

FAT-Schriftenreihe 342

Anforderungen an eine elektrische Lade- und Wasserstoffinfrastruktur
für gewerbliche Nutzfahrzeuge mit dem Zeithorizont 2030



Anforderungen an eine elektrische Lade- und Wasserstoffinfrastruktur für gewerbliche Nutzfahrzeuge mit dem Zeithorizont 2030

Florian Klausmann
Lars Mauch
Dr. Anna-Lena Klingler
Felix Röckle
Dr. Manuela Wohlhüter

Forschungsinstitut
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) gefördert.

Inhalt

Kurzfassung	7
1 Motivation, Zielsetzung und Forschungsdesign	10
2 Alternative Antriebe für Nutzfahrzeuge.....	12
2.1 Einführung.....	12
2.2 Regulatorische Rahmenbedingungen	13
2.3 Technologische Rahmenbedingungen	17
2.4 Ökonomische Rahmenbedingungen.....	20
2.5 Infrastrukturelle Rahmenbedingungen	23
2.6 Zusammenfassende Einschätzung der Rahmenbedingungen	28
3 Ladeinfrastruktur: Technologie, Geschäfts- und Betreibermodelle.....	30
3.1 Technologien für das Laden von Elektrofahrzeugen	30
3.2 Geschäfts- und Betreibermodelle	35
4 Wasserstoff: Technologien und Bedarf.....	41
4.1 Wasserstoff-Nutzfahrzeuge: Fahrzeugtechnik.....	41
4.2 Wasserstoff-Infrastruktur: Stand, Potentiale und Trends	42
4.3 Wasserstofftransport und -speicherung.....	49
4.4 Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur	50
4.5 Tankleistung einer H ₂ -Tankstelle in Zukunft.....	54
5 Anforderungen an Tank- und Ladeinfrastrukturen aus Nutzersicht ...	55
5.1 Einführung.....	55
5.2 Transportstrukturen	56
5.3 Batterieelektrisches Laden im Logistikprozess	57
5.4 Use-Cases	63
5.5 Forderungen an die Politik.....	70
5.6 Generelle Erkenntnisse aus den Expertengesprächen.....	70
6 Simulation einer Ladeinfrastruktur an lokalen Betriebshöfen.....	72
6.1 Einführung.....	72
6.2 Simulationsszenarien	72
6.3 Elektrifizierungsszenarien	73
6.4 Aufbau der Simulation und Randbedingungen.....	74
6.5 Simulation: KEP-Betriebshof	77

6.6	Simulation: Betriebshof einer Spedition	85
6.7	Generelle Erkenntnisse aus der Simulation	96
7	Zusammenfassung, Ausblick und Handlungsempfehlungen	98
	Abbildungsverzeichnis	101
	Tabellenverzeichnis	105
	Literaturverzeichnis	106

Kurzfassung

Im Rahmen der Studie wurden die Anforderungen an eine elektrische Ladeinfrastruktur für den Wirtschaftsverkehr analysiert. Der Schwerpunkt lag hierbei auf den Nutzeranforderungen und Prozessen verschiedener Branchen sowie den technischen Anforderungen für das Laden auf Betriebshöfen. Als mögliche Alternative wurden ergänzend die Potenziale für Wasserstofftechnologien betrachtet und der Bedarf an eine öffentliche Lade- und Betankungsinfrastruktur abgeleitet.

Zunächst wurden die Potenziale und allgemeinen Entwicklungen im Umfeld alternativer Antriebe für Nutzfahrzeuge dargestellt. Für eine Umstellung der Fahrzeuge wurde einerseits die technologische und ökonomische Machbarkeit erkannt aber andererseits auch ein hoher Handlungsdruck seitens der Gesetzgeber identifiziert, die notwendigen Rahmenbedingungen zu schaffen. Aus heutiger Sicht kommen verschiedene alternative Antriebstechnologien infrage. Hierzu gehören batterieelektrische Fahrzeuge, Wasserstoffantriebe, Oberleitungsfahrzeuge sowie Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, welche durch alternative, strombasierte Kraftstoffe betrieben werden. Die Lade- und Betankungsinfrastruktur für elektrische und wasserstoffbetriebene Fahrzeuge mit Brennstoffzellen wurde vertiefend betrachtet. Hierbei wurden zunächst die technischen Grundlagen und Betreibermodelle für eine Ladeinfrastruktur beschrieben sowie die technischen Grundlagen und Potenziale für eine Wasserstoffinfrastruktur analysiert, von der Herstellung des Wasserstoffs bis zur Tankstelle.

Über Experten-Befragungen und Tiefeninterviews wurden die Anforderungen verschiedener Branchen im Wirtschaftsverkehr für eine Umstellung auf alternative Antriebe evaluiert. Hierbei wurden insbesondere die Möglichkeiten für eine Integration der neuen Technologien, mit den zugehörigen Randbedingungen bezüglich Ladung oder Betankung, in die bisherigen Prozesse der Betriebe dargestellt. Um ein möglichst breites Meinungsbild einzuholen, wurden Experten aus der KEP-Branche (Kurier-, Express- und Paketdienste), der klassischen Speditionslogistik sowie der Entsorgungslogistik und von Handwerksbetrieben befragt.

Für die Volumenmärkte KEP und Speditionslogistik wurden anschließend die Anforderungen für das Laden von elektrifizierten Nutzfahrzeugen auf den jeweiligen Betriebshöfen mit Hilfe einer Simulation detaillierter betrachtet. Auf Basis der Befragungen wurden hierfür zwei exemplarische Referenzstandorte definiert und eine Teilelektrifizierung der dort verkehrenden Fahrzeuge für unterschiedliche Nutzergruppen angesetzt. Hierzu gehören unter anderem die Fernverkehre sowie die regionalen Verteilerverkehre mit ihren jeweils spezifischen Anforderungen. Für jede Nutzergruppe und für die beiden Betriebshöfe insgesamt wurde das jeweilige Mobilitätsverhalten der Fahrzeuge simuliert und die resultierenden Energie- und Ladebedarfe analysiert. Aus den simulierten Lastprofilen konnten die Gesamtleistungen und Spitzenlasten an den Betriebshöfen, Lademanagementpotenziale sowie zusätzliche, öffentliche Ladebedarfe abgeleitet und somit die heterogenen technischen Anforderungen der verschiedenen Nutzergruppen dargestellt werden.

In der Simulation wurden die technische Machbarkeit, die Mindestvoraussetzungen für eine Ladeinfrastruktur und die Auswirkungen auf die Energieinfrastruktur für ein vorausgesetztes Elektrifizierungsszenario im Jahr 2030 untersucht, welches aus den Klimaschutzziele der Bundesregierung abgeleitet wurde. Die tatsächlichen Anforderungen an realen Betriebshöfen hängen stark von den individuellen Randbedingungen vor Ort ab. Hierzu gehören insbesondere die eingesetzten Fahrzeugzahlen und -typen, die individuellen Einsatzprofile, Fahrstrecken und Topologien sowie die benötigte Flexibilität und Einsatzreserven. Neben den technischen Voraussetzungen spielen auch die Integrationsmöglichkeiten in die Prozesse und die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen eine wesentliche Rolle für die individuelle Ladeinfrastrukturplanung. Die Ergebnisse der Studie insgesamt sollen hierfür eine Orientierung und grundlegende Wissensbasis schaffen.

Im Rahmen der Studie wurden zusammengefasst folgende wesentliche Erkenntnisse gewonnen:

Hinsichtlich der Anforderungen aus Nutzersicht auf Basis von Experteninterviews mit Vertretern verschiedener Branchen im Wirtschaftsverkehr:

- Abhängig von der Branche und Transportstruktur werden die Elektrifizierungspotenziale unterschiedlich bewertet. Beispielsweise werden Fahrzeuge mit energieintensiven Aufbauten, wie Müllkipper- und Verdichter, mit niedrigen Elektrifizierungspotenzialen bewertet.
- Lade- und Tankvorgänge müssen sich so in bestehende Logistikprozesse integrieren lassen, dass bereits vorhandene Standzeiten der Fahrzeuge bzw. Ruhepausen der Fahrer genutzt werden. Prozessänderungen führen meist zu längeren Standzeiten, was mit zusätzlichen Kosten und Verzögerungen im Lieferprozess verbunden ist.
- Das Zwischenladen während einer Tour an öffentlichen Ladeinfrastrukturen wäre mit zusätzlichen Standzeiten verbunden. Denkbar ist, dass die Fahrzeuge während der Be- und Entladevorgänge von Waren elektrische Energie über eine durch den Empfänger oder Verloader bereitgestellte Infrastruktur aufnehmen. Abhängig von den örtlichen Gegebenheiten kann dieser Prozess auf einem privaten Betriebsgelände oder im Straßenraum stattfinden.
- Durch batterieelektrische Fahrzeuge wird die Tourenplanung komplexer. Zusätzliche Parameter wie Reichweite, mögliche Ladeorte und -dauern sind durch Disponenten bei der Auftragsvergabe zu berücksichtigen. Für eine bessere Planbarkeit der Ladevorgänge werden Plattformen benötigt, die eine Reservierung insbesondere öffentlicher Ladepunkte ermöglichen.
- Je vorhersehbarer eine Tour in Bezug auf Ort und Anzahl der angefahrenen Stationen ist, desto besser kann das batterieelektrische Laden bei der Tourenplanung berücksichtigt werden. Besonders Touren im Nah- und Regionalverkehr mit festen Kundenstrukturen eignen sich für batterieelektrische Fahrzeuge.
- Für eine erfolgreiche Elektrifizierung müssen neben einer betrieblichen Ladeinfrastruktur zusätzlich großflächig Ladepunkte an Autobahnen, in Industriegebieten bis hin zu Wohngebieten installiert werden. Insbesondere Fuhrunternehmer ohne eigenen Betriebshof benötigen öffentliche Ladeinfrastrukturen für eine erfolgreiche Elektrifizierung ihrer Fahrzeugflotten.
- Die Leistungsfähigkeit elektrischer Nutzfahrzeuge sollte in Bezug auf die Reichweite, Nutzlast sowie Tank- und Ladedauer, der eines konventionellen Dieselfahrzeugs ähneln. Dies erleichtert eine Integration der Fahrzeuge in bestehende Logistikprozesse.
- Elektrischen Fahrzeugen mit Brennstoffzellen werden aufgrund der höheren Reichweiten sowie dem kürzeren Tankvorgang insbesondere im Fern- und Schwerlastverkehr große Potenziale zugesprochen. Aufgrund der hohen Anschaffungskosten und geringen Marktverfügbarkeit, sowie der fehlenden Tankinfrastruktur werden Wasserstoff-Lkw bei momentanen Beschaffungen allerdings noch nicht berücksichtigt.

Hinsichtlich der Anforderungen an eine private und öffentliche Ladeinfrastruktur auf Basis von Simulationen für exemplarische Betriebshöfe (KEP-Betriebshof und Spedition):

- Die Ladebedarfe der unterschiedlichen Nutzergruppen an den Betriebshöfen und die daraus resultierenden technischen Auswirkungen unterscheiden sich teilweise sehr deutlich. Die Möglichkeit zur Nachtladung ist für viele Nutzergruppen entscheidend und vergleichsweise ressourcenschonend hinsichtlich der Ladeleistungen und Spitzenlasten.
- Im regionalen Verkehr ist die Versorgung eigener Fahrzeuge über Nacht sowohl bei der Spedition als auch auf dem KEP-Betriebshof für alle Fahrzeugklassen technisch gut möglich.

- Die Versorgung der Fahrzeuge von externen Dienstleistern stellt aufgrund der eingeschränkten Ladezeiten dagegen eine große Herausforderung dar. Öffentliche Nachtlademöglichkeiten in der Umgebung können eine Elektrifizierung dennoch ermöglichen. Aufgrund von unterschiedlichen Anforderungen der Nutzergruppen ist eine regionale Bedarfsplanung empfehlenswert.
- Das Zwischenladen beim Kunden ist für keine Nutzergruppe zwingend notwendig. Insbesondere bei den industriellen Umlaufverkehren (Werksbelieferung) kann diese Option jedoch zu einer kleineren und damit günstigeren Auslegung von Ladeleistungen und Fahrzeugbatterien führen.
- Im Fernverkehr spielt die Möglichkeit der Nachtladung ebenfalls eine wichtige Rolle. Kann diese beispielsweise an Autobahnraststätten mit heute gängigen Ladeleistungen gewährleistet werden, ist eine zusätzliche Zwischenladung mit hohen Leistungen nur für überdurchschnittlich lange Tagesstrecken erforderlich. Voraussetzung hierfür sind hinreichend große Batterien.
- Für hoch ausgelastete Fahrzeuge mit wechselnden Fahrern und nur kurzen Stopps (ohne Nachtlademöglichkeit), ist eine öffentliche Ladeinfrastruktur mit möglichst hoher Leistung zwingend erforderlich. Die Ladung am Betriebshof spielt in diesem Fall eine untergeordnete Rolle. Wasserstofffahrzeuge stellen hier aus technischer Sicht eine gute Alternative dar.
- Aufgrund der zumeist guten Planbarkeit der Touren und definierten Ladeszenarien können flexible Fahrzeugangebote eine effiziente Auslegung ermöglichen. Zudem hat die Höhe der Leistung einer öffentlichen Schnellladeinfrastruktur für manche Nutzergruppen einen direkten Einfluss auf die benötigten Batteriegrößen der Fahrzeuge sowie die notwendigen Ladeleistungen an den Betriebshöfen.
- Eine deutliche Drosselung der Spitzenlasten ist an den Betriebshöfen häufig möglich und zumeist empfehlenswert. Höhere maximale Einzelladeleistungen führen dabei zu mehr Flexibilität und geringeren Spitzenlasten des Gesamtsystems. Bei häufig wechselnden Touren oder der Ladung mehrerer Nutzergruppen am Standort können aufwändigere Lademanagementverfahren eine bessere Abstimmung und Priorisierung gewährleisten.

Nachtladung			HPC Zwischenladung
Betriebshöfe	Gewerbegebiete	Fernstrecken (Autobahn)	
<p>Für eigene Fahrzeuge mit Stellplatz auf dem Betriebshof</p> <p>Regionaler Verteil- und Sammelverkehr:</p> <p>KEP (3,5t-LNFZ): 3,7kW AC Spedition (12t-LKW): 7,4kW AC</p> <p>Depot-Direktverkehr & Systemverkehr (deutschlandweite und internationale Verbindungen):</p> <p>KEP (24t-LKW): 150kW DC (optionale Zwischenladung)</p> <p>Industrieller Umlaufverkehr (Werksbelieferung):</p> <p>Spedition (40t-SZM): 22kW AC</p> <p>Nationaler Güterverkehr:</p> <p>Spedition (40t-SZM): 50-100kW DC</p>	<p>Für Fahrzeuge ohne eigenen Betriebshof (z. B. externe Dienstleister)</p> <p>Regionaler Verteil- und Sammelverkehr:</p> <p>KEP (LNFZ): 3,7kW AC Spedition (12t-LKW): 7,4kW AC</p> <p>Industrieller Umlaufverkehr (Werksbelieferung):</p> <p>Spedition (40t-SZM): 22kW AC</p> <p>Regionale Infrastrukturkonzepte sind erforderlich, unter Berücksichtigung der ansässigen Branchen.</p>	<p>Für Fahrzeuge mit mehrtägigen Touren und längeren Standzeiten über Nacht</p> <p>Nationaler Güterverkehr (mehrtägige Touren):</p> <p>Spedition (40t-SZM): 150kW DC</p> <p>Für eine zuverlässige Nachtladung sind entsprechende Stellplätze erforderlich. Ergänzung zur HPC-Zwischenladung.</p>	<p>Für Fahrzeuge ohne Nachtlademöglichkeit, max. 1h Ladezeit</p> <p>Depot-Direktverkehr & Systemverkehr (deutschlandweite und internationale Verbindungen):</p> <p>KEP (24t-LKW): $\geq 500kW$ DC, alternativ Wasserstoff</p> <p>Eine Teilelektrifizierung der Touren ist mit der angegebenen Leistung möglich. Für mehr Flexibilität, Sicherheit und kürzere Ladezeiten sind jedoch deutlich höhere Leistungen erforderlich.</p>

Abbildung 1 Mindestanforderungen an die Ladeleistung für die simulierten Nutzergruppen der KEP- und Speditionslogistik.

1 Motivation, Zielsetzung und Forschungsdesign

Mit dem Übereinkommen von Paris 2015 hat sich die Europäische Union dazu bekannt, die globale Erwärmung auf unter zwei Grad Celsius und möglichst unter 1,5 Grad Celsius gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu beschränken. Um dieses Ziel zu erreichen sind in den kommenden Jahren und Jahrzehnten wesentliche CO₂-Emissionsminderungen in allen Sektoren notwendig. Im Verkehrssektor wird diesbezüglich die Elektrifizierung der Pkw bereits seit über einem Jahrzehnt wesentlich vorangetrieben. Die Technik wird heute in Serie angeboten und ein stetig steigender Absatz kann aktuell beobachtet werden. Mit gut einem Drittel der Emissionen spielen neben den Pkw die Nutzfahrzeuge im deutschen Straßenverkehr eine große Rolle. Die eingesetzten Fahrzeuge sind heutzutage größtenteils dieselbetrieben und die technische Entwicklung alternativer Antriebe ist den Pkw nachlaufend. Für eine angestrebte Umstellung der Fahrzeuge im Wirtschaftsverkehr müssen zeitnah die entscheidenden Weichen gestellt werden.

Der Wirtschaftsverkehr umfasst ein breites Spektrum an Branchen, Fahrzeugklassen und Einsatzzwecken, mit jeweils unterschiedlichen Voraussetzungen und Potenzialen für eine Integration alternativer Antriebstechniken. Neben den Fahrzeugen selbst spielen hierbei die Einbindung der zugehörigen Energieversorgung in bestehende Prozesse sowie die Verfügbarkeit und technische Ausstattung der Lade- und Betankungsinfrastruktur eine wesentliche Rolle. Im Rahmen dieser Studie sollen deshalb im Schwerpunkt die Anforderungen an eine elektrische Ladeinfrastruktur sowie Wasserstoffinfrastruktur vor dem Hintergrund der gewerblichen Nutzung mit dem Horizont bis 2030 beleuchtet werden.

Die Studie gliedert sich in die in Abbildung 2 dargestellten Bereiche. Im ersten Teil wird ein allgemeiner Überblick zum aktuellen Stand und den sich abzeichnenden Entwicklungen im Bereich der alternativen Antriebe für Nutzfahrzeuge gegeben. Danach werden die technischen Grundlagen sowie mögliche Betreibermodelle für eine Ladeinfrastruktur vorgestellt. Anschließend wird der technische Stand hinsichtlich der Versorgung von Wasserstofffahrzeugen, unter Berücksichtigung der Erzeugung und Verteilung bis hin zu den Tankstellen beschrieben. Diesbezüglich liegt ein weiterer Fokus auf den ökonomischen Randbedingungen und zukünftigen Potenzialen der Wasserstofftechnik. Im nachfolgenden Kapitel werden die wesentlichen Branchen im Wirtschaftsverkehr vorgestellt und deren Anforderungen an alternativ angetriebene Fahrzeuge, nebst zugehörigen Lade- und Betankungsmöglichkeiten, aus Sicht der Anwender skizziert. Hierzu wurden Befragungen und Tiefeninterviews durchgeführt, um die Integrationsmöglichkeiten der Fahrzeuge in die bestehenden Prozesse aufzunehmen. Die Volumenmärkte KEP (Kurier-, Express- und Paketdienste) und Speditionslogistik wurden anschließend detaillierter betrachtet, um deren Mobilitätsverhalten in einer Simulation abbilden zu können. Auf Basis der Ergebnisse wurden für die zugehörigen Betriebshöfe je ein Standortszenario definiert, unter Berücksichtigung verschiedener Nutzergruppen und Fahrzeuge vor Ort. Für einen Elektrifizierungsgrad der Fahrzeuge auf den Betriebshöfen, welcher für die Erfüllung der Klimaschutzziele im Jahr 2030 zu erwarten ist, wurden die resultierenden Ladebedarfe simuliert und hinsichtlich der notwendigen Ladeleistungen, Spitzenlasten und Lastmanagementpotenziale analysiert. Aus den standortbezogenen Infrastrukturanforderungen wurden anschließend die zusätzlichen Bedarfe für eine öffentliche Ladeinfrastruktur und die Anforderungen an grundlegende Fahrzeugeigenschaften abgeleitet.

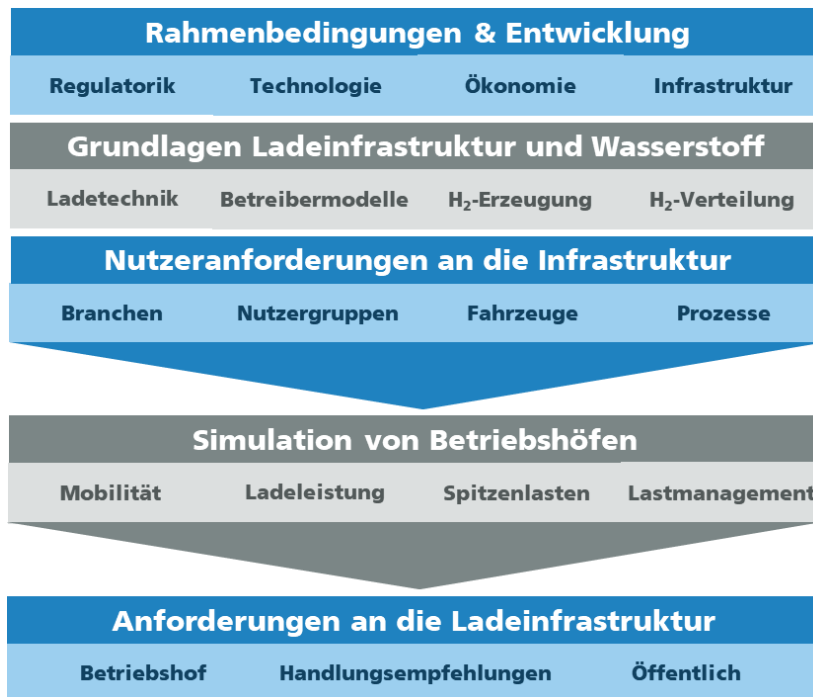


Abbildung 2 Aufbau und Schwerpunkte der Studie

Durch die Ergebnisse der Studie sollen Flottenbetreiber eine Orientierung hinsichtlich der Anforderungen aber auch den Potenzialen für eine Flottenumstellung auf alternative Antriebe erhalten. Zudem soll eine Wissensbasis zu den technischen Hintergründen und aktuellen Entwicklungen geschaffen werden. Weiterhin richtet sich die Studie an Ladeinfrastrukturentwickler und -betreiber sowie Fahrzeughersteller, welche durch passgenaue und flexible Lösungen die Transformation zu alternativ angetriebenen Nutzfahrzeugen ermöglichen und beschleunigen können. Nicht zuletzt adressiert die Studie Behörden- und Regierungsvertreter, die durch Regulierung und Fördermaßnahmen, Infrastrukturkonzepte und letztendlich den Aufbau einer grundlegenden Infrastruktur einen entscheidenden Beitrag zum Erreichen der Klimaziele leisten müssen. Hierfür werden abschließend Handlungsempfehlungen auf Basis der Studienergebnisse formuliert.

2 Alternative Antriebe für Nutzfahrzeuge

2.1 Einführung

Die Entwicklung alternativer Antriebe für Wirtschaftsverkehre ist mehr als nur die technische Umsetzung an den Fahrzeugen selbst. Vielmehr muss diese als Gesamtsystem betrachtet werden. Insbesondere die Dynamik einer möglichen Flottenumstellung hängt wesentlich von den regulatorischen, technischen und ökonomischen Rahmenbedingungen ab sowie dem Aufbau und der Verfügbarkeit einer zugehörigen Lade- oder Betankungsinfrastruktur. Weiterhin ist die Entwicklung für die verschiedenen Fahrzeugklassen, von den leichten Nutzfahrzeugen (LNFZ) bis zu den schweren Lkw und Sattelzugmaschinen (SZM) gesondert zu betrachten.

Mit Stand vom 01.01.2020 sind in Deutschland laut Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 5,9 Mio. Nutzfahrzeuge zugelassen. Darunter werden 3,3 Mio. Lkw, davon 2,7 Mio. LNFZ, und weitere 0,2 Mio. Sattelzugmaschinen gezählt.¹ Hinzu kommen über 81.000 Busse. Der Anteil an Fahrzeugen mit alternativen Antrieben ist dabei allerdings noch äußerst gering und fokussiert sich hauptsächlich auf den Bereich der leichten Transporter (siehe Abbildung 3). Bei den schwereren Fahrzeugen sind bisher fast nur alternativ angetriebene Busse im Einsatz. Hier werden sowohl rein elektrische als auch hybride Antriebe, teilweise mit Brennstoffzellen oder Oberleitungsversorgung, eingesetzt.

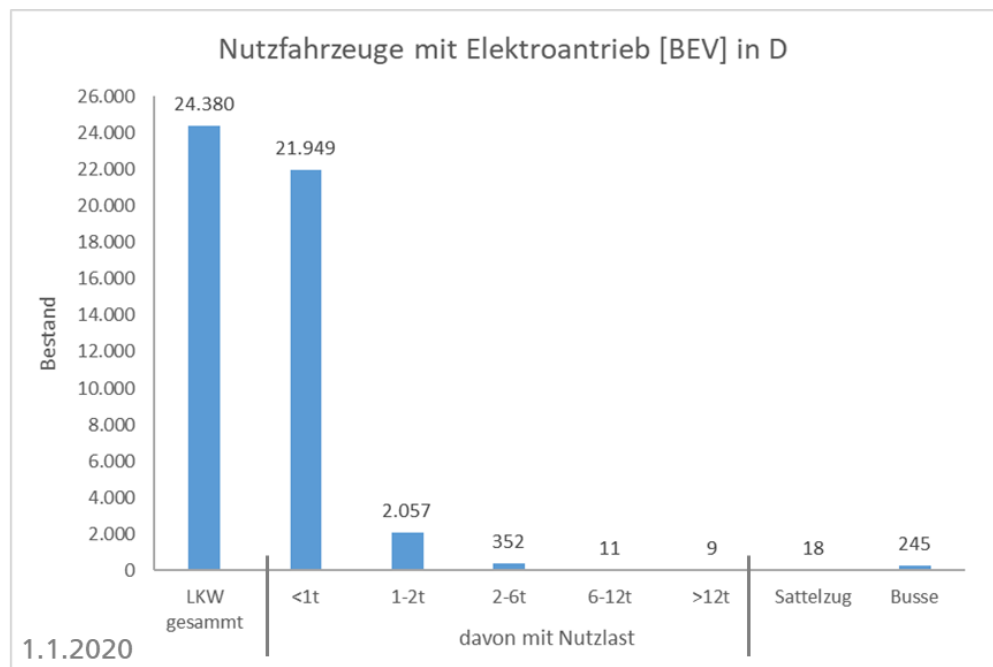


Abbildung 3 Rein elektrisch angetriebene Nutzfahrzeuge in Deutschland. Bei den Bussen werden 75 über Oberleitungen versorgt. Hinzu kommen mindestens 16 Busse mit Brennstoffzellenantrieb.²

Die Zahlen verdeutlichen, dass der Markthochlauf im Nutzfahrzeugbereich bei den LNFZ und Bussen gerade erst beginnt und bei den schwereren Lkw erst noch bevorsteht. Welche alternativen Antriebstechnologien sich durchsetzen werden und ob die technischen und umweltpolitischen Ziele mittelfristig erreicht werden, ist aus heutiger Sicht noch nicht in Gänze absehbar. Die aktuellen Entwicklungen hinsichtlich der wesentlichen ge-

¹ Eine weitere, im Folgenden nicht weiter betrachtete, große Gruppe sind die 1,51 Mio. Zugmaschinen aus Land- und Forstwirtschaft.

² Eigene Darstellung. Datenquellen: KBA (2020), PWC (2019)

nannten Einflussgrößen können jedoch einen Eindruck vermitteln, wie sich die Verkehrswende in den kommenden Jahren gestalten wird. Die nachfolgende Betrachtung fokussiert sich dabei hauptsächlich auf den Wirtschaftsverkehr (LNFZ, Lkw und SZM) mit batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV), Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV), Oberleitungsfahrzeugen (O-EV) und alternativen Kraftstoffen (E-Fuel, P2X).

2.2 Regulatorische Rahmenbedingungen

Die Verkehrswende erfordert Veränderungen in einem wohl etablierten und optimierten System aus Fahrzeugen und der zugehörigen Betankungsinfrastruktur (»lock-in«). Dieser Wandel hin zu völlig neuen Technologien und der daraus resultierenden Anpassungen in den Prozessen kann nicht rein marktseitig getrieben werden, sondern erfordert umfassende Maßnahmen seitens der Gesetzgeber. Hierbei werden einerseits restriktive Maßnahmen angewendet, wie verschärfte Abgasgrenzwerte für Neufahrzeuge, Verkaufs- oder Einfahrverbote von Verbrennern und selektive Steuern, beispielsweise auf den CO₂-Ausstoß der Fahrzeuge (»push-Faktoren«). Auf der anderen Seite werden Förderungen, wie Investitionszuschüsse, Steuererleichterungen oder Mautvergünstigungen angeboten sowie die Förderung von Forschung und Entwicklung (»pull-Faktoren«). Daneben spielen die Rahmenbedingungen für den Ausbau der für die alternativen Antriebe benötigten Energieinfrastruktur eine wesentliche Rolle. Ohne ausreichend Wasserstofftankstellen, Ladestationen oder Oberleitungen ist ein schneller Markthochlauf der damit verbundenen Antriebstechnologien nur schwer vorstellbar.

Geleitet werden die regulatorischen Maßnahmen im Wesentlichen aus umweltpolitischen Zielen. In der Europäischen Union (EU) wurden allgemeine Klima- und Energieziele festgeschrieben, welche als Zwischenziel bis 2030 eine Reduzierung der CO₂-Emissionen sektorenübergreifend um mindestens 40% gegenüber dem Jahr 1990 vorsahen.³ Dieser Wert wurde von den EU-Staaten aktuell sogar auf 55% angehoben.⁴ Bis 2050 soll eine vollständige Klimaneutralität erreicht werden. EU-weit liegen die CO₂-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen, einschließlich Lkw und Bussen, bei rund 6% der Gesamtemissionen und bei rund 25% der CO₂-Emissionen im Straßenverkehr, LNFZ liegen bei etwa 3% der Gesamtemissionen bzw. 12% im Straßenverkehr.⁵ Obwohl die LNFZ im Straßengüterverkehr zahlenmäßig die größte Gruppe stellen, sind die schweren Lkw und SZM für einen Großteil der CO₂-Emissionen in diesem Bereich verantwortlich. Dies liegt einerseits an den typischerweise deutlich längeren Fahrstrecken, andererseits am höheren Gewicht der Fahrzeuge. SZM bieten somit das größte absolute Einsparpotenzial bei vergleichsweise wenigen betroffenen Fahrzeugen.

³ EU (2020)

⁴ Electrive (2020)

⁵ EU (2019), DStatis (o.J.)

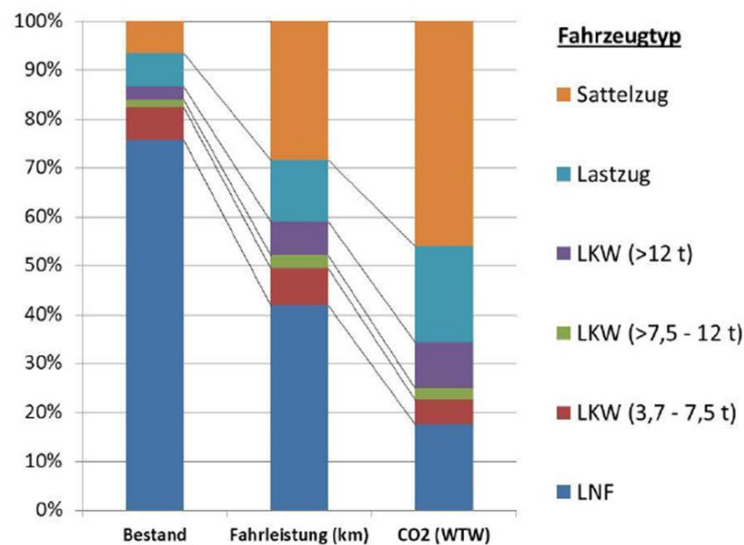


Abbildung 4 Anteile der CO₂-Emissionen nach Fahrzeugklassen.⁶

Seitens der EU wurden 2019 CO₂-Senkungsziele für den Nutzfahrzeugsbereich verbindlich festgelegt. Bei den LNFZ müssen die Hersteller die CO₂-Emissionen für ihre Neufahrzeuge in der EU ab 2030 im Mittel um jeweils 31% gegenüber dem Bezugsjahr 2021 senken, bis 2025 um mindestens 15%.⁷ Bei schweren Lkw und Bussen, ab einem zulässigen Gesamtgewicht von 16t, liegt das Senkungsziel für 2030 bei minus 30% gegenüber dem Bezugsjahr 2019, für 2025 bei minus 15%.⁸ Bei der Berechnung werden verschiedene Fahrzeuguntergruppen entsprechend ihres Einsatzgebiets definiert, um Unterschiede bei den typischen Fahrprofilen und den technischen Merkmalen über Gewichtungsfaktoren zu berücksichtigen. Die Emissionen werden jeweils in Relation zur Nutzlast berechnet. Werden die Senkungsziele nicht eingehalten, drohen den Herstellern ab 2025 hohe Strafzahlungen, welche dann proportional zu den Überschreitungen fällig werden. 2023 soll eine Überprüfung der Maßnahmen für Pkw und Nutzfahrzeuge und ggf. eine Verschärfung und Erweiterung der Senkungsziele auf bisher nicht berücksichtigte Fahrzeugklassen (mittelschwere Lkw, Arbeitsmaschinen) und nachfolgende Zeiträume erfolgen.

Auf nationaler Ebene gilt es das Bundesklimaschutzgesetz von Ende 2019 besonders zu betrachten.⁹ Hier werden erstmalig sektorspezifische CO₂-Emissionskontingente für die Jahre 2020 bis 2030 festgeschrieben. Insgesamt sollen die Emissionen bis 2030 um mindestens 55% gegenüber 1990 gesenkt werden. Für den Verkehrssektor wird für 2020 ein Jahresemissionskontingent von 150 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalent festgelegt, welches bis 2030 auf 95 Mio. Tonnen stetig abgesenkt wird (siehe Abbildung 5). Dies bedeutet eine Reduktion der absoluten jährlichen Emissionen um 37% bis 2030 und um 18% bis 2025, bezogen auf die festgelegten Emissionen für 2020. Die tatsächlichen CO₂-Emissionen im Verkehr betragen 2019 rund 163 Mio. Tonnen und lagen damit nur minimal unter dem Wert von 1990 mit 164 Mio. Tonnen.¹⁰ Da heute rund 94% aller CO₂-Emissionen im Verkehr von Pkw und Nutzfahrzeugen verursacht werden (siehe Abbildung 6) wird hier auch ein Großteil der Einsparungen erfolgen müssen. Die Einhaltung der Emissionskontingente wird jährlich überprüft, Mehr- oder Minderleistungen werden auf die Folgejahre angerechnet. Bei einer Überschreitung der Kontingente muss innerhalb von drei Monaten ein Sofortprogramm vorgelegt werden, um eine Verbesserung der Situation herbeizuführen.

⁶ Jöhrens, J. et al. (2018)

⁷ EU (2019a)

⁸ EU (2019)

⁹ Bund (2019), DStatis (o.J.)

¹⁰ BMU (2020)

Jahresmenge in Mio. t CO ₂ -Äqu.	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Verkehrssektor	150	145	139	134	128	123	117	112	106	101	95
						-18%					-37%

Abbildung 5 CO₂-Kontingente im Verkehrssektor laut Bundesklimaschutzgesetz.

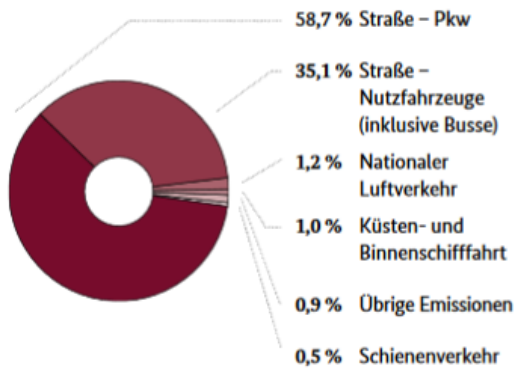


Abbildung 6 Anteile der Emissionsquellen im Verkehr 2018 (ohne CO₂ aus Biokraftstoffen).¹¹

Bei der Betrachtung fällt auf, dass laut Klimaschutzgesetz die Emissionen bis 2030 um 37% absolut gesenkt werden müssen, also im Bestand. Diese Einsparung kann natürlich nicht allein aus den Minderungen bei den Flottenemissionen der Fahrzeughersteller resultieren, welche sich mit minus 30% bis minus 37,5% entsprechend der EU-Vorgaben auf die Neuzulassungen in 2030 beziehen. Als ergänzende Maßnahmen sind deshalb eine Verlagerung der Verkehrsleistung auf andere Verkehrsträger (Bahn, Binnenschiffe, ÖPNV, Fahrrad) und eine Verkehrsvermeidung, z.B. über eine verbesserte Logistik, vorgesehen. Demgegenüber steht allerdings ein deutliches Wachstum der Güterverkehrsleistung in den vergangenen Jahren. Alternative Kraftstoffe könnten hier ebenfalls einen Beitrag leisten, insbesondere für die Bestandsfahrzeuge, sofern die CO₂-Bilanz der Kraftstoffherzeugung mit angerechnet wird. Es ist das Ziel der Bundesregierung, dass bis 2030 etwa ein Drittel der Fahrleistung im schweren Straßengüterverkehr elektrisch oder auf Basis strombasierter Kraftstoffe absolviert wird.¹²

Neben diesen grundlegenden regulatorischen Rahmenbedingungen gibt es zahlreiche weitere Entwicklungen und politische Maßnahmen, welche letzten Endes dazu dienen, die oben genannten Einsparungen zu ermöglichen. Auf der Seite der push-Faktoren spielen beispielsweise Fahrverbote für Verbrenner, insbesondere Diesel-Fahrzeuge, vor allem für den Lieferverkehr und Handwerker in den betroffenen Städten eine wichtige Rolle. Diese werden heute international und teilweise auch in Deutschland bereits praktiziert oder sind angekündigt. Zahlreiche Länder haben zudem bereits Verbote für Verbrennungsfahrzeuge, bzw. deren Verkauf oder Zulassung, vorgesehen (siehe Abbildung 7).

¹¹ BMU (2020)

¹² BMU (2020)

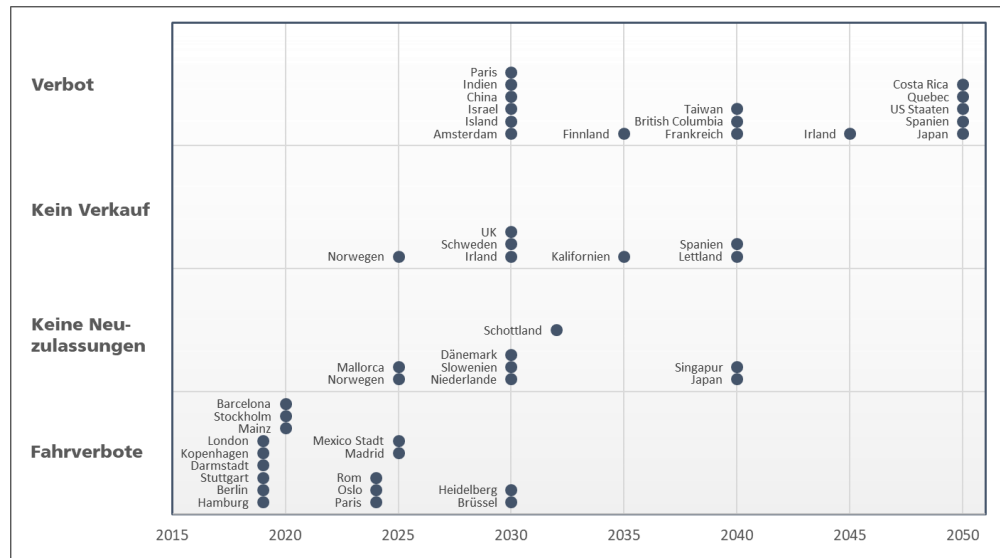


Abbildung 7 Angestrebte und beschlossene Einschränkungen für Verbrenner-Fahrzeuge in verschiedenen Regionen.

Im Rahmen der Clean Vehicles Directive hat die EU Quoten für die Beschaffung von sauberen (emissionsarm, einschließlich Gas- und Hybridfahrzeuge) bzw. emissionsfreien Neufahrzeugen für den öffentlichen Sektor erlassen (exklusive Militär, Forstwirtschaft etc.).¹³ Dies ist insbesondere für Busse im ÖPNV relevant, welche bis Ende 2025 zu je 22,5% sauber bzw. emissionsfrei sein müssen, bis Ende 2030 dann sogar zu mindestens je 32,5%. Für Pkw und LNFZ gelten Quoten von 38,5%, welche sich ab 2026 ausschließlich auf emissionsfreie Fahrzeuge beziehen. Die Quoten für Lkw liegen bei bis zu 15% für saubere Fahrzeuge. Auch beim Betrieb werden Verbrenner ab 2021 hinsichtlich der Treibstoffkosten schlechter gestellt, was insbesondere für den schweren Güterverkehr eine große Rolle spielt. Erreicht wird dies durch eine CO₂-Bepreisung für die bei der Verbrennung der verwendeten Energieträger freiwerdenden Emissionen.¹⁴

Auf Seite der Pull-Faktoren wird die Verkehrswende durch die Regierungen auf vielfältige Weise gefördert. Dies betrifft Investitionen in die Forschung und Entwicklung für alternativer Antriebe, Infrastruktur und Energiebereitstellung (einschließlich strombasierter Kraftstoffe), die Stärkung alternativer Verkehrsträger, insbesondere des ÖPNV und der Bahn, Kauf- und Steueranreize für alternativ angetriebene Fahrzeuge sowie Ausbauprogramme für die Lade- und Wasserstoffbetankungsinfrastruktur.¹⁵ Insbesondere im Logistikbereich spielen daneben monetäre Anreize durch eine vergünstigte bzw. CO₂-abhängige Autobahnmaut eine Rolle. Für die Nutzfahrzeuge wurde hierfür aktuell ein Gesamtkonzept seitens des Verkehrsministeriums für Deutschland veröffentlicht, in welchem die vorgesehenen Maßnahmen und ein Zeitplan für die Umsetzung definiert werden (Abbildung 8).¹⁶

¹³ EU (2020a)

¹⁴ Bund (2019b)

¹⁵ Bund (2019a), BMU (2020)

¹⁶ BMVI (2020)

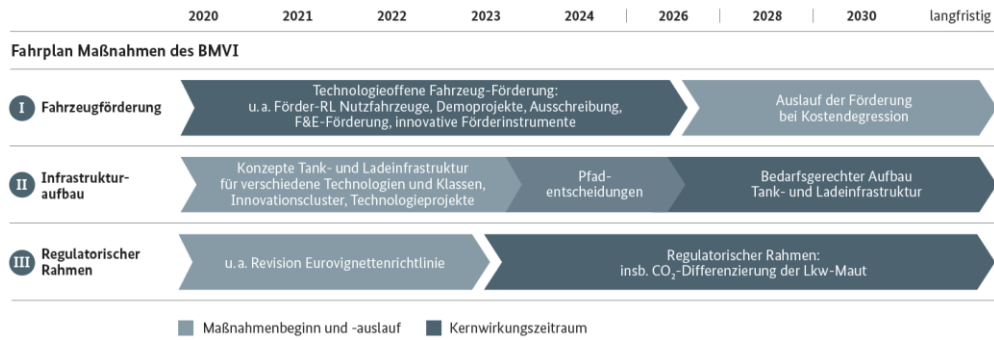


Abbildung 8 Maßnahmenplan des BMVI zur Reduzierung der CO₂-Emissionen im Nutzfahrzeugbereich.¹⁷

Zusammengefasst kann man festhalten, dass der Druck auf den Verkehrssektor und insbesondere auf die Fahrzeughersteller deutlich zunimmt. Regierungen haben die Möglichkeit durch Restriktionen und Förderungen die Entwicklung und Verbreitung alternativer Antriebe massiv zu beeinflussen, stehen aber auch in der Pflicht die notwendigen Voraussetzungen für einen Markthochlauf zu schaffen. Die Regulierung ist dabei bisher weitestgehend technologieunabhängig. Für den Schwerlastverkehr rückt seitens der Förderung aber zunehmend auch die Wasserstoffbereitstellung in den Fokus.¹⁸

2.3 Technologische Rahmenbedingungen

Ein Markthochlauf alternativer Antriebe erfordert ein bedarfsgerechtes Angebot an geeigneten Fahrzeugen mit entsprechender Technik und der zugehörigen Infrastruktur. Im Folgenden wird im Wesentlichen die Fahrzeugtechnik und die Marktsituation näher betrachtet, die Infrastruktur folgt in einem späteren Abschnitt.

Für den Wirtschaftsverkehr kommen verschiedene alternative Antriebskonzepte in Betracht. Die einfachste Variante aus Fahrzeugsicht stellen alternativ erzeugte Kraftstoffe dar, die analog zu den bisherigen Fahrzeugen in einem Verbrennungsmotor verbraucht werden können. Bisher werden bereits Biokraftstoffe den herkömmlichen Treibstoffen in geringen Anteilen beigemischt. Gesellschaftlich ist diese Variante jedoch sehr umstritten, mit dem Argument, dass die Herstellung auf Pflanzenbasis hinsichtlich der Flächennutzung mit der Nahrungs- und Futtermittelproduktion konkurriert bzw. bei Palmölplantagen der Anbau auf gerodeten Regenwaldflächen erfolgt. Anders verhält es sich mit strombasierten Kraftstoffen, welche synthetisch aus Wasser und CO₂ hergestellt werden können. Aufgrund des hohen elektrischen Energieeinsatzes in der Produktion werden diese Kraftstoffe auch als E-Fuels bezeichnet, der zugrundeliegenden Herstellungsprozess als Power-to-X, wobei das X für Gas oder Liquid (Flüssigkeit) stehen kann (P2X, P2G, P2L). Da sich die technische Ausstattung der Fahrzeuge durch alternative Kraftstoffe nur marginal ändert, liegt der Fokus hierbei vor allem auf der Infrastruktur, insbesondere der Energiebereitstellung für die Herstellung.

Eine weitere alternative Antriebsvariante stellen die batterieelektrischen Fahrzeuge (BEV) dar. Hierbei wird ein elektrischer Batteriespeicher im Fahrzeug verbaut und der Antrieb strombasiert über einen oder mehrere Elektromotoren gewährleistet. Mischformen mit Verbrennern (HEV, PHEV) wurden ebenfalls realisiert. Die Alltagstauglichkeit und Wirtschaftlichkeit rein elektrischer Fahrzeuge hängen wesentlich von der Entwicklung der Batterietechnologie ab. Die Energiedichte der Batterien definiert einerseits die Reichweite der Fahrzeuge, wirkt sich andererseits aber auch auf das Gewicht und den Bauraum des Fahrzeugs aus, mit Auswirkungen auf die Zuladung und das Ladevolumen. Während heutige Batterien problemlos für leichtere Nutzfahrzeuge eingesetzt werden können,

¹⁷ BMVI (2020)

¹⁸ DW (2020)

stellt der Fernverkehr für batterieelektrische Antriebe eine große Herausforderung dar (Reichweite, Bauraum, Gewicht, Lebensdauer). Mittelfristige Weiterentwicklungen der Batterietechnik können jedoch rein elektrische Anwendungen für alle Fahrzeugklassen und Nutzerprofile ermöglichen. Das Batteriegewicht stellt hier kein grundsätzliches Ausschlusskriterium dar.

Elektrische Transporter sind 2020 bereits mit zahlreichen Modellen verfügbar bzw. für dieses Jahr angekündigt (siehe Abbildung 9). Die Batteriekapazitäten entsprechen dabei weitestgehend dem aus dem Pkw-Bereich bekannten Größen und ermöglichen bei LNFZ typische Reichweiten von 100km bis 300km.

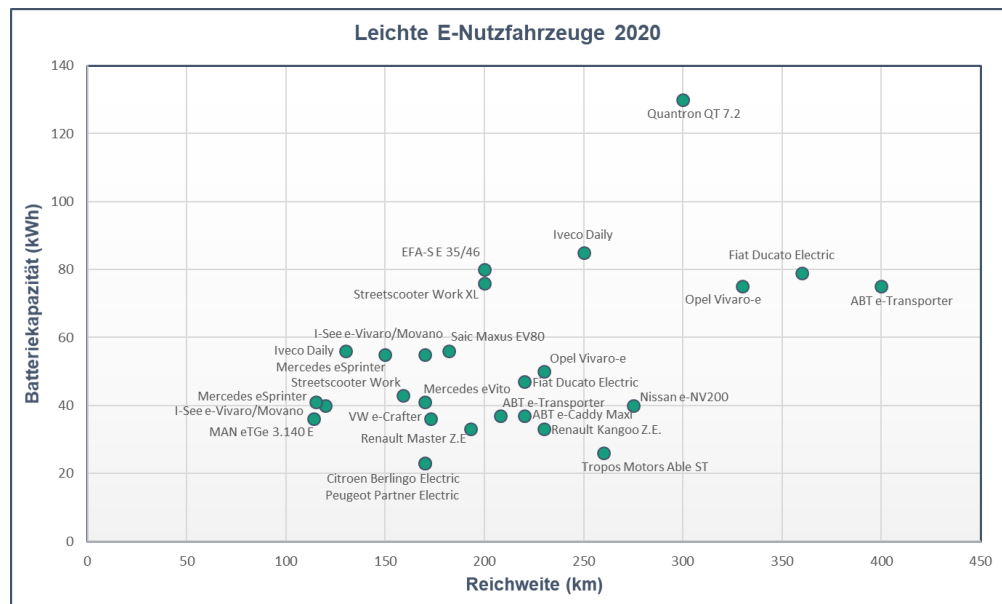


Abbildung 9 Rein elektrisch betriebene LNFZ im Markt oder für 2020 angekündigt.¹⁹

Im Bereich der schweren Lkw, insbesondere für die Langstrecke, gibt es bislang noch keine alltagstauglichen Fahrzeuge im Markt. Gerade im mittelschweren Segment werden aber schon einige Fahrzeuge erprobt. Die meisten Testfahrzeuge und Ankündigungen weisen Reichweiten von 100km bis 300 km auf und zulässige Gesamtmassen von 15t bis 30t. Ein Beispiel hierfür stellt der Daimler eActros dar, der bei einem zulässigen Gesamtgewicht von 18t bis 25t eine Reichweite von etwa 200km verspricht und bereits im Testbetrieb eingesetzt wird.²⁰ Die Batteriegröße beträgt 240kWh bei einer Motorleistung von 125kW. Langstrecken-Lkw bzw. SZM werden ebenfalls von verschiedenen Herstellern für das Jahr 2021 angekündigt. Ein prominentes Beispiel ist der Tesla Semi Truck, der als 40t-Sattelzugmaschine mit einer 1.000kWh Batterie auf 800km Reichweite kommen soll, bei einer Motorleistung von 300kW.²¹ Weitere Beispiele mit Beteiligung deutscher Firmen sind der Freightliner eCascadia (550kWh/537kW, Daimler Trucks) oder auch der E-Truck Nikola Tre (720kWh/480kW, Bosch), welcher ab Ende 2021 bei IVECO in Ulm produziert werden soll.²²

¹⁹ Eigene Darstellung, Datenquelle: Firmenauto (2020)

²⁰ Daimler (2018)

²¹ Tesla (o.J.)

²² Ingenieur (2020), Electrive (2019)



Abbildung 10 Rein elektrische Lkw: Daimler eActros und eCascadia.²³

Auch Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) sind im Prinzip rein elektrische Fahrzeuge mit einem elektrischen Antrieb. Sie beziehen ihre Energie über einen Wasserstoff-Druckspeicher im Fahrzeug. Aus dem Wasserstoff wird über eine Brennstoffzelle elektrische Energie erzeugt und für den Antrieb genutzt (siehe Kapitel 4.1). Die Technik ist grundsätzlich Einsatztauglich: Im Pkw-Bereich gibt es mehrere Serienfahrzeuge und auch erste LNFZ sollen ab 2020 erhältlich sein (Renault Kangoo Z.E Hydrogen und Master Z.E. Hydrogen), bei Letzteren dient die Brennstoffzelle aber lediglich als Range-Extender. Außerdem werden auch Busse mit Brennstoffzellenantrieb in geringen Stückzahlen bereits verkauft und im ÖPNV betrieben. Für schwere Lkw gibt es bisher noch keine marktreifen Anwendungen. Diese sollen jedoch in den nächsten Jahren folgen. Hemmnisse liegen hier nicht grundsätzlich bei der Brennstoffzellentechnik selbst, sondern eher in der zugrundeliegenden Elektrifizierung der Lkw.²⁴ Um die hohen temporären Leistungsbedarfe insbesondere an Steigungen zu decken wird häufig auf ein Hybridkonzept mit einer zusätzlichen Traktionsbatterie gesetzt. Eine weitere Herausforderung ist der Bauraum für die Mitführung ausreichender Mengen Wasserstoff. Grundsätzlich ist auch eine direkte, CO₂-freie Verbrennung des Wasserstoffs in einem Motor denkbar, jedoch wird dieser Ansatz aufgrund der im Vergleich zur Brennstoffzelle niedrigeren Wirkungsgrade heute nur sekundär verfolgt. Entwicklungspotenziale werden aber für den Nutzfahrzeugbereich gesehen, entsprechende Testfahrzeuge könnten ab 2021 auf die Straße kommen.²⁵

Einen Brennstoffzellen-Lkw für die Langstrecke will das Startup Nikola in Zusammenarbeit mit IVECO und Bosch ab 2023 in die Produktion bringen (Auslieferung ab 2024). Der Nikola Tre BZ soll, wie schon die elektrische Variante, in Ulm gebaut werden.²⁶ Das bisherige Konzept sieht neben einem Wasserstofftank für bis zu 80kg H₂ eine zusätzliche Batterie vor und soll bei einer Systemleistung von 480kW liegen. Für die Reichweite werden bis zu 800km veranschlagt.²⁷

²³ Bildquelle: Daimler Trucks

²⁴ Wietschel, M. et al. (2017)

²⁵ NZZ (2020)

²⁶ AMS (2017), Ingenieur (2020), Nikola (o.J.)

²⁷ Expertengespräch mit Iveco



Abbildung 11 Brennstoffzellen-Lkw: Nikola Tre BZ (Ankündigung) und Hyundai H₂ Xcient (Auslieferung einer Testflotte).²⁸

Bereits auf der Straße befindet sich beispielsweise der Hyundai H₂ Xcient. Mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 34t soll er 400km Reichweite abdecken.²⁹ Die Leistung aus zwei Brennstoffzellen à 95kW wird durch eine 73kWh-Batterie unterstützt. Bis Ende 2020 sollen in der Schweiz 50 Fahrzeuge zum Einsatz kommen, bis 2025 sollen es 1.600 Fahrzeuge sein.³⁰ Weitere Praxistests werden beispielsweise auch von Scania und Toyota durchgeführt.³¹ Daimler kündigt in Zusammenarbeit mit Volvo erste Fahrzeuge für frühestens 2025 an.³²

Eine weitere Variante für einen alternativen Antrieb, insbesondere für die Langstrecke, stellen Oberleitungs-Lkw (O-EV) dar. Hierbei handelt es sich im Prinzip ebenfalls um elektrisch oder hybrid betriebene Fahrzeuge, allerdings wird der Fahrstrom während der Fahrt, zumindest temporär, über einem Pantographen von einer Oberleitung bezogen. Diese Oberleitungsinfrastruktur muss an den Hauptverkehrsachsen installiert werden, für die verbleibenden Fahrstrecken zum Zielort wird dann eine im Vergleich zum BEV deutlich kleinere Batterie eingesetzt oder auf einen Verbrenner zurückgegriffen. Die Oberleitungstechnik ist seit Jahrzehnten bekannt und etabliert. Neben den Straßenbahnen werden beispielsweise auch 75 O-Busse in deutschen Städten in dieser Variante betrieben.³³ Für den Lkw-Verkehr wurden bisher nur wenige Test-Kilometer auf verschiedenen Autobahnteilstücken mit der notwendigen Infrastruktur ausgerüstet, eine Teststrecke auf einer Bundesstraße ist für 2020 in Planung.³⁴

Zusammengefasst kann man festhalten, dass aus technischer Sicht alle vorgestellten Fahrzeugkonzepte für alle Fahrzeugklassen und Nutzerprofile bereits heute oder mittelfristig umsetzbar sind. Welche Technologie sich durchsetzt hängt nicht nur von der Verfügbarkeit der Fahrzeuge, sondern wesentlich auch von den ökonomischen und infrastrukturellen Rahmenbedingungen ab, welche in den folgenden Abschnitten näher betrachtet werden.

2.4 Ökonomische Rahmenbedingungen

Fahrzeuge mit alternativen Antrieben müssen hinsichtlich ihrer Anschaffungs- und Betriebskosten über die gesamte Nutzungsdauer, einschließlich aller Fördermaßnahmen und etwaigen Restwerten (Total Cost of Ownership, TCO) für Kunden konkurrenzfähig sein, um aus wirtschaftlicher Sicht eine Chance am Markt zu haben. Diese Kostenrechnung ist von den Randbedingungen der Nutzer abhängig und muss individuell für jeden

²⁸ Bildquellen: Iveco, Hyundai

²⁹ Hyundai (o.J.)

³⁰ TransNews (2020)

³¹ Scania (o.J.), Toyota (o.J.)

³² Tagesschau (2020)

³³ PWC (2019)

³⁴ VM BW (2020)

Anwender durchgeführt werden. Relevant sind dabei die Auswahl und Ausstattung des konventionellen Vergleichsfahrzeugs, die täglich zurückgelegten Strecken, die individuellen Energiekosten für Kraftstoffe bzw. Strom sowie die Haltedauer und Restwerterwartung. Bei BEV spielen dazu auch die Kosten für die Ladeinfrastruktur eine Rolle.

Für LNFZ sind bereits zahlreiche Fahrzeuge mit Elektroantrieb am Markt verfügbar. Wie für Elektrofahrzeuge üblich, liegen die Anschaffungskosten höher als für Verbrenner, die Betriebskosten, insbesondere die Energiekosten, sind dagegen im Allgemeinen günstiger. Zur Orientierung sind in Abbildung 12 die Anschaffungs- und Energiekosten für zwei exemplarische Elektrofahrzeuge im Vergleich zur jeweiligen Verbrenner-Version dargestellt.

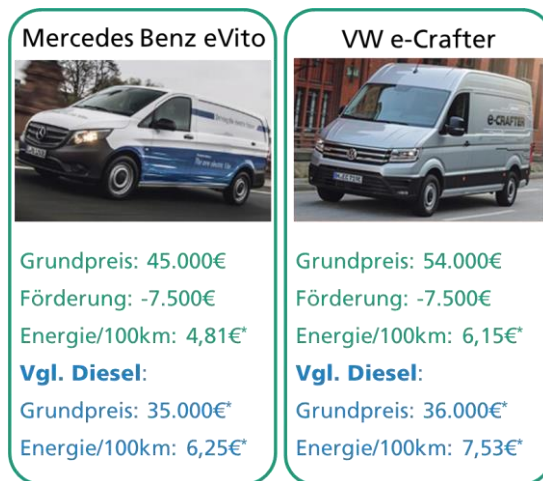


Abbildung 12 Exemplarischer Vergleich von Anschaffungs- und Energiekosten für Elektrotransporter gegenüber Dieselfahrzeugen.³⁵

Es zeigt sich, dass die Kaufpreisunterschiede bei typischer Nutzung ohne weitere Fördermaßnahmen heute noch nicht durch günstigere Energiekosten zu amortisieren sind. Beim Mercedes-Vito wäre dies beispielsweise erst nach knapp 700.000 Kilometern der Fall. Durch den bis mindestens 2025 gewährleisteten Umweltbonus von 7.500€ auf den Kaufpreis, kann die zur Amortisierung notwendige Fahrleistung jedoch auf knapp 175.000km gesenkt werden.³⁶ Monetär vorteilhaft wirkt sich zusätzlich eine Befreiung von der KFZ-Steuer aus. Auf der Gegenseite stehen weitere Kosten für eine, ggf. separat geförderte, Ladestation und bisher nicht berücksichtigte, aber gängige Rabatte für die Verbrennerfahrzeuge. Erfahrungen im Pkw-Bereich zeigen zudem, dass die Wartungskosten für Elektroautos eher günstiger sind und Versicherungsbeiträge sowie die Restwertentwicklung in einem vergleichbaren Bereich liegen.³⁷ Die vereinfachte Rechnung verdeutlicht natürlich nur die Größenordnungen, dennoch kann man festhalten, dass je nach Anwendungsfall eine Preisparität heute schon möglich sein kann. Pkw-Daten von Tesla zeigen auch, dass Elektrofahrzeuge heute mehrere 100.000 Kilometer mit nur geringen Kapazitätsverlusten der Batterie zurücklegen können (-10% nach 280.000km).³⁸

Bei schweren Lkw, insbesondere den SZM, spielen die Energiekosten in der TCO-Betrachtung eine größere Rolle als bei den LNFZ (siehe Abbildung 13). Dies liegt am höheren

³⁵ Angenommen wird der Grundpreis für ein Diesel-Fahrzeug gleichen Typs mit vergleichbarer Motorleistung und Automatik ohne MwSt (Vito 114 CDI, Crafter 30 MR 2.0 TDI). Weitere Ausstattungen wurde nicht berücksichtigt. Für den Verbrauch wurden nach Herstellerangaben folgende Werte angesetzt (ohne Ad-Blue): Crafter: 290Wh/km bzw. 7,1l/100km (NEFZ); Vito: 227kWh/km bzw. 5,9l/100km (NEFZ). Strompreis: 21,2ct/kWh bzw. Diesel 1,06€/l (jeweils ohne MwSt.). Stand 6/2020. Quellen und Bilder: Mercedes-Benz AG, Volkswagen Nutzfahrzeuge

³⁶ BafA (2020)

³⁷ Smarter fahren (o.J.)

³⁸ Teslamag (2020)

Verbrauch der schwereren Fahrzeuge und an den typischerweise deutlich längeren täglichen Fahrstrecken. Dementsprechend besteht ein höheres Potenzial, Kaufpreisunterschiede von alternativ angetriebenen Fahrzeugen über die Energiekosten wieder einzusparen.

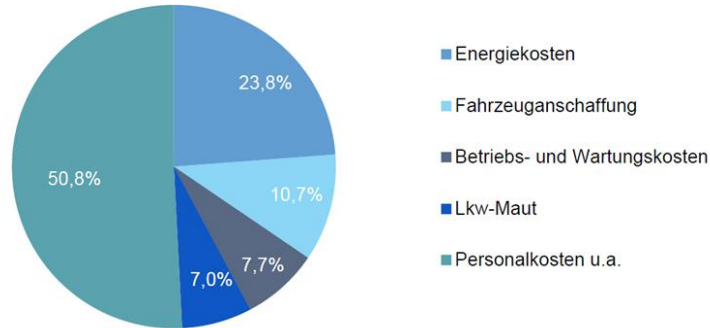


Abbildung 13 Prognose der Nutzerkostenstruktur von Diesel-Sattelzügen im Zeitraum 2020 bis 2030.³⁹

Eine aufwändige Vergleichsstudie prognostiziert die Anschaffungskosten und TCO für verschiedene alternative Antriebssysteme für SZM und vergleicht diese mit einem herkömmlichen Diesel-Fahrzeug (siehe Abbildung 14).⁴⁰ Für den Fahrzeugeinsatz wurde eine fünfjährige Betriebszeit angesetzt und ein entsprechender Restwert veranschlagt. Dieser wurde für alle Antriebe mit rund 25% analog zu bekannten Werten für Dieselfahrzeuge festgelegt, wobei Batterien nach der Erstnutzung grundsätzlich mit dem Wert null eingehen (außer beim BEV 800). Da der Gebrauchtwagenmarkt für solche Fahrzeuge stärker internationalisiert ist als beispielsweise für Pkw, setzen Verkäufe eine adäquate Infrastruktur auch in den Zielgebieten voraus. Eine Mautbefreiung gilt in Deutschland für alle elektrischen Lkw zunächst unbefristet, bisher befreite Gasfahrzeuge werden ab 2021 nur noch vergünstigt.⁴¹ Ab 2021 wird zudem in Deutschland eine CO₂-Steuer erhoben, welche insbesondere die konventionellen Kraftstoffe zusätzlich verteuert. Beginnend mit 25€ pro Tonne CO₂, welches bei der Verbrennung der Energieträger emittiert wird, wird die Abgabe bis 2025 auf 55€ steigen und soll danach zwischen 55€ und 65€ liegen. In der dargestellten Kostenrechnung konnte die CO₂-Steuer noch nicht berücksichtigt werden.

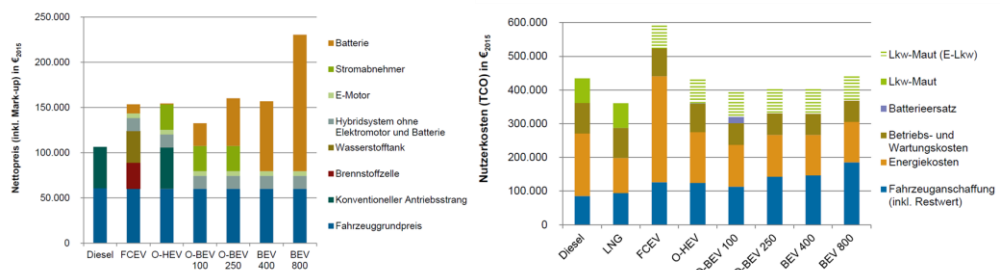


Abbildung 14 Prognostizierte Anschaffungskosten (links) und Nutzerkosten (rechts) für SZM im Jahr 2025. Die Zahlenangaben bei den BEV entsprechen der Fahrzeugreichweite in km. Die CO₂-Steuer ab 2021 wurde noch nicht berücksichtigt.⁴²

Da die angesetzten Fahrzeuge bisher noch nicht in Serie produziert und verkauft werden, sind die Ergebnisse noch mit hohen Unsicherheiten behaftet. Eine Preisparität bei den

³⁹ Kühnel, S. et al. (2018)

⁴⁰ Kühnel, S. et al. (2018)

⁴¹ BMVI (o.J.)

⁴² Exklusive MwSt., 5 Jahre Nutzungsdauer, Kosten für Austauschbatterien nicht berücksichtigt, Betriebskosten beinhalten Wartung, Reparatur, Schmierstoffe und AdBlue. Kühnel, S. et al. (2018)

TCO erscheint aber zumindest mittelfristig und ggf. mit einer Förderung, selbst für Fahrzeuge mit sehr großen Batterien, möglich. Obwohl insbesondere Brennstoffzellenantriebe für die Langstrecke wegen Gewicht und Reichweite oft als geeigneter als rein elektrische Fahrzeuge angesehen werden, wirken sich die höheren Energiekosten deutlich nachteilig gegenüber den Alternativen aus. Die Wasserstoffkosten sollen aber durch Fördermaßnahmen mittelfristig konkurrenzfähig werden (siehe hierzu auch Kapitel 4.2.2).⁴³

Vorerst bis Ende 2020 werden emissionsarme und elektrisch angetriebene Nutzfahrzeuge für den Güterverkehr mittels Kaufanreize gefördert.⁴⁴ Die Zuschüsse können je nach Fahrzeugklasse, Gewicht und Antriebsart bis zu 40.000€ pro Fahrzeug betragen, maximal jedoch 40% der Preisdifferenz zu einem vergleichbaren Diesel-Fahrzeug. Für ein Nachfolgeprogramm stehen für 2021 bis 2023 bereits 1,16 Mrd. € zur Verfügung. Dabei sollen die Mehrkosten für klimafreundliche Nutzfahrzeuge gegenüber Diesel-Lkw mit bis zu 80% gefördert werden.⁴⁵ Alternative Förderprogramme werden auch von den Bundesländern angeboten.⁴⁶ Des Weiteren gibt es, wie auch schon bei den Pkw und LNFZ, eine KFZ-Steuerbefreiung über 10 Jahre für BEV und FCEV.⁴⁷

Zusammengefasst kann man festhalten, dass alternativ angetriebene Lkw und SZM bei einer TCO-Betrachtung bereits heute (LNFZ) oder zumindest mittelfristig in einer vergleichbaren Größenordnung liegen können wie die konventionell angetriebenen Fahrzeuge. Verbleibende wirtschaftliche Nachteile können durch Förderprogramme für die Anschaffung und den Betrieb ausgeglichen werden. Welche Antriebsart insbesondere für die schwereren Fahrzeuge günstiger sein wird, lässt sich aus heutiger Sicht noch nicht abschließend beurteilen und hängt wesentlich von den Randbedingungen ab. Diesbezüglich besteht das Risiko für Fahrzeughersteller, auf die am Ende teurere Technologie zu setzen, welche dann nur geringere Marktanteile verspricht.

2.5 Infrastrukturelle Rahmenbedingungen

Eine Grundvoraussetzung für den Markthochlauf alternativer Antriebe ist eine bedarfsgerechte Lade- bzw. Betankungsinfrastruktur. Hierfür ergeben sich abhängig von der Branche der Nutzer im Wirtschaftsverkehr und der Antriebstechnik wesentliche Unterschiede. Während beispielsweise KEP-Dienstleister und Handwerker ihre Elektrofahrzeuge potenziell nachts auf einem Betriebs Hof laden könnten, sind Langstrecken-Lkw im Güterverkehr auf eine öffentliche Schnellladeinfrastruktur mit hohen Ladeleistungen angewiesen. Die branchenspezifischen Bedarfe und Unterschiede werden in Kapitel 5 genauer untersucht und durch Simulationen in Kapitel 6 ergänzt. Im Folgenden liegt der Fokus auf den verschiedenen Antriebstechniken und deren spezifischen Anforderungen an sowie Auswirkungen auf die Infrastruktur und Energieversorgung.

Aus energetischer Sicht unterscheiden sich die verschiedenen alternativen Antriebskonzepte im Wesentlichen hinsichtlich ihrer Wirkungsgrade und den daraus resultierenden Energiebedarfen für die Fahrzeuge sowie den Unterschieden bei der Energieerzeugung und der Bereitstellung über die Infrastruktur, einschließlich der Übertragung in die Fahrzeuge. Insbesondere hinsichtlich der CO₂-Emissionen einer Antriebsart muss deshalb nicht nur der Energieverbrauch im Fahrzeug (tank-to-wheel, TTW), sondern auch in der Vorkette betrachtet werden (well-to-tank, WTT). Hierzu gehört die Förderung des Primärenergieträgers bzw. die Stromerzeugung, ggf. die Umwandlung zum gewünschten Kraftstoff sowie der Transport bis zu den Fahrzeugen. Bei alternativen Antrieben sollen möglichst keine fossilen Primärenergieträger (Erdgas, Öl) eingesetzt werden. Ziel ist es

⁴³ Bund (2020)

⁴⁴ BMVI (2018)

⁴⁵ BMVI (2020), BMVI (2020a)

⁴⁶ Z.B. Emobil BW (2020)

⁴⁷ Zoll (o.J.)

viel mehr, den Kraftstoff für die Fahrzeuge möglichst auf Basis erneuerbarer Energiequellen herzustellen, bzw. die elektrische Energie direkt im Fahrzeug zu verwenden. Die Energiebedarfe und CO₂-Emissionen für die Stromherstellung sind dabei unabhängig von der alternativen Antriebstechnologie und werden im Folgenden nicht weiter betrachtet. Welche Strecke mit einer bestimmten Menge elektrischer Energie zurückgelegt werden kann, hängt von der Effizienz der Fahrzeuge und der vorgelagerten Prozesskette ab. Ein Vergleich zwischen BEV, FCEV und P2X-Technologien ist in Abbildung 15 für Pkw dargestellt.

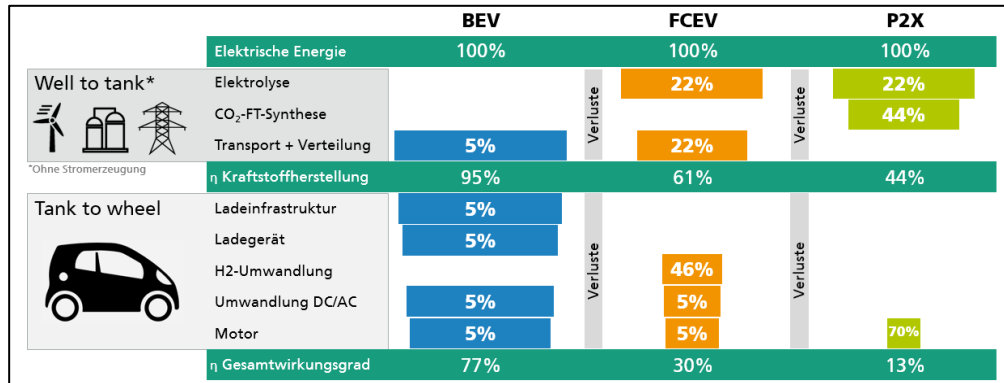


Abbildung 15 Vergleich der Gesamtwirkungsgrade von Elektrofahrzeugen (BEV), Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV) und Verbrennern mit synthetischen Kraftstoffen (P2X) einschließlich vorgelagerter Prozesse zur Energiebereitstellung. Die Energieverluste bei der Stromherstellung (hier nicht dargestellt) sind für alle Antriebsarten gleich und bei erneuerbaren Energien am geringsten.⁴⁸

Hier wird deutlich, dass der Gesamtwirkungsgrad für BEV mit Abstand am höchsten liegt, da hier der elektrische Strom direkt eingesetzt werden kann und verlustbehaftete Umwandlungs- und Verbrennungsprozesse entfallen. Umgekehrt bedeutet dies, dass für eine bestimmte zurückgelegte Strecke mit dem BEV deutlich weniger Energie benötigt wird als mit einem FCEV oder einem Verbrenner mit alternativ produziertem Kraftstoff. Gerade hinsichtlich der national begrenzten Kapazitäten für den Ausbau erneuerbarer Energiequellen stellt dies einen deutlichen Vorteil gegenüber den Alternativen dar. Im Vergleich zum Pkw liegen die Verluste der Verbrennungsmotoren bei schwereren Lkw mit unter 60% etwas geringer. Dennoch erscheint aus energetischer Sicht eine vollständige Umstellung der Fahrzeuge auf künstliche Kraftstoffe nur mit massiven Importen aus dem Ausland überhaupt realisierbar. In Abbildung 16 sind die theoretischen Strombedarfe für eine Vollumstellung auf P2X-Produkte für verschiedene Sektoren auf Basis der jeweiligen Energieverbräuche von 2016 dargestellt.⁴⁹ Allein eine vollständige Umstellung der Lkw-Flotte hätte den Strombedarf verdoppelt. Bei der noch jungen P2X-Technologie gibt es zwar noch deutliche Entwicklungspotenziale (vgl. Kapitel 4.2.2.1), ob sie einen wesentlichen Beitrag zur Energiewende leisten können ist unter Experten jedoch umstritten.⁵⁰

⁴⁸ Transport & Environment (2018)

⁴⁹ Ausfelder, F. et al. (2018)

⁵⁰ NPM (2020)

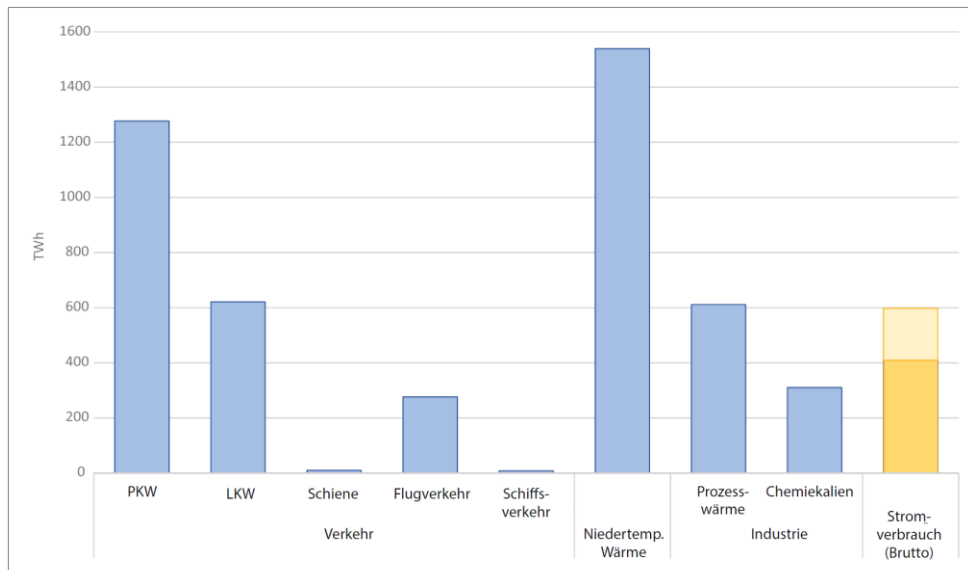


Abbildung 16 Hypothetischer Energiebedarf für die Produktion von P2X-Produkten bei einer vollständigen Deckung der Verbräuche von 2016. Die Abbildung dient dem Vergleich der Größenordnungen im Verhältnis zum tatsächlichen Gesamtstromverbrauch im selben Jahr (Anteil aus EE hell abgesetzt) und stellt keine Prognose dar.⁵¹

Eine Umstellung der Wirtschaftsverkehre auf BEV oder FCEV mit nationaler Stromproduktion erscheint hier realistischer. Für eine Komplettumstellung aller SZM in Deutschland, welche fast die Hälfte aller CO₂-Emissionen im Lkw-Bereich verursachen, werden für das Jahr 2030 ungefähr 36TWh bei BEV bzw. 70TWh für FCEV abgeschätzt (105TWh für P2X). Bezogen auf eine Nettostromerzeugung von 516TWh in Deutschland 2019 entspricht dies rund 7% bzw. 14%.⁵² Wird allerdings nur der Ökostromanteil der Erzeugung mit 237kWh betrachtet, liegen die Anteile mehr als doppelt so hoch. Für den Wasserstoff wird von der Bundesregierung deshalb zusätzlich eine Produktion im sonnenreicheren Südeuropa und Nordafrika favorisiert.⁵³

Neben der Energie- und Kraftstoffherzeugung spielt auch die Bereitstellung und Übertragung über Tankstellen, Stromnetze und Ladestationen eine wesentliche Rolle. Eine tiefgreifendere Betrachtung der technologischen Grundlagen für Ladestationen und bzgl. der Wasserstoff-Herstellung und Verteilung wird in den Kapiteln 3 und 4 vorgenommen.

Beim Betrieb einer Ladeinfrastruktur für BEV, insbesondere für den Schwerlastverkehr, können lokal sehr hohe elektrische Leistungen anfallen. Die Netzanbindung und übergeordneten Netze müssen auf diese Belastungen ausgelegt werden. Seitens der Versorgung von Pkw und LNFZ werden in den Mittelspannungsnetzen und höheren Spannungsebenen keine grundsätzlichen Leistungsengpässe erwartet, da diese Netze im Zuge der zunehmenden erneuerbaren Energiequellen sowieso ausgebaut werden. Auf der Mittelspannungsebene werden beispielsweise Schnellladeparks angebunden, mit Leistungen bis zu 350kW pro Station. Auch auf Seiten der Niederspannungsnetze (Ortsnetze) werden heute und in näherer Zukunft keine oder nur geringe Auswirkungen auf die Stabilität gesehen.⁵⁴ Anpassungsbedarfe im Einzelfall werden erst bei einem Anteil von 10-15%, in manchen Studien erst bei 20% BEV im Bestand erwartet. Über die Ortsnetze erfolgt beispielsweise die Nachladung der Fahrzeuge bei geringeren Ladeleistungen.

⁵¹ Ausfelder, F. et al. (2018)

⁵² Plötz, P. et al. (2018), Fraunhofer ISE (2020)

⁵³ DW (2020)

⁵⁴ BMU (o.J.)

Perspektivisch muss das Stromnetz, insbesondere das Verteilnetz, angepasst werden. Das Netz wird intelligenter werden, beispielsweise durch steuerbare Ortsnetztransformatoren. Diese Entwicklung findet aufgrund der Energiewende im Stromnetz, insbesondere der Integration fluktuierender Einspeisung von erneuerbaren Energien, ohnehin statt. Unterstützend werden gesteuertes Laden, der Einsatz von Batteriespeichern zur Netzstützung oder sogar die Rückspeisung von Energie aus den BEV bereits erprobt und umgesetzt.⁵⁵ Lokale Engpässe können dennoch auftreten, wenn viele Fahrzeuge gleichzeitig mit hoher Leistung laden. Ein Beispiel hierfür sind Autobahnraststätten oder auch Parkhäuser und Betriebshöfe (siehe Kapitel 6).

Die Anforderungen für einen elektrifizierten Güterverkehr bezüglich der Ladeinfrastruktur sind bisher nur wenig betrachtet worden. Insbesondere für schwere Lkw sind im Fernverkehr aufgrund der langen Laufzeiten, hohen Batteriekapazitäten und begrenzten Zeitfenstern für die Ladung jedoch hohe Ladeleistungen zu erwarten. Geht man zur Abschätzung der Größenordnungen von einem durchschnittlichen, täglichen Kraftstoffumsatz von 21.900l Diesel (217.000kWh) an einem Autohof aus, ergibt sich unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Wirkungsgrade von Verbrennern (~40%) und BEV (~80%) bei einer Vollumstellung auf Elektrofahrzeuge ein elektrischer Energiebedarf von rund 110.000kWh pro Tag. Zur Übertragung wäre hierfür eine Dauerleistung von über 4,5MW rund um die Uhr notwendig. Aufgrund von saisonalen Auslastungsunterschieden und täglichen Spitzenlastzeiten anstelle einer Gleichverteilung über alle Tages- und Jahreszeiten kann sich dieser Wert noch vervielfachen. Setzt man einen Faktor 5 an, kommt man auf 23MW Spitzenlast, wofür 66 Lkw-taugliche Ladestationen mit jeweils 350kW Leistung gleichzeitig eingesetzt werden müssten. In der Praxis wurden bisher rund 30.200 öffentliche oder teilöffentliche Ladepunkte >3,7kW angemeldet, wovon aber nur etwa 2.500 schnellladefähig sind (>44kW). Rund 720 davon wären mit jeweils mindestens 150kW grundsätzlich auch für schwerere Lkw geeignet, kommen aufgrund der Lage und Stellplatzbedingungen in der Regel hierfür aber dennoch nicht in Frage.⁵⁶



Abbildung 17 Schnellladestationen können heute schon Leistungen von über 300kW übertragen, sind hinsichtlich der Stellplätze in der Regel jedoch nur für Pkw ausgelegt.⁵⁷

Allein für SZMs im schweren Langstreckenverkehr wird in Szenarien für 5.000 BEV in 2025 bzw. 40.000 BEV in 2030 ein Bedarf von 75 bzw. 300 Hochleistungsschnellladestationen mit jeweils über 1MW Leistung prognostiziert.⁵⁸ Zusätzlich werden 6.000 bzw.

⁵⁵ Universität Stuttgart IAT (o.J.)

⁵⁶ Bundesnetzagentur (2020), Stand 9/2020

⁵⁷ Bildquelle: EnBW

⁵⁸ Plötz, P. et al. (2018), Kühnel, S. et al. (2018)

44.000 Nachladepunkte mit jeweils 150kW an Autobahnraststätten oder in Industriegebieten benötigt. Die zugehörige Kostenabschätzung liegt bei 0,5 bis 3,7 Mrd. Euro.

Auch bei Wasserstofftankstellen liegt der Fokus von Förderung und Aufbau bisher auf der Versorgung von Pkw. In Deutschland werden aktuell 87 H₂-Tankstellen betrieben, weitere 19 befinden sich in der Umsetzung.⁵⁹ Ein weiterer Ausbau auf bis zu 400 Tankstellen soll bedarfsgerecht erfolgen (siehe auch Kapitel 4.4.2). Im Rahmen der Nationalen Wasserstoffstrategie wird seitens der Bundesregierung zudem auch explizit die Förderung von Tankstellen für den schweren Straßengüterverkehr bis 2023 in Aussicht gestellt (siehe unten).⁶⁰ Analog zu den oben beschriebenen Szenarien für SZM wird in Szenarien mit FCEV ein Tankstellenbedarf von 45 für 2025 bzw. 364 für 2030 prognostiziert, mit einer Kostenerwartung von 0,3 bis 2,3 Mrd. Euro.⁶¹ Die Infrastrukturkosten für die Wasserstoffproduktion müssen jedoch zusätzlich berücksichtigt werden. Langfristig werden in Deutschland mindestens 2.000 Tankstellen benötigt, um eine flächendeckende und komfortable Wasserstoffversorgung mit ausreichend Redundanzen für alle Fahrzeuge sicherzustellen.⁶²

Oberleitungsfahrzeuge haben ein hohes Potenzial für die Minderung der Treibhausgasemissionen des schweren Straßengüterfernverkehrs, erfordern jedoch eine entsprechende Infrastruktur auf den Autobahnen und Bundesstraßen. Obige Szenarien für die SZM gehen bei Oberleitungsfahrzeugen von einem Infrastrukturbedarf von 500km für 2025 und 2.000km für 2030 aus, zu Kosten von 0,9 bzw. 5,1Mrd. Euro.⁶³ Für einen Ausbau von 90% des Autobahnkernnetzes mit rund 4.300km Länge werden andererseits rund 12 Mrd. Euro veranschlagt.⁶⁴ Bisher wurden jedoch nur wenige Kilometer mit Oberleitungen als Teststrecken ausgerüstet.

Für den Aufbau einer Lkw-tauglichen Lade- und Betankungsinfrastruktur für BEV, FCEV und O-EV wurde seitens des Verkehrsministeriums aktuell ein Gesamtkonzept vorgelegt.⁶⁵ Der Aufbau soll demzufolge ab Ende 2020 in zwei Phasen erfolgen (Abbildung 18): 1.) einer Skalierungsphase zur Entwicklung, Erprobung und Konsolidierung der Technologie und Nutzung sowie 2.) einer Roll-out Phase, in der eine passgenaue Infrastruktur in größerem Umfang aufgebaut werden soll. Pfadentscheidungen hinsichtlich der tatsächlich umzusetzenden Technologien und Bedarfe sollen dabei auf Basis der Erkenntnisse aus der Skalierungsphase getroffen werden. Bis 2023 stehen für den Infrastrukturausbau für Pkw und Lkw insgesamt 4,1 Mrd. € zur Verfügung.

⁵⁹ H2 (o.J.), Stand 11/2020

⁶⁰ Bund (2020)

⁶¹ Plötz, P. et al. (2018), Kühnel, S. et al. (2018)

⁶² Bünger et al. (2019)

⁶³ Plötz, P. et al. (2018), Kühnel, S. et al. (2018)

⁶⁴ Hacker, F. et al. (2020)

⁶⁵ BMVI (2020)

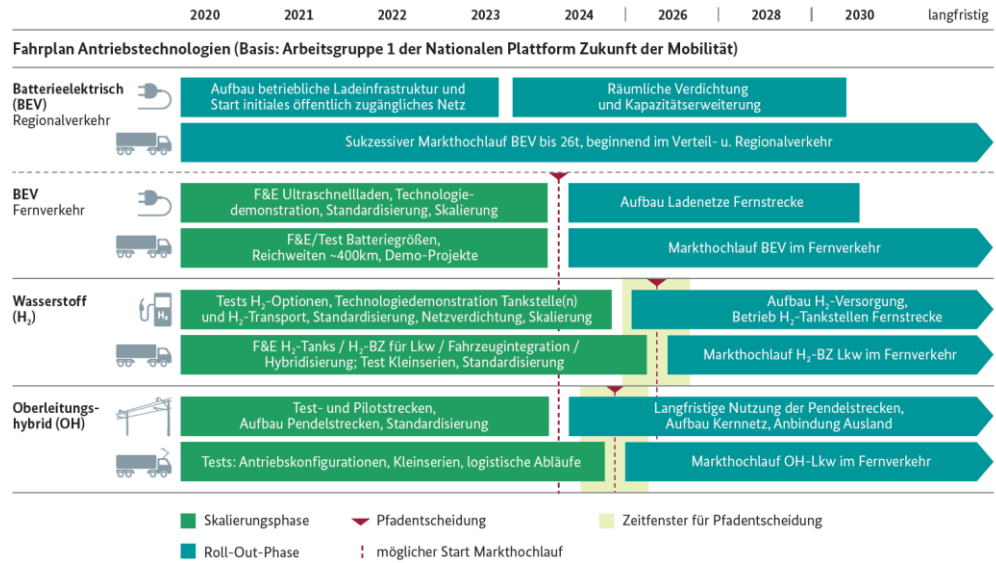


Abbildung 18 Fahrplan für den Ausbau einer Lade- und Betankungsinfrastruktur laut BMVI Gesamtkonzept.⁶⁶

Zusammenfassend kann man festhalten, dass hinsichtlich der Energieeffizienz und der begrenzten Kapazitäten an erneuerbaren Energiequellen rein elektrische Lkw (BEV, OEV) deutliche Vorteile gegenüber strombasierten alternativen Kraftstoffen, einschließlich Wasserstoff, haben und ohne Energieimporte auskommen können. Berücksichtigt man allerdings die hohen lokalen Leistungsanforderungen und die damit verbundenen Netzausbaubedarfe für die Ladung von schweren BEV könnten FCEV, insbesondere für Langstreckenfahrzeuge, dennoch die bessere Alternative darstellen. Oberleitungstechniken können für die Langstrecke ebenfalls eine gute Alternative sein, müssen jedoch durch eine Ladeinfrastruktur für Anwendungsfälle abseits der Autobahnen ergänzt werden. Außerdem erfordert es den Aufbau eines Grundnetzes mit verbindlichem Ausbauplan, um Planungssicherheit zu gewährleisten. Der bisherige Aufbau von Infrastruktur ist sowohl für FCEV als auch für BEV nicht auf schwerere Nutzfahrzeuge ausgelegt. Förderprogramme sollen diese Lücke mittelfristig schließen. Hierbei erfolgt auch die Förderung zunächst technologieoffen und zumindest in einer ersten Phase wird eine Infrastruktur für alle Antriebstechnologien geschaffen.

2.6 Zusammenfassende Einschätzung der Rahmenbedingungen

Regulatorisch besteht ein hoher Druck zur CO₂-Minimierung im Nutzfahrzeugbereich. Es gibt dabei keine Festlegung auf bestimmte Antriebstechnologien. Alternativ angetriebene Nutzfahrzeuge sind heute praktisch noch nicht im Bestand vorhanden und nur in Form von LNFZ im Markt. Schwerere Lkw sind für alle Antriebsformen grundsätzlich technologisch umsetzbar und könnten mittelfristig ebenfalls in den Markt kommen. Alternativ angetriebene Nutzfahrzeuge sind teurer in der Anschaffung können aber in den TCO mittelfristig konkurrenzfähig werden, bei LNFZ, je nach Anwendungsfall, bereits heute schon. FCEV liegen bei den schweren Nutzfahrzeugen, aufgrund der höheren Energiekosten, hinter den Alternativen. Kostenlücken gegenüber Verbrennern könnten jedoch bei allen Antriebsarten durch Fördermaßnahmen ausgeglichen werden. Der Infrastrukturausbau sowohl für Wasserstoff als auch für Ladestationen fokussiert sich bisher nahezu ausschließlich auf Pkw. Ein weiterer Ausbau ist notwendig und auch in Planung. Die Anforderungen für Lkw müssen hierbei stärker berücksichtigt werden, insbesondere

⁶⁶ BMVI (2020)

hinsichtlich des hohen Zeitdrucks zur Erreichung der Klimaziele. Entsprechende Förderprogramme laufen derzeit an. Bei den Infrastrukturkosten hat die Wasserstofftechnologie Vorteile. Technologisch könnte sie trotz der höheren Energiebedarfe ebenfalls vorne liegen, da für BEV, insbesondere für schwere Lkw, eine sehr hohe lokale Leistungsbereitstellung mit entsprechendem Netzausbau erforderlich ist. Strombasierte Kraftstoffe können aufgrund der hohen Energiebedarfe in größerem Umfang nur mit massiven Importen eine Rolle spielen. Die energieintensive Wasserstoffproduktion soll ebenfalls in südliche Länder ausgelagert werden. Welche alternativen Antriebe sich durchsetzen ist noch nicht absehbar. Es besteht das wirtschaftliche Risiko in die „falsche“ Technologie zu investieren, sowohl fahrzeug- als auch infrastrukturseitig. Durch die mittelfristige Förderung soll das Investitionsrisiko jedoch gemindert werden.

3 Ladeinfrastruktur: Technologie, Geschäfts- und Betreibermodelle

3.1 Technologien für das Laden von Elektrofahrzeugen

3.1.1 Steckerbasiertes, leitfähiges Laden als wichtigste Ladetechnologie

Grundsätzlich lässt sich die Energieversorgung von elektrischen Fahrzeugen leitfähig (kontaktgebunden) und induktiv (kontaktlos) realisieren. Beim leitfähigen Laden wird weiterhin zwischen steckerbasierten Lösungen und Anwendungen mit Stromabnehmer (Schleifkontakt) unterschieden. Sowohl das induktive Laden als auch das leitfähige Laden mittels Stromabnehmer sind insbesondere für spezielle Anwendungsfälle geeignet. So bieten induktive Ladestationen einen erheblichen Komfortgewinn in Privatgaragen, während bspw. Busse mit Pantographen oder deren Gegenstück (Ladeschienen) ausgestattet werden, um das Laden während einer kürzeren Standzeit im Betriebsablauf zu vereinfachen.⁶⁷ Beide Technologien zur Übertragung von Strom lassen sich prinzipiell auch bei fahrendem Fahrzeug nutzen. Dies wird teilweise auch erforscht bzw. erprobt, kann aus heutiger Sicht jedoch aufgrund verschiedenster Gründe (noch) als Nischenthema angesehen werden.⁶⁸

Die heute und voraussichtlich auch im Jahr 2030 am weitesten verbreitete Ladetechnologie ist das leitfähige Laden, welches weiterhin in Wechselstromladen (AC) und Gleichstromladen (DC) unterschieden wird. Während beim Wechselstromladen der Stromrichter (Gleichrichter) im Fahrzeug verbaut ist, das Fahrzeug also infrastrukturseitig mit Wechselstrom versorgt wird, ist der Gleichrichter beim Gleichstromladen in der Ladestation verbaut. Aus Platz- und Kostengründen sind in heutigen Pkw maximal Gleichrichter mit einer Leistung von 22kW verbaut, weshalb auch die meisten Ladesäulen für Pkw AC-seitig auf diese Ladeleistung beschränkt sind. Eine AC-Ladeleistung von 43kW ist jedoch möglich und vereinzelt auch an sogenannten »Triple-Chargern«⁶⁹ und bei manchen Lkw auch fahrzeugseitig anzutreffen.⁷⁰ Die aktuelle Normung erlaubt im Bereich des Gleichstromladens mit dem Combined Charging System (CCS) Ladeleistungen von bis zu 500kW. Für Lkw soll mittelfristig ein Standard mit mehr als 2MW Ladeleistung geschaffen werden.⁷¹ Heutige Pkw erzielen bereits DC-Ladeleistungen von bis zu 300kW. Dies wird i.d.R. mit sehr hohen Spannungen von bis zu 800V realisiert, wie etwa beim Porsche Taycan. Bei heutigen Lkw liegen die Ladeleistungen im Einzelfall sogar noch etwas höher.

⁶⁷ Seelinger et al. (2016)

⁶⁸ Bayern Innovativ (2019)

⁶⁹ ausgestattet mit drei Steckertypen: CCS, CHAdeMO und Typ 2

⁷⁰ Eforce (o.J.)

⁷¹ Electrive (2019c)

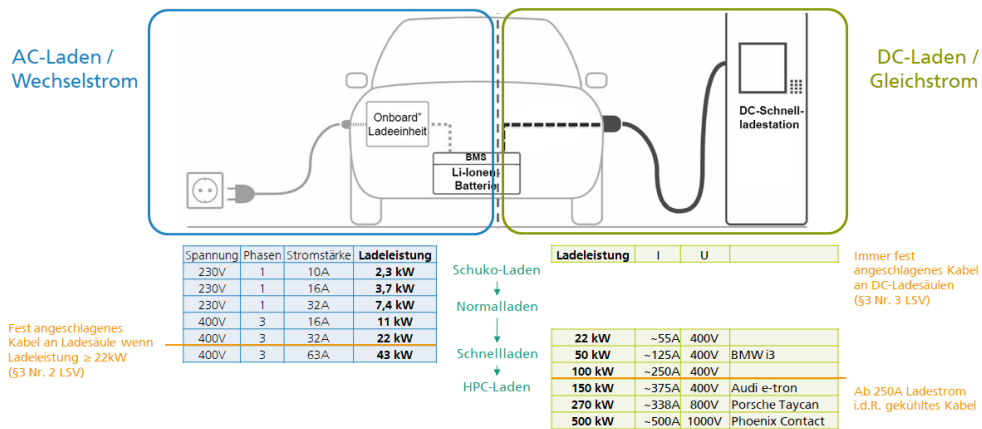


Abbildung 19 Wechselstrom- vs. Gleichstromladen

Der grundlegende Aufbau einer Ladestation sowie die technischen und gesetzlichen Mindestanforderungen sind in Abbildung 20 dargestellt.

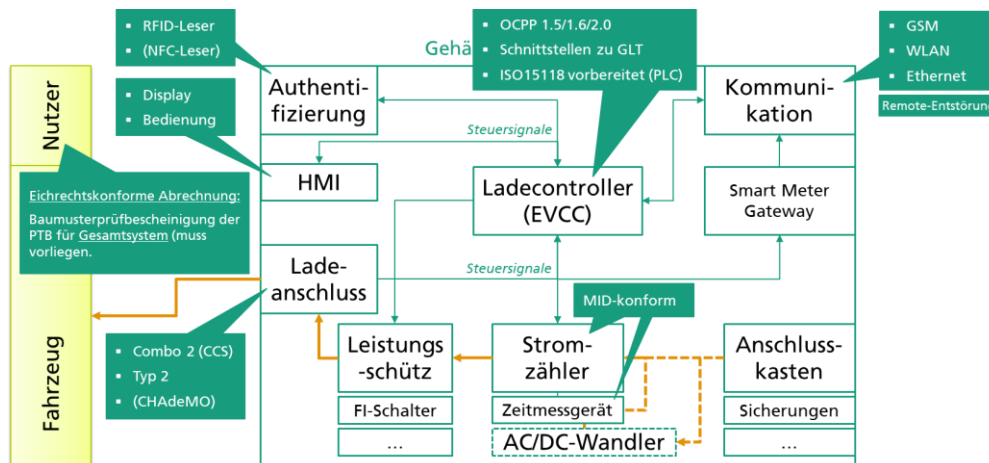


Abbildung 20 Grundlegender Aufbau von Ladestationen und technische Mindestanforderungen

3.1.2 Bedarfsgerechte Ausführungsvarianten von Ladeinfrastruktur

Um eine sichere Verbindung zwischen Fahrzeug und Ladestation herzustellen, werden Pantographen oder genormte Steckverbindungen eingesetzt. Mit der EU-Verordnung »Richtlinie 2014/94/EU des Europäischen Parlaments und des Rates über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe« wurde der Typ-2-Stecker als Standard für AC-Ladepunkte (IEC 62196-1) und das CCS-Stecksystem als Standard für DC-Ladepunkte (IEC 62196-3) festgelegt. Weitere genormte fahrzeugseitige Stecker, die noch vereinzelt im Markt zu finden sind, sind der Typ-1-Stecker (AC) sowie der Stecker gemäß des japanischen Standards CHAdeMO (DC). Für das Laden mit Stromabnehmern existiert mit »OppCharge« immerhin eine herstellerübergreifende Initiative zur Standardisierung des Ladens mit invertiertem Pantographen.

Die verschiedenen Ausführungsvarianten von Ladeinfrastruktur lassen sich grundsätzlich wie folgt gliedern.

- Alle Komponenten der Ladestation sind in einem Gehäuse untergebracht. Die Ladestation wird entweder an der Wand montiert (Wallbox) oder am Boden befestigt (Ladesäule). Wallboxen verfügen i.d.R. über maximal zwei Ladepunkte.

Traditionell handelte es sich dabei um AC-Anschlüsse, zunehmend gibt es aber auch DC-Wallboxen, um Fahrzeugen, die über keinen 22kW Bordlader für das AC-Laden verfügen, höhere Ladeleistungen zu ermöglichen. Ladesäulen verfügen über bis zu vier Ladepunkte, wobei auch eine Mischung von AC- und DC-Ladepunkten gängig ist (bspw. »Triple Charger«: CCS, CHAdeMO, Typ 2).

- Ein zentraler Schaltschrank bzw. eine zentrale Leistungseinheit enthält die Leistungselektronik, während die Nutzungsschnittstelle und der Ladeanschluss in einer separaten, vergleichsweise schlanken Bedieneinheit untergebracht sind. Im Bereich DC-Hochleistungsladen ist dies vor allem aus Platzgründen nötig, im Bereich AC-Laden, v.a. bei großen elektrifizierten Parkhäusern, sind Kosteneinsparungen der Haupttreiber.

Für Nutzfahrzeuge existieren speziell auf deren Bedürfnisse zugeschnittene Lösungen. Im Bereich des steckerbasierten Ladens sind hier Decken- und Wandabrollsysteme sowie flexible, schienengeführte Lösungen (wie man sie aus Fabrikhallen kennt) zu nennen. Weiterhin werden v.a. bei Bussen Ladestationen mit Stromabnehmer eingesetzt. Hierbei wird zwischen dem klassischen Pantograph-Ansatz (Anbringung des Stromabnehmers auf dem Fahrzeug) und dem Prinzip des umgekehrten Pantographen (Stromabnehmer ist an der Ladestation montiert und senkt sich von oben auf Fahrzeugdach herab) unterschieden. In einem Pilotprojekt in Polen werden mit dieser Technologien bereits Ladeleistungen von mehr als 500kW erzielt.⁷²



Abbildung 21 Spezielle Ladelösungen für Nutzfahrzeuge.⁷³



Abbildung 22 Pantograph (links) und Umgekehrter Pantograph (rechts).⁷⁴

⁷² Electrive (2019a)

⁷³ Bildquellen: Castellán AG, Wabtec Stemmann-Technik

⁷⁴ Bildquelle: ABB

3.1.3 Relevante Kommunikationsschnittstellen zwischen Fahrzeug, Ladestation und übergeordneten Instanzen

3.1.3.1 Kommunikation mehrerer Akteure und Rollen erfordert Standards

An einem (öffentlichen) Ladevorgang sind i.d.R. mehrere Akteure beteiligt. Insbesondere das Zusammenspiel von Ladestationsbetreiber (Charge Point Operator, kurz: CPO) und E-Mobility Service Provider (kurz: EMSP) sind von großer Bedeutung (siehe auch Kapitel 3.2.1). Daher sind alle wesentlichen an einem Ladevorgang beteiligten Komponenten und Akteure bzw. Rollen über eindeutige Kennungen identifizierbar:

Table 1 Identifikation der Beteiligten bei der Ladung

Rolle/Komponente	Kennung (ID)
Fahrzeugnutzer-/betreiber	EMA-ID (E-Mobility Account ID)
E-Mobility Service Provider	Provider ID
Charge Point Operator	EVSE Operator ID (Electric Vehicle Supply Equipment Operator ID)
Ladestation	EVSE-ID (Electric Vehicle Supply Equipment ID)

Damit das Zusammenwirken dieses Systems funktioniert, werden standardisierte Kommunikationsprotokolle genutzt.

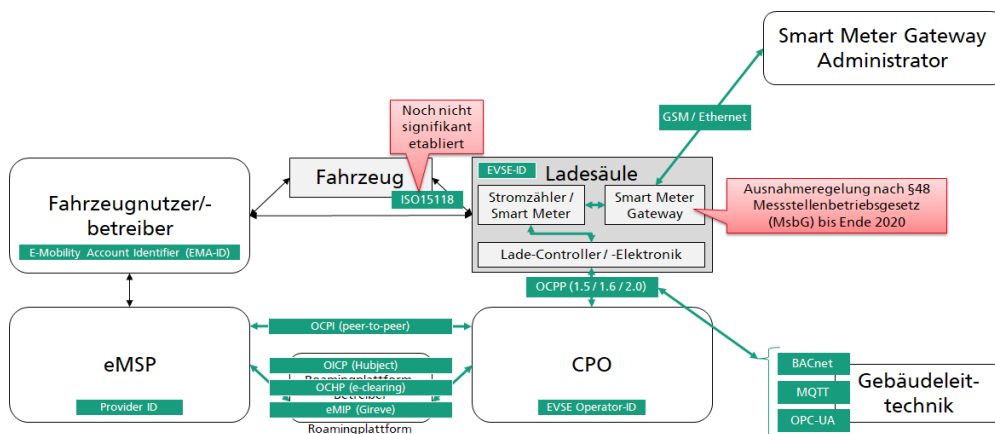


Abbildung 23 Wichtige Kennungen und Kommunikationsprotokolle der Elektromobilität

3.1.3.2 Das Open Charge Point Protocol (OCPP)

Das wichtigste Kommunikationsprotokoll für das Laden von Elektrofahrzeugen ist das Open Charge Point Protocol (OCPP). Dies ist ein offener und damit besonders leicht zugänglicher, weiterentwickelbarer und einsetzbarer Standard, der die Kommunikation zwischen Elektrofahrzeugen und Ladestationen bzw. zu einem zentralen System ermöglicht. Durch die Nutzung des Simple Object Access Protocols (SOAP) wird eine schnelle Implementierung von OCPP möglich. SOAP ist ein Framework, das es ermöglicht, Nachrichten über das Internet zu versenden. Dazu wird der XML-Standard genutzt, wobei die Nachrichten in lesbarem Text gesendet werden. Derzeit sind drei OCPP-Versionen verfügbar: OCPP 1.5, 1.6 und 2.0.1, wobei diese jeweils aufeinander aufbauen. OCPP 1.5 beschreibt 25 Operationen, wobei 10 von der Ladestation und 15 vom zentralen System initiiert werden. Von der Ladestation gehen dabei Aktionen wie die Authentifizierung, Datentransfer sowie Start und Stopp einer Transaktion aus. Vom zentralen System gehen unter anderem Reservierungen, Firmware-Updates, Resets und ebenfalls Datentransfers aus. OCPP 1.6 unterstützt zudem intelligentes Laden mit Lastenverteilung und Nutzung von Ladeprofilen. OCPP 2.0.1 ist die neueste OCPP-Version und wurde bereits von mehr als 165 Nutzern in 34 Ländern implementiert. Die erweiterten Funktionalitäten umfassen das Setzen und Abrufen von Konfigurationen, sowie das Monitoring von Ladestationen.

Zudem wurde die Handhabung von Transaktionen verbessert und zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen implementiert. Weiterhin wurden Funktionen für intelligente Ladesysteme und »Plug & Charge« ergänzt.⁷⁵

3.1.3.3 Roaming-Protokolle

Roaming-Protokolle werden zur Verbindung eines CPO-Backends und eines EMSP-Backends benötigt. Dies ist vereinfacht gesagt immer dann nötig, wenn die Rolle des CPO und die Rolle des EMSP nicht von ein und demselben Akteur eingenommen wird (vgl. Kapitel 3.2.1). Die drei relativ verbreiteten Roaming-Protokolle OICP, OCHP und eMIP wurden alle speziell für eine bestimmte Roaming-Plattform entwickelt und von deren Betreibern spezifiziert: e-clearing.net (OCHP), Gireve (eMIP) und Hsubject (OICP). Es handelt sich dennoch bei allen drei Protokollen um offene Standards, OCHP und OICP sind sogar als Open Source nutzbar. Das Open Charge Point Interface OCPI hingegen ist ein Protokoll, das unabhängig von einer Roaming-Plattform und vornehmlich für das Peer-2-Peer-Roaming entwickelt wurde. Dabei unterstützt es neben bilateralen P2P-Verbindungen auch die Kommunikation mit Roaming-Plattformen.⁷⁶

3.1.3.4 ISO15118 / Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladesäule

2013 wurde mit der Festlegung des Typ 2-Standards in den EU-Mitgliedstaaten in der IEC 62196 auch ein hardwareseitiger Standard für konduktive, bidirektionale Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladestation geschaffen. Der Kommunikationsstandard als solcher wurde in der IEC 61851 definiert, wobei sich die Kommunikation des Typ-2-Standards jedoch lediglich auf Statusmeldungen über Änderungen eines Widerstands beläuft. Für konduktive DC-Ladesysteme wurde ebenfalls in der IEC 61851 ein Standard geschaffen, wobei die digitale Kommunikation zwischen DC-Ladestation und Elektrofahrzeug in IEC 61851-24 geregelt ist. Die Kommunikation beläuft sich in diesem Fall auf einen Parametertausch zwischen Ladestation und Fahrzeug, um Kompatibilität zu gewährleisten und anschließender Steuerung der Ladeleistung durch das Batteriemanagementsystem des Fahrzeugs, nach Anforderung durch die Ladestation. Da für weitere Funktionalitäten ein IP-basiertes Protokoll nötig ist, wurde mit der ISO 15118 »Road Vehicles – Vehicle to grid communication interface« ein internationaler Standard geschaffen, der die Schnittstelle für High-Level-Communication für das Laden von Elektrofahrzeugen definiert. Dabei werden durch die ISO 15118 kontaktlose, »Plug & Charge«-Technologien, sowie bidirektionales Laden und ein Lademanagement ermöglicht. Obwohl der ISO 15118 Standard bereits seit 2014 vorliegt, wurde er nur in geringem Maß implementiert. Durch die Überarbeitung der Norm von 2019 soll eine Umsetzung im Massenmarkt erreicht werden.

3.1.3.5 Schnittstellen zur Anbindung an übergeordnete Instanzen

Gebäudeleittechnik (GLT) bezeichnet Softwarelösungen zur Überwachung und Steuerung verschiedener Komponenten der technischen Gebäudeausrüstung, wie bspw. Stromverbraucher und -erzeuger. (Bidirektionale) Ladestationen können beide diese Funktionen erfüllen und sollten sich dementsprechend in die GLT einbinden lassen. Hierfür werden die üblichen Kommunikationsprotokolle der GLT wie bspw. BACnet, KNX, Modbus, Lon oder OPC genutzt.

Über die Grenzen des eigenen Gebäudes bzw. Betriebsgeländes hinaus, gibt es im Zuge der Digitalisierung der Energiewende die Bestrebungen, Ladestationen über spezielle Kommunikationsmodule auch »von außen« steuerbar zu machen. Dadurch lassen sich Vorteile wie eine Erhöhung der Netzstabilität oder eine zuverlässige, transparente Ener-

⁷⁵ Open Charge Alliance (o.J.), Open Charge Alliance (o.J. a), Open Charge Alliance (o.J. b)

⁷⁶ EVRoaming Foundation (o.J.)

gemessung auf den Use Case des Ladens von Elektrofahrzeugen übertragen. Daher müssen Ladestationen ab 01.01.2021 mit einem Smart-Meter-Gateway ausgestattet werden, um eine sichere Kommunikation herzustellen, damit bspw. die Laststeuerung durch einen Netzbetreiber erfolgen kann.

3.1.4 Lastmanagement als zunehmend wichtiges Zusatzfeature

Generell ist in Deutschland beim Aufbau von Ladestationen ein Gleichzeitigkeitsfaktor von 1 anzunehmen, d. h. die Anschlussleistung muss immer auf 100% der Nennleistung der gesamten Ladeinfrastruktur ausgelegt werden. Somit steigen die Kosten für den Netzanschluss einer Ladestation bzw. eines Ladeparks proportional mit der Anschlussleistung. Bei Vorhandensein eines Lastmanagements kann der Gleichzeitigkeitsfaktor jedoch reduziert werden, sodass die Netzanschlussleistung kleiner ausfallen kann als die maximale Gesamtleistung aller angeschlossenen Ladestationen. Lastmanagement lässt sich prinzipiell über drei Ansätze realisieren: Ladeverschiebung, Ladeunterbrechung und Laderegulierung. Bei der Ladeverschiebung bzw. Ladeunterbrechung wird binär geschaltet, und der Ladevorgang entweder auf einen späteren Zeitpunkt verschoben oder unterbrochen und dann fortgeführt. Die Laderegulierung funktioniert nicht binär, sondern kontinuierlich, d.h. die Ladeleistung wird im Zeitverlauf immer dynamisch der jeweils zu Verfügung stehenden Anschlussleistung angepasst.

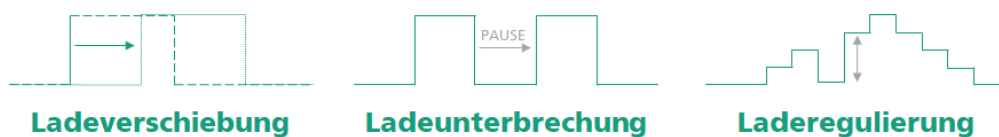


Abbildung 24 Mögliche Ansätze für das Lastmanagement

Um Lastmanagement betreiben zu können, wird ein Lastmanagement-Controller benötigt, der Steuersignale empfängt und diese an den Ladecontroller weiterleitet, um die Ladevorgänge entsprechend zu modifizieren. Abhängig davon, wie die Inputparameter für das Lastmanagement definiert werden (statisch, dynamisch, prognosebasiert), lassen sich drei Betriebsstrategien unterscheiden. Im ersten Fall liegen feste Leistungsvorgaben für alle Ladestationen vor und es werden ggf. zugewiesene Rollen der Nutzenden berücksichtigt. So können bspw. Fahrzeuge von als VIP klassifizierten Nutzenden priorisiert und in der Ladereihenfolge/leistung bessergestellt werden. Im Fall des dynamischen Lastmanagements wird ebenfalls nach festen Leistungsvorgaben sowie unter Berücksichtigung zugewiesener Rollen gesteuert. Hinzu kommt hier jedoch der Aspekt der Echtzeitlast eines ausgewählten weiteren Verbrauchers (bspw. Gebäudelast), welche ebenfalls auf die Steuerung Einfluss nimmt. Noch einen Schritt weiter geht das prognosebasierte Lastmanagement: Neben Leistungsvorgaben und Echtzeit-Lasten gehen hier auch individuelle Vorgaben durch die Nutzenden (bspw. geplante Abfahrtsuhrzeit) oder Wettervorhersagen (für die Prognose des eigenerzeugten PV-Stroms) in die Regelung mit ein. Für diese Lösung ist i.d.R. ein internetfähiger Lastmanagement-Controller bzw. eine cloud-basierte Lastmanagement-Software nötig.

3.2 Geschäfts- und Betreibermodelle

3.2.1 Rollen am Ladestandort bzw. im Markt Elektromobilität

Um das komplexe Ökosystem »Laden von Elektrofahrzeugen« und das Zusammenwirken der daran beteiligten Akteure besser zu verstehen, ist ein Rollenmodell hilfreich. Dabei ist wichtig zu verstehen, dass jeder Akteur mehrere Rollen einnehmen kann, bei jedem Ladevorgang jede Rolle aber nur von einem Akteur ausgefüllt wird. Zumindest die grundlegende Unterscheidung zwischen den Rollen »Ladestationsbetreiber« (CPO: Charge

Point Operator) und »Elektromobilitätsanbieter« (EMSP: E-Mobility Service Provider, tlw. auch nur EMP oder MSP) hat sich dabei auch in der Branche etabliert. Alle für ein funktionierendes Betreibermodell notwendigen Rollen sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 2 Beschreibung der Rollen im Markt Elektromobilität

Rolle	Definition/Funktion
CPO-Rollen: Charge Point Operator (Ladestationsbetreiber)	
Front-End CPO	Kümmert sich um Planung, Installation und (elektrotechnische) Wartung der Ladeinfrastruktur sowie um die Entstörung vor Ort (Third Level Support) im Fehlerfall; hat i.d.R. wenig Sichtbarkeit ggü. dem Endkunden.
Back-End CPO	Betreibt ein zentrales oder cloudbasiertes Software-System, das der Verwaltung von Ladestationen (inkl. Lastmanagement) und der Kommunikation mit dem EMSP Back-End dient; ist für eichrechtskonforme Datenerfassung, -speicherung und -weitergabe zuständig; verwaltet Liste aller autorisierten Nutzer-IDs (»white list«); kümmert sich um IT-seitige Entstörung im Fehlerfall (bspw. durch ferngesteuerten Neustart der Ladeinfrastruktur); hat i.d.R. wenig Sichtbarkeit ggü. dem Endkunden.
EMSP-Rollen: E-Mobility Service Provider	
Front-End EMSP	Stellt die Schnittstelle zum Endkunden dar, legt B2C-Preise fest und ist in der Regel Vertrags- und Abrechnungspartner des Endkunden; hat Sichtbarkeit ggü. dem Endkunden.
Back-End EMSP	Betreibt ein zentrales oder cloudbasiertes Software-System, das der Verwaltung von Kundenstammdaten und der Kommunikation mit dem CPO Back-End dient; bietet Software- bzw. Hardware-Lösungen (bspw. Apps bzw. RFID-Karten) zum Freischalten und Bezahlen von Ladevorgängen, häufig auch als »White Label«-Angebote; ist für eichrechtskonforme Datenweitergabe zuständig; stellt Überprüfungsmöglichkeit für eichrechtskonforme Abrechnung bereit; hat i.d.R. wenig Sichtbarkeit ggü. dem Endkunden.
Weitere Rollen	
OEM	Bezieht sich i.d.R. auf den Hersteller (Original Equipment Manufacturer) des Fahrzeugs, kann aber auch den Hersteller der Ladesäule meinen.
Endkunde	Kunden eines Betriebs, Mitarbeitende, die ihr Privatfahrzeug am Arbeitsplatz laden oder Privatleute, die ihr Privatfahrzeug an öffentlicher Ladeinfrastruktur kostenpflichtig oder kostenfrei laden.
Standortpartner	Stellt das Grundstück für den Aufbau von Ladeinfrastruktur bereit; bietet ggf. weitere Dienstleistungen/Produkte am Standort an (Cross Selling); meist Mitspracherecht bei Geschäftsmodell und B2B-Preisen des Investors; hat Sichtbarkeit ggü. dem Endkunden.
Investor	Finanziert Aufbau und Betrieb von Ladeinfrastruktur; legt (u.U. in Abstimmung mit dem Standortpartner) das Geschäftsmodell und die B2B-Preise (»CPO-Preise«) fest; hat meist Sichtbarkeit ggü. dem Endkunden, dies ist aber nicht zwingend.
Verteilnetzbetreiber	Betreibt regionale Verteilnetze (hauptsächlich Nieder- und Mittelspannung), so dass private und gewerbliche Endkunden mit Strom versorgt werden können; stellt den Netzanschluss am Grundstück des Standortpartners her.
Energieversorger	Produziert und/oder kauft Strom ein und verkauft diesen an private und gewerbliche Endkunden, bspw. den Standortpartner und/oder den Investor.
Roamingplattform-Betreiber	Betreibt ein zentrales oder cloudbasiertes Software-System, das der Bündelung von Kommunikation zwischen einer Vielzahl von EMSP Back Ends auf der einen und einer Vielzahl von CPO Back-Ends auf der anderen Seite dient; teilweise auch weitergehende Bündelungsfunktion, bspw. für die kaufmännischen Vereinbarungen (B2B-Preise) zwischen EMSP und CPO.

Die IT-lastigen Rollen des CPO- und EMSP-Backends werden häufig in Kombination als Software-as-a-Service-Lösungen von spezialisierten Firmen angeboten. Es wird im Nachfolgenden davon ausgegangen, dass diese Rollen niemals von einem Akteur des Logistikmarkts, sondern von einem spezialisierten Anbieter der Elektromobilität eingenommen wird.

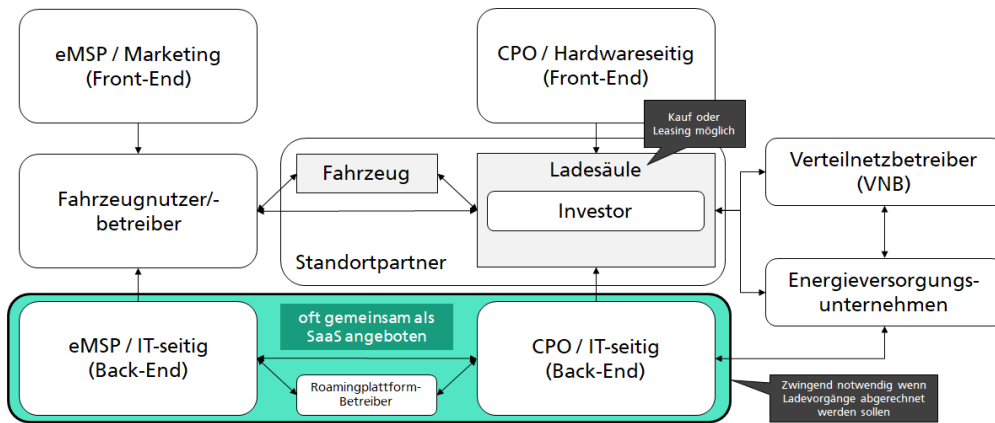


Abbildung 25 Das Rollenmodell der Elektromobilität

3.2.2 Denkbare Betreibermodelle für das Laden von Logistik-Flotten

Welche Betreibermodelle sich für unterschiedliche Einsatzszenarien eignen, hängt einerseits vom anvisierten Ladestandort und andererseits von der Akteurskonstellation ab. Als Standort kommt entweder der Betriebshof, das Zuhause eines Mitarbeitenden (der das Fahrzeug mit nach Hause nimmt) oder öffentliche bzw. halb-öffentliche Flächen in Frage. Zudem muss unterschieden werden, ob der Fahrzeugbetreiber auch Betriebshofbetreiber ist, oder nicht.

3.2.2.1 Szenario 1: Öffentliches Laden

Wenn das Fahrzeug nicht am Betriebshof und nicht Zuhause bei einem Mitarbeitenden geladen werden kann, oder wenn das Fahrzeug unterwegs zwischengeladen werden muss, kommt nur das Laden des Fahrzeugs an öffentlicher Ladeinfrastruktur in Frage. Der Betriebshofbetreiber spielt in diesem Szenario für das Betreibermodell keine Rolle. Vergleichbar zur Nutzung von Tankstellen für fossile Kraftstoffe, ist der Fahrzeugbetreiber Kunde eines nicht näher definierten Dritten bzw. indirekt Kunden von mehreren Dritten, die gemeinsam die Dienstleistung »Laden« erbringen. Dies schließt nicht aus, dass ein Rahmenvertrag mit einem spezifischen e-Mobility Service Provider (ähnlich den heute verbreiteten Tankkarten) besteht. Alle denkbaren Konstellationen werden hier als Betreibermodell (1) zusammengefasst, da sich für den Fahrzeugbetreiber nur wenig ändert.

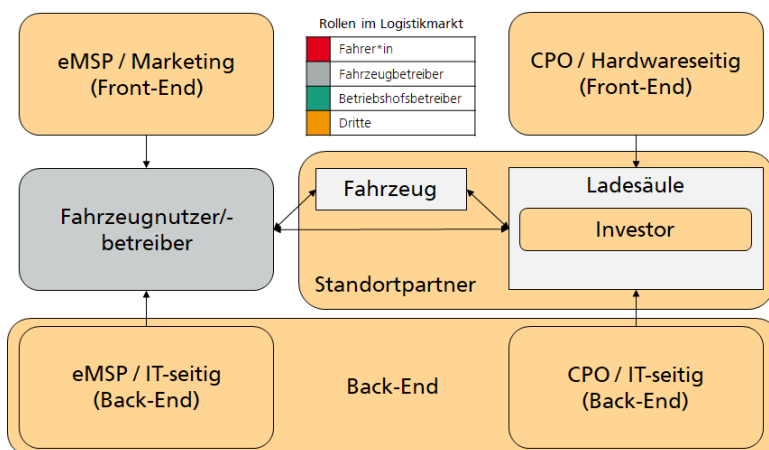


Abbildung 26 Öffentliches Laden und das dazugehörige Betreibermodell

3.2.2.2 Szenario 2: Laden am Betriebshof

Die wohl komfortabelste Möglichkeit des Ladens beispielsweise von Logistikflotten stellt das Laden am Betriebshof über Nacht dar. Hierbei könnten moderate Ladeleistungen von bis zu 22 kW (AC) bereits ausreichend sein (vgl. Kapitel 6.6). Denkbar ist jedoch auch, dass Fahrzeuge während eines vergleichsweise kurzen Aufenthalts am Betriebshof (bspw. während der Be-/Entladung) eine DC-Schnellladestation nutzen. Für Fahrzeuge, die über Nacht am Betriebshof stehen, ist der Fahrzeugbetreiber i.d.R. auch der Betriebshofbetreiber. Bei Fahrzeugen, die erst zu Betriebsbeginn an den Betriebshof kommen, ist dies jedoch nicht zwingend gegeben – daher findet in diesem Fall u.U. ein Verkauf von Ladestrom statt, unabhängig davon ob die Ladestation am Betriebshof von Dritten oder dem Betriebshofbetreiber selbst betrieben und/oder finanziert wird. Generell sind in diesem Szenario die folgenden Betreibermodelle denkbar:

- (2a): Der Betriebshofbetreiber finanziert Aufbau und Betrieb der Ladeinfrastruktur, vergibt aber sowohl CPO-Front-End und CPO-Back-End an Dritte (Betriebshofbetreiber \neq Fahrzeugbetreiber).
- (2b): Wie 2a, der Betriebshofbetreiber kümmert sich jedoch (teilweise) auch um das CPO-Front-End, also wahlweise um Planung, Aufbau und/oder Wartung (Betriebshofbetreiber \neq Fahrzeugbetreiber).
- (2c): Der Betriebshofbetreiber ist nur Standortpartner für einen Dritten, der die Ladeinfrastruktur finanziert und betreibt. Der Investor wiederum verdient sein Geld durch den Verkauf von Ladestrom an die Fahrzeugbetreiber.
- (2d): Wenn kein Ladestrom verkauft bzw. abgerechnet wird (bspw. wenn Fahrzeugbetreiber gleich Betriebshofbetreiber), ist auch eine eigenständige Finanzierung bzw. ein eigenständiger Betrieb von Ladeinfrastruktur ohne Beteiligung Dritter möglich.

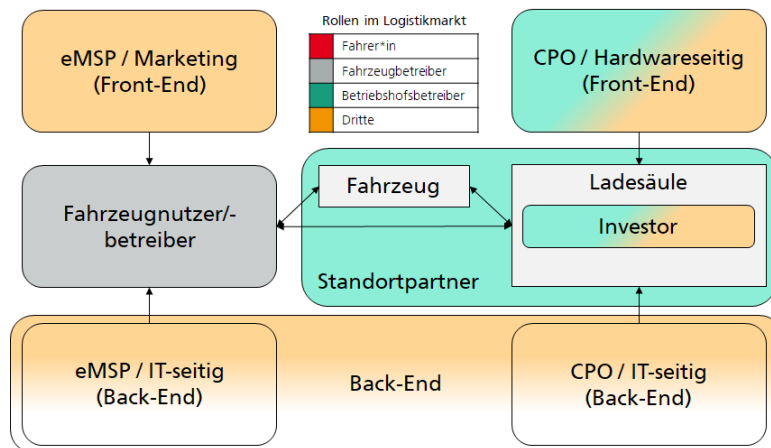


Abbildung 27 Laden am Betriebshof und die dazugehörigen Betreibermodelle

3.2.2.3 Szenario 3: Laden am Zuhause des Mitarbeitenden

Fahrzeuge, die vom Mitarbeitenden (= Fahrzeugnutzer) nach Betriebsschluss mit nach Hause genommen werden, können (i.d.R. über Nacht) auch dort geladen werden. Meist wird in diesen Fällen die Ladeinfrastruktur vom Fahrzeugbetreiber (leihweise) gestellt. Hierfür ist es wohl am naheliegendsten, dass diese von einem vom Fahrzeugbetreiber oder vom Betriebshofbetreiber beauftragten, spezialisierten Dritten installiert und gewartet wird (CPO Front-End). Auch dieses Betreibermodell ließe sich, zumindest nach aktuellem Stand, wohl ebenfalls ohne Back-End realisieren, je nachdem ob der Ladestrom pauschal (3a) oder kWh-genau abgerechnet werden soll. In letzterem Fall kommt es weiterhin darauf an, ob die vom Fahrzeug- bzw. Betriebshofbetreiber gestellte Ladeinfrastruktur nur von einem (3b) oder von mehreren Fahrzeugen (3c) genutzt wird.

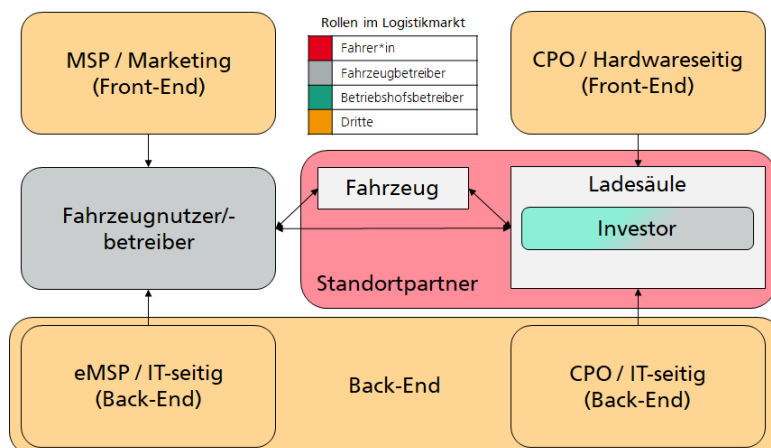


Abbildung 28 Laden am Zuhause des Mitarbeitenden und die dazugehörigen Betreibermodelle

3.2.3 Voraussetzungen für den Verkauf von Ladestrom

Soll Ladestrom verkauft werden, müssen einige Vorgaben eingehalten werden. Zum einen muss die Messung des verkauften Stroms eichrechtskonform erfolgen und die Preisgestaltung der Preisangabenverordnung gerecht werden. Des Weiteren muss eine Zuordnung zwischen EMA-ID (vgl. Tabelle 1) und Nutzer möglich sein. Beim Laden von betrieblichen Fahrzeugen am Zuhause des Mitarbeitenden muss zudem der geldwerte Vorteil berücksichtigt werden.

Tabelle 3 Zu berücksichtigende Vorgaben für die verschiedenen Betreibermodelle

Szenario	1	2a	2b	2c	2d	3a	3b	3c
Eichrecht	x	x	x	x				x
PAngV	x	x	x	x				
Zuordnung LV	x	x	x	x			x	x
Geldwerter Vorteil						x	x	x

3.2.3.1 Eichrecht

Das Eichrecht stellt zwei wesentliche Anforderungen an die kostenpflichtige Abrechnung von Ladevorgängen:⁷⁷

- 1.) Der Endverbraucher muss »vor und nach dem Ende des Ladevorgangs den effektiven, nachweislichen unverfälschten Messwert der Transaktion« einsehen können. Dementsprechend muss eine eichrechtskonforme Messwerterfassung und -anzeige gewährleistet sein (geeichter Stromzähler bzw. Zeitmessung).
- 2.) Eine »mutwillige (vorsätzliche) oder auch irrtümliche Veränderung der Daten« muss ausgeschlossen sein. Dementsprechend müssen eine veränderungssichere Übertragung und Speicherung der Messwerte gewährleistet sein. Hardwareseitig sind daher geeichte, MID-konforme Strom- und Zeitmessungen, sowie eine Zertifizierung des Gesamtsystems bestehend aus Ladesäule, Back-End und Transparenz-Software nötig.

⁷⁷ MessEG (2013), Electrive (2019b)

3.2.3.2 Preisangabenverordnung (PAngV)

Die Preisangabenverordnung schreibt vor, wie die Tarifierung gestaltet sein darf.⁷⁸ Die primäre Abrechnungseinheit für den Verkauf von Ladestrom muss die Energiemenge (kWh) sein. Eine Art »Premium-Parken«, bei dem das Laden des Fahrzeugs durch eine erhöhte Parkgebühr bezahlt wird, ist gemäß der Preisangabenverordnung nicht erlaubt, denn die Ladezeit ist energiewirtschafts- und wettbewerbsrechtlich keine energierelevante Messgröße. Auch eine sogenannte »Session Fee« (€ pro Ladevorgang) ist bezogen auf die Energielieferung weder klar [noch] eindeutig und daher nicht erlaubt. Flatrate-Preismodelle sind erlaubt, wenn die Flatrate mindestens für einen Monat kalkuliert bzw. vereinbart wird. Mehrstufige Tarife sind ebenfalls erlaubt, also: € pro kWh + € pro Zeit (»Besetzthalten der Ladesäule«) oder € pro kWh + € pro Ladevorgang (»Startgebühr«).

3.2.3.3 Zuordnung zwischen Ladevorgang und Nutzer-ID

Jeder Ladevorgang erzeugt einen CDR (Charging Detail Record) – dieser enthält Informationen zur geladenen Energiemenge, der Dauer des Ladevorgangs und der EMA-ID (es sei denn, der Ladevorgang wurde ohne Authentifizierung gestartet). Die EMA-ID wird vom e-Mobility Service Provider (eMSP) vergeben und einer RFID-Karte und/oder einem Kundenkonto (Smartphone-App) zugeordnet, welche sich dann wiederum einem Fahrzeugnutzer bzw. -betreiber zuordnen lassen. Die Anbindung der Ladestation an ein Backend ist hierfür zwingende Voraussetzung.

3.2.4 Geldwerter Vorteil

Das Laden eines Dienstfahrzeugs an öffentlichen Ladestationen ist im Normalfall in Form einer Ladekarte bereits im Fahrzeugangebot inbegriffen. Entsprechend wird diese mit dem Dienstwagen versteuert und muss nicht zusätzlich als geldwerter Vorteil versteuert werden. Die Kosten für vom Mitarbeitenden persönlich bezahlte Ladevorgänge können als steuerfreier Auslagenersatz vom Arbeitgeber erstattet werden. Sollten die Kosten nicht vom Arbeitgeber erstattet werden, mindern sie den geldwerten Vorteil der Dienstwagenstellung. Wird ein Dienstfahrzeug Zuhause geladen gilt ebenfalls: Werden die Kosten nicht vom Arbeitgeber erstattet, mindern sie den geldwerten Vorteil der Dienstwagenstellung. Werden die Kosten erstattet, handelt es sich um steuerfreien Auslagenersatz. Dafür ist eine Zuordenbarkeit der Kosten zu einem Fahrzeug jedoch Voraussetzung. Wird eine Ladestation durch nur ein Dienstfahrzeug genutzt (Betreibermodell 3b), ist ein MID-konformer Stromzähler ausreichend, bei der Nutzung durch mehrere Fahrzeuge ist ein eichrechtskonformer Gesamtprozess nötig (Betreibermodell 3c). Zur Vereinfachung können bei Elektro-Pkw jedoch auch monatliche Pauschalen genutzt werden (Betreibermodell 3a):

Tabelle 4 Pauschalen für Auslagenersatz beim Laden von Dienstfahrzeugen am Zuhause des MA

Monatliche Pauschale	Wenn beim AG eine Lademöglichkeit besteht	Wenn beim AG keine Lademöglichkeit besteht
Elektrofahrzeug	20 €	50 €
Hybridfahrzeug	10 €	25 €

Selbst wenn es sich beim Fahrzeug des Mitarbeitenden nicht um ein Dienstfahrzeug handelt, das auch für private Fahrten zu Verfügung steht, so ist zumindest der »Weg zur ersten Arbeitsstätte« als geldwerter Vorteil zu versteuern.

⁷⁸ BMWi (2018)

4 Wasserstoff: Technologien und Bedarf

4.1 Wasserstoff-Nutzfahrzeuge: Fahrzeugtechnik

Brennstoffzellenfahrzeuge beziehen ihre Energie über einen Wasserstoff-Druckspeicher im Fahrzeug. Aus dem Wasserstoff wird über eine Brennstoffzelle elektrische Energie erzeugt und für einen elektrischen Antrieb genutzt.

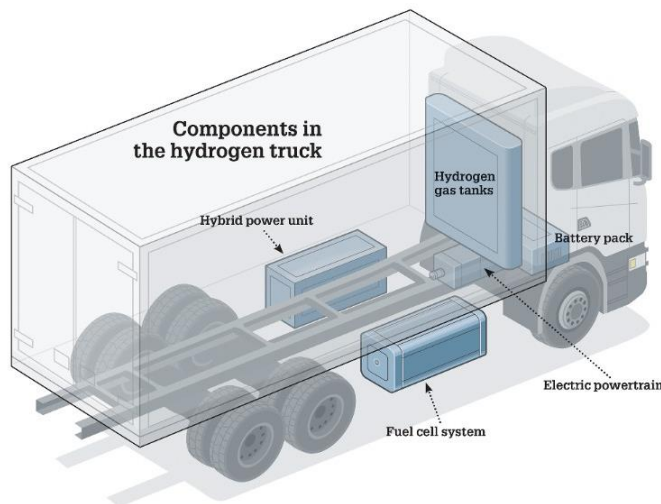


Abbildung 29 Schematische Darstellung eines Brennstoffzellen-Lkw mit Wasserstoff-Tank, Brennstoffzelle und Batterie.⁷⁹

Während im Pkw-Bereich und auch bei Bussen bereits Fahrzeuge in Serie angeboten werden, gibt es für Lkw bisher noch keine marktreifen Anwendungen. Diese sollen in den nächsten Jahren folgen (siehe Kapitel 2.3).

Die besondere Herausforderung, insbesondere für schwere Lkw und Sattelschlepper, ist der hohe elektrische Leistungsbedarf von mehreren hundert Kilowatt. Dieser ist vor allem an Steigungen erforderlich und resultiert nicht zuletzt aus dem hohen Fahrzeuggewicht. Als mögliche Konfiguration bietet sich eine Hybridlösung an, bei der die Grundlast (gleichmäßiges Fahren in der Ebene) direkt aus der Brennstoffzelle bereitgestellt wird und zum Anfahren und an Steigungen eine zusätzliche Traktionsbatterie höhere Leistungen temporär bereitstellt.⁸⁰

Eine weitere technische Herausforderung ist die geringe volumetrische Energiedichte von Wasserstoff (vgl. Abbildung 30). Wasserstoff bei 700 bar nimmt etwa siebenmal mehr Volumen in Anspruch als konventioneller Dieselmotorkraftstoff, bei 350 bar ist es sogar 12mal so viel. Um eine ausreichende Reichweite zu gewährleisten, bleibt unter den derzeitigen gesetzlichen Rahmenbedingungen, nur die Erweiterung des Wasserstoffspeichers in den Sattelzuganhänger. Das wiederum schränkt die Flexibilität der Nutzung durch Tausch des Anhängers ein.⁸¹ Zudem wird der Einbau von Wasserstoffspeichern in Anhängern in der Branche kritisch gesehen: Die Kosten des Anhängers würden damit steigen und so Kapital binden, dass bei langen Standzeiten der Anhänger nicht produktiv eingesetzt werden kann.⁸² Eine Anpassung der Baulängenbeschränkung, könnte die Installation von H₂-Tanks direkt hinter dem Fahrerhaus ermöglichen.

⁷⁹ Bildquelle: Scania

⁸⁰ Gnann et al. (2017)

⁸¹ Gnann et al. (2017)

⁸² Interview mit einem Branchen-Experten

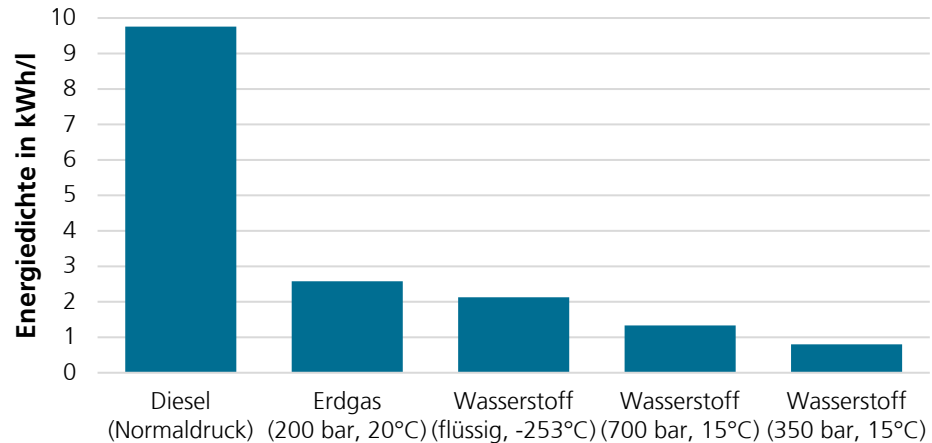


Abbildung 30 Volumetrische Energiedichten von Kraftstoffen im Vergleich.⁸³

Aufgrund der geringen Energiedichte des Wasserstoffs lassen sich nach aktuellem Stand der Technik die Reichweiten der konventionellen Diesel-Lkw von etwa 2.500 km nicht nachbilden.⁸⁴ Laut Gnann et al. lassen sich, unter Berücksichtigung verlängerter Sattelzugmaschinen zum Einbau der Tanksysteme, mit 700 bar Wasserstoffdrucktanks Reichweiten bis maximal 1.000 km erreichen. Unter Berücksichtigung der Lenk- und Ruhezeiten innerhalb der EU ermöglicht diese Reichweite eine eintägige Fahrt ohne Tankstopp.⁸⁵ Die aktuell in die Schweiz gelieferten schweren Lkw Xcient Fuel Cell von Hyundai erlauben, nach Herstellerangaben, lediglich eine Reichweite von 400 km.⁸⁶ Aus Sicht der Logistikunternehmen sind geringere Reichweiten durchaus vertretbar. Solange der Tankvorgang vergleichbar lange dauert, wie bei konventionellen Diesel-Lkw, lässt sich auch häufigeres Tanken in die Prozesse und die notwendigen Ruhezeiten integrieren (Tankvorgang siehe Kapitel 4.4.1.1).⁸⁷

Zukünftig werden im Bereich der Wasserstoffspeicherung Verbesserungen erwartet. Eine Möglichkeit bietet die Speicherung in einem Trägermaterial, z.B. Metallhydride oder Nano-Carbon-Röhren, welche bei geringen Drücken und Normaltemperatur eine volumetrische Dichte in der Größenordnung von flüssigem Wasserstoff ermöglichen könnten. Sie befinden sich derzeit allerdings noch in der Entwicklung. Weiteres Verbesserungspotential liegt in der Effizienz mobiler Brennstoffzellensysteme: Diese erreichen derzeit einen Wirkungsgrad von maximal ca. 59%, hängen jedoch stark vom realen Fahrverhalten ab.⁸⁸ Aufgrund der Kostenstruktur im Wirtschaftsverkehr, bei der die Fahrzeuginvestitionen weniger stark ins Gewicht fallen wie die Kraftstoffkosten, würde eine Verbesserung des Wirkungsgrads die Wirtschaftlichkeit stark erhöhen (siehe Kapitel 2.4).

4.2 Wasserstoff-Infrastruktur: Stand, Potentiale und Trends

4.2.1 Erzeugungstechnologien

In der Regel kommt Wasserstoff nur in gebundener Form vor, d.h. freier Wasserstoff muss zunächst unter Energieaufwand erzeugt werden. Der überwiegende Teil der heutigen Wasserstoffproduktion in Deutschland stammt aus fossilen Energieträgern. Das gängigste Verfahren ist dabei die Dampfreformierung, bei der Erdgas durch chemische

⁸³ IWR (2005), EMCEL (2019)

⁸⁴ Wietschel et al. (2017):

⁸⁵ Gnann (2017)

⁸⁶ Hyundai (2020)

⁸⁷ Interview mit einem Branchen-Experten

⁸⁸ Dell et al. (2014)

Prozesse zu Wasserstoff umgewandelt wird. Als Nebenprodukte entstehen dabei Wasser(dampf), Kohlenmonoxid und Kohlendioxid. Bei der Produktion einer Tonne Wasserstoff über dieses Verfahren werden bis zu 10 Tonnen CO₂, d.h. ca. 300 g_{CO2}/kWh freigesetzt.⁸⁹ Zum Vergleich: Der Emissionsfaktor von Diesel-Kraftstoff liegt mit 270 g_{CO2}/kWh in einer ähnlichen Größenordnung. Aufgrund der Klimabelastung wird Wasserstoff aus fossilen Energieträgern als „grauer Wasserstoff“ bezeichnet. Als Schlüsseltechnologie für die Herstellung von „grünem“ Wasserstoff wird die Wasserelektrolyse gesehen.⁹⁰ Diese bezeichnet die Aufspaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff durch den Einsatz von elektrischer Energie. Wird der Elektrolyseur mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen versorgt, kann der Wasserstoff weitestgehend emissionsfrei hergestellt werden. Einschränkung gilt es zu bedenken, dass der deutsche Strommix in 2019 einen Emissionsfaktor von 401 g_{CO2}/kWh aufgewiesen hat. Daraus ergibt sich, dass es momentan aus umwelt- und wirtschaftlichen Gründen nicht sinnvoll ist, Wasserstoff mit dem aktuellen Strommix herzustellen (siehe auch Kapitel 4.2.2). Mit immer höheren Anteilen erneuerbarer Energien, könnte das allerdings zukünftig anders sein. Entsprechend wird schon heute viel in die Forschung und Entwicklung investiert: In Deutschland existieren heute über 60 Power-to-Gas Projekte, in denen die Erzeugung von Wasserstoff oder Methan aus erneuerbarem Strom demonstriert und verbessert wird.⁹¹

Bei der Wasserelektrolyse kann grundsätzlich zwischen der Nieder- und Hochtemperatur-Elektrolyse unterschieden werden. Bei der alkalischen Elektrolyse (AEL) und der Proton-Exchange-Membran-Elektrolyse (PEM) werden geringere Temperaturen verwendet als bei der Solid-Oxid-Elektrolyse (SOEC) und Co-Elektrolyse. Die Co-Elektrolyse ist für die Produktion von reinem Wasserstoff allerdings weniger relevant, da in diesem Prozess in einem Schritt aus Wasser und CO₂ neben Wasserstoff auch Kohlenmonoxid, also Synthesegas, hergestellt wird. Die Co-Elektrolyse eignet sich daher besonders für die Methansynthese. Die alkalische Elektrolyse, welche bereits seit 80 Jahren in serienreifen Anlagen industrielle Anwendung findet, gilt auch heute noch als Stand der Technik.⁹² Allerdings hat die PEM-Elektrolyse aufgrund des Ausbaus von erneuerbaren Energien, der Industrialisierung der PEM-Brennstoffzelle und der Marktentwicklung von Power-to-Gas-Anwendungen zur AEL nahezu aufgeschlossen.⁹³ Somit besitzen die beiden Niedertemperatur-Elektrolysen AEL und PEM aktuell bereits einen sehr hohen technologischen Reifegrad (Technology Readiness Level, TRL). Während für die alkalische Elektrolyse bereits TRL 9 (das höchste Level) angesetzt wird, gilt für die PEM noch ein leicht geringeres TRL zwischen 7 und 8. Die Hochtemperatur-Elektrolysen SOEC und Co-Elektrolyse befinden sich im Vergleich zu den Niedertemperatur-Elektrolysen noch in einem frühen Entwicklungsstadium und weisen daher ein geringeres TRL auf. Die SOEC befindet sich aktuell im Übergang von Forschung zur industriellen Anwendung und besitzt somit ein TRL zwischen 4 und 5. Die Co-Elektrolyse besitzt im Moment ein TRL von 4.⁹⁴

Wenn in Zukunft vermehrt Strom aus erneuerbaren und somit fluktuierenden Quellen verwendet werden soll, eignet sich aus heutiger Sicht vor allem für die Produktion von Hochdruck-Wasserstoff die PEM-Elektrolyse, da sie eine hohe Flexibilität aufweist. Sie erlaubt häufige und hohen Lastwechsel und kann damit sehr dynamisch auf das fluktuierende Energieangebot reagieren. Ein wichtiger Parameter für die Quantifizierung von Flexibilität ist der Lastgradient. Er gibt an, wie sich die Leistung verändern kann (in % pro Sekunde). Während der Lastgradient bei der AEL und der SOEC zum Teil Werte weit unter 1 %/s annimmt, besitzt die PEM-Elektrolyse mit 10 %/s deutliche Vorteile. Auch Leerlaufzeiten stellen keine Probleme dar und die Leistung kann einfach durch das Hinzufügen weiterer Module linear erhöht werden. Höhere Wirkungsgrade verspricht allerdings die Hochtemperatur-Elektrolyse, da hier anstatt flüssigen Wassers, Wasserdampf

⁸⁹ Wismann et al. (2019), ENCON.Europe (2018) S.17

⁹⁰ BMBF (2020)

⁹¹ Dena (o.J.)

⁹² Pichlmaier et al. (2019)

⁹³ Schmidt et al. (2018)

⁹⁴ Ausfelder/Dura (2018), Schmidt et al. (2016)

eingesetzt wird, was den spezifischen Stromverbrauch verringert. Allerdings existiert aufgrund der Wärmeintegration eine geringere Betriebsflexibilität der Anlagen.

Es besteht in Zukunft vor allem bei der Hochtemperatur-Elektrolyse aber auch bei den anderen Verfahren ein Bedarf für die Verbesserung der Lebensdauer und Flexibilität, sowie eine Hochskalierung der Anlagen in hohe Megawatt-Bereiche. Während für die Niedertemperatur-Elektrolysen auch bis 2050 keine Wirkungsgrade über 70% zu erwarten sind, besitzt die SOEC bereits heute schon einen Wirkungsgrad über 80%, welcher jedoch bis 2050 nur auf 83% gesteigert werden kann (vgl. Tabelle 5).⁹⁵

Tabelle 5 Übersicht der wichtigsten Parameter der alkalischen Elektrolyse (AEL), Proton-Exchange-Membran Elektrolyse (PEM) und Solid-Oxid-Elektrolyse (SOEC).⁹⁶

		AEL	PEM	SOEC
Wirkungsgrad	2020	65%	63%	81%
	2030	68%	63%	83%
	2050	69%	68%	83%
Verfügbare Anlagen Leistungsbereich	in MW	bis 130	bis 6	0,018
Temperaturbereich	in °C	50-80	50-80	600-900
Teillastbereich	in %	20-100	5-100	-
Lastgradient	in %/s	<1	10	0,05
Lebensdauer	in h	bis 90.000	bis 50.000	-

4.2.2 Erzeugungskosten

Aufgrund der noch frühen Phase in der Marktentwicklung und der Anwendung in momentan noch relativ kleinen Anlagen sind die Kosten für Wasserstoff aus Elektrolyseanlagen im Vergleich zu konventionellen Produktionsmethoden wie der Erdgasreformierung sehr hoch. Laut der Shell-Wasserstoffstudie kann Wasserstoff aus zentralen und dezentralen Elektrolyseanlagen zu Erzeugungskosten zwischen knapp 6 €/kg (für die zentrale Anlage) und etwas unter 8 €/kg (für die dezentrale Elektrolyse) bereitgestellt werden. Damit ist die Wasserstoffproduktion mit Elektrolyseanlagen derzeit etwa fünfmal so teuer wie Wasserstoff aus der Erdgasreformierung, der mit 1,4 €/kg im Mittel angegeben wird.⁹⁷ Die zentrale Einflussgröße auf die Kosten der Elektrolyse ist, neben der Auslastung und den geleisteten Volllaststunden, der Strompreis. In den betrachteten Quellen der Shell-Studie wurde er zwischen 6,5 und 10 €-ct/kWh angegeben. Diese Stromkosten entsprechen in etwa denen der energieintensiven Industrie in Deutschland, die durch Ausnahmeregelungen von verschiedenen Abgaben und Umlagen befreit ist und deren Stromkosten daher vor allem durch die Höhe der Strombeschaffungspreise geprägt sind.⁹⁸

Bis zum Jahr 2030 ist noch ein signifikantes Kostenreduktionspotential in der Produktion von Wasserstoff aus erneuerbaren Energiequellen zu erwarten. Insbesondere die Weiterentwicklung der Elektrolysetechnologie sowie die Entwicklung der Energiekosten haben daran einen großen Anteil.

4.2.2.1 Kostenentwicklung Elektrolyse

Wie eingangs schon beschrieben, werden mit der Weiterentwicklung und Skalierung von Elektrolysetechnologien sowohl Effizienzsteigerungen als auch eine signifikante Kosten-

⁹⁵ Bünger et al. (2017)

⁹⁶ Pichlmaier et al. (2019)

⁹⁷ Adolph et al. (2017)

⁹⁸ Grave et al. (2015)

reduktion bis 2030 erwartet. Um eine Abschätzung der zukünftigen Kosten zu ermöglichen, greifen aktuelle Studien zu Technologie-Analogien. Da es sich bei einer Elektrolyse auch um eine oberflächenbezogene Technologie handelt, wird die erwartete Entwicklung mit den bisherigen Entwicklungen von Photovoltaikanlagen und Lithium-Batterien verglichen. Beide stellen ebenfalls oberflächenbezogene Technologien dar. Aus dieser Analogie ergibt sich eine Lernrate von 13%, d.h. der spezifische Investitionsbedarf von Elektrolyseanlagen reduziert sich bei jeder Verdopplung der weltweit installierten Elektrolysekapazitäten um 13%. In Abbildung 31 sind die, von der Deutsche Energie-Agentur (dena), ermittelten Kostenentwicklungen der Investitionskosten der ALK-, PEM- und SOEC-Elektrolyse bis 2050 dargestellt.⁹⁹

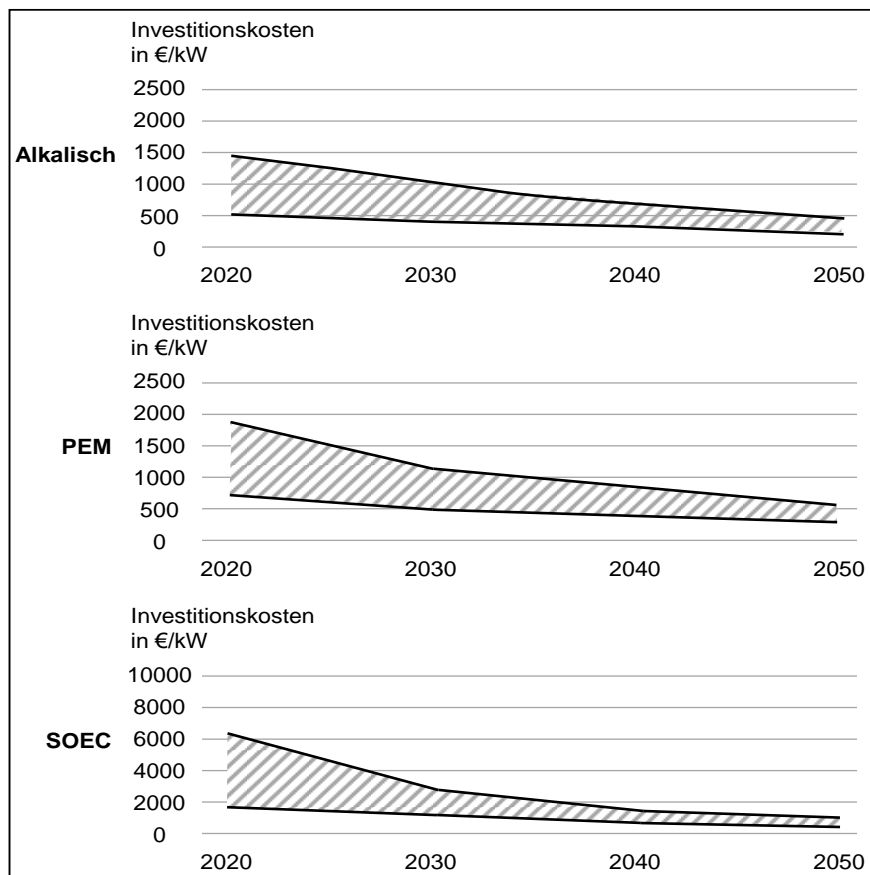


Abbildung 31 Entwicklung der spezifischen Investitionskosten für Alkalische, PEM- und SOEC-Elektrolyse bis 2050 nach DENA.¹⁰⁰

Die Investitionskosten betragen aktuell für die ALK- und PEM-Elektrolyse-Anlagen etwa 1.000 bis 1.500 €/kW. Kosten unter 1.000 €/kW werden für Anlagen im Multi-Megawatt-Bereich angesetzt, die zurzeit allerdings nur in Demonstrationsprojekten zu finden sind.¹⁰¹ Konkrete Werte liefert die Studie von Frontier Economics (siehe Tabelle 6).¹⁰² Hierbei entsprechen die Werte der Niedertemperatur-Elektrolyse in etwa der unteren Begrenzung des Kostenkorridors aus der Abbildung 31. Für die Hochtemperatur-Elektrolyse wurden tendenziell geringere Kosten angenommen. Abweichende Kostenschätzungen sind in der Literatur häufig zu finden und spiegeln die Unsicherheit bezüglich zukünftiger Entwicklungen wieder.

⁹⁹ dena (2018)

¹⁰⁰ dena (2018)

¹⁰¹ Smolinka et al. (2018) S.115.

¹⁰² Frontier Economics (2018) S.63 f.

Tabelle 6 Entwicklung der spezifischen Investitionskosten für Nieder- und Hochtemperatur-Elektrolyse bis 2050 im Referenzszenario von Frontier Economics.¹⁰³

		2020	2030	2040
Niedertemperatur-Elektrolyse	in €/kW	737	625	450
Hochtemperatur-Elektrolyse	in €/kW	930	804	600

Die jährlichen Betriebskosten können für die Niedertemperatur-Elektrolyse mit 3% und für die Hochtemperatur-Elektrolyse mit 3,5% der Investitionskosten angenommen werden.¹⁰⁴ Die Hochtemperatur-Elektrolyse besitzt, wie bereits beschrieben, einen noch geringen Reifegrad. Somit ist sie aktuell noch nicht mit den Niedertemperatur-Elektrolysen wettbewerbsfähig. Laut Smolinka et al. kann bei erfolgreicher Weiterentwicklung mit einer Wettbewerbsfähigkeit im Jahr 2030 gerechnet werden.¹⁰⁵

4.2.2.2 Stromgestehungskosten und Herkunftsländer

Die Stromkosten haben einen erheblichen Anteil an den Kosten der Produktion von grünem Wasserstoff, daher sollen an dieser Stelle die Stromgestehungskosten genauer betrachtet werden. 2018 lagen die Stromgestehungskosten in Deutschland bei Photovoltaikanlagen (PV) zwischen 3,71 und 11,54 €/Cent/kWh. Die Kosten betragen für Onshore-Windenergie zwischen 3,99 und 8,23 €/Cent/kWh und für Offshore-Anlagen 7,49 bis 13,79 €/Cent/kWh. Ab 2030 wird erwartet, dass die Stromgestehungskosten bei PV-Anlagen zwischen 2,41 und ca. 7,00 €/Cent/kWh, bei Windenergie zwischen ca. 3,5 und 7,00 €/Cent/kWh (Onshore) und zwischen 6,00 und 11,00 €/Cent/kWh (Offshore) liegen können. Strom von Biogasanlagen besitzt von den erneuerbaren Energien aktuell die höchsten Stromgestehungskosten (zwischen 10,14 bis 14,74 €/Cent/kWh, je nach Volllaststunden) und lassen auch bis 2030 kaum eine Kostenreduzierungen erwarten.¹⁰⁶

Niedrigere Stromgestehungskosten aus erneuerbaren Energieanlagen sind in Ländern mit höheren Solar- und Windpotentialen zu erwarten. Aus diesem Grund und den limitierten Gesamtpotentialen für den EE-Ausbau, wird die Erzeugung von Wasserstoff im Ausland und sein Import verstärkt diskutiert. Abbildung 32 veranschaulicht die weltweiten Potentiale für die Wasserstoffproduktion, insbesondere von grünem Wasserstoff. In den blau bzw. türkis eingefärbten Ländern wurde auch die Erzeugung von Wasserstoff auf Basis von Erdgas berücksichtigt, auf die in dieser Studie nicht weiter eingegangen wird. Es lassen sich folgende Regionen mit einem hohen und ausbaubaren Potential an erneuerbaren Energie feststellen:

- Solarenergie: Südeuropa, Nordafrika, Naher Osten, Australien und Westküste Südamerika
- Windenergie: Nord- und Ostsee aber auch Nordafrika und Island
- Geothermie und Wasserkraft: Island

Diese Regionen besitzen darüber hinaus einen Zugang zum Meer, sodass die Versorgung mit Wasser für die Elektrolyse über Entsalzungsanlagen gewährleistet werden kann ohne das eine Konkurrenz zur Trinkwasserversorgung oder landwirtschaftlichen Bewässerung entsteht. Zudem ermöglicht ein Meerzugang den Export des Wasserstoffs per Schiff.

¹⁰³ Frontier Economics (2018) S.63 f

¹⁰⁴ Frontier Economics (2018) S.64 f

¹⁰⁵ Smolinka et al. (2018) S.115

¹⁰⁶ Kost et al. (2018)

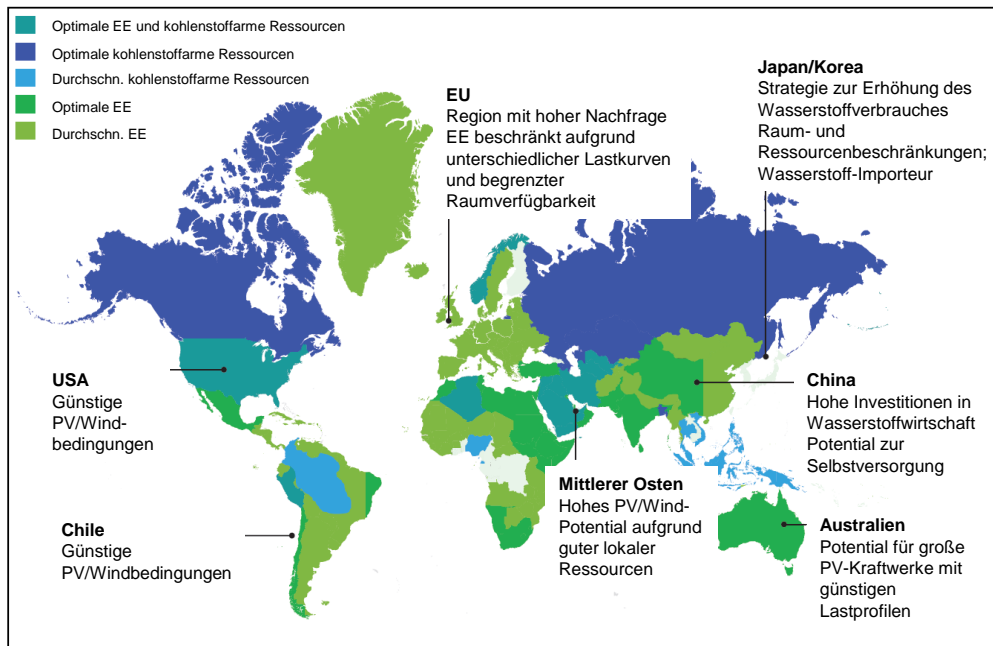


Abbildung 32 Weltweite Potentiale für die Wasserstoffproduktion nach Regionen.¹⁰⁷

Neben der verfügbaren EE-Potentiale ist eine wichtige Anforderung eine vorhandene Exporterfahrung bzw. Energiepartnerschaft mit Deutschland oder der EU. Beispiele sind hier Australien (Kohle und LNG) und Saudi-Arabien (Öl und Gas). Im asiatischen Raum laufen bereits Projekte, welche Australien als Exportland vorsehen. Saudi-Arabien kann beispielsweise auf die sehr gut ausgebaute Öl- und Gasinfrastruktur und die somit vorhandenen Erfahrungen beim Export von gasförmigen oder flüssigen Energieträgern zurückgreifen.¹⁰⁸ Auch Nordafrika besitzt bereits aufgrund von vorhandenen Gaspipelines Erfahrungen beim Handel mit Energien. Besonders das auf erneuerbare Energien ausgerichtete Marokko ist hier ein vielversprechender Kandidat für die Zukunft, da bereits eine etablierte Energiepartnerschaft zur EU besteht.¹⁰⁹ Auch die Nationale Wasserstoffstrategie verweist auf einen möglichen Import aus nordafrikanischen Ländern. Allerdings ist zu erwähnen, dass alle genannten Länder zunächst kurz- bis mittelfristig ihren eigenen Bedarf an EE bedienen müssen, um einen nachhaltigen Beitrag zu leisten. Australien bspw. produziert trotz großer EE-Potentiale über 60% seines Strombedarfs aus Kohle.¹¹⁰ Auch die Komplexität solcher Initiativen darf nicht unterschätzt werden, wie sich an den Erfahrungen vergangener Projektinitiativen gezeigt hat (vgl. Desertec¹¹¹ und TuNur¹¹²). Vor diesem Hintergrund ist grüner Wasserstoff aus Importen im Zeithorizont bis 2030 nicht zu erwarten.

Längerfristig ist ein Import von Wasserstoff aufgrund der geringeren Energiekosten aber durchaus denkbar. Abbildung 33 gibt eine Abschätzung über Stromgestehungskosten verschiedener Energieträger und Regionen. Die Abbildung stammt aus der Studie von Frontier Economics und verdeutlicht die im Vergleich niedrigen Kosten für PV Strom aus Nordafrika und dem Nahen Osten.

¹⁰⁷ Hydrogen Council (2020)

¹⁰⁸ Frontier Economics (2018) S.53 ff

¹⁰⁹ Bspw. ist hier die deutsch-marokkanische Energiepartnerschaft (PAREMA) zu nennen, welche seit 2012 die Integration von erneuerbaren Energien in die Stromnetze, Energieeffizienz und Klimaschutzprojekte fokussiert

¹¹⁰ Piria et al. (2017)

¹¹¹ DLR (2006)

¹¹² Nur (2020), Van Son/Isenburg (2019) S.88 f

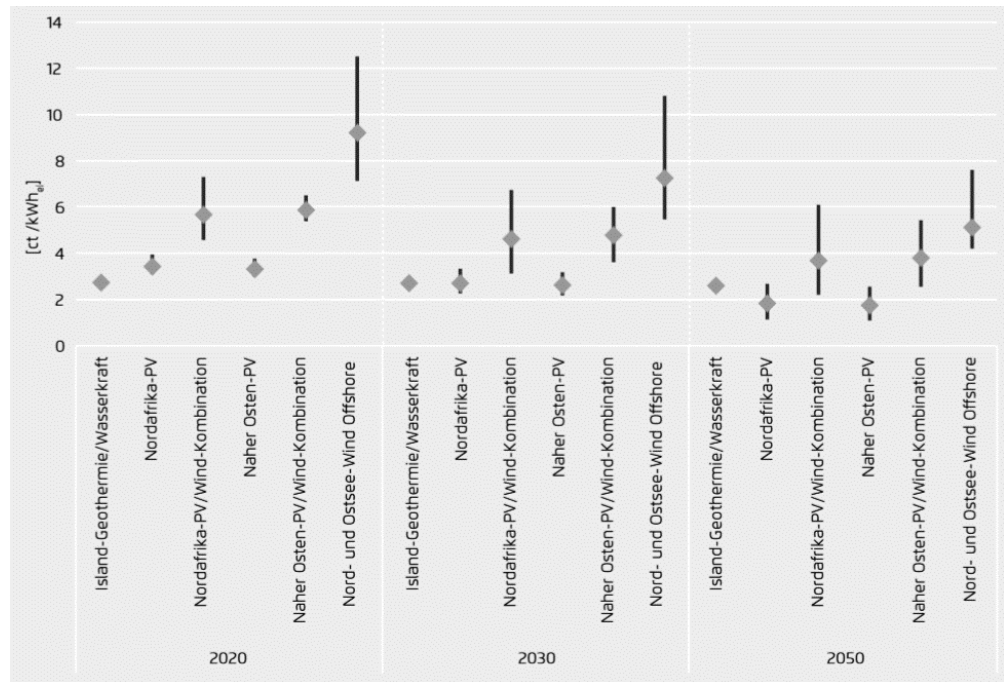


Abbildung 33 Stromgestehungskosten in den Jahren 2020, 2030, 2050 in €-ct/kWh nach Frontier Economics.¹¹³

Fazit: Unter günstigen Umständen kann sich längerfristig eine Kostendegression für grünen Wasserstoff um 50% ergeben. Damit liegen die Kosten für grünen Wasserstoff dann bei dem doppelten Preis von Wasserstoff aus Erdgasreformierung.

4.2.2.3 Wasserstoffkosten

Wie bereits dargelegt wird erwartet, dass H₂ aus zentralen und dezentralen Elektrolyseanlagen zu Erzeugungskosten zwischen knapp 6 €/kg (für die zentrale Anlage) und etwas unter 8 €/kg (für die dezentrale Elektrolyse) bereitgestellt werden kann.¹¹⁴ Diese Kosten sind, neben den Vollaststunden der Anlagen, zum größten Teil abhängig von den Stromkosten. Die Abschätzung der Kostenentwicklung für grünen H₂ bis 2030 ist mit großen Unsicherheiten verbunden. Eine Indikation sind die Zielpreise welche sich einzelne Länder gesetzt haben: Irena (2018) gibt an, dass das US-Energieministerium ein Ziel für die H₂-Kosten an der Zapfsäule von 5 USD/kg (~4,3 €/kg) ausgegeben hat (US DOE, 2018), während Japan sich zum Ziel gesetzt hat, die Kosten an Tankstellen von derzeit 10 USD/kg auf 3 USD/kg (~2,6 €/kg) bis 2030 zu senken, und der FCH JU strebt 6 €/kg für Europa an.¹¹⁵ Eine aktuelle Studie des EWI, welche verschiedene Produktionsländer und Importmöglichkeiten betrachtet, hält einen Preis für grünen Wasserstoff von ca. 3 USD/kg (~2,6 €/kg) in Deutschland 2030 für möglich.¹¹⁶

Bei einem Wasserstoffverbrauch für einen Lkw von ca. 8 kg_{H₂}/100km¹¹⁷ und Wasserstoffherstellungskosten von 8 €/kg ergeben sich somit Treibstoff-Kosten von 0,64 €/km. Dieser Wert enthält noch keine Marge für Transport, Speicherung und Verteilung von Was-

¹¹³ Frontier Economics (2018) S.60

¹¹⁴ Adolf et al. (2017) S.19

¹¹⁵ Irena (2018), Zu den Mitgliedern des Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH-JU) gehört u. A. die Europäische Kommission

¹¹⁶ Brändle, G. et al. (2020)

¹¹⁷ Hyundai (2020): Reichweite 400km, Tankvolumen 32,09 kg_{H₂}, max. Gewicht 36t, Leergewicht ca. 10t. Ergibt: Verbrauch = 32,09 kg_{H₂}/400 km ≈ 8 kg_{H₂}/100 km

serstoff (aktuell ist Wasserstoff an Tankstellen für ca. 9,5 €/kg erhältlich, bei Herstellungskosten von unter 2 €/kg). Im Vergleich: die Treibstoff-Kosten für eine herkömmlichen Diesel-Lkw belaufen sich auf ca. 0,39 €/km.¹¹⁸

4.3 Wasserstofftransport und -speicherung

Wird Wasserstoff für die Mobilität und andere Anwendungen in kleinen Anlagen dezentral hergestellt, erfolgt die Nutzung vor Ort und ein weiterer Transport entfällt. Bei zentraler Produktion hingegen ist ein Transport erforderlich. Hierbei wird H₂ entweder in speziellen Lkw, Schiffen, Zügen oder in Pipelines zum Verbrauchsort bzw. zur Tankstelle befördert. Kleinere Mengen werden heute gewöhnlich als komprimiertes Gas in Lkw transportiert. Bei mittleren Mengen und längeren Wegstrecken wird der Wasserstoff verflüssigt und mit größerer Energiedichte in entsprechend ausgelegten Lkw-Anhängern befördert. Zum Vergleich: die heute verwendeten Anhänger mit Flaschenbündeln (engl.: tube trailer) fassen ca. 500kg H₂, die größten verfügbaren Gastanks können bis zu 1.100kg H₂ fassen. Ein Lkw-Anhänger für Flüssigwasserstoff kann hingegen ca. 3.500kg transportieren.¹¹⁹ Allerdings erfordert die H₂-Verflüssigung einen hohen Energiebedarf, der insbesondere durch die Kühlung auf -253 °C entsteht. Etwa 30% seines Energieinhalts muss für die Verflüssigung von H₂ aufgewandt werden – das sind 15%-Punkte mehr als für die Speicherung unter hohem Druck bei 500 bar.¹²⁰ Darüber hinaus erfordert die Speicherung von Flüssigwasserstoff eine sehr gute Kälteisolation (sog. Kryotanks). Trotzdem können Verluste, durch Erwärmung und Verdampfung des flüssigen Wasserstoffs nicht vollständig vermieden werden (sog. Boil-off Verluste). Insbesondere bei langen Standzeiten, können diese Verluste problematisch werden.

Seit mehreren Jahren werden überdies alternative Speichermethoden, wie die chemische Bindung in flüssigen H₂-Trägern, bekannt als Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC), oder Metallhydriden erprobt. Diese Speicher bieten die Vorteile, dass zum einen eine höhere (volumetrische) Energiedichte erreicht wird, zum anderen ist durch die Bindung des Wasserstoffs keine Speicherung unter Druck bzw. bei niedrigen Temperaturen notwendig. Zudem wird das Gefahrenpotential reduziert, da der Wasserstoff nicht unkontrolliert austreten kann. Auf der anderen Seite werden, besonders bei LOHC, zusätzliche Prozessschritte und Energieaufwände für die Ein- und Ausspeicherung notwendig. Die Praxistauglichkeit dieser Stoffe im Kontext der H₂-Mobilität muss sich insgesamt erst noch zeigen.¹²¹

Auch H₂-Pipelines sind heute schon im Einsatz. Insbesondere für den Transport großer Mengen geeignet, werden sie vorwiegend für industrielle Anwendungen genutzt. In Europa existieren heute über 1.500km H₂-Pipelines, die meisten davon in Belgien und Deutschland.¹²² Der Wasserstoff wird für den Transport unter einen Druck von 30 bis 100 bar gesetzt. Perspektivisch könnten H₂-Pipelinenetze ausgebaut werden und dem Transport von H₂ für den Verkehrssektor dienen. Allerdings sind H₂-Pipelines mit einem großen baulichen und wartungstechnischen Aufwand verbunden. Ebenfalls untersucht wird die Möglichkeit, H₂ in die bestehende Erdgasinfrastruktur einzuspeisen und an anderer Stelle wieder zu extrahieren. In Deutschland wäre theoretisch eine Beimischquote von 10% H₂ möglich, ohne negativen Einfluss auf die Pipeline-Infrastruktur (Stichwort: H₂-Versprödung). Allerdings gibt es kritische Elemente: CNG-Fahrzeuge sind etwa nur bis zu einem Anteil von 2% H₂ zugelassen.

¹¹⁸ Bei einem Verbrauch von 31 l/100 km bei einem max. Gewicht von 40t (Heidt et al. (2018)) und einem Dieselpreis von 1,25 €/l

¹¹⁹ Hydrogen Europe (o.J.)

¹²⁰ Linde (2003)

¹²¹ Ehret (2020) S.48 ff

¹²² Hydrogen Europe (o.J.)

Obwohl Pipeline-Projekte auf europäischer Ebene bereits diskutiert werden, ist bis zum Jahr 2030 kein Ausbau der Pipeline-Infrastruktur zu erwarten. Entsprechend wird der Wasserstofftransport über Druck- und Flüssigspeicher erfolgen. Insbesondere Druckspeicher sind bereits heute etabliert und werden auch in zehn Jahren in der regionalen Verteilung einen Großteil der Tankstellenbelieferung übernehmen.

4.4 Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur

4.4.1 Tankstellen-Technologien

Grundsätzlich besteht eine H₂-Tankstelle aus einem oder mehreren H₂-Speichern, Kompressoren sowie Vorkühlung und Dispenser (Zapfanlage). Je nach Auslegung der Tankstelle kann außerdem ein Elektrolyseur integriert sein, welcher eine Erzeugung des Wasserstoffs vor Ort ermöglicht, und/oder eine Brennstoffzelle mit welcher Strom für den Eigenbedarf der Tankstelle erzeugt werden kann. Die H₂-Speicher werden teilweise in unterschiedlichen Druckstufen ausgeführt und auch Flüssigspeicher sind möglich. Zukünftig ist auch eine Lagerung des Wasserstoffs in einem LOHC-Träger denkbar (siehe Kapitel 4.3), was eine sichere Lagerung und bedarfsgerechte Freisetzung ermöglichen könnte.

Der Ausbau von Tankstellen für Lkw und Busse erfolgt im Wesentlichen separat vom Ausbau der Pkw-Tankstellen. Neben der Zugänglichkeit spielt diesbezüglich der Betankungsdruck eine entscheidende Rolle. Pkw werden mit 700 bar betankt, für Lkw besteht aktuell noch keine finale Einigung über den Betankungsdruck, weshalb sich auch die Auslegung von H₂-Tankstellen für Lkw noch in Diskussion befindet. Eine Lagerung bei 700 bar erfordert eine Kühlung auf -30 bis -40 °C und führt zu einer komplexen Tankstellenauslegung. Könnte die Speicherung bei 350 bar und dem Aggregatzustand wie bei der späteren Betankung erfolgen, wäre die Auslegung der Tankstelle günstiger, allerdings sind geringere Drücke auch mit einem geringeren Speichervolumen an der Tankstelle und im Fahrzeug verbunden. Insbesondere bei den hohen Bedarfen im Schwerlastverkehr könnte das ein Problem hinsichtlich Bauraum und Reichweite darstellen. Laut einem Experten ist die Norm für 350 bar am ehesten etabliert.¹²³ Die Standardisierungen bzgl. einer Wasserstoff-Infrastruktur sollen insgesamt bis ca. 2025 abgeschlossen sein. Alternativ würde sich eine Speicherung in Form von Flüssigwasserstoff an den Tankstellen anbieten, was aber wiederum die oben beschriebenen Probleme von Isolationsbedarf und Boil-off Verlusten nach sich zieht (siehe Kapitel 4.3).¹²⁴

In Abbildung 34 ist das Konzept einer H₂-Tankstelle aus dem Projekt H₂-Rivers dargestellt. Die Abbildung veranschaulicht die notwendigen Komponenten. Der in der Abbildung links dargestellte Elektrolyseur entfällt bei Belieferung mit H₂, ebenso die erste Kompressionsstufe, da der Wasserstoff in der Regel mit höheren Drücken angeliefert wird. Hochdruck-Kompressor und -Speicher sind für eine Betankung bei 700 bar, wie sie für Pkw notwendig ist, bestimmt.

¹²³ BMVI (2020)

¹²⁴ Experten-Interviews mit Experten der Unternehmen H₂ Mobility Deutschland, Nel ASA und Wystrach

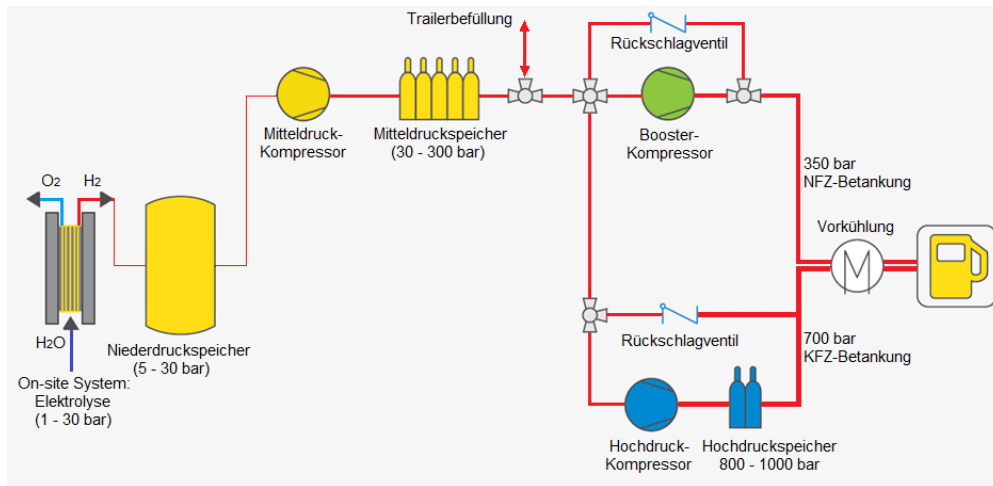


Abbildung 34 Konzept einer Wasserstofftankstelle für die Betankung von Pkw und Nutzfahrzeugen.¹²⁵

Stationäre H₂-Tankstellen können in bereits vorhandene Tank- und Servicestationen integriert oder als neue Tankstelle realisiert werden. Ersteres ist die einfachste und schnellste Möglichkeit H₂-Infrastruktur aufzubauen. Neben den stationären Tankstellen, können auch mobile Tankstellen, insbesondere während der Markteinführung, eine Rolle spielen.¹²⁶ Sie können flexibel dort eingesetzt werden, wo noch keine oder keine ausreichende Zahl fest installierter Tankstellen verfügbar ist. In der Praxis sind diese mobilen Tankstellen häufig kleiner als stationäre und erlaubt nur wenige Tankvorgänge pro Tag.

4.4.1.1 Betankungsvorgang

Wasserstoff für die Verwendung in Brennstoffzellenfahrzeugen muss besonderen Anforderungen genügen. So ist eine hohe Reinheit notwendig. Verunreinigungen durch Schwefelkomponenten, Ammoniak und/oder Kohlenwasserstoffe können zu einer Vergiftung der Brennstoffzelle führen.¹²⁷ Bei den meisten Produktionsmethoden wird eine Reinheit von über 99% erreicht, aber Verunreinigungen können auch beim Komprimieren oder während des Transports entstehen.

Der Zeitbedarf für einen Tankvorgang hängt auch vom Speicherkonzept der Tankstelle ab. Wird ein Konzept mit verschiedenen Druckstufen angewandt, wie es bei Projekten mit hohen Umsätzen üblich ist, kann ein Tankvorgang für einen Pkw in 5 bis 10 min durchgeführt werden. Bei lokalen Versorgungsspeichern mit nur einer Druckstufe muss hingegen mit 30 bis 45 min gerechnet werden. Beide Erfahrungswerte beziehen sich auf Pkw, die Tankdauer kann bei den größeren Tankmengen der Lkw natürlich länger ausfallen. Berichte aus dem Praxisbetrieb von Betankungsvorgängen von H₂-Bussen berichten von einer Tankdauer von „weniger als 20 min“ bei einer Betankung mit 350 bar.¹²⁸ Ebenfalls eine Tankdauer von „8 bis 20 min“ gibt Hyundai für den H₂-Lkw Xcient an, bei einem Tankvolumen von netto 31 kg_{H₂}.¹²⁹ Bei mehreren Tankvorgängen hintereinander kann es zudem zu einer kurzen Pause bzw. einem längeren Tankvorgang kommen, um den notwendigen Druck in den H₂-Speichern wiederherzustellen. In Summe sind so ca. 7 bis 8 Pkw Tankvorgänge pro Stunde und Entnahmepunkt möglich, für Lkw werden 3 bis 4 Füllungen pro Stunde und Entnahmepunkt erwartet.¹³⁰

¹²⁵ ZSW (2020)

¹²⁶ Huss/Corneille (2012)

¹²⁷ Chemie.de (2019)

¹²⁸ Jordan und Vesper (2017)

¹²⁹ Hyundai (2020)

¹³⁰ Experteninterview mit einem Vertreter von H₂-Mobility

4.4.1.2 Sicherheit und Standardisierung

Wasserstoff ist, wie andere Kraft- und Brennstoffe, ein Energieträger mit spezifischen Eigenschaften, die bei der Verwendung berücksichtigt werden müssen. Zahlreiche Verkehrsunfallsimulationen und Tests haben gezeigt, dass die Brandgefahr von H₂ geringer ist, als die von herkömmlichen Kraftstoffen, da das H₂-Gas aufgrund seiner geringen Dichte sehr schnell nach oben entweicht. Die Anforderungen an die Sicherheit von H₂-Tankstellen entsprechen daher in etwa denen von konventionellen Tankstellen.¹³¹ Da Wasserstoff wie andere Treibstoffe auch brennbar ist, werden in allen H₂-Anwendungen Sensoren eingesetzt, welche die Konzentration des Wasserstoffs in der Umgebung oder im Fahrzeug überwachen. Sollte es zu einem Leck in einem H₂-Tank kommen, greifen standardisierte Sicherheitsverfahren, die im schlimmsten Fall im Rahmen eines Notfall-Managements zur Abschaltung des Systems führen. Da das Wasserstoffmolekül sehr klein ist und dazu neigt Materialien zu durchdringen, werden heute nur geeignete Materialien mit einer schützenden Beschichtung für Tanks und Leitungen verwendet. Dies verhindert zudem eine mit der Zeit auftretende Materialversprödung durch den Wasserstoff.

Die Wasserstofftechnologie befindet sich in einer frühen Marktphase. Entsprechend ist der Prozess der Standardisierung noch nicht abgeschlossen, wie an einem fehlenden Standard für die Lkw Betankung deutlich wird. Allerdings wird bereits seit einigen Jahren an der Standardisierung und einer internationalen Vereinheitlichung gearbeitet: an vielen Stellen wurden Normen und Standards bereits definiert und verabschiedet (siehe Auflistung unten). Darüber hinaus existieren verschiedene Leitfäden und Handbücher, welche die Installation von H₂-Tankstellen für Behörden und Betreiber erleichtern sollen.¹³²

Richtlinien und Normen für Tankstellen:¹³³

- VdTÜV Merkblatt 514: Anforderungen an Wasserstofftankstellen
- ISO/TS 20100 Gaseous hydrogen – Fuelling stations
- SAE 2600 – Compressed Hydrogen Vehicle Fueling Connection Devices
- SAE J2601 – Compressed Hydrogen Vehicle Fueling Communication Devices
- Entwurf TRG 406 – Druckgase – Anlagen zum Füllen von festverbundenen Fahrzeugtanks zum Antrieb mit verdichtetem Druckgas (Tankstellen für verdichtete Gase – Druckgastankstellen)

Für Betreiber einer H₂-Tankstelle ist wichtig zu wissen, dass sie verpflichtet sind einen gefahrlosen Betrieb zu gewährleisten. Auf nationaler Ebene gibt die Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) die Mindestvorschriften für die Sicherheit und den Schutz der Gesundheit vor. Der Betreiber der Wasserstofftankstelle ist nach BetrSichV zur regelkonformen Erstinbetriebnahme, zum sicheren Betrieb und zu wiederkehrenden Prüfungen verpflichtet. Die entsprechende Kontrolle dieser Schritte wird durch eine zugelassene Überwachungsstelle (ZÜS) durchgeführt.¹³⁴ Bei der Inbetriebnahme ist zu beachten, dass sich die Anforderungen an das Genehmigungsverfahren unterscheiden, je nach der vorhandenen Menge an Wasserstoff auf dem Betriebsgelände: So ist z.B. ein Genehmigungsverfahren nach Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) erst ab einer Lagerung von 3t Wasserstoff notwendig.¹³⁵

¹³¹ Huss/Corneille (2012)

¹³² Z.B. Huss/Corneille (2012), Jacobi (2019), Cabalzar/Rohrer (2019), NOW (2013)

¹³³ Jordan und Vesper (2017)

¹³⁴ EMCEL (2018)

¹³⁵ INBUREX (2014)

4.4.1.3 Kosten einer Wasserstoff-Tankstelle

Die Kosten für eine Wasserstoff-Tankstelle werden mit ca. 1 Mio. € abgeschätzt.¹³⁶ Dieser Wert wird im Rahmen von Expertengesprächen für eine kleine Tankstelle für die Versorgung von Pkw bestätigt. Es werden etwa 1,3 Mio. € für den Aufbau veranschlagt und jährliche Betriebskosten im Bereich von 50.000 bis 100.000€. Durch technologisches Lernen und Skaleneffekte könnten die Kosten zwar auf 600.000€ sinken, jedoch ist zukünftig mit einem höheren H₂-Fahrzeugaufkommen und somit größeren Tankstellen zu rechnen. Die Investitionskosten hängen aber stark von der Größe der Tankstelle ab. Insbesondere die gleichzeitig abgerufenen Wasserstoffmengen (Peak-Performance) und der Gesamtenergieumsatz verursachen überproportional höhere Kosten für die Tanks und Kompressoren. Für die Versorgung von Lkw werden deshalb Investitionskosten von mindestens 5 Mio. € pro Tankstelle gesehen.¹³⁷

4.4.2 Wasserstoff-Tankstellen-Netz in Deutschland und Europa

In Deutschland werden H₂-Tankstellen für Pkw heute durch H₂-Mobility aufgebaut. Bis Ende 2020 sollen 100 und bis Ende 2021 bereits 140 Tankstellen in Betrieb sein. Aktuell sind 87 Tankstellen für Pkw (700 bar) in Betrieb und 19 in Realisierung.¹³⁸ Da die Wasserstoffmobilität bisher noch nicht etabliert ist, gibt es auch keine einheitliche Form der Tankstelle. Je nach Anforderungen werden daher unterschiedliche Komponenten verbaut. So teilt H₂ Mobility seine Tankstellen in Kategorien von *sehr klein (XS)* bis *groß (L)* ein, was einem H₂-Durchsatz von 80 kg/Tag bis 1.000 kg/Tag entspricht.¹³⁹ Der Betrieb und Aufbau von Tankstellen für Busse und Lkw (350 bar) erfolgt bislang separat mit nur wenigen Tankstellen (aktuell 6). Laut Gesamtkonzept des Verkehrsministeriums soll ein verstärkter Ausbau, insbesondere für Fernstrecken, ab dem Jahr 2025 erfolgen. Bis dahin stehen Entwicklungs- und Demonstrationsprojekte im Fokus (siehe Abbildung 18 S.28).¹⁴⁰

Laut wissenschaftlichen Studien könnten auch im Lkw-Bereich bereits etwa einhundert strategisch positionierte Tankstellen für den Schwerlastverkehr eine flächendeckende Grundversorgung sicherstellen.¹⁴¹ Allerdings sind die bisher geplanten Tankstellen, wie erwähnt, in der Regel nur auf Pkw ausgerichtet. Eine entsprechende Nachrüstung oder ein Ausbau wäre notwendig. Zudem ist eine Versorgung entlang hochfrequentierter Routen zwar relativ einfach zu realisieren, für regionale Verteilerverkehre wird allerdings nach Expertenschätzung eine höhere Dichte an Tankstellen notwendig sein. Für Logistikzentren könnten auch Tankstellen auf dem Betriebsgelände relevant sein (vgl. Kapitel 6). Büniger et al. erwarten eine komfortable Versorgung bei einer Tankstellenanzahl von ca. 1.000.¹⁴² Darüber hinaus ist für einen funktionierenden H₂-Fernverkehr nicht nur die nationale Tankstelleninfrastruktur entscheidend, sondern auch der europaweite Aufbau: Der Aufbau von Infrastruktur für alternative Kraftstoffe ist durch die EU Richtlinie 2014/94 (Alternative Fuels Infrastructure Directive, AFID) geregelt.¹⁴³ Sie verpflichtet die Mitgliedstaaten, Pläne zum Aufbau von Betankungsinfrastrukturen für Strom- und Erdgas zu entwerfen. Der Aufbau von H₂-Betankungsinfrastruktur ist bisher optional und steht mit rund 80 Tankstellen für Pkw in Europa (exklusive Deutschland) bisher erst am Anfang.¹⁴⁴ Neben dem internationalen Fernverkehr ist eine europäische Infrastruktur auch für den ebenfalls länderübergreifenden Gebrauchtwagenmarkt für Lkw relevant.

¹³⁶ Robinius et al. (2018) S.49

¹³⁷ Expertengespräch mit H₂ Mobility

¹³⁸ H₂ (o.J.), Stand 11/2020

¹³⁹ Robinius et al. (2018) S.49

¹⁴⁰ BMVI (2020)

¹⁴¹ Kluschke et al. (2020)

¹⁴² Büniger et al. (2017)

¹⁴³ NOW (2019)

¹⁴⁴ Europäisches Parlament (2018), H₂ (o.J.), Stand 11/2020

4.5 Tankleistung einer H₂-Tankstelle in Zukunft

Zur Einordnung der oben beschriebenen Kosten, Technologien und Ausbaupläne der H₂-Infrastruktur soll an dieser Stelle eine vereinfachte Abschätzung der getankten H₂-Mengen und der notwendigen Tankleistungen für eine exemplarische Tankstelle gezeigt werden. Besonders in der Markthochlaufphase, die bis über das Jahr 2030 hinausreichen wird, können die maximalen Tankleistungen noch nicht immer abgerufen werden und auch in Betriebshöfen sind individuelle Abschätzungen notwendig. Trotzdem kann die im Folgenden angestellte Überlegung Aufschluss darüber geben, ob ein Tankstellenbetrieb in der Form von heute auch zukünftig grundsätzlich möglich ist.

Laut Bünger et al. sowie Aussagen des Mineralölwirtschaftsverbands (MWW) liegt die durchschnittliche Kraftstoffkapazität einer Tankstelle bei 217.000 kWh pro Tag, was etwa 21.900 Liter Diesel entspricht ($\eta_{\text{TTW, Diesel}} \sim 40\%$).¹⁴⁵ Soll die gleiche Fahrleistung mit Wasserstoff bedient werden, sind dafür nur – aufgrund des besseren Tank-to-Wheel (TTW) Wirkungsgrads von Brennstoffzellen-Fahrzeugen ($\eta_{\text{TTW, H}_2} \sim 50\%$) – ca. 173.600 kWh pro Tag notwendig. Das entspricht im Tagesmittel einer Tankleistung von 217 kg_{H₂}/Stunde. Daraus resultiert eine Auslastung im Jahresdurchschnitt von rund 173 H₂-Tankvorgängen für Lkw pro Tag (à 30kg H₂) bzw. ca. 5.200 kg_{H₂}/Tag. Laut Bünger et al. ist eine H₂-Tankstelle ab einer Abgabemenge von 1.000 kg pro Tag wirtschaftlich.¹⁴⁶

Für die Auslegung einer Tankstelle sind allerdings Abgabespitzen zur berücksichtigen, die sowohl täglich als auch saisonal auftreten können. Die täglichen Abgabespitzen orientieren sich dabei an den Stoßzeiten in den Morgen- und Abendstunden. Die Auslegung erfolgt anhand eines Abgabeprofils, das von täglichen Spitzen von über 300% des durchschnittlichen Betriebs ausgeht.¹⁴⁷ Saisonale Schwankungen können sich bspw. durch Ferienzeiten oder Feiertage ergeben. Anhand der Autobahn-Zählstellen kann das Verkehrsaufkommen ermittelt werden. Es ergibt sich ein erhöhtes Verkehrsaufkommen von 300% in Spitzenzeiten gegenüber dem durchschnittlichen Verkehr. Berücksichtigt man beide Effekte zusammen mit einem Faktor von 5 für Spitzenzeiten (die beiden Effekte addieren sich nicht vollkommen), ergibt sich eine maximale H₂-Abgabe von 1.100 kg_{H₂}/Stunde. Wenn davon ausgegangen werden kann, dass an einem Entnahmepunkt maximal 4 Tankvorgänge pro Stunde durchgeführt werden können (siehe Kapitel 4.4.1.1), sind mindestens 9 Entnahmepunkte notwendig, um die Anforderungen auch in Spitzenzeiten bei einer Komplettumstellung der Tankstelle auf Wasserstoffbetrieb zu bedienen.

Der tägliche H₂-Bedarf der Tankstelle, von den oben abgeschätzten 5.200 kg_{H₂}/Tag, kann durch die Belieferung von 5 Lkw mit Hochdruck-Gastanks (500 bar) erfolgen oder mit 1,5 Lkw mit flüssigem Wasserstoff (siehe Kapitel 4.3). Eine dezentrale Erzeugung vor Ort würde einen Elektrolyseur mit ca. 12 MW Leistung erfordern ($\eta_{\text{Elektrolyse}} \sim 60\%$).¹⁴⁸ Dabei würden pro Tag ca. 286 MWh Strom verbraucht, sowie 46.800 l Wasser (pro Jahr: 104 GWh Strom und 17 Mio. l Wasser).

Aus den angestellten Berechnungen lässt sich Schlussfolgern, dass eine Tankstellenbelieferung mit Wasserstoff auch bei einer Komplettumstellung insgesamt möglich ist und zwar in einem vergleichbaren Umfang wie im konventionellen Fall. Allerdings ist – nach aktuellem Stand der Technik – ein höherer Anlieferverkehr notwendig. H₂-Speichertechnologien werden allerdings kontinuierlich weiterentwickelt, so dass hier zukünftig Verbesserungen zu erwarten sind.

¹⁴⁵ Bünger et al. (2016) S.110

¹⁴⁶ Bünger et al. (2017)

¹⁴⁷ Bünger et al. (2016), S.109

¹⁴⁸ Der Strombedarf für die Herstellung von Wasserstoff über eine Elektrolyse liegt bei ca. 55 kWh/kg_{H₂} bei einem Wirkungsgrad von ~60% (CEP (o.J.)). Um 5.200 kg_{H₂} pro Tag zu produzieren, müsste ein Elektrolyseur mit 12MW Leistung 24 h/Tag laufen.

5 Anforderungen an Tank- und Ladeinfrastrukturen aus Nutzersicht

5.1 Einführung

Bisherige Forschungsprojekte zur Elektrifizierung von Fahrzeugflotten fokussierten vorrangig den »Motorisierten Individualverkehr«, was mitunter auf die in diesem Marktsegment erhältlichen Fahrzeugmodelle zurückzuführen ist. Mit steigender Verfügbarkeit von elektrischen Fahrzeugen im Nutzfahrzeugbereich rücken immer mehr die unterschiedlichen Nutzergruppen des Wirtschaftsverkehrs in den Fokus von Forschung und Wirtschaft. Neben der Auswahl geeigneter Fahrzeuge stellt insbesondere die Auslegung der Ladeinfrastruktur und deren Integration in bestehende Logistikprozesse und Arbeitsabläufe die Flottenbetreiber vor planerische Herausforderungen. So wird der Einsatz batterieelektrischer Fahrzeuge beispielsweise noch durch eine beschränkte Reichweite, lange Ladedauern, sowie eine fehlende Ladeinfrastruktur limitiert. Diese Einschränkungen führen zu planerischen Unsicherheiten, die jedoch zukünftig bei der Disposition batterieelektrischer Fahrzeuge berücksichtigt werden müssen. Insbesondere bei energieintensive Transportdienstleistungen, wie sie im Fernverkehr stattfinden, müssen Tank- und Ladevorgänge möglichst effektiv in bestehende Logistikprozesse integriert werden.




Schwere Nutzfahrzeuge			Leichte Nutzfahrzeuge	
Überregional	Regional - Lokal	Lokal	Regional-Lokal	
Fernverkehr	Nahverkehrsverteillotten	Müllsammelflotten	Paketsdienstflotten	Handwerkerflotten
				
<ul style="list-style-type: none"> ■ Ladungsverkehre ■ Schwere LKW (SLKW) ■ Sattelaufzieger 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Teilladungsverkehre ■ Schwere LKW (SLKW) ■ Spezialaufbauten <ul style="list-style-type: none"> ■ Kühlaggregate ■ Hubladebühnen 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Schwere LKW (SLKW) ■ Spezialaufbauten <ul style="list-style-type: none"> ■ Tonnenkipper ■ Müllverdichter 	<ul style="list-style-type: none"> ■ i.d.R. < 3,5 Tonnen ■ 7,5-Tonner (UPS) ■ Kaum Spezialaufbauten 	<ul style="list-style-type: none"> ■ i.d.R. < 3,5 Tonnen ■ Keine Spezialaufbauten

Abbildung 35 Übersicht der betrachteten Wirtschaftsverkehre.¹⁴⁹

In Abbildung 35 sind die in dieser Studie betrachteten Nutzergruppen abgebildet. Diese stellen je nach Branche, angebotener Transportdienstleistung sowie Unternehmensstruktur unterschiedliche Anforderungen an alternativ angetriebene Fahrzeuge und die damit verbundenen Tank- und Ladeinfrastrukturen. Um diese Bedürfnisse zu ermitteln, wurde im Rahmen dieser Studie eine Literaturrecherche und vertiefende Gespräche mit Flottenbetreibern und Experten unterschiedlicher Transportbranchen durchgeführt. Anschließend wurden die Ergebnisse dieser leitfadengestützten Telefoninterviews in einem gemeinsamen Online-Workshop zusammen mit den befragten Experten diskutiert.

Die Verschiedenartigkeit von Service- und Transportverkehren, die sich erheblich in ihren Transportstrukturen, Tourenlänge, Be- und Entladeprozessen sowie des eingesetzten Fahrzeugtyps unterscheiden, erschwert es verallgemeinernde Anforderungen an Lade- und Tankinfrastrukturen abzuleiten. Um die Bedarfe möglichst umfassend zu ermitteln, wurden in dieser Studie folgende Use-Cases betrachtet und näher beschrieben:

¹⁴⁹ Bildquelle (von links nach rechts): Scania, Fraunhofer IAO, MAN Truck & Bus, Volkswagen Nutzfahrzeuge, Mercedes-Benz AG

- Use-Case I: »Handwerksverkehre«
- Use-Case II: »Entsorgungsverkehre«
- Use-Case III: »Industrielle Umlaufverkehre«
- Use-Case IV: »Nahverteilterverkehre«
- Use-Case V: »Kurier-, Express-, Paketnetzwerke«

5.2 Transportstrukturen

Je nach Branche und angebotener Dienstleistung unterscheiden sich die Transportstrukturen der Zustell Touren. In der Distributionslogistik wird zwischen »Ladungs-« und »Teilladungsverkehren« unterschieden, die jeweils unterschiedliche Möglichkeiten für batterieelektrisches Laden im Logistikprozess bieten.

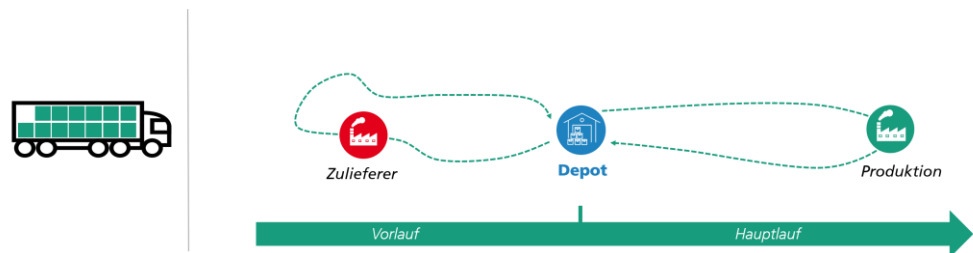


Abbildung 36 Distributionsstruktur bei Ladungsverkehren

Bei »Ladungsverkehren« findet der Transport des Ladungsgut, welches meist aus homogenen, abgepackten und stapelbaren Gütern besteht (»Güterverkehr«), auf direktem Weg vom Versender zum Empfänger statt. Das bedeutet, dass die einzelnen Ladungseinheiten während des Transports nicht zusätzlich umgeschlagen werden. Transportmittelwechsel, wie sie beispielsweise im »Begegnungsverkehr« stattfinden, treten allerdings auch bei »Ladungsverkehren« auf.

Die im »Ladungsverkehr« transportierten Güter lasten den Laderaum bezogen auf das Volumen und Gewicht meist vollständig aus. Typische Beispiele für »Ladungsverkehre« sind »Umlaufverkehre« aus der »industriellen Kontraktlogistik«, wie in Abbildung 36 dargestellt. Sie dienen meist zur direkten Versorgung der Produktion und sind deshalb ein wichtiger Bestandteil von »Just-In-Time« und »Just-In-Sequence« Konzepten (siehe Kapitel 5.4.3). Um Transportkosten zu minimieren, handelt es sich hierbei meist um lokale und regionale Transporte mit mittelschweren bis schweren Lkw. Weiterhin finden »Ladungsverkehre« im überregionalen Fernverkehr statt. Im Gegensatz zum »Ladungsverkehr« steht der »Teilladungsverkehr« oder »Stückgutverkehr«, bei dem auf Teilstrecken ein konsolidierter Transport unterschiedlicher Sendungen stattfindet.

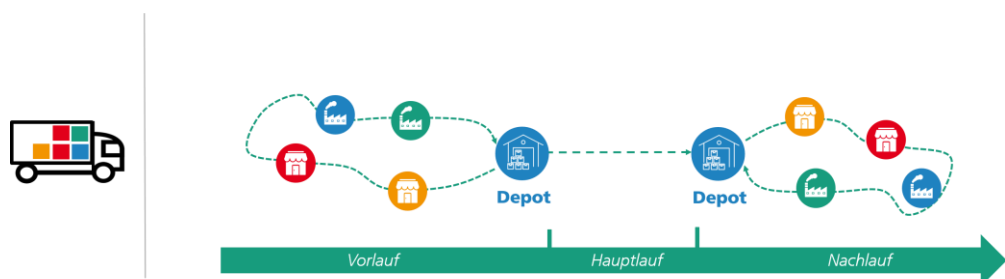


Abbildung 37 Distributionsstruktur bei Teilladungsverkehren

Abbildung 37 zeigt beispielhaft einen »Teilladungsverkehr« im Sammel- und Verteilverkehr. Hierbei handelt es sich um eine mehrstufige Transportstruktur, bei der im Vorlauf Güter von unterschiedlichen Verladern eingesammelt werden, um anschließend im

Hauptlauf in das Empfängergebiet transportiert zu werden. Bei den einzelnen Teillieferungen handelt es sich meist um palettierte Waren, die den Laderaum des Lkw bezogen auf das Gewicht und Volumen nicht auslasten würden. Aus diesem Grund werden mehrere dieser Sendungen zu Teilladungsverkehren zusammengefasst, um dann an unterschiedliche Empfänger eines Sendungsgebiets zugestellt zu werden.

Neben der Transportstruktur können Verkehre abhängig ihrer zurückgelegten Distanz klassifiziert werden. Je nach Strecke werden verschiedene Kategorien unterschieden. Bei einer Strecke bis 50 km handelt es sich um Nahverkehr, zwischen 51 km und 150 km um Regionalverkehr und bei Strecken über 150 km um Fernverkehr.

5.3 Batterieelektrisches Laden im Logistikprozess

Use-Case übergreifend wurde von den befragten Logistikexperten hervorgehoben, dass das Laden der Fahrzeuge so in die Prozesse integriert werden muss, dass möglichst keine zusätzlichen Standzeiten für das Fahrzeug entstehen. So soll das batterieelektrische Laden möglichst mit den bestehenden Standzeiten, wie sie am Betriebshof beim Be- und Entladen von Waren, oder den Lenk- und Ruhepausen an Rasthöfen auftreten, verknüpft werden. Je nach Prozessablauf ergeben sich unterschiedliche Lademöglichkeiten, welche in Abbildung 38 schematisch dargestellt sind.

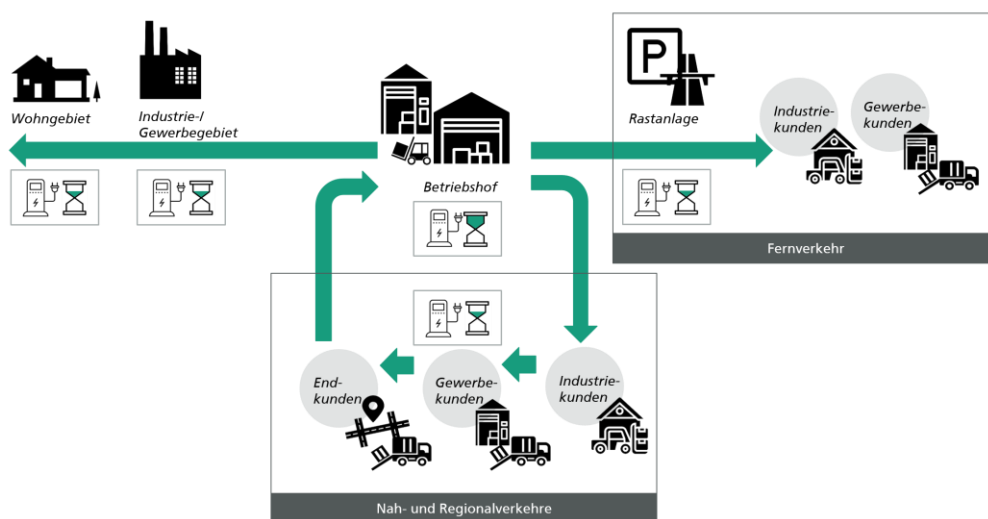


Abbildung 38 Übersicht Logistikprozess mit potenziellen Lademöglichkeiten

Laut Expertenmeinungen ist eine erfolgreiche Elektrifizierung abhängig von der Planbarkeit einer Zustelltour. So gilt es bei zukünftiger Tourenplanung und Disposition elektrischer Fahrzeuge, Ladevorgänge zu berücksichtigen. Beispielsweise müssen Orte mit Ladeinfrastruktur bekannt sein und wenn möglich durch den Disponenten bei der Planung der Tour reserviert werden können. Zeitfenster müssen eingehalten werden. Finanzielle Schäden, die durch Fehlplanung verursacht werden, weil aufgrund fehlender Reichweite ein Frachtauftrag abgelehnt werden muss, gilt es zu vermeiden. Bei der Planung und Durchführung einer Tour muss der Disponent die Gewissheit haben, wo sein Fahrer die benötigte elektrische Leistung aufnehmen kann. Dies stellt eine große Herausforderung dar, da schon heute die Fahrzeugdisposition trotz technischer Unterstützung hoch komplex ist. Zusätzliche Parameter wie der Batteriezustand oder Lademöglichkeiten erhöhen diese Planungskomplexität weiter. Touren mit einem festen Empfängerstamm sind aufgrund einer geringeren Anzahl an Variationen und Außeneinflüssen besser planbar und laut Expertenmeinungen besser zu elektrifizieren.

Je nach Use-Case, Geschäftsmodell des Unternehmens, sowie Kundenstruktur können die Potenziale zum batterieelektrischen Laden variieren. In Tabelle 7 sind die möglichen Ladeorte je Use-Case aufgezeigt.

Tabelle 7 Potenzielle Ladeorte im Logistikprozess

		Ladeort				
		Betriebs- hof	Industrie- gebiet	Rast- anlage/ Autohof	Kunde	Wohnort des Fahrers
KEP- Nahverkehr	Eigene Zustellflotte	x				
	Subunternehmer	(x) ^{*/**}	x			x
Nationaler Fernverkehr	Fuhrunternehmer mit eigenem Betriebshof	x	x	x	x	
	Fuhrunternehmer ohne eigenem Betriebshof	(x) ^{*/**}	x	x	x	
Industrielle Umlaufverkehre	Fuhrunternehmer mit eigenem Betriebshof	x		x	x	
	Fuhrunternehmer ohne eigenem Betriebshof		x	x	x	
Verteiler- verkehre	Fuhrunternehmer mit eigenem Betriebshof	x			x	
	Fuhrunternehmer ohne eigenem Betriebshof	(x) ^{*/**}	x		x	
* Schnellladen während Be- und Entladevorgang am Betriebshof						
** Subunternehmer lässt eigenes Fahrzeug über Nacht auf Betriebshof des Auf- traggebers						

5.3.1 Laden am Betriebshof

Elektrisches Laden der Fahrzeugflotte erfordert eine eigene Ladeinfrastruktur von Seiten des Betriebs hofs der Logistiker. Im Gespräch mit den Experten hat sich gezeigt, dass branchenübergreifend Flottenbetreiber gewillt sind, ihre Standorte mit eigener Ladeinfrastruktur auszustatten. Für eine bessere Prozessintegration sollten bevorzugt die Ladestellen mit E-Ladesäulen ausgestattet werden, damit während der Be- und Entladung der Fahrzeuge das batterieelektrische Laden stattfinden kann. Einige befragte Unternehmen, die bereits in Ladeinfrastruktur investiert haben, richteten allerdings bei ausreichender Hoffläche aus Brandschutzgründen eigene Ladezonen abseits des Betriebsgebäudes ein.

Idealerweise können die Fahrzeuge nachts am Betriebshof laden. Dies ist allerdings nicht in jeder Unternehmensstruktur und jeder Branche möglich. So vergeben einige Speditionen ihre Transportaufträge an kleinere Fuhrunternehmer, die ihre Fahrzeuge im Zwei- oder Dreischichtbetrieb bis zu 22 Stunden am Tag auslasten können. Generell gilt, dass Unternehmer versuchen, die Fahrzeuge möglichst auszulasten, um Standzeiten zu reduzieren.

Insbesondere im Nahverteilerverkehr ist das Geschäftsmodell, Transportaufträge an Subunternehmer zu vergeben, weit verbreitet. Diese verfügen meist über keinen eigenen Depotstandort, sondern beginnen die Zustelltour jeden Morgen am Betriebshof des Auftraggebers. Batterieelektrisches Laden ist deshalb möglichst mit den Be- und Entladeprozessen zu verbinden. Einige dieser Subunternehmerfahrzeuge stellen bei ausreichender Stellfläche ihre Fahrzeuge über Nacht am Depot ab. Hier wäre ein nächtliches Laden generell möglich. Einige Subunternehmer nutzen die Fahrzeuge allerdings auch abseits der Zustellzeiten für private Fahrten wie beispielsweise die Fahrt zum Wohnort. Um nächtliches Laden zu ermöglichen müsste folglich eine wohnortnahe, öffentliche Ladeinfrastruktur installiert werden.

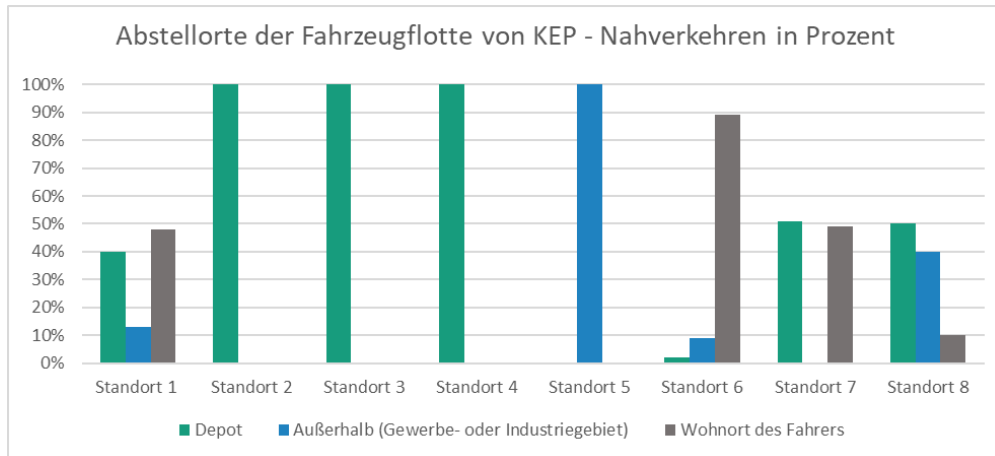


Abbildung 39 Abstellorte der Fahrzeugflotte von KEP-Nahverkehren in Prozent

Das in Abbildung 39 dargestellte Balkendiagramm zeigt eine bundesweite Stichprobe von acht Depotstandorten mit ihren jeweiligen Abstellortverteilungen in Prozent. Es zeigt sich, dass für eine erfolgreiche Elektrifizierung von KEP-Verkehren auch Ladeorte abseits der Betriebshöfe berücksichtigt werden müssen.

5.3.2 Laden in Gewerbe- und Industriegebieten

Öffentliche Ladeinfrastrukturen sind laut den befragten Experten ein wichtiger Bestandteil der Elektrifizierungsstrategien kleinerer Fuhrunternehmer ohne eigenen Betriebshof. Insbesondere in Gewerbe- und Industriegebieten muss eine öffentliche Ladeinfrastruktur geschaffen werden, die es Logistikern erlaubt, die Fahrzeuge außerhalb der Nutzungszeiten batterieelektrisch zu laden. Die Standzeiten der Fahrzeuge und damit das Potenzial für die elektrische Leistungsaufnahme kann in Gewerbe- und Industriegebieten stark variieren. Kurze Standzeiten ergeben sich, wenn das Fahrzeug beispielsweise während eines Schichtwechsels nur wenige Minuten abgestellt wird. Andererseits ergeben sich längere Standzeiten, wenn das Fahrzeug zur Einhaltung der Lenk- und Ruhezeiten für mehrere Stunden steht.

Neben einer ausreichenden Anzahl von Ladepunkten für Nutzfahrzeuge sind ebenfalls Haltemöglichkeiten und Lademöglichkeiten für Privat-Pkw der Fahrer vorzuhalten. Problematisch sehen die Experten die vermehrte Aussprache von Halteverböten in Gewerbe- und Industriegebieten. Grundsätzlich erlaubt der Gesetzgeber hier und in sog. Mischgebieten das Parken von Nutzfahrzeugen. Bei Anwohnerbeschwerden kann das Parken eingeschränkt werden, dies wäre der Fall wenn Logistikprozesse als störend wahrgenommen werden.¹⁵⁰ Diese Einschränkungen können den Mangel an Lkw-Stellflächen und somit potenziellen Ladepunkten künftig weiter verschärfen.

5.3.3 Elektrisches Laden an Rast- und Tankanlagen



Abbildung 40 Überbelegter Rastplatz an einer Autobahn.¹⁵¹

Insbesondere im Fernverkehr kehren Lkw über einen längeren Zeitraum nicht zum Betriebshof zurück, so dass diese aufgrund hoher Gesamttourenlängen an öffentlichen, oder an von Verladern und Empfängern zur Verfügung gestellten Infrastrukturen laden müssen. Neben den in Kapitel 5.3.2 beschriebenen Ladeinfrastrukturen in Gewerbe- und Industriegebieten ist der Ausbau von Ladepunkten an Rast- und Tankanlagen, sowie privaten Autohöfen ein integraler Bestandteil der Elektrifizierung des Fernverkehrs. Laut Expertenmeinungen stellt der Einsatz elektrischer Fahrzeuge insbesondere Disponenten vor große Herausforderungen. Schon heute müssen diese eine Vielzahl von unterschiedlichen Parametern bei der Einsatz- und Tourenplanung berücksichtigen. Neben der Einhaltung der Lenk- und Ruhezeiten und möglichst hohen Auslastung des Laderaums muss insbesondere die termingerechte Lieferung innerhalb der Zeitfenster sichergestellt werden.

Disponenten müssen zur Durchführung batterieelektrischer Touren, die über die Reichweite der Fahrzeuge hinausgehen, mögliche Ladepausen entlang der Route einplanen. Laut der befragten Experten bedarf es hierzu neben einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur einer »Internet-Plattform«, welche das Reservieren von Ladepunkten ermöglicht. Unwägbarkeiten wie Verkehrsbehinderungen oder lange Wartezeiten an Kundenrampen (siehe Kapitel 5.3.4) können jedoch zu einem verspäteten Eintreffen an der reservierten Ladeinfrastruktur führen, so dass die verfügbare Restladezeit nicht ausreicht um die Tour wie geplant fortzusetzen. Speziell im Fernverkehr ist es üblich, dass neue Frachtaufträge erst während der Tour übermittelt werden. Je nach Batteriestand und verfügbaren Ladeinfrastrukturen müssten gegebenenfalls diese Frachtaufträge abgelehnt werden.

Kritisch sehen die Experten einen möglichen Ausbau der Ladeinfrastruktur an Rast- und Tankanlagen. Laut Bundesverband Güterkraftverkehr und Entsorgung (BGL) fehlen bis zu 40.000 Lkw-Stellplätze an deutschen Autobahnen.¹⁵² Im Allgemeinen betonten die Experten, dass durch batterieelektrisches Laden keine zusätzlichen Standzeiten entstehen dürfen. Neben den Lenk- und Ruhezeiten sei ebenso »batterieelektrisches Zwischenladen« bei Verladern und Empfängern denkbar.

5.3.4 Elektrisches Zwischenladen bei Empfängern und Verladern

Wie in Abbildung 38 dargestellt bestehen im Zustellprozess längere Stand- und Wartezeiten während des Be- und Entladens der Fahrzeuge. Laut Expertenmeinungen lassen sich diese Zeiträume prinzipiell für elektrische Ladevorgänge nutzen. Der Aufbau einer

¹⁵¹ Bildquelle: iStock-ollo 1227155646

¹⁵² BGL (2019)

Ladeinfrastruktur bei Empfängern ist dabei nur bedingt möglich, da abhängig von den örtlichen Gegebenheiten die Anlieferung im öffentlichen Raum stattfinden kann. Insbesondere für Fahrzeuge, die nach Büro- und Geschäftsbeginn in innerstädtischen Zustellgebieten eintreffen, stehen häufig keine adäquaten Anlieferflächen zur Verfügung, da diese meist durch parkenden Individualverkehr belegt sind. Infolgedessen müssen Entladevorgänge meist in Halteverboten, in zweiter Reihe oder auf Gehwegen durchgeführt werden.¹⁵³



Abbildung 41 Warenumschlag im Straßenraum.¹⁵⁴

Bei der Suche nach einem geeigneten Entladeort versucht der Fahrer oder die Fahrerin das Fahrzeug möglichst nah an der Empfängeradresse abzustellen. Hierdurch werden lange Laufwege, die teilweise mit einem Hubwagen zurückgelegt werden müssen, vermieden. Kleine Verkehrsbehinderungen werden hierbei meist durch den Fahrer oder die Fahrerin in Kauf genommen (siehe Abbildung 41).

Neben dem Abstellort variiert auch die Haltedauer, die sich aus der eigentlichen Be- oder Entladezeit, sowie weiteren prozessbezogenen Wartezeiten, wie Warten auf den Warenempfänger zusammensetzen. Die Haltedauer kann je nach Kunde zwischen mehreren Stunden und wenigen Minuten liegen. Insbesondere bei Paketzustellungen an Endkunden (B2C) liegt die Zustellzeit meist zwischen ein und drei Minuten, was die elektrische Leistungsaufnahme für ein Zwischenladen stark limitiert.

Eine weitere Möglichkeit des elektrischen Zwischenladens besteht, wenn der Empfänger oder Verloader über eine eigene Be- und Entladeinfrastruktur verfügt. Hier kann der Empfänger eigene Ladepunkte einrichten. Rampen stellen in der Logistik die physische Schnittstelle zwischen dem Versender bzw. dem Empfänger und dem transportierenden Unternehmen dar. Zur Be- und Entladung wird das Zustellfahrzeug rückwärts an die Rampe herangefahren, bis der Abstand zwischen der Ladefläche des Lkw und der Rampe nur noch wenige Zentimeter beträgt. Dieser Prozess kann je nach Rampentyp und zur Verfügung stehender Rangierfläche unterschiedlich viel Zeit in Anspruch nehmen. Abbildung 42 zeigt einen Lkw im regionalen Verteilerverkehr während der Entladung an einer Kundenrampe.

¹⁵³ Raiber (2016)

¹⁵⁴ Bildquelle: Fraunhofer IAO



Abbildung 42 Entladung an Laderampe.¹⁵⁵

Im Vergleich zum Entladen im öffentlichen Raum wird das Fahrzeug an einem definierten Ort abgestellt. Jedoch können aufgrund geringer Abfertigungskapazitäten wie unzureichende Rampenanzahl oder fehlendes Entladepersonal und -geräte Engpässe bei der Warenannahme entstehen. Insbesondere bei Industriekunden mit großen Firmenkomplexen herrscht häufig Unklarheit darüber, welche Rampe angefahren werden soll. Sind zum Anlieferungszeitpunkt alle Rampen durch andere Lkw belegt, muss das Fahrzeug in Warteposition auf dem Gelände oder außerhalb abgestellt werden.

Zur Optimierung der Rampenprozesse setzen bereits viele verladenden Unternehmen auf Zeitfensterbuchungssysteme. Über Online-Plattformen können Disponenten des Logistikers die gewünschten Anlieferzeiten an der Rampe auswählen, so dass dem Fahrer in diesem Zeitraum garantiert eine freie Rampe vorgehalten wird.¹⁵⁶ Durch die Vergabe dieser Zeitfenster haben sich die Standzeiten in einigen Logistikbereichen bereits merklich verkürzt. Allerdings können durch externe Faktoren wie Staus oder Verzögerungen bei vorherigen Kunden diese nicht immer eingehalten werden.

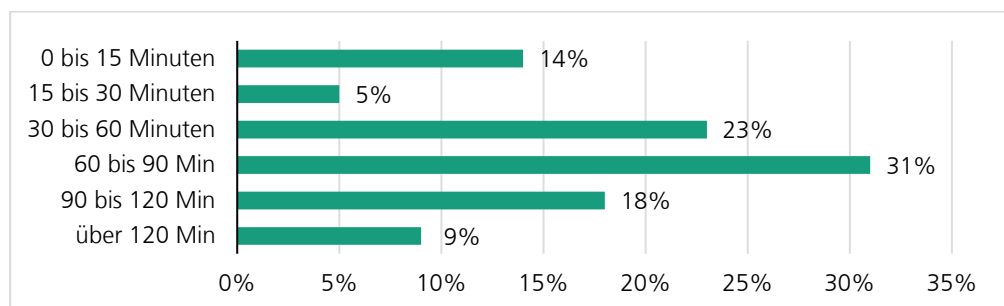


Abbildung 43 Wartezeiten an Laderampe.¹⁵⁷

Je nach Kundenstruktur und Tourenplanung unterscheidet sich die Planbarkeit des Be- und Entladeprozesses signifikant. Im Nah- und Regionalverkehr können Touren mit festem Kundenkreis bedient werden, so dass die gefahrene Strecke, sowie die Aufenthaltszeit aufgrund guter Ortskenntnis gut prognostiziert werden kann. Flexiblere Touren, wie sie häufig im Fernverkehr auftreten sind hingegen schwer planbar, da kurzfristig Anfragen zum Transport von Waren eintreffen können.

¹⁵⁵ Bildquelle: Fraunhofer IAO

¹⁵⁶ Endres, M. (2019)

¹⁵⁷ Eigene Darstellung in Anlehnung an SCI (2011)

5.4 Use-Cases

5.4.1 Use-Case I: »Handwerksverkehre«

Transporte von Handwerksunternehmen werden als Teil der Serviceverkehre dem Personenwirtschaftsverkehr zugeordnet. Zur Erbringung der Dienstleistung sind sowohl Handwerker als auch mitgeführte Werkzeuge, Ersatzteile oder sonstige Materialien erforderlich. Sie stellen demnach eine Kombination aus Güter- und Personenwirtschaftsverkehr dar.¹⁵⁸

Handwerksbetriebe agieren zu einem großen Teil lokal bzw. regional. Innerhalb eines Radius von bis zu 50km zum Betriebshof werden 67% der Handwerksverkehre abgewickelt, 17% im Radius von 50-150km und 13% innerhalb des gesamten Bundesgebiets (> 150 km).¹⁵⁹ Die Tourenplanung ist mit Unsicherheiten verbunden, da Kundenaufträge häufig erst kurzfristig bekannt sind und eingeplant werden können. Des Weiteren variiert die Aufenthaltsdauer beim Kunden stark und kann in der Planung nicht immer hinreichend abgeschätzt werden. Die Koordination der Transporte wird meist von einer zentralen Stelle durchgeführt.

Handwerksbetriebe setzen hauptsächlich leichte Fahrzeuge ein. Knapp 93% der eingesetzten Fahrzeuge haben ein Gesamtgewicht von bis zu 3,5t. Die Fahrzeuge werden typischerweise für den Weg zum Kunden und das Mitführen von Werkzeugen, Ersatzteilen oder Verbrauchs- und Baumaterialien verwendet. Einem Betrieb stehen im Schnitt drei Fahrzeuge zur Verfügung. Abhängig von der Handwerksbranche variiert die Flottengröße. So besitzen beispielsweise personenbezogene Dienstleister, wie Frisöre in der Regel weniger Fahrzeuge. Kfz-Dienstleister und Handwerker im Bauhauptgewerbe hingegen haben mehr Fahrzeuge als der Durchschnitt zur Verfügung. Die maximale Fahrleistung aller Handwerksbetriebe pro Tag liegt im Schnitt bei rund 151 km und die durchschnittliche jährliche Fahrleistung liegt bei ca. 18.000 km.¹⁶⁰

Abhängig vom Handwerksbetrieb kann es üblich sein, dass Mitarbeitende ihre Fahrzeuge nach Einsatz am Wohnort abstellen. Dieser müsste im Falle einer Elektrifizierung der Fahrzeuge mit Ladesäulen ausgestattet sein, damit das Fahrzeug über Nacht geladen werden kann. Dieses Kriterium ist allerdings selten erfüllt (siehe auch Kapitel 5.3.1). Optional können Fahrzeuge am Betriebshof geladen werden, wenn dort Lademöglichkeiten vorhanden sind. Da Handwerksbetriebe in großen Teilen lokal und regional agieren, sind die Reichweiten elektrischer Fahrzeuge ausreichend, um einen Tag abzudecken. Ein Zwischenladen beim Kunden ist daher normalerweise nicht erforderlich.

¹⁵⁸ Steinmeyer (2006)

¹⁵⁹ ZDH (2018)

¹⁶⁰ ZDH (2015)

5.4.2 Use-Case II: »Entsorgungsverkehr«



Abbildung 44 Müllsammelfahrzeug.¹⁶¹

Sammeln und Transportieren von Abfällen ist Aufgabe der Kommunen, wobei diese von Entsorgungslogistikunternehmen unterstützt werden können. Abhängig von der Abfallart werden diese entweder bei den Haushalten direkt eingesammelt oder die Haushalte bringen ihre Abfälle zu Depotcontainern.¹⁶²

In der Regel werden Haushaltsabfälle 7 bzw. 14 täglich eingesammelt. Bei der Tourenplanung werden mögliche Mengenschwankungen berücksichtigt, sodass etwa ein Drittel einer Fahrzeugflotte einen Puffer von 20% hat und nicht mit voller Auslastung eingeplant wird.¹⁶³ Weitere spezielle Anforderungen in der Entsorgungslogistik gilt es zu berücksichtigen. Alle Haushalte müssen angefahren werden, wobei eine möglichst geringe Strecke zurückgelegt werden soll. Eine Tour muss außerdem innerhalb der gesetzlich vorgeschriebenen Arbeitszeiten durchführbar sein. In der Regel verlassen die Fahrzeuge um 6:30 Uhr den Betriebshof, so dass eine Tour im Einsammelgebiet um 7:00 Uhr beginnt und im Schnitt gegen 15:15 Uhr endet. Bei den Entsorgungsfahrzeugen handelt es sich um Spezialfahrzeuge, bestehend aus den drei Hauptbestandteilen Fahrgestell, dem Aufbau zur Sammlung und Verdichtung des Mülls und der Hub- und Kippvorrichtung. Unterschiedliche Sammelverfahren bedingen zudem den Einsatz dafür vorgesehener Spezialfahrzeuge.

Transport, Verladen und Verdichten der Abfälle sind sehr energieintensive Prozesse. Der Verbrauch eines Fahrzeuges liegt zwischen 60 und 110 Liter/ 100 km. Dieser hohe Energieverbrauch bei Entsorgungsfahrzeugen muss bei einer Elektrifizierung im Besonderen berücksichtigt werden. Bei elektrischen Fahrzeugen ist die Tourenplanung anspruchsvoller, da die eingeschränkte Reichweite berücksichtigt werden muss. Die Nutzlast der Fahrzeuge bei Einsammelverkehren liegt zwischen 10,5 und 11 Tonnen, bei elektrisch betriebenen Fahrzeugen verringert sich die Nutzlast durch das hohe Gewicht der Fahrzeugbatterie. Dies wirkt sich ebenfalls auf die Tourenplanung aus, da für eine Abdeckung aller Sammelpunkte, Haushalte bzw. Touren insgesamt mehr Fahrzeuge erforderlich sind. Da eine hohe Ladekapazität benötigt wird, können die Fahrzeuge im Vorfeld leichter gebaut werden, um dem Nachteil des hohen Batteriegewichts entgegenzuwirken. Das Laden eines Fahrzeuges kann bislang nicht in den Prozess integriert werden. Elektrisch betriebene

¹⁶¹ Bildquelle: MAN Truck & Bus

¹⁶² Bilitewski et al. (2013)

¹⁶³ Bilitewski et al. (2018)

bene Fahrzeuge mit Ergänzung von Brennstoffzellen-Modulen zur Erhöhung der Reichweite könnten diesen Problemen zukünftig entgegenwirken.¹⁶⁴ Im Rahmen von Pilotprojekten wird dies bereits erprobt, beispielsweise wird in Bremen ein solches Fahrzeug bereits eingesetzt.¹⁶⁵ Grundsätzlich ist der Markt an Abfallsammelfahrzeugen in Deutschland mit 12.000 Fahrzeugen und jährlich 1.000 bis 2.000 Neuzulassungen überschaubar.¹⁶⁶

5.4.3 Use-Case III: »Industrielle Umlaufverkehre«

Industrielle Umlaufverkehre sind meist direkte Transporte zwischen einem Lager- oder Produktionsstandort, von welchem beispielsweise Vorprodukte »Just-in-Time« oder »Just-In-Sequence« zu einem Industriebetrieb befördert werden. Kunden sind meist produzierende Unternehmen aus den Bereichen des Maschinen- und Gerätebaus (B2B). Die Waren werden direkt in die Produktion eingespeist oder dienen dort als Puffer. Aufgrund der Just-in-Time Anforderungen der Produktion ist die pünktliche Auslieferung bei Umlaufverkehren ein besonders erfolgskritischer Faktor.¹⁶⁷ Große Lagerhaltungen beim Kunden werden durch die bedarfsgerechte Anlieferung der Waren vermieden, was zu einer hohen Lieferfrequenz führen kann. Typische Transportgüter sind Stückgüter, Ladungsgüter, industrielle Erzeugnisse, sowie Ersatzteile. Die Warenhaltung ist in der Regel nah am Kunden, um täglich lange Transportdistanzen zu vermeiden. Der Umfang der Dienstleistungen wird auf die jeweiligen Bedürfnisse des Kunden angepasst, weshalb die Vertragslaufzeiten meist mehrere Jahre, daher mindestens ein Jahr umfassen.¹⁶⁸ In Tabelle 8 sind die prozentualen Anteile der industriellen Kontraktlogistik dargestellt.

Tabelle 8 Prozentuale Anteile industrielle Kontraktlogistik.¹⁶⁹

Teilmarkt »industrielle Kontraktlogistik«	Anteil in %
Automobil	25%
Metall/ Maschinen	12%
Chemie	10%
Holz/Glas/ Kunststoff	10%
Lebensmittel	10%
Bau	9%
Mineralöl	6%
Öffentlicher Sektor	5%
Kleinbetriebe	3%
Sonstiger Handel	3%
Elektronik	2%
Dienstleistungen	2%
Energie	2%
Bekleidung	1%

Haben Logistikdienstleister ein Lager in der Nähe des Kunden, kann die tägliche Fahrleistung mit elektrischen Lkw gut abgedeckt werden. Die Tour startet üblicherweise am Betriebshof bzw. am Lager des Logistikdienstleisters. Dieser transportiert die Güter dann direkt zum Kunden, die Frequenz der Transporte und Anzahl der Fahrzeuge richtet sich nach Kundenbedarf. Die Fahrzeuge werden nach ihrem Einsatz am Betriebshof abgestellt und konventionelle Fahrzeuge können nun getankt werden. Grundsätzlich sind Umlauf-

¹⁶⁴ FAUN Umwelttechnik (o.J.):

¹⁶⁵ Buchholz (2020):

¹⁶⁶ VAK (o.J.)

¹⁶⁷ Schwemmer, M. (2018)

¹⁶⁸ Klaus, P. et al. (2009)

¹⁶⁹ Eigene Darstellung in Anlehnung an Schwemmer (2018)

verkehre gut planbar, da die tägliche Fahrleistung genau abschätzbar ist und die Entladezeiten beim Kunden bekannt sind. Dies ist eine gute Voraussetzung für eine Elektrifizierung der Fahrzeuge und das Laden über Nacht am Betriebshof bietet eine mögliche Prozessintegration. Dennoch können elektrisch betriebene Lkw aufgrund der längeren Ladezeiten nicht im selben Umfang eingesetzt werden, wie konventionell betriebene Fahrzeuge. Viele Fahrzeuge sind fast kontinuierlich in Umlaufverkehren im Einsatz, bei elektrischen Lkw die nachts geladen werden müssen, verringert sich die Einsatzzeit. Die Flexibilität des Dienstleisters ist somit geringer, da er weniger einsatzbereite Fahrzeuge zur Verfügung hat. Die Verfügbarkeit allerdings muss auch bei kurzfristigen Sonderfahrten gewährleistet sein. Problematisch kann die verminderte Nutzlast batterieelektrischer Lkw sein, wenn die gesamte Nutzlast für einen Transport benötigt wird, wie in einem Experteninterview erläutert wurde. Elektrische Lkw werden dennoch bereits im Rahmen von Pilotprojekten auf ihre Eignung erprobt. Ein 25 t Lkw wird von einem Logistikdienstleister für einen Umlaufverkehr mit einer Tagesfahrleistung von knapp 170 km eingesetzt, was zwölf Touren entspricht. Während der Be- und Entladevorgänge am Betriebshof des Logistikdienstleisters werden die Fahrzeuge zwischengeladen.¹⁷⁰



Abbildung 45 Sattelzugmaschine im Umlaufverkehr.¹⁷¹

Im Jahr 2017 generierten im Bereich der industriellen Kontraktlogistik die 20 umsatzstärksten Logistikunternehmen etwa 7 Mrd. €. ¹⁷² Eingesetzt werden hauptsächlich schwere Lkw und Sattelzugmaschinen wie exemplarisch in Abbildung 45 dargestellt. Der Bestand an Sattelzugmaschinen, die zu einem großen Teil im Fernverkehr eingesetzt werden wird für 2017 auf 200.000 geschätzt. Hinzu kommt der Bestand an schweren Lkw (> 9 t) exklusive der Sattelzugmaschinen von schätzungsweise 152.000 Fahrzeugen. Auch diese können teilweise dem Fernverkehr zugeordnet werden, anteilig aber auch dem Nahverkehr.¹⁷³

¹⁷⁰ Springer Fachmedien München (2020)

¹⁷¹ Bildquelle: Scania CV AB

¹⁷² Schwemmer, M. (2018)

¹⁷³ Schwemmer, M (2018) in Anlehnung an KBA (2018), BAG (2018)

5.4.4 Use-Case IV: »Nahverteilerverkehr«

Anforderungen an Tank- und
Ladeinfrastrukturen aus
Nutzersicht



Abbildung 46 7,5-Tonner mit Planenaufbau während eines Entladevorgangs in der Stuttgarter Innenstadt.¹⁷⁴

Als Nahverkehr werden meist Transporte bezeichnet, die innerhalb eines Umkreises von 50km um den Betriebshof/ das Umschlagslager stattfinden. In Abbildung 46 ist beispielhaft eine Belieferung durch einen Nahverteilerverkehr in der Stuttgarter Innenstadt dargestellt. Es handelt sich hierbei um Stückguttransporte, wobei das Gewicht der Waren in der Regel zwischen 30kg und 2.500kg liegt. Im klassischen Stückgutverkehr werden viele unterschiedliche Branchen bedient (vgl. Tabelle 9). Aufgrund des einfachen Handlings, beispielsweise der Stapelbarkeit der Güter sind die Transportanforderungen in Nahverteilerverkehren gering. Diese sind als Sammel- oder Verteilfahrten organisiert, die aufgrund ihrer begrenzten Tourenlänge von ~100km große Potenziale für den Einsatz batterieelektrischer Fahrzeuge bieten. Sie beschreiben die Abholung von Waren an mehreren Standorten im Vorlauf sowie die Belieferung von mehreren Kunden im Nachlauf (siehe Kapitel 5.2), wobei die Waren in Depots ein- oder mehrstufig umgeschlagen werden.¹⁷⁵

Insbesondere in der Innenstadtlogistik werden aufgrund der beengten Platzverhältnisse möglichst wendige Fahrzeuge eingesetzt. Aufgrund von Ein- und Durchfahrtsbeschränkungen für schwere Lkw werden meist Nutzfahrzeuge von 7,5t bis 12t oder Solo-Lkw von 12t bis 18t eingesetzt. In der Regel liegt das Fassungsvermögen des Laderaums zwischen 15 und 18 Palettenstellplätzen. Zusätzlich benötigte Entlademittel wie Hubwagen können während der Fahrt unter beladenen Paletten fixiert werden.

Es ist grundsätzlich zwischen Belieferung im öffentlichen Raum und Belieferung an befahrbarer Warenannahme zu unterscheiden. Aufgrund der beschränkten Tourenlänge ist eine Elektrifizierung grundsätzlich möglich, dennoch kann je nach Transportleistung ein Zwischenladen erforderlich sein. Das Laden bei Empfängern oder Verladern ist als Möglichkeit in Kapitel 5.3.4 erläutert worden, die Machbarkeit hängt individuell von den jeweiligen Standzeiten ab. Diese variieren stark, je nach Warenart und Anliefersituation. Nahverkehrstransporte im Stückgutsegment sind häufig regelmäßig organisierte Fahrten und unterliegen einer besseren Planbarkeit, weshalb Ladezeiten bei ausreichend langen Standzeiten besser integriert werden könnten.

Der Umsatz im Stückgutmarkt betrug im Jahr 2017 pro beförderter Tonne 220€ bei einem gesamten Transportaufkommen von etwa 53 Mio. Tonnen. Voraussichtlich wird der Markt künftig mit der Herausforderung steigender Aufträge bei kleineren Transportgrößen konfrontiert sein, was zu einer höheren Lieferfrequenz führt. Logistikunternehmen

¹⁷⁴ Bildquelle: Fraunhofer IAO

¹⁷⁵ Schwemmer, M. (2018)

besitzen daher ein flächendeckendes Netz an Depots in Deutschland, welche häufig in Kooperation mit anderen Dienstleistern genutzt werden, begründet durch das Erzielen einer hohen Auslastung sowie der Reduzierung von Leerfahrten.¹⁷⁶

5.4.5 Use-Case V: »Kurier-, Express-, Paketdienste«

Ein weiteres Marktsegment decken Kurier-, Express- und Paketdienstleistungen (KEP-Dienstleistungen) ab. Die drei Teilbereiche der KEP-Dienstleistungen unterscheiden sich hinsichtlich Lieferzeiten, Eigenschaften der Sendungsgüter sowie angebotener Servicezusatzleistungen.

Mit 84% im Jahr 2019 bilden Paketdienstleistungen das größte Sendungsvolumen in der KEP-Branche ab.¹⁷⁷ Die Sendungsstruktur zeichnet sich durch eine hohe Heterogenität der Güter aus, da Kunden aus der Industrie, dem Handel, dem Dienstleistungsbereich sowie private Haushalte beliefert werden. Die Güter in der KEP-Dienstleistung sind mit durchschnittlich 7kg Gewicht deutlich leichter, als bei den Ladungs- und Teilladungsverkehren im traditionellen Speditionsgewerbe.¹⁷⁸ Typischerweise kommen in den Verteilertouren leichte Nutzfahrzeuge (3,5t) zum Einsatz¹⁷⁹, wobei unternehmensabhängig auch Fahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 7,5t eingesetzt werden können.¹⁸⁰ Insbesondere für Abholungen bei Geschäftskunden mit großem e-Commerce-Fokus können ebenfalls punktuell Fahrzeuge mit bis zu 15t eingesetzt werden. KEP-Dienstleistungen sind ebenfalls als Sammel- und Verteilerverkehre organisiert, wie in Abbildung 47 dargestellt.

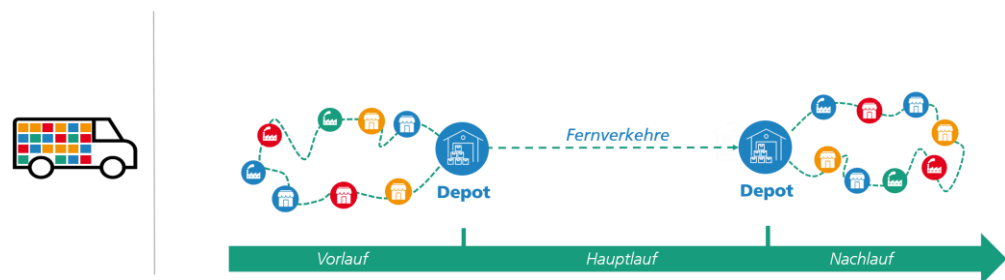


Abbildung 47 Distributionsstruktur von Paketzustellungen

Im Vorlauf werden die Waren eingesammelt und zum Depot befördert. Laut Experten werden diese Sammeltouren im Nahverkehr häufig an Speditionen vergeben. Beispielhaft kann der Einsatz mittelschwerer Lkw, 24t mit Wechselbrücke genannt werden. Diese bieten den Vorteil, dass der Lkw bei Ankunft am Depot und nach Abstellen der Wechselbrücke durch den Spediteur relativ zügig anderweitig im regionalen Umfeld eingesetzt werden kann. Die Sendungsgüter werden im Depot nach Zustelladresse sortiert, an den jeweiligen Ausgang befördert, in große Lkw beladen und somit für den Fernverkehr vorbereitet. Expertengesprächen zufolge werden häufig wieder Lkw mit Wechselbrücken für die Beförderung im Hauptlauf vom Versand- zum Empfängerdepot eingesetzt. Aufgrund der limitierenden Faktoren elektrischer Fahrzeuge sind Speditionen bislang gehemmt, diese einzusetzen. Bei den Verkehren zwischen den Depots handelt es sich in der Regel um Fernverkehrstransporte, weshalb die Reichweite eine Restriktion für die Elektrifizierung sein kann. Unternehmensseitig besteht die Hoffnung, dass mit zunehmender Serienfertigung elektrischer Lkw der Ausbau öffentlicher Ladeinfrastruktur voranschreitet. Aufgrund hoher Investitionskosten können Unternehmen in der Regel keine eigene Ladeinfrastruktur aufbauen.

¹⁷⁶ Schwemmer (2018)

¹⁷⁷ BIEK (2020)

¹⁷⁸ Kille, C. (2009)

¹⁷⁹ Brabänder, C (2020)

¹⁸⁰ BIEK (2017)

Im Empfangsdepot werden die Sendungsgüter schließlich für den Nachlauf vorbereitet, indem sie jeweils einer Verteilertour zugeordnet werden. Erfahrungsgemäß kann, je nach Lage des Depots, die Anfahrt in ein Zustellgebiet sehr lang sein. Bei Elektrifizierung ist dies aufgrund beschränkter Reichweite im Besonderen zu berücksichtigen. Die Zustellung zu den Empfängern auf der letzten Meile erfolgt im Laufe des Tages etwa zwischen 8:00 und 15:00 Uhr.¹⁸¹

Die Paketbranche steht durch ihre Präsenz im Stadtbild im öffentlichen Fokus, wenn die Minimierung innerstädtischer Schadstoffemissionen gefordert wird. Von der Politik diskutierte Einfahrverbote für dieselbetriebene Zustellfahrzeuge setzen Paketdienstleister vermehrt unter Handlungsdruck emissionsfreie Fahrzeuge einzusetzen. Hinzu kommt der Imagegewinn der KEP-Unternehmen durch den Einsatz alternativer Antriebe. Unternehmen müssen hierbei abwägen, ob ihnen genügend Touren unter 100km vorliegen, die sich grundsätzlich für eine Elektrifizierung gut eignen. Erste Pilotprojekte mit elektrischen Vor- und Serienfahrzeugen haben gezeigt, dass sich mit der heute verfügbaren Batterietechnologie etwa 25% aller Zustelltouren batterieelektrisch umsetzen lassen. Für die restlichen 75% wird die Wasserstofftechnologie als vielversprechend angesehen. Hierbei darf jedoch die Fahrzeugtechnik, das Gewicht der Batterie und der Brennstoffzelle nicht zu Lasten der verfügbaren Nutzlast gehen.

Die Elektrifizierung der Zustelltouren auf der letzten Meile ist unter Berücksichtigung der Reichweiten möglich. Laut Experten ist allerdings aufgrund sehr kurzer Standzeiten beim Empfänger zwischen ein bis drei Minuten ein Zwischenladen nicht möglich. Laden an öffentlichen Ladeinfrastrukturen führt zu Konkurrenzen mit anderen Verkehrsteilnehmern, auch hier muss die Leistungsaufnahme gesichert werden. In ländlichen Gebieten, welche von mangelnder Ladeinfrastruktur in besonderem Maße betroffen sind, bleiben moderne Diesel-Fahrzeuge weiterhin die priorisierte Wahl der KEP-Dienstleister.

Bei der Distributionsstruktur der KEP-Verkehre kann zwischen den Direktverkehren (einstufiges Transportnetz) und Hub-and-Spoke-Netzen (mehrstufiges Transportnetz) unterschieden werden. In Direktverkehrsnetzen erhalten alle Depots des gesamten Transportnetzes von jedem beliebigen Depot Waren bzw. können jeden beliebigen Standort beliefern. In Hub-and-Spoke-Netzen werden die in den Depots befindlichen Waren über Hubs, sogenannte Umschlagsknoten, geleitet. Im Hub werden Sendungsgüter konsolidiert und anschließend entsprechend der Zustelladressen einem Depot zugeordnet. Solche Transporte über Hubs werden als Systemverkehre bezeichnet.¹⁸² Aus den Expertengesprächen wird ersichtlich, dass eine Mischform der vorgestellten Distributionsstrukturen üblich ist. Depots und Hubs werden in der Unternehmenspraxis gleichermaßen zur Konsolidierung und Bündelung der Pakete genutzt.

Die Entwicklungen von Umsatz und Sendungsvolumen zeigen, dass die Nachfrage nach KEP-Dienstleistungen hoch ist. Gegenüber dem Jahr 2000 verzeichnet die Branche eine Umsatzverdopplung, wobei im Jahr 2019 ein Umsatz von 21,3 Mrd. Euro bei einem Sendungsvolumen von 3,65 Mrd. Paketen verzeichnet wurde.¹⁸³ Im Schnitt liegt das Umsatzwachstum seit dem Jahr 2000 bei 4,1%. Der Online-Handel trägt insbesondere dazu bei, dass der Anteil an Waren, insbesondere im B2C-Bereich seit dem Jahr 2009 kontinuierlich steigt.¹⁸⁴ Der Fahrzeugbestand im KEP-Bereich liegt bei rund 140.000 Fahrzeugen, anteilig 25% Pkw, 66% leichte Nutzfahrzeuge mit einem Gesamtgewicht <7,5t und 9% Lkw >7,5 t Gewicht. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die schweren Lkw hauptsächlich für die Depotverkehre im Hauptlauf eingesetzt werden. Über 90% der Fahrzeuge werden in der Zustellung auf der letzten Meile eingesetzt.¹⁸⁵

¹⁸¹ Ries (2019)

¹⁸² Cardeneo (2008)

¹⁸³ BIEK (2020)

¹⁸⁴ BIEK (2020)

¹⁸⁵ BIEK (2018)

5.5 Forderungen an die Politik

Die durch die Politik gestellten Rahmenbedingungen können Unternehmen in ihren strategischen Entscheidungen beeinflussen und zum nachhaltigen Handeln, wie beispielsweise der Anschaffung einer emissionsarmen Fahrzeugflotte, motivieren. Grundsätzlich sollten Anreize geschaffen werden, um eine Privilegierung umweltfreundlicher Antriebstechnologien zu erzielen. Mögliche Maßnahmen sind längere Lieferzeitfenster und eine Mautminderung für umweltfreundliche Fahrzeuge sowie der Ausbau von Umweltzonen. Bisher sehen sich Unternehmen, die umweltfreundlich agieren, im Nachteil, da sie zunächst hohe Investitionskosten tätigen müssen. Die Politik kann durch gesetzte Rahmenbedingungen eine gleiche Ausgangslage und somit faire Wettbewerbsbedingungen für alle schaffen. Restriktionen konventioneller Fahrzeuge können dabei eine Maßnahme sein.

Ein weiterer Aspekt ist der Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur, welcher neben der Elektrifizierung der Unternehmensstandorte erfolgen muss. Hierbei besteht Unternehmensseitig der Wunsch, beim Ausbau der betrieblichen Ladeinfrastruktur stärker durch Bund- und Landesförderungen unterstützt zu werden. Eine Ausweitung der Förderprojekte wäre deshalb wünschenswert. Insbesondere sehen Unternehmen hohe Investitionskosten beim Aufbau eigener Wasserstoff-Tankinfrastrukturen als Hemmnis für einen Wechsel des Antriebsstrangs.

Ebenso wünschen sich Unternehmen einen Wandel in der gesellschaftlichen und medialen Wahrnehmung der Transportbranche. Die Logistik ist ein wichtiger Wirtschaftszweig, der von der Politik zu wenig Beachtung findet. Des Weiteren leistet diese einen wichtigen Beitrag zur Versorgung von Städten und Industrie. Die Branche ist ein wichtiger Bestandteil der Energie- und Verkehrswende und muss deshalb mit geeigneten Maßnahmen durch den Gesetzgeber unterstützt werden.

Nicht zuletzt wird Elektrifizierung als große Chance für Spediteure in Deutschland gesehen, nachhaltige Transportlösungen als Alleinstellungsmerkmal auf dem europäischen Markt anbieten zu können.

Einige Experten sehen sehr große Potenziale in synthetischen Kraftstoffen als Brückentechnologie zu Wasserstoff, die beispielsweise aus Abfällen hergestellt werden können. Die Nutzung bereits vorhandener Tankinfrastrukturen wäre möglich, ebenso müsse der Logistikprozess nicht angepasst werden, was eine Umsetzung vereinfacht (vgl. Kapitel 2.5).

5.6 Generelle Erkenntnisse aus den Expertengesprächen

Im Rahmen dieser Studie wurden Gespräche mit Flottenbetreibern und Experten aus der Transport- und Logistikbranche geführt. Ziel war es, Anforderungen an die Tank- und Ladeinfrastruktur aus Nutzersicht zu ermitteln. Um ein möglichst breites Meinungsbild einzuholen, wurden Experten aus der klassischen Speditionslogistik, der KEP-Branche, sowie der Entsorgungslogistik und von Handwerksbetrieben befragt. Hierbei zeigte sich, dass abhängig von der Branche und Transportstruktur die Elektrifizierungspotenziale unterschiedlich bewertet wurden. So werden insbesondere für Fahrzeuge mit energieintensiven Aufbauten wie Müllkipper- und Verdichter oder Schwerlasttransporte über längere Distanzen mit einem niedrigen Elektrifizierungspotenzial bewertet. Große Skepsis äußerten die Experten bei der Integration des batterieelektrischen Ladens in bestehende Logistikprozesse. Diese sollten sich durch Elektrifizierung nicht ändern, da Prozessanpassungen mit zusätzlichen Kosten und Verzögerungen verbunden sind. Um die Flexibilität des Fahrzeugeinsatzes nicht einzuschränken, sollte die Betankungszeit bei Wasserstofffahrzeugen der eines Dieselfahrzeuges entsprechen. Ebenso dürfe sich die Nutzlast der Fahrzeuge aufgrund von schweren Batterien nicht verringern. Dies wurde insbesondere

von Logistikern angemerkt, die schwere Lkw im Fern- und Regionalverkehr einsetzen. Als limitierender Faktor für einen flächendeckenden Einsatz wird die Reichweite und die Ladedauer batterieelektrischer Fahrzeuge gesehen. Die größten Einsatzpotenziale sehen die Experten deshalb bei Touren im Regional- und Nahverkehr bis 100km.

Grundlegend für eine Elektrifizierung sei die Planbarkeit der Tour. So müssen Lademöglichkeiten im Logistikprozess schon bei der Disposition berücksichtigt und bestenfalls reserviert werden können. Hierzu ist allerdings ein flächendeckender Ausbau an öffentlicher Ladeinfrastruktur in Industriegebieten, sowie Tank- und Rastanlagen notwendig. Grundsätzlich sind die Unternehmen bereit bei entsprechender Unterstützung durch den Gesetzgeber in eigene Infrastrukturen zu investieren.

Im Bereich alternativer Antriebe wurden bei der Fahrzeugbeschaffung elektrische Nutzfahrzeuge bisher aufgrund der schlechten Verfügbarkeit nicht berücksichtigt, welche insbesondere im Bereich mittelschwerer und schwerer Nutzfahrzeuge besteht. Hauptgrund hierfür sind nicht die höheren Anschaffungskosten der Fahrzeuge, sondern die fehlende Tank- und Ladeinfrastruktur. Diese limitiert bereits heute den großflächigen Einsatz von LNG/CNG-Fahrzeugen, welche nur punktuell auf Touren mit entsprechender Tankinfrastruktur eingesetzt werden können. Hauptgrund für die Anschaffung gasbetriebener Fahrzeuge ist die Nachfrage einzelner Großkunden mit eigenen Nachhaltigkeitsprogrammen, welche schon heute bereit sind, die Mehrkosten nachhaltiger Transporte zu tragen.

In Bezug auf die Herstellung von Wasserstoff gaben die Experten an, dass dieser bevorzugt durch emissionsfreie Technologien, wie Photovoltaik- oder Windkraftanlagen, hergestellt werden soll. Beim Einsatz fossiler Energieträger wie Kohle oder Erdgas soll das CO₂ gespeichert werden, um eine CO₂-Neutralität der gesamten Prozesskette sicherzustellen.

6 Simulation einer Ladeinfrastruktur an lokalen Betriebshöfen

6.1 Einführung

Elektrifizierte Nutzfahrzeuge könnten zukünftig über eine Ladeinfrastruktur auf dem eigenen Betriebshof geladen werden, ggf. ergänzt durch eine öffentliche Ladeinfrastruktur, zum Beispiel an Autobahnen oder in benachbarten Industriegebieten. Anhand von konkreten Simulationen eines KEP-Standorts und dem Betriebshof einer Spedition werden im Folgenden die Fahrzeuganforderungen, die Ladeinfrastrukturbedarfe sowie die Auswirkungen der Fahrzeugladungen auf die Energieinfrastruktur, insbesondere hinsichtlich der elektrischen Spitzenlasten, untersucht. Auf den Betriebshöfen werden dabei unterschiedliche Nutzergruppen mit ihren spezifischen Mobilitätsverhalten modelliert, um Aussagen für Fahrzeuge im eher regionalen Einsatz aber auch im Fernverkehr betrachten zu können. Anhand der Ergebnisse werden zusätzlich zu den lokalen Anforderungen auch Bedarfe für eine öffentliche Ladeinfrastruktur qualitativ abgeleitet. Der Fokus der Betrachtung liegt dabei auf mittelschweren bis schweren Lkw (ca. 12-40t Gesamtgewicht) sowie LNFZ im regionalen Verteil- und Sammelverkehr.

6.2 Simulationsszenarien

Für die Simulation wurden auf Basis der Ergebnisse in Kapitel 5, der technischen Randbedingungen aus Kapitel 3.1 und ergänzenden Literaturrecherchen (siehe auch Kapitel 2 sowie den Erkenntnissen aus früheren Forschungsprojekten das Mobilitätsverhalten für zwei exemplarische Betriebshöfe definiert (KEP und Spedition). Es handelt sich hierbei nicht um real existierende Standorte, sondern um verallgemeinerte, realitätsnahe Betriebshöfe unter möglichst breiter Berücksichtigung der für den Volumenmarkt relevanten Nutzergruppen in den betrachteten Branchen (vgl. Kapitel 5.4). Hierbei gilt es zu betonen, dass auch innerhalb der Branchen und für verschiedene Betriebe je nach Geschäftsmodell, Organisation und Kundenstruktur unterschiedliche Mobilitätsverhalten vorliegen können und eine verallgemeinerte Simulation somit nicht jedem Einzelfall gerecht werden kann.

Für den KEP-Betriebshof werden folgende Nutzergruppen analysiert:

- *Verteil- und Sammelverkehre*: Der regionale Einsatz von LNFZ $\leq 3,5t$ Gesamtgewicht zur Paketauslieferung und -abholung. Es werden eigene Fahrzeuge (Nachtladung auf dem Betriebshof) und Fahrzeuge externer Dienstleister betrachtet.
- *Depot-Direktverkehre*: Deutschlandweite Langstreckenverbindungen zwischen den KEP-Depots mit 24t-Wechselbrücken-Lkw bei hoher Fahrzeugauslastung ohne längere Standzeiten über Nacht.
- *Systemverkehre*: Internationale Langstreckenverbindungen zwischen den KEP-Hubs mit 24t-Wechselbrücken-Lkw und längeren Standzeiten am Betriebshof.

Für den Speditionsbetriebshof werden folgende Nutzergruppen analysiert:

- *Verteil- und Sammelverkehre*: Regionale Kundenbelieferung und Warenabholung mit 12t-Lkw. Es werden eigene Fahrzeuge (Nachtladung auf dem Betriebshof) und Fahrzeuge externer Dienstleister betrachtet.
- *Industrielle Umlaufverkehre*: Zulieferung für feste Werke über mehrere Touren am Tag mit optionaler Möglichkeit zur Zwischenladung am Betriebshof und am Werk. Es werden eigene 40t-SZM (Nachtladung auf dem Betriebshof) und Fahrzeuge externer Dienstleister betrachtet.

- *Nationaler Güterverkehr*: Überregionaler, mehrtägiger Langstreckenverkehr mit wechselnden Touren. Einsatz eigener 40t-SZM mit Standzeiten über Nacht am Betriebshof oder externen Standorten (z.B. Autohöfe).

Die jeweils angesetzten Mobilitätsverhalten der Nutzergruppen (z. B. Anwesenheitszeiten am Betriebshof und Fahrstrecken) und die weiteren Randbedingungen für die Simulation (z. B. Elektrifizierungsszenarien, Ladeleistungen, Fahrzeugverbräuche) können den nachfolgenden Kapiteln entnommen werden.

6.3 Elektrifizierungsszenarien

Grundsätzlich sollen sich die Simulationen auf einen theoretischen Anteil an elektrifizierten Lkw und Sattelzügen im Jahr 2030 beziehen. Für den Szenario-Ansatz wurden, unter Berücksichtigung der bereits in den vorherigen Kapiteln dargestellten Studienergebnisse, verschiedene Überlegungen mit einbezogen, welche im Folgenden kurz skizziert werden.

In wissenschaftlichen Studien mit Hochlaufsznarien für die Elektromobilität liegt der Fokus häufig auf Pkw. Die Szenarien werden beispielsweise auf das Jahr 2050 ausgerichtet, wobei dann das Erreichen der Klimaziele oder eine vollständige Klimaneutralität für diesen Zeitpunkt als Zieldefinition festgelegt wird. Für die Mobilität werden daraus die notwendigen Hochlaufkurven abgeleitet, wobei in der Regel ein Mischszenario aus verschiedenen alternativen Antrieben zugrunde liegt. Ein aktuelles Beispiel für eine solche Studie, bei der auch explizit der Lkw-Verkehr betrachtet wird, hat das Fraunhofer ISE erstellt.¹⁸⁶ Im Ergebnis wird für 2030 in allen Szenarien nur von einem marginalen Anteil der alternativen Antriebe bei Lkw im Bereich von ein bis fünf Prozent ausgegangen und erst in den folgenden beiden Jahrzehnten mit einem wesentlichen Markthochlauf gerechnet.

Im Pkw-Bereich lautet das erklärte Ziel der Bundesregierung bis zu 10 Mio. Elektrofahrzeuge im Bestand im Jahr 2030.¹⁸⁷ Bei heute rund 48 Mio. Pkw in Deutschland entspricht dies einem Anteil von gut 20%. Aufgrund ähnlicher technischer und wirtschaftlicher Randbedingungen und der Verfügbarkeit von LNFZ erscheint eine die Größenordnung auch für diese Fahrzeugklasse nicht unrealistisch.

Die Interviewpartner aus dem Anwenderkreis im Rahmen dieser Studie sehen auf Basis heutiger Fahrzeugtechnologien je nach Branche und Nutzergruppe kurzfristig Potenziale von 20% bis 25% für eine Elektrifizierung ihrer Fahrzeuge (siehe Kapitel 5.4). Für schwere Lkw wird eher von niedrigeren Potenzialen bei der Elektromobilität ausgegangen und eher das Potenzial für Wasserstofftechnologien gesehen.

Werden in einem hypothetischen Ansatz die Quoten für alternative Antriebe für die öffentliche Beschaffung entsprechend der EU-Vorgaben auf alle Neuzulassungen übertragen (siehe Kapitel 2.2), liegt eine grobe Bestandsabschätzung für LNFZ für 2030 bei rund 27% und bei schwereren Lkw je nach Gewichtsklasse bei 6% bis 15%.¹⁸⁸

Soll die CO₂-Reduktion 2030 im Verkehrssektor von -37% gegenüber 2020 entsprechend dem Bundesklimaschutzgesetz alleine durch den Fahrzeugbestand erwirkt werden (siehe Kapitel 2.2), wäre ein Anteil an Elektrofahrzeugen von rund 20% bis 30% not-

¹⁸⁶ Sterchele, P. et al (2020)

¹⁸⁷ BMU (2020)

¹⁸⁸ Eigene Abschätzung. Bezogen auf jährliche Neuzulassungszahlen analog 2018 und unter der Annahme von einem Wachstum des Fahrzeugbestands von 5% bis 2030 bezogen auf den Bestand von 1.1.2019. Außerbetriebnahmen der elektrischen Neufahrzeuge wurden vernachlässigt. Die Quotenvorgabe für »saubere Fahrzeuge« wurde zur Hälfte als Quote für Elektrofahrzeuge angesetzt.

wendig, je nachdem, wie stark die Emissionen von Verbrennern bis dahin reduziert werden können (Annahme: -10% bis -20% im Bestand).¹⁸⁹ Je nach Fahrzeugklasse würde dies, unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Haltedauern, einer Quote von rund 20% bis 50% bei den jährlichen Neuzulassungen ab sofort bedeuten.

Als Szenario für die Simulationen wird ein Elektrifizierungsanteil von 30% für LNFZ und von 20% für schwerere Lkw und Sattelzüge angesetzt. Das Szenario wird dabei eher progressiv gewählt, da von einem weiteren Anstieg der Elektromobilität auch über das Jahr 2030 hinaus ausgegangen wird. Eine Überschätzung für das Jahr 2030 könnte somit ein realistisches Szenario wenige Jahre später darstellen. Außerdem erscheint bei einer Elektrifizierung mittelfristig keine Gleichverteilung über alle Nutzfahrzeugbetreiber als wahrscheinlich, sondern eher eine lokale Häufung bei einzelnen Unternehmen. Bei Bedarf wird in den Simulationen auf ganze Fahrzeuge gerundet.

6.4 Aufbau der Simulation und Randbedingungen

Die Simulationen für die beiden Standorte und die jeweils drei Nutzergruppen gliedert sich jeweils in zwei wesentliche Teile: 1.) Die Simulation der Mobilität der betrachteten Fahrzeuge, aus der sich die individuellen Anwesenheitszeiten am Betriebshof, die Fahrstrecken sowie die daraus abgeleiteten Energiebedarfe ergeben. 2.) Die Simulation der Ladeinfrastruktur mit der durch die Fahrzeuge abgerufenen Ladeleistungen. Sämtliche Simulationen wurden in Matlab/Simulink (2015b) durchgeführt. Die Simulationsdauer beträgt ein Jahr in Minutenauflösung. Anwesenheitszeiten werden in Fünfminutenauflösung modelliert und interpoliert. Es wurden nur bundeseinheitliche Feiertage berücksichtigt.

Für die Simulation der Mobilität wurden verschiedene Annahmen bzgl. Anwesenheitszeiten, Tourendauern, Fahrstrecken und externen Lademöglichkeiten auf Basis der Interviews mit den Anwendungspartnern und ergänzender Literaturrecherchen getroffen. Ziel war es, über entsprechende Verteilungen die gesamte Bandbreite des Mobilitätsverhaltens der Nutzergruppen realitätsnah abzubilden und zusätzlich auch individuelle, tägliche und ggf. jahreszeitliche Schwankungen zu berücksichtigen. Hierbei wurden typische Profile für alle Fahrzeuge des Fuhrparks erstellt und eine Teilmenge davon elektrifizierten Fahrzeugen zugeordnet. Die Auswahl erfolgte i.d.R. zufällig, bei geringen Fahrzeugzahlen wurde jedoch im Einzelfall manuell darauf geachtet, möglichst die komplette Bandbreite z.B. bzgl. der möglichen Tourenstrecken mit zu erfassen. Eine darüberhinausgehende systematische Zuordnung bestimmter Toureneigenschaften zu den Elektrofahrzeugen (z.B. bestimmte Limits für die möglichen Fahrstrecken) erfolgte nicht. Nutzergruppen, welche sowohl betriebseigene Fahrzeuge als auch externe Fahrzeuge (z.B. von Sub-Unternehmen) beinhalten können, wurden für beide Varianten separat ausgewertet.

Für die Simulation der Ladeleistungen wurden verschiedene Simulationskomponenten einer modularen Microgrid-Simulation aus dem bis Ende 2020 laufenden SINTEG-Projekt »c/sells« verwendet und den hier vorliegenden Szenarien angepasst.¹⁹⁰ Über das Modul Elektrofahrzeuge können die modellierten Anwesenheitsprofile der Elektrofahrzeuge und die Kilometer der jeweils nächsten Fahrt für jede Anwesenheit an den Betriebshöfen eingelesen werden. Weiterhin wird die Anzahl der Fahrzeuge, die Batteriegröße, der Verbrauch, die maximale Ladeleistung, der Ladewirkungsgrad und der Ladestand (SOC) zu Beginn der Simulation für jedes Fahrzeug definiert. Der Start SOC zu Beginn der Simulation wird auf 100% festgelegt. Der Ladewirkungsgrad im Fahrzeug wird konstant und

¹⁸⁹ Eigene Abschätzung. Annahme eines Wachstums des Fahrzeugbestands von 5% bis 2030 bezogen auf den Bestand von 1.1.2019. Annahme einer Gleichverteilung der CO₂-Minderungsanforderungen auf alle Verkehrssektoren und Fahrzeugklassen.

¹⁹⁰ c/sells (2020)

für alle Fahrzeugtypen mit 95% angenommen. Der Fahrzeugverbrauch für 2030 wird für jede Fahrzeugklasse individuell festgelegt. Da es insbesondere für schwerere Lkw noch keine Praxiswerte von Serienfahrzeugen gibt, wird der Verbrauch in Anlehnung an bisherige Testfahrzeuge, Herstellerangaben und Literaturwerten definiert.¹⁹¹ Praxiswerte liegen dabei erfahrungsgemäß über den Normwerten, Entwicklungspotenziale bis 2030 könnten diesen Effekt jedoch ausgleichen. Bei LNFZ ist die Entwicklung schon weiter und Serienfahrzeuge mit entsprechenden Normwerten sind bereits im Markt (siehe Kapitel 2.3). Auch hier werden höhere Praxiswerte angesetzt. Im städtischen Lieferverkehr ist eher von geringeren Verbräuchen auszugehen durch die hohe Zuladung könnte dies dagegen egalisiert werden. Tatsächliche Verbrauchswerte hängen jedoch immer auch vom Einzelfall ab, insbesondere auch von der Topographie der Fahrstrecken und ggf. von notwendigen Nebenaggregaten. Die für die Simulation einheitlich definierten Verbrauchswerte für 2030 können Tabelle 9 entnommen werden. Die weiteren technischen Fahrzeugdaten werden in den jeweiligen Szenarien individuell definiert und ggf. variiert.

Tabelle 9 Für die Simulation angesetzte Verbrauchswerte für Elektrofahrzeuge im Jahr 2030.

Fahrzeugklasse (zul. Gesamtgewicht)	Verbrauch pro 100km (2030)
LNFZ (bis 3,5t)	25 kWh
Leichter Lkw (12t)	80 kWh
Mittelschwerer Lkw (24t)	95 kWh
Mittelschwerer Lkw mit Anhänger	115 kWh
Sattelschlepper (bis 40t)	130 kWh

In der Praxis wird die maximale Ladeleistung von den Fahrzeugen i.d.R. nicht über die komplette Ladedauer abgerufen. Der tatsächliche Wert hängt dabei wesentlich vom Ladezustand (SOC, state of charge) und der bisherigen Belastung der Batterie ab (z.B. der Erwärmung durch eine längere Autobahnfahrt). Insbesondere bei sehr hohen Ladezuständen steigt der Innenwiderstand der Batterien, was zu einer Erwärmung und folglich einer Drosselung der Ladeleistung führt. Die tatsächlichen Ladekurven können dabei für unterschiedliche Fahrzeuge und Hersteller sehr verschieden ausfallen.¹⁹² Bei höheren maximalen Ladeleistungen wird i.d.R. früher gedrosselt als bei niedriger Leistung. Um diesen Umstand bei der Simulation zu berücksichtigen wurde ein SOC-Abhängiger Abfall der Ladeleistung ab einem bestimmten SOC-Wert angenommen. Der Grenzwert wird dabei in Abhängigkeit der maximalen Ladeleistung gewählt, der Abfall erfolgt dann linear bis auf 40% der maximalen Ladeleistung bei einem SOC von 100%. Die angesetzten Ladeprofile können Abbildung 48 entnommen werden, Zwischenwerte für die maximalen Ladeleistungen wurden interpoliert.

¹⁹¹ Otteny (2019), Kühnel, S. et al. (2018)

¹⁹² Göhler, G et al. (2017)

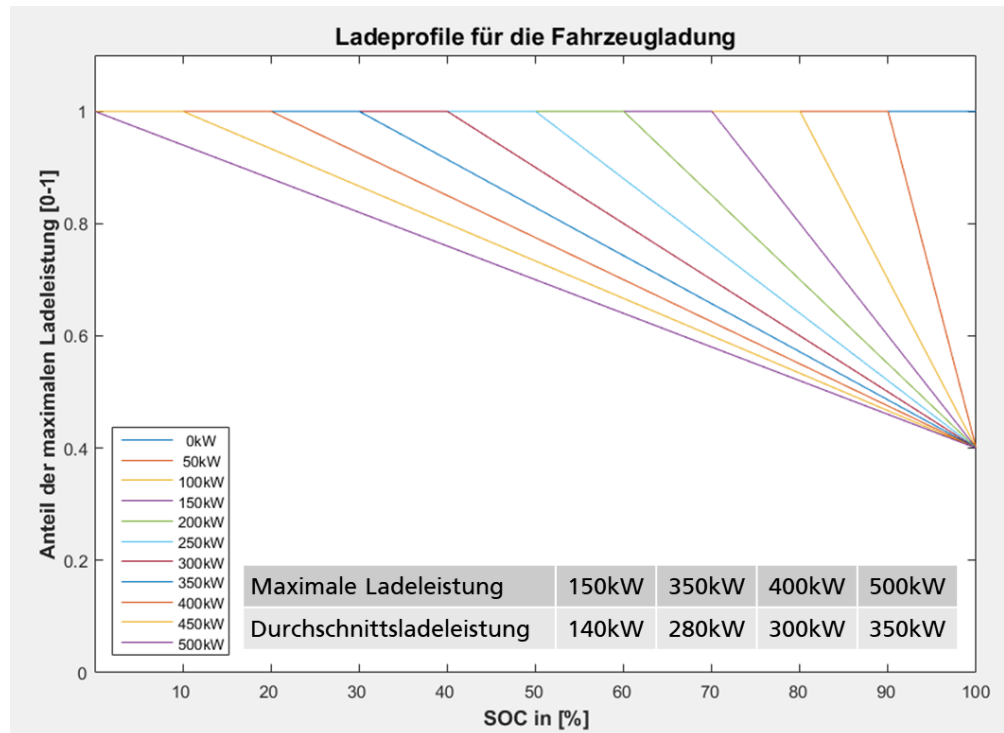


Abbildung 48 In der Simulation angesetzte Ladeleistungen in Abhängigkeit des SOC und der maximalen Ladeleistung der Fahrzeuge.

Das Modul Ladeinfrastruktur und Lademanagement bezieht sich anschließend auf das Modul Elektrofahrzeuge mit den dort angenommenen Fahrzeugeinstellungen und erwartet eingangsseitig die modellierte Anwesenheit der Fahrzeuge als Binärsignal sowie die Kilometerangaben für die jeweils nächste Fahrt. Das Modul arbeitet für jeden Zeitschritt in drei Schritten:

- 1.) Auswertung, ob ein Fahrzeug eingesteckt wird.
- 2.) Zuordnung einer Soll-Ladeleistung in Abhängigkeit der Fahrzeugdaten und ggf. einer vorgegebenen Betriebsstrategie (Lademanagement). Eine maximal verfügbare Gesamtladeleistung kann dabei optional vorgegeben werden.
- 3.) Berechnung der aktualisierten Ladestände der Fahrzeug-Batterien und der tatsächlichen Ladeleistungen.

Im Rahmen dieser Simulationen werden die Fahrzeuge immer eingesteckt und ein Lademanagement findet i.d.R. nicht statt. Wird die Gesamtleistung dennoch in einzelnen Szenarien begrenzt, erfolgt eine Drosselung der einzelnen Ladeleistungen prozentual für alle ladende Fahrzeuge. Die in den Auswertungen dargestellten Ladeleistungen entsprechen jeweils den Leistungen am Ausgang der Ladestationen. Zur Abschätzung der benötigten Netzanschlussleistungen und Energiebezüge muss also zusätzlich ein Ladewirkungsgrad für die Ladestationen angesetzt werden.

Neben der Aufladung am Betriebshof wird mit der Abwesenheit eines Fahrzeugs der für die zugeordnete Fahrstrecke benötigte Energiebedarf vom Ladestand abgezogen. Sowohl bei der Ladung als auch beim Energieverbrauch werden dabei die Ladegrenzen der Batterien berücksichtigt. Externe Zwischenladungen werden im Modul selbst nicht berücksichtigt. Wird die maximal mögliche Fahrstrecke überschritten, beträgt der SOC bei Ankunft 0% (worst case, aus zeitlichen und wirtschaftlichen Gründen wird ein bevorzugtes Laden auf dem Betriebshof angenommen). Das Simulationsmodul wertet aber neben den Lastflüssen auch die Anzahl der nicht durchführbaren Fahrten, die Energielücken (externer Ladebedarf) und die nicht direkt fahrbaren Kilometer aus, so dass die externen Ladebedarfe abgeschätzt werden können.

6.5 Simulation: KEP-Betriebshof

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Ladebedarfe und Ladeleistungen der Elektrofahrzeuge an dem bereits definierten Betriebshof eines KEP-Dienstleisters analysiert. Hierbei werden die einzelnen Nutzergruppen »Verteil- und Sammelverkehre«, »Depot-Direktverkehre« und »Systemverkehre« zuerst getrennt analysiert und abschließend der Betriebshof als Ganzes betrachtet. Sofern relevant, werden Szenarien mit ausschließlich eigenen bzw. ausschließlich externen Fahrzeugen in beiden Varianten separat ausgewertet. Ergänzend werden die ggf. externen Ladebedarfe und die Potenziale für Wasserstofffahrzeuge abgeschätzt.

6.5.1 Verteil- und Sammelverkehre (KEP)

Bei den Verteil- und Sammelverkehren werden LNFZ (bis 3,5t Gesamtgewicht) über den Tag in täglich nahezu gleichbleibenden, regionalen Touren von Montag bis Samstag eingesetzt. Entsprechend dem definierten Elektrifizierungsszenario für 2030 werden von 110 Fahrzeugen am Betriebshof 33 als Elektrofahrzeuge angesetzt. Eigene Fahrzeuge des KEP-Dienstleisters können über Nacht am Betriebshof geladen werden, externe Fahrzeuge müssen entweder andernorts (z.B. beim Subunternehmer oder in benachbarten Gewerbegebieten) über Nacht geladen werden oder während der Aufenthaltsdauer am Betriebshof vor und nach der Tour (120 bzw. 60min). Eine Zwischenladung bei den verschiedenen Kunden wird nicht in Betracht gezogen, da die Aufenthaltszeiten hier nur jeweils 1 bis 3min betragen. Die Startzeiten der Fahrzeuge liegen zwischen 7:30 und 8:30 Uhr (Gleichverteilung, tägl. Varianz ± 10 min). Die Tourendauern werden im ersten Schritt mit einer Gaußverteilung um $8h \pm 30$ min angesetzt, bei einer angenommenen Auslastung des Paketaufkommens von 80%. Abhängig vom Wochentag und von der Jahreszeit wird die Auslastung der Fahrzeuge variiert (Mo 88%, Di/Mi 96%, Do 80%, Fr 64%, Sa 50%, vor Ostern 15.4.-18.4. und Weihnachten 1.12.-24.12. immer 100%). Jeder Tour wird eine bestimmte Anzahl an Stopps für den Kundenbesuch zwischen 80 und 110 (Gleichverteilt, tägl. Varianz ± 5 Stopps) zugeordnet, mit einer durchschnittlichen Stopp-Dauer von 2,5min. Die Gesamtstandzeit wird zusätzlich entsprechend der Fahrzeugauslastung skaliert. Weiterhin wird eine tägliche verkehrsbedingte Varianz der Tourendauer von ± 10 min angenommen. Alle genannten Abweichungen zusammen führen zu einer täglichen Schwankung der ursprünglich angesetzten Tourendauern und somit zu einer unregelmäßigen Verteilung der Ankunftszeiten zwischen ca. 13 und 18 Uhr. Die längste ursprünglich angesetzte Tourendauer wird der frühesten Startzeit zugeordnet. Die täglichen Fahrstrecken liegen zwischen 30 und 220km (Gaußverteilung 95 ± 40 km, tägl. Varianz $\pm 3\%$). Externen Fahrzeugen wird zusätzlich ein Pendelweg zwischen 5 und 20km Gesamtstrecke zugeordnet (Gleichverteilung, tägl. Varianz $\pm 3\%$). Daraus ergeben sich die in Abbildung 49 dargestellten Anwesenheitszeiten.

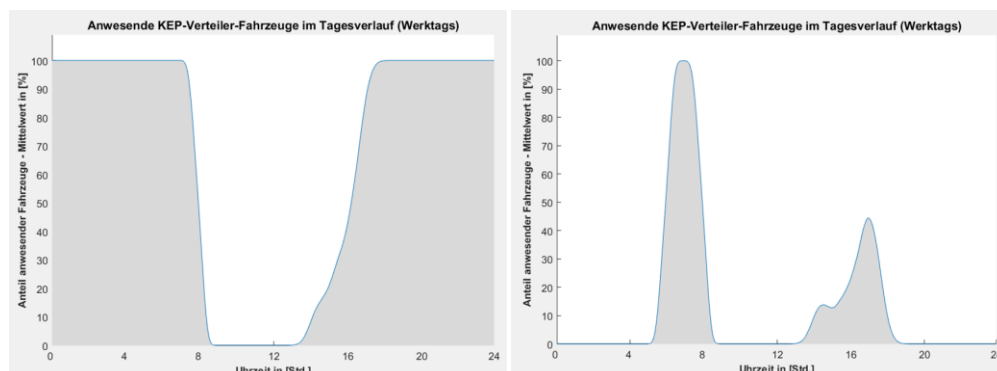


Abbildung 49 Anwesenheitszeiten der Verteil- und Sammelverkehre am KEP-Betriebshof im Tagesverlauf. Links: eigene Fahrzeuge, Rechts: externe Fahrzeuge.

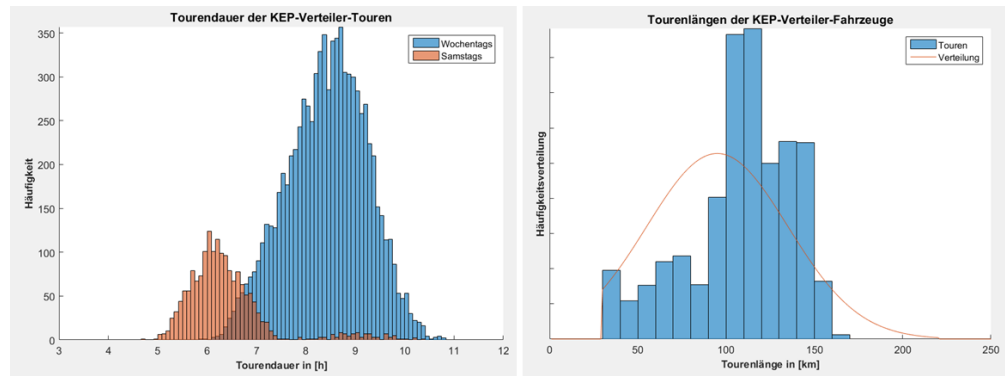


Abbildung 50 Verteilung der Tourendauern und Tourenlängen für die 33 Elektrofahrzeuge im Verteil- und Sammelverkehr (KEP).

Die Elektrofahrzeuge sollen die maximale Tagesgesamstrecke von bis zu rund 190km grundsätzlich ohne externe Zwischenladungen durchführen können. Aufgrund der gut planbaren Touren wird die Batteriegröße demzufolge ohne große Reserven auf 50kWh festgelegt, was einer realistischen Größenordnung für diese Fahrzeugklasse entspricht und für alle Tagestouren ausreicht (min. 48kWh wären nötig). Für die eigenen Fahrzeuge ist eine Nachtladung mit 3,7kW pro Ladepunkt ausreichend, um alle Fahrzeuge bis zur Abfahrt vollständig aufzuladen. Die Spitzenlast entspricht dabei mit 122kW der Anschlussleistung der Ladestationen. Diese könnte auf bis zu 70kW gedrosselt werden (-43%, rund 2,1kW pro Fahrzeug). Es werden rund 284.000 kWh p.a. am Betriebshof geladen.

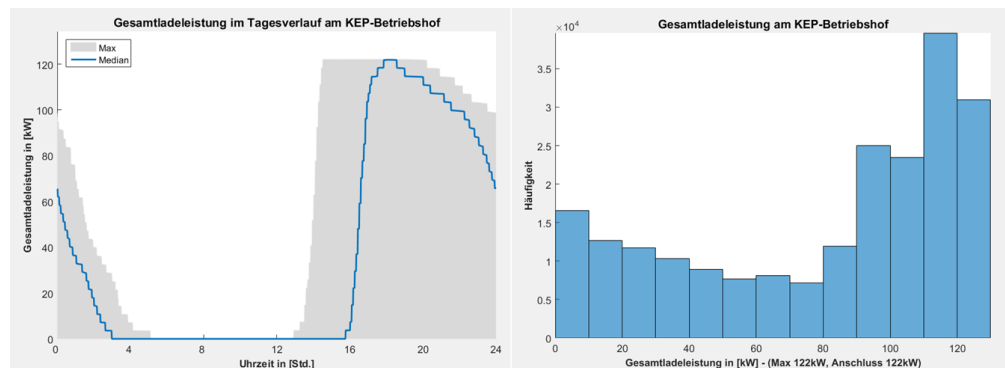


Abbildung 51 Lastverlauf und Verteilung der Gesamtladeleistung für den Verteil- und Sammelverkehr am KEP-Betriebshof (33 eigene Fahrzeuge, 3,7kW Ladeleistung, ungesteuert). Eine Drosselung auf 70kW ist möglich.

Bei der Variante mit 33 externen Elektrofahrzeugen (ohne Nachtladung) sind 22kW-Ladestationen ausreichend (min. 16kW), um alle Touren ohne weitere Zwischenladungen durchführen zu können. Die Spitzenlast liegt hier ohne Lademanagement mit über 690kW deutlich höher als bei den internen Fahrzeugen (Anschlussleistung 726kW). Eine Drosselung auf bis zu 280kW ist möglich (-59%), sofern die Anwesenheitszeit auch weitestgehend für die Ladung genutzt werden kann. Dies liegt u.a. daran, dass die Fahrzeuge nicht alle zur gleichen Zeit ankommen, die Ladeleistung mit bis zu 22kW großzügig dimensioniert ist und insbesondere für die kürzeren Tagestouren keine großen Energiemengen geladen werden müssen. Aufgrund der zusätzlichen Pendelstrecken liegt der Energieübertrag mit rund 320.000 kWh p.a. etwas höher als bei den internen Fahrzeugen.

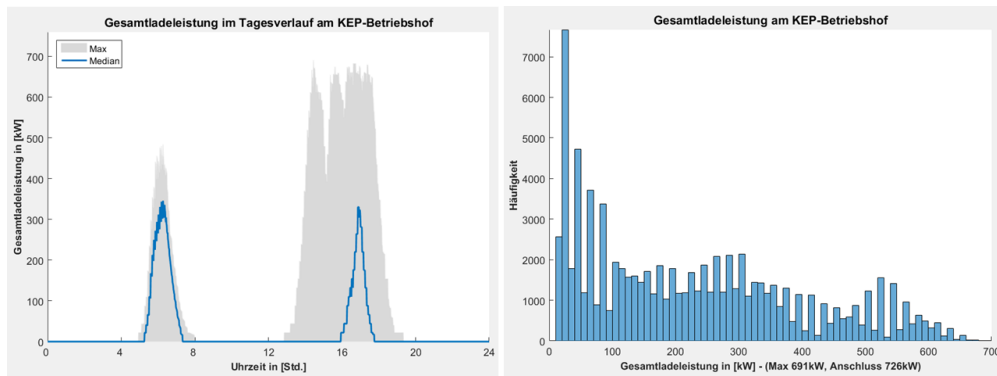


Abbildung 52 Lastverlauf und Verteilung der Gesamtladeleistung für den Verteil- und Sammelverkehr am KEP-Betriebshof (33 externe Fahrzeuge, 22kW Ladeleistung, ungesteuert). Eine Drosselung auf 280kW ist möglich.

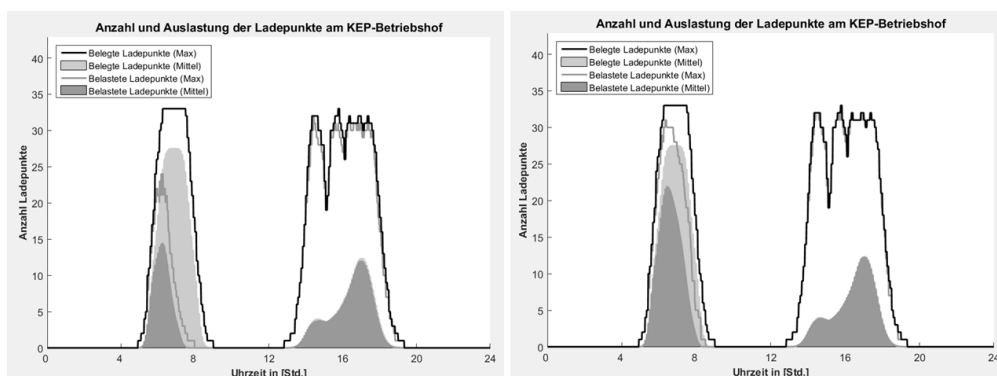


Abbildung 53 Auslastung der Ladepunkte für den Verteil- und Sammelverkehr am KEP-Betriebshof. (33 externe Fahrzeuge, max. 22kW Ladeleistung). Links: ungesteuert (über 690kW Gesamtladeleistung), Rechts: gedrosselt (max. 280kW Gesamtladeleistung).

Sofern eine Nachtlademöglichkeit besteht können die Fahrten mit relativ moderaten technischen Anforderungen elektrisch absolviert werden. Für externe Fahrzeuge ohne Nachtlademöglichkeiten könnten aber auch Wasserstofffahrzeuge eingesetzt werden, um unabhängig von der Ausstattung der Betriebshöfe agieren zu können. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Fahrzeug- und Ladewirkungsgrade ergibt sich hierfür ein Wasserstoffbedarf von rund 14.590kg p.a.¹⁹³ Dies entspricht einer durchschnittlichen Menge von rund 1,4kg pro Fahrzeug pro Tag. Je nach individueller Tourenlänge und Fahrzeugreichweite erscheinen ein bis zwei Tankvorgänge pro Woche damit realistisch. Alternativ könnten Elektrofahrzeuge auch über eine öffentliche Schnellladeinfrastruktur versorgt werden, allerdings mit entsprechend höheren zeitlichen Aufwänden. Im Durchschnitt müssen rund 32kWh pro Tag und Fahrzeug nachgeladen werden.

Zusammenfassung: Verteil- und Sammelverkehre (KEP)

Bei einer Nachtladung reichen schon sehr geringe Ladeleistungen ($\leq 3,7$ kW) aus, um alle Touren ohne Zwischenladen absolvieren zu können. Aufgrund der großen Fahrzeugzahl (33) ergibt sich für die eigenen Fahrzeuge auf dem Betriebshof dennoch eine nennenswerte Spitzenlast von über 120kW. Durch ein Lademanagement kann diese deutlich gedrosselt werden (auf 70kW, -43%). Für externe Fahrzeuge erscheint für die Nachtladung eine vergleichbare öffentliche Ladeinfrastruktur in der Umgebung am sinnvollsten. Eine öffentliche Ladeinfrastruktur ist jedoch auch für externe Fahrzeuge nicht zwingend nötig. Sie können alternativ mit 22kW-Ladern vor und nach der Tour am Betriebshof ausreichend geladen werden. Hierbei fallen ohne ein Lademanagement sehr hohe Spitzenlasten an (rund 690kW), die jedoch deutlich gedrosselt werden könnten (280kW, -59%);

¹⁹³ $\eta_{TTW, BEV} \sim 80\%$, $\eta_{LI} \sim 95\%$, $\eta_{TTW, H2} \sim 50\%$

gegenüber der Anschlussleistung von 726kW -61%). Für gemischte Elektro-Flotten (interne und externe Fahrzeuge) sollten Überschneidungen der Ladezeiten durch ein Lademanagement vermieden und Ladepunkte möglichst gemeinsam genutzt werden. Alternativ könnten externe Fahrzeuge auch über öffentliche Schnellladestationen versorgt oder die Fahrten über Wasserstofffahrzeuge abgedeckt werden.

6.5.2 Depot-Direktverkehre

Für die Depot-Direktverkehre werden mittelschwere Lkw (24t Gesamtgewicht) mit Anhänger in regelmäßigen Touren von Montag bis Samstag eingesetzt. Entsprechend dem definierten Elektrifizierungsszenario für 2030 werden von 30 Fahrzeugen am Betriebshof sechs als Elektrofahrzeuge angesetzt. Das Mobilitätsverhalten innerhalb der Gruppe ist bis auf die Tourenlängen nahezu identisch. Eine zufällig getroffene Auswahl deckt die gesamte Bandbreite der verschiedenen Fahrstrecken zu den angefahrenen Depots und die möglichen Ankunftszeiten ab (siehe unten). Die i.d.R. externen Fahrzeuge legen über Nacht die Strecke zum jeweils fest zugeordneten Ziel-Depot zurück und werden montags bis freitags tagsüber zusätzlich für eine regionale Speditionstour eingesetzt. Am KEP-Betriebshof wird folglich nur während der kurzen Standzeiten von jeweils 30min am Morgen und am Nachmittag zwischengeladen. Da die Fahrzeuge hoch ausgelastet mit mehreren Fahrern eingesetzt werden, wird keine längere Nachtladung angenommen, sondern weitere Zwischenladungen an externen Standorten (Autobahn, Bundesstraße) und am Ziel-Depot. Die Ziel-Depots werden an jedem Werktag von einem Fahrzeug angefahren, d.h. eigentlich fahren zwei analoge Fahrzeuge wechselseitig dieselbe Tour. Es wird im Szenario von sechs elektrifizierten Touren ausgegangen. Die Ankunftszeiten der Fahrzeuge liegen morgens zwischen 5 und 7 Uhr (Gaußverteilung 6 Uhr±30min, tägl. Varianz ±5min) und nachmittags zwischen 13:30 und 19:30 Uhr (Gaußverteilung 17:30 Uhr±60min, samstags 2 Stunden früher, tägl. Varianz ±5min). Für die täglichen Fahrstrecken wurde die Verteilung realer Depot-Distanzen eines KEP-Dienstleisters ausgewertet. Da die Ziel-Depots über Nacht erreichbar sein sollen, wurden nur Strecken bis zu 600km berücksichtigt (längere Fahrstrecken werden bei den Systemverkehren im nächsten Abschnitt betrachtet). Die Fahrstrecken zu den Ziel-Depots morgens vor der Ankunft und nachmittags nach der Abfahrt liegen somit zwischen 60 und 600km (Gaußverteilung 400±200km, tägl. Varianz +2km). Die Speditionstouren zwischen den beiden Aufenthaltsorten am KEP-Betriebshof werden montags bis freitags mit 50 bis 100km angesetzt (Gleichverteilung, tägl. Varianz ±3%). Samstags findet keine Speditionstour statt, es werden nur 2 bis 10km Pendelweg angenommen (Gleichverteilung). Daraus ergeben sich die in Abbildung 54 dargestellten Anwesenheitszeiten und Fahrstrecken.

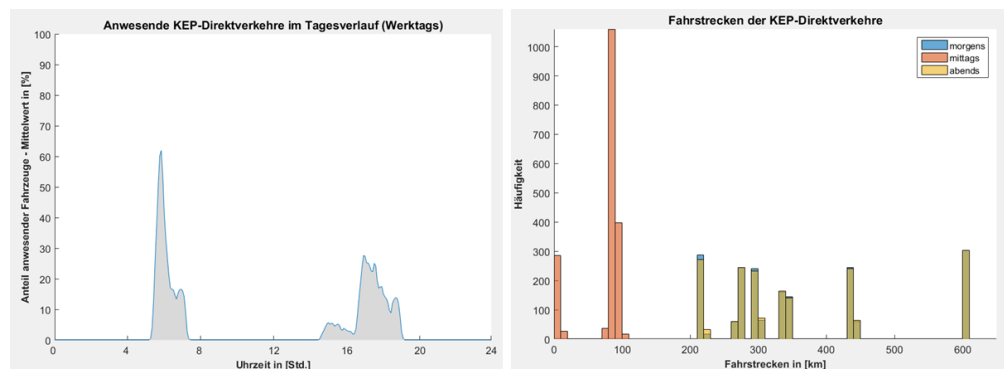


Abbildung 54 Anwesenheitszeiten am KEP-Betriebshof im Tagesverlauf und Tourenlängen für die sechs Elektrofahrzeuge im Depot-Direktverkehr.

Aufgrund der Einzelfahrstrecken von bis zu rund 600km zu den Ziel-Depots erscheint eine Fahrt ohne weitere Zwischenladung für die längeren Strecken aufgrund der ansonsten notwendigen Batteriekapazitäten (ca. 700kWh) und Ladeleistungen von mehreren hundert Kilowatt pro Ladepunkt am Betriebshof unrealistisch. Es wird deshalb zunächst

ein Szenario mit jeweils einer einstündigen Zwischenladung für die Nachtsprünge und einer einstündigen Zwischenladung während der Speditionstour analysiert. Hierbei werden Ladeleistungen am Betriebshof mit 150kW pro Ladepunkt und für die externen Zwischenladungen mit 350kW angesetzt. Die Fahrstrecken, Ladestopps und Batteriestände sind in Abbildung 55 dargestellt.

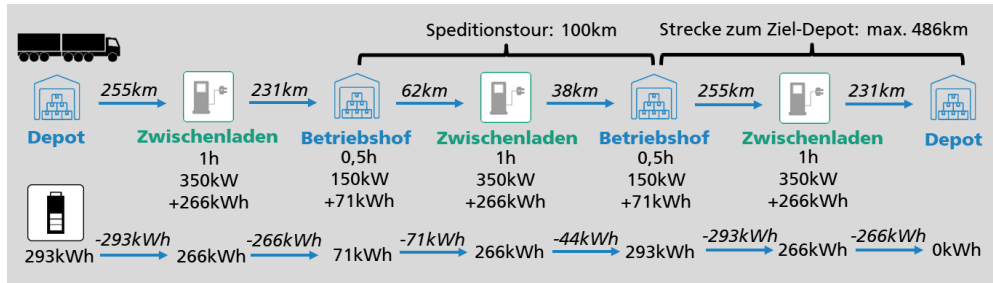


Abbildung 55 Möglicher Fahrtenablauf und Ladestopps für die Depot-Direktverkehre. Die unten angegebenen Batterieladestände des Fahrzeugs gelten bis auf den letzten Wert jeweils zur Abfahrtszeit. Am Ziel-Depot wird von einer Ladung analog des betrachteten Betriebshofs ausgegangen.

Unter den angenommenen Randbedingungen können Depot-Distanzen bei zwei externen Zwischenladungen pro Tag nur bis max. rund 490km angefahren werden. Die notwendige Batteriekapazität liegt dabei mit rund 300kWh in einem realistischen Bereich für die angesetzte Fahrzeugklasse (Minimalanforderung ohne Reserven). Sollen alle Touren im Szenario (bis 600km) durchführbar sein sind längere Ladezeiten oder höhere Leistungen bei der externen Zwischenladung erforderlich (min. 350kW-Durchschnittsleistung, z.B. 500kW-Lader) sowie dadurch etwas größere Batterien (min. 350kWh) oder häufigere Ladestopps. Für die Ladungen am Betriebshof mit 150kW ergeben sich Spitzenlasten von bis zu 750kW. Aufgrund der versetzten Ankunftszeiten und kurzen Standzeiten werden maximal fünf der sechs Fahrzeuge gleichzeitig geladen. Da die Fahrzeuge die komplette Anwesenheitszeit für die Ladung verwenden (ein SOC von 100% wird nicht erreicht), kommt eine Drosselung im Prinzip nicht in Frage, ohne die externen Ladebedarfe in gleichem Maße zu erhöhen. Insgesamt werden rund 260.000kWh auf dem Betriebshof geladen. Der externe Ladebedarf liegt bei rund 660.000kWh. Dies entspricht durchschnittlich rund 70 bzw. 180kWh pro Ladeevent.

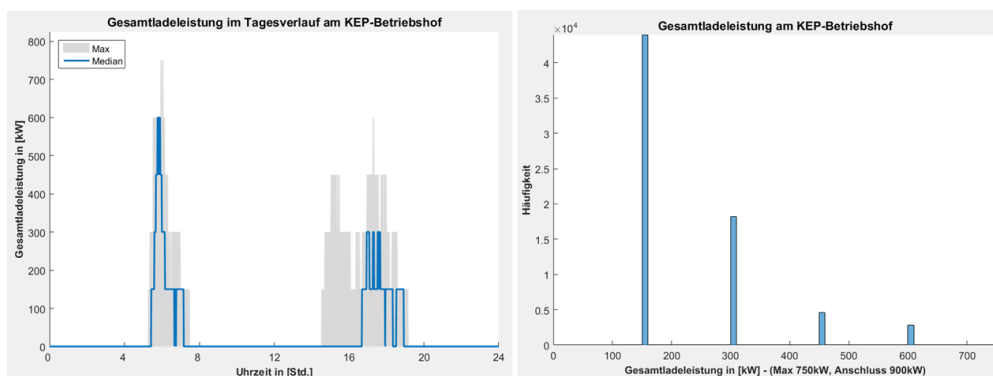


Abbildung 56 Lastverlauf und Verteilung der Gesamtladeleistung für die Depot-Direktverkehre am KEP-Betriebshof (sechs Fahrzeuge, 150kW Ladeleistung, ungesteuert). Eine Drosselung ist für diesen Anwendungsfall nicht sinnvoll.

Aufgrund der geringen Standzeiten, hohen Leistungsanforderungen und fehlender Nachtlademöglichkeiten erscheint der Einsatz von Wasserstofffahrzeugen für diesen Anwendungsfall geeigneter. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Fahrzeug- und Ladewirkungsgrade ergibt sich dadurch ein Wasserstoffbedarf von rund 41.960kg p.a. Dies entspricht einer durchschnittlichen Menge von rund 23kg pro Fahrzeug pro Tag. Je

nach individueller Tourenlänge und Fahrzeugreichweite ist maximal ein Tankvorgang pro Tag realistisch.

Zusammenfassung: Depot-Direktverkehre

Für die Depot-Direktverkehre kann der Betriebshof bestenfalls eine Zwischenladung gewährleisten. Eine öffentliche Schnellladeinfrastruktur mit hoher Leistung (>350kW) ist zwingend erforderlich, um auch die längeren Depot-Distanzen elektrisch fahren zu können. Der begrenzende Faktor für die Langstrecke ist dabei im Wesentlichen nicht die Batteriegröße der Fahrzeuge, sondern die zeitlich eingeschränkte Möglichkeit zur Ladung und in Folge die Leistung der öffentlichen Ladeinfrastruktur. Dies resultiert aus der hohen Auslastung der Fahrzeuge ohne Möglichkeit zur regelmäßigen Nachladung. Am Betriebshof resultieren aus einer 150kW-Ladung hohe Spitzenlasten (bis zu 750kW), welche aufgrund der ohnehin geringen Standzeiten (30min) auch nicht sinnvoll gedrosselt werden können. Der technische Aufwand steht hier einem relativ begrenzten Nutzen gegenüber (Energie nur für rund 60km pro Ladung), der besser an den öffentlichen Ladestellen zusätzlich mit abgedeckt werden sollte (bei entsprechend höherer Leistung). Da die hohen Leistungen am Betriebshof aber nur relativ kurz abgerufen werden, könnte alternativ auch ein Lastmanagement über einen stationären Batteriespeicher erfolgen. Insgesamt zeigen sich sehr hohe Anforderungen an eine (öffentliche) Ladeinfrastruktur für die Depot-Direktverkehre, insbesondere unter der Berücksichtigung, dass bei der Analyse nur die technischen Minimalanforderungen evaluiert wurden, ohne für den praktischen Betrieb zusätzlich notwendiger Reserven. Genannt seien hier z.B. Restladestände am Ziel, Flexibilität bei der Auswahl der Ladestandorte, abweichende Fahrzeugverbräuche oder eine Batteriedegradation. Der Einsatz von Wasserstofffahrzeugen mit möglichst hoher Reichweite erscheint für diesen Anwendungsfall deutlich praktikabler. Alternativ könnten zukünftig Fahrzeuge mit deutlich größeren Batterien in Verbindung mit einer öffentlichen Hochleistungsladeinfrastruktur im Megawattbereich eingesetzt werden, unter Vorbehalt einer technischen und wirtschaftlichen Umsetzbarkeit.

6.5.3 Systemverkehre

Für die Systemverkehre werden mittelschwere Lkw (24t Gesamtgewicht) mit Anhänger in regelmäßigen, internationalen Touren von Montag bis Samstag eingesetzt. Entsprechend dem definierten Elektrifizierungsszenario für 2030 werden von den drei Fahrzeugen am Betriebshof eins als Elektrofahrzeug angesetzt. Während sich die Anwesenheitszeiten am Betriebshof der Fahrzeuge kaum unterscheiden hängt die Fahrstrecke individuell vom regelmäßig angefahrenen Ziel-Hub ab und kann über 1.000km betragen. Da ein einziges Elektrofahrzeug nicht repräsentativ ist, werden anstelle einer festen Fahrstrecke die Potenziale für zwei unterschiedliche Batteriegrößen von 550kWh und 300kWh betrachtet. Die i.d.R. externen Fahrzeuge erreichen morgens den Betriebshof und halten sich dort vier Stunden lang auf. Während dieser Zeit können sie geladen werden, um anschließend die Fahrt zum fest zugeordneten Ziel-Hub anzutreten. Eine längere Aufladung der Fahrzeuge über Nacht wird nicht angenommen, sondern ggf. weitere Zwischenladungen an externen Standorten (Autobahn) und am Ziel-Hub. Der Ziel-Hub wird an jedem Werktag von einem Fahrzeug angefahren, d.h. eigentlich fahren zwei analoge Fahrzeuge wechselseitig dieselbe Tour. Die Ankunftszeiten der Fahrzeuge am Betriebshof liegen zwischen 5 und 7 Uhr (Gaußverteilung 6 Uhr \pm 30min, tägl. Varianz \pm 5min). Für die Ladung am Betriebshof wird eine 150kW-Ladestation angenommen (ggf. gedrosselt).

Bei der großen Fahrzeugbatterie (550kWh) können mit dem angesetzten 150kW-Lader während der vierstündigen Aufenthaltszeit am Betriebshof rund 530kWh geladen werden, was einer Reichweite von rund 460km entspricht. Dabei werden 163.710kWh p.a. bereitgestellt. Mit Zwischenladungen an einem 350kW-Lader könnten die Reichweiten bei einem einstündigen Ladestopp jeweils um rund 230km (266kWh) erhöht werden. Bei

einem 500kW-Lader (mit 350kW-Durchschnittsleistung im angesetzten Ladeprofil) wären über 290km (333kWh) möglich, unter Ausreizung aller Entwicklungspotenziale im CCS-Standard (500kW-Durchschnittsleistung) bis zu rund 410km (475kWh). Für eine vollständige Batterieladung in einer Stunde (550kWh, 480km) wären Ladestationen mit rund 580kW Durchschnittsleistung erforderlich. Alternativ müsste die Ladezeit am 350kW-Lader auf über zwei Stunden gut verdoppelt werden.

Die kleinere Fahrzeugbatterie (300kWh) kann bereits mit 80kW Ladeleistung nahezu vollständig am Betriebshof geladen werden. Die Reichweite beträgt damit rund 250km. Dabei werden 91.977kWh p.a. auf dem Betriebshof bereitgestellt. Bei einer einstündigen externen Zwischenladung reichen öffentliche 350kW-Lader aus, um die Batterie nahezu vollständig wieder aufzuladen (266kWh, 230km). Wird die Ladeleistung am Betriebshof mit 150kW voll ausgeschöpft, kann die dadurch kürzere Ladezeit auf die Bedarfe anderer Nutzergruppen abgestimmt werden.

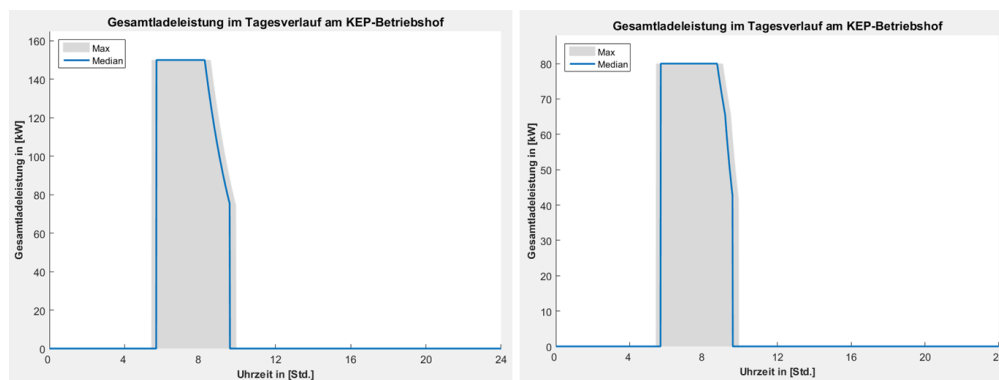


Abbildung 57 Lastverlauf der Ladeleistung für die Systemverkehre am KEP-Betriebshof (ein Fahrzeug, max. 150kW Ladeleistung, ungesteuert). Links: Ladung einer 550kWh-Fahrzeugbatterie mit 150kW, Rechts: Ladung einer 300kWh-Fahrzeugbatterie mit 80kW. Die Ladezeiten entsprechen ungefähr den Aufenthaltszeiten der Fahrzeuge im Systemverkehr.

Die Potenziale für den Einsatz von Wasserstofffahrzeugen hängen von den individuellen Fahrstrecken und den Eigenschaften der alternativen Elektrofahrzeuge und deren Lademöglichkeiten ab. Für längere Distanzen erscheint ein Tankstopp zeitlich günstiger als häufiges oder längeres Zwischenladen, insbesondere, wenn am Betriebshof keine Lademöglichkeit angeboten wird. Bei den Elektrofahrzeugen kann durch sehr große Batterien in Verbindung mit sehr hohen Ladeleistungen an öffentlichen Stationen eine ähnliche Flexibilität geschaffen werden, sofern technisch umsetzbar.

Zusammenfassung: Systemverkehr

550kWh-Batterie:

Mit einer Ladeleistung von 150kW am Betriebshof kann eine Reichweite über 450km gewährleistet werden. Der Betriebshof stellt somit den Primärladestandort für die meisten Fahrstrecken dar. Bei einer einstündigen Zwischenladung an einem öffentlichen 350kW-Lader kann die Reichweite um rund 230km (266kWh) erhöht werden. Aufgrund der großen Batteriekapazität kommt auch eine längere Ladepause oder eine deutlich größere Ladeleistung in Frage, mit entsprechend höherem Reichweitzuwachs. Die Batteriegröße entspricht jedoch nicht den heute gängigen Größenordnungen für diese Fahrzeugklasse, weshalb der Einsatz von Wasserstofffahrzeugen aus technischer Sicht vorteilhafter wäre.

300kWh-Batterie:

Für die vollständige Ladung am Betriebshof muss eine Ladeleistung von gut 80kW bereitgestellt werden. Die Reichweite ist mit rund 250km dabei relativ gering. Für eine einstündige Zwischenladung reichen 350kW-Lader aus, um die Batterie wieder nahezu vollständig aufzuladen. Die Reichweite erhöht sich dabei um rund 230km. Da bereits auf

dem Betriebshof Lenkzeitpausen gemacht werden erscheinen häufigere oder längere Ladestopps nicht praktikabel und die Reichweiten für einen internationalen Verkehr insgesamt zu gering. Durch eine Erhöhung der Ladeleistung am Betriebshof kann eine zeitliche Flexibilität für ein Lademanagement geschaffen werden.

6.5.4 KEP-Betriebshof

In diesem Abschnitt wird ein Szenario für den gesamten KEP-Betriebshof simuliert. Hierbei werden folgende Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturspezifikationen angesetzt, entsprechend dem Mobilitätsverhalten und der Ladebedarfe aus den bisherigen Einzeluntersuchungen:

- 33 Verteilerfahrzeuge ($\leq 3,5t$) mit einer 50kWh Batterie in den Varianten mit eigenen Fahrzeugen (3,7kW Nachtladung) oder externen Fahrzeugen (22kW Ladung vor und nach der Tour)
- Sechs Fahrzeuge für den Depot-Direktverkehr (24t, mit Anhänger) mit einer 300kWh Batterie und einer 150kW Zwischenladung am Betriebshof (ggf. zzgl. externer Zwischenladungen)
- Ein Fahrzeug für den Systemverkehr (24t, mit Anhänger) mit einer 550kWh Batterie und einer 150kW Ladung am Betriebshof (ggf. zzgl. externer Zwischenladungen)

Im ungesteuerten Fall ergeben sich für die Variante mit ausschließlich eigenen Verteilerfahrzeugen am Betriebshof Spitzenlasten von bis zu rund 900kW (1.172kW Anschlussleistung), welche hauptsächlich durch die Depot-Direktverkehre verursacht werden, welche sich morgens mit der Ladung des Systemverkehrs und nachmittags mit der Ladung der Verteilerfahrzeuge überschneidet. Ein Lademanagement (verzögerte Ladung, ggf. mit höherer Einzelladeleistung) könnte hier nur zu einer geringfügigen Entlastung um max. 150kW (-17%) führen. Aufgrund der relativ kurzen Spitzenlastzeiten könnte ein Batteriespeicher zur Minimierung der Lastspitzen verwendet werden. Eine Größenordnung im Bereich von 250kWh Kapazität und 450kW Leistung könnte zu einer Halbierung der Spitzenlast auf 450kW (-50%) führen. Der Speicher könnte in den Schwachlastzeiten wieder aufgeladen werden. Insgesamt werden rund 710.000kWh p.a. auf dem Betriebshof abgegeben.

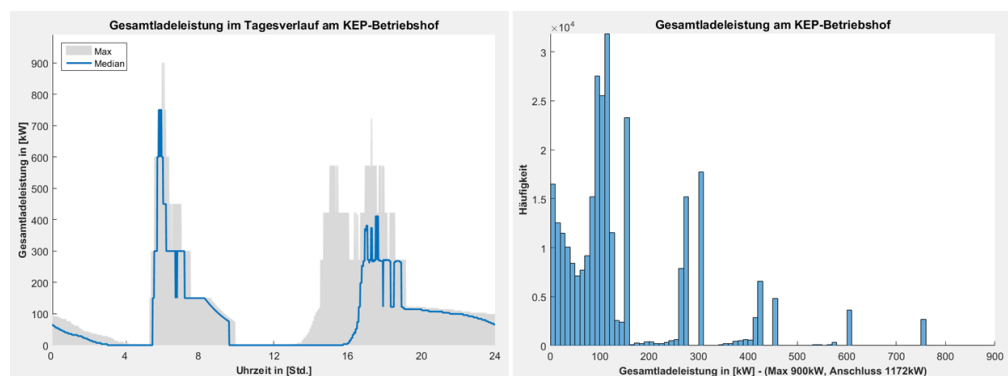


Abbildung 58 Lastverlauf und Verteilung der Gesamtladeleistung für den KEP-Betriebshof mit eigenen Verteilerfahrzeugen (ungesteuert).

In der Variante mit externen Verteilerfahrzeugen verschärft sich die Spitzenlastproblematik noch einmal deutlich, da sich deren Ladezeiten noch stärker mit denen der Depot-Direktverkehre überschneiden. Ungesteuert fallen Spitzenlasten von bis zu rund 1.270kW an (Anschlussleistung 1.776kW), welche sich durch eine gezielte Drosselung der Verteilerfahrzeuge jedoch deutlich reduzieren lässt. Insgesamt werden in dieser Variante rund 750.000kWh p.a. auf dem Betriebshof abgegeben.

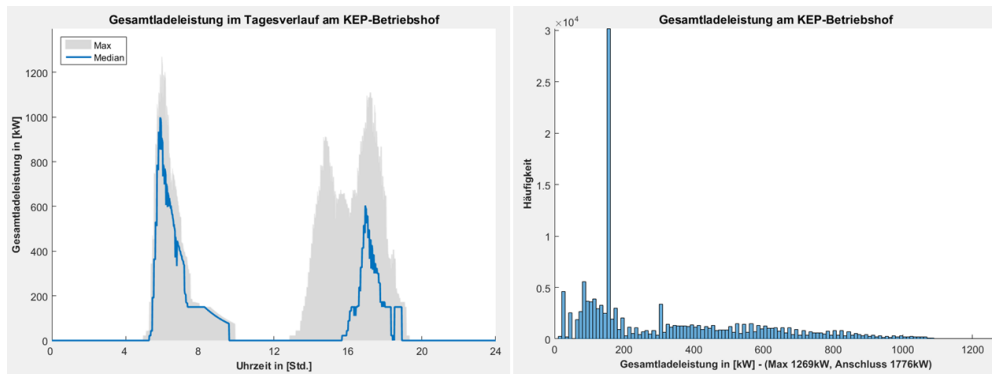


Abbildung 59 Lastverlauf und Verteilung der Gesamtleistung für den KEP-Betriebshof mit externen Verteilerfahrzeugen (ungesteuert).

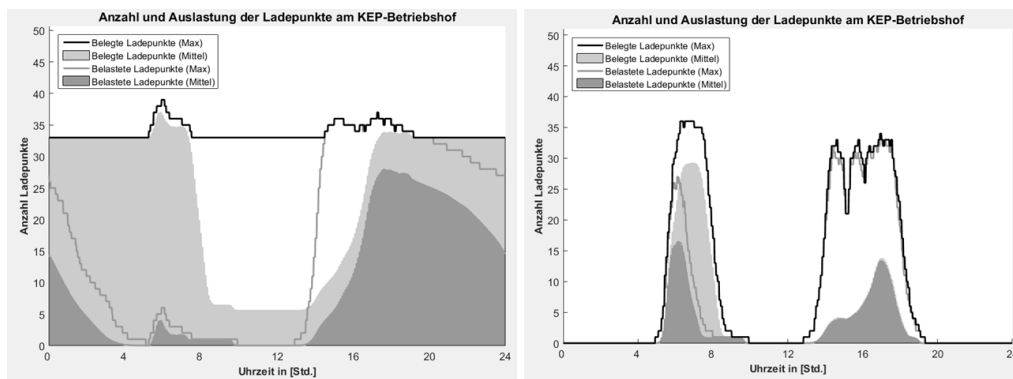


Abbildung 60 Auslastung der Ladestationen am KEP-Betriebshof im Tagesverlauf (ungesteuert). Links: mit eigenen Verteilerfahrzeugen, Rechts: mit externen Verteilerfahrzeugen

Zusammenfassung: KEP-Betriebshof

Die Ladung der eigenen Verteilerflotte ist über Nacht mit vertretbarem technischen Aufwand und vergleichsweise geringen Leistungsanforderungen möglich. Demgegenüber gestaltet sich die Ladung externer Fahrzeuge, insbesondere der Depot-Direktverkehre, aufgrund der kurzen Aufenthaltszeiten schwierig. Die sehr hohen Spitzenlasten (1.270kW) könnten über Batteriespeicher und bei den externen Verteilerfahrzeugen auch über ein individuelles Lademanagement (Drosselung) nennenswert abgesenkt werden. Ob und in welchem Ausmaß externe Fahrzeuge überhaupt auf dem Betriebshof versorgt werden können, muss im Einzelfall anhand der technischen Möglichkeiten (Netzanschluss), der prozesstechnischen Integrationsmöglichkeiten und der Wirtschaftlichkeit bewertet werden. Den hohen Investitionskosten stehen aber mögliche Erlöspotenziale für den Verkauf von Ladestrom gegenüber. Hinsichtlich des hohen technischen Aufwands für Elektrofahrzeuge stellen Wasserstofffahrzeuge für die Depot-Direktverkehre und Systemverkehre die bessere Alternative dar. Hierfür muss eine hinreichende öffentliche Tankstelleninfrastruktur geschaffen werden. Der Betrieb einer eigenen Tankstelle auf dem KEP-Betriebshof erscheint nicht sinnvoll, da nennenswerte Bedarfe nur bei externen Fahrzeugen bestehen, welche aber alleine nicht für einen wirtschaftlichen Betrieb ausreichen.

6.6 Simulation: Betriebshof einer Spedition

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Ladebedarfe und Ladeleistungen der Elektrofahrzeuge an dem bereits definierten Betriebshof einer Spedition analysiert. Hierbei werden die einzelnen Nutzergruppen »Verteil- und Sammelverkehre«, »Industrielle

Umlaufverkehre« und »Nationaler Güterverkehr« zuerst getrennt analysiert und abschließend der Betriebshof als Ganzes betrachtet. Sofern relevant, werden Szenarien mit ausschließlich eigenen bzw. ausschließlich externen Fahrzeuge in beiden Varianten separat ausgewertet. Ergänzend werden die ggf. externen Ladebedarfe und die Potenziale für Wasserstofffahrzeuge abgeschätzt.

6.6.1 Verteil- und Sammelverkehre (Spedition)

Bei den Verteil- und Sammelverkehren werden leichtere Lkw (ca. 12t Gesamtgewicht) über den Tag in täglich nahezu gleichbleibenden, regionalen Touren von Montag bis Freitag eingesetzt. Entsprechend dem definierten Elektrifizierungsszenario für 2030 werden von 35 Fahrzeugen am Betriebshof sieben als Elektrofahrzeuge angesetzt. Eigene Fahrzeuge der Spedition können über Nacht am Betriebshof geladen werden, externe Fahrzeuge müssen entweder andernorts (z.B. beim Subunternehmer oder in benachbarten Gewerbegebieten) über Nacht geladen werden oder während der Aufenthaltsdauer an der Spedition vor und nach der Tour (60 bzw. 30min). Eine Zwischenladung bei den verschiedenen Kunden wird nicht in Betracht gezogen, da die Aufenthaltszeiten hier nur jeweils zwischen 15 und 30min betragen. Die Startzeiten der Fahrzeuge liegen zwischen 7 und 8 Uhr (Gaußverteilung $7:30\text{Uhr} \pm 15\text{min}$, tägl. Varianz $\pm 5\text{min}$) und die Touren enden zwischen 13 und 16 Uhr (Gaußverteilung $14\text{Uhr} \pm 30\text{min}$, tägl. Varianz $\pm 10\text{min}$). Der frühesten Startzeit wurde dabei die früheste Endzeit zugeordnet. Die täglichen Fahrstrecken liegen zwischen 50 und 150km (Gaußverteilung $100 \pm 25\text{km}$, tägl. Varianz $\pm 3\%$). Externen Fahrzeugen wird zusätzlich ein Pendelweg zwischen 5 und 20km Gesamtstrecke zugeordnet (Gleichverteilung, tägl. Varianz $\pm 3\%$). Daraus ergeben sich die in Abbildung 61 dargestellten Anwesenheitszeiten. Aufgrund der i.d.R. den Fahrzeugen fest zugeordneten, täglich nahezu gleichbleibenden Touren kommt es nur zu geringen zeitlichen Abweichungen von den dargestellten Mittelwerten.

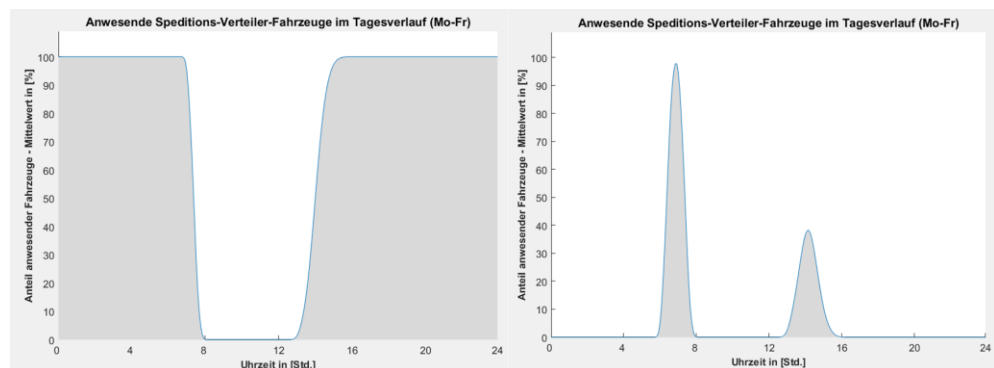


Abbildung 61 Anwesenheitszeiten der Verteil- und Sammelverkehre am Betriebshof im Tagesverlauf. Links: eigene Fahrzeuge, Rechts: externe Fahrzeuge.

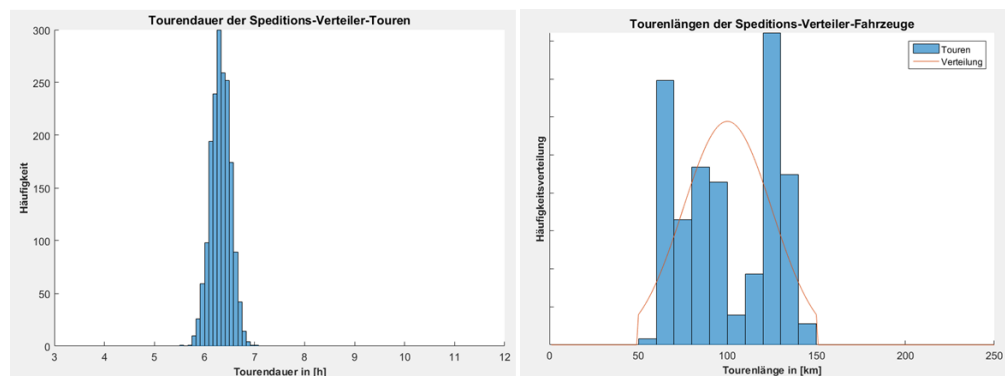


Abbildung 62 Verteilung der Tourendauern und Tourenlängen für die sieben Elektrofahrzeuge im Verteil- und Sammelverkehr.

Die Elektrofahrzeuge sollen die maximale Tagesgesamstrecke von bis zu rund 160km grundsätzlich ohne externe Zwischenladungen durchführen können. Aufgrund der gut planbaren Touren wird die Batteriegröße demzufolge ohne große Reserven auf 150kWh festgelegt, was einer realistischen Größenordnung für diese Fahrzeugklasse entspricht und für alle Tagestouren ausreicht (min. 120kWh wären nötig). Für die eigenen Fahrzeuge ist eine Nachtladung mit 7,4kW pro Ladepunkt ausreichend, um alle Fahrzeuge bis zur Abfahrt vollständig aufzuladen. Die Spitzenlast entspricht dabei mit 52kW der Anschlussleistung der Ladestationen. Diese könnte auf bis zu 40kW (-23%) gedrosselt werden. Es werden rund 150.000 kWh p.a. am Betriebshof geladen.

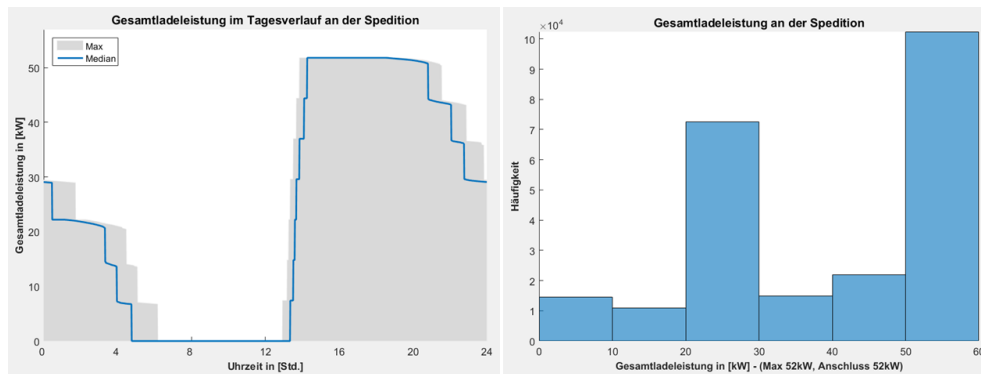


Abbildung 63 Lastverlauf und Verteilung der Gesamtladeleistung für den Verteil- und Sammelverkehr am Betriebshof (sieben eigene Fahrzeuge, 7,4kW Ladeleistung, ungesteuert). Eine Drosselung auf 40kW ist möglich.

Bei der Variante mit sieben externen Elektrofahrzeugen (ohne Nachtladung) ist eine Ladeleistung von mindestens 90kW pro Ladepunkt erforderlich, damit alle Touren ohne weitere Zwischenladungen durchführbar sind. Die Spitzenlast liegt hier ohne Lademanagement mit über 560kW deutlich höher als bei den internen Fahrzeugen (Anschlussleistung 630kW). Eine Drosselung auf 430kW (-23%) ist möglich. Werden 150kW-Lader verwendet ergibt sich eine höhere Flexibilität und die Drosselung der Gesamtleistung kann auf bis zu 330kW (-41%) verbessert werden. Aufgrund der zusätzlichen Pendelstrecken liegt der Energieübertrag mit rund 170.000 kWh p.a. etwas höher als bei den internen Fahrzeugen.

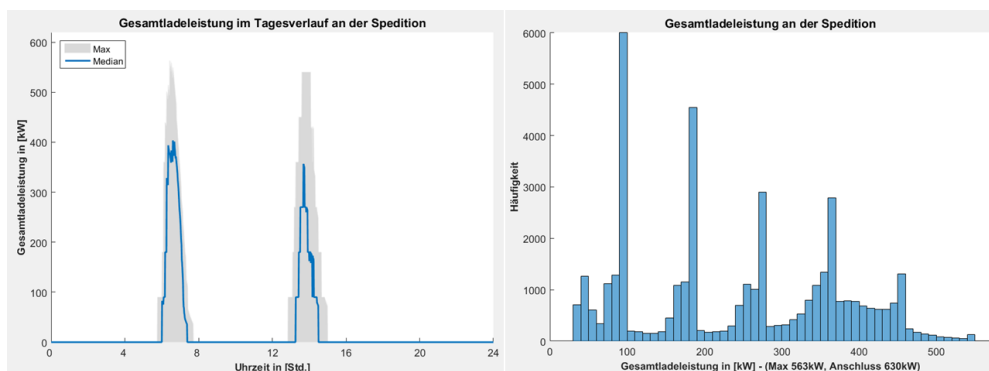


Abbildung 64 Lastverlauf und Verteilung der Gesamtladeleistung für den Verteil- und Sammelverkehr am Betriebshof (sieben externe Fahrzeuge, 90kW Ladeleistung, ungesteuert). Eine Drosselung auf 330 bis 430kW ist möglich.

Der Einsatz von Wasserstofffahrzeugen bietet sich aus technischer Sicht insbesondere für die externen Fahrzeuge an. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Fahrzeug- und Ladewirkungsgrade ergibt sich hierfür ein Wasserstoffbedarf von rund 7.750kg p.a.¹⁹⁴ Dies entspricht einer durchschnittlichen Menge von rund 4,4kg pro Fahrzeug pro Tag. Je

¹⁹⁴ $\eta_{TTW, BEV} \sim 80\%$, $\eta_{LI} \sim 95\%$, $\eta_{TTW, H2} \sim 50\%$

nach individueller Tourenlänge und Fahrzeugreichweite erscheint ein Tankvorgang pro Woche damit realistisch.

Zusammenfassung: Verteil- und Sammelverkehre (Spedition)

Bei einer Nachtladung reichen schon sehr geringe Ladeleistungen ($\leq 7,4\text{kW}$) aus, um alle Touren ohne Zwischenladen absolvieren zu können. Die Spitzenlasten bleiben moderat (52kW). Für externe Fahrzeuge sollte diesbezüglich eine öffentliche Ladeinfrastruktur in der Umgebung geschaffen werden, da hier ansonsten mit hohen Ladeleistungen (min. 90kW) vor und nach der Tour am Betriebshof geladen werden muss und unverhältnismäßig hohe Spitzenlasten (560kW , gesteuert $330\text{--}430\text{kW}$) anfallen. Eine öffentliche Ladeinfrastruktur ist jedoch auch für externe Fahrzeuge nicht zwingend nötig, wenn die hohe Gesamtleistung bereitgestellt werden kann. Bei einer ganzheitlichen Drosselung bieten höhere Ladeleistungen an den Einzelstationen Vorteile hinsichtlich der Spitzenlast. Insbesondere für die externen Fahrzeuge könnten auch Wasserstoff-Lkw eingesetzt werden, bei etwa einem Tankvorgang pro Woche.

6.6.2 Industrielle Umlaufverkehre

Für die industriellen Umlaufverkehre werden schwere Sattelzüge (bis 40t Gesamtgewicht) über den Tag in mehreren Touren von Montag bis Freitag zur Werksbelieferung eingesetzt. Entsprechend dem definierten Elektrifizierungsszenario für 2030 werden von 12 Fahrzeugen am Betriebshof drei als Elektrofahrzeuge angesetzt (2x für Werk 1, 1x für Werk 2). Eigene Fahrzeuge der Spedition können über Nacht am Betriebshof geladen werden, externe Fahrzeuge müssen entweder andernorts (z.B. beim Subunternehmer oder in benachbarten Gewerbegebieten) über Nacht geladen werden oder während der Aufenthaltsdauer an der Spedition vor und nach der Tour (jeweils 45min , Mindestaufenthaltszeit für die Ladung). Eine Zwischenladung ist optional für alle Fahrzeuge zwischen den Touren auf dem Betriebshof möglich und ggf. auch auf dem Werksgelände der Kunden, sofern dies in den Auslieferungsprozess integrierbar ist. Die Startzeiten der Fahrzeuge liegen relativ scharf um 7 Uhr (Gleichverteilung $7\text{Uhr} \pm 10\text{min}$, tägl. individuell) und die letzte Ankunft auf dem Betriebshof soll gegen 16 Uhr erfolgen. Die tatsächliche Endzeit hängt von den jeweils individuellen Standzeiten am Betriebshof zwischen 30 und 60min (Gaußverteilung $30 \pm 10\text{min}$) sowie von den individuellen Standzeiten an den Werken zwischen 30 und 120min (Gaußverteilung $45 \pm 15\text{min}$) ab. Die Anzahl der Umläufe wurde so gewählt, dass die Endzeit im Mittel möglichst nahe bei 16 Uhr liegt (5 für Werk 1, 4 für Werk 2, Fahrgeschwindigkeit im Mittel ca. 70km/h). Die täglichen Fahrstrecken liegen damit für Werk 1 bei 200km (Distanz zum Betriebshof 20km) und für Werk 2 bei 240km (Distanz zum Betriebshof 30km). Externen Fahrzeugen wird zusätzlich ein Pendelweg zwischen 5 und 20km Gesamtstrecke zugeordnet (Gleichverteilung, tägl. Varianz $\pm 3\%$). Daraus ergeben sich die in Abbildung 65 dargestellten Anwesenheitszeiten. Aufgrund der pro Umlauf variierenden Standzeiten ergibt sich insbesondere zum Nachmittag eine tägliche Varianz zu den dargestellten Mittelwerten.

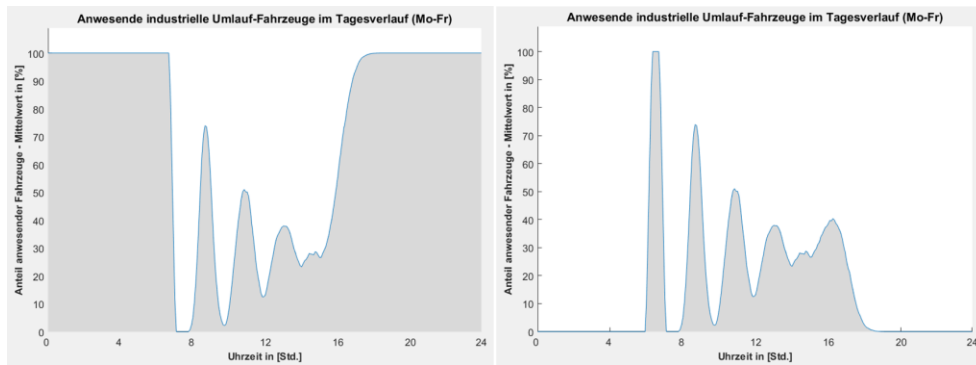


Abbildung 65 Anwesenheitszeiten der industriellen Umlaufverkehre am Betriebshof der Spedition im Tagesverlauf. Links: eigene Fahrzeuge, Rechts: externe Fahrzeuge.

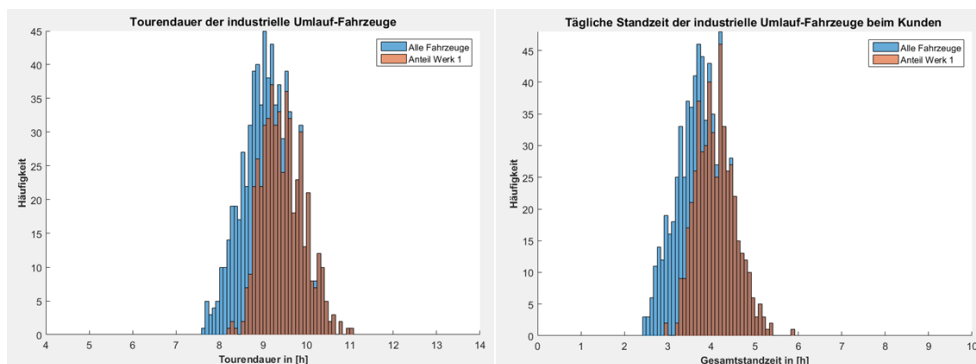


Abbildung 66 Tägliche Gesamttourendauern und Standzeiten beim Kunden der drei Elektrofahrzeuge im industriellen Umlaufverkehr. Der Anteil an Standzeiten an den täglichen Touren ist sehr hoch. Die minimale Standzeit beim Kunden liegt bei etwa 2,5 Stunden pro Tag.

Die Elektrofahrzeuge werden im ersten Schritt so ausgelegt, dass die maximale Gesamttagesstrecke von rund 260km ohne Zwischenladungen durchgeführt werden kann. Aufgrund der gut planbaren und täglich nahezu identischen Touren wird die Batteriegröße demzufolge ohne große Reserven auf 350kWh festgelegt, was einer realistischen, eher sogar moderaten Größenordnung für diese Fahrzeugklasse entspricht (min. 340kWh wären nötig). Für die eigenen Fahrzeuge ist eine Nachtladung mit mindestens 22kW pro Ladepunkt notwendig, um alle Fahrzeuge bis zur Abfahrt nahezu immer vollständig aufzuladen und alle Touren durchführen zu können. Die Spitzenlast entspricht dabei mit 66kW der Anschlussleistung der Ladestationen. Es werden rund 220.000 kWh p.a. am Betriebshof geladen.

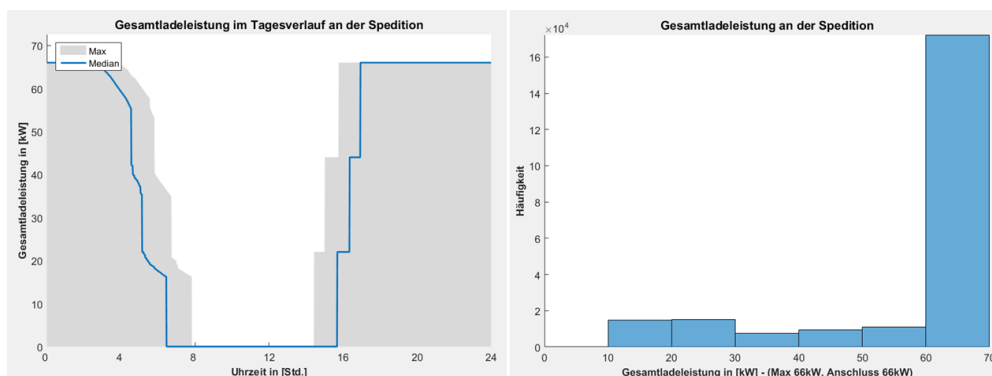


Abbildung 67 Lastverlauf und Verteilung der Gesamtladeleistung für den industriellen Umlaufverkehr am Betriebshof (drei eigene Fahrzeuge, 22kW Ladeleistung, ungesteuert, ohne Zwischenladung).

Wird zusätzlich am Betriebshof der Spedition zwischengeladen, könnte die Batteriegröße der Fahrzeuge abhängig von der Ladeleistung reduziert werden: Bei 22kW auf 290kWh, bei 50kW auf 250kWh und bei 100kW auf 180kWh. Alternativ könnte auch eine Kombination verschiedener Ladeleistungen für die Nacht- und Zwischenladung erfolgen. Eine vollständige Nachtladung ist schon bei 22kW gewährleistet und ggf. kann die Schnellladeinfrastruktur anderer Nutzergruppen tagsüber mitgenutzt werden.

Sollen externe Fahrzeuge mit 350kWh Batteriekapazität ausschließlich vor und nach der Tour am Betriebshof geladen werden, müsste mindestens eine Ladeleistung von rund 300kW pro Fahrzeug angeboten werden. Die Spitzenlast läge in diesem Fall dreimal so hoch, könnte aber auf 730kW gedrosselt werden. Werden zusätzlich Zwischenladungen nach den Umläufen am Betriebshof der Spedition vorgesehen kann die Ladeleistung auf 110kW pro Station gesenkt werden, bei einer Spitzenlast von rund 320kW (mit Drosselung min. 230kW, -28%). Wie schon bei den Verteilerfahrzeugen kann auch hier durch eine Erhöhung der individuellen Ladeleistung auf 150kW die Spitzenlast deutlich weiter gesenkt werden, auf 160kW (-50%) Gesamtladeleistung. Die umgesetzte Energiemenge liegt bei externen Fahrzeugen aufgrund der zusätzlichen Pendelwege bei rund 240.000 kWh p.a.

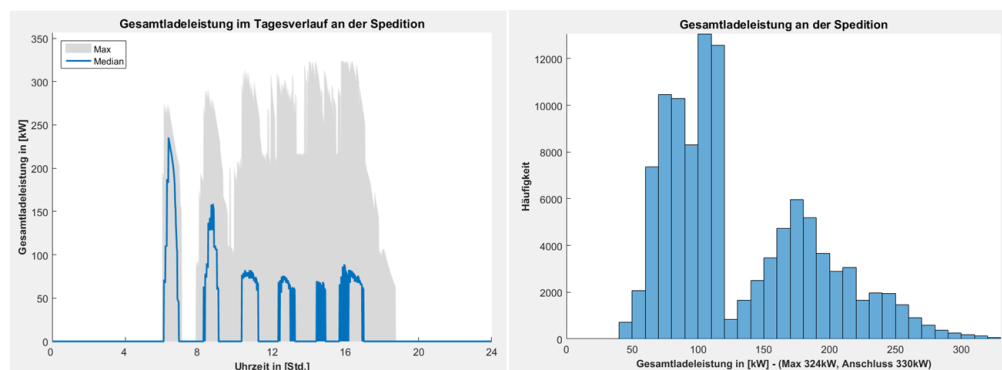


Abbildung 68 Lastverlauf und Verteilung der Gesamtladeleistung für den industriellen Umlaufverkehr am Betriebshof (drei externe Fahrzeuge, 110kW Ladeleistung, ungesteuert, mit Zwischenladung am Betriebshof der Spedition). Eine Drosselung auf 230kW ist möglich.

Eine weitere Möglichkeit zur Senkung der Lasten stellt eine zusätzliche Zwischenladung bei den belieferten Werken dar. Die minimale Gesamtstandzeit pro Tag an den Werken beträgt rund 2,5 Stunden, bei deutlich höheren Mittelwerten (siehe Abbildung 66). Wird davon ausgegangen, dass mindestens die minimale Zeit täglich beim Kunden geladen werden kann, ergibt sich beim Einsatz von 50kW-Ladern ein externer Energieumsatz von rund 95.000kWh p.a. für alle Fahrzeuge. Werden am Betriebshof der Spedition für die Nacht- und Zwischenladung ebenfalls 50kW-Lader vorgesehen, kann dieses Szenario erreicht werden (rund 140.000 kWh intern, 91.000 kWh extern p.a.). Die Spitzenlast am Betriebshof beträgt für die externen Fahrzeuge in diesem Fall nur 150kW.

Eine Alternative bei fehlenden Nacht- oder Zwischenlademöglichkeiten könnte der Einsatz von Wasserstofffahrzeugen darstellen. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Fahrzeug- und Ladewirkungsgrade ergibt sich für die externen Fahrzeuge ein Wasserstoffbedarf von rund 10.950kg p.a.¹⁹⁵ Dies entspricht einer durchschnittlichen Menge von rund 14,4kg pro Fahrzeug pro Tag. Damit würde ein Tankstopp alle zwei Tage für die Touren ausreichen.

Zusammenfassung: Industrieller Umlaufverkehr

Der sehr gut planbare und hinsichtlich der Fahrstrecken konstante industrielle Umlaufverkehr stellt relativ geringe Ansprüche an die Fahrzeuge (Batteriegröße, Ladeleistung) und Ladeinfrastruktur. Eine Nachtladung mit moderater Leistung reicht ohne weitere

¹⁹⁵ $\eta_{TTW, BEV} \sim 80\%$, $\eta_{LI} \sim 95\%$, $\eta_{TTW, H2} \sim 50\%$

Zwischenladungen aus. Durch Zwischenladungen am Betriebshof und durch die Erhöhung der Ladeleistung kann die zur Abdeckung der Gesamttagesstrecke notwendige Batteriegröße der Fahrzeuge deutlich gesenkt werden (-53% bei Zwischenladungen mit 100kW). Wird auch beim Kunden geladen, könnte dieser Effekt noch verstärkt werden. Für externe Fahrzeuge mit öffentlicher Nachtladung muss eine geeignete Infrastruktur geschaffen werden. Hierbei spielen die angebotenen Fahrzeugspezifikationen eine Rolle, hinsichtlich Ladeleistungen und verbauter Ladegeräte (AC vs. DC). Eine AC-Schnittstelle kann eine für den Anwendungsfall vollkommen ausreichende aber günstigere öffentliche AC-Ladeinfrastruktur mit mindestens 22kW pro Ladepunkt in Industriegebieten ermöglichen. Externe Fahrzeuge ohne Nachtladung können alternativ vor und nach der Tour am Betriebshof geladen werden. Hierbei sind vergleichsweise hohe Ladeleistungen notwendig (min. 290kW). Erfolgen zusätzliche Zwischenladungen auf dem Betriebshof, kann die Ladeleistung auf 110kW pro Ladepunkt gesenkt werden. Wird zusätzlich auch mindestens die minimale tägliche Standzeit beim Kunden geladen (2,5h), reichen 50kW-Lader beim Kunden und auf dem Betriebshof aus. Eine Drosselung der Gesamtladeleistung ist auf dem Betriebshof i.A. möglich. Höhere maximale Ladeleistungen an den einzelnen Ladepunkten ermöglichen dabei mehr Flexibilität und eine stärkere Drosselung der Gesamtleistung. Der Anwendungsfall ist somit nicht zwingend auf eine öffentliche Ladeinfrastruktur angewiesen. Alternativ könnten Wasserstofffahrzeuge zum Einsatz kommen, mit einem Tankvorgang alle zwei Tage. Dies bietet sich insbesondere für Fahrzeuge ohne Nachtlademöglichkeit an.

6.6.3 Nationaler Güterverkehr

Für den nationalen Güterverkehr werden schwere Sattelzüge (bis 40t Gesamtgewicht) für mehrtägige, variierende und überregionale Touren von Montag bis Freitag eingesetzt. Mögliche Rückfahrten am Samstag werden ebenfalls berücksichtigt. Entsprechend dem definierten Elektrifizierungsszenario für 2030 werden von 20 Fahrzeugen am Betriebshof vier als Elektrofahrzeuge angesetzt. Hierbei wird ausschließlich von Speditionseigenen Fahrzeugen ausgegangen, welche mindestens einmal die Woche, i.d.R. freitags, zum Betriebshof zurückkehren. Fahrzeuge, die früher eintreffen werden ab dem Folgetag erneut, ggf. mehrtägig, eingesetzt. Spätestens ab Samstagmittag befinden sich alle Fahrzeuge über das Wochenende auf dem Betriebshof. Die Abfahrtszeiten der Fahrzeuge am Betriebshof liegen zwischen 5 und 6 Uhr, die Ankunftszeiten liegen zwischen 15 und 22 Uhr, samstags zwischen 6 und 14 Uhr (alle jeweils gleichverteilt, individuell für jeden Tag). Daraus ergeben sich die in Abbildung 69 dargestellten Anwesenheitszeiten.

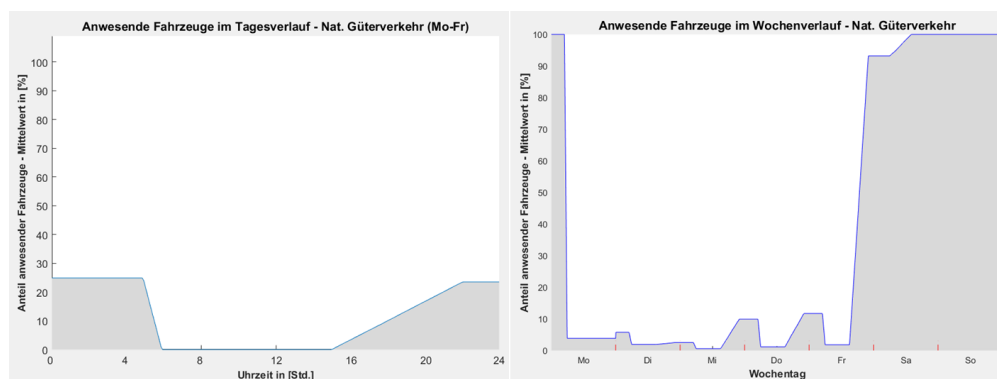


Abbildung 69 Anwesenheitszeiten für den nationalen Güterverkehr am Betriebshof der Spedition im Tagesverlauf (links, ohne Feiertage) und Wochenverlauf (rechts).

Für die täglichen Fahrstrecken wird eine Verteilung zwischen 150 und 650km (Gaußverteilung 320 ± 100 km) verwendet (Abbildung 70). Samstags wird ggf. eine halbe Tagesstrecke angesetzt. Für die i.d.R. mehrtägigen Touren der Elektrofahrzeuge summieren sich die Gesamtstrecken auf bis zu rund 2.400km.

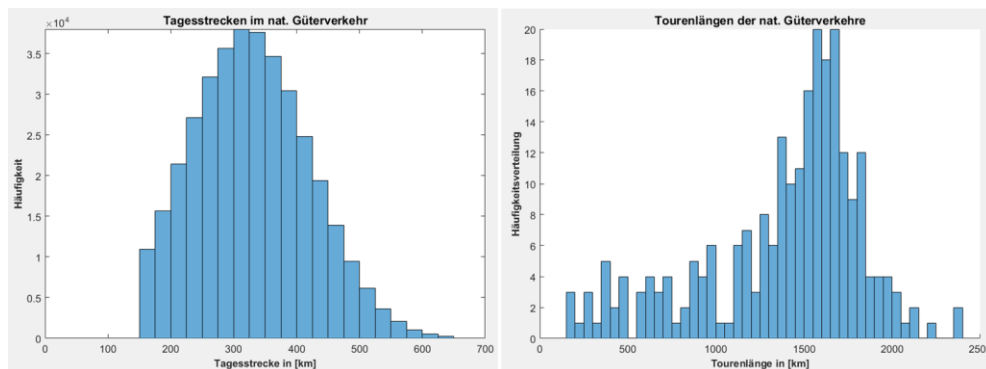


Abbildung 70 Verteilung der Tagesstrecken (links, bezogen auf 1.000 Fahrzeuge) und der Gesamtfahrstrecken pro Abwesenheit der vier Elektrofahrzeuge (rechts).

Aufgrund der langen Distanzen und bis zu sechstägigen Abwesenheit der Fahrzeuge ist eine externe Ladung zwingend erforderlich. Zur Auslegung der benötigten Batteriekapazitäten und Ladeleistungen wurden, unter Berücksichtigung gesetzlicher Pausenzeiten¹⁹⁶, folgende Annahmen getroffen: Die Fahrzeuge können sowohl am Betriebshof als auch unterwegs über Nacht aufgeladen werden. Hierfür stehen mindestens sieben Stunden zur Verfügung (min. Aufenthaltszeit am Betriebshof zwischen zwei Fahrten). Weiterhin soll nach Bedarf maximal eine Stunde am Tag zwischengeladen werden. Ausgehend von der maximalen täglichen Fahrstrecke von 650km errechnet sich ein Tagesenergiebedarf von bis zu 845kWh. Die Auslegung hängt nun wesentlich von der Ladeleistung bei der Zwischenladung ab. Kann mit einer Durchschnittsleistung von 280kW geladen werden, werden 266kWh (205km) abgedeckt, bei 140kW Durchschnittsleistung sind es 133kWh (102km).¹⁹⁷ Im ersten Fall müssten noch 579kWh (445km) in der Nacht geladen werden, wofür eine Durchschnittsleistung von 87kW über die sieben Stunden erforderlich wäre, im zweiten Fall sind 712kWh (548km) Nachts zu laden, bei einer Durchschnittsleistung von 107kW. Die Batteriekapazität der Fahrzeuge muss dabei mindestens der nachts zuzuladenden Energiemenge entsprechen und wird dem ersten Fall folgend auf 600kWh festgelegt (rund 460km Reichweite). Für die öffentliche Ladung sind somit Ladepunkte mit mindestens 350kW für die Zwischenladung und Ladepunkte mit 150kW für die Nachtladung und entsprechende Standplätze vorzusehen. Die Ladung auf dem Betriebshof kann mit etwa 100kW pro Ladepunkt veranschlagt werden.

Es wird davon ausgegangen, dass die Verwendung der eigenen Ladeinfrastruktur auf dem Betriebshof hinsichtlich der Energiekosten die wirtschaftlichste Variante darstellt und externe Zwischenladungen nach Möglichkeit (auch aus zeitlichen Gründen) vermieden werden. Demzufolge wird bei der Rückkehr der Fahrzeuge von einem i.A. geringen Restladestand ausgegangen. In der Simulation wird bei Touren außerhalb der Fahrzeugreichweite deshalb kein Restladestand berücksichtigt.

Bei einer Ladeleistung von 100kW pro Ladepunkt können alle Elektrofahrzeuge auf dem Betriebshof bis zu den jeweiligen Abfahrtszeiten vollständig geladen werden. Die Spitzenlast entspricht dabei ohne Lademanagement der Anschlussleistung von 400kW. Die höchsten Lastspitzen fallen vor allem Freitags an, da hier die meisten Fahrten enden (siehe Abbildung 71). Eine Drosselung der Gesamtleistung hätte somit in gewissen Gren-

¹⁹⁶ KFZ-Auskunft (o.J.)

¹⁹⁷ Bei einem Ladewirkungsgrad von 95% im Fahrzeug.

zen keine Auswirkungen auf die Mobilität, da am Wochenende keine Abfahrten erfolgen. Insgesamt werden rund 150.000 kWh auf dem Betriebshof und rund 300.000 kWh extern p.a. geladen.

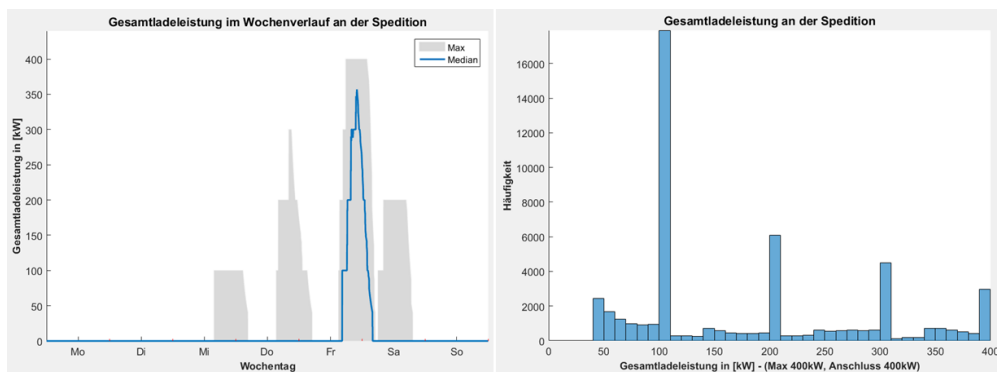


Abbildung 71 Lastverlauf und Verteilung der Gesamtleistung für den nationalen Güterverkehr am Betriebshof (vier Fahrzeuge, 100kW Ladeleistung, ungesteuert).

Bei einer Drosselung der Gesamtleistung auf 200kW (-50%) werden immer noch sämtliche Fahrzeuge vor jeder Tour vollständig aufgeladen. Bei einer Verringerung der Ladeleistung der einzelnen Ladepunkte auf 50kW, was zur gleichen Spitzenlast führen würde, wäre das bei knapp 10% aller Abfahrten nicht mehr der Fall. Dies bedeutet aber nicht zwingend, dass die nachfolgenden Fahrten dann nicht durchgeführt werden könnten, da nur für die maximale Tagesstrecke die volle Batteriekapazität erforderlich ist. Eine weitere deutliche Drosselung der Gesamtleistung erscheint somit möglich, insbesondere, wenn im Einzelfall mehr Zeit für die Zwischenladung akzeptiert wird. Die Tagesfahrstrecken sind in der Regel deutlich geringer als das Maximum von 650km, die Standzeiten in der Nacht sind in der Regel länger als das Minimum von sieben Stunden und in den meisten Fällen ist mit einem zumindest geringen Restladestand bei Ankunft zu rechnen. Für eine sichere Ladung mit geringer Spitzenlast könnte ein intelligentes, fahrzeugspezifisches Lademanagement unter Einbeziehung der Dispositionsdaten sorgen.

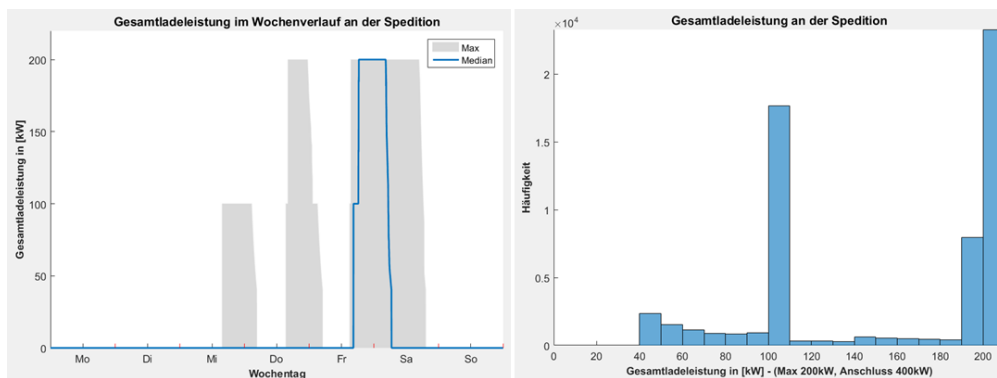


Abbildung 72 Lastverlauf und Verteilung der Gesamtleistung für den nationalen Güterverkehr am Betriebshof (vier Fahrzeuge, 100kW Ladeleistung, Drosselung auf 200kW Gesamtleistung).

Aufgrund der mehrtägigen Touren ist der Fernverkehr stark auf die Verfügbarkeit einer hinreichenden Anzahl an öffentlichen Ladestationen angewiesen und dies zu den jeweils passenden Zeiten und an den richtigen Standorten. Der Einsatz von Wasserstofffahrzeugen könnte hier mehr Flexibilität und Sicherheit bieten. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Fahrzeug- und Ladewirkungsgrade ergibt sich hierfür ein Wasserstoffbedarf von gut 20.000kg p.a.¹⁹⁸ Dies entspricht einer durchschnittlichen Menge von rund

¹⁹⁸ $\eta_{TTW, BEV} \sim 80\%$, $\eta_{LI} \sim 95\%$, $\eta_{TTW, H2} \sim 50\%$

20kg pro Fahrzeug pro Tag. Maximal ein Tankvorgang pro Tag würde somit für die meisten Tagesstrecken ausreichen, je nach Reichweite der Fahrzeuge.

Zusammenfassung: Nationaler Güterverkehr

Die Fahrzeuge des nationalen Güterverkehrs können einen Großteil der benötigten Energie über eine Nachtladung mit Ladeleistungen im Bereich von 100kW beziehen. Voraussetzung hierfür ist eine Möglichkeit zur Zwischenladung bei längeren Fahrten mit höheren Ladeleistungen (min. 350kW). Je höher die Ladeleistung bei der Zwischenladung ausfällt, desto kleiner können die Fahrzeugbatterien ausfallen und desto geringer sind die Leistungsanforderungen bei der Nachtladung. Aufgrund der langen, i.d.R. mehrtägigen Touren muss sowohl für die Zwischen- als auch für die Nachtladung eine öffentliche Ladeinfrastruktur geschaffen werden. Durch die Nachtladung auf den Betriebshöfen entstehen hohe Spitzenlasten (400kW), die aber deutlich gedrosselt werden können (<200kW). Eine Drosselung der Gesamtladeleistung ist dabei gegenüber einer Reduzierung der Leistungen der einzelnen Ladepunkte vorteilhafter. Aufgrund der i.A. mehrtägigen Fahrten wird nur rund ein Drittel der benötigten Energie am Betriebshof geladen (insgesamt rund 450.000 kWh). Ein Einsatz von Wasserstofffahrzeugen kommt für den Anwendungsfall ebenfalls in Frage und würde die Abhängigkeit von freien Stellplätzen mit externen Lademöglichkeiten vermeiden.

6.6.4 Betriebshof der Spedition

In diesem Abschnitt wird ein Szenario für den gesamten Betriebshof der Spedition simuliert. Hierbei werden folgende Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturspezifikationen angesetzt, entsprechend der optimalen Auslegung und dem Mobilitätsverhalten aus den bisherigen Einzeluntersuchungen:

- Sieben Verteilerfahrzeuge (12t) mit einer 150kWh Batterie und einer 7,4kW Nachtladung
- Drei Fahrzeuge für den industriellen Umlaufverkehr (40t SZM) mit einer 350kWh Batterie und einer 22kW Nachtladung sowie zusätzlicher Zwischenladungen am Betriebshof mit gleicher Leistung
- Vier Fahrzeuge für den nationalen Güterverkehr (40t SZM) mit einer 600kWh Batterie und einer 100kW Nachtladung sowie zusätzlicher externer Lademöglichkeiten mit 150kW bzw. 350kW Ladern für die Nacht- und Zwischenladung

Hierbei werden für die Elektrifizierung nur eigene Fahrzeuge angenommen, die über Nacht am Betriebshof geladen werden können.

Im ungesteuerten Fall ergeben sich am Betriebshof Spitzenlasten von bis zu rund 520kW, welche hauptsächlich freitags durch den nationalen Güterverkehr verursacht werden (bis zu 400kW). Insgesamt werden rund 520.000 kWh auf dem Betriebshof und 300.000 kWh extern geladen, was einem Wasserstoffbedarf von insgesamt rund 37.400kg p.a. entspricht.¹⁹⁹

¹⁹⁹ $\eta_{\text{TTW, BEV}} \sim 80\%$, $\eta_{\text{LI}} \sim 95\%$, $\eta_{\text{TTW, H}_2} \sim 50\%$

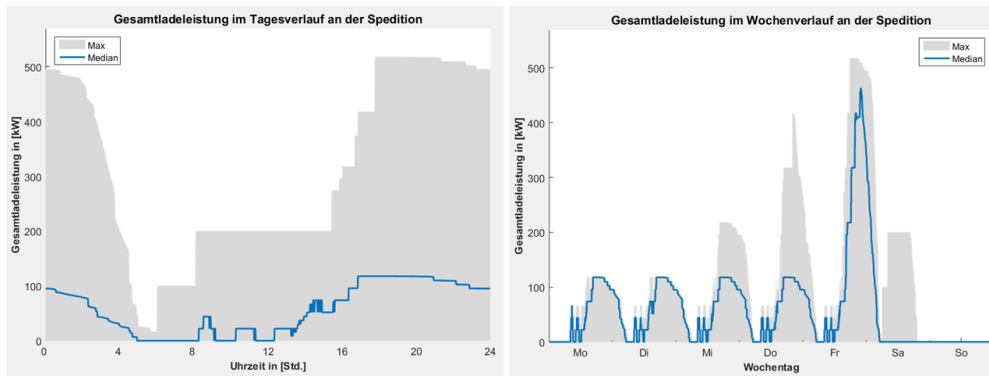


Abbildung 73 Gesamtladeleistung an der Spedition im Tages- und Wochenverlauf bei ungesteuerter Ladung.

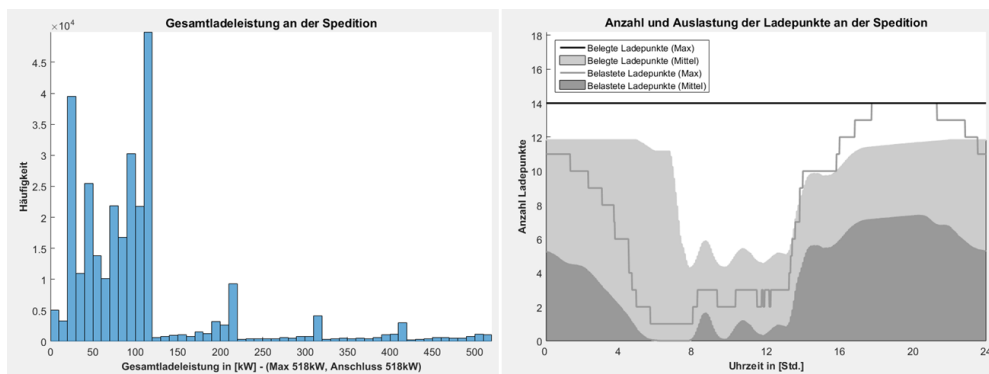


Abbildung 74 Verteilung der Gesamtladeleistung (links) und Auslastung der Ladestationen (rechts) an der Spedition bei ungesteuerter Ladung.

In der Spitze sind alle Ladestationen gleichzeitig belegt und belastet. Allerdings könnten die stärkeren Lader für den nationalen Güterverkehr tagsüber auch für die Zwischenladung der Fahrzeuge im Umlaufverkehr verwendet werden, was zu einer moderaten Entlastung der Spitzenlast am Abend führen könnte. Synergien bei den Ladestationen werden insbesondere auch bei der Elektrifizierung externer Fahrzeuge relevant, welche tagsüber bei hohen Leistungen geladen werden müssen (siehe Einzelanalysen).

Wie schon bei den Einzelanalysen ausführlich erörtert, ist eine deutliche Drosselung beim nationalen Güterverkehr möglich, u.a. aufgrund der großzügigen Fahrzeugauslegung (auch die längsten Tagesstrecken sollen bei minimaler Standzeit am Betriebshof noch ohne erhöhte externe Ladebedarfe durchführbar sein). Bei einer Begrenzung der Gesamtladeleistung auf beispielsweise 200kW, bei ausschließlicher Drosselung der Fahrzeugladungen für den nationalen Güterverkehr, liegt der minimale SOC bei Abfahrt der Fahrzeuge immer noch bei 99,6%. Werden zusätzliche externe Ladestops im Ausnahmefall zugelassen, ist sogar eine noch stärkere Drosselung möglich.

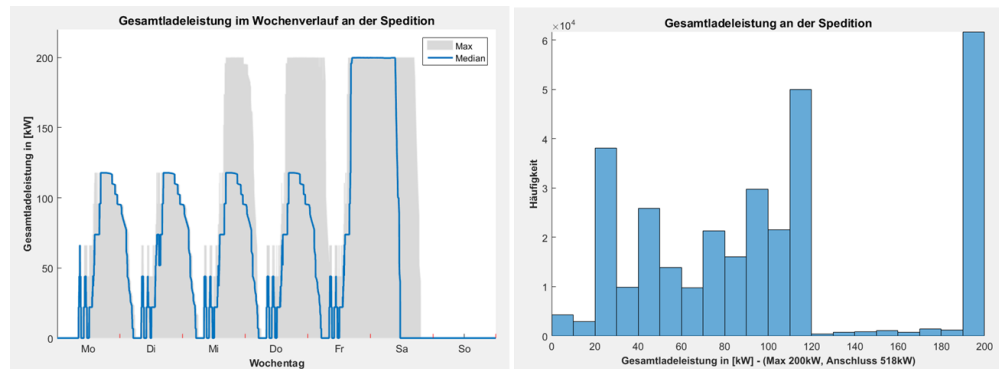


Abbildung 75 Lastverlauf und Verteilung der Gesamtleistung an der Spedition mit einer Drosselung auf maximal 200kW Gesamtleistung.

Zusammenfassung: Spedition insgesamt

Die Auswertungen zeigen, dass für die angesetzten Elektrifizierungsszenarien der regionale Verkehr über eine speditionseigene Ladeinfrastruktur bei moderaten Ladeleistungen abgedeckt werden kann. Dies wird insbesondere durch die langen Standzeiten über Nacht ermöglicht. Eine Herausforderung stellen die Fahrzeuge der externen Dienstleister dar, welche nicht über Nacht am Betriebshof stehen, und bei einer ausschließlichen Ladung an der Spedition sehr hohe Lastspitzen verursachen. Eine öffentliche Ladeinfrastruktur mit moderater Leistung in den umliegenden Gewerbegebieten könnte hier für eine Entlastung sorgen. Für den Fernverkehr müssen ausreichend öffentliche Ladepunkte geschaffen werden. Es werden Nachtladepunkte mit einer Leistung von rund 150kW und zusätzliche Hochleistungsladestationen mit mindestens 350kW für die Zwischenladung während der kürzeren Lenkzeitpausen tagsüber benötigt. Am Betriebshof führen die Fernverkehrsfahrzeuge zu vergleichsweise hohen Ladeleistungen, welche jedoch durch eine Drosselung oder besser ein fahrzeugspezifisches Lademanagement deutlich gemindert werden können. Der Einsatz von Wasserstofffahrzeugen ist für alle Nutzergruppen denkbar. Hierfür müssen öffentliche Tankstellen für Lkw bereitgestellt werden. Eine eigene Tankstelle an der Spedition erscheint dagegen aufgrund der begrenzten täglichen Wasserstoffbedarfe eher unwirtschaftlich (mittlerer täglicher Gesamtbedarf rund 150kg, vgl. Kapitel 4.5).

6.7 Generelle Erkenntnisse aus der Simulation

Aufgrund der mehrheitlich sehr gut planbaren Touren und klar definierten Einsatzszenarien der Fahrzeuge ist eine Ladeinfrastruktur gut planbar, kann bedarfsgerecht aufgebaut und dadurch effizient genutzt werden. Die Bedarfe der unterschiedlichen Nutzergruppen an den Betriebshöfen und die daraus resultierenden technischen Auswirkungen unterscheiden sich jedoch teilweise sehr deutlich. Die wichtigsten Unterschiede ergeben sich aus der Möglichkeit zur Nachtladung vs. kurzer Ladestopps vor, nach oder während den Touren, die Ladung eigener Fahrzeuge vs. der Fahrzeuge externer Dienstleister sowie der täglich zurückzulegenden Gesamtstrecken.

Unproblematisch erscheint die Ladung eigener Fahrzeuge im regionalen Verkehr mit Tagesstrecken von wenigen hundert Kilometern. Eine Nachtladung ist in diesem Fall mit moderaten Spitzenlasten am Betriebshof möglich. Hohe Herausforderungen hinsichtlich der Prozesse und Spitzenlasten stellen dagegen die externen Fahrzeuge da, welche aufgrund von nur kurzen Aufenthaltszeiten am Betriebshof, mit hohen Leistungen geladen werden müssen. Der technische Aufwand könnte durch öffentliche Nachtlademöglichkeiten in der Umgebung der Betriebshöfe deutlich minimiert werden. Externe Zwischenladungen können ebenfalls zu Entlastungen führen, eine Ladung bei Kunden ist aber keine zwingende Voraussetzung für die Elektrifizierung der Touren.

Auf der Langstrecke, mit teils mehrtägigen Touren, spielt die Möglichkeit der Nachtladung ebenfalls eine entscheidende Rolle. Ist diese neben den Betriebshöfen z. B. auch an Autobahnraststätten mit entsprechenden Lenkzeitpausen und heute gängigen Ladeleistungen gegeben, spielt eine weitere Zwischenladung mit hohen Leistungen eine untergeordnete Rolle. Letztere ist nur für überdurchschnittlich lange Tagesstrecken erforderlich. Kommt es aufgrund einer hohen Fahrzeugauslastung mit wechselnden Fahrern jedoch nur zu kurzen Stopps ohne Nachtlademöglichkeiten, ist eine öffentliche Ladeinfrastruktur mit möglichst hoher Leistung zwingend erforderlich, im Idealfall deutlich über der heute gängigen Werten. Eine ergänzende Ladung am Betriebshof ist aufgrund der dann vergleichsweise geringen Energieumsätze nur bei längeren Aufenthaltsdauern sinnvoll und ansonsten mit hohen Spitzenlasten verbunden. Für eine realistische Umsetzung sehen die in der Studie befragten Experten mehr Potenzial in einer öffentlichen Hochleistungsschnellladeinfrastruktur als für den Aufbau öffentlicher Nachtladeplätze. Letztere erfordern einen umfangreicheren Umbau der ohnehin knappen Lkw-Stellplätze, die Hochleistungsstationen werden dagegen für bestimmte Nutzergruppen ohnehin benötigt.

Die Höhe der Leistung einer öffentlichen Schnellladeinfrastruktur hat einen direkten Einfluss auf die Auslegung der Batteriegrößen der Fahrzeuge sowie der Ladeleistungen an den Betriebshöfen. In Verbindung mit den unterschiedlichen Nutzerszenarien werden seitens der Fahrzeughersteller deshalb flexible Angebote hinsichtlich Batteriegrößen, Ladeleistungen und Ladeschnittstellen (AC, DC oder Hochleistungs-DC) benötigt, um einen jeweils möglichst angepassten und damit wirtschaftlicheren Betrieb zu gewährleisten. Seitens einer öffentlichen Ladeinfrastruktur in Gewerbegebieten ist eine regionale Bedarfsermittlung empfehlenswert, um die spezifischen Belange der ansässigen Branchen zu berücksichtigen.

Die an den Betriebshöfen durch die Ladung von Elektrofahrzeugen verursachten Spitzenlasten können für die meisten Nutzergruppen durch einfache Lademanagementverfahren (Drosselung), teilweise sogar deutlich, reduziert werden. Bei wechselnden Touren oder konkurrierenden Nutzergruppen empfiehlt sich ein intelligenteres Lademanagement, welches zusätzliche Informationen, z. B. bezüglich der Einsatzplanung, berücksichtigen kann. Es zeigt sich zudem, dass höhere mögliche Maximalleistungen an den einzelnen Ladepunkten und Fahrzeugen in Verbindung mit einem Lademanagement zu geringeren Spitzenlasten am gesamten Betriebshof führen können. Bei sehr kurzen Aufenthalten mit geringer Flexibilität hinsichtlich der Ladeleistung können Lastspitzen ggf. alternativ über Batteriespeicher abgefangen werden.

Wasserstofffahrzeuge kommen für nahezu jeden Anwendungsfall grundsätzlich in Frage. Insbesondere für externe Fahrzeuge ohne Nachtlademöglichkeiten und hoch ausgelastete Fahrzeuge ohne längere Standzeiten, stellen sie hinsichtlich des technischen Aufwands ggf. eine bessere Alternative gegenüber den rein elektrischen Varianten mit sehr hohen Ladeleistungen und Spitzenlasten dar. Ausschlaggebend ist hierbei nicht die mögliche Batteriegröße, sondern die zeitlich eingeschränkten Lademöglichkeiten bei fehlender Nachtladung. Der Betrieb einer eigenen Wasserstofftankstelle auf den Betriebshöfen wird aufgrund der relativ geringen Umsätze als eher unwirtschaftlich angesehen.

7 Zusammenfassung, Ausblick und Handlungsempfehlungen

Im Rahmen der Studie wurden die allgemeinen Entwicklungstendenzen, Potenziale und Randbedingungen bezüglich einer Umstellung von Nutzfahrzeugen auf alternative Antriebe untersucht, die technischen Grundlagen für eine Lade- und Betankungsinfrastruktur dargestellt, die Anforderungen und Potenziale aus Nutzersicht über Befragungen ermittelt sowie die Anforderungen an die Energieinfrastruktur für zwei exemplarische Betriebshöfe simuliert. Die Ergebnisse zeigen, dass nicht nur das potenzielle Angebot an alternativen Antrieben heterogen ist, sondern auch die Bedarfe einzelner Branchen und Einsatzgebiete im Wirtschaftsverkehr. Dies betrifft einerseits die technischen Bedarfe und Auswirkungen sowie andererseits die Prozesse in den Betrieben.

Über die Simulationen konnten die technischen Minimalanforderungen für die betrachteten allgemeinen Szenarien und die verschiedenen Fahrzeuge und Einsatzzwecke ermittelt werden. Für eine praktische Umsetzung müssen jedoch auch die individuellen Anforderungen und Randbedingungen einzelner Standorte berücksichtigt werden. Hierzu gehören die Integration der neuen Fahrzeuge in bestehende Prozesse, die technische Machbarkeit hinsichtlich Fahrzeugauswahl, Reichweite und Nutzlast, Reserven und Flexibilität bei der Batteriekapazität und den Ladeleistungen. Zudem müssen für jeden Standort individuell abweichende Werte, beispielsweise für die Elektrifizierungsanteile, die Topologie der Fahrstrecken oder die Fahrzeugverbräuche berücksichtigt werden. Daneben spielen die individuellen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen eine wesentliche Rolle bei der Entscheidung, ob Fahrzeuge auf alternative Antriebe umgestellt werden können, bzw. welche Antriebsformen in Frage kommen. Mit der hier vorliegenden Studie wurde eine breite Grundlage geschaffen, um eine erste individuelle Bewertung des eigenen Fuhrparks vornehmen zu können. Weiterhin sind die entwickelten Simulationstools übertragbar und können für spezifische Standortanalysen einzelner Betriebshöfe angewendet werden.

Durch die Befragungen und Simulationsergebnisse konnten darüber hinaus zukünftige Bedarfe und Anforderungen an eine öffentliche Ladeinfrastruktur, beispielsweise in Gewerbegebieten und an Autobahnen, abgeleitet werden. Auch hier zeigten sich große Unterschiede und verschiedene Optionen für die verschiedenen Einsatzzwecke der Fahrzeuge. Die Ausgestaltung einer öffentlichen Ladeinfrastruktur kann sich dabei auch direkt auf die notwendige Auslegung der privaten Ladestationen und die technischen Anforderungen der Fahrzeuge selbst auswirken, wie beispielsweise der benötigten Batteriekapazitäten. Ein schneller und den Nutzern angepasster Aufbau einer öffentlichen Lade- und Betankungsinfrastruktur wird als grundlegend angesehen, um für alle Einsatzszenarien eine Umstellung grundsätzlich zu ermöglichen.

Eine ausführliche Zusammenfassung der Kernergebnisse der Studie findet sich in der Kurzfassung zu Beginn des Dokuments. Aus den Ergebnissen werden abschließend folgende Handlungsempfehlungen abgeleitet:

Hinsichtlich der öffentlichen Infrastruktur:

- **Öffentliche Basis-Infrastruktur:** Der Aufbau einer flächendeckenden Grundausstattung an öffentlicher Lade- und H₂-Betankungsinfrastruktur sollte umgehend durch das zuständige Bundesministerium angestoßen und gefördert werden. Hierbei sollten sowohl Nachtladeplätze als auch das Hochleistungsschnellladen (HPC) für verschiedene Branchen berücksichtigt werden (siehe Abbildung 1, Seite 9). Quantitative Bedarfsplanungen müssen dementsprechend ergänzt werden (vgl. Plötz, P. et al. (2020)). Die Infrastruktur, insbesondere für den Fernverkehr, sollte bereits vor den Fahrzeugen verfügbar sein, zur Vermeidung der

Henne-Ei Problematik (vgl. verfehltes 1 Mio. Ziel bei Pkw). Um Engpässe zu vermeiden, sollten Park- und Ladestandorte an Autobahnen ausgebaut werden und über Reservierungsmöglichkeiten verfügen. Einer Konkurrenz von Verbrennern und alternativ angetriebenen Lkw um Stellplätze (z. B. auch bei Plätzen mit unterschiedlichen Ladeleistungen) sollte entgegengewirkt werden.

- **Regionale Infrastrukturkonzepte:** Die Anforderungen an die Ladeinfrastruktur für elektrische Lkw sind sehr heterogen und branchenspezifisch und somit komplexer als für Pkw. Beim Infrastrukturaufbau muss z. B. zwischen Nachtladungen (längere Standdauer, moderate Ladeleistung, viele Stationen) und schnellen Zwischenladungen (hohe Ladeleistungen) unterschieden werden (siehe Abbildung 1, Seite 9). Neben den Planungen für Fernstrecken müssen auch regionale Infrastrukturkonzepte erstellt werden (z. B. für Gewerbegebiete). Der Bedarf hängt dabei wesentlich von der Struktur und den Randbedingungen der lokal ansässigen Unternehmen ab (z. B. eigene Fahrzeuge vs. externe Dienstleister; Ladung auf dem Betriebshof vs. Abstellort im öffentlichen Raum; schwere Lkw vs. Lnfz; Kurzstrecken vs. Langstrecken; Nachtladung vs. Schnellladung). Für regionale Ladeinfrastrukturkonzepte sollte der Aufbau zentraler Ladeparks (ggf. auf privaten Flächen, z. B. über ein Mietkonzept) gegen eine dezentrale Ladeinfrastruktur (ggf. mit einer Reservierungsmöglichkeit) abgewogen werden. Branchenverbände und ansässige Unternehmen sollten den Prozess entsprechend ihren Anforderungen unterstützen.
- **Standards schaffen:** Bestehende Standardisierungsaktivitäten müssen weiter unterstützt und zügig vorangebracht werden. Insbesondere hinsichtlich der Lade- und Wasserstoffinfrastruktur sind EU-weit einheitliche Systeme erforderlich.

Hinsichtlich der Umsetzung bei Unternehmen:

- **Ladeinfrastruktur auf Betriebshöfen:** Für verschiedene Branchen und Einsatzszenarien kann ein wesentlicher Teil der Energiebereitstellung für elektrische Lkw über die eigenen Betriebshöfe erfolgen (siehe Abbildung 1, Seite 9). Eine Ladeinfrastruktur sollte hier deutlich gefördert werden, um einen wirtschaftlichen Betrieb zu ermöglichen. Eine Förderung von Beratungsangeboten kann zur Reduzierung von Einstiegshürden beitragen (z. B. bzgl. energetischer und technischer Voraussetzungen, Disposition und Prozesse, Förderprogramme, ...).
- **Nutzungsszenarien aufzeigen:** In Abhängigkeit der realen Nutzung sollten in Abstimmung mit den beteiligten Akteuren Nutzungsszenarien für die Ladeinfrastrukturen entwickelt werden. In Nebenzeiten, zu denen die Ladeinfrastruktur nicht für gewerbliche Zwecke benötigt wird, sollte geprüft werden, ob Dritte die Ladeinfrastruktur nutzen können. Ziel sollte eine optimale Auslastung der Ladeinfrastruktur sein, um die Wirtschaftlichkeit des Systems zu verbessern.
- **Vereinbarkeit mit bestehenden Prozessen:** Die Verwendung alternativ angetriebener Lkw sollte für eine bessere Akzeptanz die bestehenden Prozesse der Fahrzeugbetreiber und -nutzer so wenig wie möglich beeinflussen. Die Aufladung bzw. Betankung der Fahrzeuge sollte insbesondere in bestehenden Lenkzeitpausen bzw. über Nacht garantiert erfolgen können oder nicht länger dauern als bisherige Tankvorgänge.
- **Praktische Fahrzeugeinsätze:** Die Anforderungen an die elektrischen Nutzfahrzeuge sind sehr heterogen und branchenspezifisch. Fahrzeuge müssen flexibel angeboten werden (z. B. hinsichtlich Batteriegrößen, Ladeleistung, Zuladung und Anhängerlasten, ...). Prozesse müssen in den Unternehmen ggf. angepasst werden. Die Integration in die Flotten sollte durch breit angelegte praktische Fahrzeugeinsätze bei den Anwendern gefördert werden. Neben einer spezifischen Bedarfsermittlung sollte der Nachweis der Alltagstauglichkeit (seriennahe Fahrzeuge) und die Verminderung von Einstiegshürden (geförderte Infrastruktur, angepasste Prozesse) erreicht werden. Pilotprojekte werden sowohl für den Langstreckengüterverkehr als auch für den lokalen Lieferverkehr empfohlen.

Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit:

- **Wirtschaftliche Fahrzeuge:** Zum Erreichen der Klimaziele für 2030 müssen alternative Fahrzeuge zeitnah in den Markt kommen. Dies gilt insbesondere für schwere Lkw, welche einen Großteil der CO₂-Emissionen im Straßengüterverkehr verursachen. Für eine schnelle Verbreitung sollten diese Fahrzeuge durch Förderung bei den Total Cost of Ownership (TCO) wirtschaftlich zumindest gleichwertig wie Verbrenner sein. Kosten für eine lokale Ladeinfrastruktur müssen hierbei mitberücksichtigt werden.
- **Planbare Energiekosten:** Die Energiekosten sind vor allem im Fernverkehr ein wesentlicher Kostenfaktor beim Betrieb von Lkw. Insbesondere beim grünen Wasserstoff bestehen hohe Unsicherheiten bzgl. zukünftiger Bezugspreise. Für eine bessere Planbarkeit der Investitionen sollten Konzepte für eine stabile und günstige Preisgestaltung entwickelt werden (z. B. Förderung der Infrastruktur für die H₂-Gewinnung, Verminderung von Steuern und Abgaben, Preisgestaltung als Auswahlkriterium für Förderungen, ...).
- **Förderung alternativer Antriebe:** Grundsätzlich sollten Anreize geschaffen werden, um eine Nutzung umweltfreundlicher Antriebstechnologien zu erzielen. Die Fahrzeugbetreiber wünschen sich diesbezüglich auch nicht-monetäre Anreize, wie beispielsweise längere Lieferzeitfenster und den Erlass von Einfahrverboten für umweltfreundliche Fahrzeuge sowie den Ausbau von Umweltzonen. Bisher sehen sich Unternehmen, die umweltfreundlich agieren, im Nachteil, da sie zunächst hohe Investitionskosten tätigen müssen. Die Bundesregierung kann durch gesetzte Rahmenbedingungen eine gleiche Ausgangslage und somit faire Wettbewerbsbedingungen für alle schaffen, z. B. durch Aufnahme der Maßnahmen in das Elektromobilitätsgesetz (für Lkw).

In Abbildung 76 wurden die notwendigen Maßnahmen mit dem Horizont bis 2030 zeitlich eingeordnet. Ein gemeinsames, konstruktives und effizientes Handeln aller Akteure ist erforderlich, um auch im Wirtschaftsverkehr zeitnah den notwendigen Beitrag zu den Klimazielen leisten zu können. Die entscheidenden Weichen für eine Umstellung der Fahrzeuge hin zu alternativen Antrieben müssen heute gestellt werden.

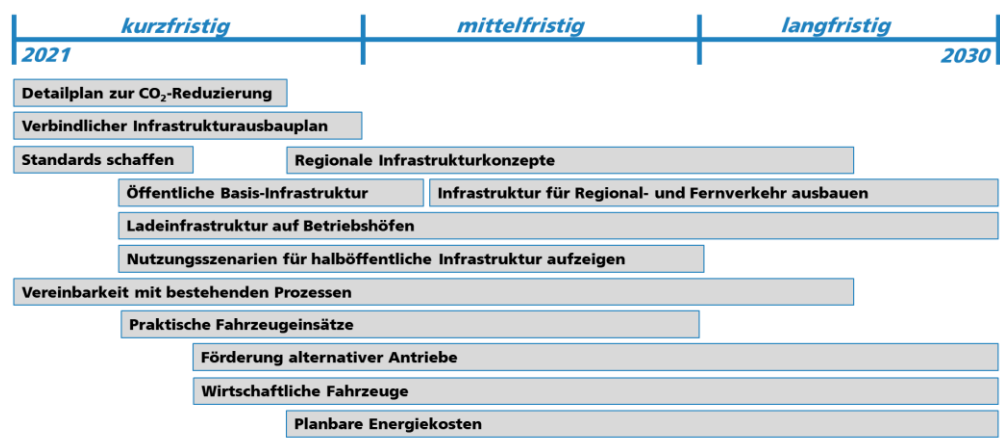


Abbildung 76 Zeitliche Einordnung der aus der Studie abgeleiteten Handlungsempfehlungen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Mindestanforderungen an die Ladeleistung für die simulierten Nutzergruppen der KEP- und Speditionslogistik.....	9
Abbildung 2	Aufbau und Schwerpunkte der Studie	11
Abbildung 3	Rein elektrisch angetriebene Nutzfahrzeuge in Deutschland.....	12
Abbildung 4	Anteile der CO ₂ -Emissionen nach Fahrzeugklassen.....	14
Abbildung 5	CO ₂ -Kontingente im Verkehrssektor laut Bundesklimaschutzgesetz. ...	15
Abbildung 6	Anteile der Emissionsquellen im Verkehr 2018 (ohne CO ₂ aus Biokraftstoffen).....	15
Abbildung 7	Angestrebte und beschlossene Einschränkungen für Verbrenner-Fahrzeuge in verschiedenen Regionen.....	16
Abbildung 8	Maßnahmenplan des BMVI zur Reduzierung der CO ₂ -Emissionen im Nutzfahrzeugbereich.....	17
Abbildung 9	Rein elektrisch betriebene LNFZ im Markt oder für 2020 angekündigt.	18
Abbildung 10	Rein elektrische Lkw: Daimler eActros und eCascadia.	19
Abbildung 11	Brennstoffzellen-Lkw: Nikola Tre BZ (Ankündigung) und Hyundai H ₂ Xcient (Auslieferung einer Testflotte).....	20
Abbildung 12	Exemplarischer Vergleich von Anschaffungs- und Energiekosten für Elektrotransporter gegenüber Dieselfahrzeugen.	21
Abbildung 13	Prognose der Nutzerkostenstruktur von Diesel-Sattelzügen im Zeitraum 2020 bis 2030.....	22
Abbildung 14	Prognostizierte Anschaffungskosten und Nutzerkosten für SZM im Jahr 2025.....	22
Abbildung 15	Vergleich der Gesamtwirkungsgrade von Elektrofahrzeugen (BEV), Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV) und Verbrennern mit synthetischen Kraftstoffen (P2X) einschließlich vorgelagerter Prozesse zur Energiebereitstellung.....	24
Abbildung 16	Hypothetischer Energiebedarf für die Produktion von P2X-Produkten bei einer vollständigen Deckung der Verbräuche von 2016.....	25
Abbildung 17	Schnellladestationen nur für Pkw ausgelegt.	26
Abbildung 18	Fahrplan für den Ausbau einer Lade- und Betankungsinfrastruktur laut BMVI Gesamtkonzept.	28
Abbildung 19	Wechselstrom- vs. Gleichstromladen.....	31
Abbildung 20	Grundlegender Aufbau von Ladestationen und technische Mindestanforderungen	31
Abbildung 21	Spezielle Ladelösungen für Nutzfahrzeuge.....	32
Abbildung 22	Pantograph (links) und Umgekehrter Pantograph (rechts).	32
Abbildung 23	Wichtige Kennungen und Kommunikationsprotokolle der Elektromobilität.....	33
Abbildung 24	Mögliche Ansätze für das Lastmanagement.....	35
Abbildung 25	Das Rollenmodell der Elektromobilität.....	37
Abbildung 26	Öffentliches Laden und das dazugehörige Betreibermodell	37

Abbildung 27 Laden am Betriebshof und die dazugehörigen Betreibermodelle	38
Abbildung 28 Laden am Zuhause des Mitarbeitenden und die dazugehörigen Betreibermodelle.....	39
Abbildung 29 Schematische Darstellung eines Brennstoffzellen-Lkw mit Wasserstoff-Tank, Brennstoffzelle und Batterie.	41
Abbildung 30 Volumetrische Energiedichten von Kraftstoffen im Vergleich.....	42
Abbildung 31 Entwicklung der spezifischen Investitionskosten für Alkalische, PEM- und SOEC-Elektrolyse bis 2050 nach DENA.....	45
Abbildung 32 Weltweite Potentiale für die Wasserstoffproduktion nach Regionen. ..	47
Abbildung 33 Stromgestehungskosten in den Jahren 2020, 2030, 2050 in €-ct/kWh nach Frontier Economics.....	48
Abbildung 34 Konzept einer Wasserstofftankstelle für die Betankung von Pkw und Nutzfahrzeugen.	51
Abbildung 35 Übersicht der betrachteten Wirtschaftsverkehre	55
Abbildung 36 Distributionsstruktur bei Ladungsverkehren	56
Abbildung 37 Distributionsstruktur bei Teilladungsverkehren	56
Abbildung 38 Übersicht Logistikprozess mit potenziellen Lademöglichkeiten	57
Abbildung 39 Abstellorte der Fahrzeugflotte von KEP-Nahverkehren in Prozent.....	59
Abbildung 40 Überbelegter Rastplatz an einer Autobahn.....	60
Abbildung 41 Warenumsatz im Straßenraum.	61
Abbildung 42 Entladung an Laderampe.	62
Abbildung 43 Wartezeiten an Laderampe.	62
Abbildung 44 Müllsammelfahrzeug.	64
Abbildung 45 Sattelzugmaschine im Umlaufverkehr.	66
Abbildung 46 7,5-Tonner mit Planenaufbau während eines Entladevorgangs in der Stuttgarter Innenstadt.....	67
Abbildung 47 Distributionsstruktur von Paketzustellungen.....	68
Abbildung 48 In der Simulation angesetzte Ladeleistungen in Abhängigkeit des SOC und der maximalen Ladeleistung der Fahrzeuge.....	76
Abbildung 49 Anwesenheitszeiten der Verteil- und Sammelverkehre am KEP- Betriebshof im Tagesverlauf.	77
Abbildung 50 Verteilung der Tourendauern und Tourenlängen für die 33 Elektrofahrzeuge im Verteil- und Sammelverkehr (KEP).	78
Abbildung 51 Lastverlauf und Verteilung der Gesamtladeleistung für den Verteil- und Sammelverkehr am KEP-Betriebshof (33 eigene Fahrzeuge, 3,7kW Ladeleistung, ungesteuert).....	78
Abbildung 52 Lastverlauf und Verteilung der Gesamtladeleistung für den Verteil- und Sammelverkehr am KEP-Betriebshof (33 externe Fahrzeuge, 22kW Ladeleistung, ungesteuert).....	79
Abbildung 53 Auslastung der Ladepunkte für den Verteil- und Sammelverkehr am KEP-Betriebshof. (33 externe Fahrzeuge, max. 22kW Ladeleistung).	79
Abbildung 54 Anwesenheitszeiten am KEP-Betriebshof im Tagesverlauf und Tourenlängen für die sechs Elektrofahrzeuge im Depot- Direktverkehr.	80

Abbildung 55 Möglicher Fahrtenablauf und Ladestopps für die Depot-Direktverkehre.	81
Abbildung 56 Lastverlauf und Verteilung der Gesamtladeleistung für die Depot-Direktverkehre am KEP-Betriebshof (sechs Fahrzeuge, 150kW Ladeleistung, ungesteuert).	81
Abbildung 57 Lastverlauf der Ladeleistung für die Systemverkehre am KEP-Betriebshof (ein Fahrzeug, max. 150kW Ladeleistung, ungesteuert)....	83
Abbildung 58 Lastverlauf und Verteilung der Gesamtladeleistung für den KEP-Betriebshof mit eigenen Verteilerfahrzeugen (ungesteuert).	84
Abbildung 59 Lastverlauf und Verteilung der Gesamtladeleistung für den KEP-Betriebshof mit externen Verteilerfahrzeugen (ungesteuert).	85
Abbildung 60 Auslastung der Ladestationen am KEP-Betriebshof im Tagesverlauf (ungesteuert).	85
Abbildung 61 Anwesenheitszeiten der Verteil- und Sammelverkehre am Betriebshof im Tagesverlauf.	86
Abbildung 62 Verteilung der Tourendauern und Tourenlängen für die sieben Elektrofahrzeuge im Verteil- und Sammelverkehr.	86
Abbildung 63 Lastverlauf und Verteilung der Gesamtladeleistung für den Verteil- und Sammelverkehr am Betriebshof (sieben eigene Fahrzeuge, 7,4kW Ladeleistung, ungesteuert).	87
Abbildung 64 Lastverlauf und Verteilung der Gesamtladeleistung für den Verteil- und Sammelverkehr am Betriebshof (sieben externe Fahrzeuge, 90kW Ladeleistung, ungesteuert).	87
Abbildung 65 Anwesenheitszeiten der industriellen Umlaufverkehre am Betriebshof der Spedition im Tagesverlauf.	89
Abbildung 66 Tägliche Gesamttourendauern und Standzeiten beim Kunden der drei Elektrofahrzeuge im industriellen Umlaufverkehr.	89
Abbildung 67 Lastverlauf und Verteilung der Gesamtladeleistung für den industriellen Umlaufverkehr am Betriebshof (drei eigene Fahrzeuge, 22kW Ladeleistung, ungesteuert, ohne Zwischenladung).	89
Abbildung 68 Lastverlauf und Verteilung der Gesamtladeleistung für den industriellen Umlaufverkehr am Betriebshof (drei externe Fahrzeuge, 110kW Ladeleistung, ungesteuert, mit Zwischenladung am Betriebshof der Spedition).	90
Abbildung 69 Anwesenheitszeiten für den nationalen Güterverkehr am Betriebshof der Spedition im Tagesverlauf und Wochenverlauf.	91
Abbildung 70 Verteilung der Tagesstrecken und der Gesamtfahrstrecken pro Abwesenheit der vier Elektrofahrzeuge.	92
Abbildung 71 Lastverlauf und Verteilung der Gesamtladeleistung für den nationalen Güterverkehr am Betriebshof (vier Fahrzeuge, 100kW Ladeleistung, ungesteuert).	93
Abbildung 72 Lastverlauf und Verteilung der Gesamtladeleistung für den nationalen Güterverkehr am Betriebshof (vier Fahrzeuge, 100kW Ladeleistung, Drosselung auf 200kW Gesamtleistung).	93
Abbildung 73 Gesamtladeleistung an der Spedition im Tages- und Wochenverlauf bei ungesteuerter Ladung.	95
Abbildung 74 Verteilung der Gesamtladeleistung und Auslastung der Ladestationen an der Spedition bei ungesteuerter Ladung.	95

Abbildung 75 Lastverlauf und Verteilung der Gesamtladeleistung an der Spedition mit einer Drosselung auf maximal 200kW Gesamtladeleistung.	96
Abbildung 76 Zeitliche Einordnung der aus der Studie abgeleiteten Handlungsempfehlungen.....	100

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Identifikation der Beteiligten bei der Ladung	33
Tabelle 2 Beschreibung der Rollen im Markt Elektromobilität	36
Tabelle 3 Zu berücksichtigende Vorgaben für die verschiedenen Betreibermodelle..	39
Tabelle 4 Pauschalen für Auslagenersatz beim Laden von Dienstfahrzeugen am Zuhause des MA	40
Tabelle 5 Übersicht der wichtigsten Parameter der alkalischen Elektrolyse (AEL), Proton-Exchange-Membran Elektrolyse (PEM) und Solid-Oxid-Elektrolyse (SOEC).	44
Tabelle 6 Entwicklung der spezifischen Investitionskosten für Nieder- und Hochtemperatur-Elektrolyse bis 2050 im Referenzszenario von Frontier Economics.....	46
Tabelle 7 Potenzielle Ladeorte im Logistikprozess	58
Tabelle 8 Prozentuale Anteile industrielle Kontraktlogistik.....	65
Tabelle 9 Für die Simulation angesetzte Verbrauchswerte für Elektrofahrzeuge im Jahr 2030.....	75

Literaturverzeichnis

- ADAC (2020): Massiver Mangel an Lkw-Parkplätzen. <https://www.adac.de/news/mangel-Lkw-parkplaetze-autobahn/>, zuletzt geprüft am 10.12.2020
- Adolph, J. et al. (2017): Shell-Wasserstoffstudie; Energie der Zukunft? Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H₂. Shell Deutschland und Wuppertal Institut. Shell Deutschland Oil GmbH (Hrsg.), Hamburg
- AMS (2017): Wasserstoff-Lkw mit 1.000 PS, <https://www.auto-motor-und-sport.de/news/nikola-one-wasserstoff-truck-1000-ps>, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- Ausfelder, F. et al. (2018): 1. Roadmap des Kopernikus-Projekt, Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X Technologien, https://www.kopernikus-projekte.de/lw_resource/datapool/systemfiles/agent/news/74A887D0C78A746AE0539A695E86E488/live/document/P2X_Roadmap_A4_V2.pdf, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- Ausfelder, F. et al. (2018): Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X Technologien. Herausforderungen – Potenziale – Methoden – Auswirkungen. 1. Roadmap des Kopernikus-Projektes „Power-to-X“: Flexible Nutzung erneuerbarer Ressourcen (P2X). Ausfelder, Florian (Hrsg.); Dura, Hanna Ewa (Hrsg.). 1. Auflage. Frankfurt am Main
- BafA (2020): Erhöhter Umweltbonus für E-Autos, https://www.bafa.de/SharedDocs/Kurzmeldungen/DE/Energie/Elektromobilitaet/2020_erhoehter_umweltbonus.html?nn=13683754, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- BAG (2018): Bundesamt für Güterverkehr: Marktbeobachtung. Köln, 2018.
- BIEK (2018): BIEK-Kompendium „Zahlen, Daten und Fakten der KEP-Branche“ — Teil 2. <https://www.biek.de/download.html?getfile=1555>, zuletzt geprüft am 10.12.2020
- BIEK (Hrsg.) (2017): Innovationen auf der letzten Meile. <https://www.biek.de/download.html?getfile=508>, zuletzt geprüft am 15.12.20
- BIEK (Hrsg.) (2020): KEP-Studie 2020 – Analyse des Marktes in Deutschland. https://www.biek.de/files/biek/downloads/papiere/BIEK_KEP-Studie_2020.pdf, zuletzt geprüft am 15.12.20
- Bilitewsk, B. et al. (2018): Bewährte Verfahren zur kommunalen Abfallbewirtschaftung. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-05-30_texte_39-2018-verfahren-kommunale-abfallwirtschaft_0.pdf, zuletzt geprüft am 15.12.20
- Bilitewski, B. et al. (2013): Abfallwirtschaft. Handbuch für Praxis und Lehre. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- BLG (2019): 35.000 bis 40.000 Lkw-Stellplätze fehlen an deutschen Autobahnen, https://www.bgl-ev.de/web/medien/presse/article_archiv.htm&news=3383&year=2019, zuletzt geprüft am 15.12.20
- BMBF (2020): Eine kleine Wasserstoff-Farbenlehre, <https://www.bmbf.de/de/eine-kleine-wasserstoff-farbenlehre-10879.html>, zuletzt geprüft am 14.12.2020
- BMU (2020): Klimaschutz in Zahlen, https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz_zahlen_2020_broschuere_bf.pdf, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- BMU (o.J.): Kurzinformation Elektromobilität bzgl. Strom- und Ressourcenbedarf, www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Verkehr/emob_strom_ressourcen_bf.pdf, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- BMVI (2018): Richtlinie über die Förderung von energieeffizienten und/oder CO₂-armen schweren Nutzfahrzeugen in Unternehmen des Güterkraftverkehrs, https://www.bmvi.de/Shared-Docs/DE/Anlage/G/richtlinie-foerderung-von-energieeffizienten-nutzfahrzeu-gen.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- BMVI (2020): Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge, https://www.bmvi.de/Shared-Docs/DE/Anlage/klimafreundliche-nutzfahrzeuge.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 15.12.2020

- BMVI (2020a): Nutzfahrzeuggipfel: Mit alternativen Antrieben auf dem Weg zur Nullemissionslogistik auf der Straße, <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Video/Youtube/nutzfahrzeuggipfel-11-11-2020.html>, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- BMVI (o.J.): Lkw-Maut, <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/StV/Strassenverkehr/Lkw-maut.html>, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- BMW (2018): Rechtsgutachten zur Anwendbarkeit von § 3 Preisangabenverordnung (PAngV) auf Ladestrom für Elektromobile, https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/P-R/preisangabe-fuer-und-abrechnung-von-ladestrom-fuer-elektromobile-rechtsgutachten.pdf?__blob=publicationFile&v=11, zuletzt geprüft am 14.12.2020
- Brabänder, C. (2020): Die Letzte Meile. Definition, Prozess, Kostenrechnung und Gestaltungsfelder. Regensburg: Springer Gabler Verlag.
- Brändle, G. et al. (2020): Estimating Long-Term Global Supply Costs for Low-Carbon Hydrogen, EWI Working Paper, No 20/04, <https://www.ewi.uni-koeln.de/de/news/policy-brief-h2-kosten/>, zuletzt geprüft 22.02.21
- Buchholz, T. (2020): Wasserstoff: Bremen testet Müllsammler, <https://www.nfz-messe.com/de/news/brennstoffzellen-entsorgungslogistik-wasserstoff-bremen-testet-muell-sammler-2721.html>, zuletzt geprüft 15.12.20
- Bund (2019): Bundes-Klimaschutzgesetz, <http://www.gesetze-im-internet.de/ksg/KSG.pdf>, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- Bund (2019a): Eckpunkte für das Klimaschutzprogramm 2030, <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975232/1673502/768b67ba939c098c994b71c0b7d6e636/2019-09-20-klimaschutzprogramm-data.pdf?download=1>, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- Bund (2019b): CO₂-Bepreisung, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/co2-bepreisung-1673008>, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- Bund (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.html>, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- Bund (o.J.): Masterplan Ladeinfrastruktur, https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/masterplan-ladeinfrastruktur.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- Bundesnetzagentur (2020): Ladesäulenkarte, https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/HandelundVertrieb/Ladesaeulenkarte/Ladesaeulenkarte_node.html, zuletzt geprüft am 19.10.2020
- Bünger et al. (2019): Infrastrukturbedarf E-Mobilität - Analyse eines koordinierten Infrastrukturaufbaus zur Versorgung von Batterie- und Brennstoffzellen-Pkw in Deutschland, https://stiftung.adac.de/app/uploads/2019/06/BeMo_Abschlussbericht_final_190625_LBST_Zerhusen.pdf, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- Bünger, U. et al. (2016): Vergleich von CNG und LNG zum Einsatz in LKW im Fernverkehr – Eine Expertise für die Open Grid Europe GmbH. Abschlussbericht.
- Bünger, U. et al. (2017): Wasserstoff – Schlüsselement von Power-to-X. In: Wasserstoff und Brennstoffzelle. Technologien und Marktperspektiven. / Töpler, Johannes (Hrsg.); Lehmann, Jochen (Hrsg.). 2. Aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin: Springer Vieweg
- c/sells (2020): Projektseite c/sells, Fraunhofer IAO, https://www.muse.iao.fraunhofer.de/de/projekte/c_sells.html, zuletzt geprüft am 14.12.2020
- Cabalzar (2019): Leitfaden zum Aufbau von Wasserstoff-Tankstellen, <https://www.aramis.admin.ch/Default.aspx?DocumentID=62081&Load=truel>, zuletzt geprüft am 14.12.2020
- Cardeneo, A. (2008): Kurier-, Express- und Paketdienste. In: Arnold, D. et al. (Hrsg.): Handbuch Logistik. 3., neu bearbeitete Auflage. Heidelberg: Springer Verlag. S.782-788.
- Cardeneo, A. (2008): Kurier-, Express- und Paketdienste. In: Arnold, Dieter et al. (Hrsg.): Handbuch Logistik. 3., neu bearbeitete Auflage. Heidelberg: Springer Verlag. S.782-788
- CEP (o.J.): FAQ Wasserstoffproduktion und Speicherung, <https://cleanenergypartnership.de/faq/wasserstoffproduktion-und-speicherung/>, zuletzt geprüft am 14.12.2020
- Chemie.de (2019): Brennstoffzellen-Auto: Forscher sichern Qualität und Reinheit des Wasserstoffs direkt beim Tanken, <https://www.chemie.de/news/1160073/brennstoffzellen-auto-forscher-sichern-qualitaet-und-reinheit-des-wasserstoffs-direkt-beim-tanken.html>, zuletzt geprüft am 14.12.2020

- Daimler (2018): Nachhaltig, vollelektrisch und leise: Mercedes-Benz eActros geht 2018 in den Kundeneinsatz, <https://www.daimler.com/dokumente/investoren/nachrichten/kapitalmarkt-meldungen/daimler-mercedes-benz-ir-release-de-20180221-1.pdf>, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- Dena (o.J.): Projektkarte P2G, <https://www.powertogas.info/projektkarte/>, zuletzt geprüft am 14.12.2020
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (2018): Power Fuels. Power to X: Technologien. Berlin
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (2006): Trans-Mediterraner Solarverbund. Zusammenfassung. Stuttgart
- DStatis (o.J.): Straßenverkehr: EU-weite CO₂-Emissionen seit 1990 um 24 % gestiegen, https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Umwelt-Energie/CO2_Strassenverkehr.html, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- DW (2020): Deutschland will Wasserstoff-Land Nummer eins werden, <https://www.dw.com/de/wasserstoffstrategie-deutschland-will-wasserstoff-land-nummer-eins-werden/a-53770326>, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- EForce (o.J.) EForce EF26, <https://www.eforce.ch/products/ef26>, zuletzt geprüft am 14.12.2020
- Ehret, Oliver (2020): Wasserstoff: Stand, Trends, Perspektiven. Studie des Center of Automotive Management (CAM) im Auftrag des Deutschen Vereins des Wasser- und Gasfaches e.V. (DVWG)
- Electrive (2019): Freightliner liefert erste Vorserienmodelle des eCascadia aus, www.electrive.net/2019/08/13/freightliner-liefert-erste-vorserienmodelle-des-ecascadia-aus/, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- Electrive (2019a): Posen baut Pantograf-Lader mit bis zu 540 kW, <https://www.electrive.net/2019/10/28/posen-baut-pantograf-lader-mit-bis-zu-540-kw/>, zuletzt geprüft am 14.12.2020
- Electrive (2019b): Gespräch zum Umgang mit DC-Ladesäulen ab dem 1. April 2019, <https://www.electrive.net/wp-content/uploads/2019/02/Protokoll-Gespraech-Eichrecht-DC-Lad-einfrastruktur.pdf>, zuletzt geprüft am 14.12.2020
- Electrive (2019c): CharIN – Fortschritte bei Lkw-Ladestandard ab 2MW, <https://www.electrive.net/2019/09/28/charin-fortschritte-bei-Lkw-ladestandard-ab-2-mw/>, zuletzt geprüft am 14.12.2020
- Electrive (2020): EU beschließt schärfere Klimaschutzziele bis 2030, <https://www.electrive.net/2020/12/11/eu-beschliesst-schaerfere-klimaschutzziele-bis-2030/>, zuletzt geprüft am 16.12.2020
- EMCEL (2018): Zulassung Wasserstofftankstelle: Was sind die wesentlichen Normen und Gesetze aus Sicht des Betreibers? <https://emcel.com/de/zulassung-wasserstofftankstelle/>, zuletzt geprüft am 14.12.2020
- EMCEL (2019): Warum fasst ein Wasserstofftank bei 700 bar nicht doppelt so viel wie bei 350 bar? <https://emcel.com/de/warum-fasst-ein-wasserstofftank-bei-700-bar-nicht-doppelt-so-viel-wie-bei-350-bar/>, zuletzt geprüft am 14.12.2020
- Emobil BW (2020): Nachfrage nach E-Lkw-Förderung des Landes wächst, <https://www.e-mobilbw.de/service/meldungen-detail/nachfrage-nach-e-lkw-foerderung-des-landes-waechst>, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- ENCON.Europe (2018): Potentialatlas für Wasserstoff - Analyse des Marktpotentials für Wasserstoff, der mit erneuerbarem Strom hergestellt wird, im Raffineriesektor und im zukünftigen Mobilitätssektor. Studie im Auftrag der IG BCE Innovationsforum Energiewende e.V. und dem Mineralölwirtschaftsverband e.V.
- Endres, M. (2019). Brötchen an der Rampe. Logistik Heute, 41(1–2), 46. Retrieved from <https://logistik-heute.de/fachmagazin/fachartikel/produkte-software-broetchen-der-rampe-16835.html>, zuletzt geprüft am 15.12.20
- EU (2019): Verordnung zur Festlegung von CO₂-Emissionsnormen für neue schwere Nutzfahrzeuge, <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-60-2019-INIT/de/pdf>, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- EU (2019a): Verordnung zur Festsetzung von CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge

- EU (2020): Klima- und Energiepolitischer Rahmen bis 2030, https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_de, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- EU (2020a): Clean Vehicles Directive, https://ec.europa.eu/transport/themes/urban/clean-vehicles-directive_en, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- Europäisches Parlament (2018): Bericht über den Aufbau der Infrastruktur alternativer Kraftstoffe in der Europäischen Union: Zeit zu handeln! (2018/2023/II). Ausschuss für Verkehr und Infrastruktur, https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-8-2018-0297_DE.html, zuletzt geprüft am 14.12.2020
- EVRoaming Foundation (o.J.): EVRoaming Foundation. Realising cross-border charging. Online verfügbar unter <https://ocpi-protocol.org/>, zuletzt geprüft am 09.06.2020
- Faun Umwelttechnik (o.J.): BLUEPOWER. https://www.faun.com/produkte/alternative_antriebe/bluepower/, zuletzt geprüft am 15.12.2020
- Firmenauto (2020): E-Transporter 2020, www.firmenauto.de/preise-daten-fotos-aller-elektro-transporter-e-transporter-2020-die-grosse-uebersicht-10059975.html, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- Fraunhofer ISE (2020): Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland 2019: Mehr erneuerbare als fossile Energieerzeugung, <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/news/2019/oeffentliche-nettostromerzeugung-in-deutschland-2019.html>, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- Frontier Economics (2018): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. Studie im Auftrag von Agora Verkehrswende und Agora Energiewende. In: Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und Frontier Economics (2018): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe.
- Gnann, T. et al. (2017): Teilstudie „Brennstoffzellen-Lkw: kritische Entwicklungshemmnisse, Forschungsbedarf und Marktpotential“. Studie im Rahmen der wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung, Fraunhofer ISI, Karlsruhe, Fraunhofer IML, Dortmund, PTV Transport Consult GmbH, Karlsruhe
- Göhler, G et al. (2017): Technical data analysis and power grid effects of fast charging processes of electric vehicles, 1st E-Mobility Power System Integration Symposium 2017: October 2017, Berlin, Germany
- Goingelectric (2019): EnBW eröffnet Schnellladepark am Hotel & Rasthaus Seligweiler, <https://www.goingelectric.de/2019/04/01/news/enbw-eroeffnet-schnellladepark-am-hotel-rasthaus-seligweiler/>, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- Grave, K. et al. (2015): Stromkosten der energieintensiven Industrie – Ein internationaler Vergleich. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie
- H2 (o.J.): H2 tanken - Wasserstoffmobilität beginnt jetzt, <https://h2.live/>, zuletzt geprüft am 15.12.2020
- Hacker, F. et al. (2020): StratON - Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge, <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Endbericht.pdf>, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- Heidt, C. et al. (2018): Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen zur Verminderung von CO₂-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen. Abschlussbericht. Ifeu, INFRAS AG und Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH für das UBA.
- Huss, A. et al. (2012): Wasserstoff-Tankstellen - Ein Leitfaden für Anwender und Entscheider. Band 1 der Schriftenreihe Wasserstoff und Brennstoffzellen. Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
- Hydrogen Council (2020): Path to hydrogen competitiveness. A cost perspective
- Hydrogen Europe (o.J.): Hydrogen Transport & Distribution, <https://hydrogeneurope.eu/hydrogen-transport-distribution/>, zuletzt geprüft am 14.12.2020
- Hyundai (2020): Hyundai XCIENT Fuel Cell Heads to Europe for Commercial Use, <https://www.hyundai.news/eu/brand/hyundai-xcient-fuel-cell-heads-to-europe-for-commercial-use/>, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- Hyundai (o.J.): Hyundai Hydrogen Mobility, <https://hyundai-hm.com/>, zuletzt geprüft am 09.07.2020

- INBUREX Consulting (2014): Sicherheitstechnische Machbarkeitsstudie zur Wasserstoffinfrastruktur auf dem Busbetriebshof Gleisdreieck – Umsetzung §50 BImSchG und genehmigungsrechtliche Konsequenzen. Bericht Nr. PS/8707/14.
- Ingenieur (2020): Nikola E-Truck rollt in Ulm vom Band, www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/fahrzeugbau/nikola-e-truck-rollt-in-ulm-vom-band/, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- International Organization for Standardisation ISO (o.J.): ICS 43.120. Electric Road Vehicles. Online verfügbar unter <https://www.iso.org/ics/43.120/x/p/1/u/1/w/0/d/0>, zuletzt geprüft am 09.06.2020
- IRENA (2018): Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IWR (2005): Wasserstoff, <http://www.iwr.de/wasserstoff/wasserstoffspeicherung/wasserstoffspeicherung.html>, zuletzt geprüft am 14.12.2020
- Jacobi (2019): Leitfaden für die Errichtung von öffentlich zugänglichen Wasserstoff-Tankstellen im Land Mecklenburg-Vorpommern, <https://www.leka-mv.de/wp-content/uploads/2019/10/LEKA-LF-Wasserstoff-web.pdf>, zuletzt geprüft am 14.12.2020
- Jöhrens, J. et al. (2018): Roadmap OH-Lkw: Potentialanalyse 2020-2030, <https://docplayer.org/123386410-Roadmap-oh-Lkw-potentialanalyse.html>, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- Jordan, T. et al. (2017): Statusbericht – KIT Busshuttle-Service auf Basis von Wasserstoff-Brennstoffzellen-Bussen und einer Wasserstofftankstelle.
- KBA (2018): Kraftfahrtbundesamt (Hrsg.): Fahrzeugzulassungen (FZ) – Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Haltern, Wirtschaftszweigen.
- KBA (2020): www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz13_b_uebersicht.html?nn=663524, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- KFZ-Auskunft (o.J.): LKW Lenk- und Ruhezeiten, <https://www.kfz-auskunft.de/Lkw/lenkzeiten-ruhezeiten.php>
- Kille, C. (2009): KEP-Märkte und Dienste. In: Klaus, P. et al. (Hrsg.): Gabler Lexikon Logistik. 4., komplett durchgesehene und aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Gabler Verlag. S.259-S.263.
- Klaus, P. et al. (2009): Gabler Lexikon Logistik. 4., komplett durchgesehene und aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Gabler Verlag.
- Kluschke, P. et al. (2020): Optimal development of alternative fuel station networks considering node capacity restrictions. Transportation Research Part D 78 (2020). DOI: 10.1016/j.trd.2019.11.018
- Kost, C. et al. (2018): Stromgestehungskosten Erneuerbarer Energien. Freiburg: Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme ISE
- Kühnel, S. et al. (2018): Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr - Ein Technologie- und Wirtschaftlichkeitsvergleich, <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Technologievergleich-2018.pdf>, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- Linde (2003): Die neuen Entwicklungen der Technik – Elemente der Wasserstoff-Infrastruktur von der Herstellung bis zum Tank. Handout zum Vortrag von Dr. Joachim Wolf. Medienforum Deutscher Wasserstofftag. München, <https://www.linde-gas.de/de/legacy/attachment?files=tcm:T565-71312,tcm:565-71312,tcm:65-71312>, zuletzt geprüft am 14.12.2020
- MessEG (2013): Mess- und Eichgesetz, <https://www.gesetze-im-internet.de/mess-eg/BJNR272300013.html>, zuletzt geprüft am 14.12.2020
- Nikola (o.J.): Tre Truck, <https://nikolamotor.com/tre>, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- NOW (2013): Genehmigungsleitfaden für Wasserstoff-Stationen, <https://docplayer.org/42446991-Genehmigungsleitfaden-fuer-wasserstoff-stationen.html>, zuletzt geprüft am 14.12.2020
- NOW (2019): Internationale Kooperationen – Mobilität, Energie, Umwelt, https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/now_flyer_internationale-kooperationen.pdf, zuletzt geprüft am 14.12.2020

- NPM (2020): Werkstattbericht alternative Kraftstoffe, https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/12/NPM_AG1_Werkstattbericht_AK.pdf, zuletzt geprüft am 16.12.2020
- Nur Transmission (2020): Projektbeschreibung, <http://www.nurenergie.com/tunur/index.php/english/project/transmission/>, zuletzt geprüft am 14.12.2020
- NZZ (2020): Wasserstoff für den Verbrennungsmotor – neu aufgegleist, <https://www.nzz.ch/mobilitaet/auto-mobil/wasserstoff-fuer-den-verbrennungsmotor-neu-aufgegleist-ld.1538425>, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- Open Charge Alliance (o.J. a): Open Charge Point Protocol 1.6. Online verfügbar unter <https://www.openchargealliance.org/protocols/ocpp-16/>, zuletzt geprüft am 09.06.2020
- Open Charge Alliance (o.J. b): Open Charge Point Protocol 2.01. Online verfügbar unter <https://www.openchargealliance.org/protocols/ocpp-201/>, zuletzt geprüft am 09.06.2020
- Open Charge Alliance (o.J.): Open Charge Point Protocol 1.5. Online verfügbar unter <https://www.openchargealliance.org/protocols/ocpp-15/>, zuletzt geprüft am 09.06.2020
- Otteny (2019): Modellierung von Ladeprofilen elektrischer Lkw aus Fahrtenketten zur Untersuchung einer zukünftigen Netzintegration, Masterarbeit, Universität Stuttgart IEH, 2019
- Pichlmaier, S. et al. (2019): Elektrolyse – Die Schlüsseltechnologie für Power-to-X., <https://www.ffe.de/publikationen/pressemitteilungen/892-elektrolyse-die-schlüsseltechnologie-fuer-power-to-xl>, zuletzt geprüft am 20.01.2020
- Piria, R. et al. (2017): Überblick über die australische Energiepolitik. Berlin: adelphi/RAP
- Plötz, P. et al. (2018): Alternative Antriebe und Kraftstoffe im Straßengüterverkehr –Handlungsempfehlungen für Deutschland, <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Thesen-Zukunft-Str-Gueterverkehr.pdf>, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- Plötz, P. et al. (2020): Hochleistungsschnellladenetz für Elektro-Lkw, Kurzstudie im Auftrag des Verbandes der Automobilindustrie (VDA), <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-608666.html>, zuletzt geprüft am 22.02.2021
- PWC (2019): E-Bus-Radar 2019, www.pwc.de/de/branchen-und-markte/oeffentlicher-sektor/e-bus-radar.html, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- Raiber, S et al. (2016): Urbaner Logistischer Wirtschaftsverkehr, <https://www.muse.iao.fraunhofer.de/de/projekte/urbaner-logistischer-wirtschaftsverkehr.html>, zuletzt geprüft am 15.12.2020
- Ries, J. (2019): Der Spediteur und die Paketdienste. In: Hölser, T. (Hrsg.): Grundwissen Spedition und Logistik für Ausbildung und Beruf. 26., komplett überarbeitete Auflage 2019. Leverkusen: PMS Media House GmbH.
- Robinius, M. et al. (2018): Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles. Studie für H₂ Mobility. Schriften des FZ Jülich, Reihe Energie & Umwelt, Band 408.
- Scania (o.J.): Norwegischer Großhändler ASKO testet vier wasserstoffbetriebene Scania-Lkw mit Brennstoffzellen-Elektroantrieb, <https://www.scania.com/ch/de/home/experience-scania/news-and-events/News/archive/2020/02/asko.html>, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- Schmidt, P. (2016): Power-to-Liquids: Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel
- Schmidt, P. et al. (2018): Power-to-Liquids as Renewable Fuel Option for Aviation: A Review. In: Chemie Ingenieur Technik 90
- Schwemmer, M. (2018): Top 100 der Logistik, DVV Media Group GmbH
- SCI (2011): Geschäftsklima saisonal beeinflusst, https://www.sci.de/fileadmin/user_upload/logistikbarometer/pdf/2011/Auswertung_Jun2011.pdf, zuletzt geprüft am 15.12.2020
- Seeliger, A. et al. (2016): Elektrobuse im ÖPNV – Eine technisch/wirtschaftliche Analyse unter Berücksichtigung praktischer Anwendungsbeispiele, Diskussionsbeiträge des Fachbereichs Wirtschaftsingenieurwesen der Hochschule Niederrhein, No. 9, Hochschule Niederrhein, Krefeld. Online verfügbar unter <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/162175/1/Elektrobusse%20im%20%C3%96PNV%20final.pdf>, zuletzt geprüft am 09.06.2020

- Smarter fahren (o.J.): Kosten: E-Auto, Benziner und Diesel im Vergleich, <https://www.smarter-fahren.de/e-auto-kosten/>, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- Smolinka, T. et al. (2018): Studie IndWEde. Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme. Berlin
- Springer Fachmedien München (2020): Daimler Trucks setzt auf mehr Effizienz und neue E-Lkw-Initiative, <https://www.verkehrsrundschau.de/nachrichten/daimler-trucks-setzt-auf-mehr-effizienz-und-neue-e-lkw-initiative-2545853.html>, zuletzt geprüft am 15.12.20
- Steinmeyer, I. (2006): Definition und Bedeutung des Personenwirtschaftsverkehrs, https://svn.vsp.tu-berlin.de/repos/public-svn/publications/vspwp/2007/07-05/29jan07_WP07-05_PwV_Steinmeyer.pdf, zuletzt geprüft am 15.12.20
- Sterchele, P. et al (2020): Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem. Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Freiburg. www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Wege-zu-einem-klimaneutralen-Energiesystem.pdf, zuletzt geprüft am 14.12.2020
- Tagesschau (2020): Mit dem Wasserstoff-Lkw in die Zukunft, <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/boerse/wasserstoff-lkw-101.html>, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- Tesla (o.J.): Semi Truck, <https://www.tesla.com/semi>, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- Teslamag (2020): Neue Daten zu Akku-Haltbarkeit bei Tesla: Über 90 Prozent nach 280.000 Kilometern, <https://teslamag.de/news/neue-daten-akku-haltbarkeit-tesla-ueber-90-prozent-280000-kilometer-28357>, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- Toyota (o.J.): Emissionsfreier Güterverkehr mit neuem Brennstoffzellen-Lkw, <https://www.toyota.de/news/brennstoffzellen-lkw-toyota-kenworth>, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- TransNews (2020): Erster H₂-Xcient-Lastwagen ist eingetroffen, <https://www.tir-transnews.ch/erster-h2-xcient-lastwagen-ist-eingetroffen/>, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- Transport & Environment (2018): Roadmap to decarbonising european cars, https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2050_strategy_cars_FINAL.pdf, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- Universität Stuttgart IAT (o.J.): SmaLES – Smart Local Energy Services, www.smales-bw.de, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- VAK (o.J.): AG ABFALLSAMMELFAHRZEUGE, <https://www.vak-ev.de/de/mitglieder/abfallsammel-fahrzeuge>, zuletzt geprüft am 15.12.2020
- Van Son, P. et al. (2019): Emission free energy from the deserts: How a crazy Desertec idea has become reality in North Africa and the Middle East. Smart Book Publishers
- VM BW (2020): Pilotprojekt Oberleitungs-Lkw im Murgtal wegweisend, <https://vm.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/pilotprojekt-oberleitungs-lkw-im-murgtal-wegweisend/>, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- Wietschel, M. et al. (2017): Teilstudie „Brennstoffzellen-Lkw: kritische Entwicklungshemmnisse, Forschungsbedarf und Marktpotential“, https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/teilstudie-brennstoffzellen-lkw.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 09.07.2020
- Wismann, S. et al. (2019): Electrified methane reforming: A compact approach to greener industrial hydrogen production. Science 364 (6442), pp. 756-759, DOI: 10.1126/science.aaw8775
- ZDH (2015): Ergebnisse einer Umfrage unter Handwerksbetrieben im dritten Quartal 2014. Berlin, zuletzt geprüft am 15.12.2020
- ZDH (2018): Kennzahlen des Handwerks: Wirtschaftlicher Stellenwert des Handwerks 2019. <https://www.zdh.de/daten-fakten/kennzahlen-des-handwerks/>, zuletzt geprüft am 15.12.2020
- Zoll (o.J.): Steuervergünstigungen für reine Elektrofahrzeuge, https://www.zoll.de/DE/Fachthemen/Steuern/Verkehrsteuern/Kraftfahrzeugsteuer/Steuerverguenstigung/Elektrofahrzeuge/elektrofahrzeuge_node.html, zuletzt geprüft am 09.07.2020

ZSW (2020): Projekt H₂-Rivers – Wasserstoff-Erzeugung und Tankstelle in Waiblingen,
<https://www.zsw-bw.de/projekt/regenerative-kraftstoffe/h2-rivers-wasserstoff-erzeugung-und-tankstelle-in-waiblingen.html>, zuletzt geprüft am 14.12.2020

Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2015)

Nr.	Titel
270	Physiologische Effekte bei PWM-gesteuerter LED-Beleuchtung im Automobil, 2015
271	Auskunft über verfügbare Parkplätze in Städten, 2015
272	Zusammenhang zwischen lokalem und globalem Behaglichkeitsempfinden: Untersuchung des Kombinationseffektes von Sitzheizung und Strahlungswärmeübertragung zur energieeffizienten Fahrzeugklimatisierung, 2015
273	UmCra - Werkstoffmodelle und Kennwertermittlung für die industrielle Anwendung der Umform- und Crash-Simulation unter Berücksichtigung der mechanischen und thermischen Vorgeschichte bei hochfesten Stählen, 2015
274	Exemplary development & validation of a practical specification language for semantic interfaces of automotive software components, 2015
275	Hochrechnung von GIDAS auf das Unfallgeschehen in Deutschland, 2015
276	Literaturanalyse und Methodenauswahl zur Gestaltung von Systemen zum hochautomatisierten Fahren, 2015
277	Modellierung der Einflüsse von Porenmorphologie auf das Versagensverhalten von Al-Druckgussteilen mit stochastischem Aspekt für durchgängige Simulation von Gießen bis Crash, 2015
278	Wahrnehmung und Bewertung von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger in verschiedenen Verkehrssituationen und unterschiedlichen Betriebszuständen, 2015
279	Sensitivitätsanalyse rollwiderstandsrelevanter Einflussgrößen bei Nutzfahrzeugen – Teil 3, 2015
280	PCM from iGLAD database, 2015
281	Schwere Nutzfahrzeugkonfigurationen unter Einfluss realitätsnaher Anströmbedingungen, 2015
282	Studie zur Wirkung niederfrequenter magnetischer Felder in der Umwelt auf medizinische Implantate, 2015
283	Verformungs- und Versagensverhalten von Stählen für den Automobilbau unter crashartiger mehrachsiger Belastung, 2016
284	Entwicklung einer Methode zur Crashsimulation von langfaserverstärkten Thermoplast (LFT) Bauteilen auf Basis der Faserorientierung aus der Formfüllsimulation, 2016
285	Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf realer Fahrbahn, 2016
286	χMCF - A Standard for Describing Connections and Joints in the Automotive Industry, 2016
287	Future Programming Paradigms in the Automotive Industry, 2016
288	Laserstrahlschweißen von anwendungsnahen Stahl-Aluminium-Mischverbindungen für den automobilen Leichtbau, 2016
289	Untersuchung der Bewältigungsleistung des Fahrers von kurzfristig auftretenden Wiederübernahmesituationen nach teilautomatischem, freihändigem Fahren, 2016
290	Auslegung von geklebten Stahlblechstrukturen im Automobilbau für schwingende Last bei wechselnden Temperaturen unter Berücksichtigung des Versagensverhaltens, 2016
291	Analyse, Messung und Optimierung des Ventilationswiderstands von Pkw-Rädern, 2016
292	Innenhochdruckumformen laserstrahlgelöteter Tailored Hybrid Tubes aus Stahl-Aluminium-Mischverbindungen für den automobilen Leichtbau, 2017

- 293 Filterung an Stelle von Schirmung für Hochvolt-Komponenten in Elektrofahrzeugen, 2017
- 294 Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Feibleche aus Stahl unter kombinierter Beanspruchung, 2017
- 295 Wechselwirkungen zwischen zyklisch-mechanischen Beanspruchungen und Korrosion: Bewertung der Schädigungsäquivalenz von Kollektiv- und Signalformen unter mechanisch-korrosiven Beanspruchungsbedingungen, 2017
- 296 Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur, 2017
- 297 Analyse zum Stand und Aufzeigen von Handlungsfeldern beim vernetzten und automatisierten Fahren von Nutzfahrzeugen, 2017
- 298 Bestimmung des Luftwiderstandsbeiwertes von realen Nutzfahrzeugen im Fahrversuch und Vergleich verschiedener Verfahren zur numerischen Simulation, 2017
- 299 Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen, 2017
- 300 Thermisches Rollwiderstandsmodell für Nutzfahrzeugreifen zur Prognose fahrprofilspezifischer Energieverbräuche, 2017
- 301 The Contribution of Brake Wear Emissions to Particulate Matter in Ambient Air, 2017
- 302 Design Paradigms for Multi-Layer Time Coherency in ADAS and Automated Driving (MULTIC), 2017
- 303 Experimentelle Untersuchung des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit von Scheiben auf die Kondensatbildung, 2017
- 304 Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter realen Umgebungsbedingungen, 2018
- 305 Simulationsgestützte Methodik zum Entwurf intelligenter Energiesteuerung in zukünftigen Kfz-Bordnetzen, 2018
- 306 Einfluss der Kantenbearbeitung auf die Festigkeitseigenschaften von Stahl-Feiblechen unter quasistatisch und schwingender Beanspruchung, 2018
- 307 Fahrerspezifische Aspekte beim hochautomatisierten Fahren, 2018
- 308 Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter zeitvarianten Betriebsbedingungen, 2018
- 309 Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von Schraubverbindungen mit gefurchtem Gewinde, 2018
- 310 Konzept zur Auslegungsmethodik zur Verhinderung des selbsttätigen Losdrehens bei Bauteilsystemen im Leichtbau, 2018
- 311 Experimentelle und numerische Identifikation der Schraubenkopfverschiebung als Eingangsgröße für eine Bewertung des selbsttätigen Losdrehens von Schraubverbindungen, 2018
- 312 Analyse der Randbedingungen und Voraussetzungen für einen automatisierten Betrieb von Nutzfahrzeugen im innerbetrieblichen Verkehr, 2018
- 313 Charakterisierung und Modellierung des anisotropen Versagensverhaltens von Aluminiumwerkstoffen für die Crashsimulation, 2018
- 314 Definition einer „Äquivalenten Kontakttemperatur“ als Bezugsgröße zur Bewertung der ergonomischen Qualität von kontaktbasierten Klimatisierungssystemen in Fahrzeugen, 2018
- 315 Anforderungen und Chancen für Wirtschaftsverkehre in der Stadt mit automatisiert fahrenden E-Fahrzeugen (Fokus Deutschland), 2018
- 316 MULTIC-Tooling, 2019
- 317 EPHoS: Evaluation of Programming - Models for Heterogeneous Systems, 2019
- 318 Air Quality Modelling on the Contribution of Brake Wear Emissions to Particulate Matter Concentrations Using a High-Resolution Brake Use Inventory, 2019

- 319 Dehnratenabhängiges Verformungs- und Versagensverhalten von dünnen Blechen unter Scherbelastung, 2019
- 320 Bionischer LAM-Stahlleichtbau für den Automobilbau – BioLAS, 2019
- 321 Wirkung von Systemen der aktiven, passiven und integralen Sicherheit bei Straßenverkehrsunfällen mit schweren Güterkraftfahrzeugen, 2019
- 322 Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen - Umsetzung und Anwendung, 2019
- 323 Transitionen bei Level-3-Automation: Einfluss der Verkehrsumgebung auf die Bewältigungsleistung des Fahrers während Realfahrten, 2019
- 324 Methodische Aspekte und aktuelle inhaltliche Schwerpunkte bei der Konzeption experimenteller Studien zum hochautomatisierten Fahren, 2020
- 325 Der Einfluss von Wärmeverlusten auf den Rollwiderstand von Reifen, 2020
- 326 Lebensdauerberechnung hybrider Verbindungen, 2020
- 327 Entwicklung der Verletzungsschwere bei Verkehrsunfällen in Deutschland im Kontext verschiedener AIS-Revisionen, 2020
- 328 Entwicklung einer Methodik zur Korrektur von EES-Werten, 2020
- 329 Untersuchung zu den Einsatzmöglichkeiten der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung zur Entwicklung von 3D-Rahmenstrukturen in Crashlastfällen, 2020
- 330 Analyse der Einflussfaktoren auf die Abweichung zwischen CFD und Fahrversuch bei der Bestimmung des Luftwiderstands von Nutzfahrzeugen, 2020
- 331 Effiziente Charakterisierung und Modellierung des anisotropen Versagensverhaltens von LFT für Crashsimulation, 2020
- 332 Charakterisierung und Modellierung des Versagensverhaltens von Komponenten aus duktilem Gusseisen für die Crashsimulation, 2020
- 333 Charakterisierung und Meta-Modellierung von ungleichartigen Punktschweißverbindungen für die Crashsimulation, 2020
- 334 Simulationsgestützte Analyse und Bewertung der Fehlertoleranz von Kfz-Bordnetzen, 2020
- 335 Absicherung des autonomen Fahrens gegen EMV-bedingte Fehlfunktion, 2020
- 336 Auswirkung von instationären Anströmeffekten auf die Fahrzeugaerodynamik, 2020
- 337 Analyse von neuen Zell-Technologien und deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem Batteriepack, 2020
- 338 Modellierung der Einflüsse von Mikrodefekten auf das Versagensverhalten von Al-Druckgusskomponenten mit stochastischem Aspekt für die Crashsimulation, 2020
- 339 Stochastisches Bruchverhalten von Glas, 2020
- 340 Schnelle, breitbandige Datenübertragung zwischen Truck und Trailer als Voraussetzung für das hochautomatisierte Fahren von Lastzügen, 2021
- 341 Wasserstoffkompatibilität von Aluminium-Legierungen für Brennstoffzellenfahrzeuge, 2021
- 342 Anforderungen an eine elektrische Lade- und Wasserstoffinfrastruktur für gewerbliche Nutzfahrzeuge mit dem Zeithorizont 2030, 2021

Impressum

Herausgeber	FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Behrenstraße 35 10117 Berlin Telefon +49 30 897842-0 Fax +49 30 897842-600 www.vda-fat.de
ISSN	2192-7863
Copyright	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2021

Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA)
Behrenstraße 35, 10117 Berlin
www.vda.de
Twitter @VDA_online

VDA | Verband der
Automobilindustrie

Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT)
Behrenstraße 35, 10117 Berlin
www.vda.de/fat

FAT | Forschungsvereinigung
Automobiltechnik