

ELEKTRIFIZIERUNG DES GÜTERVERKEHRS

ADDENDUM: LADEN MIT BIS ZU 3000 A



**TECHNOLOGIEN UND
HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN**

NEFTON 

7

8

9

10

11

INHALT

	LADEN MIT BIS ZU 3000 A	4
7.1	Einleitung und Motivation	6
7.2	Anforderungen und Systemdesign	9
	ENTWICKLUNG UND VALIDIERUNG EINES 3000 A-LADEPFADS	14
8.1	Aufbau des Ladepfad-Prüfstands	16
8.2	Ergebnisse der Ladepfad-Tests	18
	ELEKTRISCHE SICHERHEIT IN ZUKÜNFTIGEN HV-BORDNETZEN	22
	VON DER FORSCHUNG ZUR ANWENDUNG	26
10.1	Die entscheidende Rolle der Infrastruktur	28
10.2	Perspektiven für zukünftige Entwicklungen	31
	ÜBER DAS KONSORTIUM	32
11.1	Team NEFTON 3000	34
11.2	Veröffentlichungen und Glossar	36

7

LADEN MIT BIS ZU 3000 A

Das Laden mit Strömen bis zu 3000 A eröffnet neue Anwendungsfelder, insbesondere in Bereichen mit hohem Energiebedarf und begrenzten Standzeiten. Daraus ergeben sich spezifische technische und infrastrukturelle Anforderungen, die das Systemdesign maßgeblich beeinflussen. Im Fokus stehen insbesondere die Identifikation möglicher Anwendungsfälle sowie die Ableitung spezifischer Anforderungen an die Komponenten innerhalb des Ladepfads, um einen zuverlässigen und leistungsfähigen Ladevorgang zu ermöglichen.



EINLEITUNG UND MOTIVATION

Die Transformation des Straßengüterverkehrs hat begonnen. Immer mehr Elektro-Lkw finden ihren Weg auf Europas Straßen – und zeigen eindrucksvoll, dass emissionsfreier Transport möglich ist. Doch mit dem Markthochlauf steigen auch die Anforderungen: Fahrzeuge müssen nicht nur sauber, sondern vor allem effizient, zuverlässig und wirtschaftlich sein. Nicht zuletzt ist dafür die Ladeleistung entscheidend. Das folgende Kapitel beleuchtet Motivationsstreiber für zukünftig nochmal deutlich gesteigerte Ladeleistungen und deren Mehrwert für den Kunden auf.

Neue Freiheitsgrade im Praxisalltag durch Steigerung der Ladeleistung

Die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs stellt einen zentralen Hebel zur Erreichung der europäischen Klimaziele dar. Gleichzeitig bleibt die zentrale Herausforderung bestehen, die heute etablierten Logistikprozesse ohne Einschränkungen hinsichtlich Zuverlässigkeit, Geschwindigkeit und Wirtschaftlichkeit aufrechtzuerhalten.

Vor diesem Hintergrund spielt die Ladeleistung eine entscheidende Rolle: Sie bestimmt maßgeblich, ob Elektro-Lkw nahtlos in bestehende Transportprozesse integriert werden können. Mit steigenden Ladeleistungen verändert sich dabei ein wesentlicher Aspekt:

Laden nähert sich zunehmend dem bekannten Prozess des Tankens an – kurze Stopps mit hoher Energieaufnahme, statt langer Standzeiten zur Energieversorgung.

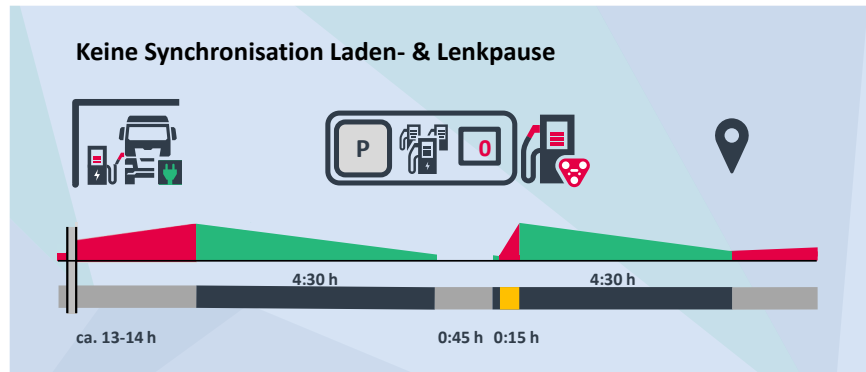
Bereits im ersten Teil des NEFTON-Projekts wurde gezeigt, dass Ladeleistungen bis 1 Megawatt (MW) eine Voraussetzung für den wirtschaftlichen Einsatz batterieelektrischer Lkw im Fernverkehr sind. Für bestimmte Betriebsszenarien ergeben sich jedoch aus der nochmaligen deutlichen Steigerung der Ladeleistungen Vorteile für den Kunden. Insbesondere dann, wenn Standzeiten weiter reduziert oder Ladeprozesse flexibler gestaltet werden müssen.

Im Projekt NEFTON 3000 wird daher gezielt die nächste Stufe entwickelt: Ladepfade mit bis zu 3000 A Stromstärke, die perspektivisch Ladeleistungen von bis zu drei Megawatt ermöglichen. Ziel ist es, Ladeprozesse so weit zu verkürzen, dass sie sich stärker an bestehende Abläufe im Dieselmotorbetrieb annähern.

Mögliche Anwendungsfälle für das Laden mit 3000 A

Sehr hohe Ladeleistungen können insbesondere dort relevant werden, wo heutige Ladeinfrastruktur und Betriebsprozesse an ihre Grenzen stoßen. Im Folgenden werden die Anwendungsfälle betrachtet, in denen das Laden mit 3000 A einen konkreten operativen Mehrwert für den elektrischen Güterverkehr bieten kann.

Abb. 1 Illustration eines Anwendungsfalls für hohe Ladeleistungen. Es steht keine Lademöglichkeit während der 45-minütigen Lenkzeitpause zur Verfügung. Der Elektro-Lkw lädt in zusätzlichen 15 min die benötigte Energie nach.



Ein zentraler Anwendungsfall ergibt sich aus der fehlenden Synchronität zwischen gesetzlich vorgeschriebener Lenkzeitpause und verfügbarer Ladeinfrastruktur » Abb. 1. Pausen finden häufig an Logistikstandorten, Baustellen oder anderen Einsatzorten statt, an denen keine geeigneten Ladepunkte vorhanden sind oder diese nicht verfügbar sind. In solchen Situationen müssen kurze Standzeiten möglichst effizient genutzt werden, sodass hohe Ladeleistungen erforderlich sind, um innerhalb begrenzter Zeitfenster ausreichend Energie nachzuladen und Zeitverluste zu minimieren.

Ein weiterer relevanter Anwendungsfall entsteht beim Betrieb ohne zuverlässige Übernachtladung. Nicht alle Fahrzeuge können regelmäßig im Depot geladen werden, etwa aufgrund begrenzter Netzanlüsse, externer Parkflächen oder hoher Fahrzeugauslastung. In diesen Fällen muss ein Großteil der Energie während des laufenden Betriebs aufgenommen werden. Hohe Ladeleistungen ermöglichen es, Fahrzeuge auch unter diesen Rahmenbedingungen schnell wieder einsatzbereit zu machen und damit die Einsatzfähigkeit sicherzustellen.

Besonders deutlich wird die Bedeutung hoher Ladeleistungen bei zeitkritischen Transportaufgaben. Im Fernverkehr sowie bei Just-in-Time- oder Just-in-Sequence-Lieferketten wirkt sich jede zusätzliche Minute Stillstand unmittelbar auf die Wirtschaftlichkeit aus. Sehr hohe Ladeleistungen tragen dazu bei, Ladezeiten signifikant zu verkürzen und damit den Abstand zum konventionellen Tankvorgang weiter zu reduzieren. Perspektivisch wird es möglich, innerhalb von zehn Minuten Energie für mehrere hundert Kilometer nachzuladen, wodurch sich das Laden zunehmend dem bekannten, schnellen Energienachschub im Dieselbetrieb annähert.

Auch in Einsatzformen mit besonders kurzen Standzeiten, etwa im Zweifahrer-Betrieb, spielt die Ladeleistung eine entscheidende Rolle. Je höher die verfügbare Leistung ist, desto stärker kann der Ladevorgang in sehr kurze Stopps integriert werden.

Schließlich eröffnet die Verfügbarkeit sehr hoher Ladeleistungen auch Freiheitsgrade in der Fahrzeugauslegung. Große Batterien erhöhen Kosten und Fahrzeuggewicht und reduzieren die Nutzlast. Wenn Energie jedoch schnell und flexibel nachgeladen werden kann, lässt sich die erforderliche Batteriekapazität reduzieren, ohne die Einsatzfähigkeit einzuschränken. Dies kann zu geringeren Investitionskosten, höherer Nutzlast und insgesamt verbesserter Wirtschaftlichkeit des Fahrzeugs führen.

ANFORDERUNGEN UND SYSTEMDESIGN

Der Übergang zu sehr hohen Ladeleistungen erfordert ein grundlegendes Umdenken in der Auslegung von Fahrzeug und Ladesystem. Im Fokus steht dabei nicht mehr die einzelne Komponente, sondern das Zusammenspiel aller Elemente entlang des Ladepfads. Dieses Kapitel beschreibt die wesentlichen Anforderungen sowie die technischen Ansätze, mit denen eine sichere und effiziente Umsetzung im Fahrzeug erreicht werden kann.

Technische Herausforderungen beim 3000 A Ladepfad

Die Entwicklung von Ladesystemen für Stromstärken bis zu 3000 A bedeutet einen grundlegenden Technologiesprung im elektrischen Güterverkehr. Während heutige Schnellladesysteme für Pkw und Nutzfahrzeuge typischerweise im Bereich einiger hundert bis maximal eintausend Ampere arbeiten, bewegt sich NEFTON 3000 in einer neuen Leistungsdimension: Ströme bis 3000 A, Spannungen bis etwa 1000 V und damit Ladeleistungen von mehr als 2–3 MW.

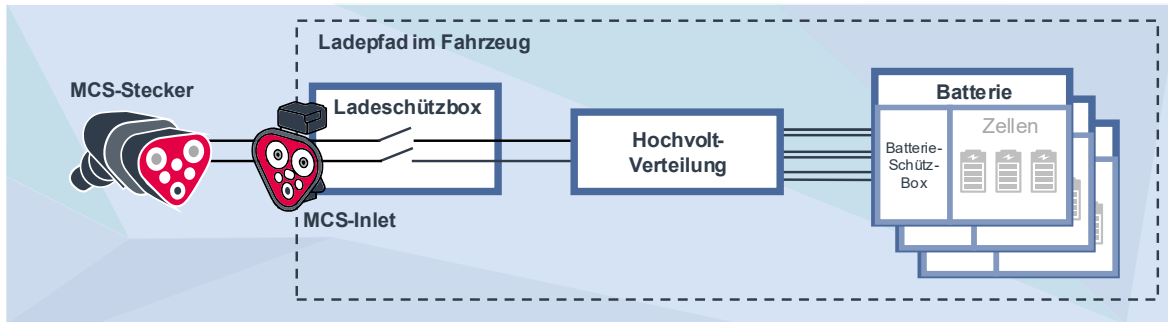
Mit diesen Größenordnungen steigen nicht nur die Möglichkeiten, sondern auch die Anforderungen an das Gesamtsystem deutlich. Im Gegensatz zu klassischen Ladeansätzen genügt es nicht, einzelne Komponenten leistungsfähiger zu machen. Stattdessen muss der gesamte Ladepfad – vom Stecker über die Verkabelung bis hin zur Integration im Fahrzeug – als zusammenhängendes System ausgelegt werden. Ziel ist es, hohe Ladeleistungen zuverlässig, sicher und gleichzeitig fahrzeugtauglich umzusetzen. Dabei stehen drei zentrale Aspekte im Vordergrund: elektrische Belastbarkeit, thermisches Verhalten sowie Integration in das Fahrzeug.

Ein wichtiges Ziel des Projekts ist es, diese Anforderungen zunächst unter kontrollierten Bedingungen an einem fahrzeugnahen Prüfstand zu untersuchen. Dabei wird bewusst kein vollständiges Fahrzeug und kein reales Batteriesystem verwendet. Stattdessen wird der Ladepfad gegen elektrische Quellen und Senken am Prüfstand betrieben. Dies erlaubt es, die physikalischen Grenzen unabhängig vom Fahrzeugbetrieb zu untersuchen. Gleichzeitig wird deutlich, dass Batteriesysteme, die Ladeleistungen in dieser Größenordnung dauerhaft aufnehmen können, aktuell noch nicht für die Integration in Serienfahrzeuge verfügbar sind.

Komponenten entlang des Ladepfads

Im Zentrum von NEFTON 3000 steht die Entwicklung eines durchgängigen Ladepfads für Ströme von bis zu 3000 A. Dieser beginnt an der Ladeschnittstelle und endet – im realen Fahrzeug – am Batteriesystem mit der Batterieschützbox » [Abb. 2](#).

Abb. 2: Illustration der wichtigsten Komponenten des Ladepfads



Am Anfang des Systems steht der Stecker gemäß MCS-Standard (Megawatt Charging System), der die Verbindung zwischen Infrastruktur und Fahrzeug herstellt. Über das angeschlossene Ladekabel wird die Energie in das Fahrzeug geführt. Bei den eingesetzten Kabeln handelt es sich um speziell entwickelte Hochstromkabel, die aufgrund der hohen Stromdichte aktiv gekühlt werden müssen. Die Kühlung erfolgt über integrierte Flüssigkeitskreisläufe in der Ladesäule, damit die Kabel trotz hoher Leistung handhabbar bleiben.

Innerhalb des Fahrzeugs – beziehungsweise im Prüfstand – folgt die zentrale Schnittstelle, die sogenannte Ladeschützbox. Sie übernimmt mehrere Funktionen gleichzeitig: Sie stellt die elektrische Verbindung her, enthält die Schaltkomponenten zur sicheren Ein- und Ausschaltung des Systems sowie Sensoren und bildet die Schnittstelle zur weiteren Hochvoltverteilung.

Von der Ladeschützbox aus fließt der Strom über den weiteren Hochstrompfad durch die Hochvoltverteilung bis hin den Batterieschützboxen. Die Batterieschützboxen umfassen zentrale Bauteile wie Schütze, Batterie-Steuergeräte, Sensorik und Stromschienen, welche alle auf minimale Verluste ausgelegt sind. Entlang des gesamten Ladepfads sind Stromsensoren integriert, die den Stromfluss kontinuierlich überwachen.

Alle Komponenten sind dabei aufeinander abgestimmt und bilden ein Gesamtsystem, das hohe Ströme möglichst verlustarm und sicher übertragen kann.

Elektrische Anforderungen: Hohe Leistungen sicher beherrschen

Die elektrische Auslegung des Systems ist eine der zentralen Herausforderungen beim 3000 A-Laden. Im Normalbetrieb müssen sehr hohe Ströme zuverlässig übertragen werden, gleichzeitig müssen auch seltene, aber kritische Fehlerfälle sicher beherrscht werden.

Ein besonders relevanter Fall ist der Kurzschluss. Hier können kurzzeitig Ströme auftreten, die deutlich über dem Nennstrom liegen. Im Projekt wurden daher Tests mit Kurzschlussströmen im Bereich von über 10 kA durchgeführt, um das Verhalten der Komponenten zu untersuchen.

Um solche Situationen sicher zu beherrschen, werden mehrere Schutzmechanismen kombiniert. Dazu gehören schnell reagierende Schaltkomponenten, die den Stromfluss unterbrechen können, sowie Überwachungssysteme, die kritische Zustände frühzeitig erkennen.

Parallel dazu spielt die Minimierung elektrischer Verluste eine zentrale Rolle. Bei Strömen in dieser Größenordnung führen selbst kleinste Widerstände zu erheblicher Wärmeentwicklung. Deshalb wird der gesamte Ladepfad konsequent auf möglichst geringe Übergangswiderstände ausgelegt – von der Steckverbindung über die Kabel bis hin zu den internen Verteilstrukturen.

Die elektrische Auslegung folgt damit zwei grundlegenden Prinzipien: maximale Sicherheit im Fehlerfall und minimale Verluste im Normalbetrieb.

Thermische Anforderungen: Wärme kontrollieren und abführen

Die thermischen Anforderungen ergeben sich direkt aus der hohen Stromstärke. Da die entstehende Verlustleistung mit dem Quadrat des Stroms zunimmt, entsteht bei 3000 A eine erhebliche Wärmebelastung.

Diese Wärme muss effizient abgeführt werden, um Bauteile vor Überhitzung zu schützen und einen stabilen Betrieb zu ermöglichen. Im Projekt wurden deshalb konsequent aktive Kühlösungen eingesetzt.

Ein wesentlicher Bestandteil sind flüssigkeitsgekühlte Komponenten entlang des gesamten Ladepfads. Dazu gehören insbesondere das Ladekabel, die Steckverbindungen sowie zentrale Verteilkomponenten wie die Ladeschützbox. Die Kühlung erfolgt über geschlossene Systeme, die die Wärme gezielt aufnehmen und ableiten.

Eine zentrale Herausforderung besteht darin, Kühlung und elektrische Isolation gleichzeitig sicherzustellen. Materialien müssen einerseits Wärme gut leiten, andererseits aber elektrisch isolierend wirken. Das Sys-

temdesign basiert daher auf einem ausgewogenen Zusammenspiel verschiedener Materialien und Konstruktionsprinzipien.

Ziel ist es, alle Komponenten dauerhaft innerhalb definierter Temperaturgrenzen zu betreiben und gleichzeitig ein kompaktes und robustes System zu realisieren.

Bauraum und Gewicht: Integration im Fahrzeug

Neben elektrischer und thermischer Auslegung spielt die Integration in das Fahrzeug eine entscheidende Rolle. Nutzfahrzeuge unterliegen strengen Anforderungen hinsichtlich Nutzlast, Bauraum und Wartbarkeit.

Komponenten für das Hochstromladen dürfen daher nicht beliebig groß oder schwer werden. Jede zusätzliche Masse reduziert die transportierbare Nutzlast, und zusätzlicher Bauraum steht im Fahrzeug nur begrenzt zur Verfügung.

Das Systemdesign zielt daher darauf ab, alle Komponenten möglichst kompakt und effizient zu gestalten. Dies betrifft insbesondere Kabel, Steckverbindungen und Verteilkomponenten. Gleichzeitig müssen die Bauteile mechanisch robust sein, da sie im realen Fahrzeugbetrieb Vibrationen, Temperaturschwankungen und Umwelteinflüssen ausgesetzt sind.

Die Herausforderung besteht darin, hohe elektrische Leistung mit möglichst geringem Bauraum und Gewicht zu kombinieren – eine zentrale Voraussetzung für den Einsatz im Fernverkehr.

Entwicklungs- und Validierungsansatz

Die beschriebenen Anforderungen machen deutlich, dass das Hochstromladen nur als Gesamtsystem entwickelt werden kann. Im Projekt NEFTON 3000 wurde daher ein fahrzeugnaher Prüfstand aufgebaut, an dem der komplette Ladepfad untersucht werden kann.

Dieser Prüfstand bildet die Fahrzeugarchitektur in wesentlichen Punkten nach, verzichtet jedoch bewusst auf ein reales Batteriesystem. Stattdessen werden elektrische Quellen und Senken eingesetzt, die es ermöglichen, definierte Betriebszustände exakt einzustellen. Dadurch können sowohl Dauerbetrieb als auch Grenzfälle wie Kurzschlüsse oder hohe Lastsprünge gezielt untersucht werden, ohne die Einschränkungen eines realen Fahrbetriebs.

Ein wesentlicher Bestandteil der Entwicklung ist die Validierung unter verschiedenen Bedingungen. Dazu gehören unter anderem:

- Tests bei hohen Strömen bis 3000 A
- Untersuchungen des thermischen Verhaltens
- Validierung der Kühlkonzepte
- Prüfung von Abschalt- und Schutzmechanismen

Auch die Integration in eine realistische Hochvoltarchitektur wird am Prüfstand berücksichtigt. Dazu gehören die Anordnung der Komponenten, die Einbindung der Kühlsysteme sowie die Umsetzung von Abschalt- und Trennkonzepten. Diese Schutzkonzepte stellen sicher, dass das System im Fehlerfall kontrolliert deaktiviert werden kann. Sie umfassen sowohl die Trennung einzelner Systembereiche als auch die vollständige Abschaltung des Ladepfads bei kritischen Ereignissen.

Gleichzeitig erlaubt der Prüfstands Aufbau eine klare Einordnung des aktuellen Entwicklungsstandes: Während der Hochstrompfad technisch umgesetzt und getestet werden kann, bleibt die Integration geeigneter Batteriesysteme eine zentrale zukünftige Aufgabe. Erst mit der Entwicklung von Batterien, die dauerhaft Ladeleistungen im Bereich mehrerer Megawatt aufnehmen können, wird eine vollständige Integration in Serienfahrzeuge möglich sein.

8

ENTWICKLUNG UND VALIDIERUNG EINES 3000 A-LADEPFADS

Das Hauptziel im NEFTON 3000 A Projekt ist die Entwicklung eines 3000 A-fähigen Ladesystems für schwere elektrische LKW sowie dessen Erprobung an einem dafür entwickelten Prüfstand. Die Tests demonstrieren erfolgreich Ladevorgänge mit 3000 A und über 2 MW.



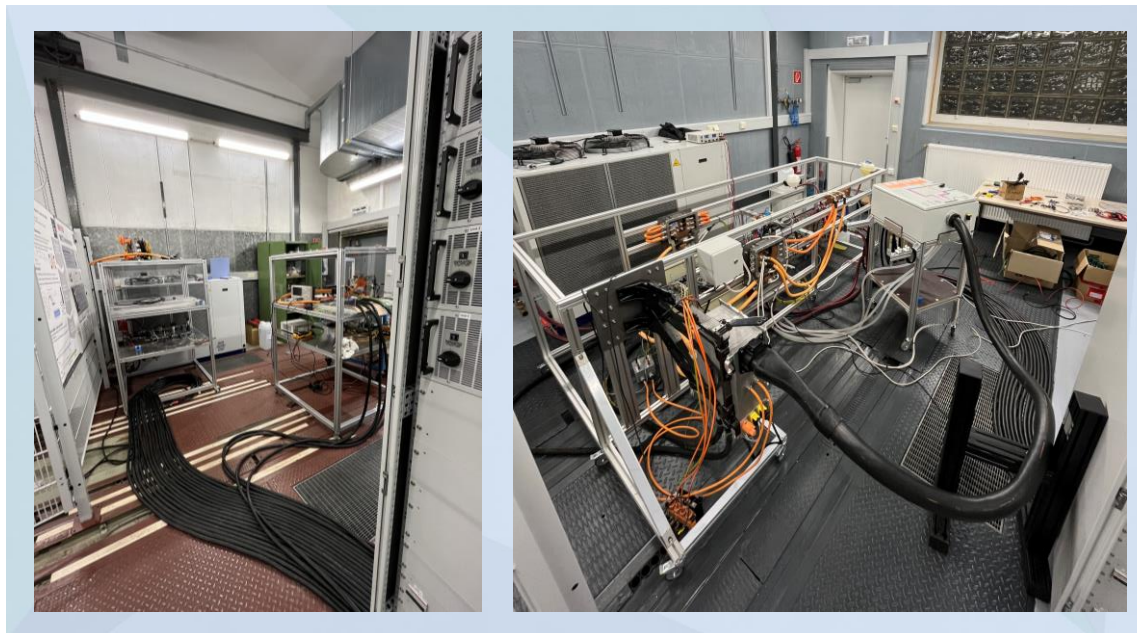
8.1

AUFBAU DES LADEPFAD-PRÜFSTANDS

Bei dem Ladepfad-Prüfstand handelt es sich um ein maßgeschneidertes Gegenstück zum 3000 A Ladepfad-Prototypen. Er emuliert alle notwendigen Schnittstellen und Systeme seitens Fahrzeugs sowie Infrastruktur. Zudem übernimmt er die Aufgabe der Messdatenerfassung während des Betriebs. Dies ermöglicht während der verschiedenen Projektphasen das Testen verschiedenster Entwicklungsstadien des 3000 A Ladepfads.

Der Ladepfad-Prüfstand ermöglicht den Betrieb des Prototyps unter realistischen Bedingungen. »Abb. 3 gibt eine Übersicht über den Prüfstand gegen Ende der ersten Testphase an der TU München. Die Ansteuerung der Prüfstandskomponenten sowie des Prüflings wird auf einem Real-Time Controller von National Instruments mittels im Projekt entwickelter Software dargestellt. Dieses System übernimmt auch die Überwachung während des Betriebs sowie die Messdatenerfassung.

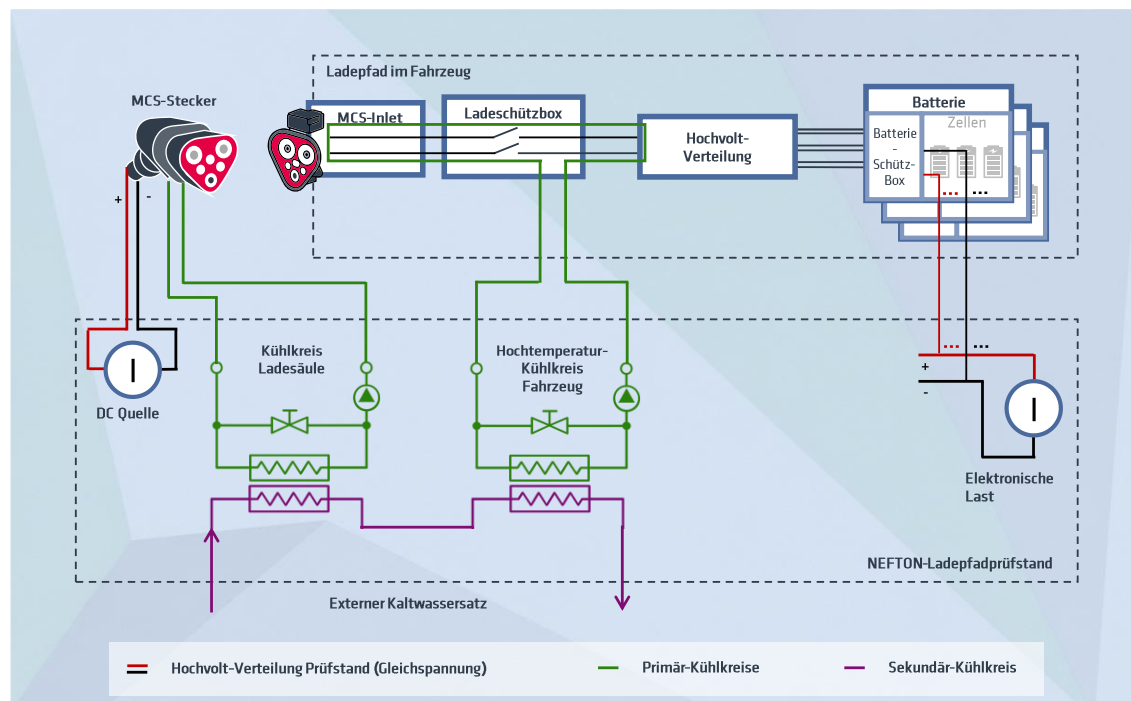
Abb. 3 Übersicht über den Ladepfad-Prüfstand in verschiedenen Konfigurationen.



Der Prüfstand stellt im Betrieb bis zu 3000 A simulierten Ladestrom. Je nach Ausbaustufe erfolgt dies im Kurzschlussbetrieb mit Spannungen unter 60 V oder im Quelle-Senke-Betrieb mit bis zu 1000 V. Der Prüfstand

stellt die Kühlung mittels mehrerer unabhängiger, regelbarer Kühlkreise dar. Auf Infrastruktur-Seite wird das MCS-Ladekabel mit einem nichtleitenden Gemisch aus deionisiertem Wasser und Propylenglykol gekühlt, da die Kühlung im Kabel über direkten Kontakt des Kühlmediums mit den aktiven Leitern erfolgt. Der Kühlkreis besitzt eine Leitfähigkeitsüberwachung sowie eine Harzfilterkartusche zur Absorption von neu gebildeten Ionen, um jederzeit einen hohen Isolationswiderstand des Kühlmittels zu garantieren. Auf Prüflingsseite wird die Kühlung mit herkömmlichem, im Automobilbereich verbreitetem Kühlmittel aus Wasser und Ethylenglykol (50 – 50%) hergestellt. Alle unabhängigen Kühlkreise sind über Plattenwärmetauscher an einen gemeinsamen Kaltwassersatz mit 40 kW_{therm} Kühlleistung angebunden. » Abb. 4 stellt den Aufbau schematisch dar.

Abb. 4 Schematische Darstellung des kombinierten Ladepfad-Prüflings & Prüfstandssystems.



Der Prüfstand ermöglicht so den Betrieb der verschiedenen Ausbaustufen des Ladepfad-Prototypen mit verschiedenen Strombelastungen und -profilen bei verschiedenen Temperaturniveaus. Hierbei werden die Messdaten der im Prüfling und Prüfstand verbauten Sensorik erfasst, sowie je nach Experiment weitere Datenquellen z. B. via CAN-Bus, Ethernet oder Modbus eingebunden. Meist werden die Prüflingskomponenten mit zusätzlichen HV-isolierten Temperatursensoren ausgestattet, um sicher direkt auf aktiven Leitern Temperaturmessungen durchführen zu können.

Das Testprogramm für den NEFTON 3000 Ladepfad verfolgte zwei Hauptziele. Zum einen wurden noch während der Entwicklungsphase verschiedenste Kombination der vorliegenden Prototypen und Vorserien-Komponenten kombiniert und funktional getestet. Hierbei lag der Fokus auf der thermischen Systemperformance. Die Ergebnisse flossen danach vor allem in die Weiterentwicklung der 3000 A Ladeschützbox. Schließlich wurde das Testprogramm mit dem erfolgreichen simulierten Ladebetrieb des entwickelten Systems bei Nennspannung von 800 V und voller Stromstärke von 3000 A beendet, was einer Spitzen-Ladeleistung von 2,4 Megawatt (MW) entspricht.

Die erste Testphase an der TU München wurde vor allem zur thermischen Untersuchung einzelner Baugruppen sowie des gesamten Ladepfads genutzt. Hier wurden verschiedene MCS-Verbindungskomponenten, gekühlte Kabel, Schütze, Stromsensorik sowie Batterietrennvorrichtungen jeweils in den Ladepfad integriert getestet. Hier konnte anhand der ersten Generation des Ladepfad-Prototyps wertvolle Erfahrung gesammelt werden, die dann in die Entwicklung der zweiten Generation eingeflossen ist. Besonders die MCS-Steckverbindung wurde zu Projektbeginn als thermisch kritisch eingestuft. Der Kontaktwiderstand der Verbindung ist somit minimal zu halten und eine möglichst direkte Anbindung des Inlets an die aktive Kühlung auf der Fahrzeugseite sollte angestrebt werden. Dies wurde ebenfalls im Zuge der MCS-Standardisierung durch die CharIN diskutiert. In diesem Kontext wurde im Jahr 2024 das National Renewable Energy Laboratory (NREL) beauftragt, um verschiedene MCS-Steckkombinationen am Prüfstand auf deren thermische Eigenschaften zu untersuchen. Darunter befanden sich auch zwei prototypische 3000 A Kombinationen. Im Vergleich zu den im NEFTON Projekt durchgeführten Tests ergeben sich zwei Unterschiede. Am NREL wurden lediglich Kombinationen aus Ladekabel & -stecker sowie Fahrzeug-Inlet getestet, ohne diese in einen Fahrzeug-Ladepfad zu integrieren. Zudem wurde bei den 3000 A Tests mit sehr niedrigen Kühlmitteltemperaturen gearbeitet. Die Ergebnisse aus dem NEFTON Projekt zeigen, dass 3000 A Laden mit MCS in einem Ladesystem für batterieelektrische Sattelzugmaschinen funktioniert, und selbst bei den im Betrieb zu erwartenden Worst-Case-Tempe-

raturen noch die von der CharIN in den Design-Kriterien vorgeschlagenen maximalen Kontakttemperaturen von 100°C einhält, siehe » [Tab 1](#).

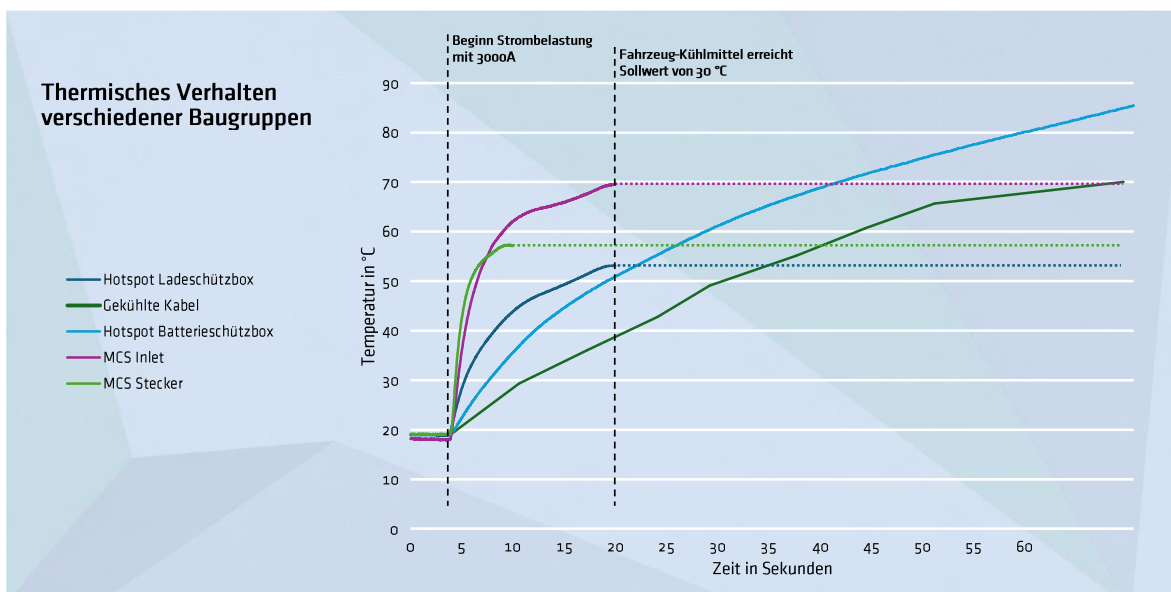
Tab. 1 Stationäre Betriebstemperaturen der kritischen Ladepfad-Komponenten bei Worst-Case-Betriebsbedingungen.

Ladepfad-Komponente	Maximaltemperatur
MCS-Inlet Kontakte	94 °C
MCS-Ladekabel Kontakte	67 °C
Stromsensor Ladepfad (Hotspot Ladeschützbox)	98 °C

Thermisches Systemverhalten

Bei den Messungen fiel auf, dass das 3000 A Ladesystem an verschiedenen Stellen über deutlich unterschiedliche thermische Zeitkonstanten verfügt. Vor allem die direkt flüssigkeitsgekühlten Komponenten haben kurze thermische Zeitkonstanten, da hier der Wärmewiderstand Richtung Kühlmittel gering ist, um bei geringen Temperaturunterschieden hohe Kühlleistungen zu erreichen. » [Abb. 5](#) vergleicht den Temperaturanstieg an verschiedenen Messstellen beim Aufwärmvorgang bei konstanter Belastung mit 3000 A. Die Kühlkreise heizen sich zusammen mit dem Prüfling auf, der fahrzeugseitige Kühlkreis wird in diesem Versuch auf 30 °C geregelt, da die beschriebenen Phänomene hier klarer zu erkennen sind. Im regulären Betrieb sind eher hohe fahrzeugseitige Vorlauftemperaturen im Bereich von 60 °C im Hochtemperatur-Kühlkreis zu erwarten, wodurch sich im Betrieb die Temperaturen in » [Tab 1](#) einstellen.

Abb. 5 Aufheizverhalten verschiedener Ladepfad-Komponenten.



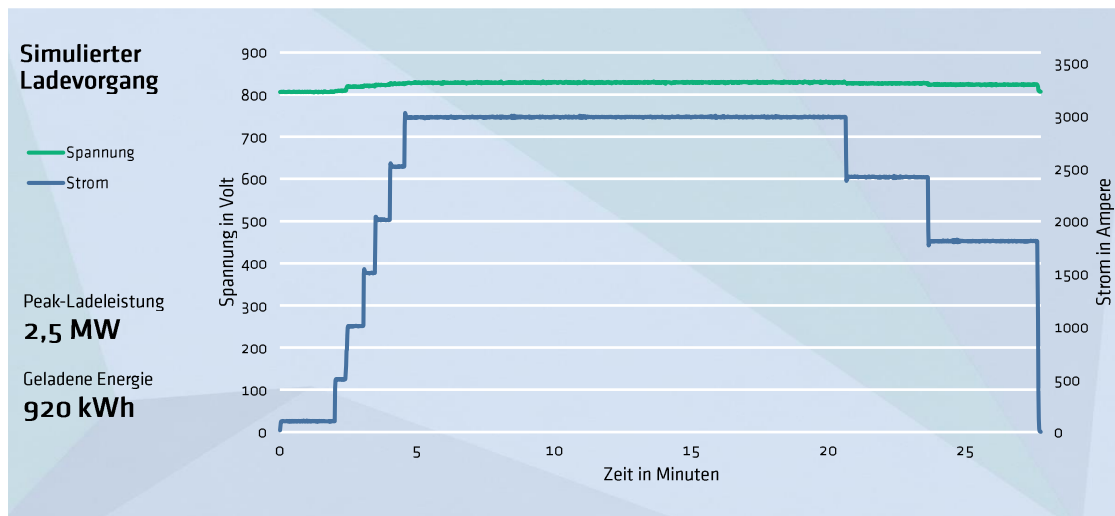
Die Temperaturen der Steckerpins sowie des Inlets und der Ladeschützbox stellen sich innerhalb weniger Minuten stationär ein. Hierbei dominieren die jeweiligen Aufheizprozesse der Kühlmittelkreise. Die Oberflächentemperaturen von HV-Kabeln sowie die Temperaturen in den passiv gekühlten Batterieschützboxen steigt deutlich langsamer an.

An besonders gut gekühlten Punkten mit hoher Verlustleistung führt diese thermische Dynamik dazu, dass bereits Ladevorgänge von 15 bis 30 min ausreichen können, um stationäre Temperaturen zu erreichen. Diese Komponenten sind damit per Definition thermisch dauerhaft. Auch die gekühlten HV-Leitungen im Fahrzeug sind thermisch dauerhaft; ihre stationäre Temperatur stellt sich jedoch zumindest an der Oberfläche der Isolation erst nach langer Zeit ein. Für die Batterieschützboxen gilt dies nicht in gleichem Maß. Je nach Batteriekonfiguration und Außentemperatur unterstützen jedoch auch sie simulierte Ladevorgänge mit 800 kWh geladener Energie, ohne die Auslegungstemperaturen zu überschreiten. Damit werden bereits nahezu alle im Lkw denkbaren Use-Cases abgedeckt.

Betrieb bei Nennleistung

In der zweiten Testphase am Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) wurde der Ladepfad-Prototyp mit Nennspannung bei voller Stromstärke betrieben. Hierzu wurde der gesamte Ladepfad-Prüfstand zum ISE nach Freiburg transportiert, mit Ausnahme der Kleinspannungs-DC-Quelle-Senke Einheiten, welche während der ersten Testphase genutzt wurden. Der Prüfstand wurde in die Systeme vor Ort integriert, um so die 2,x MW Ladeversuche im Quelle-Senke-Betrieb durchzuführen. Hier konnte die Funktionstüchtigkeit des entwickelten Lkw-Ladepfad-Prototyps final gezeigt werden.

Abb. 6 Spannungs- und Stromverlauf des simulierten Ladevorgangs.



»**Abb. 6** zeigt die Verläufe von Strom und Spannung während einem der simulierten Ladevorgänge. Insgesamt wurden hier innerhalb von 30 min 920 kWh übertragen und eine Spitzen-Ladeleistung von 2,5 MW erreicht.

Bei der spezifischen Ladekurve handelt es sich um ein generisches Beispiel für ein Fahrzeug mit 800 V Bordnetz bei größtenteils konstanter Spannung. Im Fahrzeug-Einsatz wird die Ladekurve zukünftig hauptsächlich durch die Zellparameter sowie deren Kühlung bestimmt.

9

ELEKTRISCHE SICHERHEIT IN ZUKÜNFTIGEN HV-BORDNETZEN

Höhere Ladeleistungen erfordern immer leistungsfähigere Batterien. Dies stellt das HV-Systemdesign vor neue Herausforderungen. Gleichzeitig soll die Systemeffizienz noch weiter steigen, um für die Kunden die TCO weiter zu verbessern. Im NEFTON 3000 A Projekt wurden in diesem Sinne neuartige Batterie-Trennelemente auf Basis verschiedener Funktionsprinzipien betrachtet.



Höhere Ladeleistungen erfordern Hochleistungsbatterien. Trotz der hohen Antriebsleistungen schwerer Elektro-Lkw von teilweise über 1000 PS kurzzeitig, stellt das Laden mit weit über 1 MW eine deutlich größere Herausforderung dar. Dabei sind die Batteriezellen selbst der entscheidende Faktor für die Ladeeffizienz. Hohe Effizienzen sind essenziell, um das Batterie-Kühlsystem im Fahrzeug auch bei hohen Ladeleistungen nicht zu überlasten. Hochleistungs-Batterien erzeugen allerdings im Fehlerfall höhere Kurzschlussströme. Daher müssen Trenneinrichtungen zukünftig noch höhere Ströme im Bereich mehrerer 10.000 A sicher trennen können, während des normalen Betriebs aber gleichzeitig die Leitungsverluste reduzieren und die Robustheit der Fahrzeuge durch Ausfallsicherheit und Rücksetzbarkeit verbessern.

Im Projekt wurde während der Konzeptphase ein morphologischer Kasten der möglichen Bordnetz-Schaltarchitekturen aufgestellt, und nach verschiedenen Kriterien bewertet. Im späteren Projektverlauf wurden zwei vielversprechende Technologien für Batterie-Trenneinrichtungen anhand von kommerziellen Prototypen untersucht:

- Smart Contactors: Mechanische Schütze mit automatischer Kurzschlusstrennung
- Halbleitertrenner / Solid State Circuit Breaker (SSCB): Halbleiter-basierte Sicherungen

Die Smart Contactors vereinen die Funktionalität von Batterieschutz und Sicherung (Schmelzsicherung oder pyrotechnische Sicherung). So können Bauraum und Kosten gespart werden. Die Geräte trennen je nach Situation in wenigen Millisekunden und sind zudem in begrenztem Maße rücksetzbar, was die Weiterfahrt nach einem schwerwiegenden, externen Fehlerfall, beispielsweise nach dem Versagen einer Ladesäule, ermöglicht. SSCBs sind ein neuartiges Konzept im Elektrofahrzeug-Bereich und nutzen statt mechanischen Kontakten Halbleiter-Bauelemente. Sie können Fehlerströme extrem schnell, innerhalb von Mikrosekunden detektieren und unterbrechen, lange bevor diese ihren Maximalwert erreichen. Dadurch können weitere Schäden verhindert werden. SSCBs können quasi beliebig oft Fehlerströme trennen, ohne nennenswerten Verschleiß. Sie haben in ihrer aktuellen Form allerdings klare Nachteile in puncto Kosten sowie Verlustleistung. Die verschiedenen Prototypen wurden mit für das Ladesystem üblichen Betriebsströmen belastet, um so deren thermische

Eigenschaften zu analysieren. Außerdem wurden Kurzschluss tests am Fraunhofer ISE mit Strömen bis zu 10.000 A durchgeführt, um das Verhalten der Geräte besser zu verstehen.

Neben den kommerziellen Prototypen wurde vom Projektpartner TH Degendorf ebenfalls ein prototypischer SSCB mit zwölf parallel geschalteten bidirektionalen MOSFET-Modulen und integrierter Spannungsbegrenzung entwickelt und validiert. » Abb. 7 zeigt die finale Design-Iteration der Leistungshalbleiter-Platine mit Bare-Die Siliziumkarbid-MOSFETs (SiC). Durch Simulationen und Versuche bei 400 V und Fehlerströmen bis 400 A konnte nachgewiesen werden, dass das System Fehlerströme schnell und sicher abschaltet und die erwartete Klemmenfunktion bei Transienten erfüllt. Die Untersuchungen zeigten zudem die Grenzen der Technologie hinsichtlich Verlustleistung, Kühlung, Bauraum und Stromtragfähigkeit auf und lieferten wichtige Erkenntnisse für die Auslegung dieser Technologie für Anwendungen mit hohen Spannungen und Strömen.

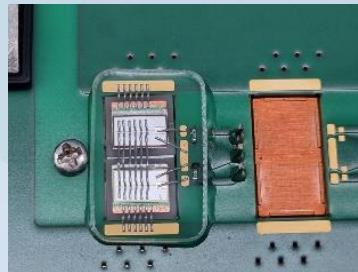
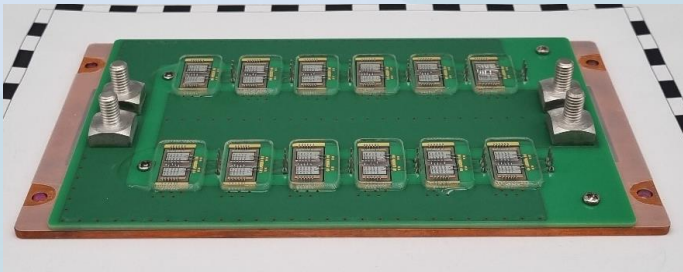


Abb. 7 Gesamtaufbau der Leistungsplatine mit 12 parallelen MOSFET-Paaren (links).

Nahaufnahme eines Bare-Die MOSFET-Paars sowie unbestückter Position. Thermische Anbindung direkt auf die Kupfer-Baseplate sichtbar (rechts).

Bei SSCBs mit bidirektionaler Trennfähigkeit mit SiC-Bauelementen ist aktuell von einem Faktor 5 – 10 bei den Verlusten im Vergleich zu einem Smart Contactor je Trennkontakt auszugehen. So ist eine indirekte Kühlung nur über die verbundenen Busbars nicht mehr möglich. Eine großflächige thermische Anbindung an das Komponentengehäuse oder sogar eine Flüssigkeitskühlung wird notwendig. Diese Erfahrungen decken sich mit den Erkenntnissen aus Tests mit den kommerziellen SSCB-Prototypen.

10

VON DER FORSCHUNG ZUR ANWENDUNG

Bei der Dekarbonisierung des Güterverkehrs auf der Straße spielen Fahrzeugkonzept und Ladesystem eine wichtige Rolle, stellen jedoch nur einen kleinen Teil der Gesamtlösung dar. Vor allem die flächendeckende Bereitstellung kostengünstiger Lademöglichkeiten an Logistikstandorten sowie Hauptverkehrsadern stellt die Branche vor zahlreiche Herausforderungen.



DIE ENTSCHEIDENDE ROLLE DER INFRASTRUKTUR

Im Projekt NEFTON 3000 wurden Konzepte zur deutlichen Steigerung der Ladeleistung für schwere elektrische Nutzfahrzeuge entwickelt und erprobt. Neben der Fahrzeug- und Systemtechnik zeigt sich dabei, dass der Aufbau leistungsfähiger Ladeinfrastruktur eine zentrale Voraussetzung für den erfolgreichen Markthochlauf elektrischer Nutzfahrzeuge ist. Dies betrifft sowohl Megawatt-Ladeparks entlang wichtiger Hauptverkehrsrouten als auch Ladeinfrastruktur an Logistikstandorten.

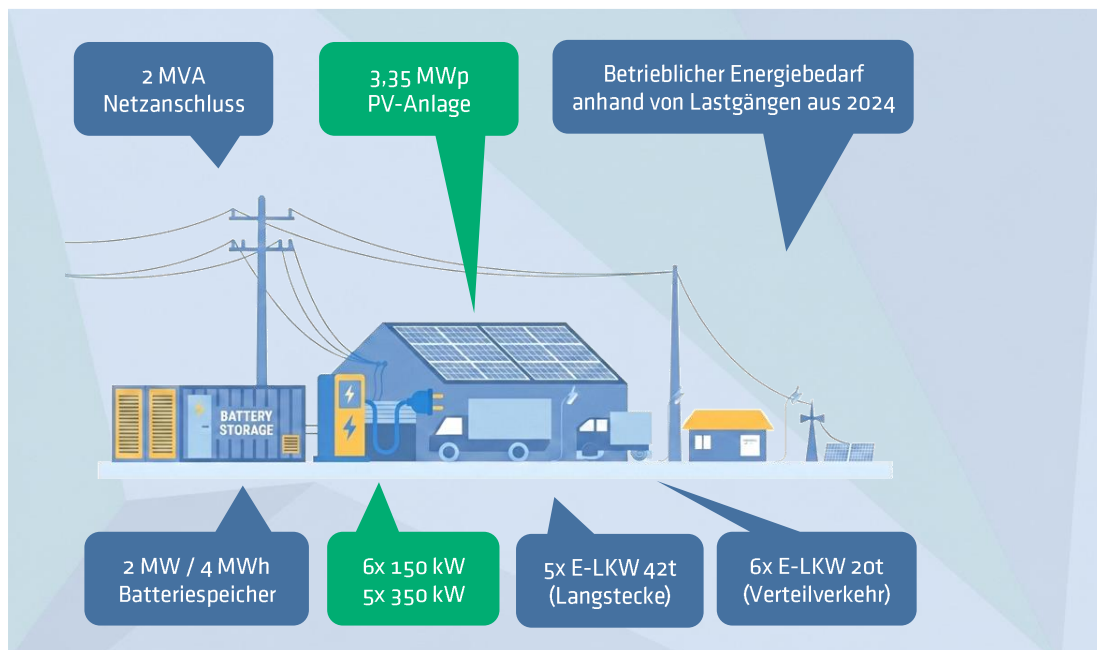
Die Elektrifizierung eines Logistikunternehmens stellt deutlich höhere Anforderungen an den Netzanschluss als die bisherige Infrastruktur eines konventionellen Logistikbetriebs. Unterschiedliche Fahrzeugklassen und Reichweiten eröffnen zwar ein breites Spektrum an Einsatzmöglichkeiten, gleichzeitig entscheidet die verfügbare Anschlussleistung maßgeblich darüber, in welchem Umfang Elektro-Lkw in bestehende Fuhrparks und Betriebsabläufe integriert werden können. Der Flaschenhals des Umstiegs liegt daher nicht allein in der Fahrzeugverfügbarkeit oder in wirtschaftlichen Entwicklungsszenarien, sondern insbesondere in der rechtzeitigen Bereitstellung geeigneter Netzanschlussleistung.

Ein Beispiel für diese Herausforderung ist der sukzessive Umstieg der Firma Streck Transportgesellschaft mbH von dieselbetriebenen Lkw auf Elektro-Lkw, der hinsichtlich Energiebedarf und Netzanschlussituation durch das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme untersucht wurde. In einem ersten Schritt sollen sechs Fahrzeuge mit 20 t sowie fünf Fahrzeuge mit 42 t eingesetzt werden. Für den Ausbau wurde beim lokalen Netzbetreiber und Energieversorger eine Anschlussleistung von 15 MVA beantragt, ausgehend von einer bestehenden Anschlussleistung von weniger als 1 MVA. Zwar wurde dem Antrag stattgegeben, für die Bereitstellung der Leistung ist jedoch der Bau eines neuen Umspannwerks mit 110 kV / 20 kV erforderlich. Die optimistische Zeitplanung liegt bei etwa fünf Jahren; zusätzliche ein bis zwei Jahre erscheinen realistisch.

Derartige Zeiträume stellen Unternehmen vor erhebliche Herausforderungen, da sie geplante Modernisierungen und die schrittweise Transformation des Fuhrparks deutlich verzögern können.

Gemeinsam mit dem Fraunhofer ISE wurde daher ein alternatives Versorgungskonzept erarbeitet¹. Grundlage waren umfangreiche Simulationen, die sowohl den aktuellen als auch den künftigen Energiebedarf des Standorts berücksichtigen. Dabei wurde nicht nur der mittlere Verbrauch betrachtet, sondern insbesondere die zeitliche Dynamik des Logistikbetriebs mit Schichtbetrieb, Standzeiten zur Be- und Entladung sowie eng getakteten Betriebsabläufen. Auf Basis vorhandener Dachflächen und nutzbarer Stellflächen wurden Erzeugung und Spitzenleistung von PV-Anlagen sowie stationären Batteriespeichern optimiert. Zusätzlich konnte in Gesprächen mit dem Netzbetreiber die bestehende Anschlussleistung bei gegebener Infrastruktur auf 2 MVA erhöht werden. Unter Berücksichtigung aller Randbedingungen entstand so ein technisch umsetzbares und wirtschaftlich sinnvolles Konzept, mit dem der geplante Einsatz von sechs Elektro-Lkw mit 20 t sowie fünf Elektro-Lkw mit 42 t ermöglicht werden kann. »Abb. 8 zeigt das Systemkonzept mit PV-Anlage, Speicher und Ladestellen, mit dem auch bei begrenzter Anschlussleistung der Betrieb von Elektro-Lkw realisiert werden kann.

Abb. 8 Systemkonzept zur Depotelektrifizierung



Die Netzanschlusssituation bei der Firma Streck Transportgesellschaft mbH verdeutlicht eine Herausforderung, die viele Logistikstandorte betrifft. Während bislang vor allem ausreichende Flächen und eine gute Verkehrsanbindung zentrale Standortkriterien waren, wird die elektrische Anschlussleistung zunehmend zu einem entscheidenden Planungsfaktor. Viele Spediteure und Standortplaner stehen daher vor der Aufgabe, kurzfristig umsetzbare Lösungen zu finden, obwohl der Ausbau der übergeordneten Netzinfrastruktur häufig mehrere Jahre in Anspruch nimmt.

Die Betrachtung des Standorts als Hybridkraftwerk mit PV-Anlage und stationärem Speicher stellt hierfür einen schnell umsetzbaren Ansatz dar. Der notwendige Netzausbau auf der 110 kV / 20 kV Ebene wird dadurch nicht ersetzt, aber der Einstieg in die Elektrifizierung kann vorgezogen und schrittweise umgesetzt werden. Gleichzeitig schaffen PV-Anlagen und Speicher eine Grundlage für einen langfristig kosteneffizienten Betrieb mit höherem Eigenverbrauchsanteil und reduzierten Energiekosten. Heute errichtete Speicher- und PV-Systeme bleiben damit auch nach einem späteren Netzausbau ein wichtiger Bestandteil des Gesamtsystems.

PERSPEKTIVEN FÜR ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNGEN

Aus den Projektergebnissen von NEFTON 3000 ergeben sich mehrere Anschlussaktivitäten.

Auf Fahrzeugseite steht die Weiterentwicklung seriennaher Hochstromladepfade im Vordergrund. Dazu gehören die weitere Optimierung von Stecksystemen, gekühlten Leitungen, Ladeschützboxen, Hochvoltverteilungen und Batterieschützboxen hinsichtlich Verlustleistung, Bau- raum, Gewicht, Kosten und Dauerhaltbarkeit. Parallel dazu bleibt die Entwicklung geeigneter Batteriesysteme eine zentrale Voraussetzung für die spätere Anwendung sehr hoher Ladeleistungen. Zellchemie, Moduldesign, thermische Anbindung und elektrische Verschaltung müssen so weiterentwickelt werden, dass hohe Ladeleistungen effizient, sicher und über die Lebensdauer beherrschbar aufgenommen werden können.

Insgesamt liefert NEFTON 3000 damit einen wichtigen Beitrag zur technologischen Vorbereitung des Megawattladens für schwere elektrische Nutzfahrzeuge. Die Projektergebnisse zeigen, welche technischen Stellhebel für Ladeleistungen oberhalb von einem Megawatt relevant sind, wo heutige Grenzen liegen und welche Entwicklungsfelder für eine spätere industrielle Umsetzung adressiert werden müssen. Der nächste Schritt besteht darin, die gewonnenen Erkenntnisse in seriennähere Komponenten, integrierte Fahrzeug- und Batteriesysteme sowie skalierbare Infrastrukturkonzepte zu überführen. Damit kann der im Projekt erreichte technologische Fortschritt als Grundlage für weitere Entwicklungs-, Standardisierungs- und Demonstrationsaktivitäten dienen.

1

1

ÜBER DAS KONSORTIUM



11.1

TEAM NEFTON 3000

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



Team:
Steffen Büttner
Maximilian Schuckert
Michael Stark
Prof. Malte Jaensch

Die Technische Universität München trägt die Konsortialführung von NEFTON. Für den Projektteil NEFTON 3000 übernahm der Lehrstuhl für Nachhaltige Mobile Antriebssysteme (NMA) die Konsortialführung, entwickelte eine Prüfstandsumgebung für Tests mit 3000 A bei niedrigen Spannungen und begleitete sowie koordinierte die Hochvolt-Tests maßgeblich.



Team:
Fabian Schweizer
Nils Störmer
Benjamin Drescher
Alexander Engelhardt
Jahneke Emil-Sarvanandan
Josef Püschel
Dimitri Schlee
Christoph Apitz
Johannes Volker
Michael Leopold

MAN Truck & Bus verantwortete die fahrzeugseitige Systemarchitektur des 3000-A-Ladepfads und entwickelte zentrale Komponenten für die Integration hoher Ladeleistungen in zukünftige Elektro-Lkw. Darüber hinaus koordinierte MAN die Auslegung, Erprobung und Bewertung des Gesamtsystems hinsichtlich Fahrzeugintegration, Sicherheit, Kühlung und Betriebsverhalten.



ISE

Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) stellte die Prüfstandsinfrastruktur für Hochleistungsversuche bei Nennspannung bereit und führte die Validierung des Ladepfads im Quelle-Senke-Betrieb bis in den Megawattbereich durch. Darüber hinaus brachte das Institut seine Expertise in den Bereichen Ladeinfrastruktur, Energiesysteme und Netzintegration in das Projekt ein.

Team:
Dirk Kranzer
Jürgen Thoma
Andreas Hensel
Sönke Rogalla

Team:

Gia Khanh Nguyen
Boris Komljen
Mittalben Pandhal
Michael Glashauer
Prof. Otto Kreutzer

Die Technische Hochschule Deggendorf untersuchte neue Konzepte zur elektrischen Sicherheit zukünftiger Hochvolt-Bordnetze. Im Fokus standen insbesondere die Entwicklung und Validierung halbleiterbasierter Trenneinrichtungen (Solid State Circuit Breaker, SSCB) sowie die Analyse ihres Verhaltens unter hohen Betriebs- und Fehlerströmen.

VERÖFFENTLICHUNGEN UND GLOSSAR

Die Veröffentlichungen, die im Rahmen des Projekts NEFTON 3000 entstanden sind, werden im Folgenden aufgeführt. Verwendete Abkürzungen werden im Glossar gesammelt aufgelistet.

Veröffentlichungen im Rahmen von NEFTON 3000

2025

- **Schweizer, Fabian; Langer, Benjamin:** Pioneering megawatt-charging and bidirectional energy transfer for battery electric trucks. VDI Dritev 2025 (VDI Wissensforum Bericht), 2025
- **Büttner, Steffen; Schweizer, Fabian; Schuckert, Maximilian; Jaensch, Malte:** Full MCS – Road to 3000 A Charging in Battery Electric Trucks. 38th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS38), 2025

2026

- **Schweizer, Fabian:** Megawatt-Charging and Bidirectional Energy Transfer for Battery Electric Trucks. ECPE Workshop „MegaWatt Charging Systems and Infrastructure“, 2026

GLOSSAR

CAN	Controller Area Network
CharIN	Charging Interface Initiative
DC	Direct Current
HV	Hochvolt
MCS	Megawatt Charging System
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
NREL	National Renewable Energy Laboratory
PV	Photovoltaik
SiC	Siliziumkarbid
SSCB	Solid State Circuit Breaker
TCO	Total Cost of Ownership; Gesamtbetriebskosten eines Fahrzeugs

Anmerkung der Redaktion:

Zur besseren Lesbarkeit wird in diesem Buch das generische Maskulinum verwendet. Die in dieser Arbeit verwendeten Personenbezeichnungen beziehen sich – sofern nicht anderskenntlich gemacht – auf alle Geschlechter

Herausgeber

Technische Universität München

Lehrstuhl für Nachhaltige Mobile Antriebssysteme

Schragenhofstraße. 31

80992 München

Redaktion

Steffen Büttner

Michael Leopold

Maximilian Schuckert

Fabian Schweizer

Autoren

Steffen Büttner

Dirk Kranzer

Michael Leopold

Gia Khanh Nguyen

Maximilian Schuckert

Fabian Schweizer

Juni 2026

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

