen der Analyse wird von einer benötigten Anschlussleistung von 15 MVA ausgegangen. Aktuell ist eine Netzstudie zum Gleichzeitigkeitsfaktor bei Ladeinfrastruktur für Nutzfahrzeuge entlang der Autobahn vakant. Dies versucht der Abschnitt „Konzepte für zukünftige Netzintegration“ aufzulösen und ein signifikantes Desiderat im Rahmen der Energiewende zu schließen. Aufgrund der gesetzten Rahmenparameter wird von einem Gleichzeitigkeitsfaktor von 1 ausgegangen. Die vorhandenen Stellplätze wurden vernachlässigt. Relevant ist dies vor allem auf dem Parkplatz Täubcheshöhle, bei dem hohe Netzkapazitäten vorhanden sind, jedoch kaum nennenswerte Anzahl an Stellplätzen.

Bei systematischer Nutzung sämtlicher Netzanschlussreserven, werden die letzten der insgesamt 50 Ladesäulen mit einer jeweiligen Leistung von 300 kW in beiden Fahrrichtungen am Standort Forsthausen platziert. Die Analyse zeigt geringe bestehenden Anschlusskapazitäten. Verstärkt wird dieser Faktor, da die noch zur Verfügung stehenden Netzkapazitäten bereits durch die Wärmewende, Elektrifizierung im Industriesektor und stationäre Ladesäulen bei Pkw stark beansprucht werden. Der Schwerlasttransport hat hierbei noch einen zu geringen Stellenwert in der Berücksichtigung der Netzplanung. Prinzipiell sind für einen schnellen Ausbau große netzdienliche Energiespeicher an allen Raststätten zu platzieren, was den Kostenfaktor der Technologie eminent erhöht.

Synergie-Szenario

Nach Analyse des Streckenabschnitts durch ein reines Netz an stationären Ladeinfrastrukturen (Basis-Szenario) wird dieses durch ein Netz aus abschnittsweiser dynamischer Ladeinfrastruktur erweitert (vgl. Abbildung 4). Anschließend werden die damit zusammenhängenden Netzurückwirkungen in das Basis-Szenario betrachtet. Es werden beide Fahrrichtungen synchron evaluiert [22]. Im Vordergrund stehen Synergiebetrachtungen und Vergleiche energetischer Lastgänge im Tagesverlauf sowie Betrachtungen hinsichtlich der Planbarkeit des Gleichzeitigkeitsfaktors.

Der dazugehörigen Simulation liegen Rahmenbedingungen zugrunde. So verfügen die O-Lkw über eine Leistungsaufnahme von 300 kW (Traktion und Laden) und eine Batteriekapazität von 187,5 kWh. Bei einer Betriebsgeschwindigkeit von 80 km/h beträgt der maximale Ladestrom 208 A und der maximale Entladestrom 333,3 A. Zudem wird von einem Wirkungsgrad der Batterie von 98 % ausgegangen. Die Unterwerke werden durch ein AC Netz von 20 kV versorgt und weisen eine Nennspannung von DC 1500 V auf. Die Speiseart DC ist symmetrisch im Bereich +/-750 V gegen Erde.

Bei einer Nennspannung von 1500 V darf sich laut IEC 60850 das Spannungsband permanent innerhalb -30 % UN (1000 V) und +20 % UN (1800 V) bewegen. Bei Betrachtung der Stromtragfähigkeit der Kabel und Fahrleitungen existieren keine Normen. Sie werden spezifisch vom Hersteller angegeben. Für das dynamische Ladesystem ist die Stromtragfähigkeit der Oberleitungen jedoch maßgebend. Sie hängt von der Materialmischung und der Zusammensetzung des Kettenwerks ab. Zudem ist der Einfluss der Witterung zu berücksichtigen. An kalten und windigen Tagen sind die Oberleitungen belastbarer als an windstillen Sommertagen. Für letzteren Fall sind die Oberleitungen ausgelegt. Für die zugrundeliegende Simulation wird ein Leitermaterial RiM 0,5% 150 mm² and BzII 120 mm² – 888 A kontinuierlich bei 80 Grad Celsius, 20 % Abrieb angewendet. Demnach dürfen in der Simulation dauerhaft nicht mehr als 888 A fließen.

Für die Analyse wird der Streckenabschnitt unter der Prämisse eines Elektrifizierungsgrades der Strecke von 70 % betrachtet. Somit soll energietechnisch und wirtschaftlich eine möglichst effiziente Länge des elektrifizierten Streckenabschnitts ermittelt werden, um den Anforderungen aus den Anteilen an O-Lkw (Anteil O-Lkw an e-Lkw: 50 % \approx 54 O-Lkw/h, Zeitlücke 60 s) gerecht zu werden.

Ausgehend vom herangezogenen Streckenabschnitt beginnt in Fahrtrichtung Süden bei Betriebskilometer 504.2791 (erster Mast) die Oberleitungsinfrastruktur. Die effektive Ladestrecke der Infrastruktur beträgt 11,8 km. Basierend auf diesem Wert und der Annahme eines durchschnittlichen Elektrifizierungsgrades von 70 % der Strecke wird nach einem ca. 8 km langen nicht-elektrifizierten Streckenabschnitt erneut ein Oberleitungsabschnitt folgen. Dieser setzt auf Höhe der Tank- und Rastanlage Pfungstadt Ost/West auf der A67 an (Abbildung 9). Basierend auf den definierten Rahmenbedingungen ermittelt die Simulation einen maximale möglichen elektrifizierbaren Streckenabschnitt von 16,8 km.

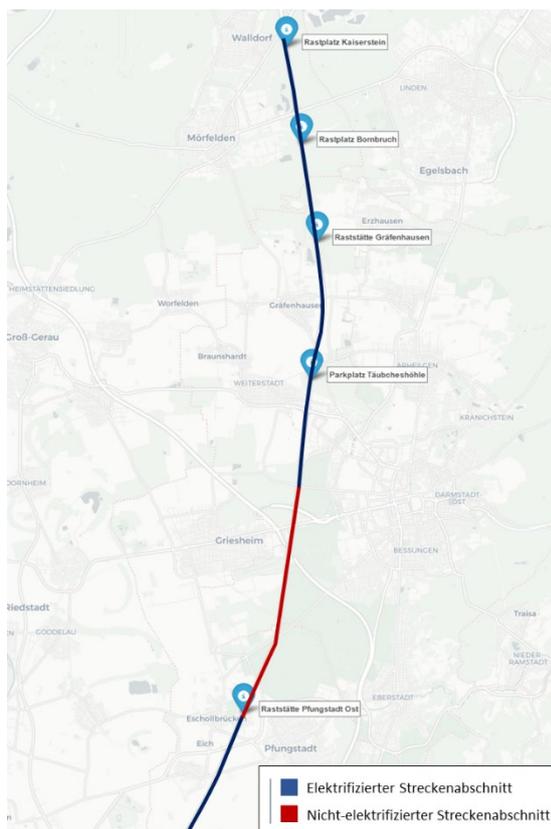


Abbildung 9: Streckenmodell bei 70 % Elektrifizierungsgrad des Streckenabschnitts (Darstellung Siemens Mobility)

Die Länge sowie die Anzahl der erforderlichen Unterwerke und zu bereitstellenden Leistung ermittelt sich aus der gestellten Verkehrsaufgabe in Anlehnung an den definierten Anteil O-Lkw.

Um ein möglichst realistisches Szenario abzubilden, werden drei Modi betrachtet.

- 1) Vier O-Lkw passieren gleichzeitig, mit einer durchschnittlichen Zeitlücke von 60 s, den Messquerschnitt.
- 2) Jeder O-Lkw passiert im gleichen Abstand, d.h. einer Zeitlücke von 60 s, den Messquerschnitt entlang der Oberleitungsinfrastruktur.
- 3) Die O-Lkw passieren nach dem Zufallsprinzip den gleichen Messquerschnitt entlang der Oberleitungsinfrastruktur, jedoch mit einer durchschnittlichen Zeitlücke von 60 s.

Hierbei wird Modi 3 als das realistischste Szenario angesehen. Um die O-Lkw realitätsnah abzubilden, sind dem Simulationsmodell zum einen geschwindigkeitsabhängige Traktionsleistungen hinterlegt, zum anderen spannungsabhängige Traktionsleistungen (Abbildung 10). Die Traktionsleistungen werden als spannungsabhängige Strombegrenzung implementiert. Für Obussysteme ist dies in der EN 50388 Kapitel 7.2 genormt, für dynamische Ladesysteme existiert diese Normung bisher nicht. Allerdings ist diese zum aktuellen Zeitpunkt bei der Deutsche[n] Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (DKE) im Arbeitskreis 351.1.13 Elektrische Straßensysteme in Erarbeitung.

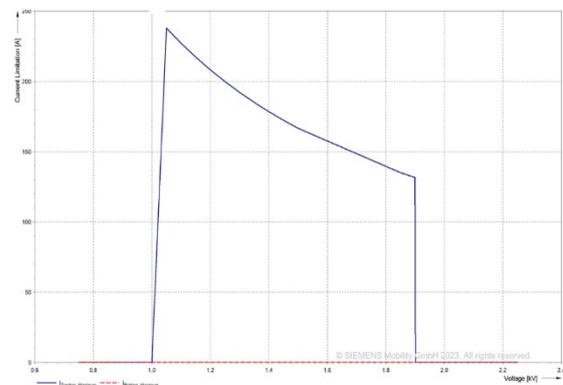


Abbildung 10: Spannungsabhängige Traktionsleistung (Darstellung Siemens Mobility)

Die Simulationsergebnisse, wie beispielhaft in Abbildung 10 dargestellt geben zum einen an, ob die Norm eingehalten wird, und lassen zum anderen Rückschlüsse auf die Belastung des Systems zu. Anhand der lokalen Maxima im Verlauf der minimalen Spannung lässt sich die Platzierung der Unterwerke ablesen. Die Spannung am Stromabnehmer der O-Lkw schwankt in weiten Grenzen. Je weiter entfernt die Unterwerke voneinander stehen, desto größer ist aufgrund von Leitungsimpedanzen der Spannungsfall entlang der Leitung. Das Spannungsprofil hängt von der Anzahl der angebugelten Fahrzeuge, deren Geschwindigkeit, Steigung und weiteren Faktoren ab. Dies bedeutet, dass der Spannungsfall mit steigender Anzahl der O-Lkw größer wird.

Liegt der Spannungsfall außerhalb des zulässigen Wertebereichs, sind weitere Unterwerke einzuplanen, welche die Spannung wieder anheben. Es ist dabei die energietechnisch und wirtschaftlich effizienteste Lösung anzustreben. Die Abbildung 11 zeigt die Spannungsverläufe entlang des elektrifizierten Streckenabschnitts in Abhängigkeit der elektrifizierten Länge, der Anzahl der Unterwerke und unter Berücksichtigung des Betriebs-modi 3, einer

durchschnittlichen Zeitlücke der O-Lkw von 60s. Ausgehend von diesen Untersuchungen werden im letzten Schritt der Simulation die Leistungsbedarfe der einzelnen Fahrzeuge und anschließend der Fahrzeugkollektive je Zeiteinheit ermittelt. Dies erfolgt unter Berücksichtigung eines Elektrifizierungsgrades von 70 % sowie einer durchschnittlichen Zeitlücke der O-Lkw von 60 s.

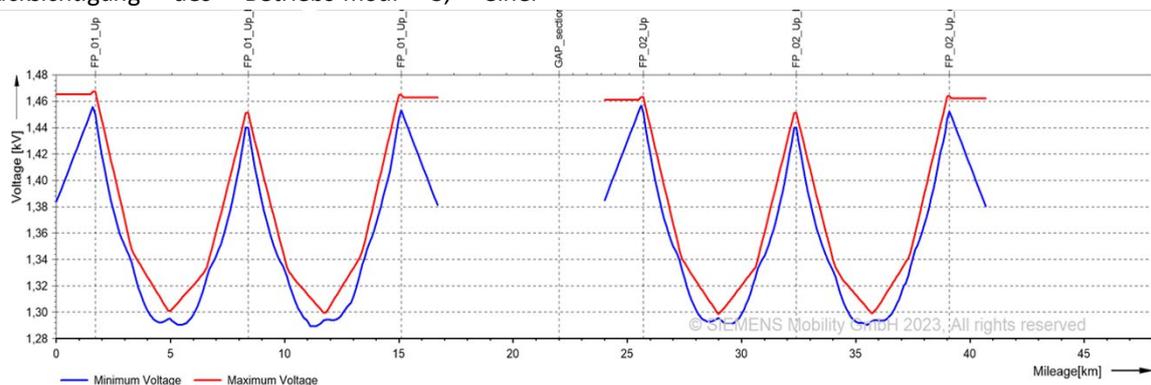


Abbildung 11: Spannungsverlauf entlang der Strecke, 70% Elektrifizierungsgrad mit 3 Unterwerken

Mit der Annahme eines Elektrifizierungsgrades von 70 % sowie unter den gegebenen Bedingungen, d.h. dem Erreichen einer durchschnittlichen Zeitlücke von 60 s, dem Erreichen des Oberleitungsstroms unter seiner maximalen Kapazität, dem Erreichen der maximalen Strombelastung der Unterwerke und unter der Aufrechterhaltung der Mindestspannung am Oberleitungssystem sowie der Prämisse, dass die Batterie der O-Lkw vom Oberleitungssystem ausreichend Leistung für den nächsten elektrifizierten Streckenabschnitt aufnimmt, ermittelt die Simulation, dass eine Einspeisung von 4 MVA alle 6,7 km von Nöten ist. Die dafür erforderlichen drei Unterwerke speisen die Fahrleitung dabei in beide Fahrrichtungen.

In einem weiteren Schritt bildet die Simulation das Optimum aus gegebenen Bedingungen und Mindestelektrifizierungsgrad. Es zeigt sich, dass selbst bei einem Elektrifizierungsgrades von 50 % und zwei Unterwerken die gegebene Verkehrsaufgabe (Zeitlücke von 60 s) erfüllt werden kann (Einspeisung weiterhin 4 MVA). Anzumerken ist, dass die Leistungsauslegung dynamischer Systeme jeweils projektspezifisch im Hinblick auf die jeweilig erwartete Anzahl an O-Lkw den Leistungsanforderungen aus der geplanten Verkehrsaufgabe festzulegen ist. Als maximale Stromaufnahme je O-Lkw sind derzeit 350 A während der Fahrt (> 5 km/h) und 100 A im Stillstand (≤ 5 km/h) zugelassen.

Tabelle 2: Simulationsergebnisse 50 % und 70 % Elektrifizierungsgrad mit 2 und 3 Unterwerken (Siemens Mobility)

	min. Spannung [V]	max. Stromstärke [A]	max. Leistung [kVA]	bezogene Energie [kWh] / [%]		verbrauchte Energie [kWh] / [%]		eingesparte Energie [kWh] / [%]	
Elektrifizierungsgrad 50 %									
2 Unterwerke									
Modi 1	1044	574	2529	17,8	9,49	13,6	7,25	4,2	2,2
Modi 2	1238	482	2156						
Modi 3	1068	525	2320						
3 Unterwerke									
Modi 1	1044	582	3178	29,6	15,79	23	12,27	6,6	3,5
Modi 2	1227	493	2889						
Modi 3	1058	546	3021						
Elektrifizierungsgrad 70 %									
2 Unterwerke									
Modi 1	1044	574	2530	17,8	9,49	5,7	3,04	12,1	6,5
Modi 2	1238	482	2156						
Modi 3	1068	532	2325						
3 Unterwerke									
Modi 1	1044	582	3178	29,6	15,79	10	5,33	19,6	10,5
Modi 2	1227	493	2889						
Modi 3	1058	546	3021						

Konzepte für zukünftige Netzintegration

Die ressourceneffiziente Integration von Ladetechnologien in das bestehende Energieversorgungssystem erfordert eine sorgfältige Abwägung und Einbeziehung einer Vielzahl von Faktoren und Rahmenbedingungen, die (sozio-)ökonomische und ökologische Aspekte gleichermaßen berücksichtigen. Diese multidimensionalen Überlegungen wurden in vorangegangenen Ausführungen detailliert erörtert.

Im Kontrast zur Analyse des Gleichzeitigkeitsfaktors von stationären Ladepunkten eröffnet das Konzept des dynamischen Ladens die Möglichkeit, eine zusätzliche verifizierte Gesetzmäßigkeit aufgrund der inhärenten Zentralisierung der Ladeinfrastruktur zu definieren. Der Gleichzeitigkeitsfaktor, der bei dieser Betrachtungsweise zum Tragen kommt, leitet sich nicht ausschließlich aus regionalen Charakteristiken oder potentiellen Hochlaufphasen ab, wie es beim Personenverkehr aktuell der Fall ist [23]. Vielmehr lässt er sich auf einer fundierten Datenbasis anhand der Verkehrsbelastung des Schwerlasttransports quantifizieren und qualifizieren. Über diese Verkehrsbelastungen existieren in Deutschland Langzeitdaten, die in Abbildung 12 dargestellt sind.

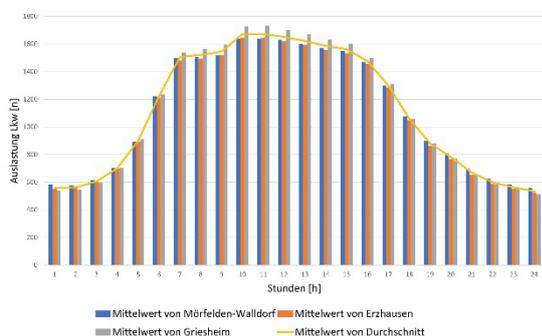


Abbildung 12: Streckenbelastung Werktag [n/h] [24]

In Verbindung mit der Verkehrsstudie des Instituts für Logistik- & Dienstleistungsmanagement (FOM), ergeben sich hier ergänzend die perspektivischen Standzeiten des Schwerlasttransportes im betrachteten Streckenabschnitt. Hierbei wird mit einer Parkplatzmenge von $\approx 5,55^5$ Parkmengenbedarf je km in Abhängigkeit von der aktuellen Verkehrsbelastung und dem Überlastungskapazitäten von 142 % gerechnet und dem zeitlichen Intervall von 1 min [25]. Die perspektivischen Standzeiten im Fallbeispiel sind in Abbildung 13 dargestellt und relevant für die Berechnung des Gleichzeitigkeitsfaktors beim stationären Laden. Die Streckenbelastung ist wiederum relevant für die Frequentierung im fließenden Verkehr und den Gleichzeitigkeitsfaktor des dynamischen Ladens.

⁵ Parkmenge (NP_p) = 2120 n; Streckenlänge A5 = 382 km [30]
Parkplatzkapazität (NS) = 1495 n [30]

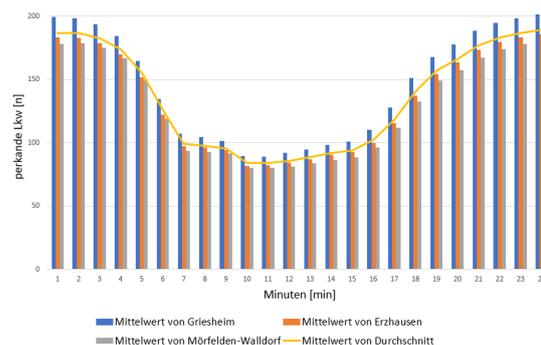


Abbildung 13: Standzeiten Werktag [n/1min] [26;27]

Aus Formel 1 ergibt sich die Berechnung des Gleichzeitigkeitsfaktors in der allgemeinen Netzplanung aus dem Verhältnis der Summe der Spitzenlasten einzelner Verbraucher zur Spitzenlast der Gesamtheit dieser Verbraucher [28].

$$g(N) = \frac{\max_t \sum_{i=1}^N P_i(t)}{\sum_{i=1}^N \max_t P_i(t)}$$

Formel 1: Berechnung Gleichzeitigkeitsfaktor Netzplanung [29]

Für die Berechnung des Gleichzeitigkeitsfaktors des dynamischen Ladens sind eine Vielzahl von Parametern entscheidend. Die Streckenmaximalauslastung (AG_{qmax}) gibt Aufschluss über die maximale Belastbarkeit einer Strecke, die sich aus der Strecke der Oberleitungsanlage (s_{OL}), der Länge des Oberleitungs-Lkw (l_{OL-Lkw}) und dem Mindestanstand (x) ergibt. Ergänzt wird die Verkehrsflussanalyse durch den Zeitfaktor (t) und den in Verbindungstehenden Faktor der Verkehrsgeschwindigkeit (v). Die aktuell noch stark synchronen Faktoren O-Lkw Maximalleistungsbezug (P_{imax}) und O-Lkw Durchschnittsleistungsbezug ($P_{i\emptyset}$) müssen bei sich stärker veränderten Leistungsklassen der O-Lkw eine größere Berücksichtigung finden. Es ergibt sich die in Formel 2 dargestellte Berechnung des dynamischen Ladens.

$$g(N_{dyn}) = \frac{\max_{t=v*s} \sum_i^{AG_{qmax} = \frac{s_{OL}}{l_{OL-Lkw} + x}} P_{imax}(t)}{\sum_{i=1}^N \max_{t=v*s} P_{i\emptyset}(t)}$$

Formel 2: Gleichzeitigkeitsfaktor dynamisches Laden

Neben dem dynamischen Laden ist der Gleichzeitigkeitsfaktor des stationären Ladens zu berechnen. Es ergibt sich in Anlehnung an die Studie des FOM und in Ergänzung an die Formel des FNN, die Berechnung des Gleichzeitigkeitsfaktors des Schwerlastverkehrs aus den maximalen Parkplätzen entlang des Streckenabschnitts (P_{max}) und des aktuellen Parkplatzbedarfs (N_{2024}), sowie aus der Berechnung des Ladezyklus durch die Faktoren Batteriekapazität (C) und Ladeleistung am Ladepunkt PE-LKW die dargestellte Formel 3.

Auslastungsgrad (AG_q) = 142 % [30]

$$g(N_{Stat.}) = \frac{\max_{t=\overline{P_{E-LKW}}} \sum_i^{P_{qmax}} P_i(t)}{\sum_{i=1}^{N_{2024}} \max_{t=\overline{P_{E-LKW}}} P_i(t)}$$

Formel 3: Berechnung Gleichzeitigkeitsfaktor stationäres Laden Lkw an Autobahnen

Wie im Rahmen der FOM-Studie aufgezeigt, gibt es historisch bedingt nur wenig geeignete Netzverknüpfungspunkte entlang einer Autobahn. Im Kontext der Netzdimensionierung ist primär nicht der einzelne absolute Wert des Gleichzeitigkeitsfaktors von ausschließlicher Bedeutung, sondern vielmehr die Kombination verschiedener Verbraucher und der daraus resultierende effektive Leistungsbeitrag. Wie in Abbildung 14 dargestellt, ergeben sich aus der Verbindung von stationären und dynamischen Laden nennenswerte Synergiepotentiale für eine ideale Netzdimensionierung. Hervorzuheben ist der sich hohe Auslastungs- und Planungsgrad.

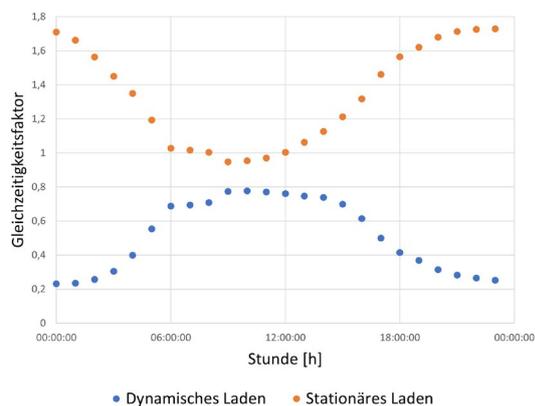


Abbildung 14: Synergieszenario Gleichzeitigkeitsfaktor dynamisches und stationäres Laden⁶

Daraus ist abzuleiten, dass die Gleichzeitigkeitsfaktoren dynamischen und beim stationären Laden für eine effiziente Auslastung einzelner Netzverknüpfungspunkte gut harmonieren. Der höhere Gleichzeitigkeitsfaktor > 1 entsteht durch die fehlenden Parkplatzkapazitäten, wie auch in der FOM-Studie aufgezeigt von über 142 % Überbelastung [21; 22]. Die Darlegung der systematischen Harmonisierung vom dynamischen und stationären Laden bleibt hiervon unbetroffen.

Ergänzend zu der oben aufgezeigten Formel müssen zwei weitere Faktoren in Betracht gezogen werden. In Abhängigkeit des Elektrifizierungsgrades mit Oberleitungsanlagen (e^{OL}) und der Verkehrsstreckentopologie muss die Zentralisierung des Verkehrs bei etwaigen Ausweichstrecken Erwähnung finden. Eine Adaption zum öffentlichen Nahverkehr ist sozioökonomisch möglich.

Bei synchron verlaufenden Strecken ist ergänzend Formel 4 heranzuziehen.

$$g_{ges.} = \frac{AG1_q * e^{OL} + (AG2_q * e^{OL})}{2}$$

Formel 4: Berechnung Gleichzeitigkeitsfaktor dynamisches Laden mit Ausweichstrecke

Wie in der FOM-Studie dargestellt, ergeben sich aus der gut planbaren Dimensionierung der Netzverknüpfungspunkte mit weitreichenden Synergiepotentialen eine Empfehlung für eine tiefergehende Betrachtung der kombinierten Nutzung des dynamischen und stationären Ladens. Des Weiteren ist zu empfehlen eine vorausschauende Netzplanung unter Berücksichtigung eines integrativen Ansatzes des gesamten Streckenabschnittes durchzuführen. Dabei sind Parkplatzraumbedarf, Charakteristika der Verkehrsstrecke, Verkehrsflussintensität und bestehende Netzanschlusskapazitäten zu berücksichtigen. Dadurch wird eine präzise und kontextbezogene Einschätzung der erforderlichen Ladeinfrastrukturkapazitäten ermöglicht, die für eine effiziente und nachhaltige Transformation des Schwerlasttransportes unerlässlich sind. Die Berücksichtigung bestehender Energieinfrastrukturen ist zwingend notwendig. An dieser Stelle soll auch die nötige stärkere integrative Betrachtung des Mobilitäts- und Transportsektors, sowie der Energieinfrastruktur Berücksichtigung finden. Eine volkswirtschaftlich sinnvolle Lösung ist nur dann möglich, wenn die Modelle auf resilienten Daten aufbauen. Exemplarisch sind die genutzten Zahlen der BAST und der FOM wichtig für die Berechnung des Gleichzeitigkeitsfaktors. Allerdings kann durch partielle Rechnungen eine Unschärfe entstehen.

Angesichts der ausgedehnten bürokratischen Planungszeiträume empfiehlt es sich, proaktiv Planfeststellungsverfahren und Netzstudien für zusätzliche Streckenabschnitte durch den Gesetzgeber zu initiieren, um durch frühzeitiges Handeln potenziellen legislativen Änderungen vorzuzuschreiten und die Klimaschutzziele einzuhalten. Darüber hinaus ist es erforderlich, bürokratische Barrieren und zeitaufwändige Verfahren, wie die Bestimmungen der Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV) und die damit verbundenen Veröffentlichungspflichten, zu reduzieren. Dies ist unabhängig von der strukturellen Betrachtung von dynamischen und stationären Laden zu erwägen.

⁶ In der Berechnung des Gleichzeitigkeitsfaktors ist anzumerken das alle weiteren vorher getroffenen Annahmen weiterhin Bestand haben.

Hierbei ist explizit, aber nicht ausschließlich die Prämisse zu erwähnen, dass beim stationären Laden nur Nachtlader Betrachtung fanden.

Zusammenfassung

Die Integration einer neuen Technologie bringt immer Ambivalenzen mit sich [31]. Wie dargelegt, können die positiven Effekte der weitreichenden Elektrifizierung des Schwerlasttransportes nur dann erreicht werden, wenn ausreichend Netzanschlusskapazitäten entlang der Autobahn erschlossen werden können. Dies ist aktuell als zentraler limitierender Faktor anzusehen und als relevantes Hemmnis für eine schnelle Integration, sowohl von stationären Ladesäulen als auch der Oberleitungstechnologie. Wie in den Abbildungen 5 bis 8 aufgezeigt, sind Netzanschlusskapazitäten entlang des ausgewählten Autobahnabschnitts historisch bedingt begrenzt.

In einer disziplinären Betrachtung der Elektrotechnik unterscheiden sich das dynamische und das stationäre Laden nicht entscheidend. Zudem zeigt das Synergieszenario auf, dass eine Kombination beider Technologien aus disziplinärer elektrotechnischer Sicht keine zusätzlichen Netzanschlusspotentiale benötigt. Für den Streckenabschnitt sind Netzanschlusskapazitäten von 15 MVA in beiden Szenarien zu resümieren.

Die Integration einer Technologie in den Verkehrssektor bedarf jedoch einer multidisziplinären Betrachtung. Dies inkludiert vor allem die Berücksichtigung von sozioökonomischen Prozessen, wie exemplarisch dem ungeplanten Blockieren einer Ladesäule durch einen Lkw, aber auch die geplante Zentralisierung von Netzanschlusskapazitäten entlang der Autobahn an strategisch sinnvollen Standorten. Die Effizienz im Bereich der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge, insbesondere für Lastkraftwagen, kann hier durch verschiedene Maßnahmen deutlich gesteigert werden, sofern es zu einem Synergieszenario zwischen stationärem und dynamischem Laden kommt.

Im Rahmen der Netzplanung ist die Wichtigkeit einer hohen Planbarkeit des Gleichzeitigkeitsfaktors hervorzuheben. Um den Gleichzeitigkeitsfaktor beim dynamischen Laden valide bestimmen zu können, stehen die benötigte Leistungsaufnahme je Lkw und die Verkehrsbelastung je Zeit und Streckenabschnitt zur Verfügung. Problematischer gestaltet sich dies beim stationären Laden. Zwar kann davon ausgegangen werden, dass nicht immer alle Ladesäulen in Benutzung sind, jedoch müssen Rückhaltekapazitäten für einen reibungslosen Prozess gebildet werden. Um die Sicherheit der Lieferkette zu gewährleisten, darf eine Leistungsreduzierung von

Ladeparks entlang von Autobahnen nicht im Netzplanungsprozess berücksichtigt werden.

Dieser Faktor wird noch weiter durch die geringen Flächenpotentiale für Stellplätze und hier im speziellen für Ladepunkte entlang der Autobahn verstärkt. Eine Herausforderung stellt die Erschließung neuer Flächen für Ladestationen dar, da in dichtbesiedelten Gebieten entlang von Fernstraßen im öffentlichen Straßenraum nur begrenzter Platz verfügbar ist. Hier bietet die Nutzung von Oberleitungen eine effiziente Lösung, da sie keinen zusätzlichen Raum beanspruchen und somit im Einklang mit Punkt 35 des Masterplans stehen [5].

Wie aus der Netzanalyse des Streckenabschnitts hervorgeht, würden die reinen Stromnetzkapazitäten ausreichen, um sowohl stationäres Laden oder alternativ dynamisches Laden zu integrieren. Problematisch stellt sich dies jedoch im Kontext tangierender Infrastrukturen und dem Hochlauf weiterer Technologien, wie exemplarisch durch die Wärmewende, die Elektrifizierung im Industriesektor bzw. stationäre Ladesäulen bei Pkw dar. Die Kompatibilität mit der bestehenden Stromnetz- und Straßeninfrastruktur ist hier besonders zu berücksichtigen.

Das Konzept des dynamischen Ladens bietet die Möglichkeit, den Anschluss an das Mittelspannungsnetz deutlich flexibler zu handhaben. Dies wird durch eine lageoptimierte Auswahl des Netzanschlusspunktes erreicht. Konkret bedeutet dies, dass die Einspeisung in einen sogenannten Oberleitungs-Versorgungsabschnitt dort erfolgt, wo die Netzinfrastrukturen leichter zugänglich sind und sich einfacher erschließen lassen. Dies kann zu einer effizienteren und kostengünstigeren Integration der Ladeinfrastruktur in das bestehende Stromnetz führen. Hierbei ist auch die Ausbaugeschwindigkeit des Mittelspannungsnetzes zu nennen. Durch die Kombination von dynamischen und stationären Ladesystemen können zudem Leistungsspitzen vermieden werden, was zu einer gleichmäßigeren Verteilung der Ladeleistung, sowohl räumlich als auch zeitlich, führt.

Durch eine Individualisierung der möglichen Lade- punkte für Lkw entstehen aktuell bereits eine Viel- zahl von Netzanschlussgesuchen bei den zahlrei- chen Netzbetreibern. Wie dargelegt, können Aus- bauprozesse aufgrund von Genehmigungsprozes- sen, längere Prozesszeiträume dauern. Zudem kön- nen die Netzbetreiber aus ökonomischer Sicht nicht pauschal Netzkapazitäten ausbauen.

Des Weiteren kommen erschwerende Faktoren wie Fachkräftemangel und der Hochlauf weiterer Tech- nologien hinzu. Die Zentrierung der benötigten An- schlusspunkte auf Zielkorridoren bietet sowohl eine schnelle als auch effiziente Möglichkeit, durch die Kombination von stationärem und dynamischem Laden eine weitreichende Elektrifizierung zu er- möglichen.

Die Flexibilität wird auch beim Anschluss an das Mit- telspannungsnetz erhöht, was eine Anpassung an die jeweiligen Gegebenheiten und eine optimierte Auswahl des Netzanschlusspunktes erlaubt. Dies ist insbesondere relevant im Kontext des Masterplans, Punkt 35, der eine flexible Gestaltung der Netzinfrast- ruktur vorsieht.

Durch den im Mittel höheren Ausnutzungsgrad der installierten Ladeinfrastruktur wird zudem eine deutliche Steigerung der Kosteneffizienz erreicht. Die Erschließung neuer Flächen für Ladeparks ent- lang von Fernstraßen wird durch die Nutzung von dynamischen Ladesystemen erleichtert, da diese keinen zusätzlichen Raum benötigen.

Autoren

Hein, Christian R., e-netz Süd Hessen AG, Forschung und Entwicklung, Darmstadt, christian.hein@e-netz-suedhessen.de

Dr.-Ing. Wauri, Danny, Siemens Mobility GmbH, Sys- temingenieur, Erlangen, danny.wauri@Siemens.com

Först, Barbara, Siemens Mobility GmbH, Systemaus- legung, Erlangen, barbara.foerst@siemens.com

Hepp, Alexander, e-netz Süd Hessen AG, Forschung und Entwicklung, Darmstadt, alexan- der.hep@e-netz-suedhessen.de

Khan, Sahil, Siemens Mobility GmbH, Systemausle- gung, Pune, sahil.khan@siemens.com

Köhler, Ingo, e-netz Süd Hessen AG, Projekt- und As- setmanagement, Darmstadt, ingo.koehler@e- netz-suedhessen.de

Petermann, David, netz Süd Hessen AG, Leiter For- schung und Entwicklung, Darmstadt,

Turgut, Ömer, Siemens Mobility GmbH, Systemaus- legung, Erlangen, omer.turgut@siemens.com

Literatur

- [1] Statista GmbH (2021): Weltweites Frachtvolumen im Vergleich der Jahre 2010 und 2050 nach Verkehrsträgern. [online] <https://de-statista.com/statistik/daten/studie/482955/umfrage/frachtvolumen-weltweit-nach-verkehrstraegern/> [abgerufen am 09.12.20219].
- [2] OECD/ITF (2015): ITF Transport Outlook 2015, International Transport Forum (ITF), OECD Publishing/ITF [Hrsg.], Paris 2015. [online] <http://dx.doi.org/10.1787/9789282107782-en> [abgerufen am 09.12.2021].
- [3] Boltze, M. (2019): eHighway – An Infrastructure for Sustainable Road Freight Transport. In: CIGOS 2019, Innovation for Sustainable Infrastructure. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 54 (S.35-44), Ha-Minh, C., Dao, D., Benboudjema, F., Derrible, S., Huynh, D., Tang, A. [Hrsg.], Springer, Singapur 2019.
- [4] Wauri, D. (2024): Verkehrsverhalten und Verkehrsablauf auf Fernstraßen mit eHighway-System, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt 2024.
- [5] Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) Referat G 23 (2022): Masterplan Ladeinfrastruktur II der Bundesregierung, Oktober 2022
- [6] Panchal, C., Stegen, S. und Lu, J. (2018): Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system. Engineering Science and Technology, an International Journal, Jg. 21, Heft 5, S. 922–937.
- [7] Kraftfahrt-Bundesamt (2019): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD), Verkehrsaufkommen Jahr 2019 VD1, Kraftfahrt Bundesamt [Hrsg.], Flensburg 2019.
- [8] Hessen Mobil (2017a): ELISA – Elektrifizierter, innovativer Schwerverkehr auf Autobahnen Feldversuch zur Erprobung elektrischer Antriebe bei schweren Nutzfahrzeugen und deren Energieversorgung per Oberleitung,

- Vorhabensbeschreibung zur Förderbekanntmachung BAnz AT 10.11.2015 B3, Punkt 2.2, Teilprojekt ELISA I: Planung, Genehmigung und Errichtung der Infrastruktur, Hessen Mobil – Straßen- und Verkehrsmanagement, Wiesbaden 2017.
- [9] Wietschel, M., Gnann, T., Kühn, A., Plötz, P., Moll, C., Speth, D., Buch, J., Boßmann, T., Stütz, S., Schellert, M., Rüdiger, D., Balz, W., Frik, H., Waßmuth, V., Paufler-Mann, D., Rödl, A., Schade, W., Mader, S. (2017): Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw, Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI), Karlsruhe, Februar 2017.
- [10] Kippelt, S., Probst, F., Greve, M. (2022): Einfach laden an Rastanlagen - Auslegung des Netzanschlusses für E-Lkw-Lade-Hubs, Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur unter dem Dach der NOW GmbH [Hrsg.], Berlin 2022.
- [11] Ali, S.; Wintzek, P.; Zdrallek, M. Development of Demand Factors for Electric Car Charging Points for Varying Charging Powers and Area Types. *Electricity* 2022, 3, 410–441.
- [11] VDE FNN (2021): Ermittlung von Gleichzeitigkeitsfaktoren für Ladevorgänge an privaten Ladepunkten, [online] FNN Studie Gleichzeitigkeitsfaktoren (vde.com) [21.06.2024]
- [12] VDE FNN (2021): Technische Regeln für die Beurteilung von Netzurückwirkungen, [online] 02-01-technische-regeln-fuer-die-beurteilung-von-netzrueckwirkungen-data.pdf (vde.com) [21.06.2024]
- [13] Burges, K., Kippelt, S. (2021): Grid-related challenges of high-power and megawatt charging stations for battery-electric long-haul trucks, study on behalf of Transport & Environment, 2021.
- [14] National Grid, CALSTART, RMI, Stable Auto, and Geotab (2022): Electric Highways: Accelerating and Optimizing Fast-Charging Deployment for Carbon-Free Transportation, 2022.
- [15] Plötz, P., Hacker, F., Jöhrens, J., Speth, D., Gnann, T., Scherrer, A., Burghard U. (2021): Infrastruktur für Elektro Lkw im Fernverkehr: Hochleistungsschnelllader und Oberleitung im Vergleich – ein Diskussionspapier. Karlsruhe, Berlin, Heidelberg: Fraunhofer ISI, Öko-Institut, ifeu, 2021.
- [16] BAST/BAST (2023): Automatische Zählstellen 2021, Bundesanstalt für Straßenwesen, [online] https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Aktuell/zaehl_aktuell_node.html?cms_filer=true&cms_str=A5&cms_map=0 [09.08.2023]
- [17] IZT (2008): Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse Überblick, Bewertung und Auswahlkriterien, [online] (PDF) Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse Überblick, Bewertung und Auswahlkriterien | Robert Gaßner - Academia.edu [21.06.2024]
- [18] Dusseldorf, Marc (2012): Die Szenariomethode in der Interdisziplinären Technikbildung – Eine didaktische Rekonstruktion, S. 165
- [19] Ali, S.; Wintzek, P.; Zdrallek, M. (2022): Development of Demand Factors for Electric Car Charging Points for Varying Charging Powers and Area Types. [online] <https://doi.org/10.3390/electricity3030022> [11.06.2024]
- [20] enviaM-Gruppe: Netzausbau [online] Netzausbau - ohne Ausbau der Stromnetze keine Energiewende (enviam-gruppe.de) [25.06.2024]
- [21] BNetzA (2024): Stromnetzausbau Stand der Genehmigungsverfahren der Bundesnetzagentur [online] Stromnetzausbau - Stand der Genehmigungsverfahren der Bundesnetzagentur [25.06.2024]
- [22] BMWK (2023): Die Abrechnung elektrischer Energie für Oberleitungs-LKW. Modellvergleich ELISA II-B und AMELIE 2, [online] Die Abrechnung elektrischer Energie für Oberleitungs-LKW (usercontent.one) [21.06.2024]
- [23] bast (2022): Automatische Dauerzählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen, [online] BAST - Automatische Straßenverkehrszählung [04.06.2024]

- [24] ild(2018): Entwicklung eines Konzepts zur Deckung des streckenbezogenen LKW-Parkbedarfs in Süddeutschland mittels GAMS, S. 18
- [[25] ild(2018): Entwicklung eines Konzepts zur Deckung des streckenbezogenen LKW-Parkbedarfs in Süddeutschland mittels GAMS, S. 18
- 26] bast (2022): Automatische Dauerzählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen, [online]BAST - Automatische Straßenverkehrszählung [04.06.2024]
- [27] VDE FNN (2024): Analyse und Verifikation der BNetzA-Vorgaben zur Berechnung der Mindestbezugsleistung aus Sicht eines Verteilnetzbetreibers, [Online] vde-fnn-impuls-mindestbezugsleistung-download-data.pdf [11.06.2024]
- [28] VDE FNN (2024): Analyse und Verifikation der BNetzA-Vorgaben zur Berechnung der Mindestbezugsleistung aus Sicht eines Verteilnetzbetreibers, [Online] vde-fnn-impuls-mindestbezugsleistung-download-data.pdf [11.06.2024]
- [29] VDE FNN (2024): Analyse und Verifikation der BNetzA-Vorgaben zur Berechnung der Mindestbezugsleistung aus Sicht eines Verteilnetzbetreibers, [Online] vde-fnn-impuls-mindestbezugsleistung-download-data.pdf [11.06.2024]
- [30] ild (2018): Entwicklung eines Konzepts zur Deckung des streckenbezogenen LKW-Parkbedarfs in Süddeutschland mittels GAMS, S. 18
- [31] Liebert, Wolfgang, Schmidt, Jan Cornelius (2018):Ambivalenzen im Kern der wissenschaftlich-technischen Dynamik, [online] View of Ambivalences at the core of the scientific-technological dynamic | TATuP - Journal for Technology Assessment in Theory and Practice [21.06.2024]