



White Paper

AkkuSwap- Batteriewechselstationen für schwere LKW- Power to Mobility



Erstellt: Peter Mühlbach,
AkkuSwap Business Development
28.09.2025, Rev. 3.

<https://akkuswap24.de>
|peter.muehlbach@akkuswap.eu

History of changes

Version	Publication date	Changes
0.0	12.05.2025	
1.0	22.05.2025	Chapter TCO
2.0	18.06.2025	Chapter TCO
3.0	28.09.2025	Chapter Autonomes Fahren, TCO

Table of content

History of changes	2
Table of content	2
Executive Summary	3
1 Einleitung	3
2 Strategie und Planung der Ladeinfrastruktur heute	3
<i>Abbildung 1 Ladeszenarien für BET (Quelle: Sachverständigenrat, Frühjahrsgutachten 2024 Kapitel 2 ,</i>	<i>4</i>
2.1 Herausforderung Transformation Energienetz	4
• Netzausbau und -anpassung	4
• Speicherausbau	5
• Digitalisierung des Energienetzes	5
2.2 Herausforderung Transformation der Speditionsbranche	5
• Rolle der Speditionen im Energiemarkt	5
• Planungssicherheit	6
<i>Abbildung 2 Zieldreieck Ladezeitpunkt, -dauer und -preis</i>	<i>6</i>
• Autonomes Fahren	7
3 Batteriewechsel: Schneller als Laden, flexibler als Warten	8
<i>Abbildung 3 AkkuSwap as digital B2B transaction platform with network effects</i>	<i>9</i>
3.1 Batteriewechsel in Europa: Warum die Technologie hinter China zurückbleibt	9
3.2 Sind diese Vorbehalte gegen Batteriewechseltechnologien noch zeitgemäß?	9
3.3 Weitere Vorteile von Batteriewechselsystemen	10
4 AkkuSwap als Weiterentwicklung des eHaul Forschungsprojektes	11
4.1 Neues Design und Operating System	11
<i>Abbildung 4 AkkuSwap Station Schematische Darstellung</i>	<i>11</i>
4.2 TCO – die ultimative Entscheidungsgrundlage	12
4.2.1 Status Quo der TCO Betrachtung	12
4.2.2 AkkuSwap TCO Methodik	13
5 Schlussbemerkung	13

Executive Summary

Das White Paper „AkkuSwap - Batteriewechselstationen für schwere Nutzfahrzeuge“ stellt eine Lösung zur Dekarbonisierung des schweren Straßengüterverkehrs in Europa vor. Es behandelt die Herausforderungen beim Ausbau der Ladeinfrastruktur, den Transformationsbedarf im Energiesektor und die Rolle der Spediteure als Energiemanager. Die AkkuSwap-Plattform nutzt die Batteriewechseltechnologie, um eine effiziente Kopplung von Energie- und Transportsektor zu ermöglichen.

Batteriewechselsysteme bieten entscheidende Vorteile: Sie ermöglichen einen schnellen Batteriewechsel in nur 6 bis 8 Minuten, wodurch lange Ladezeiten und hohe Netzanschlusskosten vermieden werden. Außerdem trägt die Technologie zur Netzstabilität bei und unterstützt das Lebenszyklusmanagement von Batterien.

Die Plattform baut auf den Erkenntnissen des Forschungsprojekts eHaul auf und integriert moderne Technologien wie generative und analytische KI. Ein modularer Aufbau der Wechselstationen gewährleistet eine flexible Standortwahl und OEM-Neutralität. Ein TCO-Berechnungsmodell ermöglicht eine individualisierte Wirtschaftlichkeitsanalyse.

Trotz des Erfolgs von Batteriewechseltechnologien in China hinkt Europa aufgrund von Investitionshürden, fehlender Standardisierung und Skepsis der OEMs hinterher. AkkuSwap zeigt, dass technologischer Fortschritt und sinkende Batteriepreise diese Barrieren überwinden können.

Letztlich wird sich am Markt für Ladeinfrastruktur ein Mix aus niedrigen und hohen Ladeleistungen herausbilden, wobei AkkuSwap aufgrund seiner Vorteile ein relevanter zusätzlicher Bestandteil vieler Ladestrategien werden kann.

1 Einleitung

In der Fachwelt besteht weitgehend Einigkeit darin, dass die europäischen Emissionsziele für schwere Nutzfahrzeuge im Straßengüterverkehr (Fahrzeugklasse N3 >12,5t) nur mit dem schnellen Markthochlauf von Batterieelektrischen Trucks (BET) zu erreichen sind. Während alle OEMs inzwischen BETs mit immer größeren Reichweiten (500...600 Km mit 600 KWh Batteriekapazität) im Portfolio haben, steht der Ausbau der erforderlichen Ladeinfrastruktur noch am Anfang seiner Entwicklung. Der **zusätzliche jährliche** elektrische Strombedarf für die vollständige Dekarbonisierung allein des schweren Straßengüterverkehrs wird für Deutschland bis 2045 auf **über 100 Terawattstunden (TWh)** geschätzt. Dies sind rund 20% des gesamten deutschen Verbrauchs im Jahr 2023 (517 TWh).

Hierfür sind, neben der eigentlichen Ladeinfrastruktur, vor allem auch erhebliche Investitionen in erneuerbare Erzeugungskapazitäten, in den Netz- und Speicherausbau sowie in die Digitalisierung zu Smart Grids nötig.

Das White Paper beschreibt, wie die AkkuSwap Plattform mit Batteriewechseltechnologie einen erheblichen Beitrag zur effizienten Kopplung des Elektro- und des Verkehrssektors und damit zur Erreichbarkeit einer vollständigen Dekarbonisierung des schweren Straßengüterverkehrs bis 2045 leisten kann.

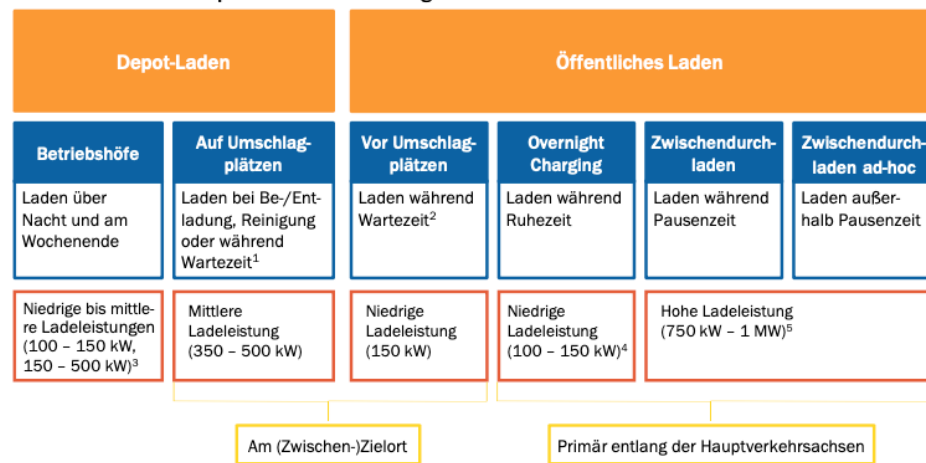
2 Strategie und Planung der Ladeinfrastruktur heute

Zentrales Element der Ausbauplanung seitens der Bundesregierung ist der Masterplan Ladeinfrastruktur II, der eine Gesamtstrategie für den Ausbau der Ladeinfrastruktur beinhaltet. Parallel dazu wurden und werden entsprechende Förderprogramme durch die beim Bundesverkehrsministerium angesiedelte Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur unter dem Dach der NOW GmbH aufgelegt.

Die Nationale Leitstelle orientiert sich bei Ihrer Planung an folgenden Ladeszenarien:

ABBILDUNG 48

Ladeszenarien mit empfohlener Ladeleistung für BE-LKW



1 – Primär bei Tank- und Silofahrzeugen. 2 – Primär bei Stückgutfahrzeugen. 3 – Abhängig davon, ob parallel oder sequenziell geladen wird. 4 – In Verbindung mit Lastmanagement. 5 – Das Megawatt-Ladesystem (MCS), das sich derzeit noch im Standardisierungsprozess befindet, wird voraussichtlich Ladeleistungen von bis zu 3,75 MW ermöglichen. Allerdings dürfte eine Spitzenleistung von etwa 1 MW ausreichen, um den LKW innerhalb der gesetzlichen Pausenzeit vollständig aufzuladen.

Quellen: NPM (2021a), eigene Darstellung
© Sachverständigenrat | 24-073-01

Abbildung 1 Ladeszenarien für BET (Quelle: Sachverständigenrat, Frühjahrsgutachten 2024 Kapitel 2¹,

Damit lassen sich die Ladevorgänge nach Ansicht der NOW GmbH bei entsprechendem Ausbau der Infrastruktur gut in die Betriebsabläufe der Spediteure integrieren, dauern aber natürlich in fast allen Fällen immer noch deutlich länger als die konventionelle Dieselbetankung.

2.1 Herausforderung Transformation Energienetz

Aus Sicht von AkkuSwap, aber auch vieler Netzexperten, wird der Plan jedoch nicht im vorgesehenen Zeitrahmen umsetzbar sein, da die notwendigen Herausforderungen der Netzintegration der E-Mobilität und die notwendige Transformation des Energieversorgungssystems („Klimaneutralitätsnetz“) unterschätzt werden. Dazu zählen vor allem folgende Aspekte:

- **Netzausbau und -anpassung**

Die Elektrifizierung der Sektoren Verkehr und Wärme, insbesondere auch des schweren Straßengütertransportes, führt zu einer erheblichen zusätzlichen Belastung der Stromnetze. Dies betrifft sowohl die Übertragungs- als auch die Verteilnetze:

- **Erhöhte Netzbelastung:** Die steigende Anzahl von Elektrofahrzeugen und deren Ladebedarf führt zu einer signifikanten Erhöhung der Netz Last, insbesondere in den Verteilnetzen. Die Gleichzeitigkeit der Ladevorgänge und die lokale Netzsituation spielen dabei eine entscheidende Rolle. Ohne Maßnahmen drohen Überlastungen, insbesondere in Mittel- und Niederspannungsnetzen.
- **Netzausbau:** Um die zusätzliche Belastung zu bewältigen, sind massive Investitionen in den Ausbau und die Verstärkung der Netze erforderlich. Bis 2045 wird ein Investitionsbedarf von etwa 651 Milliarden Euro für Übertragungs- und Verteilnetze geschätzt². Dies umfasst sowohl den Bau neuer Leitungen als auch die Modernisierung und Erweiterung bestehender Infrastruktur. Die zukünftig erforderliche Ladeinfrastruktur

¹ https://www.sachverstaendigenrat-wirtschaft.de/fileadmin/dateiablage/gutachten/fg2024/FG2024_Kapitel_2.pdf) Dabei wird davon ausgegangen, dass die BET in Depots bzw. nächtlichen Ruhestopps mit geringen bzw. mittleren Ladeleistungen (CCS) aufgeladen und tagsüber an Schnelladesäulen während der gesetzlich vorgeschriebenen Lenkpausen mit hoher Ladeleistungen (HPC, MCS) nachgeladen werden.

² Studie Nr. 97 der Hans-Böckler-Stiftung „Ausbau der Stromnetze: Investitionsbedarfe“ (Dezember 2024)

erfordert zusätzliche Anschlusskapazitäten von ca. 80 GW im Hochspannungsnetz und ca. 190 GW im Mittelspannungsnetz³. Hierfür sind ein erheblicher Antrags- und Planungsvorlauf und die Bereitstellung der erforderlichen Ausbaupkapazitäten erforderlich. Allein die Lieferfrist für kundenspezifische Leistungstransformatoren hat sich in den letzten Jahren mehr als verdreifacht.

- **Flexibilität und Steuerung:** Der Ausbau von Ladeinfrastruktur muss mit einer netzdienlichen Steuerung kombiniert werden, um die Gleichzeitigkeit der Ladevorgänge zu reduzieren und die Netzbelastung zu optimieren. Intelligente Steuerungssysteme könnten die Ladezeiten in Zeiten geringer Netz Last verschieben, wenn diese durch Speicher gepuffert sind.

- **Speicherausbau**

Die Integration von Batteriespeichern ist essenziell, um die Schwankungen im Stromnetz auszugleichen, die durch die Elektrifizierung des Verkehrs und den Ausbau erneuerbarer Energien entstehen:

- **Großbatterien und Vehicle-to-Grid (V2G):** Großbatterien können überschüssigen Strom speichern und bei Bedarf wieder ins Netz einspeisen. Elektrofahrzeuge bzw. deren Batterien könnten zukünftig als dezentrale Speicher dienen (V2G), was die Netzstabilität unterstützt. Die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für diese Technologie sind momentan noch nicht ausreichend attraktiv. Auf die Speichermöglichkeiten der Batteriewechseltechnologie wird noch eingegangen.

- **Herausforderungen beim Speicherausbau:** Der Ausbau von Großspeichern wird durch lange Wartezeiten für Netzanschlüsse und regulatorische Hürden behindert. In Deutschland sind derzeit Batterie-Großspeicher mit einer Leistung von 1,7 GW installiert, während sich 287 Projekte mit einer geplanten Leistung von 2,4 GW in der Pipeline befinden. Die Netzanschlussanfragen für Großspeicher summieren sich derzeit auf 226 GW, was das Hundertfache! der aktuellen Kapazität darstellt⁴.

- **Digitalisierung des Energienetzes**

Die Digitalisierung ist ein zentraler Baustein, um die Herausforderungen der Elektrifizierung des Verkehrs zu bewältigen:

- **Intelligente Netze (Smart Grids):** Die Einführung von Smart Grids ermöglicht eine bessere Überwachung und Steuerung der Netzbelastung. Digitale Technologien wie Smart Meter und **intelligente** Ladeinfrastrukturen sind notwendig, um die Ladeprozesse zu optimieren und die Netzkapazitäten effizient zu nutzen.
- **Datenmanagement und Standardisierung:** Die zunehmende Vernetzung von Verbrauchern, Erzeugern und Speichern erfordert eine einheitliche Datenstruktur und klare Governance-Regeln. Ohne Standardisierung und effizientes Datenmanagement können die Potenziale der Digitalisierung nicht vollständig ausgeschöpft werden.
- **Hemmnisse:** Der Rollout digitaler Technologien wird durch hohe Kosten, fehlende Standards und den Fachkräftemangel verlangsamt. Zudem fehlt es an einer übergreifenden Koordination zwischen den zahlreichen Akteuren im Energiesektor.

2.2 Herausforderung Transformation der Speditionsbranche

Die Ladeszenarien von NOW schreiben die derzeitigen Betriebsabläufe der Speditionen adaptiert auf „elektrische Betankung“ praktisch fort. Die grundlegende Transformation des Speditionssektors werden in den Zukunftsszenarien nur ungenügend berücksichtigt. Hierzu zählen vor allem:

- **Rolle der Speditionen im Energiemarkt**

Speditionen entwickeln sich über ihre traditionelle Rolle hinaus zu Energiemanagern (Prosumer, Flexumer). Sie müssen nicht nur ihre Flotten betreiben, sondern auch Energieflüsse optimieren, um Kosten zu senken und die Effizienz zu steigern. Dies umfasst die Nutzung von Energiemanagementsystemen (EMS), die Integration von Eigenstromerzeugung (z. B. durch Photovoltaik) und die Teilnahme am Energiemarkt (z.B. über flexible Strombezugstarife und

³ Schriftenreihe des Kuratoriums N° 17 | *Umsetzung der Energiewende: Zwischen Wunsch und Wirklichkeit 2024*

⁴<https://www.pv-magazine.de/2025/01/13/uebertragungsnetzbetreibern-liegen-zum-jahreswechsel-650-anchlussanfragen-fuer-grosse-batteriespeicher-mit-226-gigawatt-vor/>

Power Purchase Agreements). Diese neue Rolle erfordert technisches Know-how und Investitionen in intelligente Softwarelösungen.

Die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs wird Speditionen dazu zwingen, ihre Geschäftsmodelle, Prozesse und Strategien grundlegend zu überdenken. Sie müssen sich nicht nur als Logistikdienstleister, sondern auch als Energiemanager und Technologieanwender positionieren.

• Planungssicherheit

Die Transportunternehmen müssen sich durch eine hohe Flexibilität auszeichnen, um variabel auf nicht planbare Situationen (kurzfristige Tourenänderungen, Verspätungen durch Staus etc.) reagieren zu können. Das elektrische Laden wird die Unvorhersehbarkeit noch drastisch erhöhen, da der gesamte Ladeprozess schlechter planbar ist als ein konventioneller Tankvorgang.

Die Verfügbarkeit und der Standort von Ladestationen sind entscheidende Parameter für die Routenplanung. Die Ladezeit wird im Wesentlichen durch die zur Verfügung gestellte Ladeleistung bestimmt, die vielen Unwägbarkeiten unterliegt (verfügbare Ladeinfrastruktur mit ausreichend dimensioniertem Netzanschluss, Preis, Platz, Gleichzeitigkeitsfaktor).

Daher müssen die Speditionen eine Ladestrategie entwickeln, die das in Abbildung 2 gezeigte Zieldreieck optimal ausbalancieren kann.

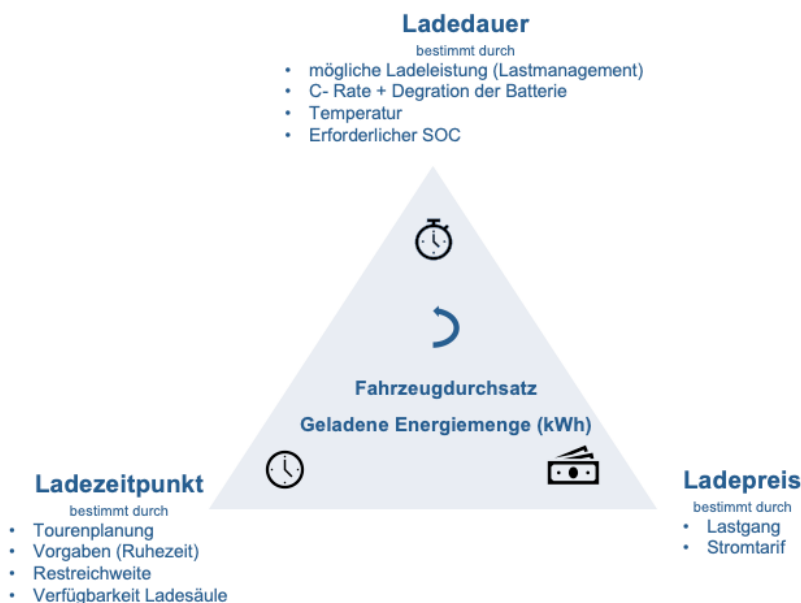


Abbildung 2 Zieldreieck Ladezeitpunkt, -dauer und -preis

Das Zieldreieck in Abbildung 2 zeigt die Abhängigkeiten der einzelnen Parameter, die für den Nutzer jeweils in einem optimalen Verhältnis stehen und gleichzeitig für den Betreiber (CPO) eine gute Auslastung bei maximalen Energieverkauf ermöglichen sollten.

Es gibt verschiedene Elektromobilitätsprovider, die über Plattformgeschäftsmodelle Speditionen und Charge Point Operators (CPOs) zusammenbringen wollen, um Ladesäulen und Zeiten zu reservieren und ein einheitliches Abrechnungssystem zu etablieren. Es reicht aber nicht, nur Ladefenster zu reservieren, sondern gleichzeitig müsste auch die benötigte Energiemenge innerhalb des Ladefensters reserviert werden, was natürlich den entsprechenden Beschränkungen des Netzanschlusses unterliegt.

Der aktuelle Stand der Technik bei BET-Managementsystemen (FMS⁵) liefert z.Zt. noch keine Echtzeitdaten über Batterieladezustand, Reichweite und Ladepunkte an ein zentrales Dispositions- und Routenplanungssystem, was die Planung erschwert. Erst mit dem FMS-Standard 5.0 haben sich die OEMs bereit erklärt, Informationen über die Fahrzeuge und deren Batteriemangement auszutauschen. Dieser Standard ist jedoch noch nicht weit verbreitet.

Das Routenplanungssystem muss die Ruhezeiten des Fahrers berücksichtigen und mit den Ladezeiten synchronisieren. Dies ist eine komplexe Aufgabe, die einen ausgeklügelten Algorithmus erfordert. Der Energieverbrauch von Elektro-Lkw kann je nach Beladung, Topografie und Temperatur stark schwanken. Das macht es schwierig, die Reichweite und den Ladebedarf genau vorherzusagen. Schließlich sind Softwareunternehmen, die Routenplanungssysteme entwickeln, auf Echtzeitinformationen von den Lkw angewiesen. Diese Informationen werden jedoch von den Lkw-Herstellern kontrolliert, die auch ihre eigenen Lösungen entwickeln. Dies führt zu Kompatibilitätsproblemen⁶.

Ein großes Problem stellt auch die Preisfindung dar, da es im deutschen Strommarkt noch keine dynamischen Stromtarife, dynamischen Netzentgelte und damit sinnvolle Durchleitungsmodelle gibt. Preise oberhalb von 40 ct/kWh verschlechtern die Wettbewerbsfähigkeit erheblich und machen den batterieelektrischen Antrieb unwirtschaftlich.

Die ohnehin knappen Margen der Speditionen können so durch zusätzliche Wartezeiten und zu hohe Preise noch weiter unter Druck geraten .

- **Autonomes Fahren**

Das autonome Fahren von Trucks hat in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gemacht, insbesondere in den USA und China, wo die Technologie bereits in der Praxis getestet wird. In Deutschland und Europa ist die Entwicklung ebenfalls im Gange, jedoch mit einem stärkeren Fokus auf gesetzliche Rahmenbedingungen und Sicherheitsanforderungen.

Autonome Trucks bewegen sich derzeit hauptsächlich auf „Level 4 der Automatisierung“, was bedeutet, dass sie in bestimmten, klar definierten Betriebsbereichen (z. B. Autobahnen) ohne menschliches Eingreifen fahren können. Daimler hat beispielsweise zwei Freightliner Inspiration Trucks entwickelt, die mit dem sogenannten "Highway Pilot" ausgestattet sind. Diese Trucks können auf Autobahnen autonom fahren, allerdings nur zu Testzwecken und mit Sondergenehmigung.

Ein weiterer Marktführer ist das Start-up Aurora aus den USA. Der OEM unabhängige Spezialist für autonom fahrende Fahrzeuge unterhält Kooperationen mit verschiedenen Fahrzeugherstellern und Zulieferfirmen. Speziell für Trucks wurde Aurora Driver entwickelt welches sich in Texas bereits in der Felderprobung befindet.

Autonome Trucks werden vor allem für den Langstrecken-Güterverkehr entwickelt, da Autobahnen eine besser kontrollierbare Umgebung bieten und die Automatisierung hier einfacher umzusetzen ist. Dies könnte langfristig den Fahrermangel in der Logistikbranche lindern und die Effizienz durch wesentlich höhere Fahrzeugauslastung steigern.

Experten gehen davon aus, dass autonome Trucks in den nächsten 5 bis 10 Jahren eine größere Rolle im Güterverkehr spielen könnten, insbesondere auf Autobahnen und in Logistikzentren.

Die Firma Einride aus Schweden hat kürzlich den ersten voll autonomen BET auf einer öffentlichen Strecke im Hafen von Antwerpen auf die Straße gebracht⁷.

⁵ <https://www.fms-standard.com/Truck/index.htm>

⁶ <https://www.dvzzero.de/killerapplikation-fuer-e-lkw-dispo-gesucht-2775692>

⁷ <https://www.einride.tech/press/einride-operates-first-ever-fully-autonomous-heavy-duty-truck-on-a-public-road-in-belgium-at-the-port-of-antwerp-bruges>



Abbildung 3 Einride autonomer Truck (Quelle: <https://www.einride.tech/press/einride-operates-first-ever-fully-autonomous-heavy-duty-truck-on-a-public-road-in-belgium-at-the-port-of-antwerp-bruges>)

Damit stehen zukünftig auch die derzeit noch geltenden gesetzlichen vorgeschriebenen Ruhepausen und damit die entsprechenden Ladeslots zur Disposition.

3 Batteriewechsel: Schneller als Laden, flexibler als Warten

Um den unter 2.1 und 2.2 beschriebenen Herausforderungen besser begegnen zu können, entwickelt AkkuSwap eine Plattform, die Energie- und Datenflüsse mit Hilfe von Batteriewechseltechnologien und KI so steuert, dass die Bedürfnisse aller Stakeholder möglichst effizient erfüllt werden. Dazu soll ein Plattformgeschäftsmodell etabliert und ein Ökosystem skaliert werden, in dem Spediteure, Batterie- und Fahrzeughersteller sowie Netzbetreiber effizient interagieren und durch Netzwerkeffekte den Markthochlauf von BET beschleunigen können. So werden Mobilitäts- und Energiemarkt zusammen gedacht und das Depot- und Schnellladen um eine weitere Option ergänzt.

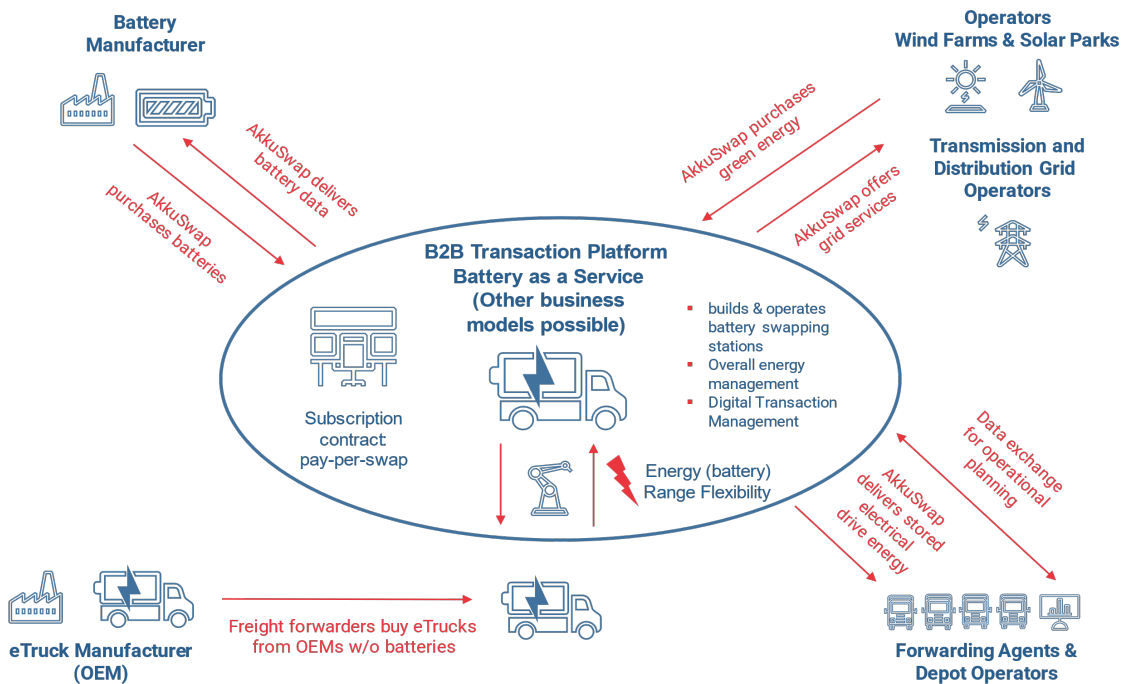


Abbildung 4 AkkuSwap as digital B2B transaction platform with network effects

3.1 Batteriewechsel in Europa: Warum die Technologie hinter China zurückbleibt

Während Batteriewechseltechnologien für Fahrzeuge vor allem in China bereits etabliert sind (mehr als die Hälfte aller neu zugelassenen BET sind mit Wechselbatterien ausgestattet⁸), spielt diese Technologie in Europa bisher keine Rolle. Dafür werden vor allem folgende Gründe angeführt:

- Hohe Investitionskosten (Wechselstationen vs. Ladesäulen, erforderliche Batterieanzahl)
- Die Entwicklung zu höheren Ladeleistungen (MCS bis 2 MW) verkürzt die Ladezeiten drastisch und die bessere Netzverträglichkeit kann durch die Kombination mit stationären Speichern erreicht werden.
- Fehlende Standardisierung (Batterie + Schnittstellen zum Fahrzeug), Standardisierungsprozesse dauern oft Jahre
- Skepsis der europäischen OEMs (Batterie als wesentliches Differenzierungsmerkmal im Wettbewerb)
- Die Rahmenbedingungen in China sind durch staatliche Regulierung und Subventionen nicht mit Europa vergleichbar
- Oft wird auch mit dem Scheitern des Unternehmens „Betterplace“ argumentiert, welches jedoch in einer sehr **frühen Marktphase der E-Mobilität** (hohe Batteriepreise, geringe Energiedichte) im PKW-Segment nicht skalieren konnte, da die Standardisierung aufgrund der Vielfalt der unterschiedlichen Fahrzeug Geometrien wesentlich herausfordernder als bei BET ist.

3.2 Sind diese Vorbehalte gegen Batteriewechseltechnologien noch zeitgemäß?

Die zwei Hauptargumente Argumente gegen die Batteriewechseltechnologie können durch die Entwicklung in der Batterietechnologie und -fertigung als mittlerweile überholt gelten:

- **zu hohe initiale Investition**

⁸ https://www.bloomberg.com/news/newsletters/2024-03-05/china-s-clean-truck-surprise-defies-the-ev-slowdown-narrative?utm_source=website&utm_medium=share&utm_campaign=email&embedded-checkout=true

Die Zell- und Batterieentwicklung der letzten Jahre hat zu deutlich höheren Energiedichten bei gleichzeitig sinkenden Preisen geführt. Insbesondere die von chinesischen Herstellern dominierte Massenproduktion wird, ähnlich wie bei den Solarmodulen zu bereits absehbaren Überkapazitäten führen, die zu einem weiteren Preisverfall beitragen werden. Das macht das initiale Investment in Batteriewechseltechnologie tendenziell preiswerter und damit wettbewerbsfähiger.

Beim Vergleich der Investition zwischen Schnellladesäulen (HPC/MCS) und Batteriewechselstationen kompensieren die geringeren Kosten für die Leistungselektronik und der geringere Verkabelungsaufwand einen Teil der höheren Kosten für die Gebäudehülle und die elektromechanischen Vorrichtungen zum Batterietausch. Mit der Skalierung von Wechselstationen können auch durch Standardisierung (industrielle Vorfertigung) bis hin zu quasimobilen Lösungen wesentliche Kostensenkungen erreicht werden.

- **Schnelladeinfrastruktur garantiert kurze Ladezeiten und macht Batteriewechselsysteme dadurch obsolet**

Wie bereits unter 2.2. Planungssicherheit beschrieben kann die erreichbare Ladegeschwindigkeit und damit die Ladedauer bis zu einem bestimmten SOC (State of Charge) von der projektierten Ladeleistung stark abweichen und birgt damit große Unsicherheiten.

Um diese zu reduzieren und die erforderliche Netzanschlussleistung zu minimieren bieten alle Marktführer Schnelladesysteme in Kombination mit stationären Batteriespeichern an, um hohe Ladeleistungen zu erreichen und gleichzeitig Lastspitzen auszugleichen und das Stromnetz zu entlasten. Wenn jedoch ohnehin zusätzliche Batteriekapazität benötigt wird, kann diese auch über „quasistationäre“ BET Traktions Batterien in der Wechselstation bereitgestellt werden, die zwar etwas teurer als stationäre Speicher sind, dafür aber wesentlich flexibler und energieeffizienter eingesetzt werden können

3.3 Weitere Vorteile von Batteriewechselsystemen

Batteriewechselstationen haben durch die Entkopplung des Ladevorganges vom Fahrzeug folgende weitere Vorteile:

- Sie ermöglichen ein **sicheres Erreichen von 100% SoC (State of Charge) innerhalb von 6...8 Minuten**, nachdem der Fahrer das Fahrzeug verlassen und den vollautomatischen Wechselvorgang gestartet hat. **Dies kann mit dem MCS-Laden nicht erreicht werden.** Die sehr hohen Ströme (teilweise bis zu 3000 A) und Spannungen (bis ca. 1250 V) erfordern überdimensionierte Kabel und Stecker, die erhebliche Wärmeverluste abführen müssen. Der erhöhte Kabelquerschnitt und das Gewicht zwingen zu innovativen Lösungen bei der aktiven Kühlung und der robotergestützten Handhabung.
- Sie können durch **Lastmanagement und kontinuierliches Laden die Anschlussleistung deutlich reduzieren**, während Schnellladesäulen ohne Batteriepufferung aufgrund der hohen Ladegeschwindigkeit eine deutlich höhere Anschlussleistung benötigen. Der genaue Unterschied hängt von der Anzahl der Schnellladesäulen und der Ladeleistung der Batteriewechselstation (abhängig von der Batterieanzahl) ab, liegt aber oft im Bereich von mehreren hundert Kilowatt bis in den MW-Bereich. Dadurch wird bei vergleichbarer Lademenge der Netzanschluss günstiger. Würde man sich nur auf MCS für das Laden unterwegs verlassen, müssten letztlich alle 450 öffentlichen Rastplätze an den Autobahnen mit einem Hochspannungsanschluss (110 KV) ausgerüstet werden. Abgesehen vom Zeitrahmen (derzeit 8...10 Jahre für jeweils einen Anschluss) würde dies bei Kosten von ca.20 Mio € pro Anschluss eine geschätzte Investition von ca. 9 Mrd. € allein für den Netzanschluss bedeuten⁹.
- Gleichzeitig ist der **physische Platzbedarf einer Wechselstation bei gleichen Lademengen wesentlich geringer** als andere Ladeinfrastrukturen, was insbesondere beim schon jetzt akuten Park- und Stellplatzmangel für Sattelzugmaschinen eine wesentliche Rolle spielt. Im Regelfall ist trotz einer geringen Grundfläche

⁹ <https://www.golem.de/news/e-lkw-lkw-ladestationen-unter-hochspannung-setzen-2501-192863.html>

vergleichbar mit einer Waschanlage kein Rangieren und Abkoppeln der Auflieger nötig und an- und abfahrende Sattelzüge kommen sich nicht in die Quere.

- **Batteriewechselsysteme ermöglichen** durch die Trennung des Ladevorganges vom Fahrzeug grundsätzlich **die Reduzierung unvermeidlicher Stillstands Zeiten** durch Ladevorgänge. Damit können Fahrzeuge besser z.B. durch Mehrschichtbetrieb genutzt werden.
- **Batteriewechselsysteme ermöglichen wesentlich mehr Flexibilität**, da die Anzahl der Batterien zwar durch die Regalsysteme limitiert ist (28 bzw. 56 Ladeplätze), diese aber natürlich nicht komplett bestückt sein müssen bzw. bei erhöhtem Speicherbedarf auch noch mit stationären Batterien aufgestockt werden könnten. Auch der Austausch defekter Batterien bzw. der Tausch gegen weiterentwickelte Batterien ist bei gleicher Kubatur problemlos möglich.
- **Batteriewechselsysteme ermöglichen ein deutlich besseren Lebenszyklusmanagement** im Sinne der EU-Batterieverordnung (2023/1542) vom 12. Juli 2023 und bringen somit den Einstieg in eine echte Kreislaufwirtschaft. Dazu gehört auch eine klare Second-Life-Strategie.

4 AkkuSwap als Weiterentwicklung des eHaul Forschungsprojektes

Das Konzept der AkkuSwap-Plattform führt die Ergebnisse und Erfahrungen der ersten Batteriewechselstation in Europa, die im Rahmen des eHaul-Projekts gesammelt wurden, konsequent weiter und berücksichtigt insbesondere neue Technologien wie die generative KI, um Kunden bei der Transformation zum emissionsfreien Straßengüterverkehr zu unterstützen und gleichzeitig einen Beitrag zur Netzstabilität zu leisten.

Damit setzt AkkuSwap die Anforderungen an die „**Flexilienz**“ (die Fähigkeit eines Energiesystems, flexibel auf Schwankungen in der Stromerzeugung und -nachfrage zu reagieren und gleichzeitig gegenüber Störungen widerstandsfähig (resilient) zu bleiben) überzeugend um und ermöglicht eine effiziente Sektorenkopplung von smartem Energienetz und digitaler Mobilität für den schweren Straßengüterverkehr.

Nachfolgend werden die Komponenten des Systems kurz beschrieben und ein neuer TCO-Ansatz zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit vorgestellt.

4.1 Neues Design und Operating System



Abbildung 5 AkkuSwap Station Schematische Darstellung

- **Gebäudehülle:**
 - * Modularer, containerisierter Aufbau zur schnellen Installation und flexiblen Standortwahl
- **Mechanische Komponenten:**
 - * D Truck Adjustment Mechanism (TAM): Justiert das Fahrzeug lateral für eine präzise Positionierung
 - * Battery Racking System (BRS): Lagert und führt die Batterie automatisch in ihre Wechsellage
 - * Battery Locking Bolts (BLB): Sichern die Batterie während des Wechsels
 - * D Battery Adjustment Mechanism (BAM): Elektromechanisch/hydraulisch gesteuerte Vorrichtung, die schwere Batterien (bis ca. 1,5 Tonnen) mit einer Präzision von unter 0,3 mm bewegt
 - * Stationen sind so konzipiert, dass sie unterschiedliche Batteriekonfigurationen verschiedener Truckhersteller aufnehmen können, ohne umfangreiche Anpassungen nötig zu haben (OEM Neutralität)
- **Last- und Lademanagement:**
 - * Ermöglicht flexible Ladezyklen unabhängig vom Fahrzeug
 - * Nutzung der Batteriekapazitäten zur bidirektionalen Stromspeisung ins Netz
 - * Optimierung der Energienutzung (Eigenstromerzeugung, Strommarkt Arbitrage) sowie Reduktion von Lastspitzen (Peak Shaving)
- **Software- und IT-Infrastruktur:**
 - * SCADA System und PLC Software für Steuerung, Überwachung und Optimierung des Wechselprozesses
 - * KI-gestützte AkkuSwap Plattform mit Integration von Routenplanung, Buchungssystem, prädiktiver Wartung, Big-Data-Analysen und Echtzeitsimulation
 - * Cloud- und edge-basierte IT-Ressourcen zur sicheren, automatisierten Betriebsführung
- **Nachhaltigkeit:**
 - * Durch Entkopplung der Lifecycle von Batterie und Fahrzeug wird eine Second Life Nutzung sowie das Recycling stark vereinfacht und damit ein wesentlicher Schritt zur Umsetzung der EU Battery Regulation 2023/1542 zu einer wirklichen Circular Economy vollzogen.

4.2 TCO – die ultimative Entscheidungsgrundlage

Letztlich wird die Entscheidung für die Anschaffung neuer Fahrzeuge und interner Ladeinfrastruktur in Speditionen ausschließlich nach ökonomischen Gesichtspunkten getroffen. Dazu werden die **Total Cost of Ownership (TCO, Gesamtkosten eines Fahrzeugs über dessen gesamte Lebensdauer)** für das jeweilige Einsatzszenario betrachtet.

Für die Ermittlung der TCO existieren in diversen Studien eine ganze Reihe unterschiedlicher Ansätze und Annahmen, die die Ergebnisse stark beeinflussen.

4.2.1 Status Quo der TCO Betrachtung

Die NOW GmbH hat eine Metastudie in Auftrag gegeben (Datenstand 07-2024), in der insgesamt 26 Studien zu TCO Ermittlungen (Filter: TCO, nachhaltige Antriebsart, Referenzjahr 2030) ausgewertet wurden¹⁰.

Dabei kristallisierten sich folgende Hauptfaktoren für die Ermittlung des TCO heraus:

- Investition [€]
- Förderung (z.B. Investitionszuschüsse, tw. Mautbefreiung)
- Restwert [€]
- Jahresfahrleistung [km] / Nutzungsdauer [a]
- Energiekosten pro kWh [€/kWh]
- Verbrauch pro Kilometer [kWh/km]
- Wartung und Instandhaltung [€/km].

Generell wird in den Studien eingeschätzt, dass sich die TCO-Parität zwischen konventionellen Diesel und Batterieelektrischen Trucks zwischen 2025 und 2030 einstellen wird und das der BET spätestens ab 2030 für alle Szenarien die wirtschaftlichste Antriebsart sein wird, weil der höhere Anschaffungspreis durch die geringeren Betriebskosten überkompensiert wird.

¹⁰ <https://www.now-gmbh.de/datenfinder/tco-klimafreundliche-nutzfahrzeuge-studienuebersicht/>

Das Grundproblem der TCO-Ermittlung, nämlich die klassische Berechnung über einen rein statischen Ansatz mit bestimmten Annahmen, die zu stark vereinfachten Ergebnissen führt, wird einer konkreten individuellen Entscheidungsfindung zu einer erheblichen Investition bei unsicheren Rahmenbedingungen nicht vollständig gerecht. Es wird z.B. nur ungenügend berücksichtigt, in welcher Zeit wie viel Energie zu welchem Preis in das Fahrzeug gelangt und wie sich dies auf das Betriebsregime auswirkt.

4.2.2 AkkuSwap Ladestrategie und TCO-Methodik

Da bisher keine dezidierten TCO-Berechnungen speziell für BET und Batteriewechselstation vorliegen, entwickelt AkkuSwap derzeit eine eigene dynamische Simulation und hat in einem ersten Schritt ein überschlägiges Berechnungstool entwickelt, um die Wirtschaftlichkeit angenommener Ladeszenarien zu ermitteln und vergleichen zu können. Das Tool ist über die Website <https://akkuswap24.de> verfügbar.

Mit Hilfe des Berechnungstools kann die Wirtschaftlichkeit einer angenommenen Ladestrategie durch die Eingabe verschiedener Ladeszenarien ermittelt werden. Dabei werden drei zentrale Szenarien betrachtet: Übernachtladung im Depot, Batteriewechselstationen mit AkkuSwap und Schnellladen unterwegs. Die Total Cost of Ownership (TCO) bzw. die Amortisationsdauer einer Investition können so nach bestimmten selbst festgelegten Ausgangsannahmen berechnet werden.

5 Schlussbemerkung

Das vorliegende Whitepaper möchte gängige Vorbehalte gegen die Batteriewechseltechnologie für BET ausräumen. AkkuSwap sieht sich nicht als ausschließliche Alternative zum Depot- bzw. Schnellladen, sondern als sinnvolle Ergänzung, zumal auch BET mit Wechselbatterien ganz normal kabelgebunden geladen werden können. Letztlich wird sich im Laufe der weiteren Etablierung von BET ein bestimmter Mix von Ladetechnologien einstellen.

In China wurden im Jahr 2024 ca. 30.000 schwere Nutzfahrzeuge mit Wechselbatterien verkauft, eine Steigerung von 94% gegenüber dem Vorjahr. Dort ist man aus dem Erprobungsstadium längst heraus und die Marktführer setzen auf Skalierung. Es gibt keinen wirklich stichhaltigen Grund, warum diese Technologie nicht auch in Europa beträchtliche Marktanteile gewinnen sollte.¹¹

¹¹<https://theicct.org/publication/ze-mhdv-market-china-2024-mar25/#:~:text=Sales%20of%20zero%2Dmission%20medium%2D,more%20than%2030000%20in>