



White Paper

Battery Swapping von schweren Nutzfahrzeugen als Komplement zum kabelgebundenen Laden

Im Auftrag von:



Mit Unterstützung von:

Impressum

Herausgeber

Fraunhofer-Institut für Materialfluss
und Logistik IML
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2 – 4
44227 Dortmund
verkehrslogistik@iml.fraunhofer.de
www.iml.fraunhofer.de/verkehrslogistik

Autorinnen und Autoren

Philipp Müller M.Sc.
Dipl.-Logist. Daniela Kirsch

Im Auftrag von (in alphabetischer Reihenfolge)

DHL Group
DSV Holding Germany GmbH
Greiving Truck & Trailer GmbH & Co.KG
Nagel-Group Logistics SE
REMONDIS Sustainable Services GmbH
REWE Markt GmbH

Mit Unterstützung von

DSLVB Bundesverband Spedition und Logistik e. V.

DOI

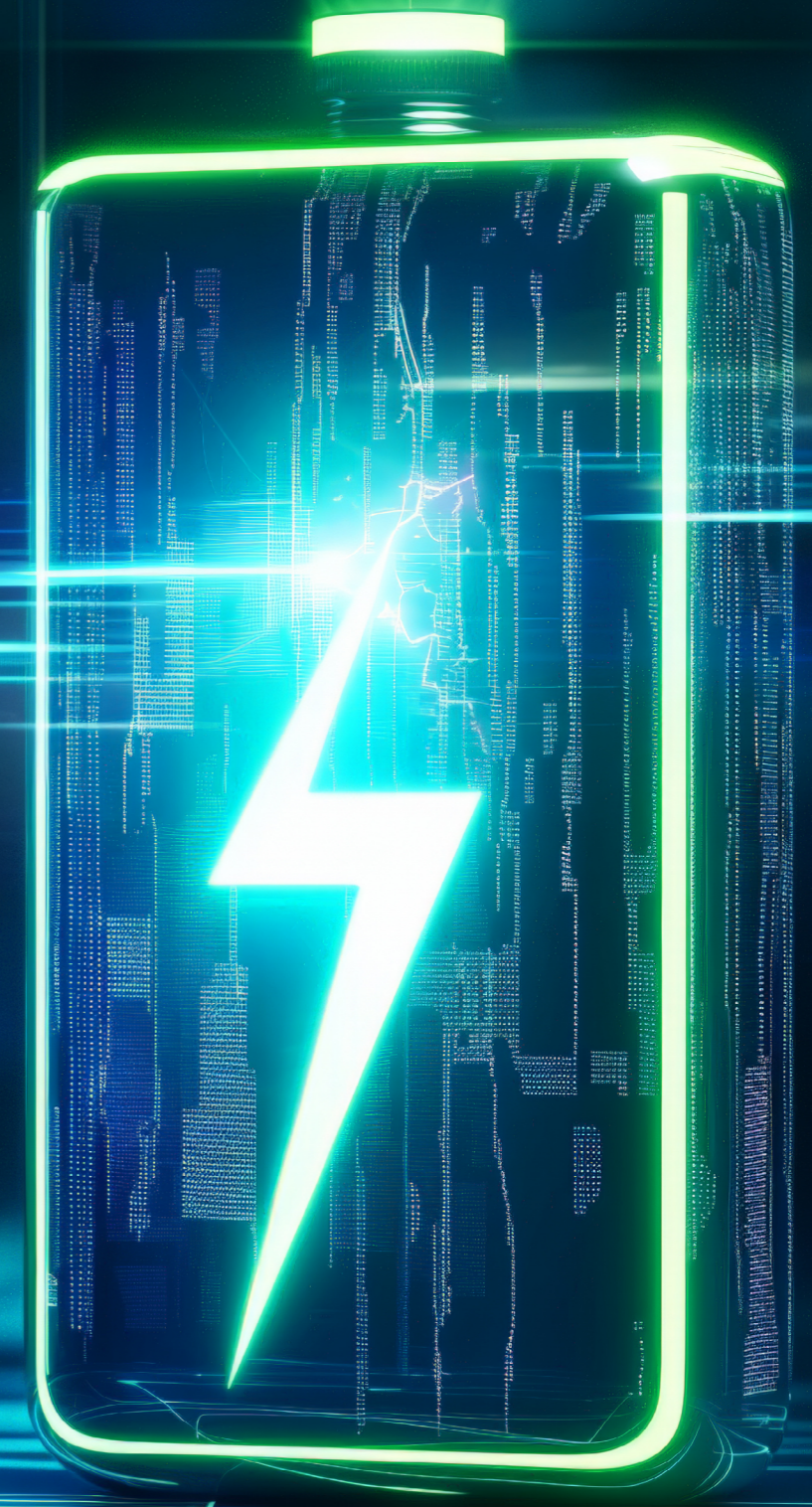
10.24406/publica-6972

Titelbild

IBEX.Media – stock.adobe.com

Inhalt

Impressum	3
1. Executive Summary	6
2. Einleitung	7
3. Technologieüberblick	8
3.1 Internationaler Status Quo	8
3.2 Status Quo in Europa und Deutschland	12
4. Spiegelung mit der Praxis	14
4.1 Anwender	14
4.2 Betreiber von Battery Swapping Stationen und Batteriehersteller	15
4.3 Netz- und Ladeinfrastrukturbetreiber	15
4.4 Original Equipment Manufacturer (OEM)	16
4.5 Akteursübergreifende Aussagen	17
5. Potenziale und TCO	18
5.1 Hemmnisse und Potenziale	18
5.2 TCO	20
6. Handlungsempfehlungen	30
7. Fazit	32
Literaturverzeichnis	34
Abkürzungsverzeichnis	39



1. Executive Summary

Das vorliegende White Paper bewertet Battery Swapping für schwere Nutzfahrzeuge als komplementären Baustein zu Depot-, High Power Charging (HPC)- und perspektivisch Megawatt Charging System (MCS)-Laden. Ausgangspunkt sind verschärfte CO₂-Flottenziele für schwere neue Nutzfahrzeuge sowie praktische Engpässe bei Netzanschlüssen, Flächen und verfügbaren Fahrzeugstandzeiten im operativen Betrieb. Analysiert werden internationale Entwicklungen, der europäische Status quo, Stakeholder-Perspektiven aus der Praxis sowie Total Cost of Ownership (TCO) und Systemeffekte, um Nutzen, Grenzen und Voraussetzungen eines möglichen Roll-outs in Europa einzuordnen.

Technologisch ist Swapping über Demonstratoren hinaus gereift (automatisierter Tausch in wenigen Minuten, sichere Hochvolt-(HV)-Kontaktierung, digitale Orchestrierung); in China existieren skalierende Anwendungen, in Europa dominieren Pilotprojekte und Standardisierungsansätze. Regulatorisch adressiert die EU primär Combined Charging System (CCS)/MCS; Swapping wird bislang nur randständig erfasst. Diese Konstellation erzeugt einen »Proof-under-real-world-conditions«-Bedarf in Europa.

Die Praxisrückmeldungen sind konsistent: Depotladen bleibt Grundpfeiler; öffentliches Schnellladen erschließt die Langstrecke nur langsam. Mehrwert stiftet Swapping dort, wo zeitkritische Prozesse, planbare Korridore und knappe Netz- oder Flächenressourcen zusammenfallen, z. B. Hub-to-Hub-Verkehre im Mehrschichtbetrieb oder 24/7-Werksverkehre. Zentrale Eintrittsbarrieren sind fehlende herstellerübergreifende mechanische Interoperabilität, ungeklärte Eigentums-/Haftungs- und eichrechtliche Fragen (inkl. Rückgabestatus), die Kapitalbindung eines Batterie-Pools sowie Anforderungen an Redundanz und Verfügbarkeit der Stationstechnik.

Ökonomisch ist Battery Swapping kontextabhängig: Vorteilhaft wirken kurze Wechselzeiten (geringere Opportunitätskosten), potenzielles »Right-Sizing« der fahrzeugseitigen Batterie, Battery-as-a-Service (BaaS)-Modelle mit geringerer Kapitalbindung für Nutzende sowie planbare Lastprofile. Dem stehen zusätzliche Investitionen in automatisierte Wechselstationen und einen Batteriepool für den Betreiber gegenüber. Battery Swapping Stationen weisen hierbei aber Ähnlichkeiten zu

HPC-/MCS-Ladepunkten in der Auslastungsabhängigkeit auf, da beide Systeme einen gewissen Nutzungsgrad benötigen. In hochfrequenten, gut planbaren Einsatzprofilen können sich diese Mehrinvestitionen durch höhere Fahrzeugdurchschleusungen, geringeren Flächenbedarf und eine bessere Planbarkeit der Fahrzeugslots jedoch amortisieren; der Organisationsaufwand sinkt im Vergleich zu reinem Ad-hoc-Laden. Systemisch kann Swapping im Gegensatz zu Depotladen, wenn keine stationären Batteriespeicher eingesetzt werden, lokale Lastspitzen glätten, Anschlussengpässe überbrücken und folglich potenzielle, stationär vorzuhaltende Kapazitäten obsolet machen. Insgesamt ist Swapping kein Ersatz, sondern eine Ergänzung bzw. ein Beschleuniger elektrischer Logistik in klar umrissenen Use-Cases.

Für einen belastbaren Roll-out werden drei Stränge empfohlen:

1. Technische Referenzarchitektur (Wechselformat, HV/Kühlung/Kommunikation, SoH/SoC-Transparenz, Interoperabilitätstests),
2. Compliance-Pfad (eichrechtsfeste kWh-Abrechnung, eindeutige Eigentums-/Haftungslogik, Bau-/Brand-/Betriebs-sicherheit)
3. Betrieb & Marktorganisation (offene Protokolle, Reservierung/Zugang/SLA, Fallback via HPC/MCS, grenzüberschreitende Clearing-Prozesse).

Ein »perfekter« Zeitpunkt existiert nicht. Sinnvoll sind jetzt standardoffene Korridor-Piloten mit Ankerflotten als Ergänzung zum CCS- und MCS-Hochlauf, die auf den Masterplan Ladeinfrastruktur 2030 der Bundesregierung einzahlen, um technische, regulatorische und ökonomische Fragen unter Realbedingungen zu adressieren; auch um zu vermeiden, dass außereuropäische Lösungen de-facto-Standards setzen.

2. Einleitung

»Die Elektrifizierung schwerer Nutzfahrzeuge muss beschleunigt werden.«

Schwere Nutzfahrzeuge (Lkw, Busse und Reisebusse) verursachen mehr als ein Viertel der Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs in der EU und über 6 % der gesamten EU-Emissionen (European Commission 2025). Im Zuge dessen sind 2024 die EU-CO₂-Standards für neue schwere Nutzfahrzeuge verschärft worden: Neben dem fortgeltenden -15 %-Ziel ab 2025 gelten nun Emissionsminderungsziele von -45 % ab 2030, -65 % ab 2035 und -90 % ab 2040 im Vergleich zum Referenzjahr 2019 (Verordnung (EU) 2024/1610) (European Parliament & Council 2024).

Vor diesem Hintergrund bildet die Antriebswende und damit die Flottenelektrifizierung von transportierenden Unternehmen einen großen Hebel, die politisch-strategische Zielerreichung maßgeblich zu unterstützen. Die Elektrifizierung schwerer Nutzfahrzeuge ist für transportierende Unternehmen jedoch betriebslogistisch und technisch anspruchsvoller als von leichten Nutzfahrzeugen oder Pkw: hohe Tagesfahrleistungen, enge Zeitfenster, große Energiemengen je Stopp, Flächenknappheit an logistisch stark frequentierten Standorten sowie die Notwendigkeit verlässlicher Planbarkeit sind einige Problemstellungen. Wenn Deutschland und die EU bis 2045 bzw. 2050 Klimaneutralität erreichen möchten und der Verkehrssektor hierzu maßgeblich beitragen soll, muss die Elektrifizierung schwerer Nutzfahrzeuge trotz dieser Hürden beschleunigt werden.

Battery Swapping könnte als komplementäre Elektrifizierungsoption schwerer Nutzfahrzeuge dazu beitragen, diese Hürden zu reduzieren und in Teilen zu überwinden. Energie wird innerhalb weniger Minuten durch den Tausch einer vorab geladenen Batterie bereitgestellt, anstatt das Fahrzeug während längerer Standzeiten zu laden. Damit lassen sich Standzeiten

minimieren, Batteriegrößen bedarfsgerechter dimensionieren und Ladeprozesse in Stationen verlagern, wo sie netzdienlich gesteuert werden können.

Das vorliegende White Paper versteht sich als Impulsgebung für eine aktorsübergreifende Diskussion zwischen Anwendern, Original Equipment Manufacturers (OEM), Netz- und Ladeinfrastrukturbetreibern, der Politik sowie der Forschung. Es verknüpft technologische, betriebswirtschaftliche und energiesystemische Perspektiven, ordnet internationale Erfahrungen und Entwicklungen für europäische Rahmenbedingungen ein und formuliert schließlich konkrete, differenzierte Handlungsvorschläge. Das folgende dritte Kapitel legt dazu zunächst die Basis für das gemeinsame Verständnis des Konzepts Battery Swapping. Es beinhaltet die Definition und Abgrenzung zu anderen Ladestrategien sowie eine Darstellung des Status quo in Asien, Europa und Deutschland. Dabei wird auf bestehende Projekte und internationale Entwicklungen eingegangen. Anschließend werden diese Erkenntnisse mit ExpertInnen aus der Praxis gespiegelt (siehe Kapitel 4), um Potenziale und Hemmnisse des Konzepts gegenüberzustellen und entsprechend den Akteursgruppen einzuordnen. Darauf aufbauend werden im fünften Kapitel diese Aussagen reflektiert, um die wichtigsten Rahmenbedingungen zu identifizieren, die für die Einführung von Battery Swapping auf dem europäischen Markt relevant sind. Dazu werden auch potenziell erfolgversprechende Einsatzfelder abgeleitet dargestellt, in denen Battery Swapping Vorteile gegenüber dem kabelgebundenen Laden besitzen kann. In diesem Zusammenhang werden auch wichtige Kostenpositionen dargestellt. Den Abschluss bilden aktorsübergreifende Handlungsempfehlungen, um mögliche nächste Schritte für einen weiteren Roll-out zu skizzieren.

3. Technologieüberblick

Battery Swapping bezeichnet den (weitgehend) automatisierten Austausch entladener Traktionsbatterien gegen vollgeladene Einheiten in speziell dafür eingerichteten Stationen. Die wechselbaren Batteriemodule (engl. Swappable Battery Systems (SBS)) werden dabei z. B. von unten oder seitlich aus dem Fahrzeug entnommen und ersetzt. Fahrzeuge verbringen nur die Swap-Zeit, plus einer eventuellen Wartezeit, in der Station, während das eigentliche Laden der Batterien in den Stationen netz- und preisoptimiert erfolgen kann. Damit kann die zeitliche Abhängigkeit des Ladevorgangs vom Fahrzeugbetrieb reduziert bzw. entkoppelt werden. Für den schweren Straßengüterverkehr ist dieser Entkopplungseffekt besonders bedeutsam, weil er hohe Verfügbarkeiten bei gleichzeitig beherrschbarer Netzlast erlaubt. Dies wird durch ein Vor- bzw. Nachladen der Batterien mit vergleichsweise geringer Ladeleistung ermöglicht.

Der technische Reifegrad des Battery Swappings für schwere Nutzfahrzeuge ist heute deutlich über das Stadium von Demonstratoren und Piloten hinaus entwickelt. Die Kernfunktionen wie das mechanisierte Aus- und Einbringen der Traktionsbatterien, die sichere elektrische Kontaktierung, digitale Identifikation und Freigabe, sowie eine vernetzte Betriebs- und Ladeführung, wurden international und auch in Europa bereits umgesetzt. Die internationalen und europäischen technischen und regulatorischen Entwicklungen werden nachfolgend dargestellt.

3.1 Internationaler Status Quo

3.1.1 Internationale Entwicklungen

Diverse internationale Unternehmen sind im Bereich der technischen Umsetzung des Battery Swappings für schwere Nutzfahrzeuge aktiv. Insbesondere Unternehmen aus dem asiatischen Raum setzen Battery Swapping zum Teil bereits im industriellen Maßstab um, wobei sich insbesondere in China die Entwicklungen zunehmend beschleunigen.

Bereits 2021 wurden erste Pilotrouten mit Tauschkorridoren in China eingerichtet (siehe Kapitel 3.1.2) und seitdem wachsen die absoluten Zulassungszahlen swap-fähiger schwerer Nutzfahrzeuge zunehmend: Im Jahr 2020 waren erst rund 600 swap-fähige schwere Lkw in China zugelassen (siehe Abbildung 1). Das entsprach zu dem Zeitpunkt rund 23 % der neu zugelassenen, schweren New Energy Vehicles (NEV), wozu batterie-elektrische Fahrzeuge, Plug-in-Hybride und auch Brennstoffzellenfahrzeuge zählen. Im Jahr 2024 waren es bereits 28.700 Fahrzeuge (Marktanteil rund 35 % an NEV) (He 2025; Wang 2024). In der Hochlaufphase bis 2022 fungierte Battery Swapping folglich als Wachstumstreiber (rund 49 % der NEV) innerhalb des noch jungen BEV-Segments schwerer Nutzfahrzeuge. Gleichzeitig war nach dem Peak auch 2024 weiterhin rund jedes dritte neu zugelassene schwere Nutzfahrzeug in China swap-fähig. Gründe für dieses Einpendeln des Anteils

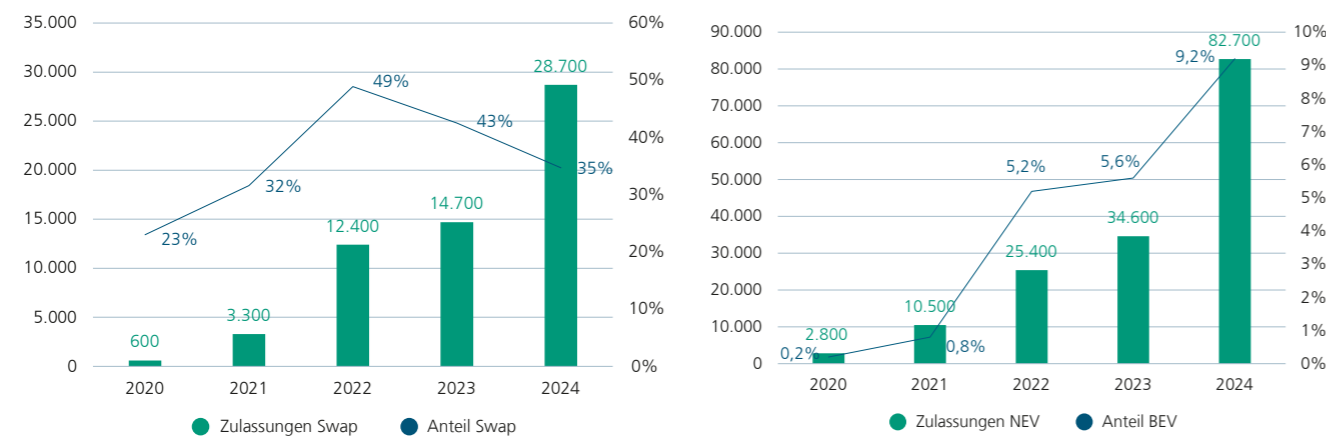


Abbildung 1: Zulassungszahlen swap-fähiger schwerer Nutzfahrzeuge, ihr Anteil an NEV in China und Zulassungszahlen NEV und Anteil BEV am Gesamtbestand schwerer Nutzfahrzeuge im Zeitraum 2021 bis 2024 (He 2025; Wang 2024)

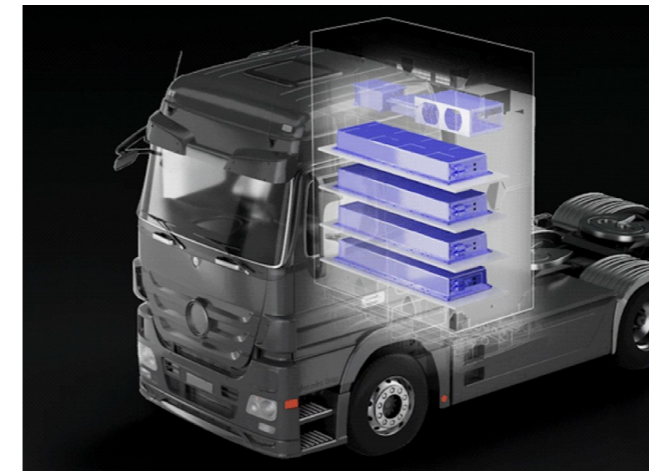


Abbildung 2: Wechselmöglichkeiten des Unternehmens CATL (Bildquellen: CATL)

swap-fähiger Fahrzeuge sind eine zunehmende Diversifizierung der Gesamtpalette an NEV und elektrischen Nutzfahrzeugen sowie die Beschleunigung der Marktdiffusion dieser Fahrzeuge.

Contemporary Amperex Technology Co. Limited (CATL) ist eines der Unternehmen, das die Entwicklungen in China maßgeblich vorantreibt. Branchenanalysen zufolge dominiert CATL den chinesischen Markt für Traktionsbatterien in batterie-elektrischen schweren Nutzfahrzeugen mit einem Marktanteil von rund 70 % (ThinkerCar 2025). CATL hat das Battery Swapping für Nutzfahrzeuge entlang einer Evolutionslinie von heckseitig wechselbaren Komplettgehäusen (»Back-swap«) hin zu bodenseitig wechselbaren, standardisierten Batteriemodulen (»Bottom-swap«) entwickelt (siehe Abbildung 2). Beide Systeme werden in eine Vielzahl chinesischer Nutzfahrzeugbaureihen integriert (u. a. Zugmaschinen, Baufahrzeuge, Verteiler-Lkw). CATL kooperiert hier im asiatischen Raum u. a. mit BYD, FOTON und SANY (He 2025).

2023 hat CATL ein integriertes System für den Lkw-Batterietausch (Marke QIJI) vorgestellt und 2025 einen standardisierten 75# Swapping Electric Block SEB für schwere Nutzfahrzeuge spezifiziert (Randall 2025). Für den Schwerlastbereich betreibt CATL mit »QIJI Energy« seit 2023 die erste explizite Trunk-Line für Lkw zwischen Ningde und Xiamen (rund 420 km) mit vier Stationen (CATL 2023). Dieses umfassende System besteht u. a. aus Battery Swapping Stationen, Batteriepacks und einer cloudbasierten Plattform. Kunden können je nach Bedarf und Anwendung zwischen einem, zwei oder drei Batteriepaketen wählen. Jedes Batteriepaket bietet eine Kapazität von 171 kWh, was in Summe eine maximale Kapazität von 513 kWh ermöglicht. Nach Unternehmensangaben werden die Stationen mit je 24 Packs ausgelegt und ermöglichen maximal 192 Swaps pro Tag. Für 2025 kündigte CATL den Aufbau von 300 Lkw-Tauschstationen in China an. Zudem sollen die Batteriepakete der neuen Generation jeweils 200 kWh Kapazität haben (He 2025).

Auf der Fahrzeug- und Betreiberseite lässt sich eine Ausweitung der Kompatibilitäts- und Plattformstrategien beobachten. Die OEM NIO und Geely vereinbarten Ende 2023 im Pkw-Segment eine Kooperation zu Standardisierung, Netzbetrieb und beiderseitiger Kompatibilität; 2024 folgten weitere Abkommen, u. a. mit Guangzhou Automobile Group (GAC), mit Fokus auf gemeinsame Standards, netzseitige Öffnung und Daten-Interoperabilität. Zusätzlich arbeiten NIO und CATL an längerlebigen Packs für Tauschsysteme (Ziel: hohe Restkapazität auch nach langjährigem Einsatz), was die Lebenszykluskosten in Batterie-as-a-Service (BaaS)-Geschäftsmodellen senken soll. Die Hersteller Anhui Jianghuai Automobile (JAC) und CATL haben 2025 ein System vorgestellt, das Battery Swapping in nur 150 Sekunden ermöglicht. Sie planen, bis Ende 2025 etwa 1.000 solcher Swap-Stationen in China aufzubauen (27 Städte waren Mitte 2025 bereits versorgt) und langfristig auf 10.000+ Stationen zu erweitern (Hampel 2025a). Weitere Ausbaukooperationen umfassen den Energie- und Tankstellennetzbetreiber Sinopec zur massiven Verdichtung von Wechselstandorten (CATL 2025).

Geely, ein weiterer chinesischer Automobilkonzern und Kooperationspartner von CATL, zeigt ebenfalls Battery Swapping Stationen für schwere Nutzfahrzeuge und adressiert mit einem ihrer Systeme Baufahrzeuge (u. a. Betonmischer). Bei den Nutzfahrzeugen sitzt das Wechselbatteriesystem als abgeschlossene Einheit hinter dem Fahrerhaus (»Back-swap«). Statt eines Unterflur-Wechsels hebt ein Portalkran den etwa 3,2 t-Batterieblock automatisiert heraus und setzt einen vollgeladenen Block ein. Der gesamte Wechselvorgang dauert laut Geely rund fünf Minuten und wird per Scan eines QR-Codes, den der Fahrer vorzeigen muss, gestartet; inklusive Radführungen zur Positionierung (siehe Abbildung 3). Geely beziffert die Batteriekapazität mit 280 kWh, womit die Fahrzeuge eine Reichweite von rund 190 km bei gleichzeitiger Stromversorgung der Nebenaggregate erreichen. Die Stationen sind modular aufgebaut und optional mit



Abbildung 3: Betrieb einer Swapping Station für Betonmischer (Bildquellen: Geely)

PV-Aufdachkomponenten ausgestattet. Stationen bevorraten typischerweise acht Packs, laden diese in etwa einer Stunde von 0 auf 100 % und können so »bis zu 50 Fahrzeuge« bedienen (Geely 2022).

Auch in anderen Ländern wird Battery Swapping erprobt bzw. bereits operativ eingesetzt: In Japan pilotiert ein Joint Venture von Mitsubishi Fuso mit dem US-Swap-Anbieter Ample seit 2023 Battery Swapping für Verteiler-Lkw in Tokio. Seit 2025 wird das Konzept in ein Netz von Stationen in Tokio, das zunächst auf Flotteneinsätze ausgerichtet ist, expandiert. Die Kyoto-Erprobung mit Yamato Transport belegt die Eignung für Kurier- und Lieferprofile im realen Straßenverkehr (Hampel 2025b; Westerheide 2024; Hampel 2023a). Der australische Hersteller Janus Electric rüstet Lkw mit austauschbaren Batteriesystemen aus und erreicht damit Reichweiten von 400 bis 600 km (Hampel 2021). Darüber hinaus sind in Südostasien binnen kurzer Zeit großvolumige Flottenanwendungen entstanden.

Thailand kündigte 2025 die Einführung von 4.200 swap-fähigen E-Lkw an; zugleich eröffnete U Power in Phuket die erste vollautomatisierte »Smart«-Tauschstation Südostasiens und vereinbarte mit Beijing Foton die Zusammenarbeit für das Battery Swapping schwerer Nutzfahrzeuge in Märkten innerhalb und außerhalb Südostasiens (Parikh 2025a). Indien nahm 2025

seine erste swap-fähige Schwerlast-E-Lkw-Flotte am Hafen JNPT in Mumbai in Betrieb und setzt auf kurze Tauschzeiten zur Sicherung hoher Verfügbarkeit (Parikh 2025b). Bis 2028 sollen in diesem Zusammenhang 4.500 swap-fähige Fahrzeuge in die Flotte aufgenommen und 60 Wechselstationen errichtet werden (He 2025).

Auch außerhalb des Logistiksektors werden Nutzfahrzeuge mit swap-fähigen Batterien bereits eingesetzt. Das Unternehmen Rio Tinto testet seit 2024 Batterietauschlösungen für elektrische Muldenkipper (Rio Tinto 2025). 2025 ging in der Mongolei die weltweit größte Flotte autonomer batterie-elektrischer Muldenkipper (100 Fahrzeuge) in Betrieb; die Fahrzeuge arbeiten im Dreischichtsystem, die Tauschzeit liegt bei rund sechs Minuten (Huawei 2025).

3.1.2 Regulatorik

Die internationalen Regulierungs- und Standardisierungsaktivitäten werden maßgeblich von China vorangetrieben. Die chinesische Regierung verankert Battery Swapping seit Anfang der 2020er-Jahre systematisch in ihrer Industrie- und Infrastrukturpolitik und verbindet Strategie, Pilotförderung, Normung sowie Preis-/Tarifregeln zu einem kohärenten Anreizsystem. Ausgangspunkt ist der »Entwicklungsplan für die NEV-Industrie (2021–2035)«, der den Auf- und Ausbau

von Lade- und Wechsellinfrastruktur, die Standardisierung und Harmonisierung von Steckersystemen, Schnittstellen, Kommunikation sowie die Integration in intelligente Energie- und Datenplattformen vorsieht. Der Plan fordert u. a. die Verbesserung der Wechsel-Convenience in den ersten fünf Jahren und die Adressierung eines Standardisierungs- und Sicherheitsrahmens. Gleichzeitig sind keine numerischen Ausbauziele für Wechselstationen gesetzt worden (ICCT 2021). Die Vorgaben schaffen allerdings Planungs- und Investitionssicherheit für nachgelagerte Ressortpolitik und Normung.

Die chinesische Regierung hat in diesem Zusammenhang 2021 zunächst elf Pilotstädte benannt, davon drei speziell für schwere Nutzfahrzeuge, und sich das Ziel gesetzt mehr als 100.000 swap-fähige Fahrzeuge und mehr als 1.000 Stationen in diesen Piloten zu fördern. Zahlreiche Förderprogramme wurden implementiert, z. B. Zuschüsse von 300 CNY/kWh beim Kauf von E-Lkw mit Wechselbatterie in Sichuan oder 1 Mio. CNY pro neuer Swap-Station in Städten wie Peking und Shanghai (Wang 2024; Zhu 2022).

Parallel entstand ein umfassendes Normenwerk: Bis 2022 waren in China nahezu 50 Standards zum Batterietausch verabschiedet; darunter nationale Normen für Kommunikationsprotokolle der Wechselbatterie (GB/T 32895-2016 mit einem

Update im Jahr 2025 auf GB/T 32895-2025), Auslegungsrichtlinien für Swap-Stationen (GB/T 51077-2015 mit einem Update im Jahr 2025 auf GB/T 51077-2024) und Sicherheitsanforderungen (NB/T 10903-2021). Auf Provinzebene wurden zudem technische Vorgaben speziell für das Battery Swapping im Schwerlastsegment erlassen, etwa Standardmaße für Lkw-Batterien und Schnittstellenkompatibilität (z. B. in Hebei und Jiangsu 2022) (Wang 2024). Wie in Kapitel 3.1.1 dargestellt, hat diese staatliche Unterstützung Wirkung gezeigt und zu einer Beschleunigung der Marktdynamik geführt.

Auf Unternehmensebene bilden groß angelegte Joint Ventures und Partnerschaften über OEM-übergreifende Kooperationsabkommen den industriellen Rahmen für Standardisierungsprozesse und die Stärkung des Roll-outs. Bereits 2022 ist ein Joint Venture von SAIC, CATL, Sinopec und CNPC zur Errichtung von Battery Swapping Stationen gegründet worden, während die 2025 bekräftigte Vereinbarung von CATL und Sinopec die Erweiterung eines kombinierten Pkw- und Lkw-Netzes vorsieht (Hampel 2022; CATL 2025). Solche Abkommen bündeln Kompetenzen von Fahrzeugherstellern sowie Zell-/Systemanbietern. Dies erleichtert neben der fahrzeugseitigen Definition von Standards auch die Erschließung von Standorten und unterstützt zugleich BaaS-Geschäftsmodelle, wodurch die Investitionsausgaben (engl. Capital Expenditures



Abbildung 4: Beispiele internationaler Entwicklungen im Bereich Battery Swapping schwerer Nutzfahrzeuge (Bildquellen: Rio Tinto, Huawei, Montra Electric, Mitsubishi) (im Uhrzeigersinn)

(CAPEX)) der Traktionsbatterien vom Fahrzeug für die Nutzen entkoppelt werden können. Vereinbarungen von NIO mit Geely (2023) sowie GAC (2024) adressieren gemeinsame Batteriestandards, Kompatibilität von Fahrzeugen und Netz-Interkonnektivität inklusive dynamischer Datenverknüpfung. Solche Modelle begünstigen Netzöffnungen und Skaleneffekte. Für Europa ist die Übertragung des chinesischen Geschäftsmodells bereits Gegenstand konkreter Gespräche und wird von CATL, als Hersteller mit dem größten Marktanteil (rund 70 %) (ThinkerCar 2025) von Traktionsbatterien für schwere Nutzfahrzeuge auf dem chinesischen Markt, forciert. Flankierend existiert bereits ein, wenn auch noch kleines, Referenznetz von NIO in mehreren EU-Ländern (Westerheide 2025; Randall 2024; Hampel 2023b).

Außerhalb Chinas gibt es bislang kaum spezifische Regulierungen. In Japan und Australien laufen Battery Swapping Projekte meist im Rahmen privater Kooperationen ohne besondere gesetzliche Privilegien. Nordamerika forciert bislang stärker die kabelgebundene Ladeinfrastruktur; Battery Swapping wird hier nicht explizit in Förderprogrammen oder Lade-Standards adressiert (Näbo et al. 2024). Allerdings arbeitet die International Electrotechnical Commission (IEC) international an Normierungen wie der IEC 62840-1:2025 (Electric vehicle battery swap system - Part 1: General and guidance) und IEC 62840-2:2025 (Electric vehicle battery swap system - Part 2: Safety requirements), die einerseits einen allgemeinen Überblick geben, aber andererseits auch Sicherheitsanforderungen an Battery Swapping Systeme von batterie-elektrischen Fahrzeugen beschreiben (IEC 2025a; IEC 2025b).

3.2 Status Quo in Europa und Deutschland

In den letzten Jahren haben sich in Europa unterschiedliche Aktivitäten, insbesondere im Bereich der Pilotierung und



technischen Erprobung, rund um das Thema Battery Swapping für schwere Nutzfahrzeuge entwickelt, die nachfolgend dargestellt werden.

3.2.1 Praxis

Im Vergleich zu den internationalen Entwicklungen, die bereits in Teilen industrielle Maßstäbe erreicht haben (siehe Kapitel 3.1.1), sind die Entwicklungen in Deutschland und Europa primär im Bereich der Forschungsvorhaben bzw. Prototypenentwicklung zu verorten. Deutschland zählt hierbei zu den aktivsten Ländern Europas im Bereich des Battery Swappings schwerer Nutzfahrzeuge. Von 2016 bis 2020 wurde das Forschungsprojekt RouteCharge vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert. Die Spedition Meyer & Meyer erprobte in diesem gemeinsam mit dem Fraunhofer IPK, der TU Berlin und weiteren Partnern einen swap-fähigen 19 t batterie-elektrischen Lkw, der auf einer rund 500 km langen Route zwischen Peine und Berlin zwei 2.000 kg-Batteriemodule an drei Wechselstationen tauschte. Mit 30 Minuten lag die Wechselzeit durch einen eingewiesenen Fahrer und Stapler noch bedeutend über Vergleichswerten von heutigen automatisierten Wechselstationen (RouteCharge Konsortium 2020).

Aufbauend auf dem RouteCharge-Projekt mit manuell unterstütztem Wechsel zeigen die jüngsten Ergebnisse des eHaul-Projektes, dass ein vollautomatisierter Wechsel infrastrukturell, betrieblich und sicherheitstechnisch beherrschbar ist. Zwei Sattelzugmaschinen mit einem Zuggesamtgewicht von 42 t auf Basis von Designwerk-Fahrzeugen sind hierzu im Raum Berlin/Brandenburg bis nach Dresden eingesetzt worden und nutzen eine vollautomatisierte Wechselstation bei Berlin mit Tauschzeiten zwischen acht und zehn Minuten, die im November 2023 in Betrieb ging (siehe Abbildung 5). Die dabei entwickelten Standards und Betriebsprozesse sollen künftig skalierbar ausgerollt werden (Jerratsch et al. 2025; Fraunhofer IVI



Abbildung 5: Battery Swapping Station des e-Haul Projektes sowie Prototyp des Swapping-Moduls für Trailer von Trailer Dynamics (Bildquellen: TU Berlin, Sustainable Truck&Van)

2024). Zusätzlich setzt hier das Forschungsprojekt UniSwapHD (Unified swappable battery for heavy duty commercial vehicles) mit der Zielsetzung der Entwicklung eines Standardisierungskonzepts für wechselfähige Traktionsbatterien auf (TU Berlin 2025). Aus den obigen Projekten gründete sich 2024 die E-Haul GmbH aus (eHaul GmbH 2025). Auch die IBAR Systemtechnik GmbH als Projektpartner in Brandenburg setzt erste Impulse im Bereich Battery Swapping und plant für 2025 die Ausgründung der AkkuSwap GmbH (AkkuSwap powered by IBAR Systemtechnik GmbH 2025). Beide Unternehmen zielen darauf ab, das Ökosystem von Battery Swapping Stationen für schwere Nutzfahrzeuge weiterzuentwickeln.

Parallel dazu haben Trailer Dynamics GmbH, DB Schenker und CATL eine Initiative angestoßen, um die Battery-Swapping-Technologie für Elektro-Anhänger in Europa zu lancieren. Dabei steht eine Machbarkeitsstudie zur Einrichtung von Battery Swapping Stationen im Zentrum, die den Bedarf an elektrifizierten Anhängern und potenziell Lkw in Europa decken sollen. Diese Industriekooperation zielt darauf ab, die Effizienz und Wirtschaftlichkeit der Batterieladung im Schwerlastverkehr zu verbessern, indem sie den schnellen Austausch von Batterien ermöglicht und dadurch die Reichweite und Betriebszeit von Elektrofahrzeugen erhöht. Mit einer Wechselzeit von 5 Minuten und der Möglichkeit, je nach Bedarf verschiedene Batteriemodule zu wählen, verspricht das System eine höhere Fahrzeugverfügbarkeit, bessere betriebliche Effizienz und eine geringere Abhängigkeit von herkömmlicher Ladeinfrastruktur. Hierfür ist ein Prototyp eines eTrailers mit Wechselbatterie entwickelt worden, der auf der IAA Transportation 2024 vorgestellt wurde (siehe Abbildung 5) (Deutsche Bahn AG 2024).

Auch das schweizerische Unternehmen Designwerk Technologies, heute Teil der Volvo Group, hat die Entwicklungen im Bereich des Battery Swapping vorangetrieben. Das Unternehmen bietet modulare, tauschfähige Traktionsbatterien an. Im eHaul-Projekt wurde die Fahrzeug-Batterieschnittstelle zusammen mit der TU Berlin automatisiert, sodass der Wechsel mit entsprechendem Fahrzeug in wenigen Minuten automatisch erfolgen kann. Designwerk versteht Battery Swapping als strategische Ergänzung zum Megawatt Charging System (MCS) insbesondere für Flotten mit definierten Streckenprofilen (Designwerk 2025).

In Großbritannien präsentierte das Glasgower Startup Tual Technology im Jahr 2024 ein modulares Wechselbatteriesystem für schwere Nutzfahrzeuge. Die »PowerBank Pro«-Module (120 bzw. 180 kWh) sollen in wenigen Minuten einen automatisierten Tausch ermöglichen. Laut Unternehmen positioniere sich das System als Alternative zum noch im Aufbau befindlichen MCS-Ladenetz (Reichel 2024).

3.2.2 Regulatorik

In Förderprogrammen und regulatorischen Rahmenwerken der EU, bspw. der Alternative Fuels Infrastructure Regulation (AFIR), wird Battery Swapping bislang nur marginal berücksichtigt und es werden keine politischen Leitplanken für eine Einführung in der EU gesetzt. Im Mittelpunkt steht der Ausbau standardisierter Ladeinfrastruktur für batterie-elektrische schwere Nutzfahrzeuge; kurz- bis mittelfristig über das Combined Charging System (CCS) und perspektivisch über MCS für besonders hohe Ladeleistungen. Ergänzt werden diese regulatorischen Maßnahmen um depotnahes Laden sowie die parallele Weiterentwicklung der Wasserstoffbetankung. Für das öffentliche Schnellladen wird ein Nebeneinander von CCS und MCS erwartet, wobei MCS langfristig eine zentrale Rolle einnehmen könnte (European Parliament & Council 2023a).

Mit Blick auf Battery Swapping wird primär auf internationale Entwicklungen verwiesen, insbesondere auf die (technologischen) Entwicklungen und Investitionen in China (siehe Kapitel 3.1). Für den EU-Kontext werden jedoch weder konkrete Ziele noch Maßnahmen formuliert; vielmehr wird betont, dass die potenzielle Rolle von Swapping im Schwerlastverkehr noch zu klären sei und hierfür eine breite Abstimmung zwischen Fahrzeugherstellern erforderlich wäre. Eine vertiefte Auseinandersetzung mit dem Konzept bleibt somit offen (Council of the European Union 2025).

Auf technischer Ebene wird diese Lücke jedoch zunehmend durch erste Normungsaktivitäten adressiert. So befindet sich mit der geplanten DIN SPEC »Battery swapping systems for electric heavy duty vehicles for range extension«, basierend auf den Ergebnissen des UniSwapHD-Forschungsprojektes der TU Berlin, ein möglicher Konsortialstandard in Vorbereitung, der Schnittstellen und Rahmenparameter von Batteriewechselsystemen für schwere Nutzfahrzeuge definiert, ohne jedoch rechtsverbindliche Vorgaben zu setzen (DIN 2025).

Im Masterplan Ladeinfrastruktur 2030 des Bundesministeriums für Verkehr (BMV) wird die »Erprobung von Batteriewechselsystemen für E-Lkw« auf Ebene der Bundesrepublik als Maßnahme definiert. Die im Plan enthaltenen Maßnahmen sollen dazu dienen, »(...) die Rahmenbedingungen für den Aufbau von Ladeinfrastruktur zu verbessern und den Verbrauchern die komfortable Nutzung von Elektrofahrzeugen zu ermöglichen.« (BMV 2025, S. 7)

4. Spiegelung mit der Praxis

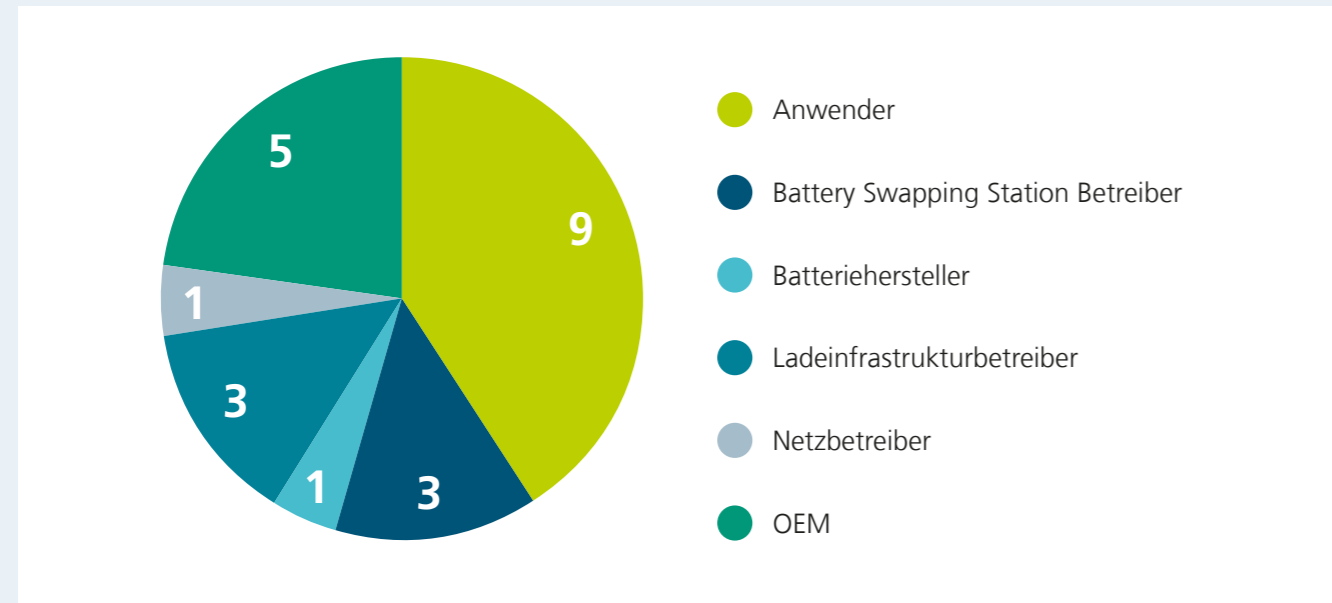


Abbildung 6: Expertengespräche gruppiert nach Akteursgruppen (Summe: 22)

Im Rahmen des Whitepapers wurden mit diversen Unternehmen Expertengespräche zum Einsatz schwerer, batterieelektrischer Nutzfahrzeuge geführt. Zielsetzung war es, die Perspektiven unterschiedlicher Stakeholder zum Thema Elektrifizierung schwerer Nutzfahrzeugflotten und der potenziellen Bedeutung des Battery Swappings, insbesondere für den europäischen und deutschen Raum, abzubilden. Im Rahmen dieses Kapitels werden die Erkenntnisse dieser Gespräche konsolidiert nach Akteursgruppen neutral dargestellt¹.

4.1 Anwender

Logistikunternehmen bewerten Battery Swapping überwiegend als komplementäre Option zu Depot- und öffentlichem HPC/MCS-Laden mit klaren Vorteilen in planbaren Korridoren und Mehrschicht-Betrieben. Der Hauptnutzen könne in deutlich verkürzten Stillstandszeiten durch Tauschvorgänge sowie in der Entkopplung von Energieaufnahme und Tourenplanung

liegen, was insbesondere dort relevant ist, wo Hofinfrastruktur, Fläche und Mittelspannungsanschlüsse zu Engpässen werden. Gleichzeitig bleibt Depotladen der operative Grundpfeiler. Mit steigendem Hochlauf der schweren Nutzfahrzeuge werden Kapazitäts- und Flächenrestriktionen jedoch zum Treiber für ergänzende Ladekonzepte an Knotenpunkten, um einen höheren Fahrzeugdurchsatz zu ermöglichen.

Operativ werden vor allem fünf (potenzielle) Vorteile genannt:

- kurze Tauschvorgänge (in Projekterfahrungen fünf bis zehn Minuten), die die Ladezeit von der Tour entkoppeln und die Einhaltung von Lenk- und Ruhezeiten besser mit der Energieaufnahme synchronisieren.
- höhere Flexibilität bei Prozessstörungen durch Staus, Umleitungen oder Fahrzeugdefekten, da sich ein fünfminütiger Batterietausch besser in die vorhandene Ladeplanung integrieren lässt als ein einstündiger Ladevorgang.

¹ Im Fokus der Expertengespräche stand der Einsatz batterieelektrischer schwerer Nutzfahrzeuge. Andere Antriebsenergien wie der Einsatz von bspw. HVO 100 oder Bio-LNG ist nicht Schwerpunkt der Expertengespräche gewesen.

- eine gleichmäßigere Netznutzung, weil Batterien außerhalb der Fahrzeugnutzung schonend und preisoptimiert geladen werden können.
- ein kleinerer Flächen- und Spitzenlastbedarf am Standort im Vergleich zu großen High Power Charging-(HPC)-Ladepunkten.
- bei entsprechendem Geschäftsmodell Vorteile in der Finanzierung durch Pay-Per Use und weniger Risiko, weil der Anwender nicht mehr »Eigentümer« der Batterie ist. Die Kapitalintensität sinkt, da ein Großteil der Kosten des batterieelektrischen Lkw durch die Batterie verursacht wird.

Diese Punkte werden ausdrücklich mit der Erwartung verknüpft, dass Fahrzeuge einerseits swap-fähig sein und andererseits kabelgebunden laden können müssen. Gleichzeitig würden klare Service Level Agreements und Buchungsoptionen mit Betreibern von Swapping Stationen verfügbare Energiekapazitäten absichern.

Viele der interviewten Unternehmen rechnen daher mit einem strukturellen Mix aus Depotladen, semi-öffentlichen Lösungen und je nach Region öffentlichen Angeboten, die allerdings nur bei passenden Energiepreisen und kurzen Zu-/Abfahrtswegen tragfähig erscheinen. Vor diesem Hintergrund gewinnt Battery Swapping als Ergänzung, die potenziell einen höheren Fahrzeugdurchsatz ermöglicht, an Attraktivität. Unterstrichen wird zudem die Struktur des Logistiksektors, indem der Subunternehmeranteil oftmals hoch ist und nicht jedes Transportunternehmen einen eigenen Mittelspannungsanschluss realisieren kann. Insgesamt wird Battery Swapping nicht als Ersatz für das kabelgebundene Laden verstanden, aber als ernstzunehmender Baustein zur Entschärfung von Netz-, Flächen- und Zeitrestriktionen im Hochlauf; sofern Standardisierung, Betreiberrolle, Abrechnung und Verfügbarkeiten gelöst werden.

4.2 Betreiber von Battery Swapping Stationen und Batteriehersteller

Die drei interviewten Betreiber von Battery Swapping Stationen und Batteriehersteller ordnen Battery Swapping als komplementären Baustein neben Depot- und öffentlichem HPC/MCS-Laden ein. Aus ihrer Sicht entfaltet der Ansatz besonders dort Wirkung, wo Strecken(-abschnitte) mit hohen Fahrzeugfrequenzen und enge Zeitfenster zusammenkommen. Als Anwendungsfelder gelten vor allem Mehrschicht-/Line-Haul-Verkehre mit hoher zeitlicher Fahrzeugauslastung. Der operative Kernnutzen liege in deutlich verkürzten Stillstandszeiten der Fahrzeuge durch automatisierte Tauschvorgänge im Bereich von Stand heute rund 6 bis 10 Minuten, der Entkopplung der Energieaufnahme von der Tourenplanung sowie in gleichmäßigeren Lastprofilen, weil Batterien außerhalb der Fahrzeugnutzung mit moderater Leistung vor- bzw. nachgeladen werden können.

Aus Betreiberperspektive besitzt das Swapping von Batterien nicht nur einen zeitlichen Hebel, sondern bietet Skalenvorteile für Infrastrukturen: Bei steigender Frequenz lassen sich Durchsatz und Verfügbarkeit über Slot-/Buchungslogiken und eine digitale Plattform präzise steuern. Gleichzeitig reduziert ein kontinuierliches Vorladen die erforderlichen Anschlussleistungen und erleichtert die Inbetriebnahme an Standorten mit begrenzter Netzkapazität. Modulbauweisen und Batterie-Racks ermöglichen eine kompakte Flächennutzung, ein bedarfsgerechtes Batteriehandling und ein schrittweises Hochskalieren der Kapazitäten.

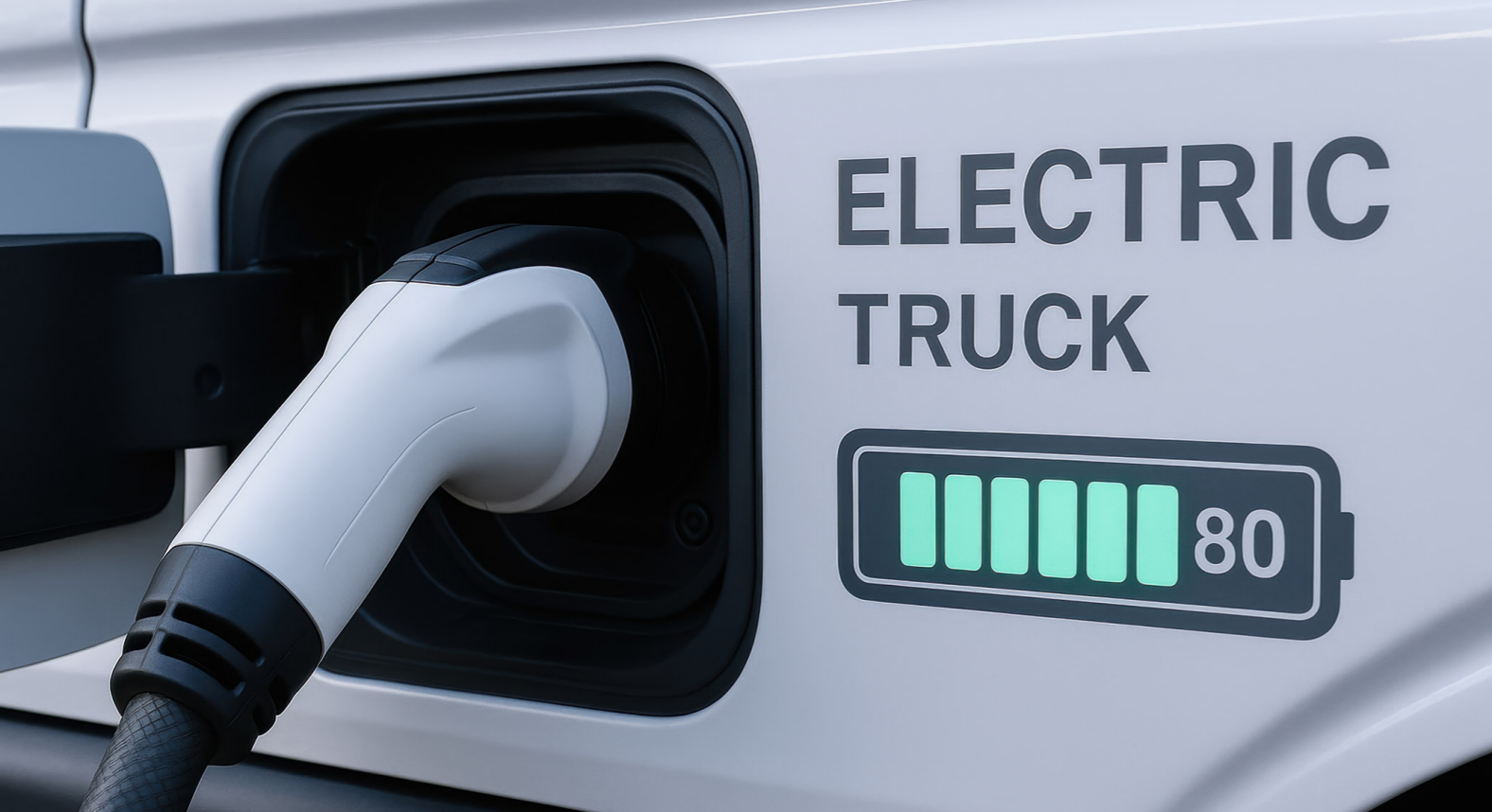
Gleichzeitig formulieren Betreiber wie alle anderen Stakeholder klare Bedingungen für eine erfolgreiche Marktdiffusion: Ohne herstellerübergreifende Interoperabilität (Geometrie und Verriegelung des Batteriemoduls, Hochvolt-(HV)-/Kühlschnittstellen, Kommunikation) drohen Insellösungen, eingeschränkte Skalierung und erhöhte Inventar- sowie Haftungsrisiken. Ein tragfähiges Betreiber- und BaaS-Modell muss Eigentum, Haftung, Versicherung, State of Health (SoH) und State of Charge (SoC) sowie Second-Life-Pfade eindeutig regeln. Eine weitere Voraussetzung ist die eichrechtskonforme kWh-Abrechnung je Tausch für offene Nutzungsszenarien.

Batteriehersteller stufen die Technologie des Battery Swapping als ausgereift ein, sehen für Europa jedoch vor allem marktspezifische organisatorische Hürden: Zurückhaltung der Fahrzeughersteller bei standardisierten Batterien, ein strengeres Regulierungsumfeld als bspw. in China und fehlende Investitionsanreize hemmen die Marktdiffusion. Der Blick nach Asien dient dabei als Referenz, ohne die dortigen Rahmenbedingungen unkritisch auf Europa übertragen zu können. Mehrere Stimmen der Swappingstation-Betreiber und Batteriehersteller warnen jedoch vor einer »gläsernen Decke« bei der Zielerreichung der Flottenelektrifizierung bzw. -dekarbonisierung auf dem europäischen Markt, falls die Branche ausschließlich auf kabelgebundenes Laden setze.

4.3 Netz- und Ladeinfrastrukturbetreiber

Netzbetreiber

Der interviewte Netzbetreiber erwartet einen deutlichen Hochlauf elektrischer Nutzfahrzeuge im Schwerlastsegment, wobei entlang von Autobahnen priorisierte Ausbauten erfolgen und Depotladen mit standortnaher Photovoltaik als besonders kostengünstige Option gilt. Dynamische Ansätze wie das Oberleitungsladen werden nach (begleiteten) Pilotphasen als nachrangig eingeschätzt. Größte Hürde des Aufbaus einer eigenen Ladeinfrastruktur, unabhängig von der Ladeoption, zur Flottenelektrifizierung ist die verfügbare Netzanschlusskapazität. Erweiterungen dieser Kapazitäten können bis zu fünf Jahre und mehr beanspruchen.



Aus diesem Grund wird Battery Swapping unter technischen und betrieblichen Vorbehalten beobachtet, grundsätzlich aber als nutzerseitige Entscheidung eingeordnet. Aus Sicht der Netzbetreiber kann Swapping die Leistungsanforderungen an einzelnen Standorten reduzieren und Lastverläufe glätten, indem Batterien außerhalb der Fahrzeugnutzung mit geringerer Leistung geladen werden. Dies kann zusätzlich die Integration erneuerbarer Einspeisungen erleichtern und frühere Inbetriebnahmen von Infrastrukturen und entsprechenden elektrifizierten Flotten ermöglichen. Zugleich wird keine erhebliche Entlastung des energietechnischen Gesamtsystems erwartet, da der Netzausbau weiterhin erforderlich bleibt und die Verlässlichkeit von Prozessen und Lastprofilen erst durch Betriebserfahrungen des Battery Swappings in einem skalierten Betrieb belegbar ist. Die Wahl zwischen kabelgebundenem Laden und Battery Swapping liegt bei Betreibern und Anwendern, während Parkraum- und Flächenthemen außerhalb des Zuständigkeitsbereichs eines Netzbetreibers liegen, aber auch als Beweggründe der Auseinandersetzung von Anwendern mit dem Thema Battery Swapping anerkannt werden.

Ladeinfrastrukturbetreiber

Ladeinfrastrukturbetreiber verorten batterie-elektrische Lkw fest in ihrer Ausbaustrategie: Ähnlich der Meinung der anderen Akteure bildet das Depotladen den Grundpfeiler, während leistungsfähiges öffentliches Schnellladen HPC/MCS für den Langstreckenbetrieb als relevant erachtet wird. Pufferbatterien dienen in diesem Szenario bei Bedarf zur Überbrückung begrenzter Anschlussleistungen und zur Reduktion von Leistungspreisen.

Battery Swapping wird überwiegend als mögliche komplementäre Option eingestuft, die vor allem Zeitvorteile schafft, Lade- von Fahrzeiten entkoppelt und durch gleichmäßigere

Lastverläufe moderate Netzanschlussleistungen sowie eine planbarere Energiebeschaffung ermöglicht. Gleichzeitig verweisen Betreiber auf substantielle Eintrittsbedingungen: Ohne herstellerübergreifende Standardisierung (Mechanik, HV-/Kühl-Schnittstellen, Kommunikation) sowie klare Eigentums-, Haftungs- und Inventarmodelle (Batterie-Pool/BaaS) sei ein Roll-out risikobehaftet. Zudem berge die Mechanik der Stationen Single-Point-of-Failure-Risiken, die nur durch Redundanz und Fallback-Lösungen betriebswirtschaftlich vertretbar wären. In der Breite wird das kabelgebundene Laden als der robustere Pfad betrachtet, nicht zuletzt aufgrund steigender Ladeleistungen, wachsender Dichte an Standorten und ausgereifter Betriebsprozesse. Parallel rücken Shared-Parks in den Fokus, um Auslastungen zu erhöhen und die Total Cost of Ownership (TCO) zu verbessern.

4.4 Original Equipment Manufacturer (OEM)

Die befragten Fahrzeug- und Trailerhersteller verorten batterie-elektrische Lkw klar im Zentrum ihrer Strategie zur Dekarbonisierung von Nutzfahrzeugflotten. Depotladen gilt als Grundpfeiler, während öffentliches Schnellladen mit hoher Leistung die Langstreckenfähigkeit absichern soll. Ein häufig beschriebenes Einsatzmodell besteht aus Fahrzeugreichweiten um 500 Kilometer mit einer 45-minütigen Pausenladung. Dynamische Ladesysteme, wie die Nutzung von Oberleitungen oder Induktion, werden demgegenüber aufgrund von Kosten, Realisierungstiming und fehlender Standardisierung mehrheitlich als unrealistisch oder deutlich nachrangig in der EU bewertet. Diese Grundhaltung prägt auch die Einordnung von Battery Swapping: Der Ansatz wird als technisch machbar und in spezifischen Einsatzprofilen kundenwirksam anerkannt, insbesondere wegen kurzer Tauschzeiten von Stand heute etwa

fünf Minuten, der Entkopplung von Energieaufnahme und Tourenplanung sowie der Möglichkeit, Fahrzeug und Batterie bilanziell zu trennen und Obsoleszenzrisiken beim Betreiber von Swapping Stationen zu bündeln.

Gleichzeitig weisen die Hersteller darauf hin, dass ein herstellerübergreifendes Wechsel- und Schnittstellenformat derzeit fehlt und kurzfristig nicht absehbar ist, worin die zentrale Eintrittshürde für Europa liege. Ein einheitliches Unterboden- bzw. Modulformat würde nach heutiger Sicht die hersteller-spezifisch optimierte Batterieintegration aufbrechen. Zusätzlich bestehen Vorbehalte gegenüber der Langzeitzuverlässigkeit mechanischer und elektrischer Schnittstellen bei täglichen Tauschvorgängen. Nichtsdestotrotz begleiten einige OEMs Standardisierungsprozesse in Normungsgremien wie der DIN SPEC zum Thema »Battery swapping systems in electric heavy-duty vehicles - General requirements for automated battery swapping stations« (DIN 2025). Ökonomisch wird ein relevanter Mehrbedarf an Batterieinventar (+25 bis 50 %) mit entsprechendem Kapital- und Umweltfußabdruck betont, während parallel eine zweite Infrastruktur zum kabelgebundenen Laden aufgebaut und betrieben werden müsste. Vor diesem Hintergrund vertreten mehrere Hersteller die Position, dass Battery Swapping gegenüber dem anlaufenden MCS-Roll-out zeitlich ins Hintertreffen geraten könnte und TCO-seitig zumindest heute keinen generellen Vorteil gegenüber kabelgebundenem Laden aufweist. Zudem verweisen sie auf die fortschreitende Entwicklung der Batterien und die dadurch entstehenden Reichweitzuwächse und kürzeren Ladezeiten.

Ein weiterer genannter Aspekt ist, dass mittel- bis langfristig eine stärkere funktionale Integration von Zugmaschine und Trailer denkbar ist, in der beide Komponenten als eine Einheit gesehen und entsprechende energetische Synergien stärker gehoben werden können. Zugleich wird die Entwicklung in China sehr aufmerksam verfolgt. Die dortige Standardsetzungskraft einzelner Zell- und Systemanbieter wird als potenzieller externer Impuls gesehen, der auch für Europa Relevanz entfalten könnte. Insgesamt zeigen diverse OEMs und Komponentenhersteller Bereitschaft zur Mitarbeit in Arbeits- und Standardisierungskreisen. Prämisse der Tragfähigkeit des Battery Swappings sei ein europäischer Cross-OEM-Standard für Geometrie, HV-/Kühlschnittstellen und Kommunikation, ein tragfähiges Betreiber- und BaaS-Modell einschließlich klarer Eigentums-/Haftungslogik und eichrechtskonformer kWh-Abrechnung, sowie Feldnachweise ohne signifikante Nutzlast- oder Reichweitznachteile bei hoher Verfügbarkeit.

4.5 Akteursübergreifende Aussagen

Die Flottenelektrifizierung ist bei allen relevanten Stakeholdern strategisch verankert. Wie dargestellt, divergieren die Bewertungen zum Battery Swapping zwar in Teilen zwischen den

Akteursgruppen. Gleichzeitig zeigt sich ein konsistentes Bild im Vergleich zu anderen Studien, die die Akzeptanz von Battery Swapping untersucht haben (vgl. Noto & Mostofi 2023). Im Segment schwerer Nutzfahrzeuge verschiebt sich der Schwerpunkt von Unternehmen mit Erfahrungswerten elektrischer Fahrzeuge zunehmend von der Pilotierung und Einzelanwendungen zur Skalierung der Flotten und der dafür erforderlichen Infrastruktur. Das Laden am Depot stellt übereinstimmend den Grundpfeiler dar und ist, insbesondere bei standortintegrierter Photovoltaik, die kostengünstigste Option. Die Skalierbarkeit des Depotladens wird jedoch durch begrenzte Mittelspannungsnetzanschlussleistungen, Flächenverfügbarkeiten auf Betriebshöfen und (absehbar) wachsende Fahrzeugzahlen eingeschränkt. Stationäre Batteriespeicher können Anschlusslücken überbrücken, Lastspitzen glätten und Leistungspreise senken. Der wirtschaftliche Nutzen solcher Speicher variiert jedoch deutlich in Abhängigkeit vom jeweiligen Anwendungsszenario und kann mit Wirkungsgradverlusten (u. a. durch Umrichter) von bis zu 20 % verbunden sein (Koltermann et al. 2024).

Übereinstimmend wird die Relevanz des öffentlichen Schnellladens mit HPC und perspektivisch MCS unterstrichen. Es wird konstatiert, dass der Infrastrukturausbau, öffentlich wie privat, zwar vorankommt. Jedoch bestehen Herausforderungen durch sehr hohe Leistungsbedarfe, Fragen der Stellplatzverfügbarkeit, der verlässlichen Verfügbarkeit bzw. Reservierbarkeit von Ladepunkten sowie der (Dauer von) Genehmigungsverfahren nicht zuletzt aufgrund der Fragmentierung allein des deutschen Strommarktes mit über 860 Verteilnetzbetreibern.

Battery Swapping wird von mehreren Akteursgruppen als operativ vorteilhaft bewertet. Zu den genannten Vorteilen zählen Tauschzeiten von etwa fünf Minuten, die Entkopplung von Ladezeit und Tourenplanung, geringere Anforderungen an die Anschlussleistung bei potenziell höherem Durchsatz, ein geringer Flächenbedarf sowie potenzielle Vorteile im Batterie-Lebenszyklus und in der Second-Life-Nutzung. Demgegenüber stehen aber auch zentrale Hemmnisse: Diese betreffen insbesondere das Fehlen interoperabler Standards auf Batterie- und Schnittstellenebene, potenzielle Herstellerbindungen, ungeklärte Eigentums-, Haftungs- und eichrechtliche Fragen, genehmigungsrechtliche Anforderungen, die Kapitalbindung durch zusätzliche Batteriebestände sowie das Betriebsrisiko bei Ausfall einzelner Stationen. Im internationalen Vergleich verweisen die ExpertInnen auf China, das beim Thema Battery Swapping eine höhere Implementierungsgeschwindigkeit aufweist, was auf Standardisierungsinitiativen, staatliche Steuerung und eine höhere Marktdynamik zurückgeführt wird. Europa liegt zurück, vor allem aufgrund offener Standardisierungs-, Regulierungs- und Akzeptanzfragen. Daraus kann das Risiko resultieren, externe (insbesondere chinesische) Standards adaptieren zu müssen.

5. Potenziale und TCO



Abbildung 7: Konsolidierte Potenzial- und Hemmnisfelder des Battery Swappings basierend auf den Expertengesprächen

Nachfolgend werden die aus der Praxis genannten Hemmnisse und Potenziale mit Fachliteratur und Entwicklungen auf europäischer, aber auch internationaler Ebene abgeglichen, um diese zunächst einzuordnen und anschließend wichtige Kostenpositionen des Battery Swappings mit anderen Ladeoptionen zu vergleichen.

5.1 Hemmnisse und Potenziale

Kompatibilität

Die fehlende Kompatibilität zwischen Elektrofahrzeugmodellen und Batteriepacks ist eine der größten Herausforderungen für das Battery Swapping in Europa. Ein gemeinsamer Standard für die Batterien ist von fundamentaler Bedeutung, um eine umfassende Wechselladinfrastruktur zu schaffen. Eine Lösung könnte die Entwicklung eines einheitlichen Batteriedesigns sein, das in verschiedenen Fahrzeugen verwendet werden kann. Dies erfordert jedoch enge Zusammenarbeit zwischen Fahrzeug- und Batterieherstellern sowie anderen Interessengruppen. Erste Schritte zur Standardisierung erfolgen derzeit punktuell und werden von Herstellern in Normungsgremien begleitet (DIN 2025). Allerdings fehlt noch eine koordinierte Initiative auf europäischer Ebene.

Eine Zusammenarbeit zur Entwicklung von Standards ist daher unerlässlich, um die Technologie des Battery Swappings auszubauen. Der Blick Richtung Asien offenbart, dass Normierungsprozesse auch international bereits initiiert und in Praxisanwendungen des Battery Swappings akteursübergreifend angewendet werden (siehe Kapitel 3.1).

Öffentliche Infrastruktur

Politisch-regulatorisch wird Battery Swapping in der EU bislang nachrangig behandelt. Die AFIR setzt für schwere Nutzfahrzeuge ein dichtes Netzwerk verbindlicher Ladeziele (CCS/MCS) auf, nennt Battery Swapping jedoch lediglich als mögliche zukünftige Ladeoption, wenn technisch möglich, ohne Ausbauvorgaben oder Förderkulisse (European Parliament & Council 2023a). Unter dem Motto »Power to the Road« treibt Deutschland im Sinne der AFIR das Lkw-Schnellladenetz mit rund 350 Standorten voran (NOW GmbH 2025), was in der Anlaufphase den Einsatz batterie-elektrischer Fahrzeuge bei entsprechender Preispolitik unterstützen kann. Daneben gibt es laut der Nationalen Leitstelle Ladeinfrastruktur (Stand: 02.03.2026) derzeit 69 öffentlich zugängliche Lkw-Ladestandorte mit 50.160 kW installierter Ladeleistung. Demgegenüber steht die Zielsetzung des Lkw-Schnellladenetzes von 351 Standorten mit insgesamt

2.842.950 kVA geplanter Netzanschlussleistung. Damit sind bislang rund 20 % der geplanten Standortzahl erreicht (69 von 351), während die aktuell erfasste installierte Ladeleistung nur rund 1,8 % der geplanten Anschlussleistung bis zum Zieljahr 2030 ausmacht (50.160 kW vs. 2.842.950 kVA) (Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur 2026; NOW GmbH 2024).

Energiebedarfe

Einher mit der Elektrifizierung des schweren Güterverkehrs geht ein bedeutend erhöhter elektrischer Energiebedarf des Logistiksektors. Übereinstimmenden Studien zufolge wird der zusätzliche jährliche elektrische Strombedarf, bei vollständigem Einsatz von schweren batterie-elektrischen Lkw, für Deutschland bis 2045 auf über 100 Terawattstunden (TWh) geschätzt (Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung (SVR) 2025; Göckeler et al. 2023). Im Vergleich zu den im Jahr 2024 deutschlandweit verbrauchten 464,4 TWh (Bundesnetzagentur 2025a) ist dies ein Zuwachs von über 20 %. Die zuvor skizzierte Gleichzeitigkeit der Ladevorgänge und die lokale Netzsituation spielen dabei eine entscheidende Rolle dafür, inwieweit Mittel- und Niederspannungsnetze die wachsenden Bedarfe zukünftig abfedern können. Möglichkeiten zum Energiemanagement durch die zeitliche Verschiebung von Ladevorgängen sind in der Regel, durch u. a. definierte Cut-off-Zeiten oder Mehrschichtbetriebe, eingeschränkt, da die Ladung nach einer Pause abgeschlossen sein muss und kapitalintensive Schnellladepunkte zur effizienten Nutzung der Infrastruktur nicht durch nicht ladende Lkw blockiert werden dürfen. Die Folge kann ansonsten eine (teils erhebliche) Anpassung der Tourenplanung zur Berücksichtigung der Ladeplanung und des Energiemanagements sein. Battery Swapping kann hierbei die Standzeiten reduzieren und erhöht die betriebliche Flexibilität von Nutzfahrzeugflotten (Li et al. 2024). Durch die zentrale und vom Fahrzeug entkoppelte Ladung der Batterien kann die Netzbelastung durch das Aufbrechen einer potenziellen Gleichzeitigkeit der Ladevorgänge im MW-Bereich reduziert und die Aufnahme erneuerbarer Energien optimiert werden. Vallera et al. (2021) unterstreichen die Potenziale des Battery Swappings, um das Energienetz langfristig bei steigendem Durchdringungsgrad elektrischer Nutzfahrzeuge, und entsprechender Gesamtenergiebedarfe, zu stabilisieren.

Anwender und Fuhrparks

Neben der gesamtheitlichen Perspektive zwingt die Elektrifizierung von Fahrzeugflotten transportierende Unternehmen, ihre Prozesse und Geschäftsmodelle grundlegend zu überprüfen und ggf. zu überdenken. Im Zuge eines höheren Durchdringungsgrades schwerer elektrischer Nutzfahrzeuge wird der Straßengüterverkehr zunehmend zu einer der energieintensivsten Branchen. Logistikunternehmen übernehmen hierbei zunehmend nicht nur eine ihrer originären Aufgaben, den Transport, sondern müssen gleichzeitig Energiemanagement betreiben; für sich und vor dem

Hintergrund der Entscheidungen anderer Marktbegleiter oder -konkurrenten. Dies stellt ein Hemmnis im Hochlauf dar, wenn Energiebedarfe ohne Koordinationen zwischen den Akteuren bei den Verteilnetzbetreibern beantragt werden und Kapazitäten auf der Mittelspannungsebene ausgeschöpft sind.

Hierbei ist zudem zu bedenken, dass kleine und mittlere Unternehmen (KMU) sowie Subunternehmer einen wesentlichen Bestandteil des Transportsektors darstellen. Im europäischen Durchschnitt besitzen transportierende Unternehmen nur rund sechs Mitarbeitende (European Commission: Directorate-General for Mobility and Transport 2025). Oftmals sind die Kapazitäten zum Aufbau einer eigenen Ladeinfrastruktur infolgedessen beschränkt. Battery Swapping kann eine Elektrifizierung der eigenen Flotte erleichtern, da die Betriebsrisiken und CAPEX potenziell reduziert werden. Gleichzeitig kann der Energiebedarf, trotz größerer Durchdringungsraten elektrifizierter Fahrzeuge nivelliert werden, was wiederum für die Allgemeinheit netzdienlich ist (Vallera et al. 2021).

Service Level

Als potenzielles Risiko ist in diversen Expertengesprächen das Thema SoC und SoH der (gewechselten) Traktionsbatterien hervorgehoben worden. Für einen verlässlichen Betrieb sind folglich klar definierte Service Level Agreements (SLA) für Anlagenverfügbarkeit, Tauschdauer und Fehlerraten sowie Transparenz zu SoC/SoH der getauschten Traktionsbatterien zentral. Operativ braucht es dafür eine digitale Plattform, die Reservierung, Zugangsmanagement, Abrechnung und Zustandsdaten integriert und die Einhaltung der SLAs auditierbar macht. Durch Redundanzen, mindestens eine Fallback-Option via HPC/MCS am Standort, können Single-Point-of-Failure-Risiken reduziert werden. Ergänzend unterstützt die EU-Batterieverordnung die vertragliche Ausgestaltung von Qualitätskriterien: Artikel 14 verpflichtet zu Informationen über SoH und erwartete Lebensdauer, und nach Art. 77 wird ab 2027 ein Battery Passport als standardisierter Datenträger für Batterien mit mehr als 2 kWh Kapazität verpflichtend (European Parliament & Council 2023b). Diese Datenbasis kann absehbar SoH/SoC-Transparenz, Reklamations- und Qualitätsprozesse im Swapping-Betrieb erleichtern.

Ein geteiltes Geschäftsmodell, bei dem Investitionen in Fahrzeug und Batterie getrennt sind, bietet zudem mehr Flexibilität, senkt die CAPEX für den Anwender und kann die Lebensdauer der Einzelkomponenten, also Fahrzeug und Batterien, verlängern. Das Battery Swapping ermöglicht eine längere Lebensdauer der Batterien. Eine Batterie, die über Battery Swapping geladen wird, benötigt beim Netzladen weniger Strom, was Vorteile wie längere Lebensdauer und kontrolliertes Laden bietet. Batterien, die nicht unmittelbar im Umlauf sind, können in einem engen Ladezustandsfenster gehalten werden, was die Kalenderalterung minimiert. Zudem unterstützt die Entkopplung von Batterie- und Fahrzeuglebenszyklus Voraussetzungen für eine standardisierte

Wiederverwendung und effizientes Recycling, was die Ziele der EU-Batterieverordnung (EU) 2023/1542 in Richtung Kreislaufwirtschaft unterstützt (ebd.).

Timing und MCS-Konkurrenz

Einige ExpertInnen zeigen sich skeptisch und verweisen auf Timing-Risiken, fehlende Standardisierung sowie Zielkonflikte bei Packaging, Reichweite und Nutzlast im Vergleich zum Hochlauf des MCS-Systems. Gleichzeitig jedoch bereiten alle involvierten Stakeholder durch ihre Aktivitäten potenzielle Expertisen und Synergien zu einem potenziellen Battery Swapping System mit auf (z. B. durch Slot-/Buchungskonzepte, standardoffene Plattformen und Mittelspannungs-/Hochspannungs-Anbindung) Industrieseitig prägt in Europa die MCS-/HPC-Strategie den Pfad: Organisationen wie CharIN und SAE treiben MCS (bis zu 3 000 A/1 250 V) zügig voran, was die Verfügbarkeit leistungsfähiger Ladehubs erhöht. So beschreibt der 2025 veröffentlichte »Megawatt Charging System (MCS) Technical Information Report SAE J3271« Systemanforderungen von der Netzanbindung bis zur Kommunikation (SAE 2025). Diese Entwicklungen müssen aber zwangsläufig Battery Swapping nicht entkräften, zumal MCS-Laden die Anforderungen an den Netzanschluss weiter erhöht. Vielmehr legt die Evidenz nahe, Use-Cases zu differenzieren: Wo hochgradig planbare Taktung, homogene Flotten und hochfrequentierte Strecken(-abschnitte) vorliegen, kann Battery Swapping komplementär zum MCS-Netz die gesamtheitliche Flottenelektrifizierung stärken. Für Europa empfiehlt sich deshalb eine koordinierte Pilotierung mit gemeinsamen Wechselblock-Profilen statt isolierter Einzelprojekte, die die technisch-organisatorischen Entwicklungen im Bereich des MCS-Ladens in der Ausgestaltung des Ökosystems mitadressiert und Erfahrungswerte ggf. übernimmt.

Aus den genannten Aspekten sowie den internationalen Entwicklungen (siehe Kapitel 3.1.1) und Erfahrungswerten europäischer bzw. deutscher Projekte (siehe Kapitel 3.2.1) lassen sich folgende Einsatzfelder ableiten, in denen der operative Einsatz von Battery Swapping für Nutzende (zukünftig) Vorteile haben kann.

5.2 TCO

Eine zentrale Frage ist, wie das Battery Swapping hinsichtlich der TCO abschneidet und welche Unterschiede durch die unterschiedlichen Kostenfaktoren entstehen. Aktuelle Studien und Projekte haben diese Aspekte in Teilen für schwere Nutzfahrzeuge aus Sicht von Flottenbetreibern untersucht, sodass diverse Erkenntnisse vorliegen. Im Folgenden werden die wichtigsten Kostenfaktoren und Ergebnisse dieser Arbeiten im Vergleich von Battery Swapping, Depotladen und öffentlichem Schnellladen für die Nutzenden dargestellt und wenn möglich gegenübergestellt. Zu den wichtigsten Kostenfaktoren im Vergleich zu anderen BEV-Ladeoptionen zählen:

1. Energiekosten
2. Opportunitätskosten durch Lade- bzw. Wechselzeiten und Stillstand
3. Fahrzeugbatterie-Größe, -Kosten und Nutzlastverluste
4. Batterielebensdauer und Wartung
5. Infrastruktur- und Fixkosten
6. Energie-Arbitrage

Energiekosten

Die Energiekosten von batterie-elektrischen Lkw setzen sich aus mehreren Komponenten zusammen: dem reinen Energiepreis

Hub-to-Hub-Langstrecke im Mehrschichtbetrieb

Dieses Szenario adressiert fest planbare Korridore mit Tagesfahrleistungen von mehr als 400 bis 500 Kilometern sowie zwei bis drei Schichten. Battery Swapping ersetzt ein kabelgebundenes Zwischenladefenster im Bereich von rund 50 bis 70 Minuten, wie es bei heutigen HPC-Leistungen von etwa 350 - 400 kW und einer nachzuladenden Energiemenge von ca. 400kWh bei idealisierter Ladekurve realistisch ist, durch einen Tauschvorgang von sechs bis zehn Minuten. Mit perspektivisch verfügbaren MCS-Leistungen im Megawattbereich können sich diese Ladefenster bei vergleichbaren Energiemengen zwar auf grob 30 bis 40 Minuten verkürzen. Gleichzeitig steigen jedoch die Anforderungen an Netzanschluss, Transformatoren und Standortausbau. Durch Battery Swapping steigt die Planbarkeit des Betriebes, und der Fahrzeugdurchsatz erhöht sich nachhaltig. Gleichzeitig sinken die Risiken für die Nutzenden durch Wartezeiten, mögliche Falschbelegungen und unsichere Reservierungen an öffentlicher Ladeinfrastruktur infolge externer Faktoren wie Staus. Die erforderliche Anschlussleistung liegt in der Regel im einstelligen Megavoltampere (MVA)-Bereich, und der Flächenbedarf fällt geringer aus als bei vergleichbaren HPC/MCS-Ladepunkten. Auf hochfrequentierten Strecken mit kritischer Parkplatzsituation können Linien- und Begegnungsverkehren für alle Marktbegleiter so erleichtert werden, da Flächen, fernab der Lenkzeitregelung, nicht für andere Nutzende blockiert werden.

24/7-Werksverkehr mit Just-in-Time-Anforderungen

Dieses Szenario fokussiert werksnahe Verkehre mit sehr hohen Verfügbarkeitsanforderungen und Pönalen bei Verspätungen. Der Tauschvorgang findet parallel zu Rampen- und Hofprozessen statt und verursacht keine zusätzlichen Standzeiten. Zusätzlich wird die Situation auf dem Hof des jeweils Nutzenden entspannt, da eine schnellere Durchschleusung der Fahrzeuge auf dem eigenen Gelände möglich ist, ohne dass Stellplätze, die für den Umschlag gebraucht werden, langfristig blockiert sind. Dadurch sinkt das Risiko für Prozessunterbrechungen, und die Auslastung der Zugmaschinen verbessert sich signifikant. Gleichmäßigere Lastgänge erleichtern die Integration von Photovoltaik oder von strompreisstabilisierenden Beschaffungsmodellen und senken leistungsabhängige Netzentgelte.

Ausblick: Autonome 24/7-Logistik

Dieses Szenario adressiert hoch ausgelastete Transportflotten im kontinuierlichen Einsatz, bei denen autonome Fahrzeuge nahezu durchgehend im 24/7-Betrieb fahren – z. B. auf definierten Strecken oder zwischen Hubs mit festem Routing. Battery Swapping ersetzt dabei klassische Ladeprozesse und stellt die Energieversorgung vollautomatisch, fahrerlos und ohne operative Stillstandzeiten sicher. Tauschvorgänge erfolgen innerhalb von fünf bis acht Minuten und werden durch das Fahrzeug selbst oder über Flottenleitsoftware automatisch ausgelöst. So wird die technische Voraussetzung geschaffen, um autonome Fahrzeuge mit maximaler Auslastung zu betreiben und unnötige Rückhalteleistung an den Knotenpunkten zu vermeiden. Durch die Integration von autonomen Fahrzeugen und Battery Swapping entsteht ein vollständig entkoppelter, hoch skalierbarer Transportbetrieb – mit kalkulierbarer Energieversorgung, minimalen Stillstandszeiten und maximaler Fahrzeugverfügbarkeit.

(Strombeschaffung), den Netzentgelten (einschließlich Leistungspreisen) sowie anteiligen Abschreibungskosten für die Ladeinfrastruktur. Beim Depotladen kann ein transportierendes Unternehmen in Deutschland bei guter Infrastrukturplanung und -auslastung für ca. 0,15 bis 0,20 € pro kWh (Basma et al. 2021) außerhalb von Spitzenzeiten zu günstigen Stromtarifen laden – vorausgesetzt Netzkapazität ist vorhanden. Öffentliches Hochleistungsladen ist im Vergleich hierzu teurer. Hier fallen aufgrund von Betreibergebühren je nach Anbieter und Tarif häufig rund 0,30 bis 0,50 € oder mehr pro kWh an (vgl. Milence 2025)². Diese Gebühren beinhalten neben der Strombeschaffung auch Netzentgelte, Standortkosten sowie eine kommerzielle Marge.

Im Kontext der (privaten) Ladeinfrastruktur ist in Deutschland zudem die sogenannte »2.500-Stunden-Regelung« relevant, weil sie im deutschen Netzentgelt-Jahresleistungspreissystem die Tariflogik für leistungsgemessene Entnahmestellen prägt. Bei diesen Entnahmestellen setzen sich Netzentgelte aus einem Leistungspreis, bezogen auf die maximale in Anspruch genommene Leistung, und einem Arbeitspreis, bezogen auf die entnommene Energiemenge, zusammen (Bundesnetzagentur 2025b).

Maßgeblich ist dabei die Jahresbenutzungsdauer, definiert als Quotient »(...) aus der in einem Abrechnungsjahr aus dem Netz entnommenen Arbeit (kWh) und der in diesem Abrechnungsjahr in Anspruch genommenen Jahreshöchstleistung (kW)« (Bundesministerium der Justiz 2005): Jahresbenutzungsdauer = kWh/a ÷ kW. Die Schwelle von 2.500 h/a fungiert als fixer Knickpunkt in dieser Systematik: bei Jahresbenutzungsdauern unterhalb und oberhalb dieser Grenze greift jeweils eine andere Preisrelation zwischen Leistungs- und Arbeitspreis, wobei die konkreten Werte je nach Netzbetreiber, Netzebene und Preisblatt variieren (Bundesnetzagentur 2015).

Für eine Ladeinfrastruktur am eigenen Firmenstandort ist die Regelung infolgedessen relevant, weil der Betrieb durch paralleles Schnellladen mehrerer Fahrzeuge in kurzen Zeitfenstern sehr hohe Lastspitzen erzeugt. Diese Spitzen treiben die Jahreshöchstleistung (kW) nach oben, ohne dass die jährliche entnommene Arbeit (kWh) im gleichen Verhältnis steigt: die Benutzungsstunden sinken damit tendenziell, potenziell in Bereiche < 2.500 h/a. Umgekehrt kann Battery Swapping die Leistungsaufnahme aus dem Netz entkoppeln: Während der Fahrzeugbetrieb weiterhin

² Werte für Depotladen und öffentlichem Hochleistungsladen basierend auf durchgeführten Expertengesprächen und Desk Research

hohe Energiemengen erfordert, kann das Laden der Batterien zeitlich geglättet und über längere Zeiträume mit geringerer Anschlussleistung erfolgen. Dadurch sinkt die maximale Leistungsspitze am Netzanschlusspunkt, die Benutzungsstunden steigen, und es ergeben sich potenziell Vorteile bei netzseitiger Dimensionierung und in der resultierenden Entgeltstruktur. Ein zweiter Aspekt ist der Netzanschluss bzw. -ausbau: Wenn für die Ladeinfrastruktur eine Anschlussverstärkung erforderlich wird, kann ein Baukostenzuschuss anfallen. Die Bundesnetzagentur (2024) diskutiert bzw. beschreibt hierfür ein Leistungsmodell, das sich am Leistungspreis orientiert und zur Glättung typischerweise mit einem arithmetischen Mittel über mehrere Jahre arbeitet (u. a. zur Reduktion von Volatilität). In der Praxis bedeutet das: Wenn Standort- und Betriebsprofil es erlauben, können Lösungen, die die bestellte bzw. benötigte Anschlussleistung reduzieren (Lastmanagement, Speicher, oder eben ein Swap-Ansatz mit geglätteter Ladung), nicht nur laufende Netzentgeltkomponenten für den Flottenbetreiber positiv beeinflussen, sondern auch die Anschlusskostenlogik entlasten.

Beim Battery Swapping dürften bzw. müssten die Energiekosten mindestens in ähnlicher Größenordnung wie beim öffentlichen Laden liegen oder niedriger, um konkurrenzfähig zu sein. Tatsächlich zeigen Pilotprojekte in China, dass swap-fähige Lkw bereits heute dieselbetriebene Lkw bei den »Treibstoff«-Kosten unterbieten können: CATL gibt an, dass swap-fähige Lkw rund 60.000 CNY (ca. 7.500 €) auf 100.000 km günstiger als Diesel-Lkw sind (Randall 2025). Wang et al. (2023) haben berechnet, dass Battery Swapping Stationen mindestens 0,8 CNY/kWh (ca. 0,10 €/kWh) verlangen müssen, um profitabel zu sein, wobei die tatsächlichen Gebühren aber höher liegen, um die Stations- und Batterievorhaltekosten zu decken. Diese Kosten werden dann über eine Kombination aus kWh-Preis, Swap-Gebühren und ggf. zusätzlichen Service-/Nutzungsentgelten an den Nutzenden weitergegeben. Wang et al. (2023) verdeutlichen in einem Kurzstrecken-Use-Case für China, dass unterschiedliche Lademodi nicht nur technische Effizienzunterschiede haben, sondern auch stark von Strompreisen und Tarifstrukturen abhängen. Für Flottenbetreiber bedeutet dies, dass ein ungünstiges Preissetting (z. B. hohe Serviceaufschläge) den Vorteil operativer Zeitersparnis neutralisieren kann. Umgekehrt aber kann ein Betreiber bei hoher Auslastung und optimierter Beschaffung (z. B. durch Laden außerhalb teurer Spitzenzeiten) Kostenvorteile realisieren, die in wettbewerblichen Märkten an die Nutzenden weitergegeben werden können (Börjesson et al. 2025). Hierbei ist anzumerken, dass ebenso nutzungsbezogene Kapitalkosten für konventionelle Ladeinfrastruktur, wie HPC-Standorte, anfallen und somit die effektiven Kosten des kabelgebundenen Ladens mitbestimmen.

Börjesson et al. (2025) zeigen in ihren Simulationen für Europa, dass die relative Wirtschaftlichkeit zwischen stationärem Laden

und Battery Swapping u. a. durch Annahmen zu Strompreisen und Gebühren beeinflusst wird, wobei der entscheidende Hebel häufig nicht der absolute Energiepreis ist, sondern die Wechselwirkung aus Energiepreis, Lade-/Swap-Zeit und daraus folgenden Zeit- bzw. Opportunitätskosten.

Opportunitätskosten durch Lade- bzw. Wechselzeiten und Stillstand

Die Dauer der Energieaufnahme hat großen Einfluss auf die Produktivität des Lkw sowie die Personal- und Opportunitätskosten (Börjesson et al. 2025). Depotladen erfolgt typischerweise langsam über mehrere Stunden (z. B. über Nacht), was im Idealfall in planmäßigen Standzeiten des Fahrzeugs oder Ruhezeiten des Fahrers geschieht. Hier fallen folglich keine zusätzlichen Standzeiten an, solange das Laden in die Betriebspausen integriert und das Fahrzeug nicht im Dreischichtbetrieb oder im Nachtsprung genutzt wird. Gleichzeitig jedoch mindert Übernachten den spezifischen Säulen-Umsatz, da kein Fahrzeugdurchsatz generiert wird, was zu einer schlechteren Amortisation der Infrastruktur führt.

(Öffentliches) Schnellladen mit HPC geht deutlich schneller als kabelgebundenes Laden mit geringerer Ladeleistung, kann aber immer noch, je nach geladener Energiemenge und Ladeleistung, über eine Stunde Ladepause für einen batterie-elektrischen Lkw erfordern.³ Durch das MCS-System wird diese Ladezeit potenziell weiter unterschritten. Diese Ladezeiten müssen jedoch entweder in die gesetzlich vorgeschriebenen Lenkzeit-Unterbrechungen eingeplant werden oder führen zu zusätzlichen Standzeiten, wenn keine betrieblichen Standzeiten vorliegen (bspw. im Mehrschichtbetrieb). Hierbei können zusätzlich Umwege oder Wartezeiten auftreten (Börjesson et al. 2025), wenn z. B. Ladesäulen belegt sind oder bei hoher Auslastung durch ein Lastmanagement die Leistung geteilt wird. Weitere Verluste können entstehen, wenn durch operative Prozessstörungen (z. B. Staus) vereinbarte Ladezeitfenster nicht eingehalten werden können und Ladesäulen bereits durch nachfolgende Fahrzeuge belegt sind. Für Flottenbetreiber können bei Nutzung dieser (semi-)öffentlichen Ladeinfrastrukturen zusätzliche betriebliche Aufwände in Form einer potenziellen Fahrpersonal-Logistik entstehen, um die An- und Abfahrt zum bzw. vom Ladepark nach Beendigung bzw. vor Beginn der jeweiligen Schichten zu gewährleisten.

Battery Swapping stellt hierbei die schnellste Option dar: Der komplette Tausch einer Lkw-Batterie kann in ca. 5 bis 10 Minuten erfolgen, wobei bereits an schnelleren Wechselvorgängen industrieseitig gearbeitet wird (Ghosh 2025). Dies könnte sogar die Zeit eines Diesel-Tankstopps unterbieten, sodass nahezu keine zusätzliche Standzeit entsteht, sofern Stationen ausreichend Swap-Kapazität und Batterieinventar vorhalten.

Kürzere Standzeiten bedeuten geringere Stillstandskosten, die insbesondere Kosten des Fahrpersonals und die entgangene Transportleistung umfassen. In einem Gedankenbeispiel: Muss ein batterie-elektrischer Lkw entsprechend des Szenarios »Hub-to-Hub-Langstrecke im Mehrschichtbetrieb« 50 bis 70 Minuten lang mit HPC laden, entstehen 41,67 € bis 58,33 € Zusatzkosten für Fahrer und Fahrzeug je Ladevorgang. Beim Battery Swapping (5 bis 10 Minuten Tauschvorgang oder kürzer) belaufen sich diese Opportunitätskosten hingegen auf 4,17 € bis 8,33 €.

Zhu et al. (2023) nutzen genau diesen Mechanismus in einem tonnenkilometer-basierten Kostenmodell und zeigen, dass Battery Swapping besonders dann wirtschaftlich wird, wenn hohe Transporteffizienz gefragt ist und die Ladezeit den Betriebsablauf stark einschränkt. Auch Deng et al. (2023) nennen Swap-Zeiten im Bereich weniger Minuten als wesentlichen Produktivitätshebel. Börjesson et al. (2025) operationalisieren diese Produktivitätsdimension, indem sie Zeitkosten (u. a. Fahrzeit) in Tageskosten abbilden und damit sichtbar machen, dass selbst marginal erscheinende Unterschiede in der Servicezeit über mehrtägige Touren erhebliche Kosteneffekte auslösen können. Wang et al. (2025) bestätigen auf Systemebene, dass Battery Swapping die Transporteffizienz (Zeit und Arbeitsaufwand) gegenüber Fast Charging erhöhen kann.

Sollte in Zukunft der Fahrermangel durch autonomes Fahren gemildert werden, wodurch die Personalkosten des Fahrers entfallen, könnte sich der Kostenvorteil zwar relativieren (Wang et al. 2025). Kelkar et al. (2024) betonen aber, dass Battery Swapping in Zusammenspiel mit autonomen Fahrzeugen eine höhere Fahrzeugnutzung als beim MCS-Laden ermöglicht und somit die Transporteffizienz erheblich gesteigert würde.

Fahrzeuggestöße und -kosten

Die benötigte Batteriestöße selbst variiert je nach Ladeansatz und beeinflusst Anschaffungs- und Kapitalkosten sowie die mögliche Nutzlast des Fahrzeuges. Transportunternehmen optimieren, unabhängig vom Lkw-Typ, die Batteriestöße ihrer Fahrzeuge mit dem Ziel, die täglichen Fahrtkosten zu minimieren (Börjesson & Proost 2025). Dafür sprechen zwei Hauptgründe: Erstens stellt die Batteriestöße einen wesentlichen Anteil an den Gesamtkosten eines batterie-elektrischen Lkw dar (Samet et al. 2023). Zweitens reduziert das Batteriegewicht bei gewichtslimitierter Nutzung die zulässige Nutzlast gemäß Richtlinie 96/53/EG des Europäischen Rates und mindert infolgedessen die Transporteffizienz (Liimatainen et al. 2020).

Kabelgebundenes Laden erfordert oft eine möglichst große Traktionsbatterie, um ausreichende Reichweiten zu gewährleisten

und im Fahrzeugbetrieb weniger Lade-Stopps einzulegen. Nach einer Kosten-Nutzen-Analyse von Wang et al. (2025) ist eine optimale Batteriestöße von 600 kWh und mehr pro Lkw anzunehmen, um 400 bis 500 km Reichweiten zu erzielen. Batteriestöße mit entsprechender Kapazität sind entsprechend teuer und schwer.

Battery Swapping erlaubt hingegen ein anderes Optimierungskonzept: Hier kann die Batterie kleiner ausgelegt werden, da im Fahrzeugbetrieb schnell getauscht werden kann. Die Berechnungen von Wang et al. (2025) zeigen, dass bei Einsatz von Swap-Netzwerken eine mittlere Batterie (rund 450 kWh) pro Lkw optimal sein kann, um dieselbe Einsatzleistung und somit Kostenwirkung pro transportierter Frachtmenge wie beim kabelgebundenen Laden, ohne zu häufige Stopps, zu erzielen.

Die kleinere Traktionsbatterie reduziert zusätzlich das Fahrzeuggewicht, wodurch mehr Zuladung möglich ist. Zudem entfällt beim Swap-Konzept häufig der Batteriekauf für den Nutzenden: Das Nutzfahrzeug kann ohne Batterie günstiger angeboten werden und die Batterie wird vom Swap-Anbieter gestellt (BaaS). Laut Untersuchungen kann dieses Decoupling die Investitionskosten pro batterie-elektrischen Lkw um bis zu 50 % reduzieren (Ghosh 2025). Das heißt, ein Transportunternehmen muss nur das Fahrzeug (ohne Batterie) finanzieren, was die Kapitalkosten und Abschreibung deutlich senkt. Damit werden hohe Einmalinvestitionen auf planbare operative Kosten umgelegt und die Eintrittshürde zur Elektrifizierung potenziell gemindert.

Batterielebensdauer und Wartung

Ein oft übersehener Faktor sind die Auswirkungen der Ladeoptionen auf die Batteriegesundheit und Wartungskosten. Durch hohe Ladeleistungen wird die Traktionsbatterie stärker strapaziert und diese können die Kalender- und Zykluslebensdauer verkürzen. Gleichzeitig sinkt der Wirkungsgrad von der Ladesäule ins Fahrzeug durch bspw. Abwärme. Infolgedessen führt häufiges Laden nahe der Leistungsgrenze zu schnellerer Degradation der Komponenten bzw. durch entsprechendes Thermalmanagement wird die nutzbare Gesamtkapazität des Systems reduziert (Shiledar et al. 2025; Dalir et al. 2025; Schneider et al. 2023). Negativfolgen können sein, dass die Traktionsbatterie über ihre gesamte Lebenszeit aufgrund von Degradationserscheinungen früher ausgetauscht werden muss, was entsprechend die Kosten erhöht.

Battery Swapping bietet hier zwei Vorteile: Erstens können die stationären Batteriestöße potenziell mit geringerer C-Rate⁴ über längere Zeit geladen werden, da sie außerhalb des Fahrzeugs geladen werden, während der Lkw mit einer geladenen Batterie weiterfährt. Zweitens ist bei einem Defekt der Batterie

³ Annahme: Ladeleistung (CCS) 350 kW bei Energieabgabe von 400 kWh und linearer Ladekurve

⁴ Die C-Rate (oder C-Koeffizient) ist eine Angabe für die Lade- und Entladegeschwindigkeit einer Batterie im Verhältnis zu ihrer Gesamtkapazität. Eine Rate von 1C gibt an, dass eine Batterie innerhalb von einer Stunde komplett geladent oder entladen ist. Eine C-Rate kleiner als 1 bedeutet, dass es länger als einer Stunde dauert; eine C-Rate größer als 1, dass es weniger als einer Stunde dauert.

das Fahrzeug nicht längerfristig außer Betrieb, muss ggf. tagelang in die Werkstatt und durch ein Ersatzfahrzeug substituiert werden. Dieser Aspekt erhöht die Betriebszeitverfügbarkeit der Flotte und kann prognostisch die Ausfallkosten senken.

Infrastruktur- und Fixkosten

Für Flottenbetreiber ist entscheidend, ob Infrastrukturinvestitionen selbst getragen oder über nutzungsabhängige Preise eingekauft werden. Die Kosten zum Aufbau und Betrieb der Ladeinfrastruktur verteilen sich entsprechend unterschiedlich. Privates Depotladen erfordert die Installation von Ladestationen am Betriebshof; bei mehreren Lkw ggf. ein signifikanter Invest mit teils langen Genehmigungszeiten. Öffentliches Laden verlagert die Kosten des Infrastrukturaufbaus an Dritte wie Charging Point Operator (CPO). Der Nutzende zahlt hier pro kWh einen Aufpreis, der die Infrastruktur mitfinanziert.

Laut einer Studie, die von der e-mobil BW GmbH 2021 veröffentlicht wurde, belaufen sich die CAPEX für die Hardware, Planung, Installation und Inbetriebnahme sowie Netzanbindung (inkl. Transformator) für eine 350 kW-HPC-Ladesäule auf über 130 k€ (Waxmann et al. 2021).⁵ In der betrieblichen Praxis können diese Investitionskosten jedoch, je nach Standortgegebenheiten, deutlich höher ausfallen. Ist bspw. der nächste Mittelspannungsanschlusspunkt weit entfernt und sind umfangreiche Tiefbauarbeiten erforderlich, steigen die Ausgaben für Netzanbindung und Baumaßnahmen erheblich. Hinzu kommt, dass in logistischen Depots, wenn nicht von Grund auf neugeplant, selten eine ideale Anordnung der Ladeplätze zum Mittelspannungsanschluss realisiert werden kann, sodass die Säule inklusive Installation teils etwa doppelt so teuer werden kann.⁶ Zusätzlich sind die Flächenkosten der Ladeplätze zu berücksichtigen, da hier in der Regel keine bestehenden Park- bzw. Stellplätze substituiert werden: Der Lkw muss den Ladeplatz nach Abschluss des Ladevorgangs wieder räumen, sodass zusätzliche Abstellflächen vorgehalten werden müssen. Laut Plötz et al. (2025) belaufen sich die CAPEX im Jahr 2025 (Hardware, Installation, Netzanbindung) für eine MCS-Station mit 4 Ladepunkten in einer Spanne von rund 1,33 bis 1,47 Mio. €. Allein für Deutschland konstatieren Speth et al. (2022), dass entlang stark frequentierter Strecken die Ladestationen bereits in einer frühen Marktphase teils mit bis zu 13 Ladepunkten ausgestattet sein müssen, um dem prognostizierten Hochlauf batterie-elektrischer Lkw gerecht zu werden. Neben den hohen Infrastrukturkosten entstehen somit hohe Flächenbedarfe und -kosten allein entlang des deutschen Autobahnnetzes.

Battery Swapping Stationen haben potenziell die höchsten Infrastrukturkosten: Eine Station muss vollautomatische Wechselvorrichtungen und einen Puffer an Ersatzbatterien vorhalten. Laut Bernard et al. (2022) liegen die Investitionskosten je nach Batteriekapazität und Anzahl der Ladeplätze im Bereich 1 bis 1,5 Million USD pro Station für schwere Nutzfahrzeuge. Rund die Hälfte der Kosten entfällt auf die vorgehaltenen Batterien (Cui et al. 2023). Zwar ist der erreichbare Energieumsatz, ebenso wie bei konventionellen Ladesäulen, im Wesentlichen durch die verfügbare Netzanschlussleistung begrenzt, jedoch können Battery Swapping Stationen bei ausreichender Auslastung durch die Entkopplung von Fahrzeugstandzeit und Batterieladung einen höheren realisierten Fahrzeugdurchsatz erreichen, da sie weniger stark von einer perfekt geplanten Lade- und Umlaufdisposition abhängig sind. Eine Untersuchung von Zhu et al. (2023) zeigt etwa, dass Battery Swapping wirtschaftlich am günstigsten wird, sobald eine Station über 43 % Auslastung erreicht. Dadurch werden die hohen Investitionskosten auf viele Fahrzeuge umgelegt, was wiederum potenziell günstigere Preise pro kWh für den Nutzenden ermöglicht. Für transportierende Unternehmen aber auch Betreiber von Swapping Stationen folgt daraus, dass Battery Swapping in Korridor-, Shuttle- oder Hub-to-Hub-Verkehren ökonomisch vorteilhaft sein kann, in denen ausreichend Durchsatz entsteht, um Fixkosten zu verteilen. Gleichzeitig sinkt der Flächenbedarf an diesen neuralgischen Ladepunkten durch Einsatz des Battery Swappings im Vergleich zu stationären Ladeoptionen.

Energie-Arbitrage

Energie-Arbitrage kann die Erlöse des Betreibers einer Battery Swapping Station erhöhen, sollte jedoch nicht als primärer Werttreiber kalkuliert werden. Hierzu werden die Swapping Stationen bidirektional gestaltet, um Netzdienstleistungen anzubieten (Jerratsch et al. 2025; He 2025). Arbitrage-Potenziale entstehen aus zeitvariablen Beschaffungspreisen und lokaler Erzeugung, bspw. durch Photovoltaik oder Power-Purchase-Agreements. Diese Potenziale sind opportunistisch zu nutzen, ohne die operativen Ziele des Battery Swappings für die Nutzenden zu gefährden. Das Grundgeschäft sollte jedoch die verlässliche Bereitstellung von Tauschkapazität mit hoher Verfügbarkeit und definierten Tauschzeiten bleiben.

Vergleichsrechnung stationäres Laden und Swapping

Um die zuvor diskutierten Kostenhebel (Energiebezug, Opportunitätskosten, Batterie- und Fahrzeugkapitalkosten, Infrastruktur-CAPEX sowie Nutzlastwirkungen) in eine greifbare Größenordnung zu überführen, wird nachfolgend eine

beispielhafte Vergleichsrechnung für die Kosten von Flottenbetreibern für Deutschland dargestellt. Betrachtet werden hierzu zwei Einsatzprofile:

- 80.000 km/Jahr im regionalen Verkehr mit überwiegend planbarem Depotladen
- 150.000 km/Jahr im Fernverkehr mit erhöhtem Anteil nicht-depotgebundener Energieversorgung

Die Ergebnisse werden als Kostenbandbreiten ausgewiesen, um die Unsicherheiten zentraler Parameter (u. a. Strompreise, Swap-Gebühr, Infrastruktur- und Batterie-CAPEX) transparent abzubilden. Die Beispielrechnungen dienen der Illustration von Größenordnungen und Kostentreibern; sie sind keine Prognose für einen konkreten Standort oder eine spezifische Flotte. Die Bandbreiten ergeben sich aus heute unsicheren bzw. stark standortabhängigen Parametern und werden daher bewusst als Range ausgewiesen. Für die Kalkulationen gelten insbesondere folgende Einschränkungen:

- Standort- und netzseitige Effekte (z. B. tatsächlich verfügbare Anschlussleistung, Baukostenzuschüsse, konkrete Netzentgelt-/Lastspitzenwirkung) können je Depot stark variieren; die Rechnung bildet diese nur über vereinfachte Annahmen ab.
- Preislogiken im öffentlichen Laden und im Swapping (kWh-Preis, Swap-Gebühr, mögliche zusätzliche Serviceentgelte) sind derzeit markt- und vertragspezifisch; reale Konditionen können deutlich abweichen.
- Infrastruktur-Auslastung und Betriebsorganisation (z. B. wie viele Lkw sich eine Depot-Ladesäule teilen, zeitliche Glättung, Ladefenster) beeinflussen die annualisierten Infrastrukturkosten maßgeblich; die Rechnung nutzt hierfür vereinfachte Auslastungsannahmen.
- Nicht enthalten bzw. bewusst ausgeklammert sind u. a. Detour- und Queue-Effekte (Warte- und Umwegzeiten), mögliche Flotten-Resilienzvorteile (z. B. höhere Verfügbarkeit durch Batteriepool) sowie sämtliche Effekte aus spezifischen Fördermaßnahmen oder individuellen Finanzierungs-/Restwertannahmen.

Die Kostenblöcke pro Jahr und Lkw werden wie folgt berechnet:

(1) Depot & öffentliches Laden

$$C_{\text{Depot,Total}} = (C_{E,\text{Mix}} + C_{\text{Opp,HPC}} + C_{\text{Veh}} + C_{\text{Bat}} + C_{\text{Infra,CAPEX}} + C_{\text{Infra,Betrieb}}) * M(B_{\text{Depot}})$$

mit Energiebezug:

$$C_{E,\text{Mix}} = E * [(1-p) * f_{\text{Depot}} + p * f_{\text{HPC,öffentlich}}] \text{ mit } E = \text{KM} * k$$

Opportunitätskosten: $C_{\text{Opp,HPC}} = (p * E * f_{\text{Opp}}) / P_{\text{Peak}}$

Fahrzeug-CAPEX (ohne Batterie): $C_{\text{Veh}} = f_{\text{Veh}} * 365$

Batterie-CAPEX : $C_{\text{Bat}} = f_{\text{Bat}} * B_{\text{Depot}} * 365$

Depot-Ladeinfrastruktur-CAPEX: $C_{\text{Infra,CAPEX}} = f_{\text{Infra}} / (n_{\text{Lkw}} * L)$

Depot-Ladeinfrastruktur-Betrieb: $C_{\text{Infra,Betrieb}} = (f_{\text{Infra}} * c_{\text{Betrieb}}) / n_{\text{Lkw}}$

Nutzlastverlust-Multiplikator: $M(B_{\text{Depot}}) = V / (V - w * B_{\text{Depot}})$

(2) Swapping (BaaS)

$$C_{\text{Swap,Total}} = (C_{E,\text{Swap}} + C_{\text{Service,Swap}} + C_{\text{Opp,Swap}} + C_{\text{Veh}}) * M(B_{\text{Swap}})$$

mit Energiebezug: $C_{E,\text{Swap}} = E * f_{\text{Swap}}$ mit $E = \text{KM} * k$

Swap-Service-Fee: $C_{\text{Service,Swap}} = E * S_{\text{Swap}}$

Opportunitätskosten: $C_{\text{Opp,Swap}} = N_{\text{Swap}} * c_{\text{Swap}}$ mit $N_{\text{Swap}} =$

$$E / (u * B_{\text{Swap}}), u \in [0, 0, 9] \text{ und } c_{\text{Swap}} = t_{\text{Swap}} * f_{\text{Opp}}$$

Fahrzeug-CAPEX (ohne Batterie): $C_{\text{Veh}} = f_{\text{Veh}} * 365$

Nutzlastverlust-Multiplikator: $M(B_{\text{Swap}}) = V / (V - w * B_{\text{Swap}})$

Wenn Ladeprozesse überwiegend in planmäßigen Standzeiten am Depot stattfinden können, zeigen die Ergebnisse im regionalen Verkehr mit überwiegend planbarem Depotladen (80.000 km/Jahr), dass kaum zusätzliche Opportunitätskosten anfallen. Damit rücken Energiebezug (€/kWh) sowie CAPEX-getriebene Kostenblöcke (Batterie und Depot-Ladeinfrastruktur) in den Vordergrund. Battery Swapping kann nur dann wirtschaftlich konkurrieren, wenn die Swap-Service-Fee und das Swap-Energie-Preissetting niedrig genug sind, um spürbar Batterie- sowie Depot-Ladeinfrastruktur-CAPEX und den Betrieb dieser zu kompensieren.

Im Fernverkehr mit erhöhtem Anteil nicht-depotgebundener Energieversorgung (150.000 km/Jahr) verschiebt sich die Gewichtung: Durch knappe Depot-Zeitfenster und einen höheren Anteil (semi-)öffentlicher HPC-Energie steigen sowohl die laufenden Betriebskosten (engl. Operational Expenditures (OPEX)) für Energie als auch die Opportunitätskosten durch Ladezeiten. Genau hier zeigt die Beispielrechnung, warum Battery Swapping als Option erscheint: Eine höhere nutzungsabhängige Gebühr (Swap-Service-Fee) kann durch geringere Fahrzeugstillstandszeit teilweise oder vollständig kompensiert werden. Zusätzlich kann eine kleinere Batterieauslegung, und damit ein geringerer Nutzlastverlust, die Gesamtkosten beeinflussen. Gleichzeitig kann ein BaaS-Geschäftsmodell spürbar die Batterie- und

⁵ OPEX für Betrieb wie bspw. Wartung und Reparatur, Internetanbindung werden hier ausgeklammert.

⁶ Werte basierend auf durchgeführten Expertengesprächen.

Parameter	Variable	Range	Quelle/Anmerkung
Jahresfahrleistung	KM	80.000 km/Jahr	vgl. TNO et al. (2018)
Verbrauch (Autobahn & Stadt)	k	1,5 kWh/km	vgl. Shoman et al. (2023)
Anteil öffentliches Laden	p	0–5 %	vgl. Suzan & Mathieu (2021)
Opportunitätskosten (Personal, Fahrzeug und Transportleistung)	f _{Opp}	50 €/h	basierend auf Expertengesprächen
Depot-Ladeinfrastruktur (175 kW) CAPEX	f _{infra}	45.000–67.500 €	vgl. Bernard et al. (2022); Waxmann et al. (2021)
Fahrzeug-CAPEX (ohne Batterie)	f _{Veh}	59 €/Tag	vgl. Börjesson et al. (2025)
Batterie-CAPEX	f _{Bat}	0,083 €/kWh/Tag	vgl. Börjesson et al. (2025)
Strompreise (Depot)	f _{Depot}	0,15–0,20 €/kWh	vgl. Hacker et al. (2025)
Strompreise (Öffentlich)	f _{HPC,öffentlich}	0,40–0,60 €/kWh	vgl. Milence (2026) und basierend auf Expertengesprächen
Strompreise (Swap)	f _{Swap}	0,25–0,50 €/kWh	Annahme der Arbitrage, wodurch Swapping Station Betreiber niedrige kWh-Preise für den Nutzenden ermöglichen können
Swapping-Gebühr (Swap)	s _{Swap}	0,03-0,10 €/kWh	vgl. Börjesson et al. (2025)
Batteriegröße (Depot)	B _{Depot}	550–650 kWh	vgl. Link & Plötz (2022)
Batteriegröße (Swap)	B _{Swap}	450-550 kWh	vgl. Wang et al. (2025)
Ladeleistung (Öffentlich)	P _{peak}	350 kW	vgl. Basma & Schmidt (2025)
Zeit (Swap)	t _{Swap}	5–10 min	vgl. Li et al. (2024)
Depot-Ladeinfrastruktur (Betrieb & Instandhaltung)	c _{Betrieb}	1,20%	vgl. Bernard et al. (2022)
Lkw/Ladepunkt	n _{Lkw}	1–4 Lkw/Ladepunkt	vgl. Göckeler et al. (2023)
Abschreibungsdauer (linear)	L	9 Jahre	vgl. Bundesministerium der Finanzen (2000)
Nutzlast	V	27 t	vgl. Basma et al. (2021)
Batteriegewichtsfaktor	w	0,005 t/kWh	vgl. Khan et al. (2023); Basma et al. (2021)

Tabelle 1: Definition der Parameter für 80.000 km/Jahr im regionalen Verkehr mit überwiegend planbarem Depotladen

Kostenblock (€/a pro Lkw)	Depot & öffentliches Laden	Swapping (BaaS)
Energiebezug	18.000-26.400 €	30.000-60.000 €
Opportunitätskosten	0-860 €	1.240-2.280 €
Swap-Service-Fee	–	3.600-12.000 €
Nutzlastverlustkosten	6.530-10.510 €	5.125-10.870 €
Fahrzeug-CAPEX (ohne Batterie)	21.540 €	21.540 €
Batterie-CAPEX	16.660-19.690 €	–
Depot-Ladeinfrastruktur-CAPEX	1.250-7.500 €	–
Depot-Ladeinfrastruktur (Betrieb)	140-810 €	–
SUMME	64.120-87.310 €	61.500-106.690 €

Tabelle 2: Kostenblöcke für 80.000 km/Jahr im regionalen Verkehr mit überwiegend planbarem Depotladen

Depot-Ladeinfrastruktur-CAPEX zugunsten von Flottenbetreibern reduzieren.

Quintessenz

Battery Swapping kann unter Bedingungen hoher Auslastung, zeitlicher Restriktionen und größerer Flottengrößen die TCO für Flottenbetreiber verbessern, insbesondere durch verringerte Stillstandszeiten und geringere Ladeinfrastruktur-CAPEX. Zusätzlich nimmt der Netzausbau, insbesondere auf Mittelspannungsebene, teilweise mehrere Jahre in Anspruch und erfolgt meist nach dem Prinzip »First come, first served«. Im Zuge dessen kann Battery Swapping dazu beitragen diese Situation für Einzelunternehmen zu entspannen. Zusätzlich könnte mittel- bis langfristig autonomes Fahren die Logiken von Lenkzeiten und Ladefenstern verändern, wobei Battery Swapping einen stärker kontinuierlichen 24/7-Betrieb ermöglicht.

Die Studienlage zeigt, dass sich Battery Swapping wirtschaftlich nicht als »one size fits all«-Ansatz bewerten lässt. Vielmehr hängt das Ergebnis stark vom Einsatzprofil (Tourenlängen, Zeitfenster, Tageskilometer), von Systemparametern (Batteriegröße, Lade-/Swap-Zeiten, Infrastrukturverfügbarkeit) und vom Geschäftsmodell (Batterieeigentum vs. BaaS, Swap-Preise und Gebührenlogik) ab. Es ist hierbei wichtig zu beachten, dass die Datenlage zu realen Betriebskosten bei schweren Swap-Flotten noch stark begrenzt ist. Durchgehend weisen die im Rahmen dieses White Papers

sondierten Studien explizit auf Unsicherheiten in der Parametrisierung hin.

Die Literatur liefert trotz unterschiedlicher Annahmen jedoch Anhaltspunkte für Kostenspannen und Größenordnungen. Börjesson et al. (2025) konstatieren für ihr europäisches Multi-Day-Trip-Modell Tageskosten pro Truck, die je nach Szenario und Parameterannahmen für Battery Swapping im Bereich von etwa 961 bis 1.248 EUR pro Tag liegen, während stationäres Laden in ihrem Modell etwa 1.060 bis 1.494 EUR pro Tag erreicht. Aus diesen Zahlen lässt sich als Orientierungsgröße ableiten, dass Battery Swapping unter bestimmten Annahmen für Flottenbetreiber pro Fahrzeug und Tag günstiger sein kann.

Im chinesischen Kontext zeigen Zhu et al. (2023) auf Basis eines tonnenkilometer-orientierten Kostenmodells, dass Battery Swapping insbesondere im mittleren Recharge-Distanz-Bereich wirtschaftlich sein kann und bei ausreichend hoher Stationsauslastung gegenüber stationärem Laden Vorteile aufweist. Wu et al. (2021) bestätigen in einer anwendungsnahen Kostenstudie, dass Battery Swapping im betrachteten Einsatz ökonomisch attraktiv sein kann, wobei die Ergebnisse stark davon abhängen, welche Infrastrukturkosten den Flottenbetreibern zugerechnet werden (z. B. rein Nutzung oder Pacht/Leasing von Stationen) und wie dicht das Stationsnetz ist.

Björssen et al. (2025) haben im Zusammenhang der TCO die Kosten pro Tour und Tag für mehrtägige Langstreckenverkehre

Parameter	Variable	Range	Quelle / Anmerkung
Jahresfahrleistung	KM	150.000 km/Jahr	vgl. Zähringer et al. (2024); Unterlochner (2021)
Verbrauch (Autobahn)	k	1,8 kWh/km	vgl. Shoman et al. (2023)
Anteil öffentliches Laden	p	25–40 %	vgl. Suzan & Mathieu (2021)
Opportunitätskosten (Personal, Fahrzeug und Transportleistung)	f _{Opp}	50 €/h	basierend auf Expertengesprächen
Depot-Ladeinfrastruktur (350 kW) CAPEX	f _{infra}	150.000–250.000 €	vgl. Bernard et al. (2022); Waxmann et al. (2021)
Fahrzeug-CAPEX (ohne Batterie)	f _{Veh}	59 €/Tag	vgl. Börjesson et al. (2025)
Batterie-CAPEX	f _{Bat}	0,083 €/kWh/Tag	vgl. Börjesson et al. (2025)
Strompreise (Depot)	f _{Depot}	0,15–0,20 €/kWh	vgl. Hacker et al. (2025)
Strompreise (Öffentlich)	f _{HPC,öffentlich}	0,40–0,60 €/kWh	vgl. Milence (2026) und basierend auf Expertengesprächen
Strompreise (Swap)	f _{Swap}	0,25–0,50 €/kWh	Annahme der Arbitrage, wodurch Swapping Station Betreiber niedrige kWh-Preise für den Nutzenden ermöglichen können
Swapping-Gebühr (Swap)	s _{Swap}	0,03-0,10 €/kWh	vgl. Börjesson et al. (2025)
Batteriegröße (Depot)	B _{Depot}	600–700 kWh	vgl. Link & Plötz (2022)
Batteriegröße (Swap)	B _{Swap}	450-550 kWh	vgl. Wang et al. (2025)
Ladeleistung (Öffentlich)	P _{peak}	350 kW	vgl. Basma & Schmidt (2025)
Zeit (Swap)	t _{Swap}	5–10 min	vgl. Li et al. (2024)
Depot-Ladeinfrastruktur (Betrieb & Instandhaltung)	c _{Betrieb}	1,20%	vgl. Bernard et al. (2022)
Lkw/Ladepunkt	n _{Lkw}	1–8 Lkw/Ladepunkt	vgl. Göckeler et al. (2023)
Abschreibungsdauer (linear)	L	9 Jahre	vgl. Bundesministerium der Finanzen (2000)
Nutzlast	V	27 t	vgl. Basma et al. (2021)
Batteriegewichtsfaktor	w	0,005 t/kWh	vgl. Khan et al. (2023); Basma et al. (2021)

Tabelle 3: Definition der Parameter für 150.000 km/Jahr im Fernverkehr mit erhöhtem Anteil nicht-depotgebundener Energieversorgung

Kostenblock (€/a pro Lkw)	Depot & öffentliches Laden	Swapping (BaaS)
Energiebezug	57.380–97.200 €	67.500–135.000 €
Opportunitätskosten	9.640–15.430 €	2.780-5.120 €
Swap-Service-Fee	–	8.100–27.000 €
Nutzlastverlustkosten	13.630–32.900 €	9.080-21.390 €
Fahrzeug-CAPEX (ohne Batterie)	21.540 €	21.540 €
Batterie-CAPEX	18.180–24.240 €	–
Depot-Ladeinfrastruktur-CAPEX	2.080–27.780 €	–
Depot-Ladeinfrastruktur (Betrieb)	230–3.000 €	–
SUMME	122.680–222.090 €	109.000-210.050 €

Tabelle 4: Kostenblöcke für 150.000 km/Jahr im Fernverkehr mit erhöhtem Anteil nicht-depotgebundener Energieversorgung

in Europa modelliert und sind zu dem Schluss gekommen, dass swap-fähige Lkw Stand heute einen Kostenvorteil für die Fahrzeughaltenden von bis zu 17 % gegenüber stationär geladenen Lkw erbringen können und auch 2035 dieser Vorteil weiterhin besteht (bis zu 10 %). Treiber hierfür sind insbesondere die Kapitalkosten der Batterie, die Energiebezugskosten im (semi-)öffentlichen Raum und die durch die Ladeprozesse entstehenden Opportunitätskosten. In diesem Zusammenhang kommen die Autoren der Studie zu dem Schluss, dass Battery Swapping von der EU bei der Ausarbeitung von Maßnahmen zur Förderung der Elektrifizierung von Lkw zur Erreichung der Klimaziele nicht außer Acht gelassen werden sollte.

Über die Studien hinweg lassen sich entsprechend wiederkehrende Bedingungen identifizieren, unter denen Battery Swapping aus Flottenbetreiber-Sicht wirtschaftlicher als stationäres Laden sein kann. Erstens wächst der Vorteil von Battery Swapping mit steigenden Zeitkosten, insbesondere in Einsätzen mit engen Zeitfenstern, hoher Tourfrequenz oder Situationen, in denen zusätzliche Ladehalte zu zusätzlichem Fahrzeugeinsatz oder zu Mehrschichten führen. Wang et al. (2025) sowie Börjesson et al. (2025) machen deutlich, dass Zeit- und Arbeitskosten in vielen Szenarien der dominante Hebel sind. Zweitens steigt die Wirtschaftlichkeit mit hoher Auslastung der Swap-Infrastruktur. Zhu et al. (2023) quantifizieren dies explizit, indem sie Battery Swapping als kostengünstigstes Konzept für schwere batterie-elektrische Lkw dann ausweisen, wenn Stationsauslastungen größer

als 43 % sind. Diese Kippunkte sind kontextspezifisch, verdeutlichen aber das Grundprinzip, das auch Speth und Funke (2019) qualitativ betonen: Battery Swapping ist fixkostenintensiv und benötigt eine genügend hohe Nutzungsintensität, um wettbewerbsfähig zu werden. Drittens spielt die Gebührenlogik eine Schlüsselrolle. Selbst bei gegebenen Zeitgewinnen kann eine (zu) hohe Swap-Gebühr den Vorteil neutralisieren. Börjesson et al. (2025) geben hierfür einen modellbasierten Schwellenwert von 50 EUR pro Swap als Orientierung an. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass Battery Swapping besonders dann attraktiv wird, wenn Swap-Preise möglich sind, die die Produktivitätsgewinne nicht überkompensieren. Viertens hängt die Vorteilhaftigkeit eng mit der Batteriegröße und damit mit Nutzlast- und CAPEX-Effekten zusammen. Wenn stationäres Laden nur mit großen Batterien praktikabel ist, steigen Batteriekapitalbindung und Nutzlastverluste. Battery Swapping kann dann über kleinere oder mittlere Batterien ökonomische Vorteile erzielen (Wang et al., 2025; Zhu et al., 2023).

Die Studienlage deutet infolgedessen daraufhin, dass Battery Swapping im Bereich schwerer Nutzfahrzeuge einerseits für die Nutzenden einen Kostenvorteil ggü. rein stationär geladenen Fahrzeugen bieten kann, gleichzeitig Potenziale für Geschäftsmodelle für Betreiber von Swapping Stationen vorhanden sind und andererseits durch eine stärkere Durchdringung von batterie-elektrischen Lkw mithilfe des Battery Swappings der Dekarbonisierungsstrategie in der EU ein Vor-schub geleistet werden kann.

6. Handlungsempfehlungen

Basierend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Kapitel werden Handlungsempfehlungen formuliert. Diese sollen als Impulsgebung für eine vertiefte akteursübergreifende Zusammenarbeit zwischen relevanten Akteuren aus Politik, Wirtschaft und Forschung dienen, um die Kooperationen zur Weiterentwicklung des Battery Swappings schwerer Nutzfahrzeuge in Deutschland und Europa zielgerichtet voranzutreiben. Diese sind als einzelne Bausteine zu verstehen, die in Teilen komplementär und sukzessive mithilfe der entsprechenden Akteure entwickelt und umgesetzt werden sollten.

Use-Case-Fokus

Der Ansatz entfaltet seinen Nutzen insbesondere in operationellen Kontexten mit hohen Tagesfahrleistungen, straffen Umlaufplänen sowie begrenzten Netz- und Flächenressourcen. Für Linien- bzw. Hub-to-Hub-Verkehre mit Mehrschichtbetrieb ermöglicht Swapping die Entkopplung von Energieaufnahme und Tourenplanung, reduziert Stillstandszeiten und erhöht den potenziellen Fahrzeugdurchsatz. Eine fokussierte Markteinführung entlang weniger, klar definierter Verkehrskorridore mit Ankerdepots (bspw. Güterverkehrszentren) ist strategisch zielführend, da sie Nachfragebündelung, Lernkurveneffekte und regulatorische Klärungen beschleunigt.

Standardisierung und technische Referenzarchitektur

Die Skalierung setzt eine frühzeitige, industriegetragene Standardisierung voraus. Wie in *Kapitel 3* dargestellt, finden solche Standardisierungsprozesse im asiatischen Raum bereits vermehrt akteursübergreifend statt. Eine herstellerübergreifende Referenzspezifikation für wechselfähige Packs/Module im europäischen Raum mit definierten HV-, Kühl- und Kommunikationsschnittstellen muss um belastbare Anforderungen an Verriegelungsmechanik, Zyklenfestigkeit, Thermomanagement und funktionale Sicherheit ergänzt werden und kann sich gegebenenfalls an asiatischen Prozessen und Lösungen orientieren. Unverzichtbar sind Konformitäts- und Interoperabilitätstests sowie klare IP- und Lizenzregeln. Aus Sicht der digitalen Kommunikation sind swap-spezifische Erweiterungen bestehender Protokolle (z. B. analog ISO 15118) mit Mindestanforderungen an SoH-/SoC-Transparenz als Teil eines »Battery Passports« zu etablieren.

Geschäftsmodell und Finanzierung

Das Zielbild trennt Fahrzeug-, Infrastruktur- und Batterieeigentum und nutzt ein BaaS-Design. Denkbar ist eine eigenständige Battery-Asset-Gesellschaft, um Restwert- und Obsoleszenzrisiken professionell zu managen. Tariflich können Energieentgelte, Swap-Gebühren und vertraglich fixierte Verfügbarkeits-SLAs kombiniert werden. Die Batterie-Pooldimensionierung erfolgt service-level-basiert, bspw. entlang definierter Zielkorridore für Wartezeit und Ankunftsvarianz, statt über pauschale »Batterienpro-Fahrzeug«-Quoten. Ein paralleler Fallback über leistungsfähige HPC/MCS-Ladepunkte am Standort senkt Single-Point-of-Failure-Risiken und stabilisiert die Servicekontinuität. Für OEMs verschiebt ein solches Modell die Verteilung von Investitionen und Erlösen zwischen Fahrzeugverkauf, Batteriegeschäft und Serviceleistungen. Rollen, Anreizstrukturen und Datenschnittstellen im Zusammenspiel von OEM, Betreiber und Asset-Gesellschaft sind daher explizit zu klären (z. B. Teilnehmungsmodelle, langfristige Wartungs- und Performance-Services, SBS-Optionspakete), sodass Fahrzeugverkauf und After-Sales-Geschäft nicht entkoppelt, sondern (weiterhin) ergänzt werden.

Netz- und energiewirtschaftliche Einbindung

Eine frühzeitige Planung der Mittelspannungsanbindung mit realistischen Leistungskorridoren ist unverzichtbar. Stationäre bzw. ungenutzte Speicherkapazitäten sollten primär zur Lastglättung und zur Senkung von Leistungspreisen eingesetzt werden; eine netzdienstliche Vermarktung kann ergänzend geprüft werden, sollte jedoch nicht als tragende Erlössäule kalkuliert werden. Die Integration standortnaher Photovoltaik und strompreisstabilisierender Lieferverträge verbessert die Kostenbasis, wenn die Lastgänge der Swap-Prozesse in die Beschaffungsstrategie eingebettet sind. Ein Redundanzkonzept mit mindestens zwei Tauschbahnen pro Station sowie klar definierten Notfall- und Instandhaltungsprozessen ist im Hinblick auf Verfügbarkeit und Sicherheit anzudenken.

Betrieb, Sicherheit und digitale Plattform

Für einen skalierbaren Betrieb ist eine Plattformarchitektur aufzubauen, die Reservierung, Zugangsmanagement, Abrechnung und Zustandsdaten der Batterien integriert und über offene Schnittstellen Interoperabilität mit Flotten- und Energiemanagementsystemen sicherstellt. Service-Level-Ziele für Tauschdauer,

Anlagenverfügbarkeit und Fehlerraten sind verbindlich zu definieren und durch prädiktive Wartung, standardisierte Ersatzteilerhaltung und wiederkehrende Audits abzusichern. Eine konsequente Datenerfassung und -auswertung über den gesamten Tauschprozess ist erforderlich, um technische Reifegrade sowie ökonomische Hypothesen fortlaufend zu validieren.

Digitale Interoperabilität und Cybersicherheit

Um Swapping nahtlos in die Disposition zu integrieren, braucht es ein offenes Protokoll für Buchung, Identifikation, Abrechnung sowie Verfügbarkeits-/Zustandsdaten, das gleichzeitig Plattformmonopole verhindert. Entlang der gesamten Kette, Fahrzeug, Batterie, Station und Backend, sind Sicherheitsanforderungen (z. B. nach IEC 62443) zu standardisieren, regelmäßig zu auditieren und mit sicherer Update-/Schlüsselverwaltung zu unterlegen, um Betriebsunterbrechungen und Manipulationen einer potenziell zukünftig kritischen Energieinfrastruktur vorzubeugen.

Grenzüberschreitende Verkehre und Rückführungslogik der Batterie

Für grenzüberschreitende Einsätze ist eine EU-weit harmonisierte Prozesskette erforderlich. Zentrale Elemente sind eine standardisierte Batterie-Identifikation, eine interoperable SoH-/SoC-Dokumentation sowie eine Clearing-Logik, die Batterie-tausche über Betreiber Grenzen hinweg verrechnet. Zoll- und Transportrecht sind in Hinblick auf den temporären Eigentumsübergang und die Rückführung von Batterien zu präzisieren. Praktikabel kann bei einem offenen Standard ein Clearing-Haus-Ansatz sein, der kWh-Flüsse, Nutzungsentgelte und eventuelle Pfandbeträge zwischen Betreibern saldiert. Fahrzeuge müssen jederzeit kabelgebunden laden können, um Rückführungspässe zu vermeiden. Die Abrechnung berücksichtigt den Ladezustand der zurückgegebenen Batterie sowie etwaige Qualitätsabweichungen, die über den dokumentierten SoH abgedeckt werden.

Zugangspolitik in offenen Korridoren

Ein skalierbares Modell erfordert eine explizite Zugangspolitik, die vertragliche Beziehungen zwischen Ankerflotten, Subunternehmern und Betreiber klar regelt. Zwingend ist eine eindeutige Identitäts- und Zugriffsverwaltung auf Fahrzeug- und Unternehmensebene, die Slot-Buchungen, Abrechnung und Haftung sauber zuordnet. Sinnvoll sind volumengebundene Preise für Ankerflotten sowie standardisierte Konditionen für Subunternehmer mit definierter Service-Level-Priorität.

Regulierung, Abrechnung und Compliance

Für einen regelkonformen Betrieb ist ein klarer, mit den zuständigen Stellen abgestimmter Konformitätspfad erforderlich. Im

Vordergrund stehen eine eichrechtskonforme kWh-Abrechnung einschließlich der Behandlung des rückgegebenen Ladezustands, eindeutige Regelungen zu Eigentum, Haftung und Versicherung der Batterie-Assets sowie konsistente Anforderungen an Bau-, Brand- und Betriebssicherheit der Stationen. Darüber hinaus sind variable Batteriegewichte und deren Auswirkungen auf Zulassung und Nutzlast verbindlich zu regeln. Ein frühzeitig institutionalisierter Dialog mit Normungsorganisationen und Marktaufsichtsbehörden reduziert Projektrisiken und verkürzt Genehmigungszeiten.

Forschung, Entwicklung und Qualifizierung

Priorität in Forschung und Entwicklung haben robuste Pack- und Verriegelungssysteme für hohe Zyklenzahlen, schnelle SoH-Diagnostik, Umgang mit Alterungsstreuung, thermisches Management sowie Schnittstellen zur Kreislaufwirtschaft (Refurbishment, Second-Life, hochwertiges Recycling). Offene Referenzstationen als »lebende Labore«, gemeinsam betrieben von Industrie und Forschungseinrichtungen, ermöglichen komponenten- und softwareseitige sowie prozessuale und betriebswirtschaftliche Validierung unter Realbedingungen. Die Veröffentlichung unabhängiger Auswertungen schafft Vertrauen und beschleunigt Lernkurven. Zusätzlich können operativ Schulungen für Werkstätten, Betreiber, Anwender und Einsatzkräfte von Feuerwehren Sicherheit und Akzeptanz erhöhen.

Energie-Arbitrage

Gleichzeitig kann Energie-Arbitrage die Erlöse des Betreibers einer Battery Swapping Station erhöhen, sollte jedoch nicht als primärer Werttreiber kalkuliert werden. Hierzu werden die Swapping Stationen bidirektional gestaltet, um Netzdienstleistungen anzubieten (Jerratsch, Killian & Marker 2025; He 2025). Arbitrage-Potenziale entstehen aus zeitvariablen Beschaffungspreisen und lokaler Erzeugung, bspw. durch Photovoltaik oder Power-Purchase-Agreements. Diese Potenziale sind opportunistisch zu nutzen, ohne die operativen Ziele des Battery Swappings für die Nutzenden zu gefährden. Das Grundgeschäft sollte jedoch die verlässliche Bereitstellung von Tauschkapazität mit hoher Verfügbarkeit und definierten Tauschzeiten bleiben.

Battery Swapping kann unter Bedingungen hoher Auslastung und größerer Flottengrößen die TCO verbessern, insbesondere durch verringerte Stillstandszeiten und niedrigere Anschlussleistungen. Zusätzlich nimmt der Netzausbau, insbesondere auf Mittelspannungsebene, teilweise mehrere Jahre in Anspruch und erfolgt meist nach dem Prinzip »First come, first served«. Im Zuge dessen kann Battery Swapping dazu beitragen diese Situation für Einzelunternehmen zu entspannen. Zusätzlich könnte mittel- bis langfristig autonomes Fahren die Logiken von Lenkzeiten und Ladefenstern verändern, wobei Battery Swapping einen stärker kontinuierlichen 24/7-Betrieb ermöglicht.

7. Fazit

»Swapping wird als wirksamer Hebel anerkannt.«

Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass Battery Swapping für den europäischen Hochlauf batterieelektrischer Schwerlastverkehre als komplementäre Technologie zu Depot-, HPC- und perspektivisch MCS-Laden einzuordnen ist. Sein spezifischer Beitrag kann in der Entkopplung von Energieaufnahme und Betrieb liegen: Der Tausch im Minutenbereich reduziert planbare Stillstände, ermöglicht ein netz- und preisoptimiertes Laden der Batterien in der Station und schafft damit in hochfrequenten, taktgebundenen Anwendungen zusätzliche Handlungsspielräume. Gleichzeitig bleibt für den breiten Roll-out der Fokus der europäischen Politik und Industrie auf kabelgebundene Lösungen gerichtet. Internationale Erfahrungen, insbesondere aus China, belegen zwar die technische und organisatorische Machbarkeit von Swapping im industriellen Maßstab, sind aber aufgrund abweichender Rahmenbedingungen nicht 1:1 übertragbar.

Die Praxisrückmeldungen zeichnen ein konsistentes Bild: Swapping wird von vielen als wirksamer Hebel in eng umrissenen Use-Cases anerkannt, während der Basishochlauf weiterhin primär über HPC/MCS erwartet wird, auch wenn aus den Expertengesprächen und Betriebserfahrungen ersichtlich wird, dass (bereits heute) durch eine reine Fokussierung auf HPC/MCS Skalierungsgrenzen durch Netzanschlusskapazitäten, Flächenverfügbarkeiten, Standortdichten und Verfügbarkeiten von Ladepunkten entstehen (können) (siehe Kapitel 4.4 und 5.1). Akteursübergreifend werden klare Eintrittsbedingungen benannt: herstellerübergreifende mechanische Interoperabilität der Wechselblöcke, definierte HV-, Kühl- und Kommunikationsschnittstellen

sowie ein regelkonformer Abrechnungspfad einschließlich der Behandlung des Rückgabe-SoC. Flankierend sind Eigentums-, Haftungs- und Versicherungsmodelle für BaaS zu klären. Aus Betriebssicht werden Redundanz und Fallback über kabelgebundene Ladepunkte gefordert, um Single-Point-of-Failure-Risiken der Stationen zu beherrschen. Eine digitale Plattform für Reservierung, Zugangsmanagement, Abrechnung und Zustandsdaten gilt als notwendige Infrastruktur, um Verfügbarkeit und Durchsatz transparent zu steuern.

Ökonomisch ist Swapping auf der Infrastrukturseite zunächst kapitalintensiver als eine einzelne HPC/MCS-Ladesäule, da neben Automatisierung ein Batteriepool vorgehalten und bewirtschaftet werden muss (siehe Kapitel 5.2). Im Vergleich zu einem MCS-Ladepunkt mit mehreren Ladesäulen und ggf. Pufferbatterien bewegt sich der Investitionsbedarf in einer ähnlichen Größenordnung. Die Vorteilhaftigkeit entsteht nicht per se, sondern aus betrieblicher Passung und Auslastung: je homogener die Flotte, je planbarer die Umläufe und je höher der Durchsatz, desto eher lassen sich Opportunitätskostenvorteile mittels Battery Swappings realisieren. Dabei sollte die Pooldimensionierung nicht als starre »Batterien-pro-Fahrzeug«-Quote verstanden werden, sondern service-level-basiert erfolgen (Wartezeit- und Ankunftsvarianz). Systemisch kann Swapping zudem Lastspitzen glätten, indem mit moderaten Leistungen vor- bzw. nachgeladen wird. Der allgemeine Netzausbaubedarf wird dadurch nicht ersetzt, aber lokal handhabbarer und temporär flexibler gestaltet.

Für einen belastbaren europäischen Roll-out lassen sich drei Arbeitsstränge ableiten. Erstens die technische Referenzarchitektur: Ein herstellerübergreifendes Wechsel- und Schnittstellenformat (Mechanik, HV, Kühlung,

Kommunikation) mitsamt SoH/SoC-Transparenz und Konformitäts-/Interoperabilitätstests verhindert Insellösungen und schafft Investitionssicherheit. Beispiele für Bestrebungen bestehen bereits im asiatischen, aber auch europäischen Raum (siehe Kapitel 3). Zweitens der Compliance-Pfad: eichrechtskonforme kWh-Abrechnung unter Berücksichtigung des Rückgabestatus, klare Eigentums- und Haftungsregeln und konsistente Bau-, Brand- und Betriebssicherheitsanforderungen. Drittens die Betriebs- und Marktorganisation: offene Protokolle und Schnittstellen, ein Zugangskonzept für Ankerflotten und Subunternehmer, Redundanz in der Station sowie – für grenzüberschreitende Verkehre – eine harmonisierte Clearing- und Rückführungslogik, damit Batterien über Betreiber Grenzen hinweg verrechnet und rückgeführt werden können.

Entscheidend ist das Timing. Europa verfügt über wesentliche normative Grundpfeiler im Bereich Kommunikation und Sicherheit sowie über ein sich schnell formierendes MCS-Ökosystem. Offene Punkte – allen voran die mechanische Interoperabilität, die Verzahnung mit Abrechnungs- und Marktaufsicht sowie der Nachweis robuster Betriebs-SLAs unter Realbedingungen – sind jedoch zeitkritisch. Wird ihre Klärung vertagt, wächst die Wahrscheinlichkeit, dass externe (außer-europäische) Lösungen de-facto Standards setzen, denen Europa nachfolgt, statt sie mitzugestalten. Gleichzeitig existiert kein »perfekter« Zeitpunkt: Sinnvoll ist, Battery Swapping ausdrücklich als Ergänzung zum MCS-Hochlauf zu begreifen und kurzfristig koordinierte, standardoffene Korridor-Piloten mit Ankerflotten aufzusetzen. So lassen sich technische, regulatorische und betriebswirtschaftliche Fragen unter realen Lastprofilen adressieren, Lernkurven beschleunigen und Pfadabhängigkeiten vermeiden – und zugleich die Elektrifizierung schwerer Nutzfahrzeuge im Zusammenspiel der Technologien beschleunigen.

Literaturverzeichnis

- [1] **Basma & Schmidt (2025):** Charging infrastructure needs for battery electric trucks in the European Union by 2030, URL: https://theicct.org/wp-content/uploads/2025/10/ID-476-%E2%80%93-EU-BETs_report_final-1.pdf [Zugriff: 12.02.2026].
- [2] **Basma et al. (2021):** Battery electric tractor-trailers in the European Union: A vehicle technology analysis, URL: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/12/eu-tractor-trailers-analysis-aug21-2.pdf> [Zugriff: 12.02.2026].
- [3] **Bernard et al. (2022):** Charging Solutions for Battery-Electric Trucks, URL: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/12/charging-infrastructure-trucks-zeva-dec22.pdf> [Zugriff: 12.02.2026].
- [4] **BMV (2025):** Masterplan Ladeinfrastruktur 2030 der Bundesregierung, URL: https://www.bmv.de/Shared-Docs/DE/Anlage/K/masterplan-ladeinfrastruktur-2030.pdf?__blob=publicationFile [Zugriff: 12.02.2026].
- [5] **Börjesson et al. (2025):** Stationary charging, electric road charging or battery swapping? A multi-day truck trip cost model. In: Research in Transportation Business & Management, Vol. 62 (October 2025), URL: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2025.101431> [Zugriff: 12.02.2026].
- [6] **Bundesministerium der Finanzen (2000):** AfA-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter (AfA-Tabelle "AV"), URL: https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere_Steuertemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/Ergaenzende-AfA-Tabellen/AfA-Tabelle_AV.html [Zugriff: 12.02.2026].
- [7] **Bundesnetzagentur (2025a):** Der Strommarkt im Jahr 2024. Energiemarkt aktuell, URL: <https://www.smard.de/page/home/topic-article/444/215556/der-strommarkt-im-jahr-2024> [Zugriff: 12.02.2026].
- [8] **Bundesnetzagentur (2025b):** Zusammenhang von Strompreis und Netzentgelt, URL: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/BK08/BK8_06_Netzentgelte/BK8_NetzE.html [Zugriff: 12.02.2026].
- [9] **CATL (2025):** CATL Joins Hands with Sinopec to Build Battery Swap Stations, URL: <https://www.catl.com/en/news/6396.html> [Zugriff: 12.02.2026].
- [10] **CATL (2023):** China's First Battery Swapping Trunk Line for Heavy-Duty Trucks Put into Operation, URL: <https://www.catl.com/en/news/6107.html> [Zugriff: 12.02.2026].
- [11] **Council of the European Union (2025):** Communication from the Commission to the European Parliament and the Council on the technological and market readiness of heavy-duty road transport vehicles (COM(2025) 260 final), URL: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-9568-2025-INIT/en/pdf> [Zugriff: 12.02.2026].
- [12] **Cui et al. (2023):** China is propelling its electric truck market by embracing battery swapping, URL: <https://theicct.org/china-is-propelling-its-electric-truck-market-aug23/> [Zugriff: 12.02.2026].
- [13] **de Leeuw van Weenen et al. (2025):** Study on the availability of suitable rest facilities for professional drivers and of secured parking facilities, as well as on the development of safe and secure parking facilities in the EU. Final report, URL: <https://data.europa.eu/doi/10.2832/7101639> [Zugriff: 12.02.2026].
- [14] **Designwerk (2025):** Batteriewechsel bei E-LKW: Effizienter Game Changer oder teure Nischenlösung?, URL: <https://www.designwerk.com/post/blog/batteriewechsel-bei-e-lkw-effizienter-game-changer-oder-teurenischenloesung/> [Zugriff: 12.02.2026].
- [15] **Deutsche Bahn AG (2024):** DB Schenker, Trailer Dynamics und CATL starten Studie für Wechselbatterien in eTrailern, URL: https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart_zentrales_uebersicht/DB-Schenker-Trailer-Dynamics-und-CATL-starten-Studie-fuer-Wechselbatterien-in-eTrailern-13069790 [Zugriff: 12.02.2026].
- [16] **DIN (2025):** Business plan for a DIN SPEC project: Battery swapping systems in electric heavy-duty vehicles - General requirements for automated battery swapping stations, URL: <https://www.din.de/de/wdc-beuth:din21:391361139/pdf-3617035> [Zugriff: 12.02.2026].
- [17] **European Commission, Directorate-General for Climate Action (2025):** Lorries, buses and coaches, URL: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-decarbonisation/road-transport/lorries-buses-and-coaches_en [Zugriff: 12.02.2026].
- [18] **European Commission: Directorate-General for Mobility and Transport (2025):** EU transport in figures. Statistical pocketbook 2025, URL: <https://data.europa.eu/doi/10.2832/2584130> [Zugriff: 12.02.2026].
- [19] **European Parliament & Council (2024):** Regulation (EU) 2024/1610 of the European Parliament and of the Council of 14 May 2024 amending Regulation (EU) 2019/1242 as regards strengthening the CO2 emission performance standards for new heavy-duty vehicles and integrating reporting obligations, amending Regulation (EU) 2018/858 and repealing Regulation (EU) 2018/956. Official Journal of the European Union, 06.06.2024, URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401610 [Zugriff: 12.02.2026].
- [20] **European Parliament & Council (2023a):** Regulation (EU) 2023/1804 on the deployment of alternative fuels infrastructure, and repealing Directive 2014/94/EU. Official Journal of the European Union, 22.09.2023, URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1804> [Zugriff: 12.02.2026].
- [21] **European Parliament and Council (2023b):** Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC. Official Journal of the European Union, 28.07.2023, URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj/eng> [Zugriff: 12.02.2026].
- [22] **Fraunhofer IVI (Hrsg.) (2024):** Nachhaltige Alternative für Speditionen im Fernverkehr. 20. November 2024 | Projekt eHaul zum automatischen Batteriewechsel von E-Lkw erfolgreich abgeschlossen, URL: <https://www.ivi.fraunhofer.de/de/archiv/2024/ehaul-abschluss.html> [Zugriff: 12.02.2026].
- [23] **Geely (Hrsg.) (2022):** Geely's Battery Swapping Just Got Bigger..., URL: <https://zgh.com/media-center/story/geelys-battery-swapping-just-got-bigger/?lang=en> [Zugriff: 12.02.2026].
- [24] **Göckeler et al. (2023):** Göckeler et al. (2023): StratES - Szenarien für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs: Studie auf Basis von Markthochlaufmodellierungen (Dritter Teilbericht). Berlin: Öko-Institut e. V., URL: <https://www.oeko.de/publikation/strates-szenarien-fuer-die-elektrifizierung-des-strassengueterverkehrs/> [Zugriff: 12.02.2026].
- [25] **Ghosh (2025):** Battery Swapping for Truck Electrification in the United States, URL: https://www.aceee.org/sites/default/files/pdfs/battery_swapping_for_truck_electrification_in_the_united_states.pdf [Zugriff: 12.02.2026].
- [26] **Hacker et al. (2025):** Truck depot charging. Final report for Transport and Environment, URL: https://www.transportenvironment.org/uploads/files/1-TE_truck-depot-charging_final-report_v15.3.pdf [Zugriff: 12.02.2026].
- [27] **Hampel (2025a):** JAC & CATL battery swapping station ready for commercial vehicles across China, URL: <https://www.electrive.com/2025/07/11/jac-catl-battery-swapping-station-ready-for-commercial-vehicles-across-china/> [Zugriff: 12.02.2026].
- [28] **Hampel (2025b):** Battery swapping for commercial vehicles expands in Japan, URL: <https://www.electrive.com/2025/06/07/battery-swapping-for-commercial-vehicles-expands-in-japan/> [Zugriff: 12.02.2026].
- [29] **Hampel (2023a):** Mitsubishi Fuso & Ample trial truck battery swapping, URL: <https://www.electrive.com/2023/07/26/mitsubishi-fuso-ample-trial-truck-battery-swapping/> [Zugriff: 12.02.2026].
- [30] **Hampel (2023b):** Nio and Geely join forces on battery swapping, URL: <https://www.electrive.com/2023/11/29/nio-and-geely-join-forces-on-battery-swapping/> [Zugriff: 12.02.2026].
- [31] **Hampel (2022):** SAIC, CATL, Sinopec & CNPC to swap batteries in China, URL: <https://www.electrive.com/2022/10/10/saic-catl-sinpec-cnpc-join-forces-on-battery-swapping/> [Zugriff: 12.02.2026].
- [32] **Hampel (2021):** Janus Electric & Li-S Energy collaborate on batteries, URL: <https://www.electrive.com/2021/11/24/janus-electric-li-s-energy-collaborate-on-batteries/> [Zugriff: 12.02.2026].
- [33] **He (2025):** Advancing Heavy-Duty Truck Electrification: The Status Quo of Battery Swapping Technology in China [Vortrag], DEKRA Zukunftskongress Nutzfahrzeuge 2025, Berlin, 28.10.2025.

- [34] **Huawei (2025):** North China's Yimin Mine deploys world's first fleet of 100 5G-A connected, self-driving electric trucks, URL: <https://www.huawei.com/en/media-center/our-value/2025/driverless-trucks-yimin-mine> [Zugriff: 12.02.2026].
- [35] **ICCT (Hrsg.) (2021):** China's New Energy Vehicle Industrial Development Plan for 2021 to 2035, URL: <https://theicct.org/sites/default/files/publications/China-new-vehicle-industrial-dev-plan-jun2021.pdf> [Zugriff: 12.02.2026].
- [36] **IEC (2025a):** IEC 62840-1:2025. Electric vehicle battery swap system - Part 1: General and guidance, URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/66398> [Zugriff: 12.02.2026].
- [37] **IEC (2025b):** IEC 62840-2:2025 CMV. Electric vehicle battery swap system - Part 2: Safety requirements, URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/108442> [Zugriff: 12.02.2026].
- [38] **Jerratsch et al. (2025):** Realisierung einer Batterie-wechselinfrastruktur für schwere elektrische Nutzfahrzeuge. In: Experten-Forum Powertrain: Komponenten zukünftiger Antriebe 2023. Springer Vieweg. Wiesbaden, URL: https://doi.org/10.1007/978-3-658-46690-9_3 [Zugriff: 12.02.2026].
- [39] **Kelkar et al. (2024):** Will autonomy usher in the future of truck freight transportation?, URL: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/will-autonomy-usher-in-the-future-of-truck-freight-transportation#/> [Zugriff: 12.02.2026].
- [40] **Koltermann et al. (2024):** Improved rule-based power distribution algorithm for hybrid battery storage systems and real-world validation, *Journal of Energy Storage*, Volume 86, Part B, 2024, 111360, URL: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111360> [Zugriff: 12.02.2026].
- [41] **Li et al. (2024):** Electrifying heavy-duty truck through battery swapping. *Joule*, 8, Issue 6, URL: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.04.008> [Zugriff: 12.02.2026].
- [42] **Link & Plötz (2022):** Technical Feasibility of Heavy-Duty Battery-Electric Trucks for Urban and Regional Delivery in Germany - A Real-World Case Study. In: *World Electric Vehicle Journal*. 2022, 13, 161, URL: <https://doi.org/10.3390/wevj13090161> [Zugriff: 12.02.2026].
- [43] **Milence (2026):** Milence Ladetarife. In: Website. Milence (Commercial Vehicle Charging Europe B.V.). URL: <https://milence.com/de/milence-ladetarife/> [Zugriff: 12.02.2026].
- [44] **Nåbo et al. (2024):** Battery-Swapping for Heavy Duty Vehicles: A Feasibility Study on Up-Scaling in Sweden, URL: <https://vti.diva-portal.org/smash/get/diva2:1826965/FULLTEXT02.pdf> [Zugriff: 12.02.2026].
- [45] **Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur (2025):** Lkw-LISMONITORING, URL: <https://nationale-leitstelle.de/nutzfahrzeuge/lkwlismonitoring/> [Zugriff: 12.02.2026].
- [46] **Noto & Mostofi (2023):** Acceptance Analysis of Electric Heavy Trucks and Battery Swapping Stations in the German Market. *Systems* 2023, 11, 441, URL: <https://doi.org/10.3390/systems11090441> [Zugriff: 12.02.2026].
- [47] **NOW GmbH (2025):** Ladeinfrastruktur für Nutzfahrzeuge, URL: <https://nationale-leitstelle.de/nutzfahrzeuge/> [Zugriff: 12.02.2026].
- [48] **Parikh (2025a):** Thailand gets 4,200 battery-swappable electric trucks, URL: <https://www.electrive.com/2025/08/22/thailand-gets-4200-battery-swappable-electric-trucks/> [Zugriff: 12.02.2026].
- [49] **Parikh (2025b):** India deploys its first fleet of battery-swappable heavy-duty e-trucks, URL: <https://www.electrive.com/2025/09/30/india-deploys-its-first-fleet-of-battery-swappable-heavy-duty-e-trucks/> [Zugriff: 12.02.2026].
- [50] **Plötz et al. (2025):** Future Demand and Costs of Megawatt Charging for Battery Electric Trucks. In: EVS38 – International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, Göteborg, Sweden, URL: <https://publica.fraunhofer.de/bitstreams/c7b00dbe-d594-4ccf-9e01-6f70eecb5ca0/download> [Zugriff: 12.02.2026].
- [51] **Randall (2025):** CATL reaches milestone of 700 battery replacement stations, URL: <https://www.electrive.com/2025/10/21/catl-reaches-milestone-of-700-battery-replacement-stations/> [Zugriff: 12.02.2026].
- [52] **Randall (2024):** Nio teams up with GAC on battery swapping, URL: <https://www.electrive.com/2024/05/08/nio-teams-up-with-gac-on-battery-swapping/> [Zugriff: 12.02.2026].
- [53] **Reichel (2024):** Tual: Tauschbatterie für E-Lkw soll Betriebszeit maximieren und Reichweite verlängern, URL: <https://vision-mobility.de/news/tual-tauschbatterie-fuer-e-lkw-soll-betriebszeit-maximieren-und-reichweite-verlaengern-336387.html> [Zugriff: 12.02.2026].
- [54] **Rio Tinto (Hrsg.) (2025):** Rio Tinto and China's State Power Investment Corporation launch battery swap truck trial fleet at Oyu Tolgoi mine, URL: <https://www.riotinto.com/en/news/releases/2025/rio-tinto-and-chinas-state-power-investment-corporation-launch-battery-swap-truck-trial-fleet-at-oyu-tolgoi-mine> [Zugriff: 12.02.2026].
- [55] **RouteCharge Konsortium (2020):** Batteriewechsel-system für die Erschließung mittlerer Distanzen bei der Filialbelieferung mit e-NFZ (RouteCharge). Abschlussbericht Teilvorhaben MCM im Rahmen des Förderprogramms IKT für Elektromobilität III.
- [56] **SAE (2025):** Information Report. SAE Megawatt Charging System for Electric Vehicles, SAE Standard J3271_202503, Issued March 2025, URL: https://doi.org/10.4271/J3271_202503 [Zugriff: 12.02.2026].
- [57] **Shiledar et al. (2025):** Daily Operational Impacts on Battery Degradation in Heavy-Duty Electric Drayage Trucks, URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5217731 [Zugriff: 12.02.2026].
- [58] **Shoman et al. (2023):** Battery electric long-haul trucks in Europe: Public charging, energy, and power requirements. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 121, 103825, URL: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103825> [Zugriff: 12.02.2026].
- [59] **Suzan & Mathieu (2021):** Unlocking Electric Trucking in the EU: long-haul trucks, URL: https://www.transportenvironment.org/uploads/files/202102_pathways_report_final.pdf [Zugriff: 12.02.2026].
- [60] **SVR (2025):** Güterverkehr zwischen Infrastrukturanforderungen und Dekarbonisierung (Frühjahrgutachten 2024, Kapitel 2), URL: https://www.sachverstaendigenrat-wirtschaft.de/fileadmin/dateiablage/gutachten/fg2024/FG2024_Kapitel_2.pdf [Zugriff: 12.02.2026].
- [61] **TU Berlin (Hrsg.) (2025):** UniSwapHD. Projektbeschreibung, URL: <https://www.tu.berlin/fvb/forschung/laufende-projekte/uniswaphd> [Zugriff: 12.02.2026].
- [62] **Unterlohner (2021):** How to decarbonise long-haul trucking in Germany. An analysis of available vehicle technologies and their associated costs, URL: https://www.transportenvironment.org/uploads/files/2021_04_TE_how_to_decarbonise_long_haul_trucking_in_Germany_final.pdf [Zugriff: 12.02.2026].
- [63] **Vallera et al. (2021):** Why we need battery swapping technology. *Energy Policy*, 157, 112481, URL: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112481> [Zugriff: 12.02.2026].
- [64] **Wang et al. (2025):** Electrifying Heavy-Duty Trucks: Battery-Swapping vs Fast Charging. *IEEE Transactions on Smart Grid*, URL: <https://arxiv.org/pdf/2503.08080> [Zugriff: 12.02.2026].
- [65] **Wang (2024):** Annual Report on the Big Data of New Energy Vehicle in China (2023), URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-97-4840-2> [Zugriff: 12.02.2026].
- [66] **Wang et al. (2023):** Techno-economic comparison on charging modes of battery heavy-duty vehicles in short-haul delivery: A case study of China. *Journal of Cleaner Production*, 425, 138920, URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138920> [Zugriff: 12.02.2026].
- [67] **Waxmann et al. (2021):** Wirtschaftsfaktor Ladeinfrastruktur. Potenziale für Wertschöpfung in Baden-Württemberg, URL: https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/e-mobil_BW-Studie-Wirtschaftsfaktor-Ladeinfrastruktur.pdf [Zugriff: 12.02.2026].
- [68] **Westerheide (2025):** CATL looking to expand battery-swapping business to Europe, URL: <https://www.electrive.com/2025/06/26/catl-looking-to-expand-battery-swapping-business-to-europe/> [Zugriff: 12.02.2026].
- [69] **Westerheide (2024):** Courier service launches tests of Fuso eCanter with swappable batteries in Kyoto, URL: <https://www.electrive.com/2024/08/10/japanese-test-fuso-ecanter-with-swappable-batteries-in-kyoto/> [Zugriff: 12.02.2026].
- [70] **Zähringer et al. (2024):** Fast track to a million: A simulative case study on the influence of charging management on the lifetime of battery electric trucks. In: *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, Vol. 9, 100731, URL: <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100731> [Zugriff: 12.02.2026].
- [71] **Zhu et al. (2023):** Does the battery swapping energy supply mode have better economic potential for electric heavy-duty trucks? In: *eTransportation*, Volume 15, 100215, URL: <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2022.100215> [Zugriff: 12.02.2026].
- [72] **Zhu (2022):** Battery Swapping To Drive Rapid Heavy-duty Electrification In China, URL: <https://interactanalysis.com/insight/battery-swapping-to-drive-rapid-heavy-duty-electrification-in-china/> [Zugriff: 12.02.2026].

Abkürzungsverzeichnis

AFIR	Alternative Fuels Infrastructure Regulation
BaaS	Battery-as-a-Service
BMV	Bundesministerium für Verkehr
CAPEX	Capital Expenditures
CATL	Contemporary Amperex Technology Co. Limited
CCS	Combined Charging System
CPO	Charging Point Operator
GAC	Guangzhou Automobile Group
HPC	High Power Charging
HV	Hochvolt
IEC	International Electrotechnical Commission
JAC	Anhui Jianghuai Automobile
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
MCS	Megawatt Charging System
MVA	Megavoltampere
NEV	New Energy Vehicle
OEM	Original Equipment Manufacturer
OPEX	Operational Expenditures
SBS	Swappable Battery System
SLA	Service Level Agreement
SoC	State of Charge
SoH	State of Health
SVR	Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung
TCO	Total Cost of Ownership
TWh	Terawattstunde

Kontakt

Fraunhofer-Institut für Materialfluss
und Logistik IML

Philipp Müller, Daniela Kirsch
Joseph-von-Fraunhofer-Straße 2-4
44227 Dortmund

Tel. +49 231 9743-0
verkehrslogistik@iml.fraunhofer.de
www.iml.fraunhofer.de/verkehrslogistik

