

ELEKTRIFIZIERUNG DES GÜTERVERKEHRS



**TECHNOLOGIEN UND
HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN**

NEFTON 

VORWORT

Die straßengebundene Transportlogistik ist das Rückgrat der europäischen Wirtschaft. Allein in Deutschland betrug die Transportleistung des Straßenverkehrs im Jahr 2022 504 Milliarden Tonnenkilometer, was einem Anteil von über 70 % der nationalen Transportleistung entspricht. Mit dem Pariser Klimaabkommen und den daraus abgeleiteten Emissionszielen der Europäischen Union steht die Transportbranche vor einer rasanten Antriebswende. Um die Klimaziele bei gleichzeitiger Erfüllung des steigender Transportaufkommen zum Erhalt der wirtschaftlichen Entwicklung zu erreichen, müssen Industrie und Wissenschaft die Antriebstransformation ganzheitlich zu denken und effizient zu gestalten. Das Forschungsprojekt NEFTON leistet hier durch innovative Entwicklungen, wissenschaftliche Untersuchungen und den hier vorliegenden Leitfaden einen entscheidenden Beitrag zum Gelingen dieser Transformation. Es erwartet Sie ein umfassender Blick auf die Elektrifizierung des Transportsektors, ergänzt mit fachlichen Vertiefungen für Elektro-Lkw und hocheffiziente Ladeinfrastruktur sowie wissenschaftliche Untersuchungen, die Speditionen und Politik Empfehlungen für die effiziente Gestaltung der Transportelektrifizierung an die Hand geben. Dieses Buch soll die Forschungsergebnisse der letzten 3 Jahre zugänglich zusammenfassen und so eine Richtschnur geben, wie die Elektrifizierung des Güterverkehrs erfolgreich erreicht werden kann.

Wir möchten uns als gesamtes Konsortium an dieser Stelle für das Vertrauen des DLR Projektträgers und des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz bedanken. Außerdem gilt unser Dank unserem Kundenbeirat aus Speditionen, der kontinuierlich die Anwenderperspektive in die Forschung eingebracht hat.

EXECUTIVE SUMMARY



nefton.de/summary

1

2

3

4

5

6

INHALT

	EINLEITUNG UND MOTIVATION	6
1.1	Rolle des Straßengüterverkehrs	8
1.2	Herausforderung der Elektrifizierung	12
	ANFORDERUNGEN AUS DER LOGISTIK	16
2.1	Wirtschaftliche Rahmenbedingungen	18
2.2	Anforderungen an Fahrzeug und Infrastruktur	22
	LADEINFRASTRUKTUR	32
3.1	Einführung in Ladetechnologien und -standards	34
3.2	Elektrifizierung im Depot	40
3.3	Aufbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur	44
3.4	Technologische Innovationen	46
	NUTZFAHRZEUG	58
4.1	Batteriesysteme für Elektro-Lkw	60
4.2	Megawattladen für den Fernverkehr	66
	DIE LOGISTIK VON MORGEN	74
5.1	Blick in die Zukunft	76
5.2	Zukünftige Forschungsfelder	80
	ÜBER DAS KONSORTIUM	86
6.1	Team NEFTON	88
6.2	Veröffentlichungen und Glossar	91



EINLEITUNG UND MOTIVATION

Der Straßengüterverkehr ist das Rückgrat unserer Wirtschaft und dessen Elektrifizierung einer der größten Stellhebel auf dem Weg zu den europäischen Klimaschutzziele. Durch ganzheitliche Forschung können Technologien für Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur, sowie Strategien und Handlungsempfehlungen für eine zukunftsorientierte Transformation des Sektors erarbeitet werden.



ROLLE DES STRASSENGÜTERVERKEHRS

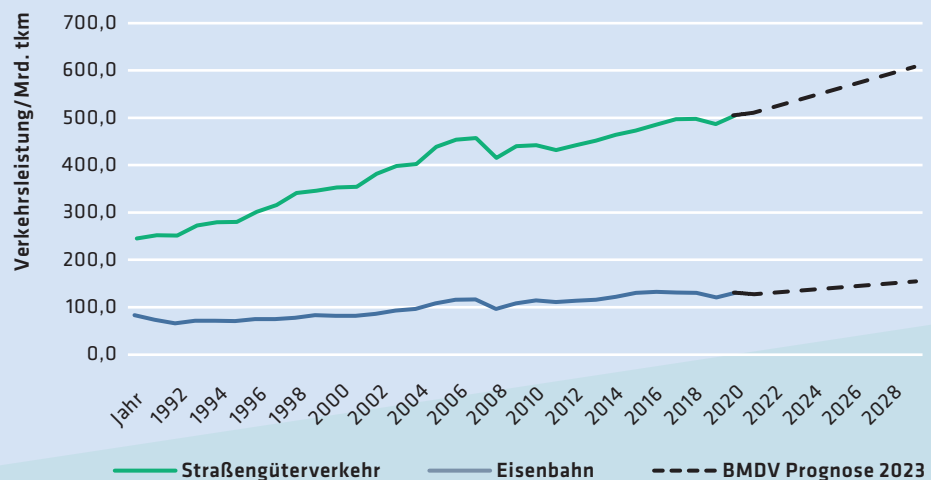
Die Dekarbonisierung des Nutzfahrzeugsektors ist das erklärte Ziel des Projektes NEFTON. Insbesondere schwere Lkw im Fernverkehr müssen hierzu priorisiert werden.

Steigende Transportleistung

Mit einer jährlichen Transportleistung von derzeit über 500 Milliarden Tonnenkilometer, Tendenz weiter steigend, erbringt der Straßengüterverkehr mit über 70 % den größten Anteil des gesamten Transportaufkommens in Deutschland. Im Jahr 2023 waren hierzu 3,6 Millionen Nutzfahrzeuge in Deutschland zugelassen. Im Vergleich zum Pkw-Bestand von rund 49 Millionen, ist die Flottengröße der Nutzfahrzeuge zwar gering, aufgrund ihrer deutlich höheren Fahrleistung tragen sie jedoch entscheidend zum Emissionsausstoß des Transportsektors bei.

Abb. 1: Prognose der Verkehrsleistung des Straßengüterverkehrs und der Eisenbahn bis zum Jahr 2030. Der Straßengüterverkehr wird den größten Teil des Wachstums im gesamten Gütertransport tragen.

Güterverkehrsleistung in Deutschland



Bedeutender Anteil an Emissionen

Mit 148 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent entfallen etwa 1/5 der gesamten Emissionen in Deutschland auf den Verkehrssektor. Obwohl der Anteil an Nutzfahrzeugen in diesem Sektor nur gering ist, stellen sie mit 40 % einen entscheidenden Anteil an den Verkehrsemissionen dar. Dabei werden 71 % dieses Anteils durch schwere, dieselbetriebene Lkw über 12 Tonnen verursacht » **Abb. 1**. Um die Klimaziele zu erreichen, stellt die Dekarbonisierung schwerer Nutzfahrzeuge einen zentralen Stellhebel im Verkehrssektor dar.

Seit 1995 konnten die Emissionen der Lkw pro Kilometer laut Umweltbundesamt um 8,5 % gesenkt werden. Durch bessere Motoren, Reifen und die Aerodynamik stieg die Effizienz der Lkw. Dennoch ist absehbar, dass die ehrgeizigen EU-Emissionsziele von 45 % Senkung bis 2030 und 90 % Senkung bis 2040 durch die Verbesserung von Dieselfahrzeugen nicht erreicht werden können.

Flottenzusammensetzung

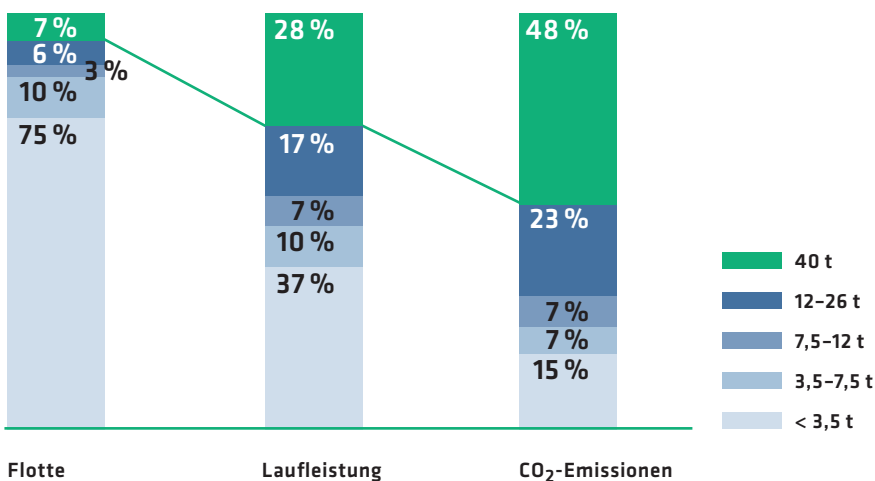
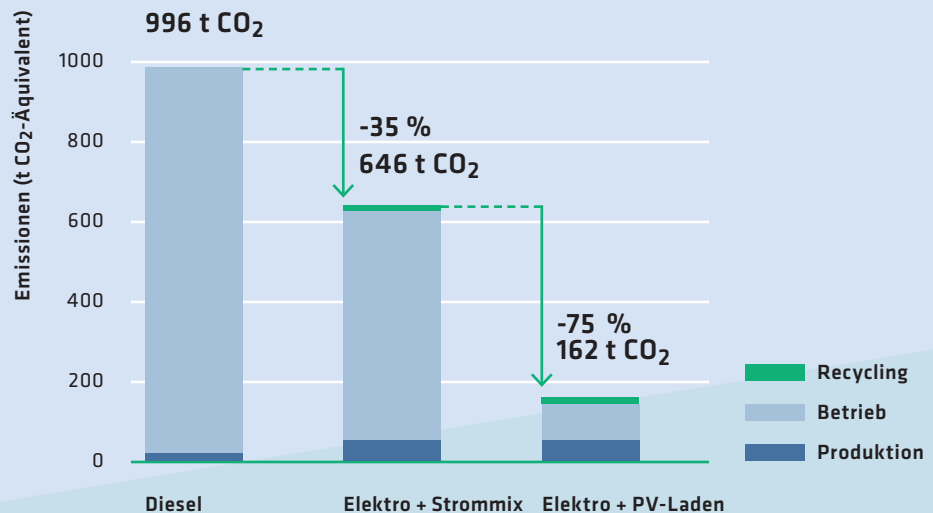


Abb. 2: Fahrleistung und CO₂-Emissionen nach Gewichtsklassen der Nutzfahrzeuge.

Die hohe Fahrleistung im Laufe eines Lkw-Lebens ist die primäre Ursache der verursachten CO₂-Emissionen » **Abb. 2**. Die Emissionen in der Produktion eines konventionellen Lkw sind gegenüber den Emissionen durch die Dieselerbrennung im Betrieb verschwindend gering. Zwar sind die CO₂-Emissionen der Produktion und des Recyclings eines batterieelektrischen Lkw, im Nachfolgenden Elektro-Lkw genannt, im Vergleich zum konventionellen Antrieb deutlich höher, jedoch kann bei der Betrachtung des gesamten Lebenszyklus durch den überproportional größeren Anteil der Emissionen im Betrieb des Lkw der deutlich bedeutendere Anteil vermindert werden. Ursächlich für die hohen Werte bei der Produktion und dem Recycling des Elektro-Lkw ist die aktuell noch emissionsreiche Herstellung der Batterien. Die Gewinnung und Verarbeitung von Rohstoffen wie Lithium, Kobalt, Nickel, Kupfer und Aluminium erfordert einen erheblichen Energieaufwand, oft in Form von fossilen Brennstoffen, woraus hohe CO₂-Emissionen resultieren.

Abb. 3: Treibhausgas-Emissionen unterteilt in die Bereiche des Produkt Lebenszyklus. Aktuell fällt der überwiegende Teil der Emissionen durch Dieselerbrennung im Betrieb an. Durch die Elektrifizierung wird die energieintensive Produktion der Batterien stärker in den Fokus rücken.

Treibhausgas-Emissionen



Auch die gesamte Fertigung von Elektro-Lkw erfordert aufgrund der komplexen Batteriesysteme und Elektromotoren spezialisierte und teilweise energieintensive Produktionsprozesse. Deutlich wird jedoch in » **Abb. 3**, dass trotz dieser vergleichsweise hohen Werte der gesamte CO₂-Ausstoß durch Elektro-Lkw signifikant reduziert werden kann. Über den Lebenszyklus hinweg sind die CO₂-Emissionen eines elektrischen Lkw um 35 % niedriger als die eines konventionellen und durch eine Kombination mit PV-Laden kann eine Reduktion um nochmals 75 % erreicht werden.

Wie die » **Abb. 3** verdeutlicht, entstehen sowohl bei Diesel- als auch Elektro-Lkw der Großteil der Emissionen durch den Fahrbetrieb, entweder durch die Dieselerbrennung oder die Stromerzeugung. Den größten Hebel in der Dekarbonisierung hat demnach der Antrieb. Zur Diskussion stehen derzeit die Nutzung von synthetischen Kraftstoffen, sogenannten eFuels, und Wasserstoff für die Nutzung in Brennstoffzellen oder Verbrennungsmotoren. Demgegenüber stehen Lösungen mit reinem Elektroantrieb, die im Fokus des NEFTON-Projekts sind. Der Ausbau der erneuerbaren Energien ist für jegliche zukünftige Antriebsformen der zentrale Hebel. Um den Ausbau zielgerichtet zu gestalten, sollte die effizienteste Lösung, die gleichzeitig den Anforderungen der Logistikbranche gerecht wird, gewählt werden. Im Folgenden gehen wir auf die Gesamteffizienzen dieser Antriebsformen näher ein.

HERAUSFORDERUNG DER ELEKTRIFIZIERUNG

Die Elektrifizierung des Güterverkehrs stellt eine gewaltige Herausforderung für alle beteiligte Stakeholder dar. Neben diesen Herausforderungen werden zunächst nachhaltige Antriebstechnologien verglichen und der erwartete Markthochlauf von Elektro-Lkw dargestellt.

Effizienzvergleich nachhaltiger Antriebstechnologien

Unter der Prämisse, dass rein erneuerbare Energien für den Antrieb eines schweren Nutzfahrzeuges verwendet werden, beleuchten wir die Gesamteffizienz der verschiedenen Antriebsformen von Energiegewinnung (Quelle, engl. well) bis zum Rad des Lkw (engl. wheel). Diese, auch als Well-to-Wheel Wirkungsgrad bezeichnete Effizienz, setzt sich aus dem Well-to-Tank und dem Tank-to-Wheel Wirkungsgrad zusammen. Dabei beziffert der Well-to-Tank Wirkungsgrad das Verhältnis zwischen der Primärenergie und dem Anteil, der nach dem Energietransport noch im Fahrzeug ankommt. Die Tank-to-Wheel Effizienz beschreibt, wie viel der im Fahrzeug gespeicherten Energie am Ende tatsächlich zum Antrieb genutzt werden kann.

Der wissenschaftliche Vergleich der verschiedenen Antriebsformen hat gezeigt, dass Elektro-Lkw mit einem Well-to-Wheel Wirkungsgrad von etwa 75 % die höchste Gesamteffizienz aufweisen. Da für Brennstoffzellen-Lkw (Fuel Cell Electric Trucks – FCET) im Gegensatz zum batterieelektrischen Antrieb erneuerbarer Strom erst in Wasserstoff investiert und dann zurück in Strom gewandelt wird, erreichen sie hier nur einen vergleichsweise niedrigen Wirkungsgrad von 26 %. Die geringste Effizienz zeigt sich für den Einsatz von eFuels als Energieträger mit einem Well-to-Wheel Wirkungsgrad von lediglich 14 % » **Abb. 4**. Doch nicht nur die Effizienz, sondern auch die flächendeckende Verfügbarkeit ist ausschlaggebend für die Wahl eines nachhaltigen Energieträgers. Hier kommen aktuell nur Strom und fossile Kraftstoffe in Frage, auch wenn der Ausbau des Stromnetzes obligatorisch ist. Da bei Wasserstoff vor allem die Herstellung entscheidend für die Nachhaltigkeit dieses Energieträgers ist, würde nur „grüner Wasserstoff“ (erzeugt aus erneuerbaren Energien) für die Bereitstellung der Antriebsenergie relevant sein. Da diese Herstellungsart des Wasserstoffes aktuell noch wenig verbreitet ist, liegt der Fokus in der Antriebstechnologie für den europäischen Markt gegenwärtig auf den batterieelektrischen Antriebssystemen.

Diese Technologie bietet somit die höchste Energieeffizienz, außerdem können die größten technologischen Synergien mit elektrischen Pkw gehoben werden. Daher ist diese Technologie in naher Zukunft die Erfolgversprechendste auf dem europäischen Markt.

Well-to-Wheel Effizienzvergleich der Antriebssysteme

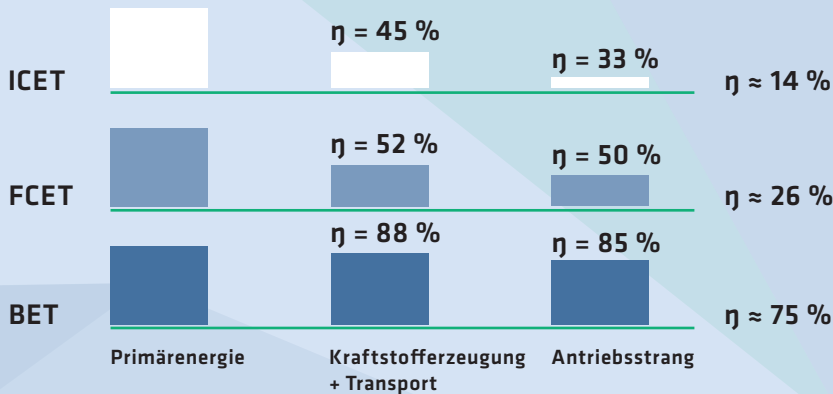


Abb. 4 Batterieelektrische Lkw, kurz Elektro-Lkw, weisen mit einem Gesamtwirkungsgrad von etwa 75 % die höchste Effizienz auf. Durch die mehrfache Energieumwandlung bei Wasserstoff (Elektrolyse) und eFuels (Fischer-Tropsch-Synthese) sinkt die Energieeffizienz dieser Antriebsformen erheblich. Solange kein erheblicher Überschuss an erneuerbarer Energie verfügbar ist, ist aus wissenschaftlicher Sicht der Elektro-Lkw klar im Vorteil.

Die Fokussierung auf Elektro-Lkw für den europäischen Markt zeigt sich neben dem prominenten Angebot der Nutzfahrzeughersteller auch in dem prognostizierten Markthochlauf. Auf diesen wird im Folgenden näher eingegangen.

Marktentwicklung elektrischer Lkw

Der aktuelle Stand und der erwartete Markthochlauf von Elektro-Lkw ist ein dynamisches Feld, das durch technologische Fortschritte, regulatorische Änderungen und Marktbedingungen stark beeinflusst wird. Auch wenn aktuell Elektro-Lkw in den meisten Märkten, einschließlich Deutschland, immer noch ein kleiner Teil des Gesamtmarktes sind, zeichnet sich ein eindeutiger Trend Richtung Elektrifizierung ab.

Prognostizierte Anteile der Antriebsformen an den Neuzulassungen in Deutschland

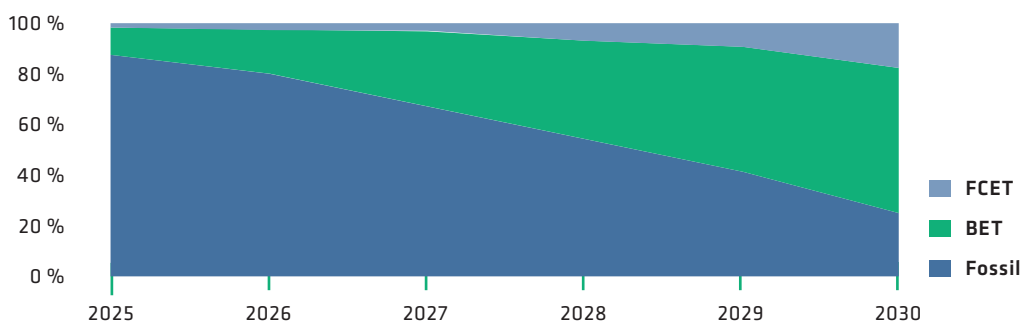


Abb. 5a Prognostizierter Marktanteil und -hochlauf schwerer Elektro-Lkw in Deutschland. Bis 2030 wird ein starker Markthochlauf von Elektro-Lkw erwartet, um die europäischen Emissionsziele zu erreichen.

Flotte schwerer BET

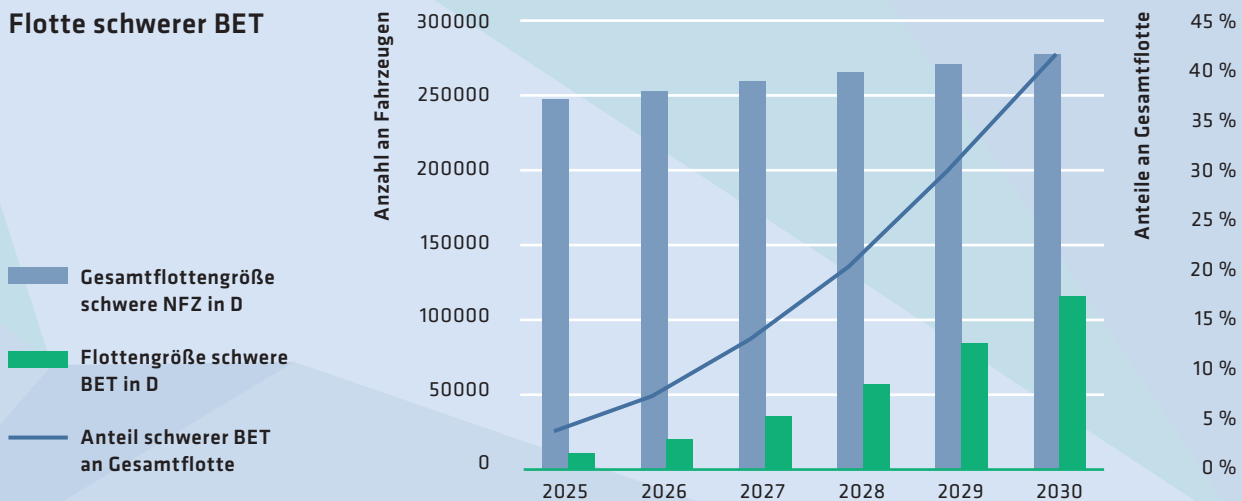


Abb. 5b Prognostizierter Marktanteil und -hochlauf schwerer Elektro-Lkw in Deutschland. Bis 2030 wird ein starker Markthochlauf von Elektro-Lkw erwartet, um die europäischen Emissionsziele zu erreichen.

Eine Prognose der Verkaufsanteile von schweren Lkw über 12 Tonnen in Deutschland deutet auf eine Verschiebung der Marktdynamik hin, wobei umweltfreundlichere Transportoptionen bevorzugt werden » **Abb. 5a**. Mit 75 % der jährlich verkauften Lkw des N3-Sektors könnten 2030 mit alternativen Antrieben den Güterverkehr unterstützen, gestartet wird dabei im Jahr 2024 mit etwa 4 %. Strenge Emissionsvorschriften, der spürbar steigende Stellenwert der Nachhaltigkeit in der gesamten Wirtschaft und Gesellschaft, wird den Markthochlauf zusätzlich beschleunigen und zu einer schnellen Transformation des Nutzfahrzeugsektors führen. Demnach werden 58 % aller verkauften, schweren Nutzfahrzeuge im Jahr 2030 Elektro-Lkw sein. Die steigenden Verkaufsanteile von Elektro-Lkw führen zu einem Markthochlauf mit einem Anteil an der Bestandsflotte von bereits 42 % im Jahr 2030 » **Abb. 5b**. Dies entspricht etwa 116.000 Elektro-Lkw.

Um den prognostizierten Markthochlauf in die Realität umzusetzen und damit sowohl die gesetzlichen Emissionsgrenzwerte als auch übergeordnet die Klimaziele zu erreichen, müssen zahlreiche damit verbundenen Herausforderungen adressiert werden. Diese betreffen alle Akteure entlang der Wertschöpfungskette: Hersteller, Infrastrukturbetreiber, Logistikunternehmen und Energienetzbetreiber. Diese Herausforderungen stellen die Motivation des Forschungsvorhabens NEFTON dar.

Heutiges Stimmungsbild

Lkw-Fahrer stellen das Rückgrat des heutigen Straßengüterverkehrs dar. Jedoch sind es genau diese, die dem Thema Antriebstransformation kritisch gegenüberstehen. In einer im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Umfrage von Lkw-Fahrern sprechen sich 78 % gegen den Umstieg auf Elektro-Lkw aus. Ihre Gründe dagegen signalisieren den erforderlichen Forschungs- und Entwicklungsbedarf » **Abb. 6**.

Deutlich wird bei diesen Gründen, dass die Elektro-Lkw als gesamtes Ökosystem betrachtet werden müssen, in das u. a. der Ausbau der Infrastruktur, saubere und sichere Fahrzeugabstellflächen, Ladestrategien und das Stromnetz miteinfließen. Obwohl aus wissenschaftlicher Sicht die Auslegung und der Betrieb der Elektro-Lkw durchaus fundiert ist, fokussiert sich die Meinung der Fahrer stark auf die Herausforderungen. Darunter fällt die Reichweitenangst und somit eine hohe Batteriekapazität der Fahrzeuge, eine hohe Lebensdauer der Batterie für möglichst niedrige Kosten und Nachhaltigkeitswerte wie die Produktionsemissionen und Recyclingfähigkeit.

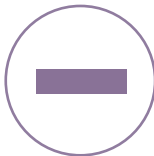


„Leises und emissionsfreies Fahren.“

„Zu wenig öffentliche Ladesäulen. Bis jetzt noch keine belastbaren Testergebnisse.“

„Gute Erfahrungen mit einem MAN TGE.“

„Geringe Reichweite“



„Fehlendes Zuladungsgewicht! Zu lange Ladezeiten! Zu wenig Strom vorhanden! Strom nicht sauber genug, um umweltfreundlich zu sein! Batterien sind nicht umweltfreundlich! Entsorgung ist nicht gesichert und zu aufwändig!“

„Geringe Autonomie und langsames Laden“

„Fehlende, praxisgerechte Nutzfahrzeug-Ladeinfrastruktur in D/EU. Diesbezüglich ebenfalls fehlende, saubere und sichere Nutzfahrzeug-abstellflächen/-parkplätze unterwegs.“

Abb. 6 Zitate von Lkw-Fahrern bezüglich der Gründe für und gegen den Umstieg zu einem Elektro-Lkw

Die Aufgabe ist gewaltig

Zusammenfassend wird deutlich, dass die Antriebstransformation zwingend erforderlich ist und dass dies in einer deutlich höheren Geschwindigkeit erfolgen muss als im Pkw-Sektor. Gleichzeitig stellt der Straßengüterverkehr die deutsche Wirtschaftsleistung sicher, sodass eine reduzierte Transportleistung durch z. B. Verzögerungen verhindert werden muss. Der Wandel hin zu einer ungewohnten Antriebstechnologie weist für alle beteiligten Akteure, von Lkw-Fahrern bis zum Energienetzbetreiber, hohe Unsicherheiten auf. Kurz gesagt: Die Aufgabe ist gewaltig!

Die gute Nachricht: Die Aufgabe wird angegangen. Das Forschungsvorhaben NEFTON betrachtet diese Herausforderung ganzheitlich, entwickelt Technologien für Fahrzeug und Ladeinfrastruktur, zeigt den Logistikunternehmen wie die Elektrifizierung des Depots zu einem echten „Gamechanger“ werden kann und stellt Handlungsempfehlungen bereit, die für Politik, Energiewirtschaft, Hersteller und Logistikunternehmen zielgerichtete Entscheidungen ermöglichen sollen. Im nächsten Kapitel beleuchten wir die Anforderungen aus den verschiedenen Bereichen, die sich zentral an der obersten Maxime, der Aufrechterhaltung des heutigen Transportvolumens, ableiten lassen.

2

ANFORDERUNGEN AUS DER LOGISTIK

Um erfolgreich in Logistikprozesse integriert zu werden, stellen Logistik und Gesellschaft Anforderungen an den Elektro-Lkw und dessen Ladeinfrastruktur. Dabei spielen die Anforderungen Wirtschaftlichkeit, Zuverlässigkeit und Ökologie zentralen Rollen für eine erfolgreiche Elektrifizierung des Güterverkehrs. Diese und weitere Anforderungen werden im Folgenden beschrieben und diskutiert.



WIRTSCHAFTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN

Die Transformation des Straßengüterverkehrs zur Klimaneutralität muss unter Aufrechterhaltung der heutigen Logistikprozesse bei gleichzeitiger Wirtschaftlichkeit gelingen. Dazu wird im Folgenden auf volkswirtschaftliche und speditiousindividuelle Anforderungen eingegangen.

Volkswirtschaftliche Betrachtung

Der Güterverkehr bildet das Rückgrat der deutschen Wirtschaft. Laut Untersuchungen des Umweltbundesamtes entfallen drei Viertel der deutschen Verkehrsleistung auf Lkw. Tatsächlich ist der Transport von Gütern eng mit der Wirtschaftsleistung verbunden: Steigende Industrieproduktion und steigender Konsum führen zu mehr Warenströmen. Dieser Zusammenhang wird als Transportintensität bezeichnet. Im Jahr 2020 wurden somit für jeden transportierten Tonnenkilometer Güter 7,70 € Bruttoinlandsprodukt erwirtschaftet.

Auch aufgrund der jährlich steigenden Wirtschaftsleistung ist mit einem Anstieg des gesamten Lkw-Verkehrs in den kommenden Jahren zu rechnen. Die Verkehrsverflechtungsprognose des Bundesverkehrsministeriums spielt eine entscheidende Rolle bei der Planung und Gestaltung der Zukunft des Güterverkehrs, da sie Veränderungen in den Frachtmengen und -routen bis 2030 beziffert. Sie bietet einen Einblick in die voraussichtlichen Veränderungen im Verkehrsaufkommen und in die Struktur des Gütertransports.

Historische Verkehrsmengen auf Straße und Schiene sowie von der Verkehrsverflechtungsprognose prognostizierte Wachstumsraten legen dar, dass sich der Straßengüterverkehr seit 1990 bereits verdoppelt hat und bis 2030 um weitere 38 % steigen wird.

Zwei wichtige volkswirtschaftliche Effekte sorgen dafür, dass sich die Dominanz des Straßengüterverkehrs in den kommenden Jahren fortsetzen wird und die Emissionssenkung durch Elektrifizierung zum Schlüsselthema wird:

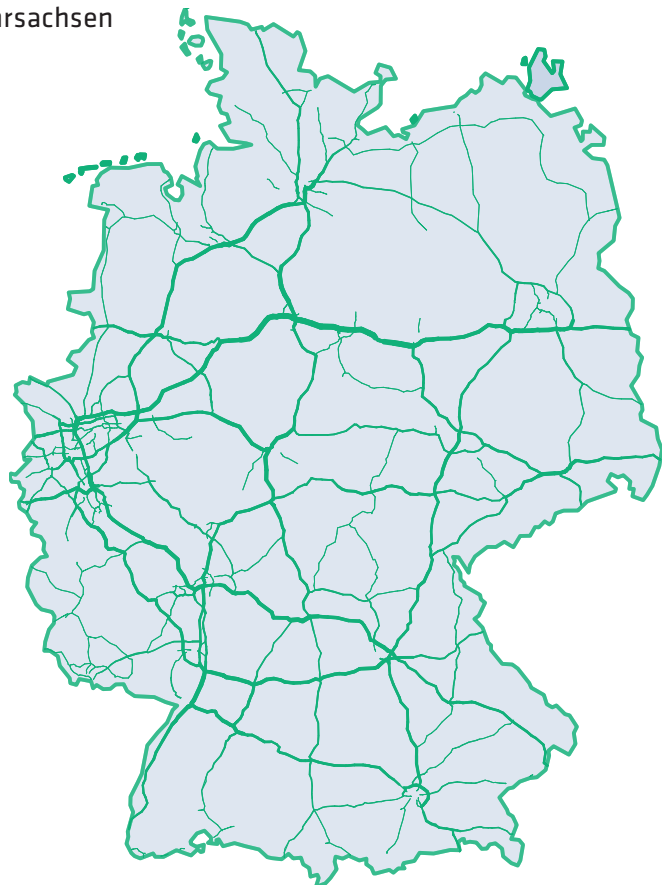
Zum einen verändert sich die Struktur der transportierten Güter. An die Stelle von Massengütern treten hochwertigere Waren, während die Sendungsgrößen sinken. Beispielsweise nimmt der Online-Versand einzelner Artikel eine immer größere Rolle ein, während der Einzelhandel stagniert.

Zum anderen verändern sich Produktions- und Logistikstrukturen. Die Unternehmen spezialisieren sich stärker, um durch Skaleneffekte Waren in größerer Menge günstiger herstellen zu können. Dadurch werden aber zwischen den Produktionsschritten immer wieder Transporte benötigt, die besonders verlässlich und schnell erfolgen müssen. Fällt ein Glied dieser Lieferkette aus, so führt dies zu teuren Produktionsstillständen. Die kurzen und verlässlichen Laufzeiten zwischen den dezentral in Deutschland verteilten Unternehmen zu gewährleisten, schafft nur der Lkw.

Die volkswirtschaftlichen Rahmenbedingungen für den Elektro-Lkw sind somit herausfordernd: Zum einen ist der Gütertransport ein Wachstumsmarkt, zum anderen werden die Anforderungen an Geschwindigkeit, Kosten und Termintreue nun durch ökologische Vorgaben beschränkt.

Deutschland stellt dabei das Drehkreuz für den europäischen Wirtschaftsraum dar: Durch die zentrale Lage in Europa führen mehrere Transitrouten über deutsche Autobahnen. Laut Bundesverkehrsministerium werden 40 % der Lkw-Kilometer auf deutschen Straßen von ausländischen Lkw zurückgelegt. Dieser Transitverkehr konzentriert sich schwerpunktmäßig auf die Verkehrsachsen in » [Abb. 7](#).

Abb. 7 Hauptstrecken der Lkw auf innerdeutschen Autobahnen. Datenquelle sind die Mautdaten des Bundesverkehrsministeriums. Die Breite der Straße zeigt die Anzahl gemessener Lkw. Das meistbefahrene Segment war die A2 bei Hannover mit 300.000 Fahrzeugen monatlich.



Gut erkennbar sind die Hauptrouten, die bis zu den Grenzübergängen starken Verkehr aufweisen wie die A1 zwischen dem Hamburger Seehafen und dem Ruhrgebiet, die A2, die West- und Osteuropa verbindet, und die A3 und A8, die die süddeutschen Wirtschaftszentren und Südosteuropa mit Ruhrgebiet und niederländischen Häfen verbinden.

Die Elektrifizierung dieser Haupttrouten steht daher im Fokus der EU TEN-T (Transeuropäische Netze – Transport) Strategie. Die TEN-T Strategie zielt darauf ab, ein umfassendes Netzwerk aus Straßen, Eisenbahnen, Binnenwasserstraßen, Seehäfen, Flughäfen und multi-modalen Terminals in der gesamten Europäischen Union zu entwickeln und zu verbessern. Dieses Netzwerk soll die grenzüberschreitende Vernetzung stärken, die wirtschaftliche Entwicklung fördern und eine nachhaltige Mobilität unterstützen.

Die Elektrifizierung der Haupttrouten im Rahmen der TEN-T Strategie ist entscheidend, um den CO₂-Ausstoß des Verkehrssektors zu reduzieren und die EU-Ziele für eine nachhaltige und umweltfreundliche Mobilität zu erreichen. Durch die Einrichtung von Ladeinfrastrukturen für elektrische Lkw entlang dieser Schlüsselrouten können die Emissionen des Güterverkehrs signifikant gesenkt werden.

Die EU-AFIR-Verordnung (Alternative Fuels Infrastructure Regulation) legt verbindliche Mindestanforderungen für den Aufbau und die Nutzung von Infrastrukturen für alternative Kraftstoffe, einschließlich Ladestationen für Elektrofahrzeuge, in der Europäischen Union fest. Entlang der TEN-T Korridore müssen bis 2030 alle 60 km Ladestationen für Lkw aufgebaut werden, entlang von Nebenrouten alle 100 km.

Mikroskopische Betrachtung

Im NEFTON-Projekt wurde der Einsatz von Elektro-Lkw im Logistikablauf untersucht. Dazu wurde mit vier Speditionen zusammengearbeitet, um verschiedene Anwendungsbereiche – vom Verteilverkehr bis zum Fernverkehr – zu analysieren. Durch den Einbau von Datenloggern und die Nutzung von GPS-Tracking wurden umfassende Daten zur Fahrzeugnutzung gesammelt. Die Ergebnisse und anonymisierten Daten sind frei verfügbar.

Mithilfe des webbasierten Analysetools Elektromobilität WATE wurden Bewegungsmuster, Möglichkeiten zur Elektrifizierung sowie die notwendige Ladeinfrastruktur simuliert. Die Ergebnisse zeigen, dass Flotten im Verteil- und Regionalverkehr quasi nicht an Raststätten und Autobahnparkplätzen halten und somit die Nutzung öffentlicher Ladeinfrastruktur zu Zeitverlusten führen würde. Im Gegensatz dazu verbringen Flotten im Fernverkehr immerhin einen einstelligen Prozentanteil ihrer Zeit dort, wobei viele Pausen auch direkt bei Kunden oder im heimischen Depot stattfinden. Hier bietet sich eine bessere Synchronisierung mit öffentlicher Ladeinfrastruktur an.

Daraus folgt die Erkenntnis, dass für den Verteilverkehr vor allem die Elektrifizierung der eigenen Depots entscheidend ist, um eine effiziente Nutzung der Elektro-Lkw zu gewährleisten. Für den Fernverkehr hingegen ist der Zugang zu öffentlicher Ladeinfrastruktur von größerer Bedeutung, da es nicht praktikabel ist, von jedem Kunden

den Aufbau einer Ladeinfrastruktur zu erwarten. Im nächsten Schritt des Projekts wird die notwendige Ladeleistung für eine effiziente Integration von Elektro-Lkw in bestehende Logistikabläufe untersucht.

Dazu wurden die Pausenorte untersucht, an denen ein Lkw stand, und welche Ladeleistung notwendig gewesen wäre, um die Energie für die folgende Fahrt zu laden. Dabei wird davon ausgegangen, dass überall geladen werden kann: Im realen Einsatz müssen also mitunter mehr als eine Fahrt gemeinsam nachgeladen werden. Die Ergebnisse sind in » **Abb. 8** dargestellt.

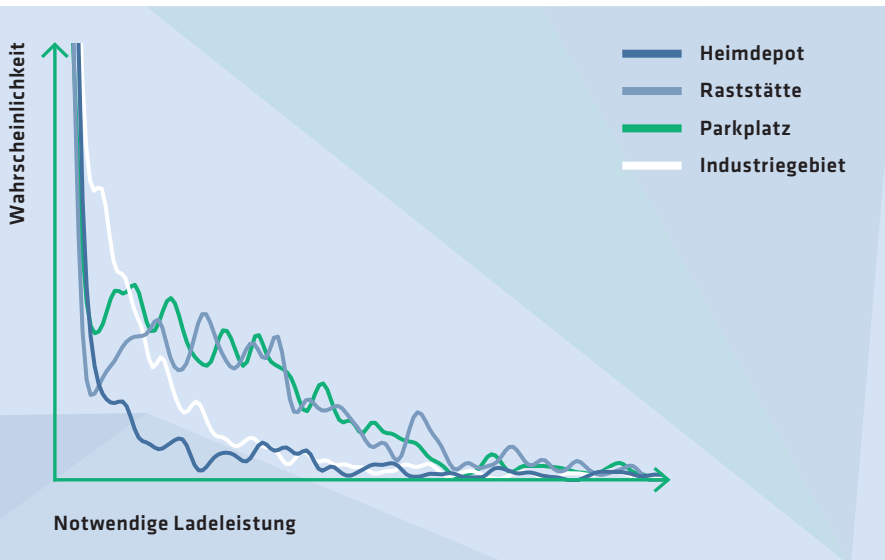


Abb. 8: Erforderliche Ladeleistung an einem Ort, um die folgenden Fahrten zu bewältigen. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung bildet das Zusammenspiel von unterschiedlich langen Pausen und folgenden Fahrten ab. Besonders hohe Ladeleistungen sind an Raststätten zu erwarten sowie an Parkplätzen. Am Heimstandort und bei Kunden sind Verweildauern länger, daher genügen CCS-Ladesäulen, um die Elektro-Lkw zu laden.

In der Regel werden am Heimdepot und beim Kunden deutlich weniger als 500 kW Ladeleistung benötigt. Die Be- und Entladung von Waren verlängert die Pausen, während Fernverkehrsfahrten nur einen kleinen Teil der ausgehenden Fahrten ausmachen. Daher ist in der Regel die Nutzung von Ladeinfrastruktur nach dem CCS-Standard ausreichend. Diese verspricht Ladeleistungen von bis zu 500 kW, wird in Großserie gefertigt und kann daher zu günstigen Preisen erworben werden. Die geringe Netzbelastung senkt dabei ebenfalls die Netzanschlusskosten. Im Fernverkehr hingegen werden Ladeleistungen von über 1 MW benötigt, um ohne Zeitverlust die Transportaufträge zu bewältigen. Die dafür notwendige Ladeinfrastruktur nach MCS-Standard wird derzeit für Lkw erst entwickelt. Die damit verbundenen kleineren Stückzahlen und höheren Netzanschlusskosten führen dazu, dass die MCS-Ladesäulen in den kommenden Jahren zunächst vorrangig an öffentlichen Ladeparks rentabel sind.

Ladeinfrastruktur wird somit vor allem in zwei Systemen vorliegen: CCS-Ladeinfrastruktur im Depot sowie MCS-Schnellladepunkte öffentlich. Beide Anwendungsfälle sind elementar für die Elektrifizierung des Güterverkehrs im Allgemeinen und werden in diesem Buch beleuchtet. Die Ladestandards werden im Verlaufe des Buches noch genauer erläutert.

ANFORDERUNGEN AN FAHRZEUG UND INFRASTRUKTUR

Die Anforderungen aus der Logistik ziehen Anforderungen an Fahrzeug und Infrastruktur nach sich. Diese Anforderungen werden im Folgenden beschrieben und im Kontext des Projekts diskutiert.

Die Anforderungen an das Nutzfahrzeug ergeben sich primär aus den genannten Anforderungen der Speditionen, welche die Fahrzeuge wirtschaftlich betreiben. Dabei steht zum einen die flexible Einsatzmöglichkeit und zum anderen die Wirtschaftlichkeit des Nutzfahrzeugs im Fokus. Um das Fahrzeug möglichst flexibel einsetzen zu können, müssen verschiedene Fahraufgaben mit einem Elektro-Lkw möglich sein. Es muss sichergestellt werden, dass eine gewisse Nutzlast über eine Strecke möglichst ohne Zeitverlust durchführbar ist. Entscheidend für diese Machbarkeit ist dabei die Möglichkeit, während der Lenkzeitpause nachzuladen. Die maximal mögliche Reichweite ohne Nachladen ist in » **Abb. 9** dargestellt. In diesem Fall können 720 km in den üblichen 9 h nur erreicht werden, wenn keine Nutzlast transportiert wird und Batteriegrößen von über 800 kWh verbaut sind. Das Blatt wendet sich, sobald in der Lenkzeitpause Schnellladeinfrastruktur zur Verfügung steht und mit 1 MW geladen werden kann. Hier sind die 720 km auch mit der maximalen Beladung bei einer Batteriegröße von nur 600 kWh möglich. Damit wird deutlich, dass primär der Fernverkehr massiv auf die öffentliche Ladeinfrastruktur angewiesen ist und es essenziell ist, dass auch das Nutzfahrzeug mit diesen hohen Ladeleistungen geladen werden kann. Da diese Leistungen und damit Stromstärken während des Ladevorgangs weit über den üblichen Werten im Pkw-Bereich liegen, stellen sie neuartige und hohe Anforderungen an diverse Komponenten im elektrischen Pfad von der Ladesäule bis zur Batteriezelle. Hohe Wirkungsgrade und thermische Stabilität sind zentrale Anforderungen, die an die Komponenten gestellt werden, um während des Ladevorgangs möglichst wenig Abwärme zu erzeugen und möglichst wenig zusätzliche Energie für aktive Kühlung aufwenden zu müssen. Neben dem Ladepfad fällt auch im Batteriesystem hohe Verlustleistung an, die zu einer Steigung der Temperatur des Batteriepacks führt. Da hohe Temperaturen zu beschleunigter Batteriealterung und zu Sicherheitsrisiken führen können, muss im Fahrzeug ein Thermomanagementsystem verbaut sein, sodass die Zellen eine Temperatur von ca. 60 °C nicht übersteigen. Allerdings führt eine zu starke Kühlung zur Reduktion der Ladegeschwindigkeit aufgrund eines sich erhöhen-

den Innenwiderstands, wodurch sich ein optimales Temperaturfenster von 35–50 °C für den Ladevorgang ergibt. Auch zu geringe Temperaturen unter -20 °C sollten durch das Thermomanagementsystem durch gezieltes Heizen verhindert werden, um die Funktionsfähigkeit der Batterie zu gewährleisten. Um die Sicherheitsanforderung der Zulassungs-Regularien zu erfüllen, ist neben der Einhaltung der Temperaturgrenzen auch die gezielte sicherheitstechnische Auslegung der Zelle und des Batteriepacks essenziell. Des Weiteren stellt die Gesamtfahrleistung eines Lkw von ca. 1 Mio. km über das Fahrzeugleben die Anforderung an die verwendete Zelle hinsichtlich der Zyklenfestigkeit, um frühzeitiges Austauschen des Batteriepacks zu verhindern. Neben den Anforderungen an die mögliche Ladeleistung und an das entsprechende Zell- und Thermomanagement für die generelle Machbarkeit des Fernverkehrs, ist auch die Wirtschaftlichkeit eine Kernanforderung an das Nutzfahrzeug.

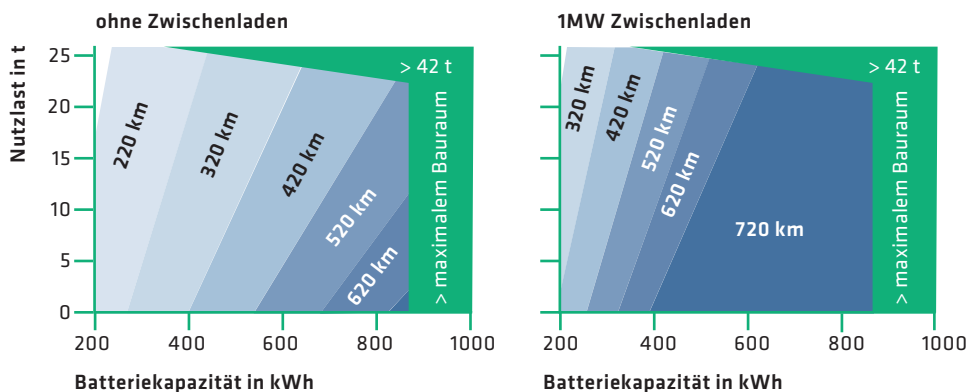
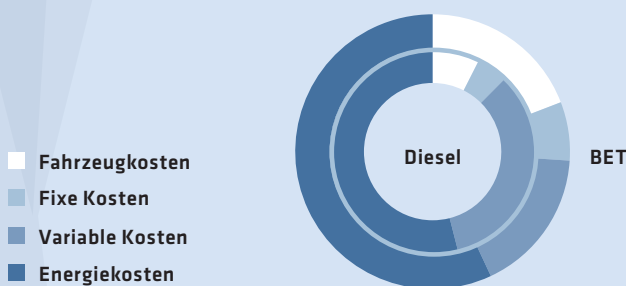


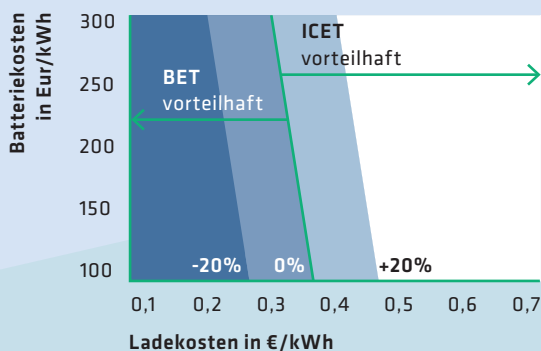
Abb. 9: Die Abbildungen zeigen die möglichen Reichweiten für verschiedene Batteriegrößen, die während der gesamten Lebensphase machbar sind. In (a) wird während der Lenkzeitpause nicht nachgeladen, in (b) mit 1 MW und dem MCS-Standard. Die transportierbare Nutzlast sinkt über die Batteriegröße bis hin zu einer maximalen Batteriegröße, die in einer Sattelzugmaschine installiert ist.

Die Gesamtbetriebskosten bezogen auf den gefahrenen Kilometer, im Folgenden als Total Cost of Ownership (TCO) bezeichnet, stellen das zentrale Kaufkriterium der Spediteure dar. Die nachstehende » **Abb. 10** zeigt rechts einen Vergleich der TCO Zusammensetzung für heutige Diesel-Lkw und zukünftige Elektro-Lkw. Aufgrund des teuren Batteriesystems steigt der Anteil an den initialen Investitionskosten von unter 10 % auf fast 25 % an. Dieser Nachteil wird durch die deutlichen geringeren Wartungskosten, hier allgemein als variable Kosten bezeichnet, ausgeglichen. Nahezu unverändert dominant bleibt der Anteil der Energiekosten mit über 50 %. Doch genau dieser Anteil stellt auch die derzeit größte Unbekannte dar. Je nach Einsatz des Fahrzeugs kann beispielsweise auf öffentliches Schnellladen und folglich teures Laden verzichtet werden. » **Abb. 10** zeigt die Abhängigkeit des Break Even von Elektro-Lkw von den durchschnittlichen Ladekosten. Demnach stellt sich ein TCO Vorteil der Elektro-Lkw für durchschnittliche Ladekosten von unter 40 ct/kWh ein. Die seit 2024 geltende CO₂-Abgabe als Teil der Maut verschiebt diesen Wert für schwere Nutzfahrzeuge nochmals um 15 ct/kWh auf 55 ct/kWh. Dagegen betragen im Jahr 2022 die Energiekosten für eine mittelgroße Spedition (100 Fahrzeuge) unter 30 ct/kWh, sodass insbesondere für einen hohen Anteil des Ladens am Depot Elektro-Lkw bereits heute einen deutlichen Kostenvorteil aufweisen.

Zusammensetzung der Total Cost of Ownership



Relativer TCO Vergleich BET zu ICET*



* Reine Technologiebetrachtung, keine Berücksichtigung von Maut und Steuern

Abb. 10 Links: Die prozentuale Zusammensetzung der Total Cost of Ownership für heutige Dieselfahrzeuge und deren batterieelektrisches Pendant. Kosten für Maut und Personalkosten sind in der Betrachtung nicht berücksichtigt. Rechts: Der relative Vergleich beider Antriebstechnologien in Abhängigkeit der zentralen Faktoren Ladekosten und Batteriekosten. Der Break Even stellt sich bei rein technologischer Betrachtung bei etwa 40 ct/kWh ein. Derzeitig angesetzte CO₂-Kosten von 200 €/t auf die Maut für Dieselfahrzeuge verschieben diesen Wert auf 55 ct/kWh.

Neben den Anforderungen an zukünftige Elektro-Lkw, die sowohl von Fahrern als auch des Speditionsunternehmens gestellt werden, erfüllen heutige Rastanlagen die Anforderungen der Fahrer nur unzureichend. Die Transformation zu Elektro-Lkw bietet hier eine große Chance, diese bei der zukünftigen Errichtung von Ladeinfrastruktur zu berücksichtigen. Im nachfolgenden Absatz werden daher die Anforderungen der Fahrer, die im Rahmen des Forschungsprojekts erfasst wurden, dargelegt.

Anforderungen an öffentliche Rastanlagen

Neben den Anforderungen an zukünftige Elektro-Lkw stellt die Elektrifizierung des Transportsektors auch öffentliche Rastanlagen und zukünftige Ladeparks für Lkw vor Herausforderungen. Die zwei zentralen Aufgaben sind die Bereitstellung von Platz und Energie. Die bereits heute angespannte Parkplatzproblematik, insbesondere in den Abendstunden, muss für Elektro-Lkw zwingend gelöst werden. Das Parken an nicht gekennzeichneten Flächen stellt, neben Sicherheitsaspekten, auch in Bezug auf das erforderliche Nachladen ein Problem dar. So werden auf rund 2.000 Rastmöglichkeiten, 440 bewirtschaftete und 1.500 nicht bewirtschaftete Anlagen, etwa fast 75.000 Lkw über Nacht abgestellt, bei einer eigentlichen Kapazität von nur knapp 51.000 Parkplätzen. Da bei voller Elektrifizierung ein Großteil der Fahrzeuge über Nacht nachgeladen werden müssen, jedoch nicht bewegt werden dürfen, muss für jedes Fahrzeug ein Ladepunkt vorgesehen werden und folglich auch ein entsprechender Stellplatz. Wird von einer Gleichverteilung über alle Rastmöglichkeiten ausgegangen, ist für das Übernachten auf bewirtschafteten Rastanlagen eine minimale Energiemenge von etwa 40 MWh erforderlich, die über knapp 90 Ladepunkte bereitgestellt werden muss. Auf den unbewirtschafteten Rastmöglichkeiten liegt die minimal erforderliche Energiemenge bei etwa 11 MWh und 24 Ladepunkten » [Abb. 11](#).

Neben dem Übernachtladen, das die Anzahl der Ladepunkte festlegt, finden Zwischenladevorgänge meist untertags in der Lenkpause von 45 Minuten statt. Bei voller Elektrifizierung muss etwa die gleiche Energiemengen, die nachts nachgeladen werden muss, in einem deutlich kleineren Zeitfenster tagsüber nachgeladen werden können. Wird von einer Verteilung der Schnellladevorgängen über ein Zeitfenster von 3 Stunden ausgegangen, bedeutet dies eine durchschnittliche Anschlussleistung pro Lademöglichkeit in Deutschland von etwa 8,5 MW. Auch hier ist punktuell mit deutlich höheren Leistungsbedarfen zu rechnen, wenn sich Ladevorgänge örtlich und zeitlich konzentrieren.

Die unterschiedlichen Standzeiten der Schnelllade- und Übernachtladevorgänge sowie die verschiedenen Anforderungen an die Ladeleistung pro Ladepunkt führen zu weiteren Anforderungen, die das Layout, also die Gestaltung eines solchen Ladeparks, betreffen » [Abb. 12](#).

Auf derzeit rund 2000 Rastanlagen werden pro Nacht etwa 75.000 Lkw abgestellt

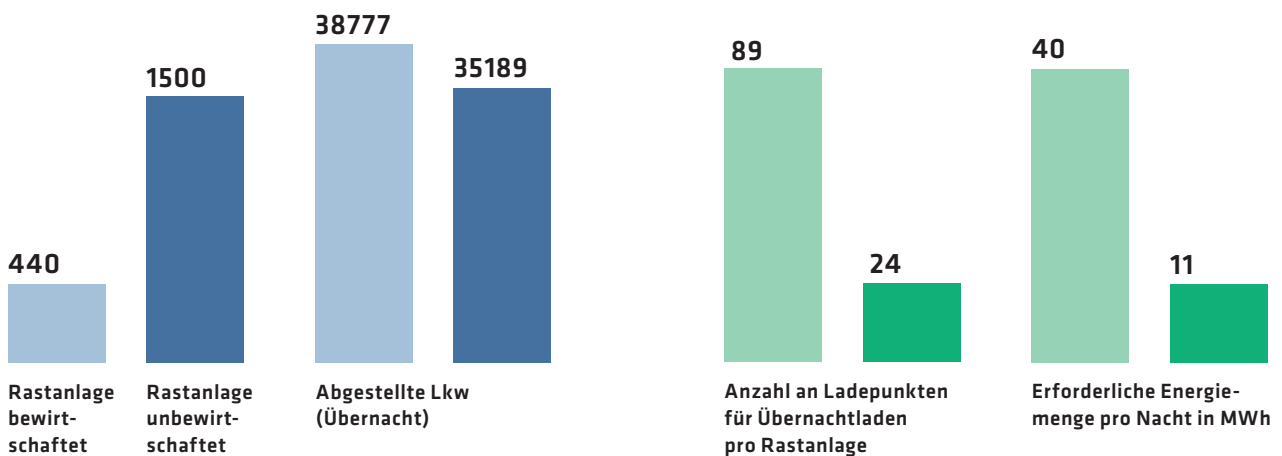


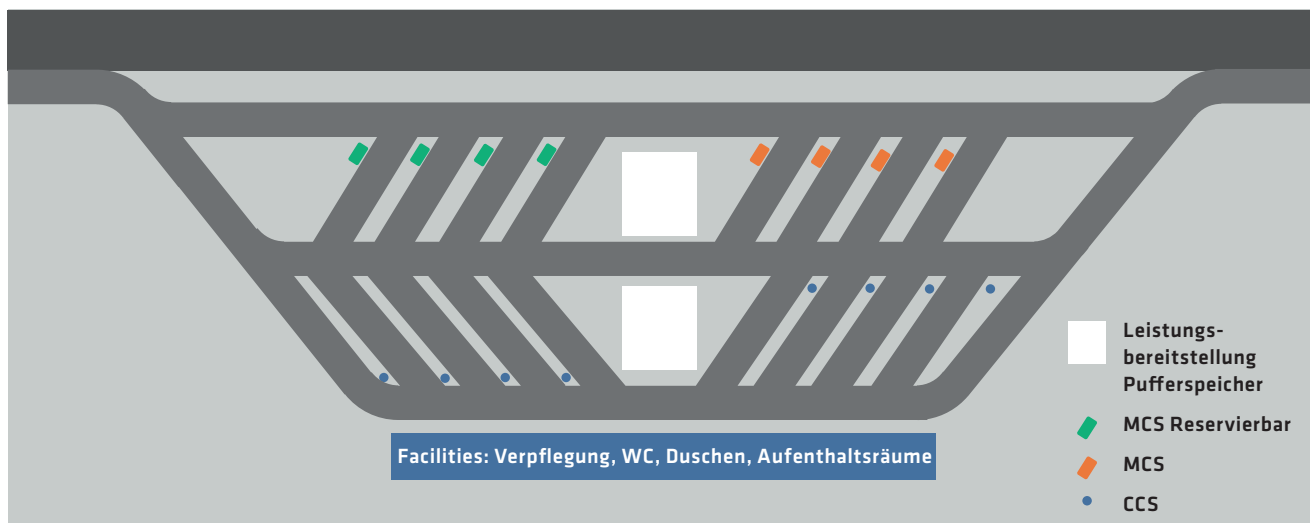
Abb. 11: Bei einer vollen Elektrifizierung beträgt die durchschnittliche Anzahl an erforderlichen Ladepunkten etwa 90 Ladepunkte auf bewirtschafteten und 24 Ladepunkte auf unbewirtschafteten Rastanlagen. Da ein überwiegender Teil des Güterverkehrs auf den Nord-Süd und Ost-West Trassen stattfindet, muss für dort gelegene Rastanlagen mit einer deutlich höheren Anzahl an Ladepunkten gerechnet werden.

Das gezeigte Layout eines zukünftigen öffentlichen Ladeparks für Elektro-Lkw zeigt dedizierte Bereiche für das Übernachten und das Schnellladen. Dies ermöglicht das Stehenbleiben der Fahrzeuge über Nacht für einen längeren Zeitraum. Die zentrale Leistungsbereitstellung gewährleistet eine bedarfsorientierte, wirtschaftliche Verteilung der verfügbaren Leistung auf einzelnen Lkw. Die in diesem Forschungsvorhaben untersuchte Integration eines Pufferspeichers kann die zu Spitzenzeiten erforderliche Netzanschlussleistung deutlich reduzieren. Neben den Parkflächen und den Ladepunkten müssen Anforderungen der Fahrer in Form von Facilities bei der Errichtung beachtet werden.

Die Unzufriedenheit der Lkw-Fahrer mit den vorhandenen Raststätten stellt eine große Herausforderung für die Branche dar. Trotz der entscheidenden Rolle, die diese Fahrer im Güterverkehr spielen, sind viele Raststätten nicht optimal auf ihre Bedürfnisse ausgerichtet. 42 % der Lkw-Fahrer sind mit der aktuellen Situation an Rastplätzen eher unzufrieden und 26 % sogar sehr. Oftmals sind die Parkplätze überfüllt und es fehlen angemessene Einrichtungen wie sanitäre Anlagen, Duschen und Ruheräume. Die begrenzten Parkmöglichkeiten zwingen die Fahrer zu unnötig langen Suchen nach einem freien Platz, was nicht nur ihre Ruhezeiten beeinträchtigt, sondern auch die Verkehrssicherheit gefährdet. Die Qualität der Verpflegung an Raststätten lässt oft zu wünschen übrig, während die Preise überhöht sind.

Offensichtlich ist die Unzufriedenheit der Lkw-Fahrer mit der generellen Raststätten-Infrastruktur ein komplexes Problem, das verschiedene Aspekte der Arbeitsbedingungen betrifft und durch Probleme beim elektrischen Laden noch deutlich verschlimmert werden könnte. Die ganzheitliche Planung und Investition in die Raststätten ist entscheidend, um die Lebensqualität der Fahrer zu erhöhen und gleichzeitig die Effizienz im Güterverkehr zu fördern.

Abb. 12: Ein öffentlicher Ladepark muss sowohl den Anforderungen für das Übernachten als auch denen des Zwischenladens gerecht werden. So werden bei dem gezeigten Layout dedizierte Bereiche für beide Ladevorgänge vorgesehen. Eine zentralisierte Leistungsbereitstellung ermöglicht die effiziente Verteilung der verfügbaren Leistung auf die einzelnen Ladepunkte in Abhängigkeit des Ladebedarfs verschiedener Elektro-Lkw. Die Integration eines Pufferspeichers kann die erforderliche Netzanschlussleistung zu Spitzenzeiten deutlich reduzieren. Neben den Parkplätzen müssen auch Facilities für Fahrer mitberücksichtigt werden.



Unter dieser Prämisse wurden Lkw-Fahrer befragt, ihre höchst priorisierten Merkmale einer Raststätte einzuordnen und eine Reihenfolge aller Aspekte zu bilden. Dadurch können die Faktoren nach Relevanz sortiert werden und die höchst bewerteten mit stärkerem Impuls bei der Neuplanung oder Umgestaltung berücksichtigt werden.

Priorisierung der Faktoren durch LKW-Fahrer



Abb. 13 Zentrale Anforderungen von Lkw-Fahrern für Rastanlagen aufgrund von Umfrageergebnissen.

Das Vorhandensein und die Qualität von Sanitäranlagen und Essen/Trinken wird dabei als wichtigster Bestandteil einer Raststätte betrachtet. Danach folgt die Auslastung, die den oben beschriebenen Veränderungsbedarf an Raum für Parkplätzen beschreibt. Eine Verbesserung bzw. Neuentwicklung dieser drei Faktoren würde schon zu einer signifikant höheren Zufriedenheit der Lkw-Fahrer mit den Rastplätzen führen. Bei einer möglichen Umgestaltung und Planung von Raststätten durch eine Errichtung der Ladeinfrastruktur liegt hier der größte Handlungsbedarf vor. Weiter gibt es erste Initiativen, die Informationen über Rastanlagen und Ladeparks für Lkw in aufbereiteter Form bereitstellen. Solche Daten können beispielsweise in Flottenmanagementsystemen genutzt werden, um den Fahrern gezielt die relevanten Informationen bereitzustellen, die für die Entscheidung, einen Ladepunkt anzufahren, notwendig sind.

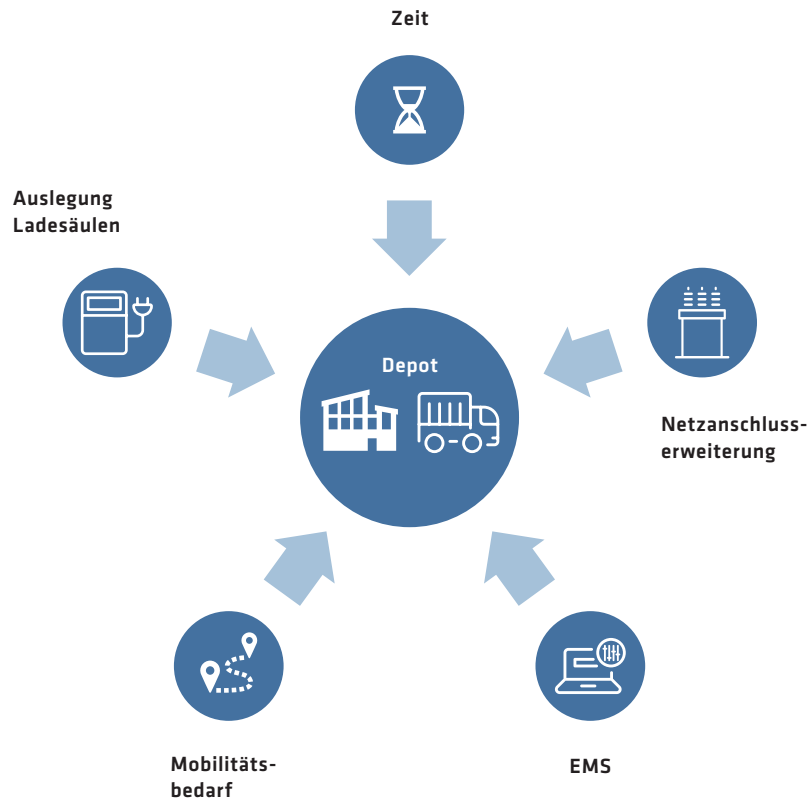
Die Neuerrichtung öffentlicher Ladeparks für Elektro-Lkw stellt eine große Chance dar, den Beruf des Berufskraftfahrenden wieder attraktiver erscheinen zu lassen, indem die angesprochenen Kritikpunkte berücksichtigt werden. Schließlich ist ein positiv bewerteter Ladepark, der öfter angefahren wird und folglich einen höheren Energiedurchsatz aufweist, auch aus wirtschaftlicher Sicht attraktiv.

Während der Fernverkehr auf eine gut ausgebaute Ladeinfrastruktur angewiesen ist, kann ein Großteil des Verteilverkehrs oder des kombinierten Verkehrs auch mit privater Ladeinfrastruktur an Logistikdepots abgebildet werden. Die daraus resultierenden Anforderungen werden im nächsten Kapitel erläutert.

Anforderungen an die Ladeinfrastruktur

Ein Großteil der Ladevorgänge von Elektro-Lkw wird zukünftig im Depot stattfinden. Dabei ergeben sich verschiedene Anforderungen an die Ladeinfrastruktur, die im Rahmen von Interviews mit unterschiedlichen Depotbetreibern identifiziert wurden und die in » [Abb. 13](#) dargestellt sind.

Abb. 14 Anforderungen an die Ladeinfrastruktur im Depot. Der Aufbau von Ladeinfrastruktur stellt finanzielle, elektrische und organisatorische Herausforderungen für Depotbetreiber dar.



Die Ladeinfrastruktur im Depot muss abhängig vom Mobilitätsbedarf der Lkw dimensioniert werden. Zur Auslegung der Ladeinfrastruktur ist daher eine Analyse des Mobilitätsverhaltens der Lkw eines Depots empfehlenswert. In den durchgeführten Interviews wurde von den Depotbetreibern gefordert, dass Elektro-Lkws idealerweise Dieselfahrzeuge eins zu eins ersetzen können, um das Kerngeschäft, die Beförderung von Personen und Gütern, uneingeschränkt aufrecht erhalten zu können. Diese Übertragung kann jedoch mit höheren Kosten einhergehen. Daher sollte individuell entschieden werden, ob für die Elektrifizierung eines Depots Logistikaufträge neu disponiert werden müssen. Dabei sollten auch Sonderfälle berücksichtigt werden wie z. B., dass Fahrer die Fahrzeuge teilweise über Nacht zuhause parken, wodurch sich ein höherer Ladebedarf am Morgen im Depot ergeben könnte.

Abhängig vom analysierten Mobilitätsbedarf können im nächsten Schritt die Ladesäulen dimensioniert werden. Eine deutliche Überdimensionierung der Ladeinfrastruktur hinsichtlich Anzahl und Leistung der Ladesäulen sollte dabei vermieden werden, um die Kosten möglichst gering zu halten. Hohe Ladeleistungen sind mit hohen Investitionskosten für Ladeinfrastruktur und Netzanschluss verbunden. Auch verursachen hohe Ladeleistungen hohe Betriebskosten. Ein Teil des Netzentgelts, das im gewerblichen Strompreis enthalten ist, wird abhängig von der Jahresleistungsspitze bemessen. Durch hohe Ladeleistungen steigen somit auch die Stromkosten des Depots. Im Fall ausreichend hoher Standzeiten sind in der Regel CCS-Ladesäulen im Depot zu empfehlen.

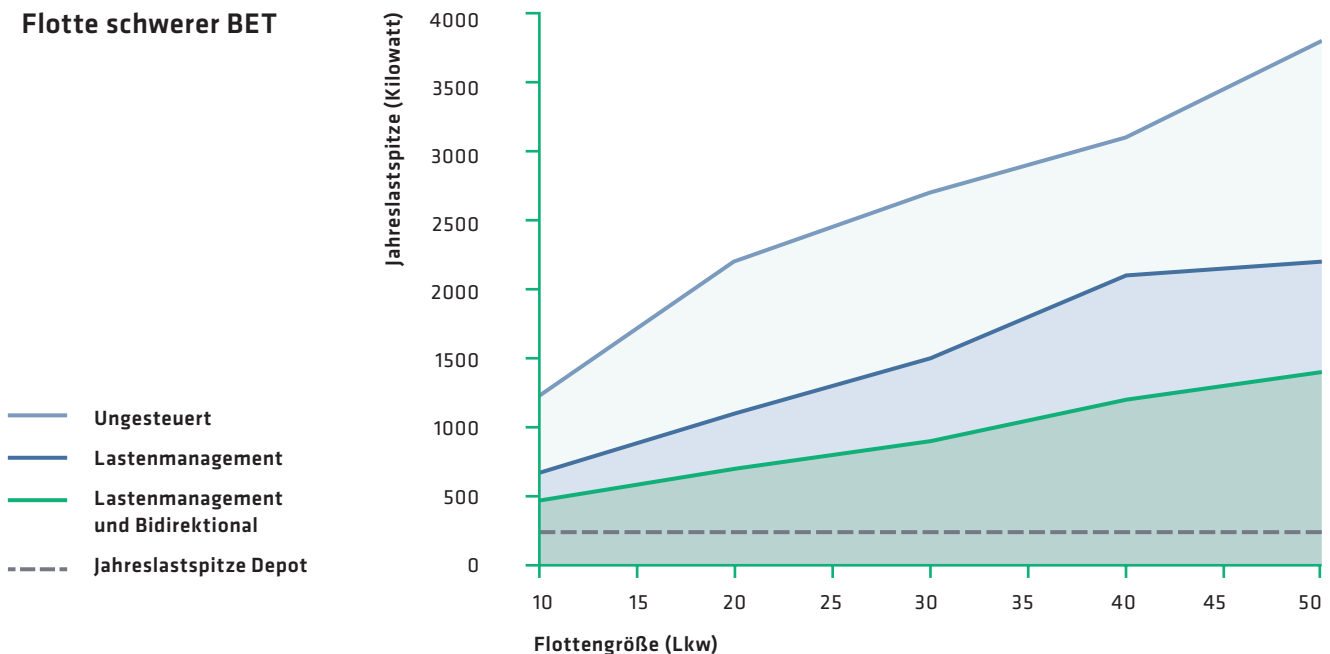
Die Anzahl und die Leistung der benötigten Ladesäulen bestimmt im nächsten Schritt, ob eine Aufrüstung des Netzanschlusspunktes erforderlich ist. Ein Depot mit einer Vielzahl an Ladesäulen für Elektro-Lkw benötigt eine hohe Netzanschlusskapazität, die üblicherweise in heutigen Depots nicht vorhanden ist. Eine Erweiterung der Anschlussleistung des Netzanschlusses und der unmittelbaren Trafostation sowie ein Anschluss in der Mittelspannungsebene stellen zusätzliche, signifikante Kostenfaktoren dar, welche durch bedarfsorientierte Auslegung der Ladeinfrastruktur vermindert werden können. So können zusätzliche, langwierige Realisierungsdauern begrenzt werden. Die Erweiterung des Netzanschlusspunktes wurde von den befragten Depotbetreibern als eine zentrale Herausforderung eingestuft.

Um die Netzanschlusskapazität möglichst gering dimensionieren zu können, sollten die Ladevorgänge im Depot mit einem Lademanagementsystem bzw. einem Energiemanagementsystem (EMS) gesteuert werden. Ein solches System kann die verfügbare Netzanschlusskapazität dann optimal auf die Lkw mit Ladebedarf aufteilen. Auch, wenn ausreichend Netzanschlusskapazität vorhanden ist, kann durch ein EMS die Jahresleistungsspitze des Depots reduziert und dadurch Netzentgelte eingespart werden. » **Abb. 14** zeigt die Ergebnisse einer Simulation, in der die Jahresleistungsspitze eines Depots abhängig von verschiedenen Ladestrategien ausgewertet wurde. Es wird deutlich, dass durch den Einsatz eines EMS (grün) die Leistungsspitze stark reduziert werden kann. Durch den Einsatz des zukünftig möglichen, bidirektionalen Ladens ist eine größere Reduktion der Lastspitze möglich.

Mit steigendem Anteil an erneuerbaren Energien wird es zukünftig wichtiger werden, Energie dann zu verbrauchen, wenn erneuerbarer Strom verfügbar ist. Dies gilt insbesondere auch für Depots mit eigener PV-Anlage, welche dann finanziell durch den Eigenverbrauch besonders profitieren, da der PV-Strom im Vergleich zu Strom aus dem Netz meist die günstigere Alternative darstellt. Auch die Anschaffung eines stationären, elektrischen Pufferspeichers könnte sich als lukrativ herausstellen. Dieser kann einerseits die erzeugte PV-Energie puffern und somit den Fahrzeugen ermöglichen, auch zu einem späteren Zeitpunkt zu besseren Konditionen zu laden. Im Fall hoher Leistungen kann ein Pufferspeicher ebenfalls einen Beitrag der Leistung übernehmen, wodurch auch die Erweiterung des Netzanschlusses geringer ausfallen könnte. Depots ohne eigene PV-Anlage können zukünftig, indirekt durch die Nutzung von dynamischen Stromtarifen, auf die Verfüg-

Abb. 15 Einfluss der Flottengröße auf die Jahresleistungsspitze, abhängig von verschiedenen Ladestrategien. Durch intelligentes Energiemanagement kann die notwendige Anschlussleistung massiv reduziert werden und somit Transformator- und Netzausbaukosten gesenkt werden.

Flotte schwerer BET



barkeit von erneuerbarer Energie reagieren. Bei Verfügbarkeit einer PV-Anlage sollte diese in das EMS integriert werden. Durch den Eigenverbrauch des PV-Stroms können die Ladekosten im Depot deutlich reduziert werden. Auch dynamische Strompreise können von solchen Systemen berücksichtigt werden.

Die frühzeitige Installation von Infrastruktur ist einerseits mit hohen Investitionskosten verbunden, kann andererseits mittelfristig jedoch auch der entscheidende Faktor sein, um massiv Kosten einzusparen. Steigende CO₂-Preise führen mittelfristig auch zu höheren Betriebskosten für den Betrieb von Diesel-Fahrzeugen. Hinzu kommen strengere Richtlinien, welche den Betrieb konventioneller Diesel-Lkw weiter einschränken (z. B. Lkw-Maut) und die emissionsfreie Variante anreizen (z. B. durch Mautbefreiung/-verminderung). Besonders relevant ist der Faktor Zeit jedoch im Fall der Netzintegration. Netzbetreiber sind durch die geplante Energiewende über alle Spannungsebenen hinweg mit enormen Herausforderungen konfrontiert. Die steigende Anzahl an Netzanschlussgesuchen, welche im Regelfall sequenziell abgearbeitet werden muss, kann zu einer signifikanten Verzögerung des eigenen Ladeinfrastruktur-Projekts führen. Zusätzliche Verzögerungen entstehen durch die mangelnde Verfügbarkeit von Transformatoren und den damit verbundenen hohen Lieferzeiten. Insgesamt stellt die frühzeitige Initiative zum Vollzug eines Technologiewechsels eine Notwendigkeit dar, welche im Extremfall auch über den Fortbestand des Unternehmens entscheiden kann. Zeit ist der alles entscheidende Faktor.

3

LADEINFRASTRUKTUR

Für eine erfolgreichen Transformation hin zur Elektrifizierung ist die Ladeinfrastruktur von großer Bedeutung. Dabei kann in zwei Anwendungsfälle unterschieden werden: Die Anforderungen für das Laden des Lkw im Depot unterscheiden sich zu denen der öffentlichen Ladeinfrastruktur, die im Fernverkehr Anwendung findet. Durch eine Vielzahl von technischen Innovationen werden diese adressiert - von der Leistungselektronik bis zum Ladenetz.



EINFÜHRUNG IN LADETECHNOLOGIEN UND -STANDARDS

Im Folgenden werden die essenziellen Grundlagen der Ladetechnologie und des MCS-Standards beschrieben. Dabei wird detailliert auf das bidirektionale Laden und die Kommunikationsstandards eingegangen

Beim Laden von Elektrofahrzeugen unterscheidet man grundsätzlich zwischen Wechselstrom (AC) und Gleichstrom (DC) Laden. Beim AC-Laden befindet sich das Ladegerät innerhalb des Fahrzeuges (On-Board-Charger) und die Wallbox wird nur als "Ein- und Ausschalter" verwendet. Gegebenenfalls dient sie noch zur Kommunikation mit weiteren Elektroanlagen, z. B. Solaranlage, Heimspeicher und im öffentlichen Bereich zur Kostenabrechnung. Durch den Typ 2 - Stecker wird hier ein dreiphasiger Wechselstrom aus dem Stromnetz bereitgestellt. Das Laden selbst übernimmt der On-Board-Charger im Fahrzeug. Die Ladeleistung beträgt meist 11 kW oder 22 kW. Beim DC-Laden treten üblicherweise höhere Ladeleistungen im Bereich von 50 kW bis 300 kW auf, wodurch ein größeres Ladegerät benötigt wird, das zu groß und zu schwer für die Integration im Fahrzeug ist. Dadurch befindet sich beim DC-Laden das Ladegerät außerhalb des Fahrzeugs. Die Batterie wird direkt mit Gleichspannung aus der Ladesäule geladen.

CCS und MCS: Was bedeutet das?

Das Megawatt Charging System (MCS) ist technisch verwandt mit dem bekannten Combined Charging System (CCS), das vorrangig für Pkw eingesetzt wird. Einen Überblick über die Stecker bietet » [Abb. 16](#).

Abb. 16 Vergleich von CCS (Combined Charging System) und MCS (Megawatt Charging System) Stecker (Ladesäulenseitig). Das CCS-System kann bis zu 500 kW Leistung übertragen, während das MCS System für bis zu 3750 kW Leistung vorgesehen ist.



Aktuelle CCS-Schnellladestationen (CCS Version 2.0) sind für Stromstärken bis zu 500 A und Spannungen bis 1000 V ausgelegt, was eine theoretische maximale Ladeleistung von 500 kW ergibt. Dafür wird mit Gleichstrom geladen, wobei die Umwandlung von Wechsel- zu Gleichstrom bereits in der Ladesäule erfolgt. In der praktischen Anwendung hängt die maximale Ladespannung und damit auch die Ladeleistung von den Batterien im Fahrzeug ab. CCS ist eine weit verbreitete Lösung und insbesondere für Pkw der gängige Standard in Europa.

Für schwere Nutzfahrzeuge bietet CCS eine ausreichende Ladeleistung, um bei längeren Standzeiten (z. B. über Nacht) zu laden. Für das Schnellladen von schweren Nutzfahrzeugen sind die CCS-Ladeleistungen hingegen nicht ausreichend. Im Rahmen der Charging Interface Initiative (CharIN), der viele der weltweit größten Automobilhersteller angehören, wurde deshalb die Definition und Standardisierung eines Megawatt-Ladesystem vorangetrieben. Das MCS basiert technisch auf dem CCS System, wird jedoch mit einer neuen MCS-Steckerspezifikation Stromstärken bis 3000 A und Spannungen von 1250 V erlauben, was einer maximalen Ladeleistung von 3,75 MW entspricht. Bei der maximalen Stromstärke von 3000 A werden dabei Stecker, Kabel und Anschluss gekühlt. Bei ausschließlicher Kühlung des Ladekabels und -steckers wird der Strom auf 1000 A begrenzt; ohne Kühlung von Stecker oder Kabel auf 350 A.

Erste Anwendungsfälle für schwere Nutzfahrzeuge sind im Leistungsbereich 700 – 1000 kW zu sehen. Weitere Anwendungsfälle des MCS finden sich in der Agrarwirtschaft, in der Schifffahrt und bei kleineren Flugzeugen.










Bidirektionales Laden

Beim Bidirektionalen Laden können Elektrofahrzeuge Strom durch Laden nicht nur einspeichern, sondern durch Entladen auch wieder aus der Fahrzeugbatterie ausspeichern. Die Fahrzeugbatterie wird damit zum Energiespeicher.

Abhängig vom Ziel der Rückspeisung wird zwischen verschiedenen Begriffen unterschieden. Aus dem Pkw-Bereich stammt der Begriff Vehicle-to-Home (V2H), wo die Fahrzeugbatterie in das eigene Heimnetz (z. B. Wohngebäude) entladen wird. Für Unternehmen gibt es den äquivalenten Fall Vehicle-to-Business (V2B). Die Rückspeisung ins öffentliche Stromnetz wird als Vehicle-to-Grid (V2G) bezeichnet. Wird durch die Entladung eines Fahrzeugs ein anderes Fahrzeug geladen, kann von Vehicle-to-Vehicle (V2V) gesprochen werden. Zur Überwindung von wirtschaftlichen Herausforderungen in Depots kann bidirektionales Laden eingesetzt werden, um damit günstigere Ladekosten zu erzielen. Abhängig davon, wofür bidirektionales Laden eingesetzt wird, lassen sich verschiedene Anwendungsfälle, die auch als Use-Cases bezeichnet werden, unterscheiden. Einige dieser Use-Cases zeigt »**Tab. 1**.

Beim Use-Case **Eigenverbrauchsoptimierung** soll die Erhöhung des Eigenverbrauchs von selbsterzeugtem Strom (z. B. durch eine PV-Anlage) bzw. die Reduktion des Netzbezugs erzielt werden. Der selbst-erzeugte Überschussstrom wird dabei in der Fahrzeugbatterie eingespeichert und kann bei Bedarf zur Versorgung anderer Verbraucher wie z. B. Fahrzeuge rückgespeist werden.

Tab. 1: Bidirektionales Laden ermöglicht verschiedene wirtschaftliche Use-Cases. Bleibt die rückgespeiste innerhalb des Depots, kann zum einen der Eigenverbrauch gesteigert als auch die Spitzelast reduziert werden. Wird die Energie hingegen in das öffentliche Netz gespeist, kann diese an verschiedenen Märkten gehandelt werden.

Use-Case	Rückspeisung
Eigenverbrauchsoptimierung Spitzenlastkappung	V2B   
Flottenmanagement	V2V   
Zeitliche Arbitrage Primärregelleistung Blindleistungsbereitstellung Redispatch	V2G   

Die Reduktion der Lastspitze an einem Standort mit registrierender Leistungsmessung ist das Ziel des Use-Cases Spitzenlastkappung. Eine registrierende Leistungsmessung ist in der Regel für Verbrauchern mit einem Jahresverbrauch von mehr als 100 MWh erforderlich. Für Depots oder Ladeparks ist dementsprechend eine solche Leistungsmessung erforderlich. Die Jahresleistungsspitze bestimmt die Höhe des Netzentgelts, das der Verbraucher für den Netzzugang zahlen muss. Durch die Reduktion der Leistungsspitze wird demnach das Netzentgelt minimiert.

Aktuell nutzen Verbraucher in Deutschland üblicherweise einen statischen Stromtarif bei dem der Strompreis konstant und nicht zeitabhängig ist. Der Strompreis an der europäischen Strombörse EPEX-Spot ändert sich jedoch alle 15 Minuten. Dynamische Stromtarife geben diese zeitlich variablen Strompreise direkt an die Verbraucher weiter. Durch die Nutzung eines solchen Stromtarifs können Verbraucher ihren Stromverbrauch z. B. in Form von Ladevorgängen in Zeiten mit niedrigen Strompreisen verschieben. Wird zusätzlich in Zeiten von hohen Strompreisen entladen und findet dadurch eine Einspeisung ins Netz statt, wird dies als zeitliche Arbitrage bezeichnet.

Für die Umsetzung von V2G Use-Cases müssen verschiedene regulatorische Vorgaben berücksichtigt werden. Ladeeinrichtungen sind als Verbraucher vor deren Inbetriebnahme beim Netzbetreiber anzumelden. Bei einer Bemessungsleistung über 12 kVA wird eine Genehmigung benötigt. Wird die Einrichtung bidirektional betrieben, muss sie als Erzeuger beim Netzbetreiber und im Marktstammdatenregister registriert werden.

Abgaben, Umlagen, Steuern und Netzentgelte machen in Deutschland einen großen Teil des Strompreises aus und sind somit auf besonders relevant für das bidirektionale Laden bzw. V2G. Ein Elektrofahrzeug wird, wie alle Letztverbraucher, beim Einspeichern von diesen Strompreisbestandteilen belastet. Wird Energie aus dem Fahrzeug zurück ins Netz gespeist, entfallen einige dieser Strompreisbestandteile (Kraft-Wärme-Kopplungs-Umlage, Offshore-Umlage und Stromnetzengeldverordnung-Umlage). Der Großteil muss jedoch entrichtet werden. Im Vergleich dazu können stationäre Stromspeicher weitgehendere Entlastungen bei den Strompreisbestandteilen in Anspruch nehmen. Hier ist auch eine Befreiung von Netzentgelten und Stromsteuer möglich. Um die Wirtschaftlichkeit von V2G Use-Cases zu erreichen wäre die Gleichstellung von bidirektionalen Elektrofahrzeugen mit stationären Speichern wünschenswert.

ISO 15118-20: Ein technischer Standard für bidirektionales Laden

Um bidirektionales Laden zu ermöglichen, müssen sowohl Fahrzeug als auch Ladeinfrastruktur dafür befähigt werden. Neben hardwareseitigen Anforderungen, wie bidirektionaler Leistungselektronik seitens der Ladeinfrastruktur, betrifft dies auch die Kommunikation zwischen Fahrzeug und der Ladesäule.

Die ISO 15118-20, als Teil der Normenreihe ISO 15118, definiert die Kommunikation zwischen Elektrofahrzeugen und Ladeinfrastruktur. Ihr Hauptziel ist es, die Interoperabilität zwischen verschiedenen Elektrofahrzeugen und Ladestationen sicherzustellen, unabhängig von Hersteller und Modell. Ein herausragendes Merkmal der ISO 15118-20 ist die Unterstützung des bidirektionalen Ladens. Dadurch wird die Umsetzung der beschriebenen Use-Cases von bidirektionalem Laden wie z. B. Spitzenlastkappung oder zeitliche Arbitrage ermöglicht, weshalb die ISO 15118-20 als Ladekommunikationsstandard für das in NEFTON entwickelte Ladesystem ausgewählt wurde.

Neben dem leitungsgebundenen Laden über Kabel, welches in NEFTON umgesetzt wurde, definiert die Norm auch die Kommunikationsnachrichten und Sequenzanforderungen für kabelloses bzw. induktives Laden. Es wird definiert, wie das Fahrzeug und die Ladestation miteinander kommunizieren, um den Ladevorgang zu steuern. Dies umfasst Aspekte wie Authentifizierung, Autorisierung, Energiemanagement und Fehlerbehandlung. Die ISO 15118-20 enthält auch Nachrichten für den Lade- und Steuerstatus. Das Fahrzeug und die Ladesäule können Informationen über den aktuellen Ladezustand, die Verfügbarkeit von Energie und andere relevante Parameter austauschen.

Der Standard bietet weiterhin robuste Sicherheitsfunktionen, einschließlich digitaler Zertifikate und sicherer Kommunikationsprotokolle. Dies verhindert unbefugten Zugriff und Datenmanipulation. Die Verschlüsselung erfolgt über das Verschlüsselungsprotokoll TLS 1.3 (Transport Layer Security), das für alle Anwendungsfälle verpflichtend ist. Durch die Verwendung von TLS 1.3 auf Transportebene und digitalen Signaturen und Zertifikaten auf der Anwendungsebene werden Vertraulichkeit, Datenintegrität und Authentizität sichergestellt – die drei Säulen der Datensicherheit.

Eine weitere wichtige Funktion des Standards ist Plug and Charge. Dabei authentifiziert sich das Fahrzeug automatisch während des Ansteckvorgangs an der Ladestation. Der Ladevorgang wird dann automatisch autorisiert und gestartet. RFID-Karten oder andere manuelle Authentifizierungsmethoden sind nicht erforderlich. Dies vereinfacht die Benutzererfahrung, verkürzt die Zeit für den gesamten Ladevorgang und erhöht die Sicherheit.

Die ISO 15118-20 definiert zwei verschiedene Betriebsmodi für die Kommunikation zwischen Elektrofahrzeugen und Ladestationen: den Dynamic Control Mode und den Scheduled Control Mode. Im Dynamic Control Mode übergibt das Elektrofahrzeug die Kontrolle über den Ladevorgang an die Ladesäule. In diesem Modus sind keine Verhandlungen zwischen Fahrzeug und Ladesäule erforderlich. Das Fahrzeug sendet Parameter, die die Grenzen der Fahrzeugbatterie beschreiben, an die Ladesäule. Das für die Steuerung zuständige Off-Board-System, ist dann für die Deckung des Energiebedarfs des Fahrzeugs verantwortlich. Dieser Regelmodus ist besonders für Use-Cases geeignet, die kurze Reaktionszeiten erfordern, wie die Erbringung von Regelleistung. Im Scheduled Control Mode werden Ladepläne verwendet. Die Ladestation und das Fahrzeug verhandeln im Voraus über den optimalen Ladezeitpunkt und die Leistung. In diesem Steuerungsmodus ist das Elektrofahrzeug für die Deckung des Energiebedarfs verantwortlich. Beide Lademodi ermöglichen ein optimiertes Energiemanagement und Lademanagement.

Ein wichtiger Schritt hin zu einer elektrifizierten Fahrzeugflotte ist der Aufbau einer Ladeinfrastruktur am Heimdepot. Eine beispielhafte Fallstudie zeigt die benötigten Energie- und Informationsflüsse zur Orientierung dieses Aufbaus. Ergänzend werden die zukünftigen Potentiale von bidirektionalem Laden am Heimdepot gezeigt.

Die Elektrifizierung des Schwerlastverkehrs erfordert, neben dem Austausch dieselbetriebener Fahrzeuge durch Elektro-Lkw, auch eine Transformation der Depots. Die Depots müssen zur Stromtankstelle werden, um die langen Standzeiten zu nutzen und die Lkw zu laden. Abhängig vom jeweiligen Depot kann diese Transformation sehr unterschiedlich ausfallen. Anhand einer beispielhaften Fallstudie wird im Folgenden erläutert, wie ein elektrifiziertes Depot zukünftig aussehen kann. Das Depot wird mithilfe eines Optimierungsmodells abgebildet und eine wirtschaftliche Potenzialanalyse durchgeführt.

Das untersuchte Beispieldepot verfügt über 30 Lkw, die jeweils mit einer eigenen Ladesäule ausgestattet werden. Es verfügt darüber hinaus über eine PV-Anlage, deren günstiger Strom im Idealfall direkt in den eigenen Fahrzeugen verbraucht wird. Auch die elektrische Last vom Depotgebäude durch z. B. Gabelstapler, Beleuchtung usw. muss bei der Elektrifizierung berücksichtigt werden. Die Steuerung der Ladevorgänge erfolgt durch ein EMS, welches die unflexible Last des Gebäudes und die PV-Anlage einbezieht. » **Abb. 17** zeigt schematisch die Energieflüsse zwischen den Komponenten und den Informationsaustausch mit dem EMS.

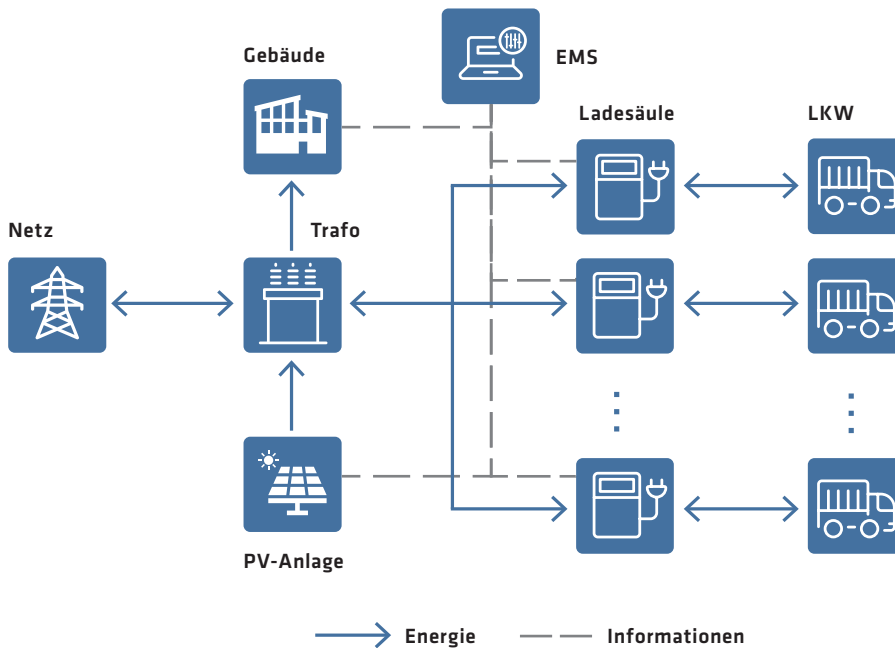


Abb. 17 Schematische Darstellung der Energie- und Informationsflüsse eines elektrifizierten Depots.

Das Beispieldepot wird im Optimierungsmodell abgebildet und der Betrieb optimiert. Ziel dieser durchgeführten Optimierung ist die Minimierung der Ladekosten. Die Optimierung übernimmt im simulierten Beispiel also die Aufgabe eines realen EMS. Durch Eigenverbrauchs-optimierung werden zunächst möglichst viele Ladevorgänge in Zeiten mit PV-Erzeugung verschoben. Auch können die Kosten durch Spitzenlastkappung, also Rückspeisung von Energie aus den Fahrzeugen bei hohem Energiebedarf des Standorts und geringer PV-Erzeugung, gesenkt werden, da die Jahresleistungsspitze das Netzentgelt bestimmt, das im Optimierungsmodell berücksichtigt wird. Durch die Optimierung wird also indirekt auch eine Reduktion der Lastspitzen erreicht. Zusätzlich wird für das Depot ein dynamischer Stromtarif angenommen, welcher sich am Börsenstrompreis orientiert. Durch die Optimierung werden dann Ladevorgänge, soweit dies der Mobilitätsbedarf zulässt, in Zeiten mit niedrigen Strompreisen verschoben. Da für die Untersuchung auch bidirektionale Fahrzeuge betrachtet wurden, können in Zeiten von hohen Strompreisen zusätzliche Erlöse durch das Einspeisen von Strom ins Netz generiert werden. Die Optimierung beinhaltet also eine Kombination aus den beschriebenen Use-Cases: Tarifoptimiertes Laden, zeitliche Arbitrage, Spitzenlastkappung und Eigenverbrauchs-optimierung. Die Kombination dieser energiewirtschaftlichen Use-Cases wird in naher Zukunft auch in realen Systemen möglich sein, wodurch eine signifikante Kostenersparnis bei den Betriebskosten möglich wird.

Für die Lkw werden reale Fahrdaten von Diesel Lkw verwendet, die auf die Elektro-Lkw übertragen werden. Die Lkw besitzen eine Jahresfahrleistung zwischen 14.200 und 66.290 km. Die PV-Anlage des Beispieldepot verfügt über eine Spitzenleistung von 1 MW. Der Jahresenergieverbrauch des Depots ohne Fahrzeuge beträgt 722 MWh. Die Fahrzeuge verfügen je nach Fahrleistung über eine Batteriekapazität von 250 bzw. 500 kWh. In einer Voruntersuchung wurden alle Fahrzeuge mit MCS ausgestattet. Es zeigte sich jedoch, dass aufgrund der Standzeiten für das Depot CCS Ladesäulen ausreichen. In der weiteren Betrachtung wurden daher Ladesäulen mit 100 kW angenommen.

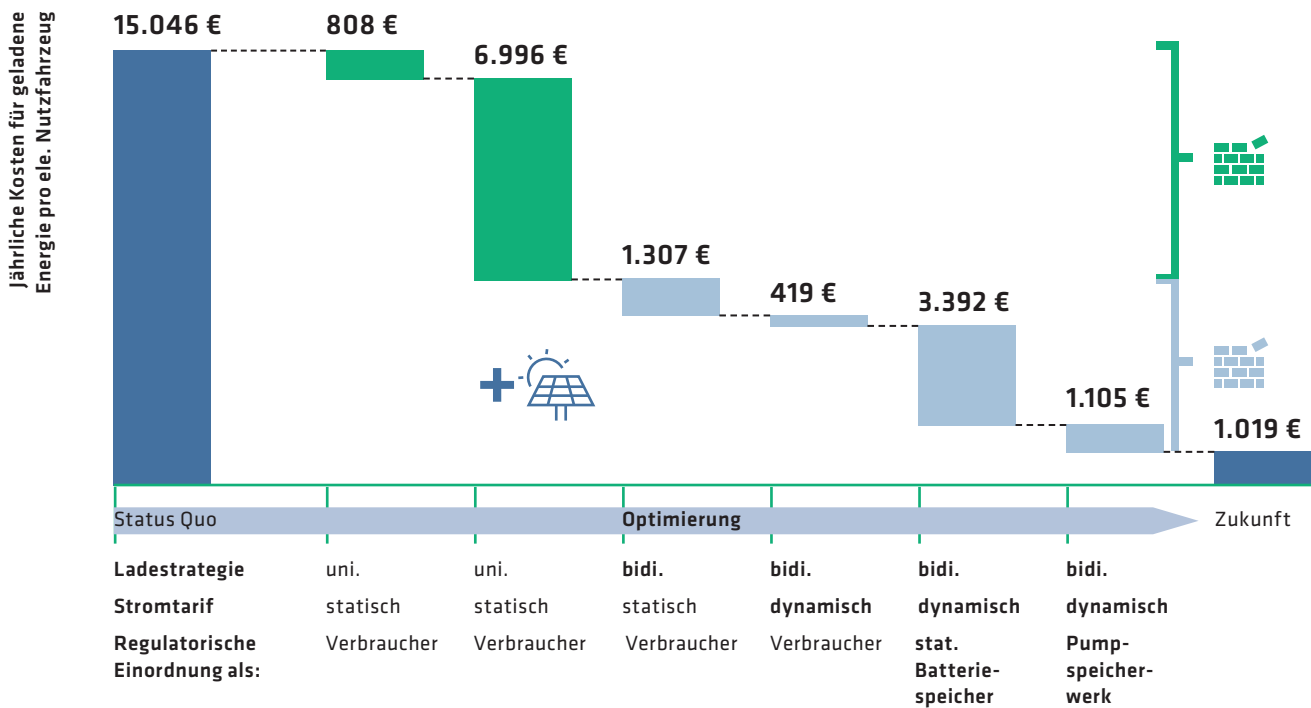


Abb. 18: Jährliche Ladekosten pro Lkw für ein Beispieldepot abhängig von Ladestrategie, Stromtarif und Regulatorik. Nach Status Quo sind die größten Hebel zur Senkung der Energiekosten die Spitzenlastkappung und der Aufbau von Photovoltaik. In Zukunft können durch bidirektionales Laden weitere Einsparungen erzielt werden.

Im Rahmen der wirtschaftlichen Potenzialanalyse wurden mithilfe eines Optimierungsmodells die jährlichen Energiekosten des beschriebene Beispieldepots bestimmt. » **Abb. 18** visualisiert die Ergebnisse der Analyse für das Jahr 2021. Im Status quo, in dem die Lkw ungesteuert mit einem statischen Stromtarif laden, liegen die jährlichen Energiekosten pro Fahrzeug bei ca. 15.000 €. Die Ladekosten können durch den Einsatz verschiedener Bausteine reduziert werden.

Die ersten beiden Bausteine umfassen die Reduktion der Spitzenlast und die Optimierung des Eigenverbrauchs von PV-Strom. Diese Bausteine (grün) können die Kosten bereits mehr als halbieren und sind durch den Einsatz eines EMS bereits heute umsetzbar. Alle weiteren Bausteine (blau) sind aktuell nur theoretisch umsetzbar, da die Technologie noch nicht im Massenmarkt verfügbar ist oder der regulatorische Rahmen (noch) nicht gegeben ist. Durch den Einsatz von bidirektionalem Laden könnten die Kosten demnach um weitere 1.307 € gesenkt werden. Durch Umstellung von einem statischen auf einen dynamischen Stromtarif, könnten die Kosten durch zeitliche Arbitrage weiter minimiert werden. Bidirektionale Lkw und Ladegeräte sind aktuell jedoch noch nicht auf dem Markt verfügbar. Auch dynamische Stromtarife sind in Deutschland bisher wenig verbreitet und werden sich erst in den kommenden Jahren im Massenmarkt etablieren. Die beiden letzten Bausteine bedürfen regulatorischen Anpassungen. Sollten bidirektionale Fahrzeuge in Zukunft regulatorisch wie stationäre Batteriespeicher oder Pumpspeicher eingeordnet werden, entfällt die bereits beschriebene Doppelbesteuerung, wodurch die Kosten nochmals deutlich reduziert werden könnten. Im optimalen Fall können so die jährlichen Energiekosten auf lediglich 1.000 € pro Fahrzeug reduziert werden.

Neben den Ladekosten sind für Depotbetreiber vor allem auch die Investitionskosten relevant, welche im Rahmen der Fallstudie nicht berücksichtigt wurden. Zur Einordnung der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass für (bidirektionale) Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur zunächst hohe Anfangsinvestitionen in Form von Kapitalkosten zu erwarten sind. Die Ergebnisse verdeutlichen jedoch die hohe Relevanz intelligenter Ladestrategien, welche bereits heute in Form der ersten „Bausteine“ zu einer signifikanten Kostenreduktion der Betriebskosten beitragen können.

AUFBAU DER ÖFFENTLICHEN LADEINFRASTRUKTUR

Um Langstreckengüterverkehr darzustellen, ist der Aufbau einer potenten öffentlichen Ladeinfrastruktur essenziell. Dazu wird ein initiales öffentliches Ladernetz vorgestellt und die Auswirkungen verschiedener Ladeleistungen auf möglichen Zeitverlust dargestellt.

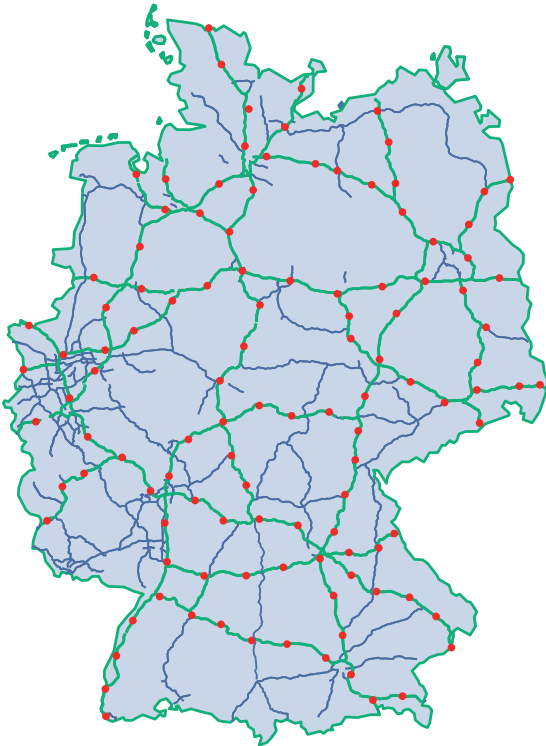


Abb. 19: Deutschland mit Autobahnen (Blau) und als Route der Transeuropäischen Netze – Transport (TENT) ausgewiesenen Autobahnen (Grün). Rot dargestellt sind 103 mögliche Rastanlagen, um die Ladeinfrastruktur aufzubauen, sodass alle 60km eine Lademöglichkeit besteht. Der Ausbauplan der Ladeinfrastruktur für schwere Nutzfahrzeuge (AFIR) schreibt ab 2030 mindestens zwei 350 kW Ladesäulen alle 60 km des Kernautobahnnetzes vor. Bereits heute ist absehbar, dass deutlich höhere Ladeleistungen installiert werden, um zwischenladen in Lenkzeitpausen zu ermöglichen.

Abhängig vom Mobilitätsbedarf können jedoch nicht alle Ladevorgänge Elektro-Lkw im Depot stattfinden. Laden muss daher auch im öffentlichen Raum möglich sein. Grundlage für den Aufbau öffentlicher Ladeinfrastruktur sind die Rahmenbedingungen welche die AFIR der EU vorgibt. Das Ziel ist es, ein Kernnetz europäischer Fernstraßen für den Elektro-Lkw Verkehr zu ertüchtigen. Diese Kernrouten werden als „Transeuropäische Netze – Transport“ (TEN-T) bezeichnet. Dazu müssen bis 2030, alle 60 km Ladesäulen entlang dieser TEN-T Routen installiert werden und mindestens 350 kW Leistung pro Ladepunkt bieten.

Absehbar ist jedoch, dass diese Ladeleistung für Lkw im Fernverkehr nur eine Rückfalloption darstellen kann: Um einen Lkw in der Lenkzeitpause von 45 Minuten vollständig zu laden, ist eine Ladeleistung von durchschnittlich 750 kW notwendig, wobei in der Spitze über ein Megawatt erreicht wird.

Dies ist vor Allem im Fernverkehr zentral: Da Fahrzeuge abends nicht immer zu ihrem Depot zurückkehren, muss die gesamte Energie zum Fahren auf dem Weg aufgenommen werden. Simulationen im Rahmen des Projekts haben ergeben, dass unter den genannten Bedingungen im innerdeutschen Fernverkehr ohne Lademöglichkeit an Start und Ziel im Durchschnitt 7 % Zeitverlust gegenüber einem Diesel-Lkw auftreten. Ziel der NEFTON-Forschung war es daher auch, Strategien zu entwickeln, um diesen Zeitverlust zu minimieren.

Es zeigt sich, dass größere Fahrzeugbatterien die Abhängigkeit von Ladesäulen verringern, und so zu kleinerem Zeitverlust führen. Die wirksamste Strategie ist jedoch höhere Ladeleistung: Durch die Erhöhung der Ladeleistung um 50 % auf 1,5 MW kann der Zeitverlust durch Laden um ein Fünftel gesenkt werden. Andersherum führt eine Senkung der Ladeleistung um ein Drittel auf 700 kW zu einem Fünftel mehr Zeitverlust.

Für diesen pessimistischen Fall ohne Ladepunkte an Start und Ziel sind diese 7 % Zeitverlust bereits sehr effizient. Der Schlüssel für reibungslosen Fernverkehr ist daher eine Kombination aus ausreichender Batteriekapazität, einem dichten Ladenetz, hoher Ladeleistung und der Möglichkeit an Start und Ziel bereits zu laden.

Diese Strategien vergleicht » **Abb. 20**: Mit dem aktuellen Stand der Technik wäre im Fernverkehr noch mit 40 Minuten Zeitverlust zu rechnen, also 7,4 % bezogen auf die zulässige Lenkzeit von 9 h am Tag. Ab 600 kWh Batteriekapazität und 1500 kW Ladeleistung wiederum ist der Fernverkehr ohne Zeitverlust möglich.

Der Abstand der Ladeparks untereinander sollte dabei unter 100 km liegen: Durch ein dichtes Netz können Fahrer das Nachladen effizient mit ihren Lenkzeitpausen synchronisieren. So sinkt die notwendige Batteriekapazität um bis zu 100 kWh, was Investitionen für den Spediteur reduziert.

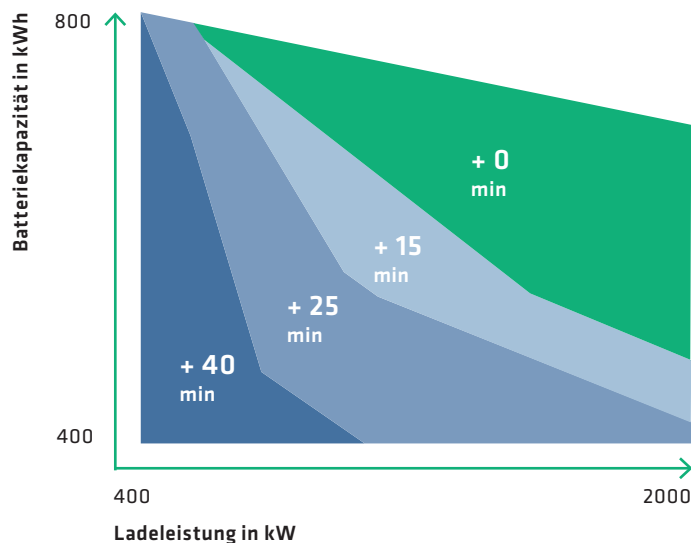


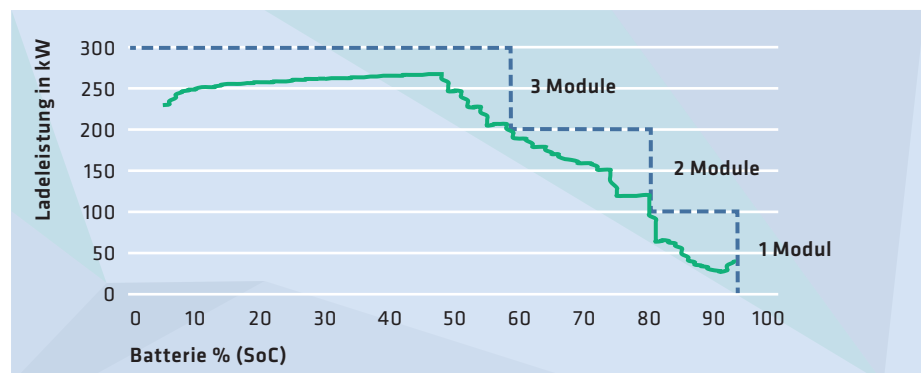
Abb. 20 Zeitverlust durch Laden bei variierenden Ladeleistungen und Batteriekapazitäten des Fahrzeugs. 400 kWh Batteriekapazität und 400 kW Ladeleistung entsprechen dem aktuellen Stand der Technik. Zeitverlust kann nur durch synchrone Verbesserung von Fahrzeug und Ladeinfrastruktur vermieden werden. Rahmenbedingungen: Start vollgeladen, 700 km Distanz, Ladesäulen alle 50 km

Im Rahmen von NEFTON werden eine Reihe von Innovationen hinsichtlich der Ladeinfrastruktur entwickelt und in ein Gesamtsystem integriert. Diese Innovationen umfassen unter anderem wirkungsgradoptimierte und intelligent verschaltete Leistungselektronikeinheiten sowie integrierte Pufferspeicherlösungen.

Intelligente Verschaltung von Leistungselektronik-Modulen für maximale Effizienz

Der MCS-Ladedemonstrator wurde im Rahmen des Projekts äußerlich in einem standardisierten Container umgesetzt. So kann dieser schnell und flexibel installiert werden, ohne sich an bürokratischen Hürden zu stoßen. Die inneren Werte des Ladecontainers bekommen ihre Cleverness durch die intelligente Verschaltung von Leistungselektronik-Modulen via einer Schaltmatrix, die den Gedanken der flexiblen Lösung somit auch nach innen trägt. Durch diese Schaltmatrix können beliebige Leistungseinheiten auf beliebige Ladepunkte eines Ladeparks geschaltet werden. Je nach dem Leistungsbedarf des jeweiligen Fahrzeugs können so gezielt die richtigen Komponenten zusammengeswitcht werden, um einen optimalen Ladevorgang über den Ladepark hinweg zu ermöglichen. Die Schaltmatrix ermöglicht es die Leistungseinheiten auch während des Ladevorgangs hinzuzufügen oder abzutrennen. So ist eine effiziente Nutzung der vorhandenen Hardware möglich und die Leistungseinheiten können größtenteils in ihren optimalen Arbeitspunkten mit hohen Wirkungsgraden betrieben werden. Der Unterschied zu konventionellen Ladelösungen ohne Schaltmatrix ist, dass bei diesen die Leistungselektronik fest in einem Ladeanschluss verbaut ist. Je nach Verlauf der Ladekurve des Fahrzeugs kann so in der meisten Zeit nur ein Teil der teuren Hardware genutzt werden.

Abb. 21: Benötigte Leistungs-
module (100 kW/Stufe)
am Beispiel der Ladekurve
eines modernen Pkw. Da die
Ladeleistung am Anfang
des Ladevorgangs höher ist,
können sukzessive Module
abgeschaltet oder auf andere
Ladepunkte geschaltet
werden.



Durch geschicktes Vernetzen der Ladepunkte mit den vorhandenen Leistungselektroniken kann die Schaltmatrix für einen Ladepark mit mehreren Ladepunkten den Hardwareaufwand bei gleichem Leistungsbedarf deutlich reduzieren. Durch das Konzept ergeben sich weitere Vorteile für den Betreiber und den Anwender. So können beispielweise Wartungsarbeiten an einzelnen Geräten während des Betriebs der Anlage durchgeführt werden, ohne dass für den Anwender zu Einschränkungen kommt. Ausfälle einzelner Leistungseinheiten führen nicht zu einem Ausfall eines Ladepunktes, da die Schaltmatrix andere Leistungseinheiten auf den Ladepunkt schalten kann. Die defekten Geräte können so auch im Betrieb ausgetauscht werden.

Im aufgebauten Demonstrator können bis zu 15 verschiedene Leistungseinheiten auf einen MCS-Ladepunkt zusammengeschaltet werden. Um die Vielseitigkeit der Lösung unterstreichen zu können, wurden die Leistungseinheiten in 4 verschiedenen Gruppen umgesetzt:

1. Gruppe: unidirektionale AC/DC Leistungselektronik
2. Gruppe: bidirektionale AC/DC Leistungselektronik
3. Gruppe: bidirektionale DC/DC Leistungselektronik mit Pufferspeicher
4. Gruppe: Standardnetzteile

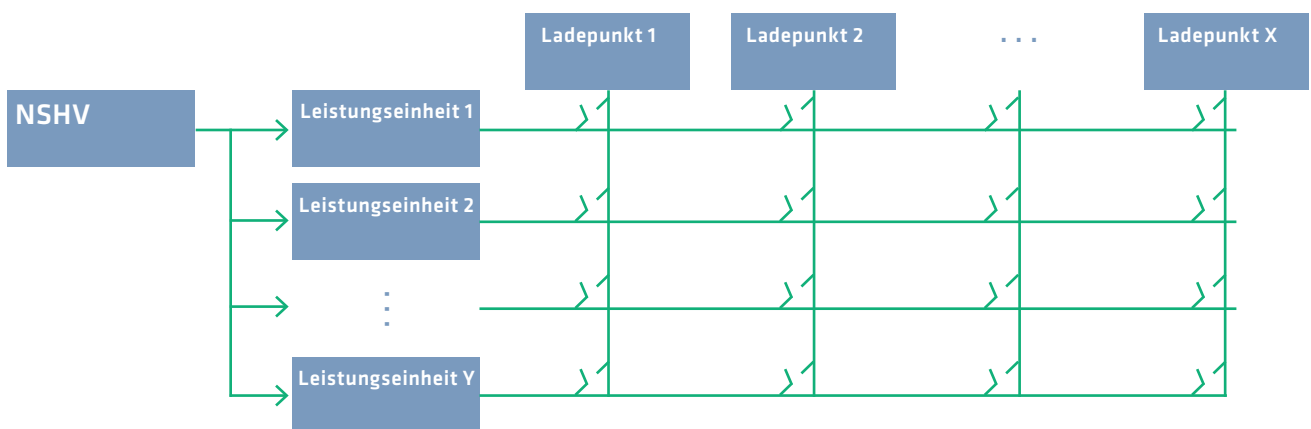


Abb. 22 Vereinfachte Struktur der Schaltmatrix: Von der Niederspannungshauptverteilung (NSHV) können die verfügbaren Leistungseinheiten auf die vorhandenen Ladepunkte je nach Bedarf geschaltet werden.

Für die Demonstration des MCS-Ladens, dem Laden des Fahrzeugs mit mehr als 1 MW, werden in der Spitze alle Leistungseinheiten durch die Schaltmatrix auf den MCS-Ladepunkt zusammengeschaltet. Da die verfügbare Leistung am vorhandenen Mittelspannungsanschluss nicht ausreicht, wird zum Erreichen der Spitzenleistung ein Pufferspeicher integriert. Dieser wird direkt DC-seitig angebunden, um den maximal möglichen Wirkungsgrad zu erreichen.

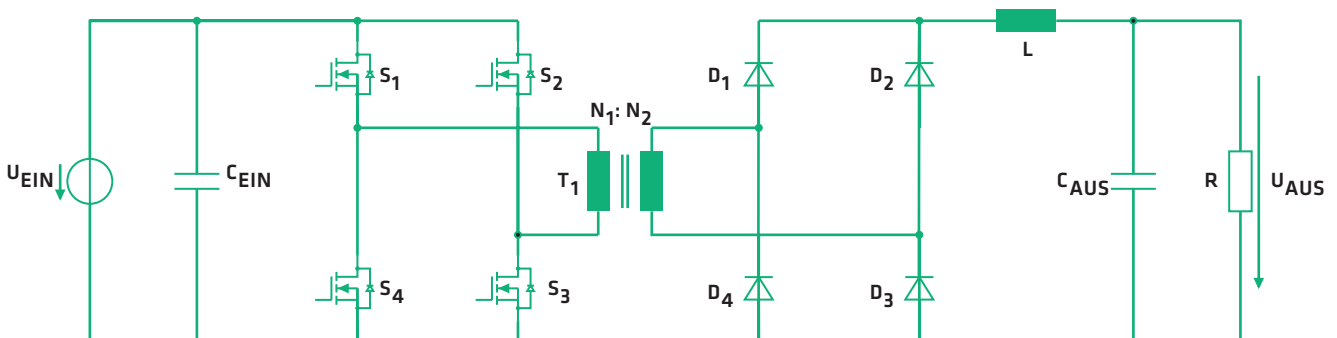
Es ist weiter möglich an einem Ladepunkt nur die unidirektionale Leistungselektronik zum Laden eines Fahrzeugs zu nutzen. An einem weiteren Ladepunkt könnte so gleichzeitig ein Fahrzeug bidirektional laden und somit das Netz stützen oder den Pufferspeicher wieder aufladen. Die Flexibilität der Schaltmatrix lässt so sehr viele Anwendungsmöglichkeiten zu und kann beliebig durch weitere Leistungseinheiten oder weitere Ladepunkte (CCS oder MCS) erweitert werden.

Künftig könnten sich beispielsweise auch unterschiedliche Nutzungsbedarfe für Ladestationen bei Tag und Nacht ergeben, welche durch die Flexibilität der Schaltmatrix und der bidirektionalen Leistungselektronik bereits heute abgedeckt werden können.

Hocheffiziente unidirektionale Leistungselektronik

Neben der intelligenten Verschaltung verschiedener Leistungselektronik wird im Rahmen von NEFTON auch an der Optimierung hinsichtlich des Wirkungsgrads einzelner Module gearbeitet. Die Entwicklung hocheffizienter Leistungselektronik zum Laden bietet insbesondere bei hohen Ladeleistungen Vorteile. Die geringen Verluste verringern nicht nur die Kosten, sondern auch die benötigte Kühlleistung und vereinfacht damit die räumliche Integration in den Ladesäulenverbund. In hocheffizienter Leistungselektronik geht man von Verlusten in der isolierenden Leistungselektronik von einem Prozent aus. Damit bewegt sich die zu kühlende Abwärme bei einer erzielten Ladeleistung von 25 kW pro Modul im Bereich von 250 W. In diesem Leistungsbereich lässt sich eine ausreichende Kühlung durch passive Kühlkörpern realisieren und vermeidet die Notwendigkeit von aktiven Kühlsystemen, was neben Kosten auch akustische Vorteile aufweist. Standard-Leistungselektroniken weisen Effizienzen im Bereich von 96 % auf und stellen daher bedeutend höhere Anforderungen an die Kühlleistung, sodass die abgegebene Verlustleistung von etwa einem Kilowatt abgeführt werden muss. Der bereits beschriebene Mehraufwand durch ein aktives Kühlsystem kann bei einer hocheffizienten Leistungselektronik entfallen. Neben den beschriebenen Vorteilen wird zusätzlich die Ausfallanfälligkeit reduziert. Für die Entwicklung der hocheffizienten Leistungselektronik im Rahmen des Projekts dient der Gegentaktflusswandler als Zieltopologie für den isolierenden Gleichspannungswandler. Dieser besitzt einen hohen Wirkungsgrad und lässt einen Aufbau nach den oben genannten Kriterien zu.

Abb. 23: Schaltbild eines isolierenden Vollbrückenwandlers mit passivem Ausgangsgleichrichter. Durch sehr schnelles Schalten mit Siliciumcarbid Halbleitern können sehr hohe Effizienzen erzielt werden



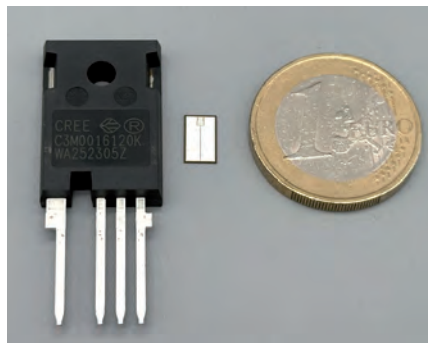


Abb. 24: Größenvergleich von gehaustem MOSFET (links) und blankem Leistungsschalter Chip (rechts). Bei Verwendung des blanken Halbleiterchips kann eine optimierte thermische und elektrische Anbindung entwickelt werden.

Im Projekt kommen blanke 900 V (Bare Die) Leistungshalbleiter des Typs Wolfspeed CPM3-0900-0010A auf SiC Basis zum Einsatz. Eine niederinduktive Anbindung dieser MOSFETs durch Dickdrahtbonden mit 200 μm Aluminium ermöglicht hohe Schaltgeschwindigkeiten. Dadurch werden die Verluste pro Schaltvorgang gering gehalten. Eine niedrige Schaltfrequenz von 20 kHz, und somit relativ wenige Schaltvorgänge pro Sekunde, reduziert die Verluste noch weiter. Eine hohe Schaltgeschwindigkeit erfordert jedoch ein aufwendiges Platinen- und Kondensatordesign am Leistungsschalter, sodass dieser Bereich hohen Entwicklungsaufwand verursacht.

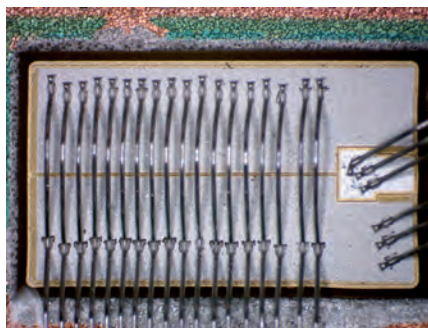
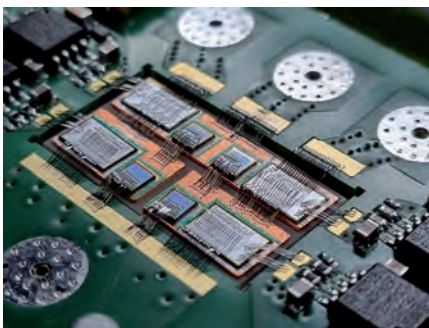


Abb. 25 Links: Thermisch und elektrisch optimierte Schaltzelle eines Vollbrückenmoduls mit MOSFETs, Dioden und Gate-Treibern. Rechts: Vergrößerung

Ein speziell entwickelter und angefertigter Hochfrequenztransformator (HF-Transformator) erlaubt durch besonders feine HF-Litzen und großes Ferritkernvolumen eine verlustarme Übertragung der Leistung. Zur Abschätzung der Einsetzbarkeit im Projekt wurden mehrere Prototypen im Dauerbetrieb zur Vorauswahl gegeneinander verglichen. Das Einhalten einer maximalen Betriebstemperatur von 70°C war bei allen getesteten Exemplaren gewährleistet. Zum konkreten Vergleich der abgegebenen Wärmeenergie wurden die Prototypen jeweils thermisch isoliert betrieben. Ein stationärer Zustand wird nicht erreicht, da der Ausgleichsvorgang sehr lange dauern würde. Der größte aufgebaute Transformator setzt sich thermisch deutlich ab und eignet sich damit für weiteres Vorgehen am besten. Gemäß der Kern- und Wicklungsparameter bestimmen sich dessen Verluste bei Vollast zu 156 W.

Thermobild von Transformator-Prototypen

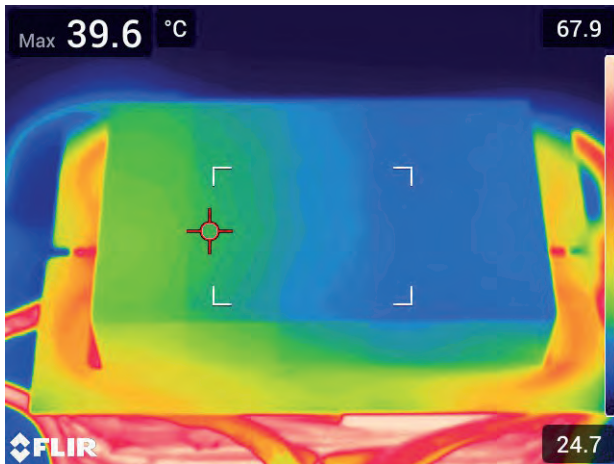
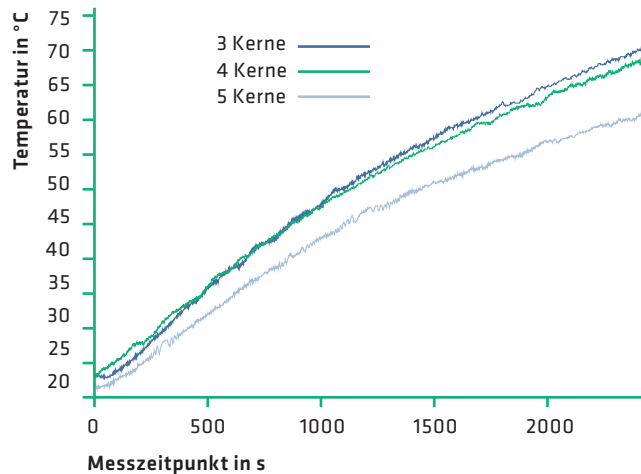


Abb. 26: Links: Thermobild von Transformator-Prototypen. Durch die hocheffiziente Leistungselektronik wird auch unter Vollast keine aktive Kühlung benötigt. Rechts: Vergleich der Erwärmung der einzelnen Prototypen mit drei, vier und fünf Magnetkernpaaren. Je kleiner der Transformator, desto stärker die Erwärmung.

Thermischer Vergleich der Transformatorprototypen



Der isolierende Gleichspannungswandler mit einer Ausgangsleistung von 25 kW wird zusammen mit einem Leistungskorrekturfaktor (PFC) Modul auf einem Aluminiumkühlkörper angebracht.

Ein Verguss der induktiven Bauteile (HF-Transformator und Spule) gewährleistet zum einen mechanische Stabilität, insbesondere der Kerne aus spröden Weichferriten, zum anderen erlaubt diese Fertigungsmethode eine gute thermische Ableitung der Verluste (Vermeidung von Hotspots). Gleichzeitig erhöht die Vergussmasse zwischen den Wicklungen und dem Gehäuse ein Anheben der Spannungsfestigkeit zwischen leitenden Bestandteilen und damit ein Bestehen der Prüfung auf Teilentladungsfestigkeit. Der erreichte Spitzenwirkungsgrad des Gleichspannungswandlers beträgt bei elektrischer Messung 98,9%, siehe » [Abb. 29](#). Der Gesamtaufbau der entwickelten Module ist in » [Abb. 27](#) gezeigt.

Hocheffiziente bidirektionale Leistungselektronik

Neben der beschriebenen unidirektionalen hocheffizienten Leistungselektronik wurde im Demonstrator auch eine bidirektionale Leistungselektronik realisiert. Mit dieser ist es möglich die Energie in beide Richtungen, also sowohl vom Eingang zum Ausgang als auch vom Ausgang zum Eingang zu übertragen. Diese Technologie ist notwendig, wenn das Fahrzeug nicht nur vom Netz geladen werden soll, sondern eben auch rückwärts die Energie des Fahrzeugs genutzt werden soll, um beispielsweise das Netz zu stabilisieren.

Für den Abgriff vom Netz wird zunächst eine Niederspannungshauptverteilung benötigt. Von dort kann mit einem bidirektionalen Gleichrichter oder bidirektionalen Wechselrichter die anliegende Wechselspannung in eine Gleichspannung transformiert werden. Diese Gleichspannung wird von dem bidirektionalen Gleichspannungswandler in die Spannung transformiert, die zum Laden des Elektrofahrzeugs benötigt wird. Aus Sicherheitsgründen muss eine galvanische Trennung zwischen dem Netz und den Fahrzeugen sichergestellt werden. Auch zwischen den Fahrzeugen, die gleichzeitig geladen werden, besteht die Notwendigkeit einer galvanischen Trennung. Aus diesen Randbedingungen wurde für den Gleichspannungswandler die DAB-Topologie (dual active bridge) gewählt.

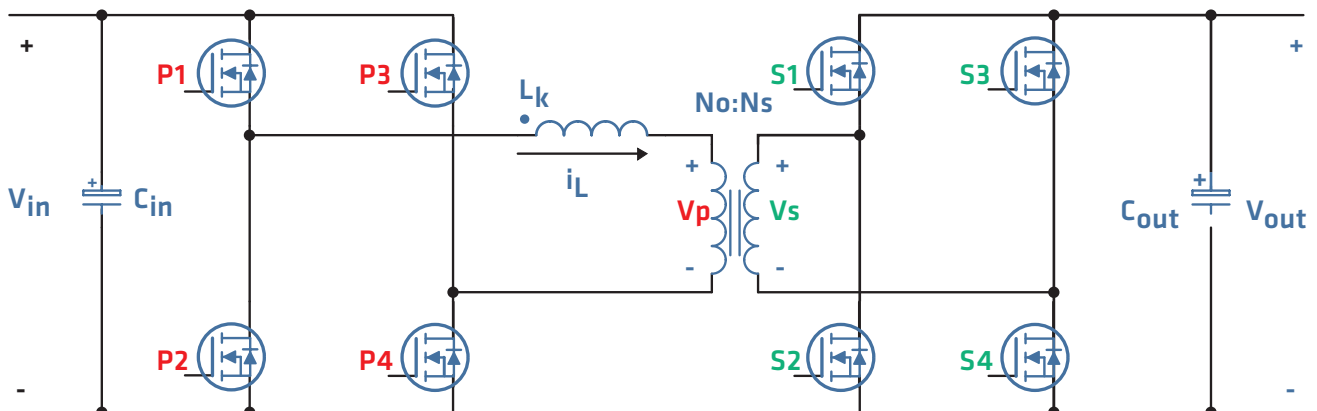


Abb. 27 Die dual active bridge (DAB) besteht aus identischen Vollbrücken auf Primär- und Sekundärseite, einem Hochfrequenztrafo in der Mitte, einer Energieübertragungsspule und den Zwischenkreis-kondensatoren.

Diese Topologie ermöglicht außerdem eine Unabhängigkeit der Ausgangsspannung von der verfügbaren Eingangsspannung. Es kann also sowohl eine niedrigere als auch eine höhere Ausgangsspannung erzeugt werden. Die verwendeten Komponenten wurden so gewählt, dass eine möglichst hohe Packungsdichte erreicht werden kann. Durch eine höhere und gleichzeitig variable Schaltfrequenz (50–90 kHz) können die Induktivitäten und Kapazitäten deutlich kleiner realisiert werden. Mit Verwendung modernster SIC-MOSFET Leistungsschalter mit hoher Schaltgeschwindigkeit konnten die Schaltverluste weiter reduziert werden. Ein Modul leistet 50 kW. Pro Gerät werden üblicherweise 2 Module verwendet. Somit ergibt sich pro Gerät eine Maximalleistung von 100 kW.

Der verwendete bidirektionale Gleichspannungswandler wird auch dazu verwendet, um den benötigten Pufferspeicher laden zu können beziehungsweise bei Bedarf die Energie aus dem Pufferspeicher zum Laden des Elektrofahrzeugs bereitzustellen.



Abb. 28: Links: Aufbau eines dreiphasigen Leistungsmodul mit 75 kW Ausgangsleistung, bestehend aus PFC-Wandler (unten), Inverter und Gleichrichter (mitte) und Spule und Transformator (oben). Rechts: Leistungseinheit der bidirektionalen Leistungselektronik.

Die beiden Lösungen werden in » Tab. 2, » Abb. 28 und » Abb. 29 verglichen: Während die unidirektionale Leistungselektronik hohe Wirkungsgrade in einem breiten Bereich erreichen kann, zeigt die bidirektionale Leistungselektronik eine stärkere Abhängigkeit von günstigen Lastbereichen. Durch die Schaltmatrix können einzelne Module dann in günstigen Bereichen betrieben werden, und andere komplett abgeschaltet. Insgesamt hat die bidirektionale Leistungselektronik eine höhere Packungs- und Leistungsdichte.

Leistungselektronik	unidirektional	bidirektional
Leistungsschalter	SiC MOSFET	SiC MOSFET
Topologie	Tiefsatzsteller	DAB (Hoch- und Tiefsatzsteller)
Effizienz	98,9 %	98,3 %
Leistungsmodul	75kW (3 x 25kW)	100kW (2 x 50kW)
Maße	97 x 68 x 61 cm	71 x 65 x 32,5 cm
Gewicht	200 kg	106kg

Tab. 2 Vergleich der hocheffizienten unidirektionalen Lösung, und der hocheffizienten bidirektionalen Lösung.

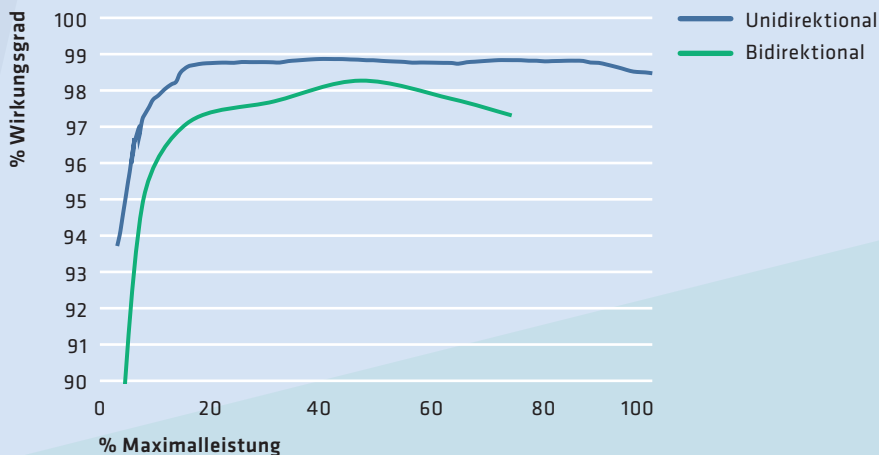


Abb. 29: Wirkungsgradkennlinie der entwickelten Leistungselektroniken. Die Unidirektionale Leistungselektronik erreicht in einem breiten Bereich Effizienzen von über 98 %. Die bidirektionale Leistungselektronik hat Wirkungsgrade, die stärker von der Ladeleistung abhängen.

Zukunftsfähige Systemintegration

Die Steuerung der NEFTON MCS-Ladesäule setzt AVL mit einer modularen Master-Slave Steuergerätearchitektur um.

Das Master-Ladesteuergerät (MCCU) übernimmt dabei die Kommunikation zur Leistungselektronik sowie zum Batteriemanagementsystem (BMS) des Pufferspeichers, die übergeordnete Steuerung dieser Komponenten sowie die Ansteuerung von benötigten Nebenaggregaten wie z. B. Human-Machine-Interface, Messgeräte und gegebenenfalls Kühlung. Weiterhin wird das Energiemanagement, bestehend aus der Überwachung und Koordination von Stromnetz, lokalem Energiespeicher sowie dem möglichen Einsatz von bidirektionalem Laden und Verbindung zum Backend, über dieses Steuergerät realisiert. Ein Notleitungssignal dient der schnellen Abschaltung der Leistungselektronik im Fehlerfall. Die MCCU ist windowsbasiert auf einem Industrie-PC implementiert mit echtzeitfähigem TwinCat.

Das Slave-Ladesteuergerät (SCCU) realisiert die gesamte Ladekommunikation zum Fahrzeug für sowohl Megawattladen nach neuem MCS-Standard als auch bidirektionales CCS-Laden nach dem Standard ISO 15118-20. Die SCCU läuft Linux-basiert in eingebetteter Umgebung. Die Kommunikation zwischen MCCU und SCCU erfolgt echtzeitfähig über eine Ethercat-Verbindung.

Hinsichtlich einer zukunftsfähigen Systemintegration wurden bei der Entwicklung der Steuergeräte folgende Schwerpunkte gesetzt:

Skalierbarkeit: Da die Ladekommunikation auf einem separaten Steuergerät implementiert ist, wird die Erweiterung des NEFTON-Ladesystems um zusätzliche Dispenser (Ladesäulen mit Ladepunkten für Lkw) ohne großen Anpassungsaufwand unterstützt. Es können für diesen Fall zusätzliche SCCUs (ein Slave-Ladesteuergerät pro Dispenser) in die Systemarchitektur eingefügt und mit der MCCU für die Ansteuerung der Leistungselektronik verbunden werden. Die MCCU-Software erlaubt die Anbindung mehrerer Ladepunkte, die unabhängig voneinander betrieben werden können und kann für Anlagen unterschiedlicher Größe beliebig dimensioniert werden. Somit ist es möglich, dass die NEFTON Ladestation mehrere Ladepunkte versorgt.

Modularität: Die Backend- und Frontendanbindung des Ladesystems ermöglichen diverse Anwendungsfälle in der Zukunft. Die Backendanbindung gemäß dem Open Charge Point Protocol 2.0.1 (OCPP) ermöglicht die drahtlose Kommunikation der Ladesystemsteuerung mit Ladeparkmanagementsystemen und zukünftigen Smart Grids. OCPP ist eine opensource Spezifikation und der defacto Standard für die Ladesäule-Backend Schnittstelle. Die AVL-Implementierung der Bedienoberfläche über ein HMI kann für zukünftige Anwendungen beliebig gestaltet und erweitert werden. Die Kommunikation zum Fahrzeug ist mit dem neuesten Standard ISO 15118-20 realisiert und kann zukünftig um Features wie z. B. Plug & Charge für die Erhöhung der Nutzerfreundlichkeit erweitert werden.

Die Ladesteuerung ist modular aufgebaut, so dass Komponenten leicht ausgetauscht, entfernt, hinzugefügt oder aufgerüstet werden können, wenn sich die Technologie weiterentwickelt. Das System kann sich an Änderungen von Standards, Protokollen und Hardware anpassen, ohne dass eine vollständige Überholung erforderlich ist. Die SCCU kann die Ladekommunikation für verschiedene Anwendungsfälle und Ladestandards realisieren (Ethernet, differentielle Power-Line-Communication und modulierte Power-Line-Communication sind implementiert bzw. vorgehalten).

Konnektivität: Mit OCPP ist eine Datenerfassung und -analyse möglich, die wertvolle Einblicke in Lademuster, Energieverbrauch und Nutzerverhalten liefert. Diese Daten können verwendet werden, um die Bereitstellung der Ladeinfrastruktur zu optimieren, innovative Dienste zu entwickeln und die allgemeine Benutzererfahrung zu verbessern.

Cyber Security: Robuste Cybersicherheitsprotokolle und Verschlüsselungsmechanismen sind im Ladekommunikationsstandard ISO 15118-20 definiert und dienen dem Schutz der Ladeinfrastruktur sowie der Einhaltung der Privatsphäre des Nutzers. Da Ladesäulen zunehmend vernetzt sind, tragen diese Maßnahmen zum Schutz vor potenziellen Cyberbedrohungen bei und gewährleisten Integrität und sichere Kommunikation. In der SCCU ist das Transport-Layer-Security (TLS) Protokoll nach ISO 15118-20 implementiert und steht für zukünftige Anwendungen mit erweitertem Cybersecurity-Umfang zur Verfügung. Dieses Verschlüsselungsprotokoll dient der sicheren Datenübertragung im Internet oder einem Netzwerk.

Integration von stationären Energiespeichern

Im NEFTON-Ladesystem ist eine Pufferbatterie bestehend aus drei Batteriepacks integriert. Dieser Ansatz bringt nicht nur Vorteile hinsichtlich der Zuverlässigkeit der Laderessourcen, sondern bietet auch zahlreiche Möglichkeiten zur Optimierung des Energieverbrauchs und der Kosteneffizienz sowie der Integration von regenerativen Energien in das Flottendepot, um die Nachhaltigkeit der Anlage zu verbessern.

Mit dem Konzept der dualen Energieversorgung aus dem Stromnetz sowie aus der Pufferbatterie wird ein zuverlässiger und leistungsfähiger Betrieb für die Ladevorgänge der Lkw-Flotten sichergestellt. Die Pufferbatterie kann dabei die für das Fahrzeug verfügbare Leistung deutlich gegenüber der Netzanschlussleistung erhöhen.

Darüber hinaus kann das System die Vorteile von dynamischen Strompreisen nutzen, indem in Zeiten niedriger Stromkosten die Pufferbatterie aufgeladen wird. Diese intelligente Strategie des Energiemanagements ermöglicht Kosteneinsparungen, indem Strom zu günstigen Zeiten in der Pufferbatterie gespeichert und dann in Spitzenzeiten zum Aufladen der Lkw verwendet wird. Die Energiekosten können sich dadurch für den Flottenbetreiber senken.

Auch für die Einbindung regenerativer Energien in das Flottendepot kann der Pufferspeicher genutzt werden. Der erzeugte Strom wird nicht in jedem Fall direkt für das Laden von Lkw genutzt. Es kann z. B. sinnvoll sein, zu Zeiten in denen Solarstrom lokal verfügbar ist die regenerativ erzeugte Energie zunächst in der Pufferbatterie zwischenspeichern, um sie zu einem späteren Zeitpunkt, wenn die Preise am Strommarkt durch starke Nachfrage unattraktiv sind, wieder für den Ladevorgang der Fahrzeuge zu nutzen.

Weiterhin rückt die Vehicle-to-Grid Technologie in den Vordergrund und ermöglicht es Lkw-Flottenbetreibern, mit bidirektionalem Laden aktiv zur Stabilisierung des Netzes beizutragen, indem sie in Spitzenzeiten überschüssige Energie aus dem Pufferspeicher in das Stromnetz zurückspeisen. Diese Möglichkeit kann für den Flottenbetreiber durch die Vergütung der Einspeisung ins Netz auch finanziell von Bedeutung sein.

Der Datenaustausch zwischen den BMSs der drei Batteriepacks vom Pufferspeicher und dem AVL-Master-Steuergerät (MCCU) erfolgt über Modbus TCP über Ethernet, ein vielseitiges und effizientes Protokoll, das speziell für die industrielle Kommunikation entwickelt wurde und die Überwachung und Steuerung in Echtzeit mit minimaler Latenz ermöglicht. Dadurch wird sichergestellt, dass kritische Informationen wie Leistungsmessungen, Spannungspegel, Ladezustand (SOC) und Systemstatus präzise übertragen und umgehend verarbeitet werden.

Durch die Kopplung mit dem BMS übernimmt die MCCU eine zentrale Rolle bei der Steuerung und Verwaltung des Batterienetzwerks. Sie sammelt nicht nur wichtige Daten, sondern gibt auch Befehle an die Batteriepacks, damit diese sich je nach Energiebedarf ein- oder ausschalten, um die dynamische Nachfrage zu decken.

4

NUTZFAHRZEUG

Neben der Ladeinfrastruktur steht auch das Nutzfahrzeug vor der Herausforderung die diversen Anforderungen aus der Logistik und der Regulatorik zu erfüllen. Innovative Lösungen für Fahrzeugkonzept, Thermomanagement und Energie werden mit Fokus auf das Batteriesystem entwickelt. Zusätzlich werden die zentralen Konzepte zur Umsetzung des Megawattladens im Fahrzeug gezeigt und diskutiert.



Die zentralen Anforderungen einer hohen Reichweite und schnellen Ladegeschwindigkeit der Elektro-Lkw betreffen vordergründig das Batteriesystem. Durch die Batterie-konfiguration und -kapazität sowie die Zellchemie können die Fahrzeuge an unterschiedliche Anwendungsszenarien angepasst werden.

Integration des Batteriesystems

Der derzeitige Aufbau von Nutzfahrzeugen erfolgt aufgrund der hohen Variantenvielfalt nach dem Leiterraumkonzept. Ein zentraler Stahlrahmen trägt modulare Aufbauten und Antriebe. Dieses Aufbaukonzept sowie die erlaubten Achslasten limitieren die maximal installierbare Batteriekapazität im Fahrzeug. » **Abb. 39** zeigt das Chassis einer Sattelzugmaschinen sowie den freien Bauraum für das Batteriesystem. Um die Anforderungen aus dem Fahrbetrieb erfüllen zu können, wird eine minimale Batteriekonfiguration, hier von 4 Modulen, verbaut. Weitere Batteriepacks können bei dem hier gezeigten modularen Aufbau in Abhängigkeit des Einsatzprofils hinzugefügt werden. Dabei muss immer ein Kompromiss aus erzielter Reichweite und transportierbarer Nutzlast getroffen werden. So kann die Reichweite bei einer Maximalkonfiguration von 6 Batteriepacks auf 400 km bei Einsatz im Fernverkehr gesteigert werden, jedoch bei gleichzeitiger Reduktion der möglichen Sattellast auf 9,5 t. Die Auswirkung verschiedener Batteriesystemkonfigurationen ist in » **Abb. 30** illustriert.

Der maximale Energieinhalt eines Batteriepacks hängt von einer Vielzahl an Kriterien ab. Vom kleinsten Element, der Batteriezelle, und ihrer Zusammensetzung über die Anordnung unter Berücksichtigung der Sicherheit und Batteriekühlung zu einem Pack bis hin zu Peripheriekomponenten wie Batteriemanagementsysteme und Anschlüsse spiegeln sich alle Komponenten in der schlussendlich erreichten Energiedichte wider.

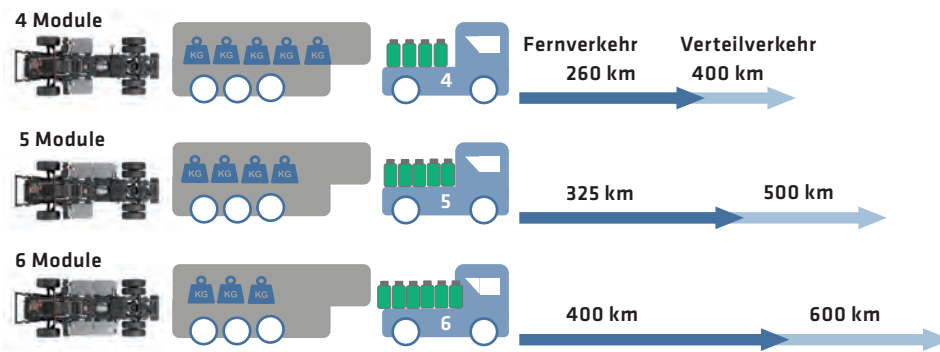


Abb. 30 Die Reichweite der Elektro-Lkw und die zulässige Sattellast des Zugfahrzeugs hängt stark von der Batteriekonfiguration des Fahrzeugs sowie dem Einsatz ab. Im Falle des neuen MAN eTruck besteht die Möglichkeit, das Batteriesystem auf das Einsatzprofil anzupassen. So kann mit einer 4-Modul-Konfiguration im Verteilverkehr (geringerer Verbrauch) eine Reichweite von 400 km erzielt werden, während eine 6-Modul Konfiguration bei geringer möglicher Nutzlast bis zu 600 km Reichweite erreicht.

Konstruktionsprinzip des Batteriesystems

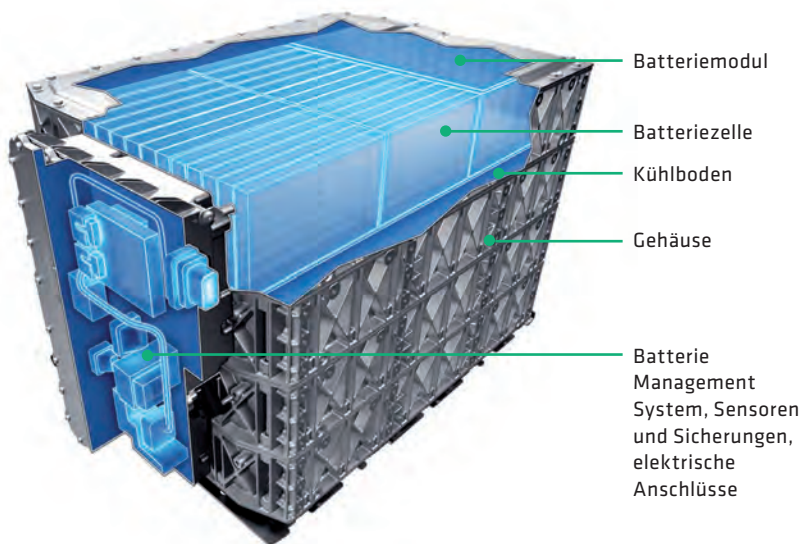


Abb. 31 Ein Batteriepack, wie es je nach Konfiguration mehrfach im Fahrzeug verbaut wird, besteht aus einer Vielzahl an Komponenten. Neben dem Kern, den Zellen, muss die Kühlung während des Betriebs und insbesondere während des Ladens gewährleistet werden. Hohe Sicherheitsstandards werden sowohl bei der Batteriezellanordnung als auch bei der Gestaltung des Packgehäuses berücksichtigt. Weitere Peripheriekomponenten, wie Batteriemanagementsysteme, beeinflussen ebenfalls die erreichte Energiedichte eines Batteriepacks.

Auswahl eines geeigneten Batteriesystems

In den kommenden Jahren werden sowohl verschiedene Anzahl an Batteriepacks als auch verschiedenen Maximalgrößen verschiedener Hersteller verfügbar sein. Dies ist in » Abb. 32 in Kombination mit der damit resultierenden maximalen Nutzlast gezeigt. Da für Zero-Emission Fahrzeuge 42 anstatt 40 Tonnen maximales Fahrzeuggewicht erlaubt sind, liegen die angekündigten Modelle nur ca. 500-1000 kg unterhalb der durchschnittlichen Nutzlast eines Diesel-Lkw. Neben den verschiedenen maximalen Batteriegrößen wird die Varianz durch verschiedene Pack-Abstufungen und unterschiedlichen Zellchemien weiter erhöht. Damit stehen dem Anwender eine Vielzahl von verschiedenen Batteriesystemen zur Auswahl. Zusätzlich besitzt die Komponente Batterie einen großen Einfluss auf die Gesamtbetriebskosten (TCO), was zusammen mit der großen Auswahl die Komplexität und Relevanz der individuell optimalen Kaufentscheidung erhöht. Im Folgenden werden die grundsätzlichen Auswirkungen der Batteriegröße auf den individuellen Anwendungsfall beschrieben.

Mögliche Nutzlasten in Abhängigkeit der Batteriekapazität

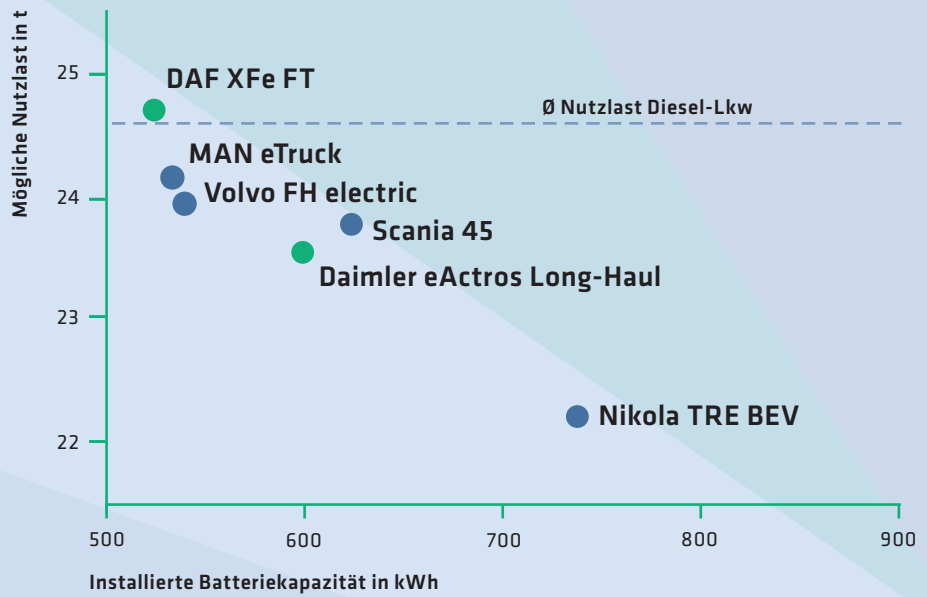


Abb. 32 Die angekündigten Modelle der verschiedenen Hersteller variieren stark hinsichtlich maximaler Batteriekapazität und verwendeter Zellchemie. Basierend auf dem unterschiedlichen Batteriegewicht ergeben sich die möglichen Nutzlasten. Diese liegen bei den angekündigten Modellen ca. 500–1000 kg unterhalb der durchschnittlich transportierbaren Nutzlast eines Diesel-Lkws.

Wenn unterschiedlich große Batteriekapazitäten im Fahrzeug verglichen werden, ergeben sich grundsätzlich folgende Zusammenhänge: Eine große Batterie resultiert in höheren Investitionskosten und in eine größere Masse des Batteriesystems. Dies bewirkt zusätzlich einen höheren Verbrauch und eine geringere maximale Nutzlast aufgrund des Mehrgewichts. Allerdings reduziert sich die Belastung auf die einzelne Zelle, was in verringerter Batteriealterung resultiert. Eine große Batterie bewirkt zudem, dass die Abhängigkeit der öffentlichen Ladeinfrastruktur sinkt und ermöglicht, dass mehr „günstige“ am Heimdepot geladene Energie mitgenommen werden kann. Ein letzter Vorteil ist die höhere Flexibilität des Spediteurs in der Disposition, weil ein größeres Spektrum an Fahrten mit diesem Lkw ausgeführt werden können. Die entsprechenden Vor- und Nachteile sind im Falle einer kleinen Batteriegröße umgekehrt.

Die Abbildung zeigt zum einen die Begrenzungen durch das maximale zulässige Gesamtgewicht als auch die Begrenzung durch den maximalen Bauraum und damit der maximalen Batteriegröße. Des Weiteren werden die Ergebnisse der Lebenszykluskosten-Berechnung für alle möglichen Nutzlasten und Batteriegrößen gezeigt. Die Kombinationen aus Nutzlasten und Batteriegrößen, die nicht bei der entsprechenden Ladeleistung darstellbar sind, sind durch eine weiße Fläche gekennzeichnet. Im Falle von 300 kW öffentlicher Ladeleistung ist immer die kleinstmögliche Batteriegröße kostenoptimal. Im Falle von höheren Ladeleistungen und damit höheren Ladepreisen zeigt sich, dass bei gleichbleibender Nutzlast die Kosten bei steigender Batteriegröße sinken, bis gänzlich auf öffentliches Laden verzichtet werden kann und die gesamte Energie „günstig“ am Heimdepot geladen werden kann. Eine noch größere Batterie führt allerdings wieder zu einem Ansteigen der Kosten, da die höheren Investitionskosten die geringere Alterung übersteigen. Grundsätzlich ist die optimale Wahl der Batteriegröße stark abhängig von der Preisdifferenz zwischen dem Strom am Depot und der öffentlichen Ladeinfrastruktur.

Neben der Batteriegröße beeinflusst die Zellchemie die Eigenschaften des Batteriepacks. Wie in » **Abb. 32** gezeigt werden vor allem die NMC (Nickel-Mangan-Cobalt) und die LFP (Lithium-Eisenphosphat) Chemie für Nutzfahrzeuge eingesetzt. Die konkreten Eigenschaften eines Batteriezelltyps schwanken dabei je nach Hersteller, Aufbau und genauer Zusammensetzung jedoch stark. Allerdings lassen sich folgende Trends beschreiben: Die NMC Chemie besitzt eine höhere Energiedichte hinsichtlich Masse und auch Volumen, was bei gleichem Energiegehalt zu einem leichteren und kleineren Batteriesystem führt. Allerdings weist

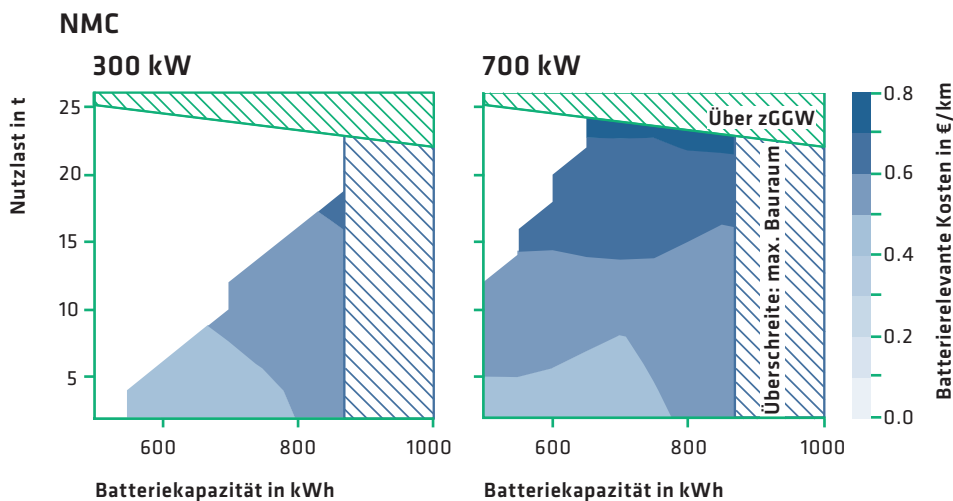


Abb. 33: Die Kosten, beeinflusst durch die Batteriegröße, für verschiedene Nutzlasten für den Fall von 650 km Tagesfahrleistung. Bei geringen Ladeleistungen ist die kleinstmögliche Batteriegröße kostenoptimal. Im Falle von höherer Ladeleistung sinken die Kosten mit steigender Batteriegröße für eine Nutzlast bis zu dem Punkt, an dem keine Öffentliche Ladeinfrastruktur mehr benötigt wird. Bei noch größerer Batteriegröße steigen die Kosten wieder. Grund ist der sinkende Anteil an öffentlich geladener Energie bei größerer Batteriegröße.

sie einen höheren Preis und geringere Lebensdauer auf. Zusätzlich muss eine größere Anzahl zusätzlicher Maßnahmen ergriffen werden, um die Sicherheit des Packs zu gewährleisten. Diese Trends resultieren in Vorteilen von NMC-Batterien bei hohen Nutzlasten und geringen Ladeleistung der öffentlichen Ladeinfrastruktur, aufgrund der hohen Energiedichten, da größere maximale Batteriekapazitäten ermöglicht werden. Die LFP Chemie weist tendenziell Vorteile bei geringeren Nutzlasten und höheren Ladeleistungen auf, außerdem kann ein geringerer Zellpreis erzielt werden.

Lebenszyklusemissionen für Elektro-Lkw

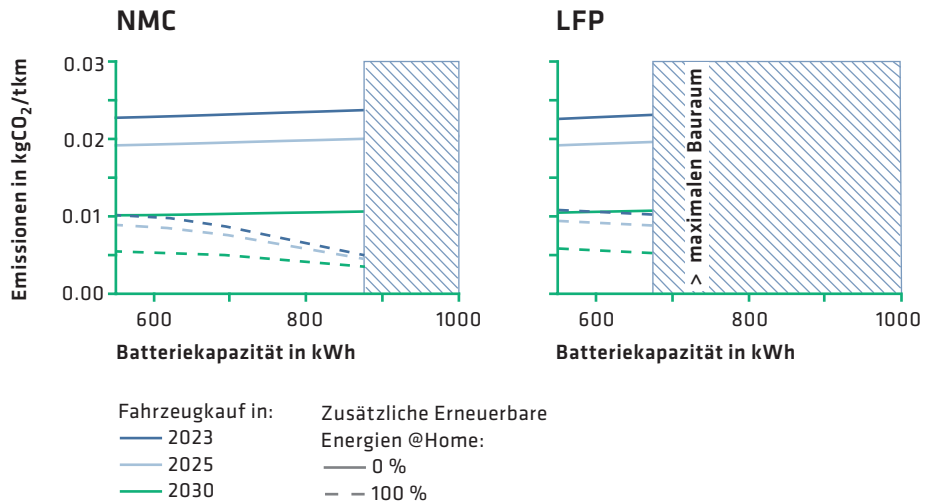


Abb. 34: Die Lebenszyklusemissionen für Elektro-Lkw bezogen auf die Transportleistung. Bei gleicher Strommix am Heimdepot und an der öffentlichen Ladeinfrastruktur weist die kleinstmögliche Batterie die geringsten Emissionen auf. Wenn am Heimdepot die gesamte Energie aus erneuerbaren PV-Strom stammt, sind größere Batteriegrößen optimal, da seltener öffentlich Netzstrom geladen werden muss.

Neben dem Ziel der minimalen Kosten können für den Spediteur ebenfalls die minimalen Emissionen als Zielgröße definiert werden. Hierbei spielen sowohl die Produktion der Batteriezellen als auch die Emissionen in der Stromherstellung eine Rolle. Hier sind höhere Produktionsemissionen der NMC Chemie festzustellen. Mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien wird jedoch insgesamt erwartet, dass die Produktionsemissionen der Zellen in den kommenden Jahren sinken werden. Hinsichtlich der Kaufentscheidung der Batteriegröße spielt neben diesen Faktoren ebenfalls die Nutzung von PV-Anlagen und der entsprechende Eigenverbrauch eine entscheidende Rolle.

Die Ergebnisse in » **Abb. 34** zeigen für den Fall, dass im Heimdepot der gleiche Strommix wie an der öffentlichen Ladeinfrastruktur vorhanden ist, die kleinstmögliche Batteriekapazität die geringsten Emissionen aufweist. Für den Fall, dass der gesamte Strom am Heimdepot aus erneuerbaren Solarstrom stammt, ist die Batteriegröße optimal, die nicht auf öffentliches Laden angewiesen ist. Zusätzlich ist festzuhalten, dass die Emissionen deutlich in den kommenden Jahren sinken werden und die Auswirkungen der Kaufentscheidung auf die Emissionen geringer werden. Vergleichbar zum Kostenfall sind auch im Fall der Emissionsbetrachtung die Emissionen der verbrauchten Energie dominierend. Anders als im Anwendungsfall Pkw spielen aufgrund der hohen Laufleistung von Lkw die Produktionsemissionen eine untergeordnete Rolle.

MEGAWATTLADEN FÜR DEN FERNVERKEHR

Um den Fernverkehr ohne Zeitverlust abbilden zu können, werden Ladeleistungen im Megawatt-Bereich benötigt. Für die Realisierung müssen eine Vielzahl an Komponenten des Ladepfades integriert und angepasst werden.

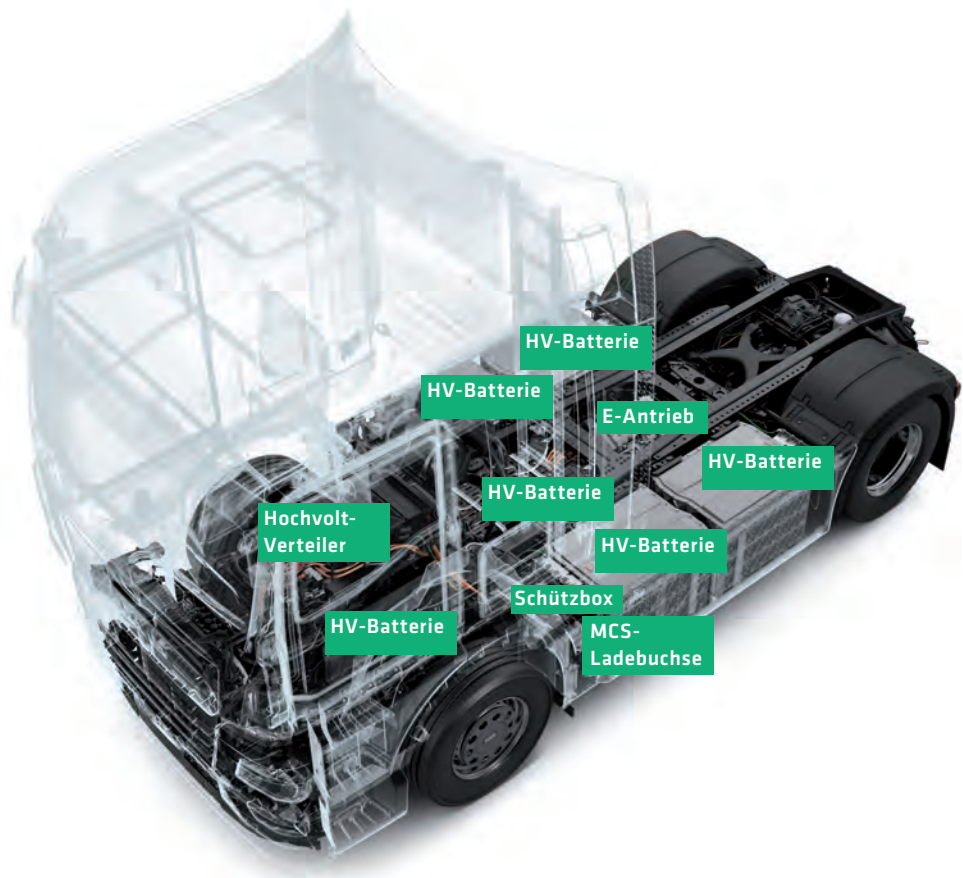


Abb. 35: Die wichtigsten Komponenten des Hochvolt-Bordnetzes des MAN eTrucks. Mehrere modulare Batteriepacks sind im Fahrzeug verbaut.

Herausforderungen beim MCS Laden

Für die optimale Planung des Einsatzes ist für den Anwender essenziell zu wissen, wie viel Energie während der Lenkzeitpause nachgeladen werden kann. Die erreichbaren Ladezeiten sind daher in » [Tab. 3](#) dargestellt.

Ladestrom	Geschätzte Ladezeit, abhängig von der Batteriekonfiguration	System
200 A (150 kW)	115 – 230 min (CCS)	Combined Charging
500 A (375 kW)	45 – 90 min (CCS)	Combined Charging
1.000 A (ca. 750 kW)	ca. 45 min	Megawatt Charging (MCS)
1.500 A (ca. 1 MW)	ca. 30 min	Megawatt Charging (MCS) im NEFTON-Projekt

Tab. 3: Ladezeiten des MAN eTrucks in Abhängigkeit von Ladestrom und Batteriekonfiguration.

Dabei kann – wie auch bei aktuellen Elektro-Pkw – die maximale Ladeleistung nicht über den gesamten Ladevorgang konstant gehalten werden. Ein Grund hierfür ist die Verlustleistung innerhalb der Batteriezellen, die zu einer Erhöhung der Temperatur in der Zelle und damit im gesamten Pack führt. Um beschleunigte Batteriealterung zu verhindern sowie die Zellen vor Überhitzung zu schützen und damit die Sicherheit zu gewährleisten, wird der Ladestrom ab einer gewissen Temperatur und einem gewissen Ladezustand begrenzt.

Diese Effekte sind, angelehnt an einen Elektro-Pkw, beispielhaft in » **Abb. 36** dargestellt. Im Forschungsprojekt NEFTON und dem MAN eTruck gelingt es, den Ladestrom über zwei Drittel der Zeit konstant zu halten.

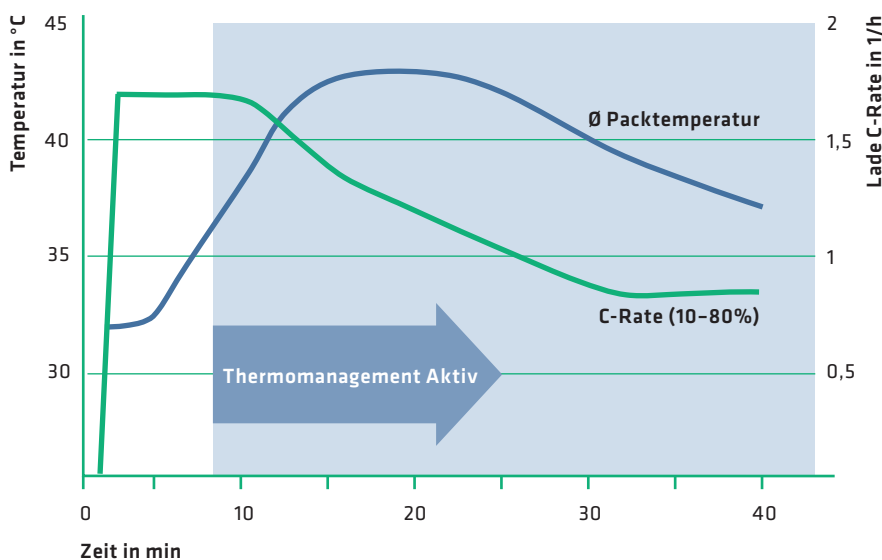


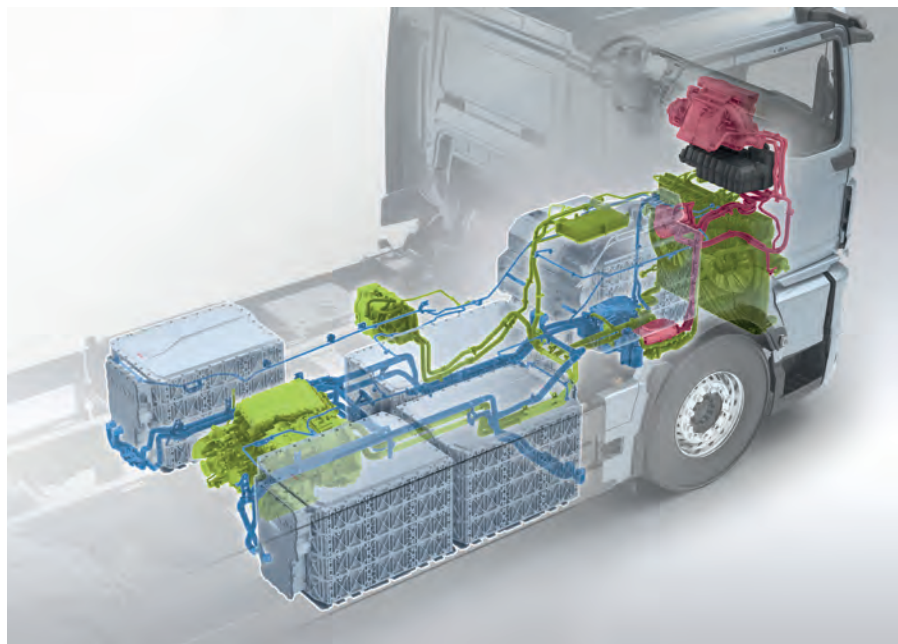
Abb. 36 Schematische Darstellung eines Schnellladevorgangs. Das Verhältnis der Ladeleistung zur Batteriegröße (C-Rate), dargestellt in Rot, erreicht am Anfang des Ladevorgangs bei niedrigem Ladestand den Maximalwert und wird über den Ladevorgang reduziert. Die Temperatur des Batteriepacks steigt über den Ladevorgang und wird durch das aktive Thermomanagement, das ab einem Schwellwert aktiviert wird, gekühlt und damit begrenzt.

Die C-Rate beschreibt das Verhältnis der Ladeleistung zur Batteriekapazität. Eine C-Rate von 1 bedeutet, dass die Batterie in einer Stunde vollgeladen ist. Eine höhere C-Rate verringert entsprechend die Zeit bis zur Vollladung. Es ist zu sehen, dass die Ladeleistung am Start des Ladevorgangs bei einem niedrigen Ladezustand ihr Maximum erreicht und dann sukzessive reduziert wird. Dabei erwärmt sich das Batteriepack und das aktive Thermomanagement (Klima-Kühlkreislauf) wird ab einem Schwellwert aktiviert. Die Funktionsweise, Topologie und Besonderheiten des Thermomanagements im Nutzfahrzeug werden im Folgenden beschrieben.

Der schematische Aufbau des Kühlsystems ist in » **Abb. 37** dargestellt. Es werden zwei gekoppelte Kühlkreise ausgeführt, die durch entsprechende Ventilstellungen Kühlmittelströme untereinander austauschen und dadurch Wärme übertragen können. Der Niedertemperatur-Kühlkreis kühlt die HV-Batterien mit Hilfe eines Kältemittelkreises. Der Kältemittelkreis ermöglicht bei sommerlichen Umgebungsbedingungen das Konditionieren der Batterien auf Temperaturen von etwa 25 °C. Dieser Kältemittelkreis wird beim Schnellladen ab einem Bereich von etwa 100 kW Ladeleistung benötigt. » **Abb. 37** zeigt beispielhafte Werte für die Verlustwärmeströme beim Laden. Die Gesamtverluste betragen für den dargestellten Fall weniger als 4 % der elektrischen Ladeleistung.

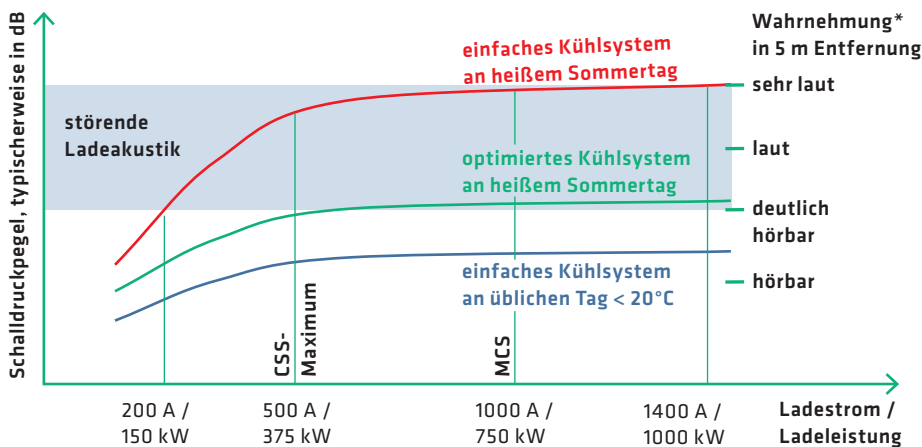
Der Hochtemperatur-Kühlkreis kühlt die Antriebskomponenten und Nebenaggregate. Ebenfalls über den Hochtemperatur-Kühlkreis erfolgt schließlich die Wärmeabfuhr an die Umgebung durch den in der Fahrzeugfront angebrachten Hauptkühler.

Abb. 37: Kühlkomponenten und deren Position im MAN eTruck.



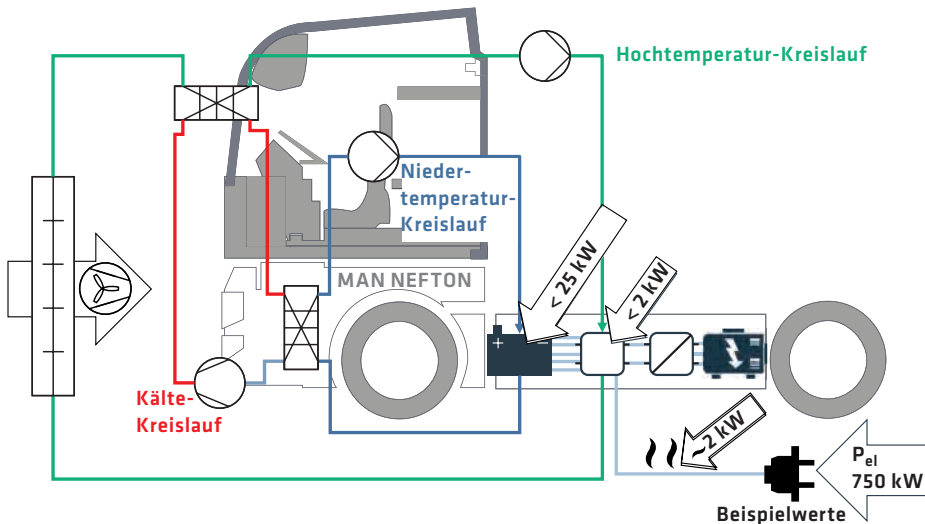
Die Kühlung der Ladesäule und das Thermomanagement im Fahrzeug können beim Schnell- und Megawatt-Laden eine erhebliche Lärmquelle darstellen, » **Abb. 38**. Im Fahrzeug sind hier der Kühlerlüfter in der Fahrzeugfront und der Kältemittel-Kompressor je nach Umgebungsbedingungen und Ladeleistung mit hohen Drehzahlen für eine störende Ladeakustik verantwortlich.

Akustik einer Ladesäule mit eTruck



* Experteneinschätzung auf Basis von Prüfstandtests

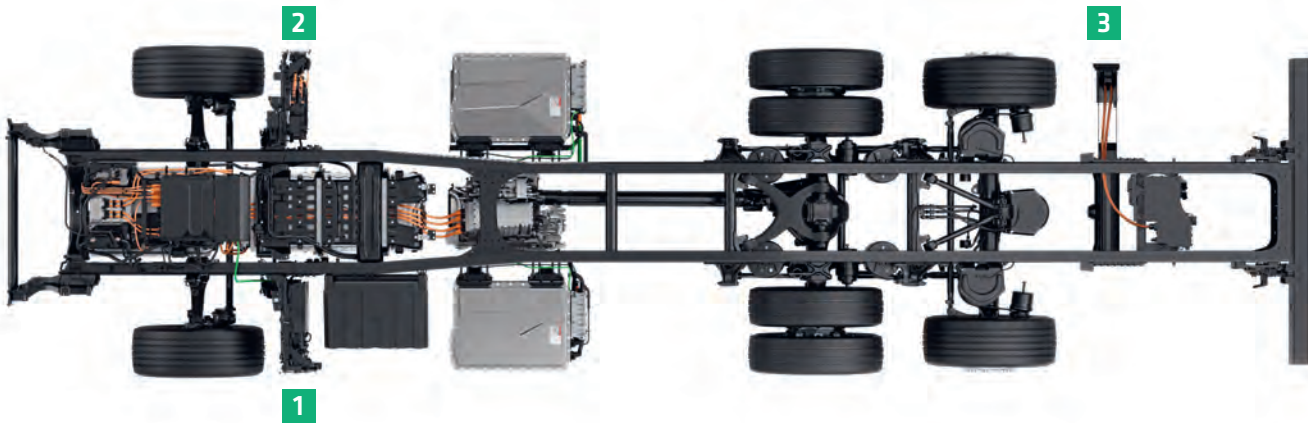
Abb. 38: Akustik eines eTrucks beim Schnellladen in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur, der Ladeleistung und der eingesetzten Technologie.



zu Abb. 37: Schematischer Aufbau der Fahrzeugkühlung samt der thermischen Ladeverluste

Neben den Einsatzbedingungen wie Umgebungstemperatur und Lade-
strom spielt die Technologie, Auslegung und Regelung der Kühlungs-
komponenten die wesentliche Rolle. Bei der Entwicklung des MAN
eTrucks wurden diverse Optimierungsmaßnahmen untersucht und
angewendet, weshalb die erste MAN eTruck-Generation bereits eine
gute Ladeakustik aufweist. Allerdings ist die Geräuschemission der
Ladesäule ebenfalls sehr ausgeprägt und weist in der Praxis in vielen
Fällen noch erhebliche Optimierungspotentiale auf. Hier muss beim Bau
von neuen Ladesäulen ein großes Augenmerk auf die Akustik gelegt
werden, sodass Lkw-Ladeparks im Hochsommer nicht zu einer Lärm-
belastung werden.

Abb. 39: Konfigurierbare
Ladepositionen beim MAN
eTruck. Für den Chassis-Lkw
sind 3 Positionen für CCS-
Laden konfigurierbar. Die
MCS-Ladeanschlüsse werden
entsprechend der Normierung
an Position 1 verbaut.



Ladepfad am Beispiel des neuen MAN eTruck

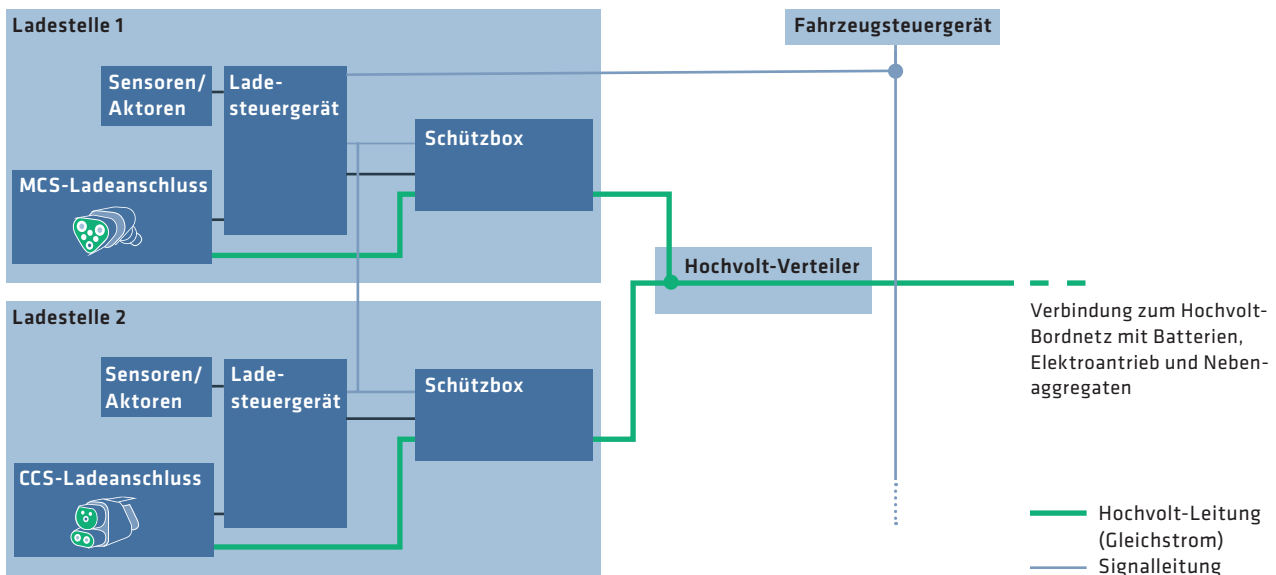
Insbesondere beim eTruck, der in kommerziellen Anwendungen eingesetzt wird, ist ein leistungsfähiges, effizientes und zuverlässiges Ladesystem entscheidend, um die Betriebskosten zu minimieren und die Verfügbarkeit des Fahrzeugs zu maximieren. Weitere wichtige Aspekte sind eine hohe Benutzerfreundlichkeit und die Gewährleistung der Sicherheit, insbesondere im Bereich der Hochvolt-Sicherheit.

Der MAN eTruck lässt sich sowohl für CCS- als auch MCS-Laden individuell konfigurieren und bietet durch die Möglichkeit, Ladeeinrichtungen an bis zu drei verschiedenen Positionen am Fahrzeug anzubringen, eine hohe Flexibilität. Dies ermöglicht eine kundenspezifische Anpassung an die baulichen Gegebenheiten der Ladestation beim Kunden und erhöht die Benutzerfreundlichkeit » **Abb. 39**.

Die Architektur des Ladepfads ist in » **Abb. 40** dargestellt. In diesem Beispiel sind zwei separate Ladeanschlüsse für CCS und MCS konfiguriert, wobei jeder Anschluss mit einem dedizierten Ladesteuergerät verbunden ist. Jedes Ladesteuergerät ist mit einer Vielzahl von Sensoren und Aktoren verbunden, die Echtzeitdaten über den Ladestatus, die Bauteil-Temperaturen und andere wichtige Größen erfassen. Diese Sensordaten ermöglichen eine präzise Überwachung und Steuerung des Ladevorgangs. Die Kommunikationsabläufe zwischen den Ladesteuergeräten und der Ladesäule richten sich nach dem jeweiligen Standard (CCS bzw. MCS). Außerdem kommuniziert das Ladesteuergerät mit dem Fahrzeugsteuergerät, um beispielsweise die Ladegeschwindigkeit in Abhängigkeit der geplanten Abfahrtszeitpunkt zu koordinieren (sogenannte Timer-Ladefunktion).

Die Schützboxen spielen eine wichtige Rolle im Ladepfad. Schütze sind elektromagnetisch betätigte Schalter, die für große elektrische Leistungen geeignet sind. Sie fungieren als Schaltzentrale für den jeweiligen Ladepfad und öffnen bzw. schließen die HV-Verbindungen zwischen Bordnetz und Ladebuchse. Koordiniert durch das Lade-steuergerät verbinden die Schütze den jeweiligen Ladepfad, sobald der eingesteckte Ladestecker erkannt ist und alle weiteren Bedingungen für den Start des Ladevorgangs erfüllt sind. Durch die Verwendung von separaten Schützboxen können für jede Variante individuell die nicht verwendeten Ladebuchsen vom Bordnetz getrennt werden. Weitere Komponenten in der Schützbox sind stromführende Kupferschienen, Sensoren und Sicherungen.

Abb. 40: Ladepfad-Topologie des neuen MAN eTrucks mit modularem Aufbau. Energie kann über CCS, sowie MCS bezogen werden, um Kompatibilität und Flexibilität sicherzustellen.



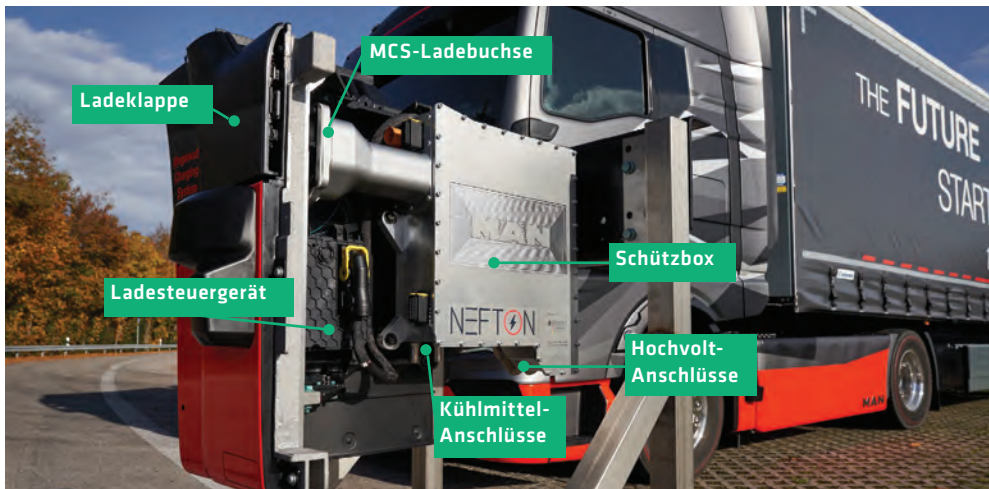


Abb. 41: NEFTON Schützbox mit Teilsystemen und Anschlüssen. Die MCS-Ladeanschlüsse werden entsprechend der Normierung fahrerseitig verbaut.

Die HV-Leitungen zur Verbindung der Komponenten sind aus robusten und widerstandsfähigen Materialien aufgebaut und garantieren so eine hohe Lebensdauer und Leistungsfähigkeit. Diese Leitungen müssen hohen Strombelastungen bei möglichst geringem elektrischem Widerstand standhalten und gleichzeitig die Spannung sicher gegen das Fahrzeug-Chassis und die Umgebung isolieren. Alle HV-Leitungen im Fahrzeug sind orange, damit sowohl die Kunden als auch das Werkstattpersonal diese eindeutig erkennen und gemäß der geltenden Sicherheitsrichtlinien damit umgehen können.

» **Abb. 41** zeigt die MCS-Ladestelle an einem eTruck. Deutlich erkennbar sind die wichtigsten Komponenten: die Ladebuchse, das Ladesteuergerät und die Schützbox. Zusätzlich sind Hochvolt- und Kühlmittelanschlüsse sichtbar.

5



DIE LOGISTIK VON MORGEN

Die Logistik steht vor der Herausforderung der Transformation in kürzester Zeit. Gesamtwirtschaftliche Trends werden zusammen mit dem Netzausbau zu den zentralen Herausforderungen für die Elektrifizierung. Weitere technische Innovationen und wirtschaftliche Rahmenbedingungen werden diskutiert mit dem Ziel, die Logistik von morgen, wirtschaftlicher und ökologischer zu gestalten.

Um den Fernverkehr ohne Zeitverlust abbilden zu können, werden Ladeleistungen im Megawatt-Bereich benötigt. Für die Realisierung müssen eine Vielzahl an Komponenten des Ladepfades integriert und angepasst werden.

Entwicklung der wichtigsten Stellhebel

In der Diskussion um den Technologiewechsel weisen diverse Indikatoren auf Elektro-Lkw als anzustrebende Lösung hin. Dieses Kapitel verdeutlicht welche prognostizierten Zukunftsszenarien diese These stützen.

Gesamtwirtschaftliche Rahmenbedingungen

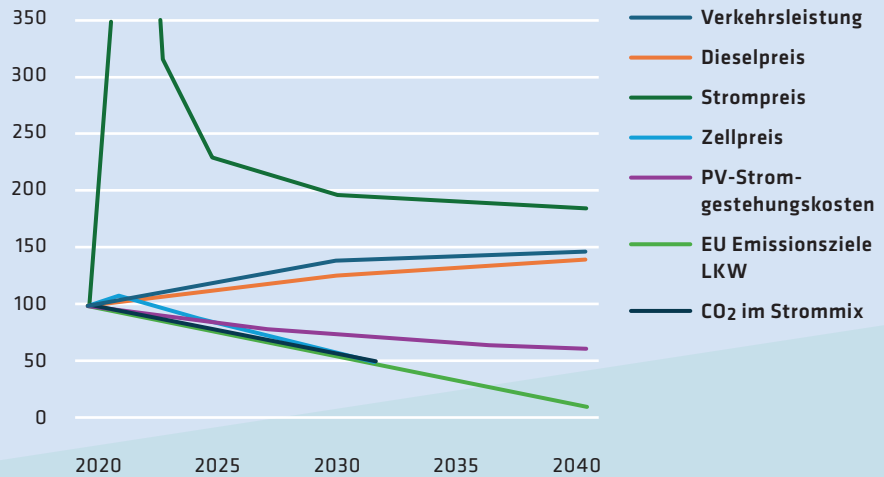


Abb. 42 Entwicklung der Rahmenbedingungen für elektrische Lkw. Nach den Strompreisschwankungen 2022/23 sind sowohl sinkende Strompreise für Netzbezug, als auch Stromgestehungskosten für PV zu erwarten, während Dieselpreise aufgrund des europäischen Emissionshandels steigen.

Das Jahr 2024 markiert einen Wendepunkt im Güterverkehr – Mit dem Startschuss für die Elektrifizierung werden die ersten schweren, elektrischen Lkw im Straßenverkehr sichtbar. Doch wie erfolgreich diese Technologie ist, hängt auch von den gesamtwirtschaftlichen Rahmenbedingungen ab, die heute und in Zukunft vorherrschen.

Einen Überblick über prognostizierte Parameter bietet » **Abb. 42**. Alle Indikatoren wurden auf ihre Werte im Jahr 2020 bezogen, um darauf zu fokussieren, welche Änderungen in Zukunft zu erwarten sind. Zunächst sticht ins Auge, dass die Verkehrsleistung bis 2040 deutlich ansteigen wird: Das bedeutet, dass das Thema Güterverkehr weiter in den gesellschaftlichen Fokus rücken wird und der Hebel des Güterverkehrs auf die nationalen CO₂-Einsparungen noch größer wird.

Im Gegensatz dazu werden die CO₂-Einsparungsziele der EU für neu zugelassene Lkw alle Hersteller dazu zwingen, schon 2030 in neu zugelassenen Fahrzeugen 45 % Emissionsreduktion zu erzielen. Da nur marginale Verbesserung in der Effizienz von Diesel-Lkw zu erwarten sind, kann von einem Anteil von ca. 45 % lokal emissionsfreier Fahrzeuge an den Neuzulassungen ausgegangen werden. Um die wachsende Güterverkehrsleistung zu transportieren, werden mehr Fahrzeuge benötigt. Zusammengenommen wird dies die Erneuerung der Flotte massiv beschleunigen.

Es ist zu erwarten, dass Dieselmotoren in den kommenden Jahren deutlich teurer werden, da der europäische CO₂-Zertifikatehandel Höchstmengen für CO₂-Ausstoß vorgibt. Die Emissionsrechte werden am Markt gehandelt und sukzessive verknappt, und werden daher im Wert steigen. Dem gegenüber sinken die Stromgestehungskosten für Solarenergie, was die Installation von PV-Anlagen auf Logistikzentren noch attraktiver macht. Der Preis für Netzbezug von Strom soll nach den Ausschlägen im Strompreis 2022/23 bis 2030 wieder deutlich abnehmen.

Nicht nur der Betrieb der Elektro-Lkw wird günstiger, sondern auch der Kauf. Neben Skaleneffekten durch anlaufende Großserienproduktion tragen dazu vor allem die sinkenden Kosten für Batteriezellen bei. Diese sind aktuell der größte Kostentreiber für Elektro-Lkw.

Final steigt auch das ökologische Potential der Lkw: Da der Strommix in Deutschland zu immer größeren Anteilen aus erneuerbaren Energien bestehen wird, sinken die CO₂-Emissionen pro Kilowattstunde, die aus dem Stromnetz entnommen wird. In 2020 wurden 411 g CO₂-Äquivalent pro Kilowattstunde Strom emittiert, dieser Betrag wird sich bis 2030 auf 203 g halbieren. Dies wird dazu führen, dass sogar die Bestandsflotte Elektro-Lkw, die ab 2024 zugelassen wird, im Laufe der Jahre ihre Emissionen zunehmend reduzieren kann.

Insgesamt wird deutlich, dass viele Faktoren zukünftiger Szenarien den Technologiewandel zum Elektro-Lkw fördern oder begünstigen, wodurch hohe CO₂-Einsparpotenziale resultieren. Um diese Emissionspotenziale zu heben und die aus regenerativen Energiequellen erzeugte Energie zu den Depots und in die Fahrzeuge zu bekommen, müssen die Energienetze ertüchtigt werden. Mit dieser Herausforderung befasst sich der folgende Absatz.

Erforderlicher Netzausbau

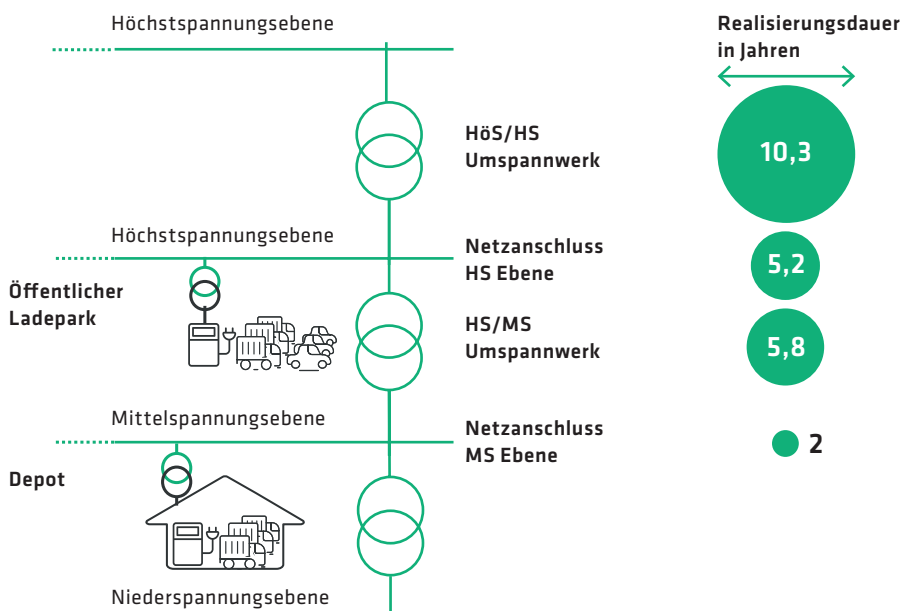
Der Ausbau der Energieversorgungsnetze ist eines der zentralen Infrastrukturprojekte in Deutschland für die kommenden Jahre. Dabei wird die komplexe Integration von Elektrofahrzeugen ins Netz deutlich. Im Pkw-Segment liegt die größte Herausforderung in der Masse der

Fahrzeuge, die perspektivisch elektrisch ins Energiesystem integriert werden sollen. Im Lkw-Segment hingegen sind die punktuell hohen Leistungsanforderungen das zentrale Hindernis.

Beim Netzanschluss ist auf die technischen Anschlussbedingungen der individuellen Netzbetreiber zu achten: Diese basieren auf den technischen Anschlussregeln (TAR) des VDE. Bei einer Einrichtung mit maximaler Wirkleistung bis 135 kW sind die Anforderungen der TAR Niederspannung anzuwenden. Dabei wird zwischen VDE-AR-N 4100, die für Verbraucher gilt, und im Fall bidirektionaler Fahrzeuge VDE-AR-N 4105, die für Erzeuger gilt, unterschieden. Ist die maximale Wirkleistung größer als 135 kW, gilt die TAR Mittelspannung (VDE-AR-N 4110). Die TAR Mittelspannung definiert besondere Anforderungen an den Betrieb von Ladeeinrichtungen für Elektrofahrzeuge. Demnach soll Ladeinfrastruktur in der Lage sein, ihren Lade- und Entladevorgang einem externen Signal anzupassen und Netzdienlichkeit durch Blindleistungsbereitstellung, Wirkleistungsbegrenzung und Wirkleistungsabgabe zu gewährleisten.

Die Netzbetreiber stehen dabei vor vielfältigen Herausforderungen und benötigen erhebliche Ressourcen, sowohl personell als auch materiell, um das Projekt des Netzausbaus zu realisieren. Aufgrund des Ressourcenmangels und der grundsätzlichen Komplexität bei der Umsetzung ergeben sich lange Realisierungsdauern für den Netzanschluss in den relevanten Spannungsebenen für die Elektrifizierung von Nutzfahrzeugen » **Abb. 43**. Es wird deutlich, dass z. B. bereits die elektrische Anbindung eines Depots in der Mittelspannungsebene mit einer im Mittel zweijährigen Realisierungsdauer einhergeht. Hinzu kommt, dass auch das Mittelspannungsnetz nur bedingte Anschlusskapazitäten aufweist, wodurch bei einer Netzerweiterung in der Mittelspannung mit noch längeren Realisierungsdauern zu rechnen ist.

Abb. 43 Durchschnittliche Realisierungsdauern für einen Netzanschluss auf verschiedenen Spannungsebenen. Depots können in der Regel in der Mittelspannungsebene angeschlossen werden, während Schnellladeparks für Lkw einen Anschluss an die Hochspannungsebene benötigen



Die Gründe für die langen Realisierungsdauern sind vielfältig. Netzbetreiber müssen Netzanschlussgesuche diskriminierungsfrei behandeln, d.h. im Regelfall sequenziell. Mit der stetig steigenden Anzahl an Netzanschlussgesuchen für jede Art von Erzeuger und Verbraucher resultiert zeitlicher Verzug. Sobald das Netzanschlussgesuch bearbeitet wird, muss durch eine Einzelfallprüfung sichergestellt werden, dass sowohl das bestehende Verteilnetz die neuen Komponenten versorgen kann, als auch die gesamtwirtschaftlich günstigste Lösung gefunden wird. Besonders in höheren Spannungsebenen ist dies ein komplexes Unterfangen, da die Kosten je nach Anschlussvariante teilweise signifikant divergieren und die reale Umsetzung von z. B. Transformatorstationen auf entsprechenden verfügbaren Flächen möglich sein muss. Die Verteilung der Kosten auf Netzbetreiber und Netzanschlussnehmer ist individuell je Netzanschlussgesuch zu bewerten. Wenn die gesamtwirtschaftlich günstigste und realisierbare Lösung für das Netzanschlussgesuch gefunden ist, beginnt die reale Projektierung und Umsetzung, wobei entsprechend notwendige Betriebsmittel (Leitungen, Schaltanlagen, Transformatoren) beschafft und verbaut werden. Auch hier können aufgrund materieller und personeller Nichtverfügbarkeit von Ressourcen weitere Verzögerungen auftreten. Exemplarisch hierfür sind hohe Lieferzeiten bei Transformatoren, die aktuell etwa bei einem Jahr liegen. Insgesamt stellt die Herstellung des Netzanschlusses ein komplexes Unterfangen dar, welches mit zahlreichen finanziellen und zeitlichen Unsicherheiten einhergeht.

Der Netzanschluss für etwaige Ladeinfrastruktur kann einen signifikanten Anteil der bei Investition resultierenden Kapitalkosten verursachen. Die Reduktion dieser Kosten ist nahezu nicht möglich, woraus die Bedeutung einer umfassenden Planung der tatsächlich notwendigen Infrastruktur deutlich wird. Sämtliche Optionen zur Reduktion der notwendigen Leistung des Netzanschlusses, wie z. B. durch Lastmanagement oder einen Pufferspeicher, sollten geprüft werden, da dies signifikante Stellhebel zur Umsetzung der gesamtwirtschaftlich günstigsten Lösung sein können.

Insgesamt wird deutlich, dass die Netzintegration die wichtigste, aber zeitgleich größte Herausforderung im Prozess der Nutzfahrzeug-Elektrifizierung darstellt, welche von zahlreichen Faktoren beeinflusst wird und mit hohen Kosten verbunden ist. Die gute Nachricht: Diese Herausforderungen werden, z. B. in Projekten wie NEFTON, adressiert und innovative Lösungen zur Realisierung, Vereinfachung und Kostenminderung entwickelt. Ein Ausblick hinsichtlich zukünftiger Handlungsfelder wird im nächsten Kapitel erörtert.

ZUKÜNFTIGE FORSCHUNGSFELDER








Im Folgenden werden zukünftige Handlungsfelder gezeigt, die im Rahmen von NEFTON-Folgeprojekten untersucht und umgesetzt werden. Dazu gehören die Erprobung des MCS-Standards mit bis zu 3000 A sowie die Umsetzung von geteiltem Depotladen und eines Reservierungssystems für Lkw Ladeinfrastruktur.

Während der vielfältigen Untersuchungen haben sich weitergehende technische, regulatorische und sozioökonomische Fragestellungen für eine erfolgreiche Elektrifizierung des Nutzfahrzeugsektors ergeben, die im Rahmen von NEFTON nicht abschließend beantwortet werden konnten. Diese Fragestellungen werden in neuen Forschungsprojekten – NEFTON 3000 und SPIRIT-E – aufgegriffen und systematisch beantwortet.

MCS – Laden mit 3000 A

Eine der Fragestellungen, die bisher nicht abschließend beantwortet werden konnte, befasst sich im Detail mit der technischen Umsetzung des vollen Potentials des Megawatt Charging Systems.

Abb. 44 Übersicht über die verschiedenen denkbaren Leistungsniveaus von elektrischen Nutzfahrzeugen und Bussen in Abhängigkeit der jeweiligen Batteriekapazität und notwendigen Reichweite. Je kürzer die möglichen Ladezeiten sind, umso höher müssen üblicherweise auch die durchschnittlichen Ladeleistungen sein, um den entsprechenden Anwendungsfall elektrifizieren zu können.

	Stadtbus	Fernverkehr-LKW	Reisebus
			
 Batteriekapazität	400–700 kWh	459–700 kWh	bis zu 1000 kWh
 Ladeleistung	bis zu 375 kWh	750–1500	1000–3750 kW
 Ladedauer	bis zu 5 h	45 min	15 min (Teilladung)
 Reichweite	mehr als 300 km	mehr als 400 km	mehr als 400 km

Für viele der im Projekt beleuchteten Anwendungsfälle in » **Abb. 44** sind Ladeleistungen von einigen Hundert Kilowatt bis ein Megawatt ausreichend. Beispielsweise für Stadtbusse mit einer Batteriekapazität von 400 bis 700 kWh und der Möglichkeit zur Depotladung über Nacht sind Ladeleistungen bis 375 Kilowatt und somit eine Verwendung des CCS ausreichend. Für einen elektrischen Fernverkehrs-Lkw mit einer Reichweite von mehr als 400 Kilometern werden ebenfalls 400 bis 700 kWh an installierter Batteriekapazität erforderlich. Die Anforderungen innerhalb der vorgegebenen Ruhepause der fahrenden Person wieder eine Reichweite von mehr als 400 Kilometern bis zur nächsten Ruhepause zu erhalten, führt auf eine notwendige Ladeleistung von ungefähr einem Megawatt. Bei anspruchsvolleren Anwendungen wie Reisebussen oder einem Fahrbetrieb mit mehr als einer fahrenden Person, fallen die Ruhepausen für ein Aufladen der Batterien nahezu weg, sodass deutlich höhere Ladeleistungen für einen zeitneutralen Betrieb erforderlich werden. Für unter anderem diese Anwendungsfälle sind Ladeleistungen innerhalb des Standards bis knapp vier Megawatt – 1250 V Systemspannung und 3000 A maximale Stromstärke – vorgesehen.

Herausforderungen für eine weitere Steigerung der Ladeleistung

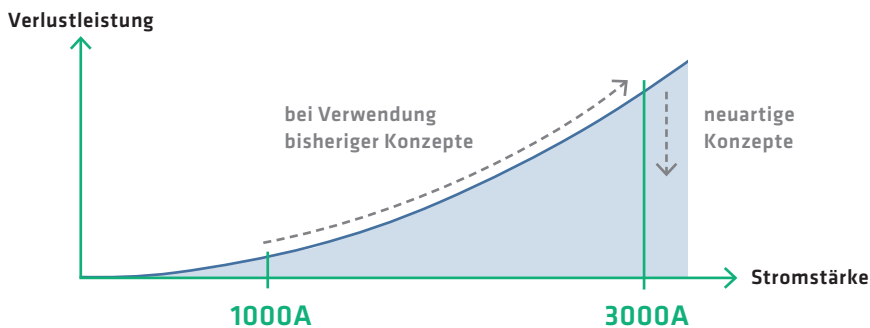


Abb. 45 Schematische Darstellung der Herausforderungen für eine weitere Steigerung der Ladeleistung. Nur durch eine Anpassung der bisherigen Konzepte und Entwicklung neuartiger Konzepte können die zusätzlichen Verluste bei hohen Stromstärken minimiert werden.

Während heutige Fahrzeug- und Ladesäulenkonzepte eine maximale Stromstärke von bis zu 1000 A vorsehen, werden für 3000 A an vielen Stellen entlang des Ladepfads neue Ansätze erforderlich. Würden die bisherigen Konzepte ohne Anpassungen übernommen, wäre durch die Verdreifachung der Stromstärke, wie in » **Abb. 45** dargestellt, eine Verneunfachung der Verlustleistung zu erwarten. Dieser Umstand führt nicht nur zu einer Reduktion der Gesamteffizienz und damit auch zu gesteigerten Kosten, sondern ebenfalls zu Herausforderungen bei der Sicherstellung der maximal zulässigen Bauteiltemperaturen. Durch neuartige Konzepte – wie beispielsweise flüssigkeitsgekühlte Kabel im Fahrzeug – können die Zusatzverluste reduziert und eine optimale Bauteilkühlung sichergestellt werden. Darüber hinaus müssen neue Absicherungs- und Trennkonzepte erarbeitet werden, um in allen Situationen die Sicherheit des Gesamtfahrzeugs sicherstellen zu können.

Im Erweiterungsprojekt NEFTON 3000 werden daher Konzepte für den gesamten Ladepfad von der Ladesäule bis zur Batterie entwickelt und erprobt, um das volle Potential des MCS bis zu einer Stromstärke von 3000 A ausnutzen zu können.

Neben der technischen Umsetzung des Megawatt Charging Systems bis 3000 A im Fahrzeug für schnelles Zwischenladen, werden zukünftig weiterführende Innovationen an den Logistikdepots untersucht. Diese beinhalten Systeme zum geteilten Laden in Depots sowie zur Reservierung von Ladeinfrastruktur.

Laden an fremden Depots

Die Gewährleistung einer zuverlässigen Verfügbarkeit von Ladepunkten mit hohen Ladeleistungen nimmt eine zentrale Rolle ein, um eine planbare Maximierung der umsatzgenerierenden Fahrzeit für Speditionen zu ermöglichen. Der schnelle Ausbau sowohl öffentlicher als auch privater Ladeinfrastruktur ist daher unerlässlich. Insbesondere der Ausbau privater Infrastruktursysteme an Depotstandorten sowie die allgemeine Flottenelektrifizierung erfordern jedoch einen hohen Kapitalaufwand, was eine erhebliche wirtschaftliche Herausforderung für Speditionen darstellt. Diese Investitionen in Kombination mit einer anfänglich schleppenden Elektrifizierung der Flotte, resultiert zudem in einer geringen Auslastung der privaten Ladeinfrastruktur und damit in einer langen Amortisationszeit.

Einen vielversprechenden Lösungsansatz zur Abschwächung der genannten Problematik stellt das geteilte Depotladen dar. Die Lücke zwischen den begrenzten Zugänglichkeiten, den wirtschaftlich teilweise unvorteilhaften privaten Ladestationen und dem schleppenden Ausbau öffentlicher Infrastruktur soll hiermit geschlossen werden. Dies wird erreicht, indem Speditionen ihre private Ladeinfrastruktur durch geeignete Zugangsmöglichkeiten, Reservierungs- und Bezahlssysteme auch für Fahrzeuge anderer Speditionen öffnen. Eine solche Erhöhung der Auslastung kann die Amortisationszeit deutlich verkürzen und die Investition gezielt attraktiver machen. Außerdem stellen die Drittfahrzeuge zusätzliche Assets im Aggregationspools am Speditionsstandort dar, der für die energiewirtschaftliche Vermarktung der Elektro-Lkw genutzt wird. Die erfolgreiche Umsetzung des Ansatzes zum geteilten Depotladen, bringt jedoch auch technische, sozioökonomische und regulatorische Herausforderungen mit sich, die u. a. im neuen Forschungsprojekt SPIRIT-E adressiert werden.

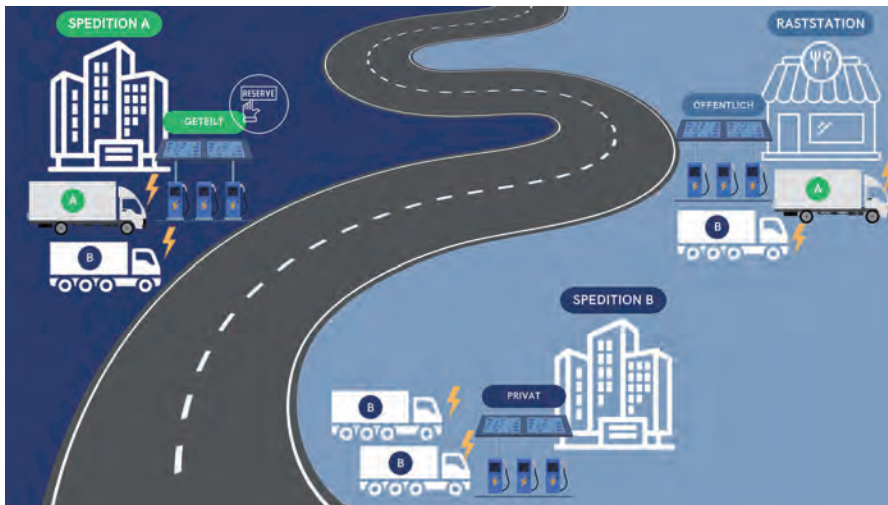


Abb. 46 Ökosystem geteilter Ladeinfrastruktur. Das Laden fremder Fahrzeuge an privater Ladeinfrastruktur wird ermöglicht, um die Investitionen zu refinanzieren. Reservierungssysteme ermöglichen ungestörte Logistikabläufe für beide Parteien.

Technische Herausforderungen umfassen die Entwicklung eines geeigneten Kapazitätsmanagements und die anforderungsgerechte Dimensionierung der Ladeinfrastruktur zur Vermeidung von Engpässen. Hierbei kann ein Reservierungssystem für Abhilfe schaffen. Zudem ist eine Sicherstellung der Interoperabilität entscheidend, um die Zugänglichkeit für und die Kommunikation mit Drittfahrzeugen zu ermöglichen, und somit die potenzielle Nutzerbasis zu maximieren.

Sozioökonomische Herausforderungen beinhalten die Gestaltung rentabler Preismodelle, die sowohl für die Standortbetreiber als auch für Fremdkunden attraktiv sind. Gleichzeitig muss die Nutzerakzeptanz durch Sicherstellung der Benutzerfreundlichkeit und Attraktivität der Standortwahl adressiert werden. Transparenz bezüglich Verfügbarkeit, Lage und Nutzungskonditionen über ein geeignetes User-Interface ist ebenfalls entscheidend, um eine breite Akzeptanz und Nutzung der geteilten Infrastruktur zu fördern.

Regulatorische Herausforderungen, wie die Zugangsregelung zur Ladeinfrastruktur auf dem Privatgelände der Spedition und die Definition von Nutzungsvereinbarungen zwischen den beteiligten Parteien, müssen ebenfalls adressiert werden. Beim geteilten Depotladen können zudem Daten über die Ladevorgänge, Fahrzeugnutzung und personenbezogene Daten erhoben werden. Der Umgang mit diesen Daten muss den geltenden Datenschutzgesetzen entsprechend gestaltet werden.

Reservierbare Ladeinfrastruktur

Um die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Ladepunkte mit hohen Ladeleistungen zu optimieren, stellen Reservierungssysteme eine innovative und erfolversprechende Lösung dar. Aufgrund der Zeitkritikalität und niedriger Margen im Straßengüterverkehr, besteht ein hoher Bedarf an Planbarkeit und Verlässlichkeit. In Kombination mit einer unzureichenden Ladeinfrastruktur und begrenzenden Netzanschlussleistung ist die Ladeplanung der einzelnen Ladepunkte daher von hoher Relevanz. Die Unkenntnis über die Verfügbarkeit eines angesteuerten Ladepunktes kann im schlechtesten Fall zu langen Wartezeiten führen, falls der Ladepunkt bereits durch andere Fahrzeuge belegt ist. Der Transportauftrag kann dadurch nicht rechtzeitig erfüllt werden, Mehrkosten entstehen und die Geschäftsbeziehung zum Kunden wird belastet. Durch eine vorzeitige Reservierung und die entsprechende Berücksichtigung bereits in der Disposition werden zusätzliche Standzeiten vermieden.

Für Betreiber von geteilter Ladeinfrastruktur eröffnen sich weitere Notwendigkeiten für ein Reservierungssystem. Werden die privaten Ladepunkte Fremdfahrzeugen zur Verfügung gestellt, muss weiterhin sichergestellt werden, dass der operative Logistikbetrieb am Standort ungehindert weiterläuft und keine Verzögerungen durch Wartezeiten entstehen. Ein Reservierungssystem ermöglicht dies, indem die elektrischen Ladeprozesse in die alltäglichen Be- und Entladeprozesse von Waren am Lager integriert werden. Fremdfahrzeuge, die das Logistikdepot ohne Warenabfertigung lediglich zum Batterieladen anfahren, sind durch die Reservierbarkeit ebenfalls in den Tagesablauf des Standorts eingeplant. Weiterhin resultiert aus der Ladeplanung eine stärkere Ausnutzung der geteilten Ladeinfrastruktur, was eine schnellere Amortisation der Investitionen für Elektrofahrzeuge und Infrastruktur ermöglicht.

Durch die Umstellung auf erneuerbare Energien und die damit verbundene dezentrale Energieerzeugung kommt ein weiterer Aspekt, insbesondere in Bezug auf die Ladeleistung, hinzu. Speditionen, die über Installationen erneuerbarer Energieerzeugung wie PV-Anlagen am Standort verfügen, oder am Energiemarkt durch Netzdienlichkeiten teilnehmen, können die Flexibilität der großen Batteriespeicher von Lastkraftwagen nutzen. Durch eine intelligente Ladeplanung und die entsprechende Reservierung von Ladepunkten kann die notwendige Planbarkeit für die Erhöhung des PV-Eigenverbrauchs und der Spitzenlastkappung am Standort optimiert werden. Die Integration von bidirektionalem Laden erhöht das Optimierungspotential durch ein Reservierungssystem, indem Zeitslots und Lade- sowie Entladeleistungen verlässlich prognostiziert werden. Diese und weitere sekundäre V2X-Anwendungen ermöglichen die Kopplung von Energie- und Trans-

portsektor und führen zu energiewirtschaftlichen Vorteilen für den Standortbetreiber. So kann die Flexibilität optimal genutzt werden, was zu einer effizienteren Planung und Nutzung der erneuerbaren Energien führt.

Technische Herausforderungen in der Umsetzung eines Reservierungssystems konzentrieren sich vor allem auf die Entwicklung von Autorisierungs- und Abrechnungsprozessen sowie die allgemeine Integration in bestehende Systeme. Eine einfache Bedienbarkeit und ein nahtloser Datenaustausch über definierte Schnittstellen mit anderen Systemen sind entscheidend. Diese Herausforderungen werden im Rahmen des Forschungsprojekts SPIRIT-E (www.spirit-e.de) wissenschaftlich untersucht und in realen Testumgebungen erprobt.

Sozioökonomische Herausforderungen entstehen durch die potenziellen Mehrkosten und zusätzlichen Erlöse, die durch die Einführung eines Reservierungssystems verursacht werden. Hier stellt sich die Frage nach der „willingness to pay“ – die Bereitschaft, für den Service zu zahlen. Die finale Preisgestaltung des Reservierungssystems orientiert sich an dieser Frage und bestimmt, inwieweit das System funktionsfähig ist. Zudem ist die Akzeptanz der Nutzer entscheidend, welche durch eine intuitive Bedienung und die Schaffung von Mehrwert, etwa durch die Vereinfachung des Logistikprozesses und Lade-managements, beeinflusst wird.

Technische Herausforderungen konzentrieren sich vor allem auf die Umsetzung von Autorisierungs- und Abrechnungsprozessen sowie auf das Backend des Reservierungssystems. Eine einfache Bedienbarkeit und nahtlose Kommunikation über definierte Schnittstellen mit anderen Systemen sind entscheidend. Diese Herausforderungen werden im Rahmen des Forschungsprojekts SPIRIT-E wissenschaftlich untersucht und in realen Testumgebungen praktisch erprobt.

Regulatorische Herausforderungen sind entlang des gesamten Ladeprozesses zu bewältigen. Neben der erwähnten Zugangsregelung für Fremdfahrzeuge auf Betriebsgelände, müssen transparente und universelle Abrechnungs- und Autorisierungsprozesse entwickelt werden, die gesetzliche Vorgaben berücksichtigen. Die AFIR-Verordnung der EU fordert primär für öffentliche Ladestationen eine angemessene, vergleichbare, nichtdiskriminierende und transparente Preisgestaltung. Die Auswirkungen auf Geschäftsmodelle im Bereich privater Ladeinfrastruktur werden jedoch nicht explizit ausgeschlossen und die uneingeschränkte Einsatzfähigkeit von Ladepunktreservierungen bleibt zu klären.

6

ÜBER DAS KONSORTIUM

Durch die Zusammenarbeit von Wissenschaft und Industrie über die Themenfelder Energiewirtschaft, Nutzfahrzeug und Ladeinfrastruktur kann die gesamte Wirkkette des Megawatt-Ladens abgebildet werden. Die einzelnen Unternehmen und Institutionen werden zusammen mit den Beteiligten im Folgenden vorgestellt.



Die Institute und Abteilungen der Konsortialpartner werden im Folgenden mit dem handelnden Team kurz vorgestellt.



Die **Technische Universität München** trägt die Konsortialführung von NEFTON. Der Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik (FTM) forscht an der Schnittstelle dreier zentraler Zukunftsthemen: Elektromobilität, Smarte Mobilität und Autonomes Fahren. Zusätzlich zum elektrisch angetriebenen Fahrzeug, dessen Flottenintegration und Mobilitätsdaten werden Rahmenbedingungen, notwendige Ladeinfrastruktur und die Wirtschaftlichkeit von Fahrzeugflotten untersucht. Der Lehrstuhl für Nachhaltige Mobile Antriebssysteme (NMA) untersucht die gesamte Bandbreite der zukünftigen Fahrzeugantriebe – von elektrischen Antriebssystemen über Brennstoffzellen bis hin zu Verbrennungskraftmaschinen. Der NMA verfolgt dabei eine ganzheitliche Philosophie und verknüpft Simulation, prototypische Umsetzung und Versuch zur Generierung und Validierung von Wissen.



Der Fokus von **AVL Software and Functions GmbH** liegt auf technologisch führenden Software- und Systemlösungen für eine intelligente, ökologisch verträgliche Mobilität sowie Systemintegration und Elektronikentwicklung. Im Bereich der Elektromobilität bietet AVL ein breites Leistungsspektrum von der Entwicklung einzelner Komponenten wie DC-DC-Wandler, Antriebsinverter und Onboard-Charger bis zur Entwicklung ganzheitlicher Systeme wie vollintegrierte E-Achsen. Ladetechnologie für Elektrofahrzeuge implementiert AVL sowohl auf Infrastrukturseite als auch im Fahrzeug. Mit der Entwicklung der Ladekommunikation und -steuerung für MCS-Laden und bidirektionales Laden im NEFTON Projekt stellt sich AVL für zukünftige Ladeapplikationen auf.

Team:
Maximilian Zähringer,
Jakob Schneider,
Georg Balke,
Teresa Junior,
Prof. Dr.-Ing.
Markus Lienkamp (FTM),
Steffen Büttner,
Maximilian Schuckert,
Michael Stark,
Prof. Malte Jaensch (NMA)

Team:
Anne-Marie Schuppan,
Benjamin Langer,
Daniel Mayer,
Levin Rajan Abraham,
Pedro Fernandez,
Michael Schächinger



Die **Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE)** ist eine unabhängige Institution, die sich auf wissenschaftlicher Grundlage mit energietechnischen und energiewirtschaftlichen Fragen befasst. Die FfE steht für impactorientierte Forschung und Beratung mit einem besonderen Fokus auf die Schnittstelle und den Transfer zwischen Wissenschaft und Praxis. Die Tätigkeitsbereiche der FfE umfasst ganzheitlich die Themenfelder der Energiewende: Energiesystem und Märkte, Mobilität, Netze, Wärme, Ressourcen und Klimaschutz, Wasserstoff und SynFuels, Industrie, Digitalisierung und Klimaneutralität. Im NEFTON Projekt lag der Fokus primär auf der energiewirtschaftlichen Einordnung der Nutzfahrzeugelektrifizierung.

Team:
Florian Biedenbach,
Andreas Weiß,
Yannic Blume,
Dr. Simon Köppl,
Dr. Christoph Pellingner



MAN Truck & Bus ist einer der führenden europäischen Nutzfahrzeughersteller und Anbieter von Transportlösungen mit jährlich rund 14,8 Milliarden Euro Umsatz (2023). Das Produktportfolio umfasst Transporter, Lkw, Busse, Diesel- und Gasmotoren sowie Dienstleistungen rund um Personenbeförderung und Gütertransport. MAN Truck & Bus ist ein Unternehmen der TRATON SE und beschäftigt weltweit ca. 35.000 Mitarbeiter.

Team:
Dr.-Ing. Christian Peteranderl,
Dr.-Ing. Fabian Schweizer,
Julius Engasser,
Marcel Hessel,
Bernd Hoffmann,
Thomas Ille,
uvm.

MAN Truck & Bus hat den Verkauf des ersten schweren Elektro-Lkw seiner Unternehmensgeschichte gestartet und damit einen weiteren Meilenstein zur Dekarbonisierung des Güterverkehrs gesetzt. Erste Exemplare werden schon 2024 zu ausgewählten Kunden rollen, bevor ab 2025 mit hochlaufenden Bestellungen die Fertigung im MAN Werk München in größeren Stückzahlen anläuft.



Team:
Martin Ronneburger,
Dr. Jan Schmidt,
Udo Heller

Die **Prettl Electronics Automotive** bietet Entwicklungs- und Produktionsdienstleistungen (EMS und Gerätefertigung) für die Ladetechnik für E-Fahrzeuge, E-Bikes und E-Motorräder aber u.a. auch die Fertigung kompletter Antriebsumrichter für die Elektrifizierung von Bussen an. Mit den Lösungen rund um die Leistungselektronik, auch unter Nutzung der bewährten zertifizierten Solarwechselrichter, richtet das Unternehmen seine Aktivitäten auch auf die Entwicklung und Industrialisierung der nächsten Generation der Ladeinfrastruktur mit den Kunden und Partnern aus.



Team:
Prof. Dr.-Ing. Otto Kreutzer,
Christian Mader,
Martin Kröninger,
Boris Komljen,
Michael Glashauer

Die **Technische Hochschule Deggendorf (THD)** ist eine staatliche Fachhochschule für Technik, Gesundheit und Wirtschaft in Deggendorf, Niederbayern. Die THD ist sehr forschungslastig ausgerichtet und betreibt insgesamt 11 sogenannte Technologicampus, die in unterschiedlichen wissenschaftlichen Disziplinen in enger Kooperation mit der Wirtschaft forschen. Ein wichtiger Fokus der Technischen Hochschule (TH) Deggendorf liegt seit Jahren auf der Elektromobilität. Dies zeigt sich nicht nur im eigens aufgebauten Studiengang Elektromobilität, sondern auch an durchgeführten Förderprojekten.

Die Veröffentlichungen die im Rahmen des Projekts NEFTON entstanden sind werden im Folgenden aufgeführt. Verwendete Abkürzungen werden im Glossar gesammelt aufgelistet.

Veröffentlichungen im Rahmen von NEFTON

2022

- **Zähringer, Maximilian; Wolff, Sebastian; Schneider, Jakob; Balke, Georg; Lienkamp, Markus:** Time vs. Capacity–The Potential of Optimal Charging Stop Strategies for Battery Electric Trucks. *Energies* 15 (19), 2022
- **Schneider, Jakob; Teichert, Olaf; Zähringer, Maximilian; Lienkamp, Markus:** How low can we go? // Minimizing battery size of battery-electric long-haul trucks. Poster, 2022
- **Teichert, Olaf; Schneider, Jakob; Lienkamp, Markus:** Strategy beats power: Cooling system design for battery-electric long-haul trucks. 35th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS35), 2022
- **Langer, Benjamin:** Charging of BEV trucks with more than 1 MW – How can the interaction of commercial vehicle, infrastructure and energy system succeed? VDI ELIV, 11/2022

2023

- **Teichert, Olaf; Link, Steffen; Schneider, Jakob; Wolff, Sebastian; Lienkamp, Markus:** Techno-economic cell selection for battery-electric long-haul trucks. *eTransportation* 16, 2023
- **Balke, Georg; Adenaw, Lennart:** Heavy commercial vehicles' mobility: Dataset of trucks' anonymized recorded driving and operation (DT-CARGO). *Data in Brief* 48, 2023
- **Schneider, Jakob; Teichert, Olaf; Zähringer, Maximilian; Balke, Georg; Lienkamp, Markus:** The novel Megawatt Charging System standard: Impact on battery size and cell requirements for battery-electric long-haul trucks. *eTransportation* 17, 2023
- **Schneider, Jakob; Teichert, Olaf; Zähringer, Maximilian; Götz, Korbinian; Lienkamp, Markus:** Spoilt for Choice: User-Centric Choice of Battery Size and Chemistry for Battery-Electric Long-Haul Trucks. *Energies* 17 (1), 2023

- **Zähringer, Maximilian & Peteranderl, Christian & Zohm, Frederik:** Megawatt Charging for Battery-electric Trucks in Long-haul Transport. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, 2023
- **Peteranderl, Christian; Zähringer Maximilian; Balke, Georg und Schneider, Jakob:** Megawatt charging as an enabler for battery-electric long-haul trucks – is that enough?. VDI Berichte, Commercial Vehicles 2023
- **Langer, Benjamin:** Schnellladen für LKWs und PKWs – Status, Herausforderungen, Lösungen für den breiten Einsatz von BEV. Antriebe und Energiesysteme von morgen 2023, ATZ live Fachkonferenzen zu Fahrzeug- und Antriebsentwicklung
- **Blume, Yannic; Hecker Maximilian; Müller, Mathias; Weiß, Andreas:** Einfluss des Hochlaufs batterieelektrischer Nutzfahrzeuge auf die Verteilnetzplanung – FfE Discussion Paper 2023-01. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2023.
- **A. Samiee, C. Mader and O. Kreutzer,** „Development of a High-Power 25 kW PFC Converter with High-Efficiency of 99,6%,“ 2023 IEEE 8th Southern Power Electronics Conference and 17th Brazilian Power Electronics Conference (SPEC/COBEP)
- **Sebastian Wolff, Jakob Schneider, Georg Balke, Maximilian Zähringer, Steffen Büttner, Maximilian Schuckert, Malte Jaensch:** Applications – Transportation | Battery, hybrid electric vehicles–Trucks and buses: And I would drive 500 miles–With batteries?, Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering, Elsevier, ISBN 9780124095472, 2023

2024

- **Langer, Benjamin; Engelbrecht, Martin; Mühlgrabner, David:** Status, Herausforderungen und Lösungen für die breite Nutzung des Schnellladens. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift (1), 2024
- **Balke, Georg; Zähringer, Maximilian; Schneider, Jakob; Lienkamp, Markus:** 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), 2024
- **Zähringer, Maximilian; Junior, Teresa; Adenaw, Lennart:** Watt matters most – Survey data results of private passenger vehicle owners and commercial vehicle drivers. Data in Brief 52, 2024
- **Zähringer, Maximilian; Teichert, Olaf; Balke, Georg; Schneider, Jakob; Lienkamp, Markus:** Optimizing the Journey: Dynamic Charging Strategies for Battery Electric Trucks in Long-Haul Transport, Energies 17 (4), 2024.
- **Biedenbach, Florian; Strunz, Kai:** Multi-use Optimization of a Depot for Battery Electric Heavy-Duty Trucks, World Electric Vehicle Journal 15 (3), 2024.
- **Peteranderl, Christian; Stauner, Vinzenz; Zähringer, Maximilian:** Megawatt charging as key for sustainable long haul transport, HoLa Symposium Berlin, 2024

GLOSSAR

AC	Wechselstrom
AFIR	Alternative Fuels Infrastructure Regulation
BET	Battery Electric Truck
BMS	Batteriemanagementsystem
CCS	Combined Charging Standard
CO ₂	Kohlendioxid
DAB	Dual Active Bridge
DC	Gleichstrom
EMS	Energiemanagementsystem
EU	Europäische Union
FCET	Fuel Cell Electric Truck
GPS	Global Positioning System
HF	Hochfrequenz
HV	Hochvolt
ICET	Internal Combustion Engine Truck
LFP	Lithium Eisen Phosphat
MCCU	Master-Ladesteuergerät
MCS	Megawatt Charging System
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistors
NMC	Nickel-Mangan-Cobalt
NHV	Niederspannungshauptverteilung
OCPP	Open Charge Point Protocol
PFC	Power Factor Correction
PLC	Power-Line Communication
PV	Photovoltaik
RFID	Radio-Frequency Identification
SCCU	Slave-Ladesteuergerät
SiC	Siliziumkarbid
TAR	Technische Anschlussregeln
TCO	Total Cost of Ownership
TEN-T	Transeuropäische Netze – Transport
TLS	Transport Layer Security
V2B	Vehicle-to-Business
V2G	Vehicle-to-Grid
V2H	Vehicle-to-Home
V2V	Vehicle-to-Vehicle

Anmerkung der Redaktion:
Zur besseren Lesbarkeit
wird in diesem Buch das
generische Maskulinum
verwendet. Die in dieser
Arbeit verwendeten Perso-
nenbezeichnungen beziehen
sich – sofern nicht anders
kenntlich gemacht – auf
alle Geschlechter

Herausgeber
Technische Universität München
Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik
Boltzmannstr. 15
85748 Garching

Redaktion
Georg Balke
Jakob Schneider
Maximilian Zähringer
Teresa Junior
Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp

Autoren
Andreas Weiß
Anne-Marie Schuppan
Benjamin Langer
Dr.-Ing. Christian Peteranderl
Dr.-Ing Fabian Schweizer
Florian Biedenbach
Georg Balke
Jakob Schneider
Dr. Jan Schmidt
Martin Ronneburger
Maximilian Schuckert
Maximilian Zähringer
Michael Glashauser
Prof. Dr.-Ing. Otto Kreuzer
Steffen Büttner
Teresa Junior

Gestaltung
Büro für Gestaltung Frank Abele,
München

Druck
Druckerei omb2,
München

Mai 2024

Inmitten einer zentralen Herausforderung der modernen Zeit – der Transformation hin zu einer nachhaltigen Mobilität – bietet dieses Buch einen entscheidenden Leitfaden für die Elektrifizierung des straßengebundenen Transportwesens. Mit über 70 % der nationalen Transportleistung übernimmt der Straßenverkehr eine Schlüsselrolle in der europäischen Wirtschaft, steht jedoch zugleich vor der Aufgabe, die ambitionierten Emissionsziele des Pariser Klimaabkommens zu erfüllen. Das Forschungsprojekt NEFTON hat es sich zur Aufgabe gemacht, durch Innovation, Technologie und Wissenschaft wertvolle Einsichten und Empfehlungen zu erarbeiten, um die nachhaltige wirtschaftliche Entwicklung im Transportsektor zu erreichen

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



DLR Projektträger

