HERAUSGEBER

TÜVRheinland®
Genau. Richtig.

INSTITUT FÜR INNOVATION UND TECHNIK

NETZINTEGRATION VON ELEKTRIFIZIERTEN SCHWEREN NUTZFAHRZEUGEN

Ein Impulspapier der Begleitforschung Elektro-Mobil

IMPRESSUM

Herausgeber

TÜV Rheinland Consulting GmbH

Institut für Innovation und Technik (iit) in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH

Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)

Dr. Sören Grawenhoff, Am Grauen Stein, 51105 Köln, soeren.grawenhoff@de.tuv.com

Autoren

Ilona Friesen (TÜV Rheinland Consulting GmbH)
Matthias Trunk (TÜV Rheinland Consulting GmbH)
Timon Kiriazis (TÜV Rheinland Consulting GmbH)
Sarah Vogl (TÜV Rheinland Consulting GmbH)

Gestaltung

LHLK Agentur für Kommunikation GmbH
Hauptstraße 28
10827 Berlin

Kontakt

begleitforschung-elektro-mobil@de.tuv.com
LinkedIn
Förderprogramm „Elektro-Mobil“

Disclaimer

An der Ausführung dieses Impulspapiers wirkten mehrere im Rahmen des Förderprogramms „Elektro-Mobil“ geförderte Projekte mit. Die Begleitforschung Elektro-Mobil verantwortet die Inhalte dieses Impulspapiers und ist für die redaktionelle Ausarbeitung zuständig. Alle an diesem Impulspapier beteiligten Projekte sind im Folgenden aufgeführt.

Mitwirkende Projekte

AMELIE 2	ELINA	evTrailer2	KoLa	SPIRIT-E
E|MPOWER	ELMAR	HV-MELA-BAT	MEGA-LADEN	UniSwapHD
eHaul	enERSyn	IDEAL	NEFTON	

Titelbild

Shutterstock

Stand

Juli 2024

EXECUTIVE SUMMARY

Der Schwerlastverkehr ist für rund ein Viertel der verkehrsbedingten CO_2-Emissionen verantwortlich, daher ist für das Erreichen der Klimaziele auch ein emissionsfreier Schwerlastverkehr nötig. Um die politischen Ziele einzuhalten, stellen Hersteller schwerer Nutzfahrzeuge bei einigen ihrer Modelle auf den batterieelektrischen Antrieb um. Batterieelektrische Lkw mit Gewichtsklassen bis 26 t zulässigem Gesamtgewicht und Reichweiten bis 300 km sind bereits marktreif und befinden sich bei mehreren Herstellern in der Serienproduktion. Mit diesen Fahrzeugen sind Anwendungsfälle wie die „letzte Meile" heutzutage bereits darstellbar und die verfügbaren Ladeleistungen sind ausreichend, um die Fahrzeuge über Nacht vollzuladen.

Erste Modelle bis 44 t zulässigem Gesamtgewicht und mit Reichweiten, die sich auch für den Langstreckentransport eignen, befinden sich mittlerweile ebenfalls in (Vor-)Serienproduktion. Diese Fahrzeuge benötigen jedoch höhere Ladeleistungen, um während der gesetzlich vorgeschriebenen Pausenzeiten genügend Energie zwischenladen zu können. Die nötige Schnellladeinfrastruktur mit Ladeleistungen von über 500 kW befindet sich jedoch noch in der Demonstrationsphase. Die Finalisierung des Megawatt Charging System (MCS) mit Ladeleistungen von über 1000 kW wird 2024 erwartet.

Neben dem Megawattladen sind weitere Technologien zur Elektrifizierung des Langstreckentransports denkbar. Die Projekte aus dem Programm „Elektro-Mobil" arbeiten an der Entwicklung dieser Technologien, zu welchen auch ein Batteriewechselsystem und elektrische Straßensysteme wie Oberleitungen und Induktionsspulen zählen. Die nötige Netzanschlussleistung kann durch die Steuerung einzelner Ladevorgänge begrenzt werden. Darüber hinaus können durch bidirektionales Laden von Nutzfahrzeugen mit ihren enormen Batteriekapazitäten zusätzliche Geschäftsmodelle – wie z. B. das Erbringen von Systemdienstleistungen – erschlossen werden.

In diesem Impulspapier formuliert die Begleitforschung des Förderprogramms „Elektro-Mobil" einen Sachstand zur Netzintegration von elektrifizierten schweren Nutzfahrzeugen. In den Grundlagen werden die Netzintegration, verschiedene Fahrzeugklassen und Ladeszenarien sowie Ladetechnologien für schwere Nutzfahrzeuge erläutert (Kapitel 2). Der Abschnitt zur Netzintegration elektrifizierter schwerer Nutzfahrzeuge beleuchtet den Status Quo im Jahr 2023 sowie aktuelle Forschungsergebnisse und gibt einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungen (Kapitel 3). Um die Netzintegration elektrifizierter schwerer Nutzfahrzeuge (N3 und M3) besser zu verstehen, werden auch Bezüge zu den leichten Nutzfahrzeugen (N1, N2, M2) hergestellt. Während die Marktrecherche und Umsetzungsbeispiele zeigen, dass für die Fahrzeugklassen N1 und N2 bereits unidirektional gesteuerte und bidirektionale Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur am Markt verfügbar sind und auch das gesteuerte Laden von E-Bussen bereits in vielen europäischen Städten umgesetzt wird (Kapitel 3.1), legen die Elektro-Mobil-Projekte mit ihrer Forschung einen Schwerpunkt auf das unidirektional gesteuerte und bidirektionale Laden von schweren Nutzfahrzeugen der Klassen N3 und M3 mit verschiedenen Ladesystemen (Kapitel 3.2).

Abschließend werden drei Handlungsempfehlungen formuliert, wie die Netzintegration von schweren Nutzfahrzeugen unterstützt werden kann. Diese Empfehlungen zielen darauf ab, die Wettbewerbsfähigkeit der Wirtschaftsstandorte Deutschland und Europa zu stärken, eine Vorreiterrolle bei der Netzintegration schwerer Nutzfahrzeuge einzunehmen und damit die Dekarbonisierung des Verkehrssektors zu beschleunigen.

Die erarbeiteten Handlungsempfehlungen werden im Folgenden zusammengefasst. Die ausführliche Version der Empfehlungen findet sich in Kapitel 4.

GEMEINSAME SPRACHE UND SEKTORÜBERGREIFENDE BEGRIFFE

Um die Netzintegration von E-Lkw voranzutreiben, müssen Akteur:innen aus den Sektoren Energie und Verkehr miteinander kommunizieren. Um die Zusammenarbeit zu vereinfachen, bedarf es einer gemeinsamen Sprache. Für gemeinsam verwendete Begriffe sollte es ein einheitliches Verständnis geben.

Alle Akteur:innen sollten Begriffe definieren, bevor sie sie verwenden. Dabei sollte, wo möglich, auf bestehende Definitionen zurückgegriffen werden, damit der bestehende Diskurs rund um die Netzintegration von Nutzfahrzeugen auf einer gemeinsamen Wissensbasis weitergeführt werden kann. Eine gemeinsame Sprache erleichtert auch das Formulieren gemeinsamer Prioritäten von Lkw-Herstellern, Netzbetreibern, Transportunternehmen und weiteren Akteur:innen.

WISSENSLÜCKEN DURCH GEZIELTE FORSCHUNG SCHLIEßEN

Die Elektromobilität im Pkw-Bereich ist dem Nutzfahrzeugsektor bereits einige Jahre in der Entwicklung voraus. Diese Kenntnisse können die Netzintegration von Nutzfahrzeugen beschleunigen. Gleichzeitig wird das bidirektionale Laden bereits parallel bei Pkw und Nutzfahrzeugen erforscht.

Forschende aus Förderprojekten, Industrie und Wissenschaft sollten Wissenslücken zur Übertragbarkeit von Erkenntnissen aus dem Pkw-Bereich auf den Lkw-Bereich (und gegebenenfalls vice versa) schließen. Ebenso wäre ein fundierter globaler Vergleich von Vorreiterprojekten aus dem Bereich der Netzintegration von schweren Nutzfahrzeugen hilfreich.

WISSEN TEILEN UND EUROPÄISCH KOOPERIEREN

Verschiedene geografische Regionen bedingen unterschiedliche Forschungsbedarfe. Durch Koordination und gezielten Austausch können Erkenntnisse aus verschiedenen europäischen Ländern in andere übertragen werden, sodass für das ganze Spektrum an geografischen und klimatischen Voraussetzungen Lösungen bereitstehen.

Europäische Kommunikation und Kooperation müssen erleichtert und optimiert werden. Forschungsergebnisse müssen international verfügbar gemacht werden. Eine koordinierende Stelle auf europäischer Ebene kann diesen Prozess unterstützen und die Verbreitung der Forschungsergebnisse vorantreiben.

EXECUTIVE SUMMARY

Heavy-duty commercial vehicles are responsible for approximately one quarter of road-transport related CO_2 emissions, thus zero-emission heavy-duty transport is a prerequisite to reach the climate goals. In order to adhere to the political targets, heavy-duty vehicle manufacturers are in the process of transitioning their models to battery-electric propulsion. Battery-electric trucks up to 26 t maximum permissible weight and driving ranges up to 300 km are market-ready and in serial production at several companies. With these existing models, use cases such as distribution traffic and „last mile" delivery can already be served, and available charging infrastructure is sufficient to fully recharge the vehicles overnight.

First models with maximum permissible weight up to 44 t and driving ranges suitable for long-haul transport have also entered (pre-)serial production. However, these vehicles require higher charging powers in order to recharge sufficient energy during the lawfully mandated break times without requiring additional standing times, which would incur economic penalties in the cost-sensitive goods transport sector. The finalisation of the Megawatt Charging System (MCS) standard with charging powers above 1000 kW is expected for 2024.

Next to megawatt charging, several other technologies are conceivable for the electrification of long-haul transport. The projects of the funding programme "Elektro-Mobil" are working on the development of these technologies, which include a battery swapping system and two electric road systems, utilising overhead catenary lines and induction coils, respectively. The required grid connection can be limited via control of individual charging processes. Furthermore, by applying bidirectional charging to commercial vehicles with their enormous battery capacities, new business models – such as providing system services – can be developed.

In this Impulse Paper, the accompanying research of the funding programme "Elektro-Mobil" gives an overview of how the grid integration of commercial vehicles is already realised on the market. The fundamentals section explains the concept of grid integration, various vehicle classes and charging scenarios as well as charging technologies for heavy-duty vehicles (Chapter 2). The section on grid integration of electrified heavy-duty vehicles sheds light on the status quo in 2023, recent research findings, and provides an outlook on future developments (Chapter 3). To better understand the grid integration of electrified heavy-duty vehicles (vehicle classes N3 and M3), references are also made to light commercial vehicles (N1, N2, M2). Market research and implementation examples indicate that for vehicle classes N1 and N2, the market already offers both unidirectionally controlled and bidirectional vehicles, along with the necessary charging infrastructure, and many European cities have already adopted controlled charging for electric buses (Chapter 3.1). Meanwhile, the "Elektro-Mobil" projects are concentrating their research efforts on the unidirectionally controlled and bidirectional charging of heavy-duty vehicles of vehicle classes N3 and M3, employing various charging technologies (Chapter 3.2).

As a conclusion, three recommendations are given on how the grid integration of heavy vehicles can be supported. These recommendations aim to strengthen the competitiveness of Germany and Europe as business locations, and to assume a leading position regarding the grid integration of heavy-duty commercial vehicles, with the ultimate goal of accelerating the decarbonisation of the road transport sector.

The formulated recommendations are summarised in the following and can be found in their complete form in Chapter 4.

COMMON LANGUAGE AND DEFINITIONS

In order to facilitate the grid integration of heavy-duty commercial vehicles, the energy and road transport sectors need to communicate. To enable cooperation between stakeholders, a common language is required. There should be a uniform understanding of commonly used terms.

All actors should define terms before using them. Where possible, existing definitions should be applied such that the ongoing conversation around the grid integration of commercial vehicles can be advanced on a common knowledge basis. A common knowledge basis also facilitates the phrasing of common priorities of heavy commercial vehicle manufacturers, grid operators, transport companies, and other market actors.

CLOSING KNOWLEDGE GAPS THROUGH TARGETED RESEARCH

Electromobility in the passenger car sector is several years ahead of commercial vehicle development. This advanced knowledge can help accelerate the grid integration of commercial vehicles. At the same time, bidirectional charging is simultaneously being developed for passenger as well as commercial vehicles.

Researchers from funded projects, industry, and academia should close knowledge gaps in the transferability of learnings from the passenger car sector to the goods transport sector (and vice versa where appropriate). At the same time, an informed comparison of frontrunner activities in the grid integration of heavy commercial vehicles could prove useful.

SHARING KNOWLEDGE AND EUROPEAN COOPERATION

Different geographic regions give rise to varying research needs. Through coordination and targeted exchange, learnings from different European countries can be transferred onto others such that solutions for the entire spectrum of geographic and climatic prerequisites can be made ready.

European communication and cooperation need to be facilitated and optimised. Reserach results must be made available internationally. A coordinating office at a European level could support this process and promote the dissemination of research results.

INHALTSVERZEICHNIS

Executive Summary 3
Inhaltsverzeichnis 7
1 Einleitung 8
2 Grundlagen 10
2.1 Netzintegration 10
2.1.1 Ungesteuertes Laden 10
2.1.2 Gesteuertes unidirektionales Laden 11
2.1.3 Bidirektionales Laden 11
2.1.4 Flexibilitäten 11
2.2 Fahrzeugklassen, Anwendungsfälle und Ladeszenarien von Nutzfahrzeugen 12
2.3 Ladetechnologien für schwere Nutzfahrzeuge 13
2.3.1 Electric Road Systems 14
2.3.2 Megawattladen 15
2.3.3 Batteriewechselsysteme 16
3 Netzintegration elektrifizierter schwerer Nutzfahrzeuge 17
3.1 Status Quo 2023 18
3.1.1 Lkw (N1-N3) 18
3.1.2 Bus (M2-M3) 20
3.2 Forschung im Programm Elektro-Mobil 21
3.2.1 Lkw (N1-N3) 22
3.2.2 Bus (M2-M3) 26
3.3 Ausblick 29
4 Handlungsempfehlungen 31
4.1 Gemeinsame Sprache und sektorübergreifende Begriffe 31
4.2 Wissenslücken durch gezielte Forschung schließen 31
4.3 Wissen teilen und europäisch kooperieren 32
5 Anlagen 34
5.1 Anlage 1 zu Kapitel 3.1.1: Tabelle mit Marktübersicht E-Lkw 34
5.2 Anlage 2 zu Kapitel 3.1.1: Tabelle mit Marktübersicht Ladeinfrastruktur 35
5.3 Anlage 3 zu Kapitel 3.2: Projektkästen 36

1 EINLEITUNG

Der European Green Deal sieht vor, dass Europa bis 2050 der erste klimaneutrale Kontinent wird und danach keine Nettotreibhausgasemissionen mehr verursacht (Abbildung 1). Auf dem Weg zu diesem Ziel sollen diese Emissionen bis 2030 um 55 % gegenüber 1990 gesenkt werden.[1] Die Erreichung dieses Meilensteins erfordert eine signifikante Dekarbonisierung des Straßenverkehrs, der 2020 für ca. 20 % des in der EU emittierten CO_2 verantwortlich war.[2] Ein großer Anteil entfällt dabei auf den straßengebundenen Personen- und Gütertransportsektor. Obwohl sie im Jahr 2020 nur 2 % der Fahrzeuge auf europäischen Straßen ausmachten,[3] waren schwere Lkw und Busse für 28 % der verkehrsbedingten CO_2-Emissionen in der EU verantwortlich, weshalb diesen Fahrzeugen zur Erreichung der Emissionsziele eine besondere Bedeutung zukommt.[2]

aktuellen Fassung sieht vor, dass die Treibhausgasemissionen bis 2030 um 65 % gegenüber 1990 gesenkt werden sollen.[4] Zu diesem Zweck hat die Bundesregierung im Klimaschutzprogramm 2030 festgehalten, dass bis 2030 bereits ein Drittel der Fahrleistung im Straßengüterverkehr elektrisch oder auf Basis strombasierter Kraftstoffe erfolgen soll.[5]

Im Pkw-Sektor hat sich der europäische Markt bereits für den Umstieg auf den batterieelektrischen Antrieb entschieden und die Transformation der Automobilindustrie ist in vollem Gange.[6] Auch im Schwerlastverkehr deutet sich an, dass ein Großteil des Straßengütertransports batterieelektrisch sein wird.[7] Im Jahr 2020 haben Scania, Daimler Truck, Volvo Trucks, MAN, DAF und Ford eine Absichtserklärung unterzeichnet, bis 2040 nur noch Nutzfahrzeuge verkaufen zu wollen, die ohne fossile Brennstoffe betrieben werden.[8] MAN und Daimler Truck haben

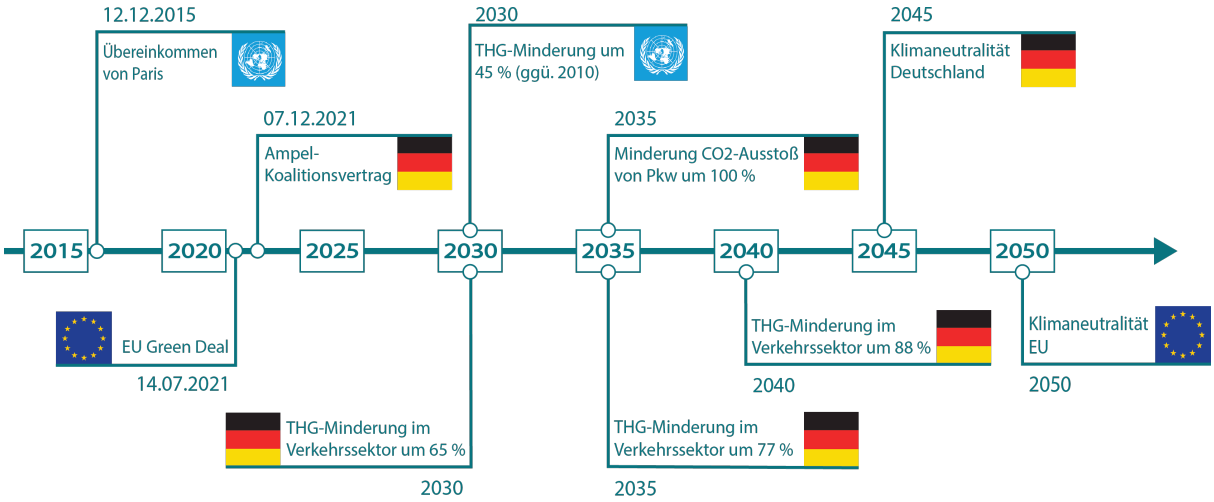

Abbildung 1: Dekarbonisierungsziele der Vereinten Nationen, der Europäischen Union und Deutschland.

Speziell für Deutschland als Industrieland mit großem Exportüberschuss, zentraler Lage in Europa und einem dichten Fernstraßennetz spielt der Straßengütertransport eine zentrale Rolle. Als führende Industrienation hat sich die Bundesregierung sogar noch ambitioniertere CO_2-Reduktionsziele als die EU gesetzt. Das Bundes-Klimaschutzgesetz in seiner

seither angekündigt, dass bis 2030 die Hälfte ihrer in Europa abgesetzten Fahrzeuge batterieelektrisch fahren sollen,[9] bei Volvo Trucks soll 2030 schon die Hälfte aller weltweit verkauften Lkw batterieelektrisch angetrieben werden.[10] Sowohl Scania als auch Volvo Trucks haben bis 2040 ein rein elektrisches Portfolio in Aussicht gestellt.[11,12] Eine umfangreiche Umfrage

unter Herstellern schwerer Nutzfahrzeuge, die zusammen 95 % des Marktes abdecken, hat ergeben, dass diese davon ausgehen, dass im Jahr 2030 über die Hälfte ihrer abgesetzten Fahrzeuge in Deutschland batterieelektrisch fahren wird.[13]

Die Entwicklung der schweren Nutzfahrzeuge selbst ist jedoch nur einer von mehreren Aspekten der Elektrifizierung des Transportsektors – ein weiterer ist das Laden und damit verbunden die notwendige Ladeinfrastruktur. Berechnungen zufolge wird der Großteil der geladenen Energie zwar im Depot bezogen werden,[14,15] darüber hinaus aber muss eine öffentliche Ladeinfrastruktur gewährleisten, dass die Durchführung von Langstreckentransporten mit schweren elektrischen Nutzfahrzeugen vergleichbar durchgeführt werden kann oder sogar Vorteile gegenüber dieselbetriebenen Fahrzeugen bietet. Aufgrund langer Transportwege und weit verzweigter Lieferketten ist der Aufbau einer Ladeinfrastruktur für E-Lkw ein inhärent internationales Thema. Sie muss internationalen Normen und Standards entsprechen, um eine umfassende Interoperabilität und Nutzungsfreundlichkeit zu gewährleisten. Des Weiteren empfiehlt es sich, Lösungsansätze für vorhandene Problematiken wie den Mangel an Stellplätzen für Lkw im Fernverkehr mitzuentwickeln. Laut Schätzung des Bundesverbands Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e. V. fehlen allein an deutschen Autobahnen derzeit zwischen 35 000 und 40 000 Stellplätze für Lkw.[16]

Aufgrund des Beschlusses, dass in der EU ab 2035 in den Bereichen Pkw und leichte Nutzfahrzeuge ausschließlich Null-Emissionsfahrzeuge neu zugelassen werden sollen, ist davon auszugehen, dass in diesen Segmenten bis 2050 eine starke Zunahme von Elektrofahrzeugen zu erwarten ist. Für deren Betrieb muss ausreichend Ladeinfrastruktur zur Verfügung stehen, die mit Strom aus erneuerbaren Quellen gespeist werden soll.

Mit dem Einsatz von mehr erneuerbarer Energie einher geht auch mehr dezentrale Erzeugung sowie die Flexibilisierung des Verbrauchs. Dadurch entstehen Wechselwirkungen zwischen dem Energiesystem und den Sektoren Industrie, Gebäude und Verkehr. Für eine erfolgreiche Energiewende ist daher der Ausbau von Übertragungs- und Verteilnetzen nötig. Es gibt Studien, die u. a. die Wechselwirkung zwischen der Elektrifizierung des Verkehrs und den Stromnetzen betrachten.[17]

Aufgrund der Größe der Traktionsbatterien von schweren Nutzfahrzeugen sowie der nötigen Energiemengen sind die Auswirkungen einzelner Ladevorgänge auf das Stromnetz potenziell größer als bei einzelnen Pkw. Analog zu Pkw ist jedoch auch bei elektrischen Nutzfahrzeugen die Steuerung von Ladevorgängen möglich, wobei die Möglichkeiten und Wirkungen noch erprobt werden müssen.

Eine erfolgreiche Netzintegration von schweren Nutzfahrzeugen und ihren großen Traktionsbatterien kann gelingen, indem z.B. Ladevorgänge von Zeiten hoher Nachfrage bzw. niedrigen Angebots in Zeiten niedriger Nachfrage bzw. hohen Angebots verschoben werden, wenn dies mit den Nutzungsanforderungen vereinbar ist. Dadurch können Lastspitzen geglättet, das Stromnetz entlastet und Stromkosten gespart werden. Speziell dort, wo Routen und Einsatzzeiten relativ feststehen (z. B. im ÖPNV), sind Ladevorgänge gut planbar, sodass potenzielle Flexibilitäten gewinnbringend eingesetzt werden können. Darüber hinaus können durch bidirektionales Laden die vorhandenen Kapazitäten von Traktionsbatterien unter anderem als Pufferspeicher zur Optimierung des Eigenverbrauchs genutzt werden.

Mit diesem Impulspapier stellen wir den aktuellen Stand* der Bestrebungen zur Netzintegration des elektrifizierten schweren Nutzfahrzeugverkehrs in Deutschland dar. Dafür liefern wir in Kapitel 2 einige grundlegende Begriffe rund um die Netzintegration (gesteuertes unidirektionales Laden, bidirektionales Laden, netzdienliches sowie marktdienliches und systemdienliches Laden), da die Begriffe in der

* Ende Oktober 2023

Branche oft unterschiedlich definiert und verstanden werden. Gleichzeitig legen wir den Umfang dieses Impulspapiers fest, indem wir aufzeigen, welche Fahrzeugklassen und Ladetechnologien wir betrachten. Unser Fokus liegt auf den schweren Nutzfahrzeugen, d.h. den Fahrzeugklassen N2-N3 bei Lkw und M2-M3 bei Bussen. In Kapitel 3.1 geben wir einen Überblick, welche Lösungen es bereits für die Netzintegration von schweren Nutzfahrzeugen gibt. Die Marktaktivitäten fokussieren sich derzeit auf das gesteuerte Laden der Fahrzeugklassen N1-N2 und M3, wobei seit 2023 auch bidirektional ladefähige Ladeinfrastruktur, leichte Nutzfahrzeuge und Busse verfügbar sind. In Kapitel 3.2 wird dargestellt, wie die geförderten Projekte aus dem Programm Elektro-Mobil die Netzintegration von schweren Nutzfahrzeugen mit ihrer Forschung vorantreiben. Für eine bessere Einordnung werfen wir auch einen Blick auf europäische und internationale Aktivitäten in diesem Bereich. In Kapitel 3.3 folgt ein Ausblick, wohin die Netzintegration von schweren Nutzfahrzeugen in der Zukunft führen kann. Zum Abschluss geben wir in Kapitel 4 drei Handlungsempfehlungen, um die Netzintegration des Nutzfahrzeugsektors voranzutreiben und so seine Dekarbonisierung zu beschleunigen.

2 GRUNDLAGEN

Durch den Hochlauf der Elektromobilität entwickelt sich mit hoher Dynamik eine Kopplung zwischen dem Verkehrs- und dem Energiesektor. An dieser Schnittstelle kommen Akteur:innen aus verschiedenen Bereichen zusammen, die Begrifflichkeiten unterschiedlich interpretieren. Um eine eindeutige Sprache zu verwenden, werden in diesem Kapitel die im vorliegenden Impulspapier verwendeten Begriffe erklärt. Außerdem zeigen wir die wichtigsten Anwendungsfälle und Ladeszenarien von schweren Nutzfahrzeugen auf, um die speziellen Anforderungen an Ladeinfrastruktur für diese Fahrzeuge zu verdeutlichen. Darüber hinaus werden – in Übereinstimmung mit Fachexpert:innen aus dem Förderprogramm Elektro-Mobil – einige technische Grundlagen verschiedener Technologien zum Laden von E-Lkw erklärt, an denen derzeit geforscht wird.

2.1 Netzintegration

Eine umfängliche Definition von „Netzintegration" (vehicle-grid integration, VGI) beinhaltet jede Art der Veränderung von Zeitpunkt, Verortung oder Geschwindigkeit eines (Ent-)Ladevorgangs eines mit dem Stromnetz verbundenen Elektrofahrzeugs mit dem Ziel, die Interaktion des Fahrzeugs mit dem Stromnetz zu optimieren und Vorteile für die Beteiligten zu generieren. Darunter fallen die Nutzung des Elektrofahrzeugs als mobiler Speicher, die Verringerung von Energiekosten, die vermehrte Einbindung der Produktion von erneuerbarer Energie, die Bereitstellung von Netzdienstleistungen und die Verringerung des Stromnetzausbaus.[18]

Die Begleitforschung Elektro-Mobil hat ein Whitepaper zur Steuerung von Ladevorgängen im Pkw-Bereich veröffentlicht,[19] wobei die zugrundeliegenden Kommunikationskanäle grundsätzlich auf den Lkw-Bereich übertragbar sind.[20] Dort wird zwischen ungesteuertem Laden, gesteuertem unidirektionalem Laden (V1G) und bidirektionalem Laden (V2G bzw. V2X) unterschieden. Diese Klassifizierung wird auch in diesem Papier angewendet und daher in den folgenden Unterkapiteln aufgegriffen und definiert (Kapitel 2.1.1 bis Kapitel 2.1.3). Der Vollständigkeit halber verweisen wir darauf, dass Branchenakteur:innen andere Klassifizierungen nutzen (z. B. Lademanagement/ V2G/Teilnahme am Regelmarkt[21]) – diese unterschiedlichen Klassifizierungen stellen eine Hürde für die Kommunikation in der Branche dar.

2.1.1 Ungesteuertes Laden

Wenn keine Form von Lademanagement zum Einsatz kommt, spricht man von „ungesteuertem Laden". In diesem Fall wird sofort mit der größtmöglichen Leistung geladen, die mit den beteiligten Geräten (Fahrzeug und Ladeinfrastruktur) möglich ist, bis der

spezifizierte Ladezustand erreicht ist. Dabei fallen die maximalen Kosten für den Energiebezug an.

2.1.2 Gesteuertes unidirektionales Laden

Unter „gesteuertem unidirektionalem Laden" (auch bekannt als „intelligentes Laden" oder „smart charging") versteht man einen Ladevorgang eines Elektrofahrzeugs („electric vehicle" → V1G), der aufgrund eines Signals in die Zukunft verschoben oder mit weniger als der technisch möglichen Maximalleistung durchgeführt wird. Dies kann z. B. ein Signal über den Zustand des Stromnetzes („electrical grid" → V1G) sein, um einer Überlastung des Stromnetzes vorzubeugen. Wenn ein dynamischer Stromtarif verwendet wird, kann durch die Verschiebung eines Ladevorgangs aus einer Zeit hoher Nachfrage in einen Zeitraum geringer Nachfrage zu niedrigeren Strompreisen geladen werden, z. B. wenn in dieser Zeit ein höheres Stromangebot aus erneuerbaren Quellen zur Verfügung steht. Die Energieübertragung erfolgt in jedem Fall vom Stromnetz in das Fahrzeug, also nur in eine Richtung (unidirektional → V1G).

2.1.3 Bidirektionales Laden

Im Gegensatz zum unidirektionalen Laden kann beim bidirektionalen Laden auch Energie aus der Fahrzeugbatterie entnommen werden (bidirektional → V2X), um damit einen nicht näher bestimmten Verbraucher (V2X) zu betreiben. Dieser Verbraucher kann sich zum Beispiel in einem Geschäfts- oder Wohngebäude auf der gleichen Liegenschaft wie der Ladepunkt und damit aus Sicht des Verteilnetzbetreibers hinter dem Netzanschlusspunkt befinden („vehicle to building/business" → V2B bzw. „vehicle to home" → V2H). Durch die Rückspeisefähigkeit in das Stromnetz („vehicle to grid" → V2G) kann zur System- bzw. Netzstabilität beigetragen und zusätzlicher Gewinn erwirtschaftet werden. Beispielsweise kann Strom in Zeiten großen Angebots zu günstigen Preisen bezogen und bei hoher Nachfrage zu höheren Preisen zurückgespeist werden.

2.1.4 Flexibilitäten

Die freien Energiespeicherkapazitäten in den Fahrzeugbatterien können als Flexibilitäten für das Stromnetz eingesetzt werden und dieses auf unterschiedliche Weise unterstützen. Die Nutzung wird daher oft in drei verschiedene Arten unterteilt: netzdienlich, marktdienlich und systemdienlich. Bei jeder Art der Nutzung von Flexibilitäten ist die optimierte Betriebsführung der Stromnetze grundlegend. Neben diesen dreien werden manchmal auch die Begriffe „netzfreundliches" bzw. „netzverträgliches" Laden verwendet, auf die wir hier nicht weiter eingehen. Eine trennscharfe Abgrenzung der Begriffe, insbesondere der netzfreundlichen und netzdienlichen Nutzung von Flexibilitäten, ist schwierig. Um für das vorliegende Papier ein einheitliches Verständnis zu schaffen, nutzen wir die folgenden Definitionen:

- *Netzdienlich* können Flexibilitäten genutzt werden, um Netzkosten zu senken. Dazu zählen unter anderem die Reduktion von Netzengpässen, der Netzausbaubedarf sowie die optimierte Betriebsführung des Netzes. Durch die Kenntnis sowie Plan- und Steuerbarkeit von Flexibilitäten kann die Netzlast verringert und ein Netzausbau aufgeschoben oder vermieden werden. Zum Beispiel kann der Abruf von Flexibilitäten zur Bereitstellung von Strom hinter einem Netzengpass dazu beitragen, die Belastung durch den Engpass zu verringern.[22]
- *Marktdienliche* Nutzung von Flexibilitäten bedeutet, dass diese am Day-Ahead- oder Intraday-Markt gehandelt werden, wodurch Angebot und Nachfrage am Markt ausgeglichen werden.[23]
- *Systemdienlich* bedeutet, dass Flexibilitäten von Übertragungsnetzbetreibern nachgefragt und am Regelleistungs- und Regelarbeitsmarkt gehandelt werden.[22]

2.2 Fahrzeugklassen, Anwendungsfälle und Ladeszenarien von Nutzfahrzeugen

Mit ca. 6,3 Millionen Fahrzeugen machen Nutzfahrzeuge rund 11 % aller Kraftwagen (Pkw und Lkw zusammengenommen) in Deutschland aus.[24] Aufgrund ihres im Vergleich zu Pkw hohen Gesamtgewichts benötigen Nutzfahrzeuge größere Traktionsbatterien, speziell im Schwerlastverkehr und im Langstreckentransport. Durch ihre vergleichsweise großen Batterien, gleichzeitig jedoch kurze Stand- und Ladezeiten können einzelne Ladevorgänge von schweren Nutzfahrzeugen einen deutlich größeren Einfluss auf das Stromnetz haben als die von elektrischen Pkw. Entsprechend groß ist auch das Potenzial, das sich durch gesteuertes und bidirektionales Laden dieser Fahrzeuge ergibt.

Kraftfahrzeuge werden gemäß EU-Richtlinie 20007/46/EG in verschiedene Gewichtsklassen unterteilt. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Fahrzeugklasse „N", Kraftfahrzeuge mit vier Rädern zur Güterbeförderung, sowie Fahrzeuge der Klasse „M", Kraftomnibusse zur Personenbeförderung, beispielsweise zum Einsatz im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV).[25,26] Nutzfahrzeuge dieser Klassen werden in der Regel für bestimmte Anwendungsfälle entwickelt. In Teilbereichen wie dem Linienverkehr innerhalb von Logistiknetzwerken oder im ÖPNV können Standzeiten, Reichweiten und Verbräuche im Vorfeld ermittelt und die durchzuführenden Fahrten entsprechend geplant werden. Aus den Anwendungsfällen ergeben sich konkrete Ladeszenarien, wodurch sich das Potenzial von gesteuertem und bidirektionalem Laden von verschiedenen Fahrzeugen in den jeweiligen Anwendungsfällen qualitativ ableiten lässt.

Im Rahmen dieses Impulspapiers werden speziell Fahrzeuge der Klassen N2 und N3 betrachtet, da diese eine eigene öffentliche Ladeinfrastruktur erfordern, die wiederum besondere Anforderungen an das Stromnetz mit sich bringt.

Die Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) hat im Rahmen von Cleanroom-Gesprächen mit Branchenvertreter:innen von Lkw-Herstellern die wichtigsten Ladeszenarien für schwere Nutzfahrzeuge – darunter fallen die schwereren Fahrzeuge der Klasse N2 sowie alle Fahrzeuge der Klasse N3 – zusammengefasst.[27] Es handelt sich dabei um drei nicht-öffentlich zugängliche Ladeszenarien (eigenes Betriebsgelände, z. B. Depot, fremdes Betriebsgelände, mobile Ladepunkte), drei öffentlich-zugängliche Ladeszenarien (Lade-Hubs in Gewerbe-

Tabelle 1: Fahrzeugklassen im Bereich der Nutzfahrzeuge und ihre zugehörigen Hauptanwendungsfälle.[25,28]

Fahrzeugklasse	Zulässiges Gesamtgewicht	Bezeichnung	Mögliche Anwendungsfälle	Mögliche Ladeszenarien
N1	< 3,5 t	Leichtes Nfz	Dienstleistung und Auslieferung („letzte Meile")	Im eigenen Unternehmen (nicht-öffentlich)
N2	3,5 -12 t	Leichter Lkw	Auslieferung im Nahverkehr	Im eigenen Unternehmen; bei Partnern (nicht-öffentlich)
		Schwerer Lkw	Auslieferung im Regionalverkehr, Transport von Volumengütern	
N3	> 12 t	Schwerer Lkw	Teil eines Gliederzuges im Güterfernverkehr	Depotladen (nicht-öffentlich); an Verkehrsachsen (öffentlich)
		Sattelzugmaschine	Güterfernverkehr	
M2	< 5 t	Kleinbus	Personenbeförderung mit mindestens 8 Sitzplätzen	Depotladen (nicht-öffentlich)
M3	> 5 t	Bus	Personenbeförderung mit mindestens 8 Sitzplätzen	Depotladen (nicht-öffentlich)

gebieten, z. B. Lieferantenparks oder Lade-Hubs an Verkehrsachsen für das Nachtladen oder das Zwischenladen bei Lenkpausen) sowie um ein gemischtes Ladeszenario (Umschlagpunkte wie z. B. Güterverteilzentren). Im Rahmen dieses Impulspapiers unterscheiden wir hauptsächlich zwischen nicht-öffentlichem Laden (z. B. in Depots) und öffentlichem Laden, wobei hier wiederum unterschieden wird zwischen Schnellladen (z. B. unter Tag an der Autobahn) und langsamem Laden (z. B. bei längeren Standzeiten über Nacht).

Die Elektrifizierung der Fahrzeugklassen N2 und N3 ist für die kommenden Jahre von großer klimapolitischer Bedeutung und bedingt eine genaue Planung bei der Errichtung der erforderlichen Ladeinfrastruktur. Die beschriebenen Ladeszenarien zeigen, dass diese sowohl öffentlich als auch privat aufgebaut werden muss, was die Zusammenarbeit privater Akteur:innen und öffentlicher Institutionen voraussetzt. Laut Studien werden zwischen 55 und 90 % der Energie an nicht-öffentlichen Ladepunkten bezogen werden, da dort einerseits die Elektrizitätskosten niedriger sind als an öffentlichen Ladepunkten und andererseits die Einbeziehung eigener Stromproduktion sowie stationärer Energiespeicher möglich ist.[14,15] Die restlichen Ladevorgänge werden an öffentlichen Ladepunkten durchgeführt. Aufgrund dieser hervorgehobenen Stellung des Depotladens wurde im Auftrag der „Dutch National Charging Infrastructure Agenda" ein Handbuch zur Elektrifizierung von Depots erstellt.[29]

Die identifizierten Ladeszenarien (nicht-öffentliches Depotladen, öffentliches langsames Nachtladen, öffentliches Schnellladen) bringen unterschiedliche Herausforderungen mit sich. Längere Stand- und somit auch Ladezeiten im Depot werden durch das Fahren in Schichten reduziert. Um etwa Dutzenden von Lkw per Schnellladen die Weiterfahrt nach einer 45-minütigen Ruhepause zu ermöglichen, müssen an hochfrequentierten Raststätten sehr hohe Anschlussleistungen zur Verfügung gestellt werden.[30,31] Die einzige bisher breit verfügbare Ladeinfrastruktur beruht auf dem CCS2/Kombo-Steckersystem. Daher wird generell von einer konduktiven, steckerbasierten Ladeinfrastruktur für die Zukunft ausgegangen, die jedoch durch komplementäre Ladetechnologien ergänzt werden könnte. Im Folgenden werden die Anforderungen an eine künftige Ladeinfrastrukturlandschaft erläutert und potenzielle Ergänzungen zum stationären Schnellladen aufgezeigt.

2.3 Ladetechnologien für schwere Nutzfahrzeuge

Zum Laden batterieelektrischer schwerer Nutzfahrzeuge bedarf es einer durchdachten Kombination bedarfsgerechter Ladeinfrastruktur zum einen im öffentlichen Raum und zum anderen auf privatem Grund. Der zur Versorgung dieser Ladeinfrastruktur nötige Netzausbau ist abhängig davon, wieviel Ladeleistung an öffentlicher Ladeinfrastruktur an den Verkehrsachsen benötigt wird, wieviel in privaten Depots bzw. an Umschlagsplätzen geladen wird, mit welcher Ladetechnologie geladen wird und wie hoch der Anteil des gesteuerten Ladens ist. Die Prognostizierbarkeit von Energiebedarf und Ladeleistung hängt davon ab, wie genau den Flottenbetreibern ihre Routen im Personen- sowie im Gütertransport bekannt sind. Je mehr Flottenbetreiber auf dem eigenen Betriebsgelände laden, desto besser können diese Flotten tarifoptimiert geladen und eigene Energieproduktion eingebunden werden. Darüber hinaus können durch die Netzintegration von Nutzfahrzeugen mit ihren enormen Batteriekapazitäten zusätzliche Geschäftsmodelle erschlossen werden. Voraussetzung für beispielsweise das Erbringen von Systemdienstleistungen oder die netzdienliche Steuerung von Ladevorgängen ist jedoch, dass die Durchführung des Transportgeschäfts dadurch nicht beeinträchtigt wird.

Grundsätzlich sind mehrere Ladetechnologien dazu in der Lage, die großen Traktionsbatterien schwerer Nutzfahrzeuge mit den erforderlichen Energiemengen zu versorgen, wobei es zwischen den einzelnen Technologien Unterschiede in den Reifegraden gibt. In den Projekten des Förderprogramms Elektro-Mobil werden diverse Ladetechnologien

erforscht und es wird untersucht, wie diese sich synergetisch ergänzen können. Diese Technologien haben ähnliche Gesamtwirkungsgrade und damit Energiebedarfe. Allerdings bedingen die verschiedenen Ladetechnologien unterschiedliche räumliche und zeitliche Konzentrationen von Ladevorgängen, woraus sich unterschiedliche Anforderungen an die Anzahl der nötigen Ladestandorte sowie deren Netzanschlussleistungen ergeben. Außerdem existieren technologiespezifische Möglichkeiten zur Steuerung von Ladevorgängen bzw. der Unterstützung des Stromnetzes durch bidirektionales Laden.

Unabhängig von der Ladetechnologie gilt, dass die Durchführung des Transports oberste Priorität hat. Für ein wirtschaftlich orientiertes Unternehmen sind Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Ladeinfrastruktur unerlässlich. Für Anwendungsfälle, die eine öffentliche Ladeinfrastruktur benötigen, sind die wichtigsten Voraussetzungen die Möglichkeit der Reservierung eines Stellplatzes inklusive Ladepunkt und -leistung, hohe Zuverlässigkeit, Interoperabilität (länder- sowie markenübergreifend) und Nutzungsfreundlichkeit sowie schnelle Reparatur im Problemfall. Neben diesen Aspekten ist aus Sicht der Nutzenden eine weitere Voraussetzung für den Umstieg auf E-Lkw die Kostenparität mit Dieselfahrzeugen. Jenseits der technischen Voraussetzungen müssen jedoch auch menschliche Bedürfnisse beachtet werden, darunter sanitäre Einrichtungen, Bewirtschaftung, Witterungsschutz, Lärmschutz und Sicherheit. Darüber hinaus ist zu bedenken, dass viele Transportunternehmen grenzüberschreitend aktiv sind. Daher bietet es sich an, den Aufbau von Ladeinfrastruktur für den Nutzfahrzeugverkehr europäisch zu planen.

2.3.1 Electric Road Systems

Hybride Systeme aus Oberleitung und Dieselmotor befinden sich seit ca. 15 Jahren in der Entwicklung für den Schwerlastverkehr auf der Langstrecke.[32] In Deutschland wurden bereits drei mehrjährige Feldversuche zur Erprobung von batterieelektrischen Lkw an der Oberleitung im Realbetrieb durchgeführt.[33] Im Bereich der Oberleitung kann nicht nur auf 100 Jahre Erfahrungen aus schienengebundenen Verkehrssystemen zurückgegriffen werden, sondern es besteht auch eine weltweite Industrie mit etablierten Lieferketten und Produktionskapazitäten mit einem jährlichen Umsatz von ca. 10 Milliarden Euro.[34]

Ein E-Lkw, der beim Fahren per Pantograph mit einer Oberleitung verbunden ist, kann seinen Elektromotor kontinuierlich direkt aus dem Stromnetz speisen.[35] Neben der direkten Speisung des Motors zur Fortbewegung ermöglicht der Pantograph auch dynamisches Laden der Traktionsbatterie während der Fahrt sowie stationäres Laden. Dadurch ist eine Entkopplung von Rast- und Ladeort möglich und die Flächenknappheit wird nicht zusätzlich verschärft. Der größte Vorteil eines batterieelektrischen Lkw mit zusätzlichem Pantographen ist die Möglichkeit, eine kleinere Traktionsbatterie verbauen zu können als in einem Lkw, der lange Strecken ohne Zwischenladen zurücklegen können muss. Da die Traktionsbatterie ca. 50 % des Preises eines Lkw ausmacht,[36] bieten Oberleitungs-Lkw Kostenvorteile bei der Anschaffung gegenüber anderen Ladetechnologien. Gleichzeitig ist das Fahrzeug leichter und hat einen geringeren Verbrauch, wodurch auch die laufenden Kosten niedriger ausfallen. Zusätzlich erfolgt das Laden während der Fahrt kontinuierlich und bei geringer Ladeleistung, wodurch die verbaute Batterie geschont wird. Auf der anderen Seite sind Fahrzeuge mit kleineren Batterien stärker auf eine flächendeckende Ladeinfrastruktur angewiesen, da sie abseits der Oberleitung nur kürzere Strecken zurücklegen können. Laut einer Studie aus dem Jahr 2020 beträgt die berechnete Länge eines Oberleitungsnetzes in Deutschland im Endausbau ca. 4000 km und wird mit Aufbaukosten von rund 12 Milliarden Euro beziffert.[37]

Durch die räumliche Verteilung der für die Oberleitungsinfrastruktur nötigen Unterwerke entlang der Autobahn wäre eine dezentralisierte Anbindung an das Stromnetz möglich, wodurch der Bau großer Netzanschlüsse und die vorausgehenden langwierigen Genehmigungsverfahren vermieden werden

könnten. Des Weiteren würde sich die Last während des Betriebs gleichmäßiger auf die Stromnetze verteilen als im Fall weniger, aber größer dimensionierter Netzanschlüsse. Im Gegenzug wäre es notwendig, viele kleine Netzanschlüsse zu schaffen und die Leitungen an die Autobahn zu legen, wofür Zugang zu vielen Flächen mit vielen Anliegern benötigt werden würde. Sollte die Verteilung auf mehrere kleine Netzanschlüsse in einer Region nicht möglich sein, kann die nötige Leistung auch über wenige, größer dimensionierte Leitungen von Mittel- bzw. Hochspannungsnetzen zur Autobahn gebracht werden. In diesem Fall könnte das Mittelspannungsnetz streckenweise mit der Oberleitungsinfrastruktur entlang der Fernstraße mitgeführt werden.

Die Integration eines Pantographen in ein Fahrzeug mit einer anderen Ladetechnologie ist grundsätzlich möglich. Durch die direkte Speisung des Elektromotors werden Wandlungsvorgänge vermieden, wodurch die Energieeffizienz steigt und die Batterie weniger altert. Allerdings verursacht der Einbau des Pantographensystems zusätzliches Gewicht im Fahrzeug, zusätzliche Komplexität bei der Produktion und entsprechend höhere Anschaffungskosten.

Beim dynamischen Laden an der Oberleitung kann in der Regel kein gesteuertes Laden (V1G) zum Einsatz kommen, weil die abgegriffene Energie direkt für den Betrieb des Elektromotors genutzt wird. Wenn die Traktionsbatterie voll ist, könnte ein durch Rekuperation generierter Energieüberschuss ins Stromnetz zurückgespeist werden (V2G), wobei die Energiemengen aber gering wären. Beim statischen Laden per Pantograph (z. B. im Depot) könnten V1G bzw. V2G leichter umgesetzt werden, allerdings bietet die geringe Kapazität der verbauten Traktionsbatterie wenig Spielraum für solche Anwendungen.

Ein zur Oberleitung alternatives elektrisches Straßensystem für den Fernverkehr basiert auf drahtloser Energieübertragung per Induktion. Die Vor- und Nachteile für das Energiesystem und die Nutzenden entsprechen im Prinzip denen der Oberleitung, jedoch könnte ein kontaktloses System auch von Pkw genutzt werden, sofern Interoperabilität sowie ein Abrechnungssystem für die bezogene Energie gegeben sind. Ein großflächiges Ausrollen der Infrastruktur wird als sehr zeit- und kostenintensiv eingeschätzt, da die energieübertragenden Spulen in die Straße eingelassen werden und dafür eine zeitweise Unterbrechung des Verkehrs auf dem entsprechenden Fahrstreifen nötig ist. Wenn die Ladeinfrastruktur hauptsächlich vom Schwerlastverkehr genutzt werden soll, könnte das Ausrollen mit den Wartungszyklen der rechten Autobahnspur kombiniert werden, die durch den Lkw-Verkehr am schnellsten verschleißt. Das Ausrollen würde sich auf diese Weise jedoch langwierig gestalten. Insgesamt befindet sich induktives Laden für den Fernverkehr noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium. Entsprechend liegen noch keine Langzeiterfahrungen zur Haltbarkeit einer in die Fernstraße integrierten Energieversorgungsinfrastruktur vor, weshalb die Kosten und Risiken der Technologie aktuell noch schwer verlässlich zu beziffern sind.

2.3.2 Megawattladen

Um Tagesfahrleistungen von 700-800 km bewältigen, sind 400 km Reichweite theoretisch ausreichend, sofern nach einer Lenkpause wieder eine volle Traktionsbatterie zur Verfügung steht. Die Charging Interface Initiative e. V. (CharIN) treibt seit 2018 die Entwicklung des Megawatt Charging System (MCS) voran, mit dem Ladeleistungen von bis zu 3,75 MW (3000 A bei 1250 V) ermöglicht werden sollen.[38] Das erste Etappenziel sind Ladeleistungen bis 1 MW, was in den Augen der meisten E-Lkw-Hersteller ausreichend sein wird.[13]

Allerdings befinden sich auch bereits E-Lkw bis 44 t zulässigem Gesamtgewicht mit Reichweiten von 500 bis 800 km in (Vor-)Serienproduktion,[39,40,41] womit auch längere Touren als 400 km ohne Zwischenladung möglich sind. In diesem Fall gelten zwar ebenfalls die gesetzlich vorgeschriebenen Ruhezeiten, es wird jedoch nicht unbedingt ein Parkplatz mit Lademöglichkeit benötigt, wodurch die Flächenknappheit nicht weiter verschärft wird. Außerdem besteht durch größere Reichweiten auch die

Möglichkeit, Touren in Gegenden mit schwächer ausgebauter Ladeinfrastruktur zu fahren. Um diese großen Reichweiten zu ermöglichen, sind Traktionsbatterien entsprechender Größe nötig, wodurch auch der Bedarf an Rohstoffen für die verbauten Aktivmaterialien steigt. Zum Beispiel beziffert der Lkw-Hersteller Designwerk das Gewicht seiner Batterie mit 1000 kWh mit 5620 kg.[42,43] Mit der Batteriekapazität steigen sowohl der Kaufpreis als auch das Eigengewicht des Fahrzeugs, wodurch ebenfalls der durchschnittliche Verbrauch steigt und die Energieeffizienz des Fahrzeugs sinkt.

Bereits heute legen Lkw-Hersteller die Kapazitäten ihrer Traktionsbatterien von Fahrzeugen für den Langstreckentransport auf Reichweiten von 400-500 km aus.[44,45,46] Damit können Fahrten zwischen Ladepunkten bequem ausgeführt werden, ohne unverhältnismäßig schwere Batterien mitzuführen und Effizienzverluste in Kauf nehmen zu müssen. Fahrzeuge mit höheren Reichweiten könnten jedoch besser in Regionen eingesetzt werden, in denen Schnellladeinfrastruktur nicht wirtschaftlich betrieben werden kann, z. B. in Gegenden mit niedriger Bevölkerungsdichte oder geringem Verkehrsaufkommen.

Zur Bereitstellung der nötigen Ladeleistungen von Megawattladeparks sind Netzanschlüsse an das Mittelspannungs- oder Hochspannungsnetz nötig. Die Autoren von zwei Studien im Auftrag von Transport & Environment (T&E) bzw. der Nationalen Leitstelle Ladeinfrastruktur haben für einen prototypischen Logistik-Hub eine nötige Netzanschlussleistung von ca. 60 MW für beide Fahrtrichtungen zusammen errechnet, wodurch ein Anschluss an das Hochspannungsnetz nötig wäre.[30,31] Diese hohe örtliche und zeitliche Konzentration von abgerufener Leistung ist in seiner Größenordnung vergleichbar mit einer Stadt mit 75 000 Einwohner:innen[47] und stellt eine große Herausforderung für das Stromnetz dar. Im Projekt HoLa wurden, basierend auf realen GPS-Daten, die attraktivsten Standorte für solche Ladeparks in Deutschland ermittelt und auf einer interaktiven Website dargestellt.[48] Die Autoren einer Studie von T&E schätzen, dass auf dem Weg zur Erreichung der Klimaziele für ein flächendeckendes Netz von konduktiver Ladeinfrastruktur für den Langstreckengütertransport entlang der TEN-T-Verkehrswege in Europa bis 2030 ca. 6600 öffentliche Hochleistungsladepunkte und 4400 nicht-öffentliche Ladepunkte nötig sind, deren Kosten sich auf insgesamt ca. 1,9 Milliarden Euro belaufen.[49]

Durch den hohen Termindruck im Transportsektor ist davon auszugehen, dass V2X-Anwendungen in Ladeszenarien unter Tag an der Autobahn bzw. bei Lade-/Entladestopps mit den aktuell verfügbaren Batteriegrößen und Ladegeschwindigkeiten kaum möglich sein werden, da die Fahrzeuge nach kurzen Standzeiten zur Weiterfahrt bereit sein müssen. Gesteuertes Laden kann jedoch zum Einsatz kommen, da Traktionsbatterien üblicherweise nicht im gesamten Bereich von 0-100 % mit voller Leistung geladen werden. Außerdem kann in Abhängigkeit vom State of Charge und der übrigen Verweildauer anderer ladender Fahrzeuge im gleichen Ladepark eine Priorisierung vorgenommen werden, welche Fahrzeuge höhere Ladeleistungen benötigen als andere. Während längerer Standzeiten, wie z. B. über Nacht an der Autobahn oder am Wochenende im Depot, sind jedoch sowohl gesteuertes Laden als auch V2X-Anwendungen denkbar. Speziell die Möglichkeit der Steuerung von Ladevorgängen sollte bei der Auslegung des Netzanschlusses von Depots und Übernachtparkplätzen berücksichtigt werden, um den baulichen Aufwand möglichst gering zu halten und Kosten zu sparen.[29]

2.3.3 Batteriewechselsysteme

Fahrzeuge im Langstreckenverkehr könnten auch wieder volle Reichweite erlangen, indem die (teilweise) leeren Traktionsbatterien gegen vollgeladene getauscht werden. In den Jahren 2017 bis 2020 förderte das Bundeswirtschaftsministerium ein Projekt, in dessen Verlauf ein Lkw auf Elektroantrieb umgerüstet und mit Traktionsbatterien ausgestattet wurde, die in weniger als 15 Minuten manuell per Gabelstapler gewechselt werden konnten.[50] Ein voll-

automatisches Batteriewechselsystem (BWS) für E-Lkw mit Wechselzeiten von wenigen Minuten wird derzeit durch ein Projekt im Förderprogramm Elektro-Mobil entwickelt.[51]

Der zusätzliche Flächenbedarf eines BWS fällt geringer aus als der einer Megawattladeinfrastruktur, da die Lenkpause nach dem Batteriewechsel an einem beliebigen Stellplatz verbracht werden kann. Der Rohstoffbedarf eines BWS ist zwar grundsätzlich höher, da zusätzlich zu den Traktions-batterien im Fahrzeug auch Wechselbatterien vorgehalten werden müssen. Allerdings können die eingelagerten Traktionsbatterien durch unidirektional gesteuertes Laden sowohl netzdienlicher als auch batterie-schonender geladen werden, wodurch sie länger genutzt werden können. Den eingelagerten Batterien kann sogar eine duale Nutzung als stationäre Speicher zukommen, wodurch weniger Speicher an anderer Stelle benötigt werden. Da die Batterien in diesem Fall nicht im Fahrzeug liegen, handelt es sich strenggenommen folglich nicht um V2X. Trotzdem könnte die in den eingelagerten Batterien zur Verfügung stehende Flexibilität durch bidirektionales Laden auch den Betreibern von Batteriewechsel-stationen zusätzliche Geschäftsmodelle ermöglichen. In Dänemark wird ein solcher Einsatz von Wechsel-batterien aus dem Pkw-Bereich zur Frequenzhaltung bereits erprobt.[52]

Fahrzeuge mit Reichweiten, die sich für den Einsatz im Langstreckenverkehr eignen, können sowohl per BWS als auch per MCS innerhalb der Pausenzeiten mit ausreichend Energie für den nächsten Strecken-abschnitt versorgt werden. Aufgrund kompatibler Batteriegrößen könnten sich Batteriewechsel und Megawattladen synergetisch ergänzen. Wenn beide Technologien in einem Fahrzeug verbaut sind, kann an beiden Ladeinfrastrukturen Strom bezogen werden, wobei sich die Komplexität der Fahrzeug-produktion durch zwei Ladesysteme erhöht. Welche Ladeinfrastruktur an einer gegebenen Stelle errichtet wird, kann anhand der örtlichen Gegebenheiten wie vorhandenem Netzanschluss und Flächenverfügbar-keit entschieden werden. Ein batteriewechselfähiger E-Lkw könnte auch mit einem zusätzlichen Pantographensystem ausgestattet werden, wobei auch hier Komplexität bei der Produktion sowie zusätzliches Gewicht hinzukommen.

Öffentlich verfügbare Hochrechnungen für die Kosten für ein initiales Netz von Batteriewechsel-stationen in Deutschland sind derzeit nicht bekannt. In Deutschland bzw. Europa gibt es aktuell noch keinen Markt an Batteriewechselsystemen für Lkw, während in China im Jahr 2022 allein ca. 18 000 batteriewechselfähige E-Lkw verkauft wurden.[53] Diese werden hauptsächlich in Anwendungen mit vergleichsweise kurzen Strecken von weniger als 100 km (einfache Strecke), wie z. B. in Häfen, Rohstoffbetrieben und der Städtelogistik eingesetzt.

3 NETZINTEGRATION ELEKTRIFIZIERTER SCHWERER NUTZFAHRZEUGE

Die Elektrifizierung des Nutzfahrzeugverkehrs ist in den Fahrzeugklassen N1 und N2 – gemessen an der steigenden Zahl erhältlicher Modelle (siehe Kapitel 3.1.1) – sowie M2 und M3 – gemessen an der steigenden Zahl der Busse auf den Straßen (siehe Kapitel 3.1.2) – bereits in vollem Gange. Daher werden für diese Fahrzeugklassen auch schon Lösungen zur Netzintegration umgesetzt, die in Kapitel 3.1 beispielhaft dargestellt werden.[54,55] Darüber hinaus wird gezeigt, dass Elektrofahrzeuge der Klasse N3 auf Strecken bis 300 km zum Einsatz kommen und auch gesteuert geladen werden. Es wird erwartet, dass auch der entstehende Markt für Elektrofahrzeuge in der Fahrzeugklasse N3 für längere Strecken stetig wachsen wird.[56,57] In Kapitel 3.2 wird dargestellt, welche Forschungs-aktivitäten zur Netzintegration dieser Fahrzeuge durchgeführt werden. Basierend auf Informationen aus Workshops und Wissensaustauschen wird in Kapitel 3.3 ein Ausblick gegeben, welche Aspekte

der Netzintegration von E-Lkw noch nicht ausreichend erforscht sind und in Zukunft untersucht werden sollten.

Außerdem wird in Kapitel 3 ein Überblick darüber gegeben, welche Lösungen zur Netzintegration elektrischer Nutzfahrzeuge aktuell am Markt verfügbar sind und welche Lösungen sich derzeit noch in der Entwicklung befinden. Aufgrund der Vielzahl an Umsetzungsvorhaben, Pilotversuchen und Forschungsprojekten besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit. Weiterhin ist zu beachten, dass die Entwicklungen am Markt derzeit sehr dynamisch sind. Grundlage dieses Kapitels sind Informationen, die bis Ende Oktober 2023 zugänglich waren; spätere Informationen wurden nicht berücksichtigt.

3.1 Status Quo 2023

Die Marktrecherche und Umsetzungsbeispiele zeigen, dass im Fall von E-Lkw die Netzintegration hauptsächlich bei den Fahrzeugklassen N1 und N2 und durch gesteuertes Laden stattfindet. Erste Angebote und Beispiele zum einen für das bidirektionale Laden der Fahrzeugklassen N1 und N2 und zum anderen für das gesteuerte Laden von Fahrzeugen der Klasse N3 sind erkennbar. Das bidirektionale Laden von Fahrzeugen der Klasse N3 wird derzeit nur von einem Fahrzeughersteller und noch mit keiner serienmäßig erhältlichen Ladeinfrastruktur angeboten. Die Anwendungsbeispiele konzentrieren sich dabei auf nicht-öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur.

Die Netzintegration von E-Bussen ist bereits weiter fortgeschritten. Es gibt viele Umsetzungsbeispiele des gesteuerten Ladens von schweren Bussen der Klasse M3. Seit 2023 gibt es am Markt auch mehrere Anbieter für bidirektional ladefähige Infrastruktur für E-Busse, die sowohl für das nicht-öffentliche Laden im Depot als auch für das Schnellladen im öffentlichen Bereich genutzt werden kann.

Sowohl bei E-Lkw als auch bei E-Bussen wird konduktive Ladetechnologie eingesetzt, jedoch noch nicht im Megawattbereich.

3.1.1 Lkw (N1-N3)

Die Zahl der rein elektrisch angetriebenen Modelle in den Nutzfahrzeugklassen N1 und N2 ist in den vergangenen Jahren stetig gestiegen. Zu den Fahrzeugherstellern, die leichte E-Nutzfahrzeuge anbieten, gehören u. a. Citroën, Fiat, Ford, Opel, Mercedes-Benz, Nissan, Peugeot, Renault, Toyota und VW.[58,59] Die Entwicklung schwerer elektrischer Nutzfahrzeuge der Klasse N3 steht zwar noch relativ am Anfang, mehrere Modelle sind jedoch bereits erhältlich und werden in Kürze durch weitere ergänzt (siehe Anlage 1 Tabelle Marktübersicht E-Lkw). Mit der aktuellen Technologie sind in allen auf deutschen Straßen zulässigen Gewichtsklassen (bis 44 t zulässiges Gesamtgewicht) Reichweiten bis 300 km darstellbar. Bei hohen Zuladungen und Reichweiten von über 500 km sind Batteriegrößen von über 600 kWh nötig. Die Schnellladeleistungen von serienmäßig erhältlichen Modellen bewegen sich meist zwischen 100 und 400 kW, erste Modelle sind jedoch bereits auf Megawattladen ausgelegt.

Das unidirektional gesteuerte Laden ist heute standardmäßig möglich. Da der hauptsächlich von japanischen Fahrzeugherstellern verwendete CHAdeMO-Standard bereits frühzeitig auf bidirektionales Laden ausgelegt war, gab es im Jahr 2021 unter den Elektrofahrzeugen der Klasse N1 nur japanische Anbieter (z.B. Nissan), die bidirektional laden konnten, die in Europa jedoch nicht weit verbreitet waren.[60] Seit 2022 bietet Ford mit dem F-150 Lightning ein leichtes E-Nutzfahrzeug an, welches zum Beispiel Werkzeuge laden und per CCS-Stecker über bidirektionales Laden ganze Haushalte mit Strom versorgen kann, sofern diese über die entsprechende Hardware von Ford verfügen.[61] Auch der Ford E-Transit Custom kann bidirektional laden und Geräte mit bis zu 2,3 kW versorgen.[62] VW bietet seit 2022 den ID. Buzz mit bidirektional ladefähigem CCS2-Stecker an.[63] In den Klassen N2 und N3 bietet derzeit nur MAN ein bidirektional ladefähiges E-Nutzfahrzeug an.

Bisher wurden 27 Wallboxen und Ladestationen angekündigt, die kurz vor dem Marktstart sind, nach

eigenen Angaben V2X ermöglichen und in Serie gefertigt werden (21 DC, 3 AC, 3 unbekannt; siehe Anlage 2 Tabelle Marktübersicht Ladeinfrastruktur).[64] Nur wenige Produkte können zum jetzigen Zeitpunkt (Ende 2023) direkt käuflich erworben werden, jedoch gibt es für viele bidirektional ausgelegte Wallboxen und Ladestationen eine Option zur Vorbestellung. Die Leistungen dieser Ladestationen reichen von 10-25 kW und eignen sich eher für das Laden von leichten Nutzfahrzeugen. Während leichte Nutzfahrzeuge, wie z.B. der VW ID. Buzz, mit 11 kW AC geladen werden können (an einer DC-Schnellladesäule auch mit bis zu 170 kW),[65] benötigen E-Lkw im Fernverkehr höhere Ladeleistungen. Am Markt erhältliche Schnellladestationen bieten Ladeleistungen zwischen 350 und 480 kW, z. B. von Tesla,[66] Ekoenergetyka,[67] Tritium,[68] ABB,[69] Elexon,[70] Alpitronic[71] und Kempower[72] und sind aktuell nicht serienmäßig V2X-fähig (siehe Tabelle 2).

Laut Maßnahme 61 des Masterplan Ladeinfrastruktur II sollte in Deutschland bis Q1/2023 ein Konzept für den Aufbau eines initialen, skalierbaren Ladeinfrastrukturnetzes für Lkw entlang des Fernverkehrsnetzes erstellt werden.[73] Die in Maßnahme 62 des gleichen Dokuments bis Q3/2023 vorgesehene Ausschreibung dieses Ladenetzes ist jedoch bis Ende 2023 noch nicht erfolgt.[74] Ein Unternehmen, das bereits mit der Planung und dem Aufbau von dedizierter Ladeinfrastruktur für den elektrifizierten Schwerlastverkehr begonnen hat, ist ein Joint Venture von Volvo Trucks, Daimler Truck und der Traton SE, zu der Hersteller wie Scania und MAN gehören. Ziel dieses Joint Ventures mit dem Namen Milence ist der Aufbau von Schnellladeparks in ganz Europa bis 2027 mit mindestens 1700 Schnellladepunkten, deren Ladeleistungen zwischen 300 und 1000 kW liegen und die genug Platz zum Parken von Sattelzügen bereitstellen sollen.[75] Zusätzlich hat Aral bereits innerhalb Deutschlands einen 600 km langen Schnellladekorridor teilweise in Betrieb genommen, der in seiner ersten Ausbaustufe 32 Ladepunkte mit bis zu 300 kW Ladeleistung umfassen soll und ebenfalls auf E-Lkw ausgelegt ist.[76] In Schweden wird ebenfalls an einem flächendeckenden Schnellladenetz für E-Lkw gearbeitet. Der Ladestationenbetreiber Nimbnet, der Ladehardware-Hersteller Kempower und der Infrastrukturdienstleister Vitra planen bis Ende 2023 die ersten Lkw-Ladepunkte in Göteborg, Söderhamn, Sundsvall und Nordmaling. Über CCS2-Anschlüsse können E-Lkw nach Reservierung mit bis zu 350 kW geladen werden.[77]

Als aktuelles Anwendungsbeispiel für elektrische Nutzfahrzeuge in Deutschland dient die Deutsche Post DHL Group mit einer Flotte von 21 500 Elektrofahrzeugen, die an mehr als 27 500 nichtöffentlichen Ladepunkten auf Betriebshöfen gesteuert geladen werden. In der Fahrzeugklasse N1 verfügt

Tabelle 2: Am Markt erhältliche Schnellladesäulen für E-Lkw.

Anbieter	Name	Ladeleistung (max.)	AC/DC	Stecker
Tesla	Supercharger V4	350 kW	DC	CCS2
Ekoenergetyka	SAT 600 HPC	350 kW	DC	CCS2
Tritium	PK350	350 kW	DC	CCS2/CHAdeMO
ABB	Terra 360	360 kW	DC	CCS2/CHAdeMO
Alpitronic	HYC 400	400 kW	DC	CCS2/CHAdeMO
Kempower	Satellite	400 kW	DC	CCS2/CHAdeMO
Elexon	sxHPC480	480 kW	DC	CCS2

das Unternehmen aktuell über einen Anteil von ca. 25 % elektrischen Nutzfahrzeugen und strebt bis 2025 einen Anteil über 38,5 % an. In den Klassen N2 und N3 sind ca. 18 % der Fahrzeuge elektrifiziert. Zum Einsatz kommen dabei in Deutschland Fahrzeuge der Marken StreetScooter,[78] Mercedes-Benz eVito,[79] Ford E-Transit,[80] Iveco eDaily,[81] Volvo FL Electric[82] und weitere. Die Steuerung der Ladevorgänge findet bundesweit über eine Cloud statt. Dabei werden u. a. eine Spitzenlastglättung, das Laden bei niedrigen Spotmarktpreisen und eine Eigenverbrauchsoptimierung erreicht.[83,84] Außerdem testet Deutsche Post DHL in Deutschland das dynamische Laden eines rein batterieelektrischen Lkw von Scania an der Oberleitung.[85]

Weitere Beispiele für die frühe Akzeptanz von schweren E-Lkw finden sich bei der Österreichischen Post AG[86] sowie der Spedition Falkenklev Logistik[87,88] und dem Logistikunternehmen Einride[89] in Schweden, die alle im Begriff sind, ihre elektrischen Flotten auszubauen. Dabei kommen Lkw von Volvo, Scania, DAF und Daimler Truck in den Gewichtsklassen zwischen 16 und 64 t (im kombinierten Verkehr in Schweden) zum Einsatz. Geladen werden diese Fahrzeuge an Ladepunkten von Elexon, Ekoenergetyka und Kempower mit bis zu 250 kW und ihre Reichweiten variieren zwischen 150 und 300 km. Die Ladeorte sind dabei Betriebshöfe, Logistikterminals und Lade-Hubs. Für das gesteuerte Laden kommen das Lade- und Energiemanagementsystem ChargePilot von The Mobility House[90,91] sowie die Softwares ChargEye und Saga von Kempower[92] bzw. Einride[93,94] zum Einsatz.

3.1.2 Bus (M2-M3)

2022 waren in Deutschland bereits etwa 1600 batterieelektrische Busse der Fahrzeugklasse M3 unterwegs, Tendenz steigend.[95] 2021 waren es noch rund 1100 Batteriebusse.[96] Zu den Herstellern dieser Elektro-Busse gehören u. a. Mercedes-Benz, Solaris, VDL, MAN, Ebusco und BYD. Auf europäischen Straßen fuhren 2021 geschätzte 8500 elektrische Busse (Hybrid-, Trolley- und Brennstoffzellenbusse eingeschlossen).[97] Entsprechende Ladeinfrastruktur für Busdepots von Kempower,[98] ABB,[99] Heliox,[100] Jema Energy,[101] Hitachi Energy,[102] Ekoenergetyka,[103] Siemens,[104] und Schunk[105] wird heute schon an verschiedenen Stellen eingesetzt.

Die in der EU bereits zum Einsatz kommenden Elektrobusse im ÖPNV können teilweise per DC-Schnellladung über CCS2 von Lade- und Energiemanagementsystemen intelligent geladen werden. Die Elektrobusse fahren bereits in verschiedenen europäischen Städten, z.B. Aalborg (Dänemark),[106,107] Amsterdam (Niederlande),[108] Mailand (Italien),[109] Aveiro (Portugal),[110] und Zaragoza (Spanien).[111] Die Steuerung der Ladevorgänge erfolgt über die Softwares ChargEye (Kempower), ChargePilot (The Mobility House), DepotFinity (Siemens), Grid-eMotionTM Fleet (Hitachi) oder die Smart Charging Intelligent Management Platform (Enel X). Dabei kann es durch die Steuerung pro Depot (also nicht-öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur) jährliche Einsparungen bis zu 100 000 Euro geben (siehe Beispiel Amsterdamer Verkehrsbetriebe). Dafür sorgen Spitzenlastkappung durch unidirektional gesteuertes sowie tarifoptimiertes Laden. The Mobility House deklariert dabei, dass bereits über 10 % des europäischen Busmarkts mit dem eigenen Lade- und Energiemanagementsystem gesteuert geladen werden.[112] Noch 2022 sprach The Mobility House im eigenen Whitepaper „Elektrobusse intelligent laden“ davon, dass „es zukünftig möglich sein [wird], Energie aus den Batterien von Elektrofahrzeugen zurück ins Energiesystem zu speisen“.[113] eMIS bietet seit 2023 eine bidirektionale Ladeinfrastruktur für E-Bus-Flotten an und ermöglicht damit die Teilnahme am Primärregelleistungsmarkt und Arbitragengeschäften.[114,115] Jema Energy bietet eine Produktpalette an modularen und interoperablen Ladegeräten für Busdepots sowie Schnellladestationen für Gelegenheitsladen an, welche mit geringen Ladeleistungen auch bidirektional zurückspeisen können.[116] Ebusco präsentierte 2023 das Produkt „Ebusco Energy Flex“, bei dem es sich um eine bidirektional ladefähige mobile Speicher- und Ladelösung handelt, die überschüssige Energie

speichern und bei Bedarf zur Ladung von Pkw und Bussen bereitstellen kann.[117]

Andere große Märkte für elektrifizierte Busse befinden sich in China, Indien und Nordamerika. Global betrachtet fuhren 2022 mit einem Anteil von 95 % die meisten E-Busse in China. Die weltweit größte elektrische Busflotte mit mehr als 16 000 Fahrzeugen befindet sich in Shenzhen.[113]

In den USA machen Schulbusse den größten Teil des öffentlichen Verkehrswesens aus. 2022 wurden weniger als 1 % der 480 000 Busse elektrisch angetrieben. Der „Infrastructure Investment and Jobs Act" stellt seit 2021 jedoch 2,5 Milliarden US-Dollar für die Anschaffung neuer elektrischer Schulbusse zur Verfügung. Die Vorteile der Netzintegration von elektrischen Schulbussen werden als hoch eingeschätzt (weitere Infos in Kapitel 3.2.2).[118] Die Möglichkeit des Rückspeisens aus Busflotten ist in den USA speziell interessant, weil die dortigen Stromnetze regelmäßig durch Extremwetterereignisse überlastet oder beschädigt werden. Abhängig von der Art der Krise fahren Schulbusse während dieser Zeit teilweise nicht (z. B. bei extremer Hitze oder Kälte) und könnten stattdessen als Netzstütze zur Verfügung stehen. Gleichzeitig ist das Erlöspotenzial in diesen Zeiten sehr hoch, was die sekundäre Nutzung der Flotten attraktiv macht. Das Unternehmen Nuvve bietet bereits ein Gesamtpaket für Ladeinfrastrukturlösungen zum bidirektionalen Laden von Schulbussen inklusive einer V2G-Steuerungssoftware an.[119]

** In diesem Impulspapier steht das Programm Elektro-Mobil im Fokus. Im Rahmen der „Richtlinie zu einer gemeinsamen Förderinitiative zur Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität" (22.02.2021) gibt es daneben weitere Forschungsaktivitäten zu schweren Nutzfahrzeugen und Bussen im Programm Erneuerbar Mobil.

3.2 Forschung im Programm Elektro-Mobil

Die Projekte des Förderprogramms Elektro-Mobil treiben die Forschung im Bereich Netzintegration des Schwerlastverkehrs an verschiedener Stelle voran.** Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Impulspapiers wurden 15 Projekte mit Fokus elektrifizierter Schwerlastverkehr im Programm gefördert. Eine detailliertere Übersicht zu den Aktivitäten dieser Projekte findet sich in Anlage 3.

Es gibt 12 Projekte im Programm Elektro-Mobil, die sich mit E-Lkw und der zugehörigen Ladeinfrastruktur beschäftigen sowie 6 Projekte, die sich mit E-Bussen und der zugehörigen Ladeinfrastruktur beschäftigen. Alle 12 E-Lkw-Projekte forschen zur Fahrzeugklasse N3, 4 von diesen Projekten forschen auch zur Klasse N2 und 2 Projekte betrachten zusätzlich noch die Fahrzeugklasse N1. Alle 6 E-Bus-Projekte forschen zur Fahrzeugklasse M3 und 1 Projekt betrachtet dabei auch die Fahrzeugklasse M2. Die große Mehrheit der Elektro-Mobil-Projekte im Nutzfahrzeugbereich forscht zu schweren Fahrzeugen (N3 und M3) und der Fokus liegt eher auf E-Lkw als auf E-Bussen (siehe Abbildung 2). Dieses Ergebnis deckt sich mit den Erkenntnissen aus Kapitel 3.1, in dem gezeigt wurde, dass für die Fahrzeugklassen N1 und N2 bereits unidirektional gesteuerte und bidirektional ladefähige Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur am Markt verfügbar sind und auch das gesteuerte Laden von

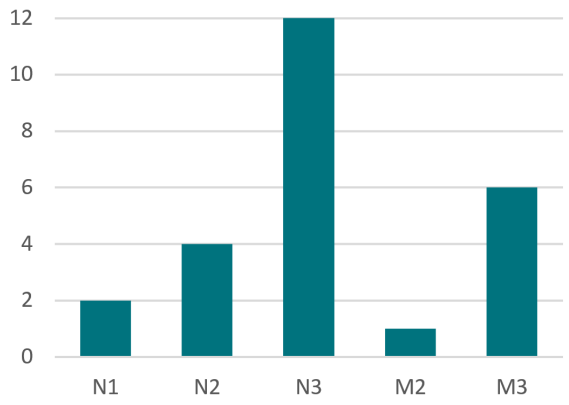

Abbildung 2: Häufigkeit der im Programm Elektro-Mobil betrachteten Nutzfahrzeugklassen.

E-Bussen bereits in vielen europäischen Städten umgesetzt wird. Die Elektro-Mobil-Projekte setzen mit Ihrer Forschung also da an, wo die Lösungen der Industrie aufhören.

In den dargestellten Forschungsprojekten hat sich die Betrachtung der Netzintegration durch unidirektional gesteuertes Laden bereits etabliert. Viele Projekte betrachten mittlerweile jedoch auch schon Aspekte des bidirektionalen Ladens. Dabei werden nicht-öffentliche und öffentliche Ladeinfrastruktur gleichermaßen betrachtet (im Gegensatz zu den Anwendungsbeispielen, die sich auf die nicht-öffentliche Ladeinfrastruktur konzentrieren, siehe Kapitel 3.1). Dabei wird gesamte Bandbreite von V2H über V2B bis V2G begutachtet.

Sowohl bei E-Lkw als auch bei E-Bussen werden in der Forschung zusätzlich zum konduktiven Laden auch Electric Road Systems (ERS) untersucht; außerdem wird ein Batteriewechselsystem (BWS) für E-Lkw entwickelt. Die Forschung geht über die Angebote am Markt hinaus, indem Ladetechnologie im Megawattbereich entwickelt und getestet wird.

In Kapitel 3.2.1 werden zunächst die 12 Elektro-Mobil-Projekte genauer betrachtet, die sich mit E-Lkw der Klasse N3 beschäftigen. Im Anschluss werden in Kapitel 3.2.2 die 6 Projekte mit Fokus auf E-Busse beleuchtet. Ergänzend werden in beiden Kapiteln auch Forschungsaktivitäten auf EU-Ebene erwähnt.

3.2.1 Lkw (N1-N3)

Aktivitäten auf nationaler Ebene in Elektro-Mobil

Bezeichnend für das Programm ist die Offenheit bezüglich der beforschten Ladetechnologien. Von den Projekten, die sich mit E-Lkw der Klasse N3 beschäftigen, arbeiten 8 Projekte mit Megawattladen und je 3 Projekte mit Laden per Oberleitung, Induktion und Batteriewechsel (siehe Abbildung 3). Sowohl Oberleitungs- als auch Induktionssysteme zählen, wie in 2.3.1 beschrieben, zu elektrischen Straßensystemen (electric road systems, ERS). Im Hinblick auf die Netzintegration sind ERS interessant, weil die zum Laden benötigte Leistung räumlich verteilt wird, anstatt lokale Lastspitzen zu erzeugen.

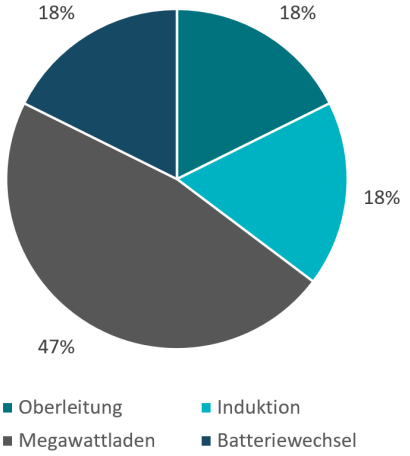

Abbildung 3: Von den E-Lkw-Projekten beforschte Ladetechnologien in Elektro-Mobil.

Mit der Frage, wie sich Oberleitungssysteme im Straßennetz technisch, rechtlich und organisatorisch umsetzen lassen, beschäftigt sich das Projekt AMELIE 2 (Forschungsart: Simulation / Demonstration).[120] In dem Projekt wird untersucht, wie sich das elektrische Straßensystem in vorhandene Strukturen von Energiewirtschaft und Autobahnen einfügen lässt. Im Projekt E|MPOWER wird anhand eines elektrifizierten Autobahnabschnitts demonstriert, wie Schwerlastfahrzeuge mit induktiven Ladetechnologien während der Fahrt geladen werden können (Forschungsart: Demonstration).[121]

In den Projekten eHaul und UniSwapHD wird ein vollautomatisches Batteriewechselsystem für E-Lkw entwickelt (beide – Forschungsart: Simulation / Demonstration), welches unter Realbedingungen auf der Strecke zwischen Berlin und Dresden getestet wird.[51] Während im Projekt eHaul das prototypische Wechselsystem entwickelt wird, haben sich die Mitarbeitenden im Projekt UniSwapHD zum Ziel gesetzt, Antworten zu den Fragen der Normung und Standardisierung von wechselbaren Traktionsbatterien im Schwerlastverkehr zu liefern. Die beiden Projekte planen den Einsatz der eingelagerten Wechselbatterien als stationäre Speicher, um über

bidirektionales Laden die Bereitstellung von Netzdienstleistungen zu demonstrieren.[122]

Im Projekt **enERSyn** wird die Schnittstelle zwischen Energie- und Verkehrssektor betrachtet (Forschungsart: Studie / Simulation). Dies geschieht durch eine quantitative Analyse der Wechselwirkungen verschiedener Ladetechnologien mit dem Energiesystem, unter besonderer Berücksichtigung von ERS-Konzepten. Dabei sollen auch die potenziellen Vorteile eines marktgesteuerten und gegebenenfalls bidirektionalen Ladens quantifiziert werden. Das Projekt enERSyn betrachtet dabei auch BWS und zählt somit zu den 3 Projekten, die sich mit diesem Thema beschäftigen.[123]

Im Zentrum des Projekts **eVTrailer2** steht die Elektrifizierung des Trailers mit dem Ziel, mithilfe einer hochstromfähigen Hochvolt-Box mit Charge Controller und des entwickelten Batteriesystems das bidirektionale HPC-Laden (High Power Charging) von Aufliegern zu ermöglichen (Forschungsart: Demonstration). Dabei wird am Laden mit hohen Leistungen an Ladepunkten oder auch an Oberleitungsstrecken gearbeitet.[124]

Sowohl enERSyn als auch eVTrailer2 beschäftigen sich – wie auch die sechs folgenden Projekte – mit Ladeinfrastruktur zum Schnellladen im Megawattbereich. Das Projekt **IDEAL**, welches an innovativen DC-Technologien zur nachhaltigen Integration moderner Ladeinfrastruktur forscht, entwickelt ein Schnell- und Hochleistungsladesystem für den gewerblichen Verkehr und den Schwerlastverkehr (Forschungsart: Studie / Simulation / Demonstration).[125] In einem Simulationsmodell sollen Kostenoptimierungspotenziale durch sowohl uni- als auch bidirektionales Laden erforscht werden. Ähnlich dazu wird in **MEGA-LADEN** ein vollautomatisches Unterbodenkontaktsystem für das Depotladen von E-Lkw im Megawattbereich entwickelt (Forschungsart: Demonstration).[126] Dabei soll unidirektional gesteuert ein Mehrpunkt-Lademanagement erprobt werden. Das Team des Projekts **HV-MELA-BAT** baut und erprobt ein Hochvolt-Megawattladesystem für das Hochleistungsladen im batteriebetriebenen Schwerlast- und Personenverkehr (Forschungsart: Demonstration). Dabei soll auch ein Pufferspeicher zum Einsatz kommen, der bidirektional ins Stromnetz zurückspeisen kann.[127] Vom Projekt **NEFTON**, was für „Nutzfahrzeugelektrifizierung für Transportsektor-optimierte Netzanbindung" steht, werden Schnellladeinfrastrukturkonzepte auf ihre Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit untersucht (Forschungsart: Simulation / Demonstration). Unter Berücksichtigung der Anforderungen von Fahrzeugen und Nutzenden wird bidirektionale Leistungselektronik für die Ladeinfrastruktur entwickelt, die mithilfe der Fahrzeugbatterie oder einer Pufferbatterie Regelleistung bereitstellen und Lastspitzen glätten können soll.[128]

Um die Amortisierungsdauer von privater Ladeinfrastruktur zu verkürzen, gibt es Bestrebungen, Ladepunkte in Depots und auf Betriebshöfen für Externe anzubieten (z. B. mithilfe von Reservierungssystemen). Mit der Entwicklung marktreifer Lösungen für solche „Shared Depots" für schwere Nutzfahrzeuge beschäftigt sich das Projekt **SPIRIT-E** (Forschungsart: Simulation / Demonstration). Basierend auf Realdaten inklusive Validierung durch Feldversuche führt das Konsortium Wirtschaftlichkeitsberechnungen sekundärer energiewirtschaftlicher Anwendungsfälle in Form von simulativen Untersuchungen durch. Darunter fällt auch ein Feldversuch zum bidirektionalen Laden von E-Lkw sowie die Systemintegration batterieelektrischer Nutzfahrzeuge am Logistikstandort.[129]

Ein Sonderanwendungsfall wird vom Projekt **ELMAR** bearbeitet, in dem sich die Beteiligten mit dem Einsatz von elektrischen Schwerlasttransportmaschinen in der Rohstoffindustrie beschäftigen (Forschungsart: Demonstration). Da Rohstoffbetriebe besonders energieintensiv sind, sollen auf Basis der erfassten Daten und den sich daraus ergebenden Erkenntnissen Strategien entstehen, die der gesamten Branche den Einstieg in die Elektromobilität erleichtern sollen. Durch gesteuertes Laden der Transportfahrzeuge und den eventuellen Einsatz von Pufferbatterien werden Spitzenlasten vermieden und die notwendige Netzanschlussleistung begrenzt.[130]

Projekt	Laden		Lade-technologie			Verbin-dungsart		Fahrzeug-klasse			Lade-szenario		Art der Forschung			Use Cases												
	Gesteuert unidirektional	Bidirektional	Batteriewechsel	Megawattladen / CCS2	Electric Road System	Konduktiv	Induktiv	N1	N2	N3	Nicht-öffentlich	Öffentlich	Studie	Simulation	Entwicklung / Demonstration	V2H Eigenverbrauchserhöhung	V2H Tarifoptimiertes Laden	V2B Spitzenlastkappung	V2B Flottenmanagement	V2G Zeitliche Arbitrage (Intraday)	V2G Zeitliche Arbitrage (Day Ahead)	V2G Primärregelleistung	V2G Lokale Netzdienstleistung	V2G Redispatch	V2G Blindleistungsbereitstellung	V2G Echter Grünstrom	Notstromversorgung	Powerbox
AMELIE 2	■				■	■			■	■		■		■	■														
E|MPOWER	■				■		■	■	■	■					■														
eHaul	■	■	■							■	■	■		■	■		■	■	■										
ELMAR	■	■		■		■				■	■				■	■	■	■	■								■		
enERSyn	■	■	■	■	■	■	■			■	■	■	■	■		■		■											
eVTrailer2	■	■		■	■	■	■			■	■	■			■			■	■				■						
HV-MELA-BAT	■	■		■		■				■	■				■			■											
IDEAL	■	■		■		■				■	■	■	■	■	■								■		■				
MEGA-LADEN	■			■		■		■	■	■	■	■			■														
NEFTON	■	■		■		■				■	■	■		■	■	■	■	■		■	■								
SPIRIT-E	■	■		■		■				■	■	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■			
UniSwapHD	■	■	■							■	■	■		■	■		■	■	■										

Abbildung 4: Übersicht der E-Lkw-Projekte in Elektro-Mobil in Bezug auf Ladetechnologie, Art der Verbindung, betrachtete Fahrzeugklasse, Ladeszenario, Forschungsart und Use Cases im Sinne der Netzintegration.

Abbildung 4 zeigt die E-Lkw-Projekte in Elektro-Mobil mit Blick auf betrachtete Fahrzeugklassen, Ladearten, Ladetechnologien, Ladeszenarien, Forschungsarten und Use Cases im Sinne der Netzintegration. Von den 12 E-Lkw-Projekten betreiben jeweils 10 Projekte Forschung zu nicht-öffentlichen und öffentlichen Ladeszenarien. AMELIE 2 und E|MPOWER fokussieren ERS und damit ausschließlich öffentliches Laden, während ELMAR und HV-MELA-BAT ausschließlich nicht-öffentliches Laden betrachten. Alle anderen Projekte betrachten beide Ladeszenarien. In Summe werden in Elektro-Mobil nicht-öffentliche und öffentliche Ladeszenarien von E-Lkw also relativ ausgewogen betrachtet. Neuere Projekte betrachten sogar Aspekte wie geteilte Depotladeinfrastruktur, also eine eigentlich als nicht-öffentlich definierte Ladeinfrastruktur, die jedoch unter bestimmten Voraussetzungen für Dritte geöffnet werden kann.

Von den 12 Elektro-Mobil-Projekten, die sich mit E-Lkw beschäftigen, forschen alle zum unidirektional gesteuerten Laden und 9 Projekte davon auch zum bidirektionalen Laden.

Die Projekte wurden gefragt, welche Use Cases (analog zu den Definitionen der Use Cases, die im Abschlussbericht des Förderprojets BDL[131] formuliert wurden) im jeweiligen Projekt betrachtet werden. Wie man Abbildung 5 entnehmen kann, sind die drei häufigsten Use Cases bei den E-Lkw-Projekten von Elektro-Mobil **V2B Spitzenlastkappung** (8 Projekte: eHaul, ELMAR, enERSyn, eVTrailer2, HV-MELA-BAT, NEFTON, SPIRIT-E, UniSwapHD), **V2B Flottenmanagement** (6 Projekte: eHaul, ELMAR, eVTrailer2, KoLa, SPIRIT-E, UniSwapHD) und **V2H Tarifoptimiertes Laden** (5 Projekte: eHaul, ELMAR, NEFTON, SPIRIT-E, UniSwapHD). **V2G Primärregelleistung** und **V2G Redispatch** werden jeweils nur in SPIRIT-E betrachtet. Auffällig ist, dass die Use Cases **Notstromversorgung** und **Powerbox** in keinem der E-Lkw-Projekte in Elektro-Mobil untersucht werden.

Bei Betrachtung der Umfrageergebnisse gibt es noch offene Fragen, die in zukünftigen Untersuchungen angegangen werden sollten. Beispielsweise könnte untersucht werden, warum bestimmte Use Cases vermehrt und andere weniger häufig betrachtet werden. Eine mögliche Fragestellung, die betrachtet werden kann, ist, ob es sich bei den häufiger vertretenen Use Cases um die wirtschaftlich interessantesten handelt.

Betrachtet man die Use Cases wie in Abbildung 6 aggregiert, so zeigt sich, dass die E-Lkw-Projekte im Programm Elektro-Mobil den Fokus auf die V2G und V2B Use Cases legen – diese werden je 14 Mal betrachtet (je 38 % aller betrachteten Use Cases). Die beiden V2H Use Cases werden 9 Mal betrachtet

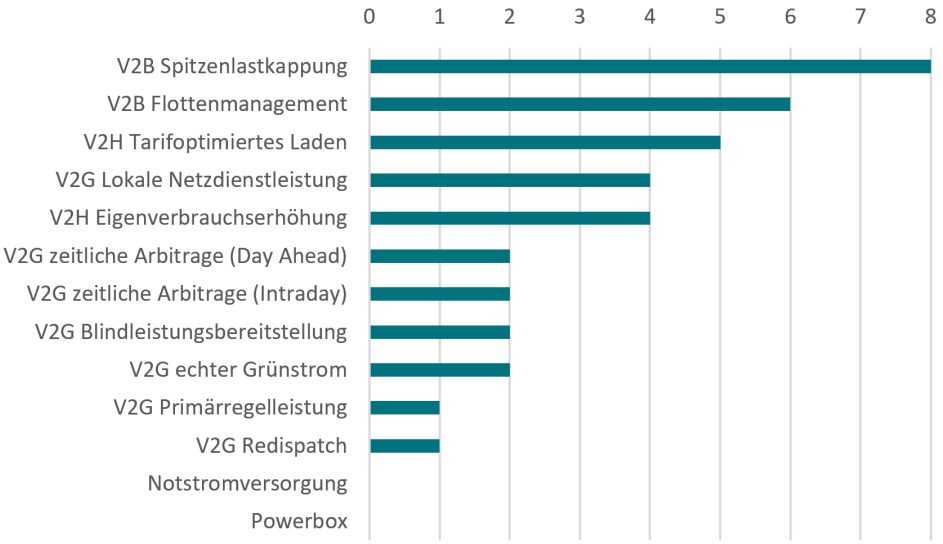

Abbildung 5: Häufigkeit der Use Cases der E-Lkw-Projekte von Elektro-Mobil.

(24 %). Die Use Cases V2H und V2B können technisch und regulatorisch für Pkw bereits in der Praxis umgesetzt werden, für die Umsetzung der V2G Use Cases bestehen jedoch noch verschiedene Herausforderungen.[132] Was beim Pkw schon umsetzbar ist (V2H und V2B), scheint für die E-Lkw-Projekte in der Forschung weniger interessant zu sein. Hingegen wird mit besonderem Interesse von E-Lkw-Projekten untersucht, was für Pkw noch nicht am Markt umgesetzt wird – hauptsächlich V2G. Weitere Studien könnten die Gründe hierfür untersuchen. Eine mögliche Fragestellung wäre, ob die Erkenntnisse aus dem Pkw-Bereich leicht auf Lkw übertragbar sind, weshalb es zu diesen Parallelen in der Forschungsarbeit kommt.

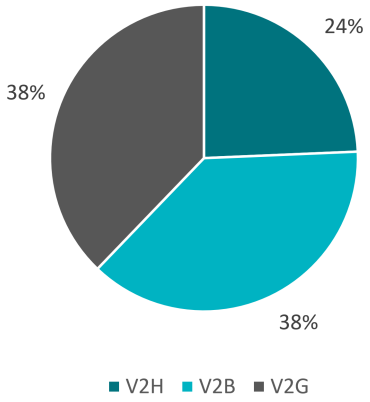

Abbildung 6: Aggregierte Use Cases der E-Lkw-Projekte von Elektro-Mobil.

Kontext: Aktivitäten auf EU-Ebene

Im Gegensatz zu den E-Lkw-Projekten in Elektro-Mobil, die in ihrer Forschung die gesamte Bandbreite an Spielarten von V2H über V2B bis V2G bearbeiten, betrachten die Forschungsprojekte auf EU-Ebene nur die Use Cases V2H tarifoptimiertes Laden und V2B Flottenmanagement. Zukünftige Untersuchungen könnten prüfen, warum der Use-Case-Umfang der EU-Projekte kleiner ausfällt als der deutschen Projekte und der Frage nachgehen, ob hier verschiedene Überzeugungen zur Wirtschaftlichkeit der Use Cases zugrunde liegen.

Das INTERREG-Projekt „electric Green Last Mile" (eGLM) mit vier E-Lkw (40 und 44 t zulässiges Gesamtgewicht) forschte von 2017 bis 2022 grenzübergreifend zwischen Deutschland und den Niederlanden zu den Anforderungen verschiedener Logistiktransportunternehmen auf der Kurzstrecke (max. 150 km). Nachts wurden die Fahrzeuge zu günstigeren Elektrizitätspreisen mit 50 kW geladen, unterwegs mit 350 kW.[133]

Im Jahr 2022 startete das Projekt NextETRUCK, das im Rahmen des europäischen Programms Horizont Europa gefördert wird und das sich mit effizienter und erschwinglicher Null-Emissions-Logistik durch den Einsatz von E-Lkw der nächsten Generation befasst. Der Fokus liegt auf dem regionalen mittleren Güterverkehr (Reichweite bis 200 km). In das Projekt sind acht Länder involviert mit Pilotstandorten in Istanbul (Ford, Fahrzeugklasse N3), Utrecht (Tevva, Fahrzeugklasse N3), und Barcelona (Irizar, Fahrzeugklasse N3). Insbesondere am Standort Utrecht sollen Flottenmanagement-Tools zum Last- und Lademanagement eingesetzt und die Fahrzeuge dynamisch zu günstigen Elektrizitätspreisen geladen werden. Auch am Standort Istanbul sollen die Gesamtkosten („Total Cost of Ownership" (TCO)) u. a. durch die Nutzung variabler Energiekosten gesenkt werden.[134,135]

In den Niederlanden gibt es seit 2022 das „Living Lab Heavy Duty Laadpleinen", innerhalb dessen an sechs Standorten Testgelände für Ladeinfrastruktur für schwere Nutzfahrzeuge aufgebaut und Erfahrungen damit gesammelt werden. Neben Fragen der Raumplanung wird die Integration in die Energieinfrastruktur untersucht.[136]

3.2.2 Bus (M2-M3)

Aktivitäten auf nationaler Ebene in Elektro-Mobil

Die Offenheit bezüglich der Ladetechnologie setzt sich bei den Projekten von Elektro-Mobil fort, die sich mit E-Bussen beschäftigen. Von den 6 E-Bus-Projekten arbeitet zwar keines an BWS, dafür forschen 3 Projekte an Megawattladen und jeweils 1 Projekt an Laden per Induktion bzw. per Oberleitung (siehe Abbildung 7).

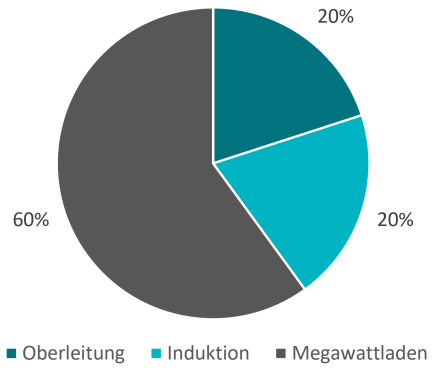

Abbildung 7: Von E-Bus-Projekten beforschte Ladetechnologien in Elektro-Mobil.

4 der 6 E-Bus-Projekte (AMELIE 2, IDEAL, MEGA-LADEN und SPIRIT-E) forschen auch zu E-Lkw und wurden bereits in Kapitel 3.2.1 vorgestellt. ELINA und KoLa forschen exklusiv zu E-Bussen und werden in diesem Kapitel kurz beschrieben.

Ein Schwerpunkt der Forschung liegt auf dem Anwendungsfall Depotladen, der insbesondere bei der Elektrifizierung von Busflotten im ÖPNV im Mittelpunkt steht. Das Projekt KoLa stellt das Lade- und Lastmanagement von Busdepots im städtischen Raum in den Fokus und entwickelt eine steuerbare Ladeinfrastruktur zum marktorientierten sowie netzdienlichen Betrieb im Depot. Dabei werden die Ladevorgänge unidirektional gesteuert und bidirektional optimiert unter Berücksichtigung der Stromnetzauslastung und der Strommarktpreise.[137] Im Projekt ELINA wird demonstriert, wie Busse im ÖPNV-Betrieb über Induktionsspulen in der Straße während der Fahrt geladen werden können.[138]

Abbildung 8 stellt tabellenartig eine Übersicht der E-Bus Projekte von Elektro-Mobil mit Blick auf die betrachteten Fahrzeugklassen, Ladearten, Ladetechnologien, Ladeszenarien, Forschungsarten und Use Cases dar. Wenn man diese Projekte neben dem Gesichtspunkt „Ladetechnologien" nach den Gesichtspunkten „Ladeszenarien" und „Ladearten" betrachtet (für alle Gesichtspunkte siehe Kapitel 2), ergibt sich das im Folgenden beschriebene Bild. Jeweils 5 E-Bus-Projekte forschen zu nicht-öffentlichen bzw. zu öffentlichen Ladeszenarien. AMELIE 2 fokussiert sich dabei ausschließlich auf das öffentliche Laden, KoLa hingegen nur auf das nicht-öffentliche Laden; alle anderen Projekte betrachten Ladetechnologien für beide Ladeszenarien.

Alle 6 Elektro-Mobil-Projekte, die sich mit E-Bussen beschäftigen, forschen zum unidirektional gesteuerten Laden, 3 davon auch zum bidirektionalen Laden (IDEAL, KoLa und SPIRIT-E). Die Projekte wurden gefragt, welche Use Cases (analog zu den Definitionen der Use Cases, die im BDL Abschlussbericht formuliert wurden) sie in ihrem jeweiligen Projekt betrachten; die Ergebnisse dazu finden sich in Abbildung 9. Die 3 E-Bus-Projekte, die sich mit dem bidirektionalen Laden beschäftigen, betrachten alle den Use Case V2G Lokale Netzdienstleistung. KoLa und SPIRIT-E betrachten außerdem V2B Flottenmanagement und V2G zeitliche Arbitrage (Day Ahead). SPIRIT-E bearbeitet darüber hinaus als einziges E-Bus-Projekt die Use Cases V2H Eigenverbrauchserhöhung, V2H Tarifoptimiertes Laden, V2B Spitzenlastkappung, V2G Zeitliche Arbitrage (Intraday), V2G Primärregelleistung, V2G Redispatch, V2G Echter Grünstrom.

Betrachtet man die Use Cases aggregiert, so zeigt sich, dass die E-Bus-Projekte – genau wie die E-Lkw-Projekte – den Fokus auf die V2G Use Cases legen, auch wenn das Ergebnis aufgrund der geringeren absoluten Anzahl von betrachteten Use Cases weniger aussagekräftig ist. Bemerkenswert ist, dass – genau wie bei E-Lkw-Projekten in Elektro-Mobil – die beiden Use Cases Notstromversorgung und Powerbox bei den E-Bus-Projekten auch nicht erforscht werden.

Kontext: Aktivitäten auf EU-Ebene und international

Mit einem Fokus auf V2G zeitliche Arbitrage (Day Ahead) und V2G Lokale Netzdienstleistung gehen die E-Bus-Projekte in Elektro-Mobil über den Forschungsumfang des europäischen E-Bus-Projekts ASSURED hinaus. ASSURED, gefördert im Rahmen des Programms Horizont Europa von 2017 bis 2021, hat gezeigt, wie Elektrobusflotten in europäischen Städten implementiert werden können. In den Städten Bayonne and Biarritz (Frankreich) wurde eine intelligente Ladestrategie für eine Busflotte von 18

Projekt	Laden		Lade-technologie			Verbin-dungsart		Fahrzeug-klasse		Lade-szenario		Art der Forschung			Use Cases												
	Gesteuert unidirektional	Bidirektional	Batteriewechsel	Megawattladen / CCS2	Electric Road System	Konduktiv	Induktiv	M2	M3	Nicht-öffentlich	Öffentlich	Studie	Simulation	Entwicklung / Demonstration	V2H Eigenverbrauchserhöhung	V2H Tarifoptimiertes Laden	V2B Spitzenlastkappung	V2B Flottenmanagement	V2G Zeitliche Arbitrage (Intraday)	V2G Zeitliche Arbitrage (Day Ahead)	V2G Primärregelleistung	V2G Lokale Netzdienstleistung	V2G Redispatch	V2G Blindleistungsbereitstellung	V2G Echter Grünstrom	Notstromversorgung	Powerbox
AMELIE 2	■				■	■			■		■		■	■													
ELINA	■				■		■		■	■	■		■	■													
IDEAL	■			■		■			■	■	■	■	■	■								■		■			
KoLa	■	■				■			■	■		■	■	■				■		■		■					
MEGA-LADEN	■			■		■		■	■	■	■			■													
SPIRIT-E	■	■		■		■			■	■	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		

Abbildung 8: Übersicht der E-Bus-Projekte in Elektro-Mobil im Bezug auf Ladetechnologie, Art der Verbindung, betrachtete Fahrzeugklasse, Ladeszenario, Forschungsart und Use Cases im Sinne der Netzintegration.

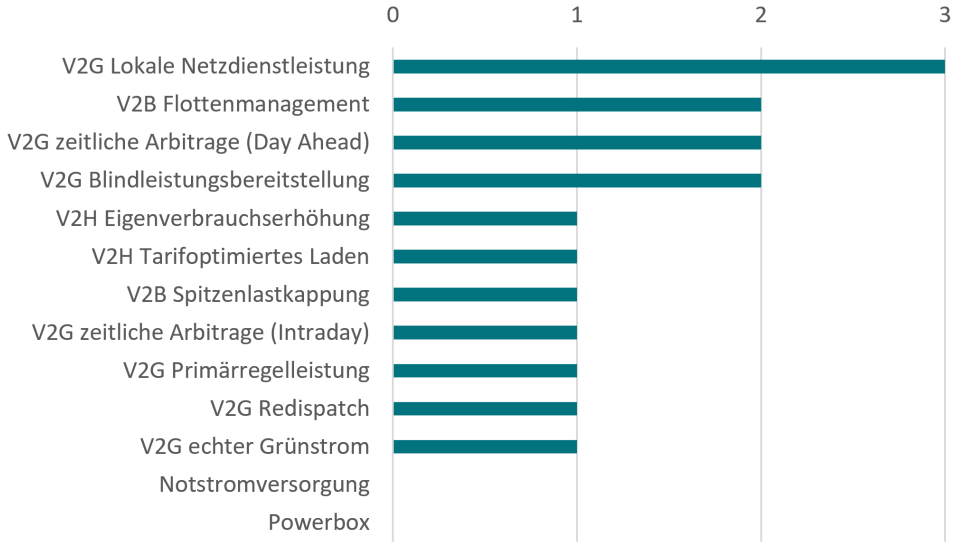

Abbildung 9: Häufigkeit der Use Cases der E-Bus-Projekte von Elektro-Mobil.

Irizar-Fahrzeugen entwickelt, bei der die Ladeleistung an die im Netz verfügbare Leistung angepasst wurde. Dabei konnten durch Spitzenlastkappung Kosten für den Flottenbetreiber gespart werden.[139]

Wie bereits im Absatz zuvor festgestellt, wird bei den E-Bus-Projekten von Elektro-Mobil die Notstromversorgung bei der Forschung nicht betrachtet. In Kapitel 3.1.2 wiederum wurde erwähnt, dass in Nordamerika das Potenzial von Schulbussen für Netzintegration und insbesondere für die Notstromversorgung als groß angesehen wird. Neben ersten Praxisbeispielen (siehe Kapitel 3.1.2) gibt es Forschungsprojekte zu diesem Thema. First Student ist ein führender Anbieter für Schultransportlösungen in Nordamerika mit Spezialisierung auf die Elektrifizierung von Schulbusflotten. Zum Beispiel fährt in Quebec (Kanada) bereits eine Flotte von 200 elektrischen Schulbussen und First Student schätzt, dass mehr als 7,4 GWh zusätzliche gespeicherte Energiekapazität zur Verfügung stehen könnten, wenn alle 46 000 Busse von First Student V2G-fähig wären. Dies wäre genug, um mehr als 33 000 durchschnittliche amerikanische Haushalte eine Woche lang mit Strom zu versorgen.[140,141] Laut einer Studie der Frontier Group und des U.S. PIRG Education Fund aus dem Frühjahr 2022 steckt die V2G-Technologie noch in den Kinderschuhen. Gleichwohl wird betont, dass elektrische bidirektionale Busflotten durch Spitzenlastkappung und Arbitrage die Kosten der Flottenbetreiber senken können. Sollte jeder Schulbus in den USA elektrisch und bidirektional ladefähig sein, würde diese Flotte einen 60 GWh große Speicher darstellen, der u. a. auch für die Notstromversorgung eingesetzt werden könnte.[118] Weitere Studien könnten untersuchen, warum in der deutschen Forschungslandschaft die Notstromversorgung durch E-Busse so wenig Beachtung findet. Eine mögliche Fragestellung ist, welchen Effekt die Netzstabilität in Deutschland im Vergleich zu den USA hat.

3.3 Ausblick

Die vorangegangenen Kapitel zeigen, dass die Netzintegration des Schwerlastverkehrs in Stufen erfolgt. Erste schwere Nutzfahrzeuge werden auf dem Betriebshof gesteuert geladen (siehe Kapitel 3.1). Die Forschungsprojekte im Programm Elektro-Mobil erproben das unidirektional gesteuerte und bidirektionale Laden von schweren Nutzfahrzeugen mit verschiedenen Ladesystemen und testen dabei u. a. tarifoptimiertes Laden, Spitzenlastkappung und die Bereitstellung von Primärregelleistung (siehe Kapitel 3.2). Seit Kurzem steht im Programm auch

der Aspekt des Asset-Sharings im Vordergrund, z. B. für die geteilte Nutzung von nicht-öffentlicher Depotladeinfrastruktur, wobei sich auch gesteuertes und bidirektionales Laden umsetzen lassen.

Wenig bis keine Aktivitäten gibt es bisher für das unidirektional gesteuerte und bidirektionale Laden von hohen Gewichtsklassen an öffentlicher Ladeinfrastruktur an den Fernverkehrsachsen. Aufgrund des hohen Termindrucks im Transportsektor und der gegebenen Lade- und Standzeitfenster ist fraglich, ob diese Techniken während des Arbeitstages hier zum Einsatz kommen können. Bei Ladestopps über Nacht besteht diese Möglichkeit jedoch, solange das Fahrzeug am nächsten Morgen wieder einsatzbereit ist. Diese Situation könnte sich in einigen Jahren ändern, wenn Batterien mit höheren Energiedichten am Markt sind und die Reichweite von E-Lkw nicht mehr der limitierende Faktor ist. Wenn ein Lkw beispielsweise über 1000 km Reichweite verfügt und nach einer 4,5 h-Schicht noch ca. 600 km Reichweite übrig hat, muss die fahrende Person zwar eine gesetzliche Pause einlegen, aber nicht zwangsweise laden und könnte, abhängig von der Route, sogar Strom ins Netz zurückspeisen. Potenzielle Innovationen, die Veränderungen in der Betriebsführung im Transportbereich herbeiführen könnten, wie z. B. das automatisierte Fahren, können wiederum einen Effekt auf die Netzintegration von schweren Nutzfahrzeugen haben.

Bei dem Expert:innenaustausch „Smart and bidirectional charging of commercial vehicles – R&D projects and practical applications", welchen die Begleitforschung am 21.06.2023 virtuell durchgeführt hat, haben die Teilnehmenden eine Mentimeter-Umfrage beantwortet. Die Antworten spiegeln wider, wohin sich die Netzintegration des Schwerlastverkehrs bewegt: Die Teilnehmenden sahen das bidirektionale Laden für Nutzfahrzeuge hauptsächlich in Sonderfahrzeugen (23), im ÖPNV (21), in der letzten Meile (20) sowie auf der Mittelstrecke (19) und dann erst für den schweren Langstreckenverkehr (8). Bei dieser Veranstaltung wurde diskutiert, dass die Herausforderungen für V2X für schwere Nutzfahrzeuge darin bestehen, dass die Bereitstellung des Stroms an öffentlicher Ladeinfrastruktur nicht planbar ist, die öffentliche Ladeinfrastruktur dafür auch bidirektional ladefähig sein muss, das Fahrzeug während des Tages fährt und beim Laden schnell seine nötige Reichweite erreichen muss.[142]

Daimler Truck und der Übertragungsnetzbetreiber TenneT TSO haben in einer gemeinsamen Studie erforscht, wie in der Zukunft das Flexibilitätspotenzial beim Laden von E-Lkw und E-Bussen genutzt werden kann.[143] Gegenüber dem Pkw-Bereich können dank höherer Batteriekapazitäten größere Energiemengen umgesetzt werden. Die Flexibilitäten von Lkw- und Busbatterien können den Übertragungsnetzbetreibern als Primär- oder Sekundärregelleistung angeboten werden, da die Batterien in der Lage sind, fast sofort auf Frequenzabweichungen zu reagieren. Besonders die in der Studie beschriebenen Use Cases „line haul", „retail truck" und „bus depots" spielen in den Morgenstunden eine wegweisende Rolle; bei diesen Use Cases wird die Nutzung sowohl von öffentlicher als auch nicht-öffentlicher Ladeinfrastruktur angenommen. Im Jahr 2040 könnten so über 4000 MW an positivem und negativem Flexibilitätspotenzial zwischen 16:00 und 04:00 Uhr zur Verfügung gestellt werden.[143] Die Übertragungsnetzbetreiber TenneT, Terna, Swissgrid, TransnetBW and APG haben eine soganannte Crowd-Balancing-Platform namens "Equigy" entwickelt, die bereits im Elektro-Mobil-Projekt BDL eingesetzt wurde und demnächst auch im Forschungsvorhaben SPIRIT-E zum Einsatz kommen soll, um die Netzintegration dezentraler Energie zu erleichtern. Aktuell führt die Plattform unidirektional gesteuerte Flexibilitäten aus, soll in Zukunft jedoch auch bidirektionale Flexibilitäten berücksichtigen.

4 HANDLUNGS-EMPFEHLUNGEN

Aus fahrzeugtechnischer Sicht ist der Übergang vom Verbrennungsmotor zum rein batterieelektrischen Antrieb im Nutzfahrzeugsektor realisierbar. Modelle in den Fahrzeugklassen N1-N3 sowie M2-M3 sind am Markt erhältlich oder befinden sich in einem sehr fortgeschrittenen Entwicklungsstadium. Basierend auf dem in den vorangegangenen Kapiteln erarbeiteten Wissensstand formuliert die Begleitforschung im Folgenden drei Handlungsempfehlungen, um den Markthochlauf elektrifizierter Nutzfahrzeuge und den Aufbau der notwendigen Ladeinfrastruktur zu unterstützen. Diese Empfehlungen richten sich an alle relevanten Interessensgruppen, darunter politische Entscheidungsträger auf nationaler und internationaler Ebene, Kommunen, Lkw-Hersteller, Hersteller und Betreiber von Ladeinfrastruktur sowie beteiligte Parteien aus dem Energiesektor. Alle drei Handlungsempfehlungen zielen darauf ab, die Marktposition von Deutschland und Europa im Bereich der Netzintegration von schweren Nutzfahrzeugen langfristig zu stärken.

4.1 Gemeinsame Sprache und sektorübergreifende Begriffe

Wie in Kapitel 2 dieses Impulspapiers diskutiert, gibt es einige Begriffsunklarheiten und nicht-trennscharfe Abgrenzungen verschiedener Begriffe. Darunter fallen nicht nur solche Begriffe wie „netzfreundlich und netzdienlich" (siehe Kapitel 2.1.4). Es wurden z. B. auch die Aktivitäten des Projekts eHaul, welches ein Batteriewechselsystem inklusive Batteriewechselstation entwickelt, unter die Begriffe V2H und V2B summiert (siehe Abbildung 4), obwohl es sich dabei streng genommen nicht mehr um Rückspeisung durch ein Fahrzeug („vehicle") handelt, da die Batterien aus dem Fahrzeug entnommen und in der Batteriewechselstation eingelagert werden, bevor sie mit dem Stromnetz interagieren können.

Eine gewisse Begriffsunschärfe ist symptomatisch für das Zusammenwachsen von zwei Sektoren, aus dem sich ein Ökosystem neu bildet und organisiert. Eine frühzeitige Klärung der Begriffe vereinfacht die Kommunikation der Akteur:innen und stärkt den gemeinsamen Diskurs. Gegebenenfalls braucht es nur Zeit, bis sich ein „gemeinsamer Jargon" entwickelt hat – man kann jedoch anregen, dass Akteur:innen bei Veröffentlichungen immer Definitionen voranstellen. Mithilfe einer gemeinsamen Sprache können gemeinsame Prioritäten klarer formuliert und Strategien effektiver verfolgt werden. Denn das gemeinsame Ziel ist klar: Der Nutzfahrzeugverkehr soll im Sinne der Klimaschutzziele schnellstmöglich dekarbonisiert werden. Nun müssen Lkw-Hersteller, Transportunternehmen, Netzbetreiber und weitere Akteur:innen durch transsektorale Kommunikation und interdisziplinäre Zusammenarbeit die gemeinsamen nächsten Schritte festlegen und gehen.

Alle Akteur:innen sollten Begriffe definieren, bevor sie sie verwenden. Dabei sollte, wo möglich, auf bestehende Definitionen zurückgegriffen werden, damit der bestehende Diskurs rund um die Netzintegration von Nutzfahr-zeugen auf einer gemeinsamen Wissensbasis weitergeführt werden kann. Eine gemeinsame Sprache erleichtert auch das Formulieren gemeinsamer Prioritäten von Lkw-Herstellern, Netzbetreibern, Transportunternehmen und weiteren Akteur:innen.

4.2 Wissenslücken durch gezielte Forschung schließen

In Kapitel 3.2 wird deutlich, welche Wissenslücken noch beim Thema Netzintegration von schweren Nutzfahrzeugen bestehen. Im Förderprogramm Elektro-Mobil werden bestimmte Use Cases (der Gruppe V2G) häufiger betrachtet, während an anderen Use Cases (z. B. Notstromversorgung) in keinem der Projekte geforscht wird. Zu betonen ist auch, dass bei den E-Lkw-Projekten von Elektro-Mobil

bisher weniger Forschung in Richtung V2H und V2B betrieben wurde als zu V2G. Dies ist interessant, da V2H und V2B bei E-Pkw in der Praxis bereits umgesetzt werden können. Eine zu prüfende Hypothese ist, ob die Erkenntnisse aus dem Pkw-Bereich leicht auf E-Lkw übertragbar sind, weshalb zu V2H und V2B bei E-Lkw weniger Forschungsarbeit nötig ist. Einen ersten Schritt, um dazu Informationen zu erhalten, hat die Begleitforschung im September 2023 getan. Gemeinsam mit Schwerlast-Expert:innen aus dem Programm Elektro-Mobil wurde darüber diskutiert, ob die Kommunikationswege bei der Steuerung von Ladevorgängen bei Pkw (siehe Whitepaper der Begleitforschung[19]) auch für die Steuerung von Ladevorgängen bei Lkw genutzt werden können. Im Ergebnis haben die Expert:innen erklärt, dass für jede Ladetechnologie schwerer Nutzfahrzeuge (siehe Kapitel 2.3) auch eine eigene Kommunikationslandkarte entwickelt werden muss. Es wurde auch darauf hingewiesen, dass ein Batteriewechselsystem die Komplexität der Landkarte gegebenenfalls reduzieren könnte, da keine direkte Kommunikation zwischen Fahrzeug und Stromnetz erfolgt, sondern die Batteriewechselstation als Schnittstelle fungiert.

Der Fokus der E-Lkw-Projekte in Elektro-Mobil auf V2G ist auch vor einem anderen Hintergrund spannend. Zum einen könnten weitere Untersuchungen die Wirtschaftlichkeit der Use Cases über alle Ladetechnologien und Ladeszenarien hinweg betrachten. Zum anderen gilt es zu analysieren, ob der Informationsfluss auch andersherum denkbar ist, also ob die Erkenntnisse der Lkw-Projekte zu V2G auch übertragbar auf den Pkw-Bereich sind.

Darüber hinaus sollten sich weitere Forschungsaktivitäten damit auseinandersetzen, warum bestimmte Use Cases in anderen Ländern fokussiert werden und welche Rahmenbedingungen diesem Fokus zu Grunde liegen. Dies könnte dabei helfen, diese Märkte besser zu verstehen und gegebenenfalls bedienen zu können. In diesem Papier wurden bereits Seitenblicke auf europäische und globale Aktivitäten im Bereich der Netzintegration von Schwerlastfahrzeugen geworfen – beispielsweise wird die Notstromversorgung, die in den USA bei E-Bussen intensiv betrachtet wird, in Elektro-Mobil-Projekten nicht betrachtet. Angestrebt werden sollte ein globaler Vergleich von Ländern, die bei der Netzintegration von schweren Nutzfahrzeugen bereits in einem fortgeschrittenen Stadium sind, um zu analysieren, ob die Erkenntnisse auf Deutschland übertragbar sind. Es besteht viel Austauschbedarf zu best practices.

Forschende aus Förderprojekten, Industrie und Wissenschaft sollten Wissenslücken zur Übertragbarkeit von Erkenntnissen aus dem Pkw-Bereich auf den Lkw-Bereich (und gegebenenfalls vice versa) schließen. Ebenso wäre ein globaler Vergleich von Vorreiterprojekten aus dem Bereich der Netzintegration von schweren Nutzfahrzeugen hilfreich.

4.3 Wissen teilen und europäisch kooperieren

Die zweite Handlungsempfehlung führt direkt zur dritten Handlungsempfehlung, denn Wissenslücken können in einem Umfeld lebendiger Kommunikation und Kooperation schneller und effizienter geschlossen werden.

Deutschland ist aufgrund seiner geographischen Lage in Europa ein Transitland; allein im Jahr 2021 lag der Anteil ausländischer Lkw auf deutschen Straßen bei 42 %. Neben den deutschen Lkw werden diese Fahrzeuge in den kommenden Jahr(zehnt)en ebenfalls die Umstellung auf batterieelektrische Antriebe durchlaufen. Es gibt nicht nur nationale, sondern auch europäische Klimaziele, deren Erreichen wir mit der Elektrifizierung des schweren Nutzfahrzeugverkehrs unterstützen wollen. Ebenso gibt es in der EU sowohl nationale als auch europäische Förderaktivitäten, die noch besser voneinander profitieren können. Das Wissen, welches wir in der EU bereits zu dem Thema Netzintegration und schwere Nutzfahrzeuge haben,

ist sehr dezentral verteilt. Es stellt sich die Frage, wie dieses Wissen besser ausgetauscht werden kann, und zwar auf verschiedenen Ebenen – wie kann beispielsweise ein Verteilnetzbetreiber aus dem Programm Elektro-Mobil seine Erfahrungen mit den mehr als 800 anderen deutschen Verteilnetzbetreibern teilen (national und im eigenen Sektor); wie fließt diese Information über E.DSO (Europe's Distribution System Operators) hin zu anderen europäischen Verteilnetzbetreibern (europäisch und im eigenen Sektor); wie fließen die Erkenntnisse aus einem deutschen Förderprogramm in ein niederländisches Förderprogramm und vice versa (transnational); wie fließen Informationen aus der deutschen Forschungslandschaft in die europäischen Forschungsprojekte (national und EU); etc.

Ein erster hilfreicher Schritt wäre, wenn die geförderten Projekte nationaler Forschungsprogramme dazu verpflichtet würden, alle öffentlichen Informationen aus den Projekten nicht nur in der jeweiligen Landessprache, sondern auch in englischer Sprache zu veröffentlichen.

Eine zentrale koordinierende Stelle, die das gesteuerte und bidirektionale Laden europaweit vorantreibt, könnte folgende Aufgaben übernehmen: Sammlung aller nationalen Forschungsaktivitäten in diesem Bereich in einer Übersicht, Sicherstellen von englischen Übersetzungen aus den nationalen Forschungsprojekten, Pflege der Kontakte und des europäischen Netzwerks sowie Orchestrierung weiterer Aktivitäten wie zentraler Austauschformate, Konferenzen oder Arbeitsgruppen.

Europäische Kommunikation und Kooperation müssen erleichtert und optimiert werden. Forschungsergebnisse müssen international verfügbar gemacht werden. Eine koordinierende Stelle auf europäischer Ebene kann diesen Prozess unterstützen und die Verbreitung der Forschungsergebnisse vorantreiben.

5 ANLAGEN

5.1 Anlage 1 zu Kapitel 3.1.1: Tabelle mit Marktübersicht E-Lkw

Die folgende Auflistung ist nicht vollumfänglich, erfasst jedoch einen großen Teil des verfügbaren Marktangebots.

Hersteller	Modell	Zuladung / t	Batteriekapazität / kWh	Ladeleistung / kW (DC)	Reichweite / km	Verfügbar ab
BYD	ETH8	11,2	255	120	200	n. b.
DAF	CF Electric	28	315	250	220	2021
DAF	LF Electric	11,7	282	150	280	2021
DAF	XD Electric	28	525	325	500	2023
DAF	XF Electric	n. b.	525	325	500	2023
Daimler Truck	eActros 400	16,6	448	160	400	2021
Daimler Truck	eActros 600	n. b.	600	1000	500	2024
Daimler Truck	eEconic	17,7	336	160	150	2022
E-Force	EF18	18	450	150	500	2019
Irizar	ie truck	13	300	100	250	2019
Iveco	Heavy Duty BEV	23,9	738	350	530	2023
MAN	eTGM	10,9	185	150	190	2019
Renault Trucks	E-Tech C	44 t zGg	540	250	n. b.	2023
Renault Trucks	E-Tech D	16 t zGg	565	150	560	2020
Renault Trucks	E-Tech D Wide	26 t zGg	375	150	315	2020
Renault Trucks	E-Tech T	44 t zGg	540	250	n. b.	2023
Scania	Electric Truck	40 t zGg	624	375	320	2021
Scania	Electric Truck	64 t zGg	624	375	250	2021
Tesla	Semi	32,6	1000	1000	805	2022
Volvo Trucks	FE Electric	27 t zGg	375	150	300	2019
Volvo Trucks	FH Electric	23	540	250	300	2022
Volvo Trucks	FL Electric	16,7 t zGg	540	150	450	2019
Volvo Trucks	FM Electric	23	540	250	300	2022

Für die meisten Modelle sind verschiedene Ausführungen und Achskonfigurationen erhältlich, daher handelt es sich bei den Werten für Zuladung, Ladeleistung und Reichweite lediglich um Maximalwerte für das spezielle Modell. Bei den Batteriekapazitäten handelt es sich teilweise um Maximalwerte, die nicht gänzlich zur Nutzung freigegeben sind. In manchen Fällen konnte die Nutzlast nicht ermittelt werden, in diesen Fällen ist das zulässige Gesamtgewicht (zGg) angegeben. In manchen Fällen war die maximale Reichweite nicht ohne Zwischenladen angegeben. Es wurde keine Unterscheidung zwischen Sattelzugmaschinen und Kastenwagen vorgenommen.

5.2 Anlage 2 zu Kapitel 3.1.1: Tabelle mit Marktübersicht Ladeinfrastruktur

Anbieter	Name	Ladeleistung (max.)	AC/DC	V2H	V2G
openWB	Pro	11 kW, 22 kW	AC	ja	ja
Wallbox Chargers	Quasar 2	12,8 kW	DC	ja	ja
Smartfox	Pro Charger 2	22 kW	n.b.	ja	ja
E3/DC	Edison V2H	n. b.	DC	ja	ja
E3/DC	S10 M	n. b.	n.b.	ja	ja
SolarEdge	n. b.	24 kW	DC	ja	ja
Evtec	sospeso&charge	10 kW	DC	ja	-
dcbel	r16	15,2 kW	AC	ja	ja
Kostal	BDL Wallbox	11 kW	DC	ja	ja
Eaton	Green Motion DC 22	22 kW	DC	ja	ja
sun2wheel	two-way-digital CHAdeMO	10 kW	DC	ja	ja
sun2wheel	two-way-10	10 kW	DC	ja	ja
sun2wheel	two-way-digital CCS	10 kW	DC	ja	ja
Silla	Duke 44	22 kW	DC	ja	ja
Ambibox	ambiCHARGE	22 kW	DC	-	-
Ambibox	ambiCHARGE	11 kW	DC	ja	ja
Mobilize	Powerbox	22 kW	DC	ja	ja
Enteligent	Hybrid	25 kW	DC	ja	-
Enphase	Bidirektionale Wallbox	-	n.b.	ja	ja
Ford	Charge Station Pro	19 kW	DC	ja	-
VW	bidirektionaler ID. Charger	-	DC	ja	ja
Sono	Wallbox	11 kW	AC	ja	ja
Wallbox Chargers	Quasar 1 (chademo)	7,4 kW	DC	ja	ja
Sigenergy Technology	SigenStor + EV DC Charging Modul	25 kW	DC	ja	ja
Ionix	AVA	25 kW	DC	ja	-
Eaton	Green Motion DC 44/66	44 kW, 66 kW	DC	-	ja
Alpitronic	HYC50	50 kW	DC	-	ja

5.3 Anlage 3 zu Kapitel 3.2: Projektkästen

AMELIE 2	Förderaufruf: III	Laufzeit: 11.2020-10.2023
Langname Abrechnungssysteme und -methoden für elektrisch betriebene Lkw sowie deren interoperable Infrastrukturen im europäischen Kontext		
Kurzbeschreibung Das Forschungsprojekt „AMELIE 2“ entwickelt deshalb ein technisch, rechtlich und organisatorisch umsetzbares Modell für den Betrieb von Oberleitungssystemen im Straßennetz. Erarbeitung eines Modells im Fokus, das Lösungen für Abrechnungs- und Regulierungsfragen eines elektrischen Straßensystems findet. Zudem werden Hemmnisse, die im Vorgängerprojekt identifiziert wurden, aufgelöst. Dazu gehört unter anderem die Erarbeitung eines praxistauglichen rechtlichen Rahmens. Gleichzeitig bietet das Modell ein Szenario dafür, wie sich das elektrische Straßensystem in die vorhandenen Strukturen von Energiewirtschaft und Autobahnen einfügen lässt.		
Netzintegration Es erfolgt eine Analyse der erhöhten regulativen Anforderungen durch mobile Energieverbraucher mit Netzspeisung und Energiespeicher an Bord im Straßenverkehr bzgl. Netzbelastung (Wirk- und Blindlast).		
Stichworte Unidirektional gesteuert, ERS: Oberleitung, N2, N3, M3, öffentliches Ladeszenario: dynamisches Laden an der Oberleitung, Simulation, Demonstration, Prototypen		

E|MPOWER	Förderaufruf: V	Laufzeit: 07.2022-06.2025
Langname Automatisierte Fertigungsprozesse für Electric Road Systems zur Elektrifizierung des Schwerlastverkehrs		
Kurzbeschreibung Das Projekt E|MPOWER beschäftigt sich mit induktiven Ladetechnologien für den Schwerlastverkehr, um diese während der Fahrt zu laden. Im Rahmen des Forschungsprojekts werden großserientaugliche Produktionstechnologien sowie innovative und automatisierte Fertigungs- und Bauprozesse entwickelt, die die Grundlage für mobiles Laden während der Fahrt schaffen. Von der Herstellung der Spulen bis zum Verbau dieser in die Straßen werden sowohl auf prozessualer als auch auf technologischer Ebene skalierbare Standards entwickelt.		
Netzintegration Analog zum Fahren an der Oberleitung verteilt sich beim dynamischen Laden während der Fahrt die abgerufene Ladeleistung auf die gesamte Strecke und die Fahrzeit, die auf der elektrifizierten Straße zurückgelegt wird. Dabei entsteht keine örtliche bzw. zeitliche Konzentration der abgerufenen Ladeleistung, woraus eine – im Vergleich zum stationären Laden – deutlich niedrigere Belastung für das Stromnetz resultiert.		
Stichworte Unidirektional gesteuert, öffentliches Ladeszenario: dynamisches Laden per Induktion, N1-N3, Demonstration		

eHaul	Förderaufruf: III	Laufzeit: 10.2020-09.2023

Langname

Electrification of long haul heavy-duty commercial vehicles with automated battery swapping station

Kurzbeschreibung

Entwicklung eines vollautomatischen Batteriewechselsystems für E-Lkw
Das Projekt „eHaul“ lässt E-Lkw binnen Minuten vollladen. Hierfür wird im Projekt ein vollautomatisches Batteriewechselsystem für E-Lkw bis 42 t zulässigem Gesamtgewicht entwickelt. Durch die automatische Auswechslung der Batterien an speziell konzipierten, befahrbaren Batteriewechselstationen können auch schwere E-Lkw lange Distanzen ohne unnötige Verzögerungen zurücklegen. Der Wechsel der Batterien erfolgt über Roboter innerhalb der Station, die mit einer optischen Sensorik ausgestattet sind. So werden die Batterien vollkommen ohne Zutun der Fahrenden oder anderen Personals ausgewechselt und die Fahrt muss nur kurz unterbrochen werden. Die Technologie wird mit einer speditionsübergreifenden Flotte unter Realbedingungen auf einer Strecke zwischen Berlin und Dresden getestet.

Netzintegration

Die Ladeinfrastruktur ist bidirektional ausgelegt, sodass die eingelagerten Wechselbatterien als Pufferspeicher genutzt werden können, um über die Leistung des Netzanschlusses hinaus andere Wechselbatterien zu laden.

Stichworte

Unidirektional gesteuert, bidirektional, BWS, N3, nicht-öffentliches Ladeszenario: eigenes und fremdes Betriebsgelände, öffentliches Ladeszenario: Lade-Hub an Achsen, Simulation, Demonstration, V2H tarifoptimiertes Laden/Entladen, V2B Spitzenlastkappung, V2B Flottenmanagement

ELINA	Förderaufruf: V	Laufzeit: 07.2022-06.2025

Langname

Einsatz dynamischer Ladeinfrastruktur im ÖPNV

Kurzbeschreibung

Das Projekt ELINA entwickelt ein automatisiertes Planungsverfahren, welches den Aufbau von induktiven Ladesystemen für den Öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) fördert. Beispielsweise wird dadurch die effiziente Planung zur Streckenelektrifizierung für E-Busrouten unterstützt, wodurch die Einführung und der Betrieb induktiver Ladetechnologien erleichtert werden. Ab Mai 2023 wird in der baden-württembergischen Stadt Balingen ein Demonstrationssystem mit passendem Elektrobus betrieben. Die Messwerte und Erfahrungen aus diesem ÖPNV-Betrieb fließen in die Entwicklung des Planungsverfahrens und weitere Untersuchungen ein.

Netzintegration

Im Rahmen des Projekts erfolgt eine Modellierung von Energiesystemrückwirkungen sowie eine Untersuchung der Emissionseinsparungen in der Betriebsphase des induktiven Ladens im Vergleich zu alternativen Ladetechnologien. Zudem erfolgt eine qualitative Darstellung technischer Anforderungen und notwendiger Anpassungen von Netzbetriebsparametern zur Integration induktiver Ladepunkte ins Verteilnetz.

Stichworte

ERS: Induktion, M3, nicht-öffentliches Ladeszenario: eigenes und fremdes Betriebsgelände, Simulation, Entwicklung, Demonstration

ELMAR	Förderaufruf: V	Laufzeit: 08.2022-07.2025

Langname

Integration und Demonstration des Einsatzes von elektrischen Schwerlasttransportmaschinen in der Rohstoffindustrie

Kurzbeschreibung

Bislang gibt es noch keine Konzepte für die Elektrifizierung von Fahrzeugen wie Lkws oder Baumaschinen in der heimischen Rohstoffgewinnung, obwohl die Branche zu den energie-intensivsten Industriezweigen Deutschlands zählt. Das Projekt ELMAR entwickelt daher erstmalig aussagekräftige Pilotkonzepte, die die Nutzung von E-Transportmitteln in repräsentativen Rohstoffgewinnungsbetrieben unter Einbezug der lokalen Energieinfrastruktur erforschen und demonstrieren. Auf Basis der Datenlage und sich daraus ergebenden Erkenntnissen sollen Strategien entstehen, die der gesamten Branche den Einstieg in die E-Mobilität ermöglichen.

Netzintegration

Der Rohstofftransport und die Ladezyklen werden modellgestützt über die Cloud-Anwendungen für einen optimierten elektrischen Betrieb geplant. Durch abgestimmtes Laden der Transportfahrzeuge und eventuellen Einsatz einer Pufferbatterie werden Spitzenlasten vermieden und eine Minderung der Erhöhung der notwendigen Netzanschlussleistung demonstriert. Mit der Flexibilisierung des lokalen Stromsystems und den gewonnenen Daten wird simulativ die Einbindung eigener Photovoltaikanlagen erprobt.

Stichworte

Unidirektional gesteuert, bidirektional, N3, nicht-öffentliches Ladeszenario: eigenes Betriebsgelände, Demonstration, V2H Eigenverbrauchserhöhung, V2H Tarifoptimiertes Laden/Entladen, V2B Spitzenlastkappung, V2B Flottenmanagement, V2G Echter Grünstrom

enERSyn	Förderaufruf: V	Laufzeit: 08.2022-07.2025

Langname

Untersuchung technischer, ökonomischer, ökologischer und energiewirtschaftlicher Synergien von Electric Road Systems (ERS) mit anderen Lkw-Antriebstechnologien

Kurzbeschreibung

Das Projekt enERSyn erforscht Abhängigkeiten und Synergien verschiedener Energieversorgungs- und Ladelösungen im zukünftigen elektrifizierten Straßengüterverkehr. Ein besonderes Augenmerk legt das Projekt auf sogenannte Electric Road Systems, durch die Lkws während der Fahrt beispielsweise über Oberleitungen geladen werden können. Dabei werden auch Auswirkungen der verschiedenen Lösungskombinationen auf das Stromnetz, Klima und die Wirtschaftlichkeit analysiert und Systemkosten berechnet. Die Ergebnisse werden in einem Abschlussbericht sowie verschiedenen weiteren Publikationen veröffentlicht.

Netzintegration

Im Projekt enERSyn wird die Schnittstelle zwischen Energie- und Verkehrssektor betrachtet. Dies geschieht durch eine quantitative Analyse der Wechselwirkungen verschiedener Ladetechnologien mit dem Energiesystem unter besonderer Berücksichtigung von ERS-Konzepten. Dabei werden auch die potenziellen Vorteile eines marktgesteuerten und ggf. bidirektionalen Ladens quantifiziert.

Stichworte

Unidirektional gesteuert, bidirektional, ERS: Oberleitung, Stromschiene und Induktion, Megawattladen, BWS, N2 und N3, nicht-öffentliches Ladeszenario: eigener und fremder Betriebshof, öffentliches Ladeszenario: Umschlagspunkt, Lade-Hub in Gewerbegebieten und an Achsen, Studie, Simulation, V2H Eigenverbrauchserhöhung, V2B Spitzenlastkappung

eVTrailer2	Förderaufruf: V	Laufzeit: 08.2022-07.2025

Langname

Elektrisches Antriebskooperations- und Energiesystem für schwere Nutzfahrzeuge

Kurzbeschreibung

Im Projekt eVTrailer2 fokussieren sich die Projektpartner auf den Nutzfahrzeugtyp „Sattelzug“ und entwickeln Möglichkeiten zur Elektrifizierung des Sattelaufliegers, einer bisher nicht motorisierten Komponente des Fahrzeugs. Die Projektpartner wollen den hier typischerweise vorhandenen Bauraum ausnutzen, um den Sattelzug über die Kombination aus integrierten Photovoltaikmodulen und elektrischem Antrieb zu einem intelligenten, sicheren und emissionsreduzierten Fahrzeugsystem für den Straßengütertransport weiterzuentwickeln. Durch die Elektrifizierung und PV-Eigenstromerzeugung des Anhängers werden die Reichweiten des Zugfahrzeugs verlängert und der Fahrstrom noch „grüner“.

Netzintegration

Im Projekt wird eine geeignete Systemarchitektur des fahrzeugseitigen HV-Energiespeichers mit einer Hochstromfähigen HV-Box mit Charge Controller für die bidirektionale HPC-Ladung (High Power Charging) zur Einbindung in Schnellladepunkte entwickelt.

Stichworte

Unidirektional gesteuert, bidirektional, Megawattladen, ERS: Oberleitung und Induktion, N3, O4 → Sattelauflieger, nicht-öffentliches Ladeszenario: eigenes und fremdes Betriebsgelände, öffentliches Ladeszenario: Lade-Hub an Achsen, Demonstration, V2B Spitzenlastkappung, V2B Flottenmanagement, V2G Lokale Netzdienstleistung

HV-MELA-BAT	Förderaufruf: V	Laufzeit: 08.2022-07.2025

Langname

Hochvolt-Megawatt-Ladesystem mit Pufferspeicher für den batteriebetriebenen Schwerlast- und Personenverkehr

Kurzbeschreibung

Das Projekt HV-MELA-BAT entwickelt, baut und erprobt ein Ein-Megawatt-Ladesystem für das Hochleistungsladen im batteriebetriebenen Schwerlast- und Personenverkehr. Im Vordergrund steht die Entwicklung innovativer Komponenten, die das Laden im Hochvolt- und Megawatt-Bereich sicher und effizient ermöglichen. Die Leistungsdichte und das Leistungsgewicht der im Projekt entwickelten Leistungselektronik sollen dabei auch die Wirtschaftlichkeit zukünftiger Megawatt-Ladesysteme von über einem Megawatt verbessern. Das Projekt verfolgt zudem einen modularen Ansatz, der auch geringere Ladungen erlaubt und so die Kompatibilität zum bereits bestehenden batterieelektrischen Pkw-Bereich sichert.

Netzintegration

Im Projekt soll ein Batteriespeicher zum Einsatz kommen, der bidirektional ins Stromnetz zurückspeisen kann. Durch den Pufferspeicher lassen sich Lastspitzen glätten. Der bidirektionale Wandler für den Pufferspeicher sowie alle weiteren notwendigen Wandlerstufen werden hinsichtlich der Leistungsdichte optimiert, so dass ein kompakter Aufbau des Gesamtsystems möglich ist. Bei Problemen müssen u. U. neue Schaltungsvarianten oder Bauelemente gefunden werden, die entsprechend raumsparend aufgebaut werden können.

Stichworte

Unidirektional gesteuert, bidirektional, Megawattladen, N3, nicht-öffentliches Ladeszenario: eigenes Betriebsgelände, Demonstration, V2B Spitzenlastkappung

IDEAL	Förderaufruf: IV	Laufzeit: 06.2021-05.2024

Langname

Innovative DC-Technologie zur nachhaltigen Integration moderner Ladeinfrastruktur für die Elektromobilität

Kurzbeschreibung

Im Projekt IDEAL werden neuartige, gleichstrombasierte Ladelösungen für die Elektromobilität erforscht, um zuverlässige Schnellladeinfrastrukturen zu vertretbaren Kosten und Aufwänden zu ermöglichen. Ziel sind Ladestationen, die mit einer kompakten und kostengünstigen Leistungselektronik ausgestattet werden können, ohne die Stabilität des Stromnetzes zu beinträchtigen. Dabei kann die bereits vorhandene Infrastruktur optimal ausgenutzt werden, sodass neue Installationen elektrischer Betriebsmittel reduziert werden können. Entwickelt werden Technologien für das Hochleistungsladen und urbane Ladesysteme im mittleren Kilowattbereich.

Netzintegration

Im Projekt werden Schnell- und Hochleistungsladesysteme für den gewerblichen Verkehr und Schwerlastverkehr im Megawatt-Bereich entwickelt. Für die DC-Bus-Versorgung sollen neben bidirektionalen auch unidirektionale Lösungen betrachtet werden, welche ggf. zusätzliche Kostenoptimierungspotenziale aufweisen. Neben der Ladeinfrastruktur wird fahrzeugseitig ein Stecker entwickelt, der Ladeleistungen im Megawattbereich bei optimierter Kühlung übertragen kann.

Stichworte

Unidirektional gesteuert, bidirektional, Megawattladen, N3, M3, nicht-öffentliches Ladeszenario: eigenes Betriebsgelände, öffentliches Ladeszenario: Umschlagspunkte und Lade-Hub im Gewerbegebiet, Simulation, Studie, Demonstration, V2G Lokale Netzdienstleistung, V2G Blindleistungsbereitstellung

KoLa	Förderaufruf: V	Laufzeit: 07.2022-06.2025

Langname

Koordinierungsfunktion des Verteilnetzes und Lastmanagement für den elektrifizierten Personenverkehr

Kurzbeschreibung

Ziel des Projekts ist zum einen die Entwicklung und Erprobung einer Koordinierungsplattform für das Stromverteilnetz. Um die Ladevorgänge der Elektrobusse der Hamburger Hochbahn zu optimieren, wird zudem ein Lastmanagement-System entwickelt und umgesetzt, welches die Anforderungen des Busbetriebs, die Stromnetzauslastung im Verteilnetz und aktuelle Strommarktdaten (Preise) berücksichtigt. Dadurch sollen die Ladezeiten der E-Busse intelligent gesteuert und die Bestandssysteme der Hamburger Hochbahn durch die Integration neuer Systeme und Schnittstellen erweitert. Außerdem soll erstmalig ein Batteriespeicher aufgebaut und genutzt werden – bei entsprechender Marktverfügbarkeit bestehend aus 2nd-Life-Batterien.

Netzintegration

Der aktuelle Zustand des Netzes wird über die erstmalige Implementierung einer sogenannten Koordinierungsfunktion berücksichtigt, die im Rahmen des Projektes entwickelt wird. Diese Koordinierungsfunktion prognostiziert den Zustand des Netzes. Das Optimierungssystem auf Lastmanagement-Ebene ermittelt auf Basis der betrieblichen Vorgaben Energiebedarfe, Flex-Potenziale und einen optimalen Ladefahrplan. Über die so ermittelten Ladefahrpläne findet ein Austausch zwischen Koordinierungsfunktion und Optimierungssystem statt. Dabei bewertet die Koordinierungsfunktion die Netzverträglichkeit der geplanten Ladevorgänge aller Netzteilgebiet-Teilnehmer und entscheidet, ob der Plan so umgesetzt werden kann oder für das Netz angepasst werden muss.

Stichworte

Unidirektional gesteuert, bidirektional, M3, nicht-öffentliches Ladeszenario: eigenes Betriebsgelände, Studie, Simulation, Demonstration, V2B Flottenmanagement, V2G zeitliche Arbitrage (Day Ahead), V2G Lokale Netzdienstleistung

MEGA-LADEN	Förderaufruf: III	Laufzeit: 10.2020-09.2023

Langname

Megawatt-Schnellladung für elektrische Nutzfahrzeuge in der Logistik

Kurzbeschreibung

Ziel des Projektes „MEGA-LADEN“ ist die Entwicklung und Demonstration eines vollautomatischen Schnellladesystems für E-Lkw im Megawatt-Bereich. Damit können große Lkw-Batterien problemlos während des Be- und Entladens oder der gesetzlichen Pausenzeiten geladen werden. Möglich macht das eine automatische Schnellladeschnittstelle mit einer Ladeleistung von mehr als einem Megawatt. Der automatische Ladevorgang mit hoher Ladeleistung bedeutet für die Nutzer und Nutzerinnen einen großen Komfortgewinn, steigert die Akzeptanz von E-Mobilität im Logistikbereich und erlaubt elektrisches Nachladen auch für Menschen ohne Spezialkenntnisse.

Netzintegration

Im Projekt wird eine automatische Schnellladeschnittstelle im Mehrere-Megawatt-Bereich für elektrische Nutzfahrzeuge entwickelt und das System für den Anwendungsfall Logistik optimiert. Dafür wird ein leistungselektronisches Ladegerät inkl. Mehrpunkt-Lademanagement für unterschiedliche Kontaktsysteme und sequenzieller Leistungsverteilung für den Anwendungsfall Logistikhub entwickelt. Die Schnellladefähigkeit und die betriebswirtschaftlich optimale Anwendbarkeit der Schnellladung für E-Lkw in Logistikanwendungen sollen demonstriert werden.

Stichworte

Unidirektional gesteuert, Megawattladen, N1-N3, M2-M3, nicht-öffentliches Ladeszenario: eigenes und fremdes Betriebsgelände, öffentliches Ladeszenario: Umschlagspunkte, Lade-Hub in Gewerbegebieten und an Achsen, Demonstration

NEFTON	Förderaufruf: IV	Laufzeit: 06.2021-05.2025

Langname

Nutzfahrzeugelektrifizierung für Transportsektor-optimierte Netzanbindung

Kurzbeschreibung

Das Projekt NEFTON entwickelt ein prototypisches Gesamtkonzept für elektrische Nutzfahrzeuge sowie eine Schnellladeinfrastruktur mit Leistungen über ein Megawatt, um den Grundstein für die Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs in Deutschland zu legen. Die Erkenntnisse aus der Entwicklung dieser Systeme sowie aus der weiterführenden Forschung werden im Rahmen des Projekts in einem "MCS Nutzerhandbuch" mit Handlungsempfehlungen für z. B. Fahrzeughersteller und Ladeinfrastrukturbetreiber festgehalten. Das Konzept wird zudem prototypisch anhand eines entwickelten Lkw sowie einer Ladestation erprobt.

Netzintegration

Im Projekt werden (Schnell-)Ladeinfrastrukturkonzepte auf Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit geprüft. In Abstimmung mit den Fahrzeug- und Nutzeranforderungen wird die uni- und bidirektionale Leistungselektronik der Ladeinfrastruktur ausgelegt, prototypisch umgesetzt, und deren Auswirkungen auf die Energiebereitstellung untersucht. Für das Ladesystem werden drei Energiepfade durch den Einsatz von hocheffizienten unidirektionalen und bidirektionalen Leistungselektronikmodulen sowie einer innovativen Verschaltung umgesetzt. Ziel ist es zum einen, einen Zusammenschluss des 800 kW Netzanschlusses (Energiepfad 1) und einer Pufferbatterie (Energiepfad 2) zu ermöglichen, um eine Ladeleistung von über 1 MW bereitstellen zu können. Weiter kann durch die bidirektionalen Module Energie aus der Fahrzeugbatterie oder Pufferbatterie zu Netzdienlichkeitsanwendungen bereitgestellt werden.

Stichworte

Unidirektional gesteuert, bidirektional, Megawattladen, N3, nicht-öffentliches Ladeszenario: eigenes Betriebsgelände, öffentliches Ladeszenario: Lade-Hub in Gewerbegebieten und an Achsen, Simulation, Demonstration, V2H Eigenverbrauchserhöhung, V2H Tarifoptimiertes Laden/ Entladen, V2G zeitliche Arbitrage (Intraday und Day Ahead)

SPIRIT-E	Förderaufruf: VI	Laufzeit: 08.2023-07.2026

Langname

Shared Private Charging Infrastructure and Reservation for Bidirectionally Integrated Truck Electrification (SPIRIT-E)

Kurzbeschreibung

Gegenstand von SPIRIT-E ist die Demonstration einer erfolgreichen, innovativen und wirtschaftlichen Integration elektrischer Nutzfahrzeugflotten in das Energiesystem unter Einsatz der Kerninnovationen Reservierung von „Shared-Depot"-Ladeinfrastruktur, d.h. Standorte mit sekundärer halböffentlicher Nutzung der Ladeinfrastruktur, die die Nutzung und Abrechnung speditionsexterner Nutzfahrzeuge ermöglicht.

Netzintegration

Es werden Feldversuche zum bidirektionalen Laden und der Systemintegration batterieelektrischer Nutzfahrzeuge an Logistikstandorten sowie eines „Shared Depots" durchgeführt. Dabei werden Wirtschaftlichkeitssimulationen sekundärer, energiewirtschaftlicher Use Cases der Nutzfahrzeuge durchgeführt, bei denen auch die Fremdfahrzeuge in die Berechnungen miteinbezogen sind. Die simulative Untersuchung basiert auf Realdaten inkl. Validierung durch die Feldversuche. Zusätzlich wird neben den Feldversuchen gleich die digitale Infrastruktur für den skalierbaren Einsatz dieser Innovationen geschaffen.

Stichworte

Unidirektional gesteuert, bidirektional, Megawattladen, N3, M3, nicht-öffentliches Ladeszenario: eigenes und fremdes Betriebsgelände, öffentliches Ladeszenario: Umschlagspunkte, Simulation, Demonstration, V2H Eigenverbrauchserhöhung, V2H Tarifoptimiertes Laden/ Entladen, V2B Spitzenlastkappung, V2B Flottenmanagement, V2G zeitliche Arbitrage (Intraday und Day Ahead), V2G Primärregelleistung, V2G Lokale Netzdienstleistung, V2G Redispatch, V2G Blindleistungsbereitstellung, V2G Echter Grünstrom

UniSwapHD	Förderaufruf: V	Laufzeit: 01.2023-12.2025

Langname

Unified Swappable Battery for Heavy Duty Commercial Vehicles

Kurzbeschreibung

Ziel des Vorhabens ist es, explizite Antworten zu Fragen der Standardisierung und Normung von wechselbaren Traktionsbatterien zu liefern.

Netzintegration

Die automatischen Batteriewechselstationen ermöglichen es, durch bidirektionales Laden Netzdienstleistungen in variablen Leistungsbereichen anbieten zu können. Damit unterstützt UniSwapHD die wirtschaftliche Verwertung der Ansätze, die im Projekt eHaul prototypisch umgesetzt werden.

Stichworte

Unidirektional gesteuert, bidirektional, BWS, N3, nicht-öffentliches Ladeszenario: eigenes und fremdes Betriebsgelände, öffentliches Ladeszenario: Lade-Hub an Achsen, Simulation, Demonstration, V2H tarifoptimiertes Laden/Entladen, V2B Spitzenlastkappung, V2B Flottenmanagement

Quellenverzeichnis

[1] European Green Deal: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de

[2] EU Transport in Figures, 3.2.7 GHG emissions from road transport: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/f656ef8e-3e0e-11ed-92ed-01aa75ed71a1

[3] ACEA Report – Vehicles in Use Europe 2022: https://www.acea.auto/files/ACEA-report-vehicles-in-use-europe-2022.pdf

[4] Bundes-Klimaschutzgesetz in der Fassung vom 24.06.2021: https://www.bmuv.de/gesetz/bundes-klimaschutzgesetz

[5] Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung: https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Landwirtschaft/Klimaschutz/Klimaschutzprogramm2030.pdf?__blob=publicationFile&v=3

[6] Impulspapier der Begleitforschung zur Transformation der Automobilindustrie: https://www.iit-berlin.de/publikation/transformation-der-automobilen-wertschoepfungsketten/

[7] Tol et al., 2022, Techno-economic uptake potential of zero-emission trucks in Europe: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Veranstaltungen/2022/Elektrische-Lkw/TNO_2022_R11862_Techno-economic_uptake_potential_of_zero-emission_trucks_in_Europe.pdf

[8] Gemeinsame Absichtserklärung europäischer Lkw-Hersteller zur Dekarbonisierung bis 2040: https://www.acea.auto/publication/acea-pik-joint-statement-the-transition-to-zero-emission-road-freight-transport/

[9] Daimler Truck will 2030 in Europa mehr Lkw mit E-Antrieb verkaufen als mit Verbrennungsmotor: https://www.handelsblatt.com/technik/thespark/lastwagenhersteller-daimler-truck-will-2030-in-europa-mehr-lkw-mit-e-antrieb-verkaufen-als-mit-verbrennungsmotor/27632388.html

[10] Volvo Trucks will bis 2030 rund 50 % der weltweit verkauften neuen Lkw elektrisch betreiben.: https://www.volvotrucks.de/de-de/news/press-releases/2023/mar/volvo-trucks-zeigt-elektromobilitaet-und-neue-digitale-services-auf-der-transport-logistic-2023.html

[11] Scania strebt an, ab 2040 nur noch Nutzfahrzeuge mit Elektromotor auf den Markt zu bringen: https://www.eurotransport.de/artikel/traton-will-vorreiter-sein-scania-ab-2040-nur-noch-elektrisch-11213361.html

[12] Volvo strebt an, ab 2040 nur noch rein-elektrische Lkw zu verkaufen: https://www.volvotrucks.de/de-de/news/press-releases/2023/may/elektrische-lkw-nehmen-fahrt-auf-volvo-trucks-behaelt-seine-fuehrende-position.html?sc_cid=pnttemplate_email_%253c%2525%253dcontext.targetdata.cta%2525%253e

[13] Auswertung der Clean-Room-Gespräche der NOW GmbH: https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de/marktentwicklung-klimafreundlicher-technologien-im-schweren-strassengueterverkehr/

[14] Die Entwicklung von E-Lkw in (inter)nationalen Logistik in den Niederlanden: https://elaad.nl/wp-content/uploads/2022/05/20Q3_Elaad_Outlook_E-trucks_internationale_logistiek.pdf

[15] K. Göckeler et al., 2023. Künftiger Transportmarkt wird von BEV-Nutzfahrzeugen geprägt sein: https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratES-Szenarien-Elektrifizierung-Strassengueterverkehr.pdf

[16] Forderung der BGL nach mehr Lkw-Stellplätzen an Autobahnen: https://www.bgl-ev.de/35-000-bis-40-000-lkw-stellplaetze-fehlen-an-deutschen-autobahnen/

[17] Abschlussbericht des Elektro-Mobil-Projekts BDL: https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2023/03/BDL-Abschlussbericht.pdf

[18] Definition von Netzintegration: https://electrificationcoalition.org/wp-content/uploads/2022/06/Advancing-V2G-Technology-Adoption.pdf

[19] Whitepaper der Begleitforschung Elektro-Mobil zur Steuerung von Ladevorgängen: https://consulting.tuv.com/aktuelles/trc-news/steuerung-ladevorgaenge-elektromobilitaet

[20] Aussagen von Fachexpert:innen des Förderprogramms Elektro-Mobil im programminternen „Schwerlast-Frühstück“ vom 29.09.2023.

[21] Klassifizierung der Netzintegration: https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Gesamtbericht-Wirtschaftlichkeit-von-Elektromobilitaet.pdf

[22] Definition von netzdienlich und systemdienlich: https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2021/05/20210122_Was-ist-Netzdienlichkeit_num_LV.pdf

[23] Definition von marktdienlich: https://www.bdew.de/media/documents/Stn_20211004_Marktdesign2030.pdf

[24] Pkw und Lkw, Stand 01.01.2023; https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Unternehmen-Infrastruktur-Fahrzeugbestand/Tabellen/fahrzeugbestand.html

[25] IPEK Fahrzeugklassen: https://www.ipek.kit.edu/11386.php

[26] VDV Kraftomnibus: https://www.mobi-wissen.de/Verkehr/Kraftomnibus#:~:text=Ein%20Kraftomnibus%20(Kom)%20ist%20ein,acht%20Sitzpl%C3%A4tzen%20neben%20dem%20Fahrersitz

[27] Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur Nutzfahrzeuge: https://nationale-leitstelle.de/nutzfahrzeuge/

[28] Adolf et al., 2010. Shell Lkw-Studie, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr bis 2030: https://elib.dlr.de/64553/

[29] Handbuch zum Aufbau von Ladeinfrastruktur in Depots für den elektrischen Schwerlastverkehr: https://www.agendalaadinfrastructuur.nl/ondersteuning+gemeenten/documenten+en+links/documenten+in+bibliotheek/handlerdownloadfiles.ashx?idnv=2403872

[30] Einfach laden an Rastanlagen: https://nationale-leitstelle.de/wp-content/uploads/2022/09/Leitstelle_LKW-Netzstudie.pdf

[31] Burges und Kippelt, 2022. Grid-Related Challenges of High-Power and Megawatt Charging Stations for Battery-Electric Long-Haul Trucks: https://te-cdn.ams3.digitaloceanspaces.com/files/2022_01_TE_grid_integration_long_haul_truck_charging_study_final.pdf

[32] Hacker et al., 2022. Mögliche Ausbauschritte für eine Oberleitungsinfrastruktur für den Straßengüterverkehr in Deutschland: https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/BOLD-Oberleitungsinfrastruktur-Deutschland.pdf

[33] Gnann et al. 2023, BOLD – Accompanying research for overhead catenary trucks in Germany. Final report: https://doi.org/10.24406/publica-2002

[34] https://www.railwaypro.com/wp/worldwide-rail-electrification-remains-at-high-volume/

[35] Jöhrens et al., 2020. Roadmap für die Einführung eines Oberleitungs-Lkw-Systems in Deutschland: https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/2020-08-05-Roadmap-OH-Lkw-web.pdf

[36] Sharpe und Basma, 2022. International Council on Clean Transportation: A meta-study of purchase costs for zero-emission trucks: https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/02/purchase-cost-ze-trucks-feb22-1.pdf

[37] Hacker et al., 2020. StratON Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge, Endbericht: https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Endbericht.pdf

[38] MCS-Standard der CharIN: https://www.charin.global/technology/mcs/

[39] Mercedes-Benz eActros LongHaul in der Vorproduktion: https://media.daimlertruck.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Absichtserklaerung-unterzeichnet-DB-Schenker-uebernimmt-100-eActros-LongHaul-in-seinen-Fuhrpark.xhtml?oid=52194928

[40] MAN produzierte 2024 neue E-Lkws: https://press.mantruckandbus.com/corporate/de/man-beschleunigt-wandel-zu-nullemissionsantrieben/

[41] Produktionsstart von Tesla Semi: https://www.electrive.net/2022/10/07/produktionsstart-fuer-den-tesla-semi/

[42] Designwerk E-Lkw mit einer Batteriekapazität von 1000 kWh: https://www.designwerk.com/post/presse/designwerk-bricht-megawattstunden-grenze/

[43] Gewicht einer Batterie mit 1000 kWh: https://www.designwerk.com/elektro-lkw-high-cab/

[44] Daimler Truck eActros 600: https://www.daimlertruck.com/newsroom/pressemitteilung/mercedes-benz-eactros-longhaul-feiert-weltpremiere-als-eactros-600-im-oktober-produktionswerke-bereiten-serienfertigung-vor-52260702

[45] Übersicht der E-Lkw von MAN: https://www.man.eu/de/de/lkw/elektro-lkw/uebersicht.html

[46] Volvo FL Electric: https://www.electrive.net/2023/06/20/batterie-update-fuer-volvo-fl-electric-und-fe-electric/

[47] Netzanschlussleistung einer Kleinstadt mit 50 000 Einwohner:innen: https://www.energie.fraunhofer.de/de/presse-medien/aktuelle-presseinformationen/presseinformationen-2019/PI-190704-fraunhofer-ise-leistungselektronik-fuer-die-energiewende

[48] Interaktive Deutschlandkarte potenzieller Standorte öffentlicher Ladeparks: https://hochleistungsladen-lkw.de/hola-en/interactive-location-map-for-charging-infrastructure.php

[49] T&E-Studie 2021 E-Lkw Schnellladeinfrastruktur: https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/202102_pathways_report_final.pdf

[50] Projekt RouteCharge: https://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/IKT-EM/ikt3-pm-RouteCharge%202020.pdf?__blob=publicationFile&v=1

[51] Projekt eHaul: https://www.ehaul.eu/

[52] Nio testet Erbringung von Systemdienstleistungen mit eingelagerten Wechselbatterien in Dänemark: https://www.nio.com/de_DE/news/202402220004

[53] Batteriewechselfähige Lkw in China 2022: https://theicct.org/china-is-propelling-its-electric-truck-market-aug23/

[54] “Challenges and requirements of megawatt charging infrastructure for long-haul trucks”, Bonjad Satvat, Abstract präsentiert auf der EVS36, Juni 2023.

[55] “Charging the electric truck fleet – Learnings from Dutch frontrunners in zero emission logistics”, Harm Weken, Abstract präsentiert auf der EVS36, Juni 2023.

[56] “Solving the charging challenge for commercial electric fleets”, Pamela Macdougall, Abstract präsentiert auf der EVS36, Juni 2023.

[57] “Real-world energy efficiency analysis and implications: medium-duty and heavy-duty EV deployments across the US”, Yin Qiu und Cristina Dobbelaere, Abstract präsentiert auf der EVS36, Juni 2023.

[58] Marktübersicht von aktuellen E-Transporter 2023: https://www.autoscout24.de/informieren/ratgeber/beste-autos/elektro-transporter/

[59] Marktübersicht von aktuellen E-Transportern: https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/kaufen/e-transporter/

[60] Ratgeber für die Installation von Ladesystemen für E-Fahrzeuge 2021: https://www.swiss-emobility.ch/de-wAssets/docs/merkblaetter/Externe-Merkblaetter/Ratgeber_fuer_die_Installation_von_Ladesystemen_fuer_eFahrzeuge_2021.pdf

[61] Ford F-150 Lightning: https://efahrer.chip.de/tests/ford-f-150-lightning-im-ersten-fahrtest-hart-eingepreister-dreitonnen-pick-up_107987

[62] Ford Elektro-Transit: https://efahrer.chip.de/news/ford-bringt-elektro-transit-reichweite-leistung-und-nutzlast-sind-spitze_109404

[63] VW ID. Buzz und ID. Cargo: VW ID. Buzz & ID. Cargo: Debüt mit 82 kWh Akku und 150 kW Leistung | Elektroauto-News.net

[64] Marktübersicht bidirektionale Wallboxen, Stand Oktober 2023: https://bidirektionale-wallboxen.de/marktuebersicht/

[65] Der neue Volkswagen ID. Buzz: https://www.wunschwagen.de/magazin/news-aus-der-branche/der-neue-volkswagen-id-buzz

[66] Tesla Schnellladesäule: https://electrek.co/2023/07/26/tesla-confirms-supercharger-v4-350-kw-output/

[67] Ekoenergetyka Schnelladesäule: https://ekoenergetyka.com.pl/products/sat-600-hpc/

[68] Tritium Schnellladesäule: https://tritiumcharging.com/product/pk-350/

[69] Abb Schnellladesäule: https://new.abb.com/ev-charging/de/terra-360

[70] Elexon Schnellladesäule: https://elexon-charging.com/wp-content/uploads/2023/09/elexon_DB_DC-Ladestation_DE_0823_8seiter_digital.pdf

[71] Alpitronic Schnellladesäule: https://www.alpitronic.it/de/hypercharger/hyc-400/

[72] Kempower Schnellladesäule: https://mediabank.kempower.com/l/VBRk-xfMK6vg

[73] Masterplan Ladeinfrastruktur II der Bundesregierung: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/masterplan-ladeinfrastruktur-2.pdf?__blob=publicationFile

[74] Forderung nach Umsetzung der Maßnahme 62: https://www.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/dateien/PDF/SDA_BW/231207_SDA_Impulspapier.pdf

[75] Aufbau von Schnellladeparks durch Milence: https://milence.com/news/milence-accelerates-europes-shift/

[76] Aral Schnellladekorridor: https://www.aral.de/de/global/retail/presse/pressemeldungen/pm-2023-aral-eroeffnet-europas-ersten-ladekorridor-fuer-elektrische-lkw.html

[77] Schwedische Unternehmen planen ein Schnellladenetz für E-Lkw: https://www.electrive.net/2023/01/13/kooperation-plant-e-lkw-ladenetz-in-schweden/

[78] StreetScooter bei DHL: https://dhl-freight-connections.com/de/nachhaltigkeit/schon-10-000-streetscooter-klimaschonend-unterwegs/

[79] Mercedes-Benz eVito bei DP DHL: https://www.manager-magazin.de/fotostrecke/elektro-lieferwagen-mercedes-e-vito-vs-streetscooter-fotostrecke-155566.html

[80] Ford E-Transit bei DP DHL: https://logistik-heute.de/news/elektromobilitaet-deutsche-post-dhl-bringt-2000-ford-elektrotransporter-auf-die-strasse-38591.html

[81] Iveco eDaily bei DP DHL: https://www.iveco.com/germany/iveco-entdecken/Pressebereich/Presseinformation/2010/IvecoElectricDailybeiderDeutschePostDHL

[82] Volvo FL Electric bei DP DHL: https://group.dhl.com/de/presse/pressemitteilungen/2023/deutsche-post-dhl-setzt-neue-elektro-lkw-flotte-in-berlin-ein.html

[83] Netzintegration bei DP DHL: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/1_GZ/BK6-GZ/2022/BK6-22-300/Stellungnahmen/Deutsche Post DHL Group.pdf?__blob=publicationFile&v=1

[84] Flottenbetrieb bei DP DHL: https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/11/NFZ22_Flottenbetrieb-leichter-E-Nutzfahrzeuge_SalomonMeyer.pdf

[85] Oberleitungs-Lkw bei DP DHL: https://www.elektroauto-news.net/news/dhl-elektro-lkw-oberleitung

[86] Pressemitteilung: https://www.volvotrucks.at/de-at/news/press-releases/2023/jan/73-volvo-fm-fuer-die-oesterreichische-post-ag.html

[87] Anwendung von E-Lkw bei der Österreichischen Post AG: https://www.electrive.net/2022/02/08/schwedischer-spediteur-falkenklev-elektrifiziert-depot-in-malmoe/

[88] Anwendung von E-Lkw bei Falkenklev Logistik: https://theevreport.com/scania-to-supply-electric-trucks-to-falkenklev-logistik

[89] Anwendung von E-Lkw bei Einride: https://www.electrive.net/2023/05/12/rewe-flottet-mithilfe-von-einride-sieben-eactros-ein/

[90] Einsatz des Lade- und Energiemanagementsystems ChargePilot von The Mobility House: https://www.mobilityhouse.com/de_de/unser-unternehmen/presse/artikel/oesterreichische-post-errichtet-modernes-und-intelligentes-ladenetzwerk-mit-the-mobility-house

[91] Einsatz des Lade- und Energiemanagementsystems ChargePilot von The Mobility House: https://www.mobilityhouse.com/de_de/unser-unternehmen/presse/artikel/volvo-group-schweiz-ag-setzt-auf-lade-und-energiemanagementsystem-von-the-mobility-house

[92] Einsatz der Software ChargEye von Kempower: https://kempower.com/news/kempower-to-deliver-fast-charging-technology-for-swedens-largest-electric-truck-charging-station/

[93] Einsatz der Software Saga von Einride: https://www.einride.tech/insights/how-to-maximize-the-efficiency-of-electric-freight

[94] Einsatz der Software Saga von Einride: https://www.einride.tech/insights/the-physical-and-digital-infrastructure-behind-intelligent-electric-freight

[95] E-Bus-Radar 2023: pwc-e-bus-radar-2023.pdf

[96] E-Bus-Radar 2022: E-Bus-Radar von PwC: 2021 fast doppelt so viele E-Busse in Deutschland unterwegs wie 2020 - PwC

[97] Einführung von E-Bussen in städtischen öffentlichen Verkehrsmittelflotten: https://www.sustainable-bus.com/electric-bus/electric-bus-public-transport-main-fleets-projects-around-world/

[98] Ladelösungen für E-Busse von Kempower: https://kempower.com/news/jonkoping-electric-bus-depot-charging/

[99] Ladelösungen für E-Busse von ABB: https://new.abb.com/news/detail/85940/abb-powers-progress-for-milans-electric-bus-network

[100] Ladelösungen für E-Busse von Heliox: https://de.heliox-energy.com/us-case-studies/groesstes-schnellladenetz-fuer-ebusse-in-europa

[101] Ladelösungen für E-Busse von Irizar: https://www.sustainable-bus.com/news/irizar-schaffhausen-ie-tram/

[102] Ladelösungen für E-Busse von Hitachi Energy: https://www.hitachienergy.com/de/de/about-us/customer-success-stories/grid-emotiontm-to-accelerate-sustainable-mobility-in-london

[103] Ladelösungen für E-Busse von Ekoenergetyka: https://www.electrive.com/2019/08/29/ekoenergetyka-polska-supplies-charging-network/

[104] Ladelösungen für E-Busse von Siemens: https://www.electrive.com/2020/12/15/siemens-to-equip-europes-largest-e-bus-depot-with-charging/

[105] Ladelösungen für E-Busse von Schunk: https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2022/05/ASSURED-Clean-Bus-report_final2.pdf

[106] Einsatz von E-Bussen in Aalborg: https://www.electrive.net/2023/02/10/tide-bus-bus-ladepark-mit-124-anschluessen-in-aalborg/

[107] Einsatz von E-Bussen in Aalborg: https://kempower.com/news/kempower-technology-at-aalborg-electric-bus-depot/

[108] Einsatz von E-Bussen in Amsterdam: https://www.electrive.net/2023/05/30/amsterdam-gvb-setzt-auf-lade-tool-von-the-mobility-house/

[109] Einsatz von E-Bussen in Mailand: https://www.solarisbus.com/de/presse/fortsetzung-der-bestellungen-aus-mailand-75-elektrisch-betriebene-solaris-busse-fahren-nach-italien-1773

[110] Einsatz von E-Bussen in Aveiro: https://www.sustainable-bus.com/electric-bus/transdev-aveiro-caetanobus-siemens/

[111] Einsatz von E-Bussen in Zaragoza: Transport electrification project in Zaragoza with Avanza | Enel X

[112] The Mobility House ChargePilot: https://www.mobilityhouse.com/de_de/unser-unternehmen/presse/artikel/elektrobusse-neue-zusatzfunktionen-von-chargepilot

[113] The Mobility House Whitepaper "Elektrobusse intelligent laden": https://25323067.fs1.hubspotusercontent-eu1.net/hubfs/25323067/Whitepaper_Elektrobusse_DE_CH.pdf?utm_campaign=B2B%20Overall%20Whitepaper&utm_medium=email&_hsmi=74039688&utm_content=74039688&utm_source=hs_automation

[114] eMIS PRL und Arbitrage: https://www.busplaner.de/de/news/elektromobilitaet-e-mobilitaet-bidirektionales-laden-betriebshof-tanken-und-laden_bidirektionales-laden-wie-oepnv-busse-geld-verdienen-koennen-83395.html

[115] eMIS PRL und Arbitrage: https://emis-deutschland.com/technologie/

[116] Jema Energy V2G-fähige Ladelösung: https://www.jemaenergy.com/en/producto/depot-chargers-electrical-buses-trucks/

[117] Bidirektionale Speicher- und Ladelösung von Ebusco : https://www.electrive.net/2023/10/06/neue-bidirektionale-speicher-und-ladeloesung-von-ebusco/

[118] Horrox, Nick et al., 2022, Electric School Buses and the Grid: https://publicinterestnetwork.org/wp-content/uploads/2022/04/FG-Electric-school-buses-and-the-grid.pdf

[119] Ladeinfrastrukturlösungen zum bidirektionalen Laden von Nuvve: https://nuvve.com/wp-content/uploads/2022/04/nuvve-school-bus-packet_lcfs_april2022.pdf

[120] Projekt AMELIE 2: https://www.ikem.de/projekt/amelie-2/

[121] Projekt E|MPOWER: https://www.faps.fau.de/neuigkeit/17-11-2022-neues-gemeinschaftsprojekt-empower-demonstriert-dynamisches-laden-von-elektrofahrzeugen-auf-deutschen-autobahnen/#:~:text=%E2%80%9CDas%20Projekt%20E%7CMPOWER%20ist,Bereich%20der%20Produktionstechnologie%20zu%20positionieren.

[122] Projekt UniSwap HD: https://www.tu.berlin/fvb/forschung/laufende-projekte/uniswaphd

[123] Projekt enERSyn: https://www.ifeu.de/projekt/enersyn-dynamisches-laden-im-kontext-der-lkw-antriebswende

[124] Projekt evTrailer2: https://www.electrive.net/2022/11/25/evtrailer2-fokus-auf-e-sattelauflieger-fuer-schwere-lkw/

[125] Projekt IDEAL: https://www.pgs.eonerc.rwth-aachen.de/cms/E-ON-ERC-PGS/Forschung/Projekte/~sxmkr/IDEAL/

[126] Projekt MEGA-LADEN: https://www.mega-laden.de/index.php/de/

[127] Projekt HV-MELA-BAT: https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/news/2023/projektstart-hv-mela-bat-hochvolt-megawatt-ladesystem-fuer-schwerlast-und-personenverkehr.html

[128] Projekt NEFTON: https://www.ffe.de/projekte/nutzfahrzeugelektrifizierung-fuer-transportsektor-optimierte-netzanbindung-nefton/

[129] Projekt SPIRIT-E: https://spirit-e.de/

[130] Projekt ELMAR: https://www.baunetzwerk.biz/index.php/pilotprojekt-klimaneutraler-steinbruch

[131] BDL-Abschlussbericht: https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2023/03/BDL-Abschlussbericht.pdf

[132] Potenzialanalyse bidirektionales Laden: https://issuu.com/nrw_energy4climate/docs/potenzialanalyse_bidirektionales_laden_final

[133] Projekt eGLM: https://www.eglm.eu/de/eGLM

[134] Projekt NextETRUCK: https://nextetruck.eu/

[135] NextETRUCK – Use case, mission and overall vehicle definition: https://nextetruck.eu/wp-content/uploads/2023/10/NextETRUCK-D2.1-Use-case-mission-and-overall-vehicle-definition.pdf

[136] Living Lab Heavy Duty Laadpleinen: https://rwsduurzamemobiliteit.nl/praktijk/vergroenen/living-lab-heavy-duty-laadpleinen/

[137] Projekt KoLa: https://www.hochbahn.de/de/projekte/elektro-busbetriebshoefe/das-projekt-koordinierungsfunktion-und-lastmanagement

[138] Projekt ELINA: https://www.electrive.net/2022/12/16/balingen-projekt-zu-induktivem-laden-waehrend-der-fahrt/

[139] Projekt ASSURED: https://assured-project.eu/storage/files/d114-d115-final-use-case-demo-brochure_2.pdf

[140] First Student E-Busse Nordamerika: https://firststudentinc.com/innovation/electric-school-buses/

[141] Kevin Matthews, Process Overview and Unique Considerations For Deploying Commercial Fleet Infrastructure for a School Bus Fleet, Vortrag bei der EVS36 in Sacramento im Juni 2023

[142] “Smart and bidirectional charging of commercial vehicles – R&D Projects and practical applications”, Dirk Kaminski, Expert Knowledge Exchange of the Accompanying Research “Elektro-Mobil” am 21.06.2023

[143] Will, Ocker et al., 2022, Flexibility marketing options for charging processes of electric medium-duty and heavy-duty commercial vehicles: https://tennet-drupal.s3.eu-central-1.amazonaws.com/default/2022-11/Daimler%20Truck%20TenneT%20Feasibility%20Study.pdf