

Aktueller Stand der Großladeinfrastruktur – Reallabor am Kronprinz Kai

Maik Plenz*, Andreas Stadler, Nils Pinke, Detlef Schulz
Professur für Elektrische Energiesysteme
Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr
Hamburg, Deutschland
 *maik.plenz@hsu.hamburg

Christoph Steinkamp, Sebastian Staffetius
hySOLUTIONS GmbH
 Hamburg, Deutschland

Kurzfassung – Der Klimawandel und seine Folgen wirken sich sowohl auf die Umwelt als auch auf die Strukturen der Energielogistik aus. Die Transformation der Mobilität ist dabei ein Treiber, um die Herausforderungen zu bewältigen. Hierzu zählt auch die Elektrifizierung des Güterverkehrs. Dazu müssen in den kommenden Jahren umfangreiche Ausbauten bei Megawatt-Charging-Systemen (MCS) bzw. auch dem Wasserstofftankstellen-Netz erfolgen. Dieses Papier beschäftigt sich mit ersten Ansätzen zur Einordnung der geplanten MCS in die bestehende Ladeinfrastruktur sowie mit Ausführungen zur Umsetzung dieser MCS in Form von Großladeinfrastrukturen und versucht einen Einblick in die aktuellen Ansätze zu geben.

Stichworte – Ladeinfrastruktur, Elektromobilität, Stromnetze, Verteilnetze

NOMENKLATUR

AFIR	Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe
CCS	Combined Charging System (Kombiniertes Ladesystem)
CHB	Cascaded H-Bridge (Kaskadierte H-Brücken-Multi-Level-Topologie)
DAB	Dual-Active-Bridge (DC/DC-Wandler)
dtec	dtec.bw - Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr
ES	Energiespeichersystem
EV	Elektrofahrzeug
FCEV	Brennstoffzellen-EV
HPC	High Power Charging
HYC	Hypercharger
LIS	Ladeinfrastruktur
LLM	Last- und Lademanagement
MCS	Megawatt-Charging-System
NVP	Netzverknüpfungspunkt
PHEV	Plug-in-Hybrid EV
TEN-V	Transeuropäisches Verkehrsnetz

I. EINLEITUNG

Die Elektromobilität des Individual- und Güterverkehrs hat ihr globales Wachstum beschleunigt, wobei die Verbreitung von Elektrofahrzeugen (EV) in verschiedenen Regionen der Welt unterschiedlich stark ansteigt. Bis 2024 wird die Zahl der global verkauften Elektrofahrzeuge (EV, PHEV oder FCEV) 14 bis 17 Millionen übersteigen, was auch einen schnelleren Anstieg gegenüber den Vorjahren bedeutet [1]. Der Fahrzeugbestand beläuft sich weltweit auf etwa 40 Millionen, wovon über 20 Millionen Einheiten in China betrieben werden [2]. Zusätzlich steigen das Angebot und der Bedarf an elektrischen Lastkraftwagen und der Elektrifizierung im Güterverkehr im Allgemeinen – wenn auch langsamer im Vergleich zum EV. Von den ca. 800.000 schweren LKW, die täglich in Deutschland unterwegs sind, werden aktuell nur etwa 500 Fahrzeuge (0,07 %) nicht mit konventionellen Kraftstoffen betrieben. Eines der Hauptprobleme ist die bisher nur vereinzelt existierende Ladeinfrastruktur für batterieelektrische LKW an Hauptverkehrsstraßen und somit fehlende mögliche Ladeoptionen, was die Umsetzung der Ziele, detaillierter ausgeführt in Kapitel II, erheblich erschwert [3]. Im Vergleich dazu hat sich der Ausbau auf PKW ausgerichteter AC- bzw. DC-Ladeinfrastruktur für EV beschleunigt, so dass weltweit über 1,8 Millionen öffentliche Ladepunkte zur Verfügung stehen [4, 5], siehe TABELLE I.

TABELLE I: HOCHLAUFSZENARIO ELEKTROMOBILITÄT SOWIE GÜTERVERKEHR UND DEREN LADEINFRASTRUKTUR.

EVs				
Mio Einheiten	2024	2035	2050	Quellen
World	~40	~400	~700	[2, 6]
Germany	~1,5	~15	~50	[7]
LIS für EV (öffentlich)				
Mio Einheiten	2024	2035	2050	Quellen
Weltweit	~4	~25	-	[2]
Deutschland	~0,12	~1	-	[8, 9]
E-LKW (Schwerlast)				
Einheiten	2024	2035	2050	Quellen
Deutschland	~500	~38.000	-	[10, 11]
LIS für E-LKW (öffentlich)				
Einheiten	2024	2035	2050	Quellen
Deutschland	120	> 1.000	-	[3, 12]

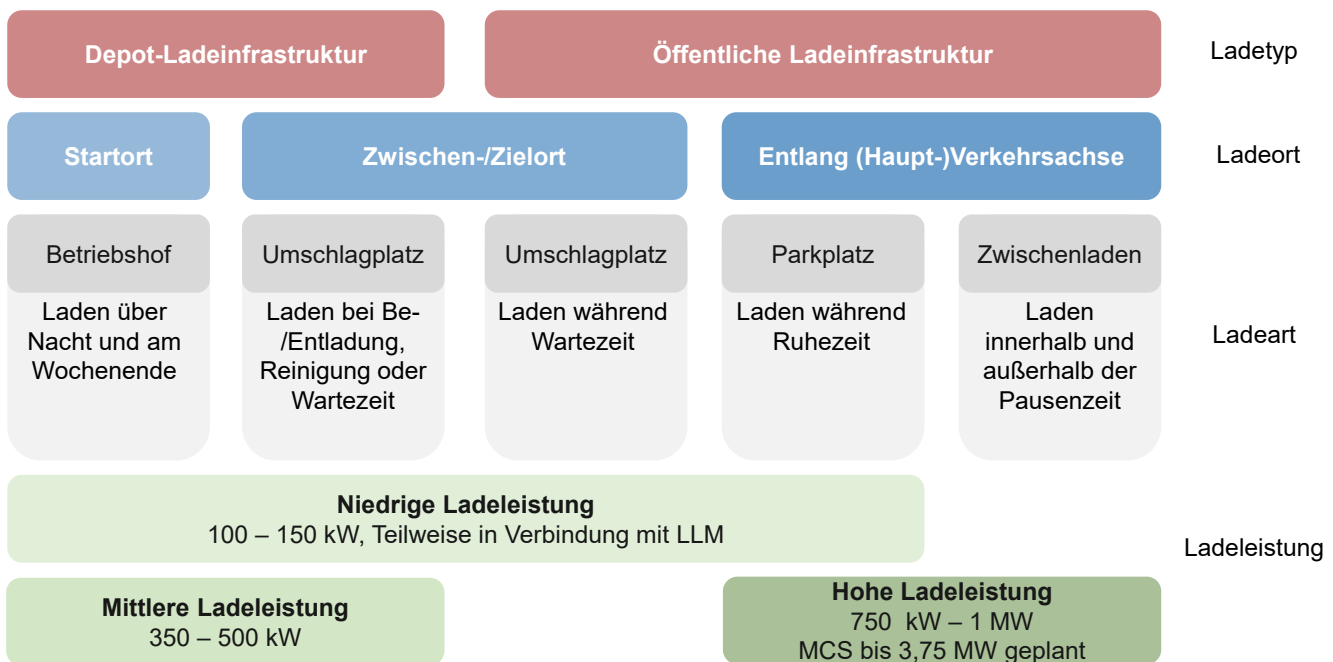


ABBILDUNG 1: LADESZENARIEN MIT EMPFOHLENER LADELEISTUNG FÜR E-LKW, ANGELEHNT AN [3].

Einerseits führt der aktuell geringe Ausbau von Hochleistungs-Ladeinfrastruktur (LIS) zu Hemmnissen bei der Umstellung auf Elektromobilität in Gewerbe und Industrie. Andererseits ist das Angebot an E-LKW seitens der Hersteller sowie auch an Hochleistungsladeinfrastruktur (bzw. deren Herstellervielfalt) noch gering. Ein zusätzlich durch die Politik forcierter Einstieg in den Wasserstoff bzw. zuvor Erdgasantrieb reduziert die Investitionsbereitschaft zusätzlich, da Unklarheiten bestehen, welche Technologie sich langfristig durchsetzen kann.

In diesem Papier soll auf die aktuelle Situation der LIS mit dem Fokus auf E-LKW eingegangen werden. Hierzu wird Fokus auf den aktuellen technischen Stand von Hochleistungsladeinfrastruktur (HPC) gelegt. Dabei wird eine Lösungsmöglichkeit zum schnelleren Ausbau von LIS in dem Aufbau sogenannter Großladeterminals, auch als hybride Megawatt-Charging-Systeme (MCS), gesehen. An diesen können sich mehrere Mobilitätsträgertypen die Plattform einer/mehrerer Hochleistungs-LIS an einem Ort teilen. Die MCS-Technologie sowie erste Umsetzungen werden nachfolgend erklärt und in Kapitel II ausgeführt. Weiterhin wird auf den technischen und regulatorischen Stand von Hochleistungs-LIS eingegangen (Kapitel II) sowie das Beispiel des Kronprinzakai in Hamburg (Kapitel III) dargestellt.

II. TECHNISCHE, REGULATORISCHE UND REALE EINORDNUNG VON GROßLADEINFRASTRUKTUR

Großladeinfrastruktur beschreibt in dieser Arbeit LIS mit einer Ladeleistung ab 1 MW aufwärts, wie in ABBILDUNG 1 beschrieben. Derartige Systeme werden vornehmlich als sogenannte Megawatt Charging Systems, kurz MCS, bezeichnet. Diese Ladetechnologien können bauart-technisch die Versorgung mehrerer Mobilitätsträger, wie:

- Zu Land: EVs, E-LKW (N1, N2, N3), E-Busse (Gelenk- oder Standardbusse) etc.,
- Zu Luft: E-Flugzeuge etc.,

- Zu Wasser: Frachter etc. ermöglichen.

Nachfolgend wird daher verstärkt auf die Technologie des MCS eingegangen und diese näher erläutert. Zusätzlich werden in den Beispielen in Kapitel II.C) auch Ansätze zu hybriden MCS (Großladeterminals, welche verschiedene Mobilitätsträger versorgen) vorgestellt.

A. Technische Erläuterung Ladeinfrastruktur

Der Aufbau der mehrpoligen Steckverbindung, die die Grundlage einer Hochleistungs-LIS mit DC-Ladern darstellen, ist in ABBILDUNG 2 vereinfacht abgebildet.

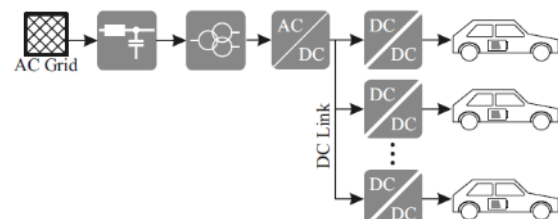


ABBILDUNG 2: SCHEMATISCHER AUFBAU SCHNELLLADESYSTEM AUS: [3].

HPC-Schnellladestationen an Autobahnen in Europa liefern derzeit eine Leistung $P_L = 150 \text{ kW}$ bis 400 kW . Bei mehreren Ladepunkten ergeben sich schnell ungesteuerte Spitzenlasten von über 2 MW, was vielerorts über die Kapazitäten des Niederspannungsnetzes hinausgeht und daher einen Anschluss an das Mittelspannungsnetz notwendig macht. Dies erfordert zusätzliche Komponenten wie Mittelspannungstransformatoren und -schaltanlagen. In ABBILDUNG 2 ist die Architektur für eine solche LIS schematisch ausgeführt; sie besteht aus einem Gleichrichter, der einen Mittelspannungstransformator mit einem gemeinsamen DC-Bus verbindet, an den die Ladeumrichter angeschlossen sind. Eine kostengünstige Lösung ist der Einsatz eines Dreifachtransformators mit einem zwölfpulsigen Diodengleichrichter, welcher jedoch nur unidirektionale Energieübertragung ermöglicht [22].

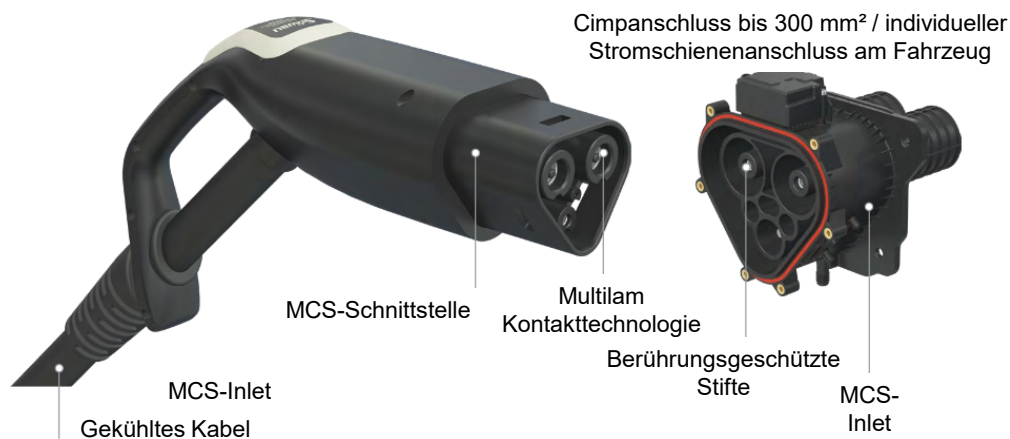


ABBILDUNG 3: MCS MEHRPOLIGE STECKVERBINDUNG, ENTNOMMEN AUS [16].

Der globale Arbeitskreis Charging Interface Initiative e.V. (kurz CharIN) strukturiert zusammen mit den Marktführern im Bereich Ladeinfrastruktur und mit Mobilitätsträgerherstellern die Weiterentwicklung von HPC Systemen, einen sogenannten MCS Standard, siehe ABBILDUNG 3.

Mit einer Ladeleistung von bis zu 3,75 MW, einem Bemessungsstrom von bis zu 3000 A und einer Bemessungsspannung von 1250 V Gleichstrom stellt das System eine der höchsten Ladeleistungen bereit. Ein Kabel mit 25 mm² Querschnitt, welches teilweise gekühlt wird, verknüpft LIS und Mobilitätsträger.

Eine mögliche Ausführung eines MCS ist hierbei in ABBILDUNG 4 veranschaulicht, vertieft ausgeführt in [17]. In [17, 23] werden MCS in sogenannte Multiports eingebunden. Der Aufbau eines Multiports im Megawatt-Ladesystem ist modular und darauf ausgelegt, verschiedene Energiequellen und Lasten effizient zu verwalten und zu koordinieren. Ein Multiport dient als zentrale Schnittstelle für das Laden von Elektrofahrzeugen, das Energiespeichersystem (ES), Photovoltaik (PV)-Anlagen und das Netz. Es besteht nach [17, 23] aus den Hauptkomponenten:

- Ladeanschluss (Charger): Jeder Multiport enthält eine oder mehrere Ladestationen, die speziell für schwere Elektrofahrzeuge ausgelegt sind. Jede Ladestation ist typischerweise für eine Ladeleistung von etwa 1,2 MW ausgelegt. Diese Ladeanschlüsse können in mehrere Schnellladesäulen mit einer Leistung von je 400 kW unterteilt werden.
- Dual Active Bridge (DAB): Die DABs werden als zentrale Komponenten verwendet, um die DC-DC-Umwandlung im System zu steuern. Sie verbinden den DC-Bus des Multiports mit den verschiedenen Energiequellen wie PV-Systemen oder ES. Auch die Ladeports für die E-LKW sind über DABs an den DC-Bus angeschlossen.
- Energiespeichersystem: Der Multiport integriert ein oder mehrere Energiespeichersysteme, die eine Pufferfunktion übernehmen. Diese haben in der Regel eine Leistung $P_{ES} = 400 \text{ kW}$ und helfen, Lastspitzen zu glätten und das Netz zu entlasten, indem sie anlassbezogen zwischenspeichern oder einspeisen.

- Netzschnittstelle: Die Verbindung zum Netz bzw. dem Netzverknüpfungspunkt (NVP) erfolgt über einen Cascaded-H-Bridge (CHB)-Wechselrichter, der an den Mittelspannungsanschluss (z.B. 10/20 kV AC) angebunden ist. Dieser CHB-Wandler wandelt die Netzspannung in eine 12 kV DC Spannung um, die dann den Multiport über einen zentralen DC-Bus speist.
- Photovoltaik (PV): Optional können erneuerbare Erzeuger wie bspw. PV-Anlagen integriert werden, um nachhaltige Energiequellen in das System einzuspeisen. Diese sind ebenfalls über DAB-Wandler an den DC-Bus angeschlossen und liefern zusätzliche Energie, um die Ladeanforderungen zu unterstützen.
- DC-Bus: Der zentrale DC-Bus verteilt die Energie zwischen den verschiedenen Komponenten (Ladeanschlüsse, ES, PV). Er sorgt dafür, dass die Energieflüsse zwischen Netz, Energiespeichern und Fahrzeugen effizient reguliert werden.

Der Multiport ist so konzipiert, dass er modular und skalierbar ist, wodurch mehrere Multiports zu einem größeren Netzwerk verbunden werden können, um die Ladeanforderungen für eine hohe Anzahl von Elektrofahrzeugen gleichzeitig zu erfüllen. Die direkt angeschlossenen Erzeugungsanlagen (meist PV) und Speichersysteme ermöglichen eine optimale Steuerung, Reduktion des Leistungsbezuges über das Netz und erzielen zusätzlich eine Kostenreduktion [17, 23].

Um eine solche Reduktion umzusetzen, müssen bestimmte Annahmen getroffen werden:

- 1) Optimierungsziel: Die Minimierung der Netzbelastung erfolgt durch eine konstante Leistungsabnahme aus dem NVP bei gleichzeitiger Sicherstellung der Ladeanforderungen der Elektrofahrzeuge.
- 2) Systemgrenzen: Es wird angenommen, dass die ES und die PV innerhalb bestimmter Energie- und Leistungsgrenzen betrieben werden.
- 3) Zeitliche Intervalle: Die Optimierung wird über feste Zeitintervalle durchgeführt, in denen Entscheidungen getroffen werden. Dies ermöglicht eine dynamische Anpassung der Lade- und Entladeleistung.

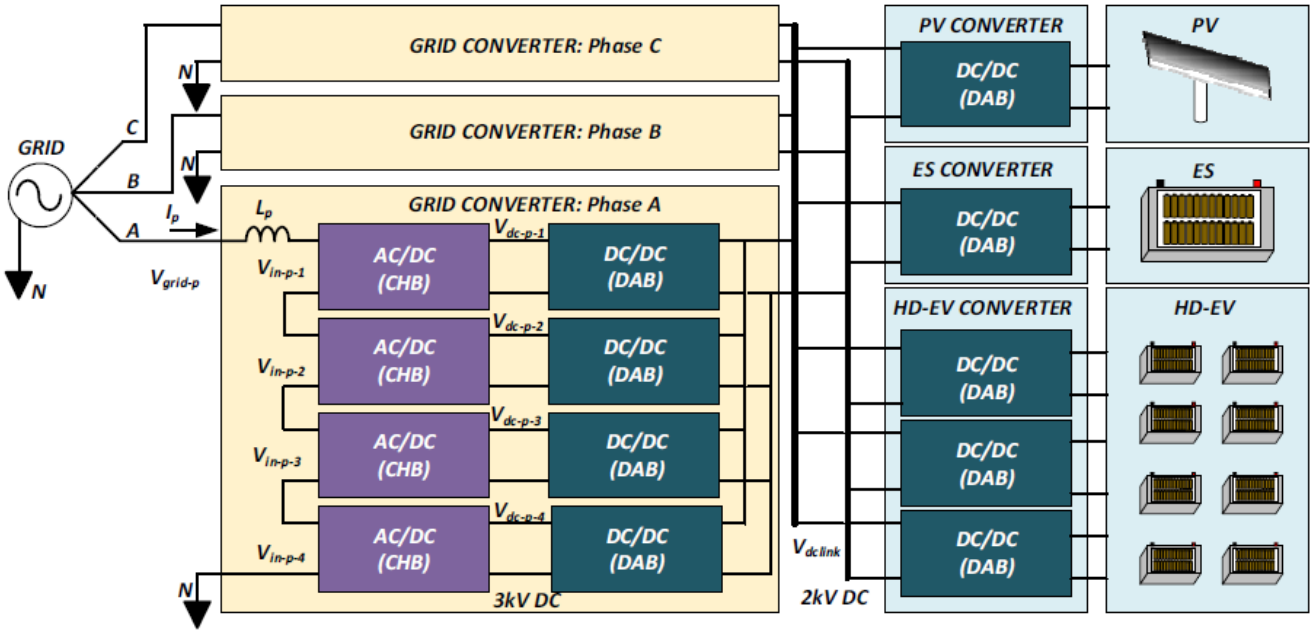


ABBILDUNG 4: MULTIPORTS: TECHNISCHER AUFBAU AUS [17, 23].

- 4) Verfügbarkeit von Ressourcen: Die Optimierung geht davon aus, dass PV-Systeme, das Netz und die ES jederzeit zur Verfügung stehen und flexibel genutzt werden können.
- 5) Lastvorhersagen: Es wird angenommen, dass präzise Vorhersagen für die Ladeanforderungen der Elektrofahrzeuge existieren, die in die Optimierung einfließen.

Die abzuleitende Minimierungsfunktion ist in (1) abgebildet. H_1 und H_2 dienen als Hilfsvariablen, die den Einfluss der Energiespeicherkapazität der jeweiligen Speichersysteme H_1 und die Leistung am NVP H_3 definieren. Zusätzlich ist P_{EV} die Ladeleistung der jeweiligen EVs oder E-LKW. μ_{ES} , μ_{NVP} und μ_{PV} sind die Gewichtungen der einzelnen Variablen in der Minimierungsfunktion.

$$\min \left(\sum \mu_{ES} \cdot H_1(t) + \sum \mu_{NVP} \cdot H_2(t) - \sum \mu_{PV} \cdot P_{EV}(t) \right) \quad (1)$$

$$C_{MIN} - E_{ES}(t) \leq H_1 \leq E_{ES}(t) - C_{MAX} \quad (1)$$

$$H_1 \geq 0$$

$$-P_Z(t) + \sum (P_L(t) - P_{EL}(t)) \leq H_2 \leq P_Z(t) + \sum (-P_L(t) + P_{EL}(t)) \quad (3)$$

$$H_2 \geq 0$$

$$P_{EV}(t) = \begin{cases} 0 \leq P_{EV}(t) \leq F_{EV}(t), & \text{wenn } \beta_{EV} = 1 \\ P_{EV}(t) = 0, & \text{wenn } \beta_{EV} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Die Systemgrenzen in (2) beschreiben neben dem aktuellen Ladestand $E_{ES}(t)$, auch die existierenden Zustandsgrenzen der Energiespeichersysteme im MCS und stellen sicher, dass die Energiespeicher nur innerhalb ihrer Kapazitätsgrenzen $E_{MIN}(t)$, $E_{MAX}(t)$ betrieben werden. Somit wird eine Überladung oder Unterentladung verhindert.

Die Grenzen in (3) steuern die Lastverteilung im MCS und sorgen dafür, dass die Leistungsanforderungen an das Netz

erfüllt werden. Dies geschieht, indem die MCS-Multiports koordiniert werden, um eine konstante bzw. möglichst niedrige Netzbelastung zu gewährleisten. H_2 muss demnach so groß sein wie die Differenz zwischen der Ziel-Leistung P_Z und dem aktuellen Leistungsbeitrag der Multiports, also die Differenz aus der Ladeleistung P_L und Entladeleistung P_{EL} . Dies gilt sowohl für die Lade- als auch für die Entladerichtung in (3).

Abschließend beschreibt (4) die Ladeleistung P_{EV} des EV zu einem bestimmten Zeitpunkt. Diese darf nicht größer sein als die prognostizierte Ladeleistung $F_{EV}(t)$. Sie stellt sicher, dass die Ladeleistung im Rahmen des Fahrzeugprofils bleibt und nur geladen wird, wenn $\beta_{EV} = 1$ ist, also das EV angeschlossen und aktiv ist.

Weitere Bedingungen wie die Bestimmung der Lade- und Entladeprozesse der Batterie des Energiespeichers sind unter [17, 23] zu finden.

B. Regulatorischer Rahmen und Planung der Ladeinfrastruktur in Deutschland

Im Jahr 2023 hat das EU-Parlament die Verordnung zum Aufbau einer Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (kurz AFIR) erlassen [26, 27]. Hieraus gehen europaweite Mindestanforderungen für den Aufbau einer batterieelektrisch- und wasserstoffbasierten Lade- und Tankinfrastruktur hervor. Für Nutzfahrzeuge der Kategorie N3 sollen entlang des transeuropäischen Verkehrsnetzes (TEN-V) je 60 km pro Fahrtrichtung eine LIS mit $P_L \geq 3,6$ MW aggregierter Ladekapazität errichtet werden. Zusätzlich sind alle 200 km Wasserstofftankstellen zu errichten.

Die ABBILDUNG 5 zeigt das TEN-V Kernnetz in Deutschland, mit einer Länge von ca. 6.370 km, sowie die daraus resultierenden Ladestandorte. Zusätzlich soll im TEN-V Gesamtnetz je Fahrtrichtung ein Ladestandort mit mindestens $P_L \geq 1,5$ MW / 100 km errichtet werden. In Deutschland betrifft dies zusätzlich rund 5.500 km. In Summe müssen bis 2025/2027 15 % bzw. 25 % der aufgelisteten Standorte in Betrieb genommen sein [3, 26, 27]. In [25] wird

mit einem öffentlichen Ladenetz entlang der Hauptverkehrsrouten mit $P_L \geq 1,7 \text{ MW} / 60 \text{ km}$ je Fahrtrichtung als strategisch ausreichende Menge gerechnet.

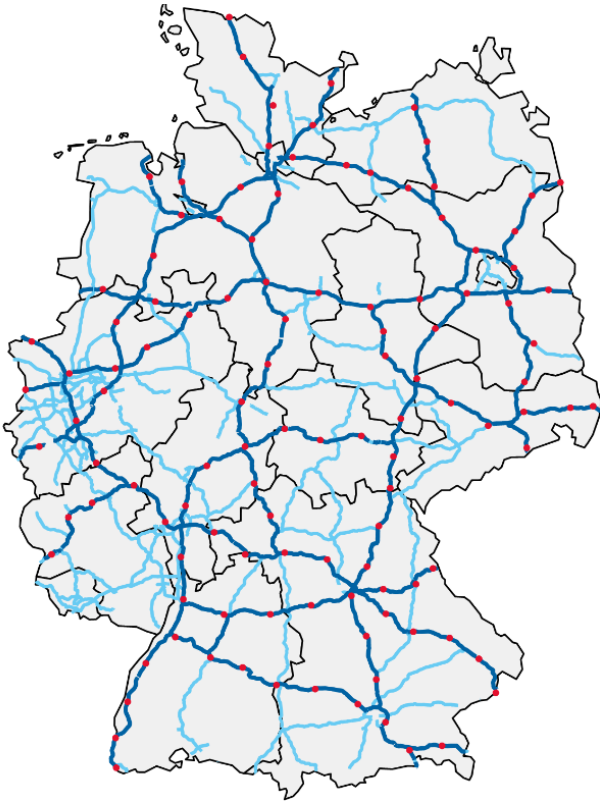


ABBILDUNG 5: AFIR-KONFORMES BEISPIELLADESYSTEM FÜR DAS TEN-V-NETZ, ENTNOMMEN AUS [3] UND [24].

Dies kann sowohl durch HPC als auch durch MCS-Systeme umgesetzt werden. Hierbei sollten bestehende HPC-Standards verwendet werden und gleichzeitig der MCS-Standardisierungsprozess vorangetrieben und schnellstmöglich abgeschlossen werden. Insofern ist es richtig und sinnvoll, bereits heute Ladestandorte für die gemeinsame Nutzung für das HPC- und MCS-Laden zu planen und umzusetzen [24, 25].

C. Beispiele der aktuellen Umsetzung

Aktuell laufen im Kontext der Großladeinfrastruktur viele verschiedenen Projekte mit unterschiedlichen Zielsetzungen. Nachfolgend werden einige kurz vorgestellt und ihre Zielstellung erläutert.

1) Retail4Multi-Use (Forschungsprojekt bis Dez. 2025)

Das Projekt untersucht die Mehrfachnutzung von Ladeinfrastruktur im Einzelhandel. Es untersucht dabei nur einen Teil der Großladeinfrastruktur, und zwar die Mehrfachnutzung, ohne auf den Aspekt der Megawattladung einzugehen. Ziel des Projektes ist es, das Potenzial von Multiladesäulen zu ermitteln, um die Auslastung zu optimieren und deren Wirtschaftlichkeit zu steigern. Dabei sollen auch planbare Nutzergruppen wie Taxis, Logistik und Carsharing die Ladeinfrastruktur nutzen. Mit georeferenzierten Analysen werden Standorte bewertet und ein digitales Matching-System entwickelt, welches Angebot und Bedarf verknüpft. Die Ergebnisse sollen auf weitere Bereiche wie Wohnungswirtschaft und ländliche Räume übertragbar sein. Das Projekt läuft von 2023 bis 2025 unter Beteiligung des DLR und des Reiner Lemoine Instituts [13].

Zur installierten Ladeleistung oder der weiteren technischen Ausführung ist zum heutigen Zeitpunkt nichts bekannt.

2) Shell Multi-use Charger, Amsterdam (Reallabor)

Shell hat an seinem Energy Transition Campus in Amsterdam ein MCS-Megawatt-Ladesystem ($P_L = 3 \times 350 \text{ kW}$) installiert, das speziell für schwere Elektro-LKW sowie Schiffe konzipiert wurde. Dieses DC-System vereinfacht das Laden von Nutzfahrzeugen und Schiffen mit hohem Energiebedarf. Ausgestattet mit zwei CCS-Ladearmen (Combined Charging System), unterstützt das System eine flexible und schnelle Aufladung verschiedener Fahrzeugtypen. Ebenfalls werden verschiedene Batterietypen unterstützt. Shell will damit einen Beitrag zur Dekarbonisierung im Logistiksektor leisten und die Ladeinfrastruktur für eine wachsende Anzahl an E-LKW und Schiffen bereitstellen, siehe ABBILDUNG 6 [14].



ABBILDUNG 6: DUAL-USE-CHARGER IN AMSTERDAM, SHELL, AUS [14].

3) CharIN MCS Charging Site, Portland, USA (Planungsphase)

Erste öffentliche LKW-Ladeinfrastruktur in Portland, Oregon, USA. Eine aktuelle Planungsvorschau ist in ABBILDUNG 7 abgebildet. Bestehend aus einer bisher unbekannt Anzahl an $P_L = 3,75 \text{ MW}$ -MCS, erfolgt eine Verknüpfung zwischen LIS und Batterien zur Reduktion der Netzbelastung. Vor Ort sollen sowohl LKW als auch Busse bis hin zu EV geladen werden können. Die Infrastruktur befindet sich in Planung, in Zusammenarbeit mit Portland General Electric und Daimler Truck Nordamerika. Weitere MCS-Stationen ähnlicher Bauart sind in Vorbereitung.



ABBILDUNG 7: DUAL-USE-CHARGER IN PORTLAND, OREGON, USA-CHARIN, AUS [15].

4) Aral Rhein-Alpen-Ladekorridor (Umsetzung)

Eine neue Ladeinfrastruktur für elektrische LKW entlang eines 600 km langen Korridors wurde 2023 eröffnet. Jeweils zwei Ladestationen, positioniert an sechs Standorten, bieten jeweils an $P_L = 2 \times 300 \text{ kW}$ CCS-Ladepunkte, die für

schwere Nutzfahrzeuge geeignet sind. Die Ladekapazitäten werden in den kommenden Monaten durch weitere Standorte erweitert. In 45 Minuten können LKW etwa 200 km Reichweite laden. Zukünftig wird der MCS-Standard (Megawatt Charging System) erwartet, um das Laden von 400 km Reichweite in 45 Minuten zu ermöglichen, was speziell für Langstrecken-LKW ein praxisrelevanter Ansatz ist [28].

III. REALLABOR AM KRONPRINZKAI

A. Hintergrund des Kronprinzkais

Der Hamburger Hafen wird aufgrund seiner Bedeutung für den straßengebundenen Transport von Waren eine entscheidende Rolle bei dem Aufbau von Ladeinfrastruktur für elektrische Schwerlastfahrzeuge einnehmen. Um die Elektrifizierung der Schwerlastfahrzeuge im Hamburger Hafen zu beschleunigen, wurde zwischen der Hamburg Port Authority (HPA) und dem Fahrzeughersteller IVECO im September 2021 ein Memorandum of Understanding zum Einsatz von 25 elektrischen Schwerlastfahrzeugen geschlossen [29]. IVECO arbeitet in dem Zusammenhang mit dem Ladeinfrastrukturbetreiber Mer zusammen, um die zuverlässige und schnelle Versorgung der E-LKW mit Ladestrom in hohen Ladeleistungen sicherzustellen. Mittlerweile hat Mer im Hamburger Hafen (auf dem Gelände des Kreuzfahrtterminals Steinwerder) insgesamt drei Ladeinfrastruktureinheiten für die Ladung von E-LKW errichtet. Jede Ladeinfrastruktureinheit verfügt über eine Leistung an $P_L = 300$ kW und jeweils zwei Ladepunkte, auf die die Leistung aufgeteilt werden kann. Somit können insgesamt sechs E-LKW gleichzeitig an der LIS versorgt werden.

Neben dieser HPC-LIS existieren weitere große Energieverbraucher im Hamburger Hafen (oder werden hinzukommen): Neben dem Aufbau von Landstromanlagen zur Versorgung von Container-, Kreuzfahrt und anderen Schiffen, wird ein 100 MW-Elektrolyseur zur Herstellung von Wasserstoff im Hafen geplant. Um diese zukünftigen Energiebedarfe im Hafengebiet decken zu können, ist ein Ausbau des Verteilnetzes notwendig. Gleichzeitig sollten die vorhandenen Netzkapazitäten möglichst effizient genutzt werden, um den kosten- und zeitintensiven Netzausbau möglichst gering zu halten. Eine zentrale Maßnahme, um die Netzkapazitäten effektiv nutzen zu können, ist die Implementierung eines intelligenten Last- und Lademanagement (LLM), das vorausschauend die netzseitigen Bedingungen mit den verbraucherseitigen Anforderungen abstimmt. Im Rahmen des dtec emob-Projektes der Helmut-Schmidt-Universität wird ein solches netzseitiges Last- und Lademanagement entwickelt, wobei die aktuellen Netzzustände anhand von künstlicher Intelligenz prognostiziert werden können.

Im Rahmen einer Kooperation zwischen der Helmut-Schmidt-Universität und der Mer Germany GmbH können die Daten der von Mer im Hamburger Hafen errichteten Ladeinfrastruktur für die Forschungsarbeit in dtec emob genutzt werden. Der von Mer betriebene Standort befindet sich in unmittelbarer Nähe zur Wasserkante, was den Standort auch für das Angebot einer Landstromversorgung geeignet erscheinen lässt. Konkrete Pläne bestehen jedoch aktuell nicht.

Das im Zuge des dtec emob-Projektes entwickelte LLM kann durch die Datenlieferung von Mer validiert und verbessert werden. Zudem bietet die Nähe der

Ladeinfrastruktur zum Wasser die Möglichkeit eine verkehrsträgerübergreifende Nutzung der Lademöglichkeit, hier Straße und Wasser, zu untersuchen. Die Helmut-Schmidt-Universität wird im Projekt simulieren, wie durch die Bündelung der Ladebedarfe der notwendige Netzausbau reduziert werden könnte.

B. Messhintergrund und Zielstellung

Am Kronprinzkai werden nach der Eröffnung drei 300 kW-HPC-Charger von HYC mit jeweils zwei Ladepunkten betrieben. Dahinterliegend befindet sich ein Transformator mit einer Bemessungsleistung von $S_{\text{Trafo}} = 1$ MVA. Dieser kann bei Bedarf erweitert werden. Der Aufbau entspricht technisch nicht den Grundlagen eines MCS, stellt jedoch eine der aktuell größten Ladeinfrastrukturen in Hamburg dar.

Hieraus ergeben sich für den Betreiber verschiedene Forschungsfragen, die mittels Analysen und der Verwendung von Messequipment zu beantworten wären:

- Wie verhält sich das Ladeaufkommen?
- Welche Leistungen werden von welchen Fahrzeugen geladen?
- Wie kann eine Prognose/vorausschauende Planung zur Nutzung und Auslastung implementiert werden? Wie kann diese optimiert werden?
- Wie ist die allgemeine Markthochlauf? Wie verhält sich der Bedarf in Bezug auf die Prognose?
- Welche lokalen Bedarfe verschiedener Nutzergruppen entstehen?
- Wann und wie sichern sich die Betreiber die Strommengen im Vorfeld?
- Wie sehen die Live-Ladevorgänge an den Stationen aus? Welche Cluster lassen sich daraus entwickeln?

Durch den ChargeLog sowie weiteren Messsystemen (wie Powerquality-Messtechnik an den Sammelschienen der Trafo-Unterspannungsseite) können relevante Informationen wie I_L , P_L , U , oder State-of-Charge (SOC) in einer $\frac{1}{2}$ min-Auflösung ausgewertet werden. Als übergreifende Zielstellung kann daher der Aufbau eines digitalen Zwillings zum Live-Tracking und Forecast sowie zur Auswertung bestehender Daten und zur Big Data-Analysis umgesetzt werden.

IV. ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit untersucht die Herausforderungen und Ansätze zum Ausbau der Ladeinfrastruktur für elektrische Lastkraftwagen vor dem Hintergrund der Energiewende und Mobilitätstransformation. Die Elektromobilität im Güterverkehr gewinnt zunehmend an Bedeutung, wobei der Ausbau von HPC oder besser Megawatt-Charging-Systemen und Wasserstofftankstellen eine der zentralen Herausforderungen darstellt. Trotz der steigenden Zahl von Elektrofahrzeugen und dem wachsenden Angebot an E-LKW bleibt die Ladeinfrastruktur in vielen Regionen unzureichend ausgebaut.

Das Papier beschreibt aktuelle Konzepte für Hochleistungsladesysteme mit einer Ladeleistungen von bis zu $P_L = 3,75$ MW, die insbesondere für E-LKW und andere Mobilitätsträger wie Busse, Schiffe und Flugzeuge relevant sind. Diese Systeme erfordern einen Anschluss an das

Mittelspannungsnetz und zusätzliche Komponenten wie Transformatoren. Der Aufbau von Multiport-Ladesystemen, die verschiedene Energiequellen wie Energiespeicher und Photovoltaik integrieren, kann als eine Lösung für ein effizientes Netzmanagement (am NVP) und skalierbares Laden angesehen werden.

Ein erstes praktisches Beispiel für die Nutzung von HPC-Systemen im Projekt dtec emob wird am Kronprinzkai in Hamburg analysiert, an dem Ladeinfrastruktureinheiten mit bis zu 900 kW kumulierter Ladeleistung errichtet wurden. Ziel ist die Entwicklung eines digitalen Zwillings zur Prognose und Analyse des Ladeverhaltens und des notwendigen Netzausbaus.

DANKSAGUNG

Diese Forschungsarbeit wird durch dtec.bw – Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr gefördert. dtec.bw wird von der European Union – NextGenerationEU finanziert.

LITERATUR

- [1] International Energy Agency (IEA) (2023), "Global EV Outlook 2023," Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>
- [2] IEA (2024), "Global EV Outlook 2024", Paris <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>
- [3] Sachverständigenrat "Frühjahrgutachten 2024 – Teil 2: Güterverkehr zwischen Infrastruktur-Anforderungen und Dekarbonisierung". Available: https://www.sachverstaendigenrat-wirtschaft.de/fileadmin/dateiablage/gutachten/fg2024/FG2024_Kapitel_2.pdf
- [4] Smith, A., (2023), "Electric Vehicle Charging Infrastructure: Global Development and Trends," *Energy Policy Journal*, vol. 145, pp. 1-15.
- [5] Johnson, B., "Public Charging Points: Growth and Challenges," *Journal of Sustainable Transportation*, vol. 12, no. 3, pp. 45-58, 2023
- [6] Wood & Mackenzie (2021), "Insight Electric vehicles outlook to 2050: Impacts and flexibility in European power", Available: <https://www.woodmac.com/reports/power-markets-electric-vehicles-outlook-to-2050-impacts-and-flexibility-in-european-power-537306/>
- [7] Robinius, M., Markewitz, P., Lopion, et al. (2020), "Paths for the energy transition: Cost-efficient and climate-friendly transformation strategies for the German energy system up to 2050." – Original: "Wege für die Energiewende: Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050." Jülich, Germany: Forschungszentrum Jülich GmbH.
- [8] BNA – Bundesnetzagentur (2024), "Electromobility: public charging infrastructure" – Original: "Elektromobilität: Öffentliche Ladeinfrastruktur", Available: <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/E-Mobilitaet/start.html>
- [9] Federal Ministry for Digital and Transport (BMD) (2022), „Charging Infrastructure Masterplan II“, Available: https://nationale-leitstelle.de/wp-content/uploads/2023/01/Masterplan-Ladeinfrastruktur-II-der-Bundesregierung_Englisch_DIN_A4_barrierefrei.pdf
- [10] Schill, W. P., Gaete-Morales, C., Jöhrens, J., Heining, F. (2024), "Klimaschutz im Güterverkehr: Batterieelektrische Antriebe können günstiger mit erneuerbarem Strom versorgt werden als Wasserstoff-Lkw.," *DIW aktuell* No. 94, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin.
- [11] Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021), „Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann.“, Prognose, Langfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende.
- [12] Minnich, L., Radrianrisoa, J., Ritter, D., Vogel, M., et. al (2022), „Szenarien und regulatorische Herausforderungen für den Aufbau der Ladeinfrastruktur für elektrische Pkw und Lkw.“, Oeko-Institut; Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln. Available: https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/ENSURE-II_Ladeinfrastruktur.pdf
- [13] Reiner Lemoine Institut (2023), "Retail4Multi-Use – Investigation of multi-use concepts at charging stations in the retail sector.," Available: <https://www.reiner-lemoine-institut.de/en/retail4multiuse/>
- [14] Nolan, S. (2024), „Shell Ushers in Megawatt Charger for Trucks & Vessels“, in EV.Magazine, Available: <https://evmagazine.com/articles/shell-ushers-in-megawatt-charger-for-trucks-vessels>
- [15] CharIN (2024), "CharIN MCS Construction Layout", Available: <https://www.charin.global/technology/mcs/>
- [16] Staubli (2024), "DEE-Mobility | Mehrpolige Steckverbinder Megawatt Charging System (MCS)", Available: <https://www.staubli.com/content/dam/ecs/catalogs-brochures/EMOB/EMOB-MCS-Charging-11014001-de.pdf>
- [17] Moorthy, R. S. K., Starke, M., Dean, B., Adib, A., Campbell, S., Chinthavali, M., "Megawatt Scale Charging System Architecture", *2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Detroit, MI, USA, 2022, pp. 1-8, doi: 10.1109/ECCE50734.2022.9947403
- [18] Michaelis, R., "Interoperable Vehicle2Grid integration enabled by the combined charging system", *5th E-Mobility Power System Integration Symposium (EMOB 2021)*, Hybrid Conference, Germany, 2021, pp. 48-63, doi: 10.1049/icp.2021.2505
- [19] Pradhan, R., Shah, S. B., Hassan, M. I., Wang, Z., Emadi, A., "A 15 kW Wide-Input Reconfigurable Three-Level DAB Converter for On-Board Charging of 1.25 kV Electric Vehicle Powertrains", in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, doi: 10.1109/TTE.2024.3358110
- [20] Wieland, S., Sun, T., Kanzenbach, L., Schneider, J., Edelmann, J., Dix, M., "Experimental setup for evaluation of electrical face contacts for high-current applications", *2024 1st International Conference on Production Technologies and Systems for E-Mobility (EPTS), Bamberg, Germany, 2024*, pp. 1-6, doi: 10.1109/EPTS61482.2024.10586737
- [21] Ligen, Y., Vruble, H., Girault, H., "Local Energy Storage and Stochastic Modeling for Ultrafast Charging Stations". *Energies*, 2019, 12, 1986. <https://doi.org/10.3390/en12101986>
- [22] Mortimer, B., Olk, C., Roy, G. K., Tarnate, W. R., De Doncker, R. W., Monti, A., Sauer, D. U. (2019), "Fast-charging technologies, topologies and standards 2.0", E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen University, Available: <https://www.fcn.eonerc.rwth-aachen.de/go/id/dnff/idx/1/file/788334>.
- [23] Starke, M., et al., "A MW scale charging architecture for supporting extreme fast charging of heavy-duty electric vehicles," *2022 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*, Anaheim, CA, USA, 2022, pp. 485-490, doi: 10.1109/ITEC53557.2022.9813825.
- [24] Balke, G., Zähringer, M., Paper, A., Lienkamp, M., "Navigating the change: Constrained optimization and ramp-up strategy of a charging network for battery electric heavy trucks", *27th IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, 2024.
- [25] Balke, G., Zähringer, M., Schneider, J., Lienkamp, M. (2024b), "Connecting the dots: A comprehensive modeling and evaluation approach to assess the performance and robustness of charging networks for battery electric trucks and its application to Germany", *World Electric Vehicle Journal*, 15 (1), 32.
- [26] Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2023), Verordnung (EU) 2023/1804 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. September 2023 über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe und zur Aufhebung der Richtlinie 2014/94/EU, PE/25/2023/INIT, Straßburg, 13. September.
- [27] Ragon, P.-L., Mulholland, E., Basma, H., Rodríguez, F. (2022), "A review of the AFIR proposal: Public infrastructure needs to support the transition to a zero-emission truck fleet in the European Union", White Paper, Int. Council on Clean Transportation, Washington, DC.
- [28] Schall, S. (2023) "Aral nimmt Europas ersten E-Lkw-Ladekorridor in Betrieb", *Electrive.net*, Available: <https://www.electrive.net/2023/01/23/aral-nimmt-europas-ersten-e-lkw-ladekorridor-in-betrieb/>
- [29] Hafen Hamburg Marketing e.V. (HHM) (Hrsg.) (2021), "Iveco und Nikola unterzeichnen Memorandum of Understanding mit der Hamburg Port Authority.," Available: <https://www.hafen-hamburg.de/de/presse/news/iveco-und-nikola-unterzeichnen-memorandum-of-understanding-mit-der-hamburg-port-authority/>