

Hinweispapier für Transporteure

Betrachtungszeitraum: 07.2022 – 12.2024



In dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) geförderten Forschungsprojekts ELISA – Elektrischer, innovativer Schwererverkehr auf Autobahnen – wurde zwischen Mai 2019 und Dezember 2024 im Realbetrieb eine Pilotstrecke für die oberleitungsbundene Energieversorgung von elektrisch angetriebenen Nutzfahrzeugen im öffentlichen Straßenraum erprobt. Der Realbetrieb des sogenannten eHighway-Systems wurde von einer wissenschaftlichen Evaluation begleitet. Die Forschung im Rahmen des Projekts ELISA zeichnet sich durch einen ganzheitlichen und interdisziplinären Evaluationsansatz aus, der das eHighway-System im Zusammenspiel mit seiner Systemumwelt analysiert. Wichtige Erkenntnisse aus der ersten Projektphase (Mai 2019 bis Juni 2022) wurden bereits in den Hinweispapieren zur ersten Phase im Jahr 2023 veröffentlicht. Das aktuelle Hinweispapier berücksichtigt nun insbesondere die Ergebnisse der zweiten Projektphase (Juli 2022 bis Dezember 2024).

Dieses Hinweispapier richtet sich an Transporteure. Relevante Knergebnisse zur Erfüllung der fahrzeugtechnischen Anforderungen von Transporteuren an Oberleitungs-Lkw (O-Lkw) hinsichtlich u.a. Reichweite, Zuladungsgewicht und Transport diverser Güter werden thematisiert. Besonders wird auf die Integrierbarkeit der O-Lkw in unterschiedliche Transportketten und mögliche Änderungen in der Tourenplanung aufgrund des Einsatzes von O-Lkw eingegangen. Aus den fahrzeugseitigen Realbetriebsdaten werden Kennzahlen für den Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen von O-Lkw bestimmt. Darüber hinaus wird auf die Akzeptanz des eHighway-Systems bei Fahrern, Disponenten und dem Management von Transportunternehmen eingegangen.

1. Stand der Technik

Das eHighway-System ermöglicht das dynamische Laden von hybriden oder batterie-elektrischen Lkw über einen Pantographen während der Fahrt. Die sogenannten Oberleitungs-Lkw (O-Lkw) beziehen mittels eines auf dem Lkw installierten Pantographen Strom von einer über dem rechten Fahrstreifen errichteten Oberleitungsinfrastruktur. Der bezogene Strom wird gleichzeitig für den Antrieb und das Aufladen der Batterie genutzt. Wird der mit Oberleitungen ausgestattete Streckenabschnitt verlassen oder muss ein langsameres Fahrzeug überholt werden, wird der Pantograph abgesenkt. In diesem Fall fährt der O-Lkw mit Energie aus der zuvor geladenen Batterie weiter.

In der ersten Projektphase zwischen Mai 2019 und Juni 2022 wurden fünf Oberleitungs-Hybrid-Lkw (OH-Lkw) der ersten Generation auf zwei fünf Kilometer langen Teststrecken in nördlicher und südlicher Fahrtrichtung auf der A5 zwischen Darmstadt und Frankfurt erprobt. Aufbauend auf den positiven Erkenntnissen wurde für die zweite Projektphase die Oberleitungsanlage in südlicher Richtung auf 12 km verlängert, sodass insgesamt 17 km Oberleitungsinfrastruktur für die Erprobung zur Verfügung standen. Die verlängerte Teststrecke wurde im August 2023 in Betrieb genommen.

Parallel zur Erweiterung der Oberleitungsteststrecke wurden die fünf OH-Lkw der ersten Generation kontinuierlich bis Juni 2024 weiter eingesetzt. Weiterhin wurden fünf OH-Lkw der zweiten Generation mit einer deutlich leistungsstärkeren E-

Maschine sowie einer größeren Batterie von bestehenden und neuen Transportunternehmen in Betrieb genommen. Ebenfalls wurde ein rein-elektrischer O-Lkw (O-BEV) von einem Transportunternehmen für einige Monate sowie für Forschungsfahrten auf der Teststrecke eingesetzt. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über die Konfigurationen der O-Lkw Generationen.

Tabelle 1: Oberleitungs-Lkw Generationen im ELISA-Realbetrieb (IVV 2025)

O-Lkw Generation	1	2	3
Fahrzeugtyp	Sattelzug	Sattelzug	Koffer-aufbau
E-Maschine	130 kW	260 kW	230 kW
Batterie-kapazität	18,5 kWh	99 kWh	297 kWh
Verbrennungs-motor	450 PS	360 PS	/
Plug-In Laden	Nicht möglich	Möglich	Möglich

Mit der Überprüfung des eHighway-Systems in den Realbetrieb sowohl durch das Projekt in Hessen als auch durch zwei weitere deutsche Projekte in Schleswig-Holstein und Baden-Württemberg erreichte das eHighway-System das Technology Readiness Level (TRL) 7.

Mit dem Abschluss der Realerprobung in den Feldversuchen ist der Nachweis eines erfolgreichen Einsatzes des eHighway-Systems gelungen, sodass im nächsten Schritt die Markteinführung, das Erreichen der TRL 9 vorbereitet werden kann.

2. Hinweise für Transporteure

2.1. Einsatzszenarien der O-Lkw

Das Forschungsprojekt ELISA hat das Ziel, das eHighway-System unter realen Bedingungen zu testen. Dafür wurden O-Lkw an technologieinteressierte Transportunternehmen vergeben, die diese auf der Teststrecke der A5 einsetzen. Anhand der Eigenschaften der beteiligten Transportunternehmen und des Einsatzprofils der O-Lkw wurden neun Einsatzszenarien (Use Case = UC) der O-Lkw unterschieden. Insgesamt verdeutlichen die UC die Vielseitigkeit und Möglichkeiten beim Betrieb von O-Lkw im Alltag.

Im UC 1 (El Leon) wurde ein O-Lkw der ersten Generation über 55 Monate im Shuttleverkehr

zwischen Ober-Ramstadt und Frankfurt zum Transport von Dispersionsfarbe eingesetzt, mit etwa drei täglichen Fahrten und einem Koffer-Auflieger.

In UC 2 (El Fidel, Ute) nutzte ein Logistikunternehmen einen O-Lkw der ersten Generation und einen O-Lkw der zweiten Generation zur Belieferung von Supermärkten im Rhein-Main-Gebiet im klassischen Verteilverkehr mit temperaturgeführten Lebensmitteln.

In UC 3 (El Fondo/ Hildegard) wurden drei verschiedene O-Lkw aus der ersten und zweiten Generation für den kombinierten Verkehr mit Containerchassis eingesetzt.

In UC 4 (El Femina) wurde ein O-Lkw der ersten Generation im Regionalverkehr und zum Teil im Fernverkehr für den Transport von Trockenbauprofilen zwischen Iphofen und Griesheim bei Darmstadt eingesetzt.

In UC 6 (El Salto) wurde ein O-Lkw der ersten Generation von einem börsennotierten Großunternehmen im Zweischichtbetrieb über 48 Monate für Luftfracht- und Schlammtransporte mit bis zu zehn Fahrten täglich eingesetzt.

In UC 6 (Nena) setzte ein Kleinstunternehmen einen O-Lkw der zweiten Generation über 28 Monate im regionalen Verteilverkehr mit palettierteter Ware und wechselnden Aufliegern (Koffer/Plane) ein.

In UC 7 (Steffi) wurde ein O-Lkw der zweiten Generation 23 Monate lang im regionalen Shuttleverkehr für pharmazeutische Produkte mit Koffer- und Kühlauflaufbau eingesetzt.

In UC 8 (Angela) wurde ein O-Lkw der zweiten Generation für 18 Monate im regulären Betrieb mit temperaturgeführten Lebensmitteln und anderen Gütern von einem großen regionalen Logistikdienstleister getestet.

In UC 9 (El Fondo) setzte ein mittelgroßes Unternehmen einen O-Lkw der ersten Generation für 10 Monate im Ladungsverkehr für Industrie- und Sammelguttransporte mit flexiblen Auflieger-Lösungen ein.

2.2. Technische Eignung der O-Lkw für Transporteure

Die O-Lkw der ersten und zweiten Generation erfüllen die fahrzeugtechnischen Anforderungen der Transportunternehmen. Die O-Lkw Sattelzugmaschinen wurden mit unterschiedlichen Aufliegern, wie Auflieger mit Koffer, mit und ohne zusätzliches Kühlaggregat, Auflieger mit Plane oder auch Containerchassis kombiniert. Trotz einer Überlänge aufgrund des notwendigen Einbauraums

für den Pantographen wurde eine Ausnahmegenehmigung bei der Zulassung erzielt. Von der Mehrheit der Fahrer wurde die Überlänge von 35 cm größtenteils nicht als hinderlich wahrgenommen.

Das Eigengewicht der O-Sattelzugmaschinen ist aufgrund zusätzlicher Komponenten höher als bei konventionellen Fahrzeugen, was eine Ausnahmegenehmigung für ein Gesamtgewicht von 41,8 t erforderlich machte. Im Realbetrieb zeigte sich, dass das Mehrgewicht in der Praxis kaum zu Einschränkungen bei der Zuladung führt.

Ebenfalls sind die erste und zweite Generation mit allen standardmäßigen Assistenzsystemen ausgestattet. Darüber hinaus verfügen alle O-Lkw-Generationen über ein oberleitungsspezifisches Assistenzsystem, den sogenannten „Catenary Keep Assist“, der die Fahrer bei der Fahrt mit dem Pantographen unter der Oberleitung insbesondere beim Halten der Spur unterstützt.

Aufgrund der Ausstattung der O-Lkw der ersten und zweiten Generation sowohl mit einem Verbrennungsmotor als auch einer E-Maschine, die sowohl elektrische Energie aus der Oberleitung mittels Pantographen als auch außerhalb der Oberleitungsanlage über die Batterie beziehen kann, ist die Reichweite dieser O-Lkw Generationen

vergleichbar mit der Reichweite eines Diesel-Lkws. Die elektrische Reichweite ist abhängig von der Größe der Batterie und der verfügbaren Oberleitungsinfrastruktur. Trotz einer Steigerung der elektrischen Reichweite von der ersten auf die zweiten O-Lkw Generation wird diese von dem Management noch nicht als angemessen wahrgenommen. Bei der langfristigen Einschätzung der optimalen Batteriekapazität von O-Lkw zeigt sich eine große Unsicherheit unter den Befragten, doch unter denjenigen mit einer klaren Meinung besteht eine Präferenz für größere Batteriekapazitäten von über 400 kWh. Zurückzuführen ist der Wunsch nach einer großen Batteriekapazität vermutlich auf die noch stark limitierte Länge der Oberleitungsanlage.

Hinsichtlich der dritten O-Lkw Generation haben sich neue Herausforderungen bei den fahrzeugtechnischen Eigenschaften auf Seiten der Transportunternehmen ergeben. Bei der Akquisition von Transportunternehmen zum Einsatz der dritten Generation hat sich gezeigt, dass die Mehrheit der grundsätzlich interessierten Unternehmen Bedenken hinsichtlich der Batteriekapazität hat. Darüber hinaus standen den Unternehmen zum Zeitpunkt der Anfrage keine stationäre Ladeinfrastruktur für das ergänzende Nachladen z.B. über Nacht zur Verfügung.

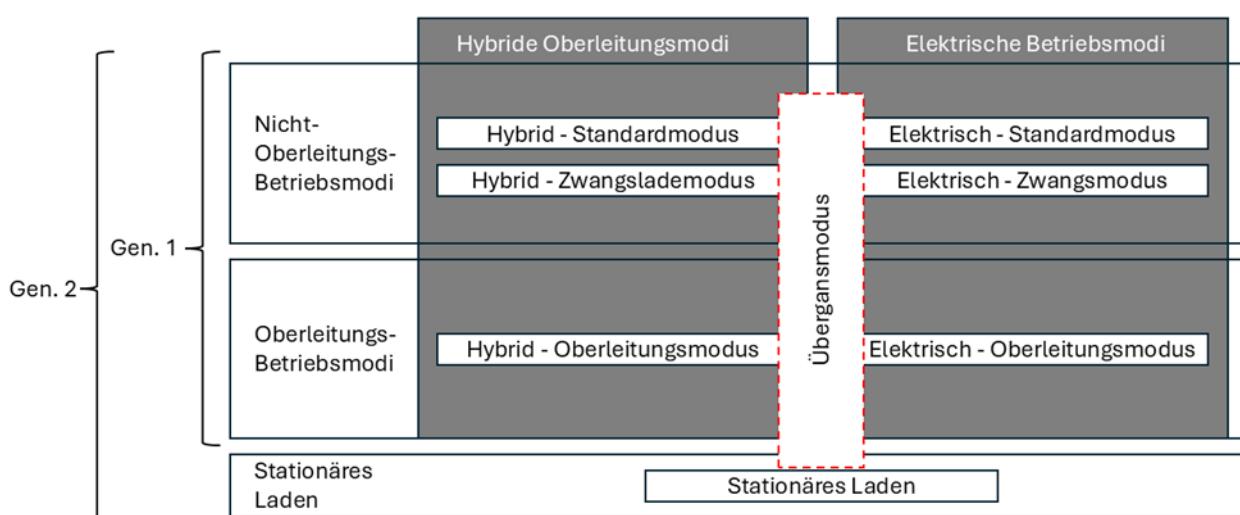


Abbildung 1: Betriebsmodi der O-Lkw Generationen 1 und 2 (hybride) (IVV 2025 erweitert nach Schöpp 2021/2022)

2.3. Betriebsmodi der O-Lkw

O-Lkw können in verschiedenen sogenannten *Betriebsmodi* operieren. Die Betriebsmodi sind abhängig von den fahrzeugtechnischen Eigenschaften.

Für die O-Lkw der Generation 1 und Generation 2 (Abbildung 1) werden der Hybrid-Standardmodus, der Elektrisch-Standardmodus, der Hybrid-Oberleitungsmodus sowie der Elektrisch-Oberleitungsmodus unterschieden. Darüber hinaus finden Übergänge zwischen dem Wechsel zweier Betriebsmodi statt. Da die Generation 2 über die

Möglichkeit des zusätzlichen stationären Nachladens der Batterie verfügt sie zusätzlich den Modus „Stationäres Laden“. Die Betriebsmodi der Generation 3 (Abbildung 2), der ersten rein elektrischen O-Lkw unterscheiden sich von den OH-Lkw. Alle hybriden Modi entfallen, da kein Verbrennungsmotor mehr verbaut ist. Dementsprechend sinkt die Anzahl der Betriebsmodi auf den Elektrisch-Standardmodus, den Elektrisch-Oberleitungsmodus, den Modus Stationäres Laden sowie den Übergangsmodus. Die Anteile der gefahrenen Kilometer in den einzelnen Betriebsmodi unterscheiden sich nicht grundsätzlich. Es lässt sich aber feststellen, dass die rein elektrischen Modi öfter durch die Generation 2 genutzt werden, als durch die Generation 1, was auf die weitere Elektrifizierung der Fahrzeuge zurückzuführen ist. Weil die Länge der nutzbaren Infrastruktur für alle Fahrzeuge dieselbe ist, bleibt der Anteil der Oberleitungsmodi über die Generationen ähnlich. Die Generation 2 nutzt indes mehr den Elektrisch-Oberleitungsmodus statt den Hybrid-Oberleitungsmodus. Innerhalb der Generationen sind Unterschiede festzustellen, sodass festgehalten werden kann, dass das Tourenprofil und die gewählten Routen sowie die Nutzung stationären Ladens großen Einfluss auf die Verteilung der Betriebsmodi haben.

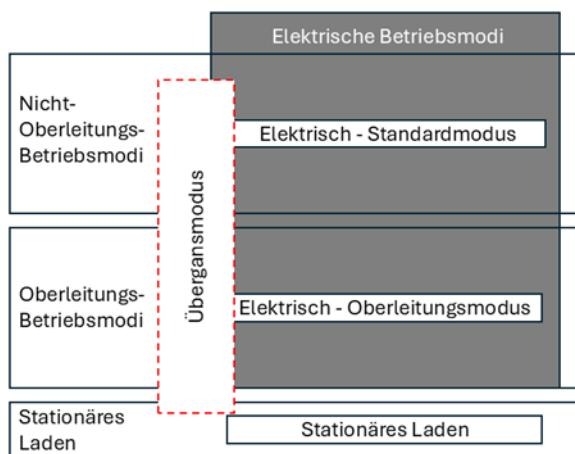


Abbildung 2: Betriebsmodi der O-Lkw Generation 3 (IVV 2025 in Anlehnung an Schöpp 2021/2022)

2.4. Kraftstoff- und Stromverbrauch

Für die eingesetzten Fahrzeuge wurde der Kraftstoffverbrauch je O-Lkw Generation ermittelt. Die Ergebnisse zeigen auf, dass der Kraftstoffverbrauch der Generation 2 sich deutlich gegenüber der Generation 1 reduziert hat.

Im Zeitraum der zweiten Projektphase von Juli 2022 bis Dezember 2024 verbrauchte die Generation 1 im Durchschnitt 28,11 l/100km, wobei Ergebnisse

zwischen 24,4 (El Fondo) und 32 (El Femina) l/100km ermittelt wurden. Die Generation 2 hingegen verbrauchte im Durchschnitt 21,02 l/100km, mit Ergebnissen zwischen 23,88 (Ute) und 15,39 (Steffi) l/100km.

Tabelle 2: Energieverbrauch der O-Lkw Generationen (IVV 2025)

O-Lkw Generation	1	2	3
Ø-Kraftstoffverbrauch (l/100km)	28,11	21,02	/
Ø-Verbrauch elektrischer Energie (kWh/100km)	16	33	84

Weiterhin wurden die Verbräuche elektrischer Energie ermittelt. Im Vergleich zur Generation 1 weist die Generation 2 deutlich erhöhte Verbräuche elektrischer Energie auf. Im Durchschnitt über den Zeitraum der zweiten Projektphase von Juli 2022 bis Dezember 2024 verbrauchte die Generation 1 rund 16 kWh/100km (zwischen 21,55 (El Salto) und 13,8 (El Femina) kWh/100km), die Generation 2 rund 33 kWh/100km (zwischen 26,15 (Angela) und 41,7 (Steffi) kWh/100km). Demzufolge verbrauchte die Generation 2 durchschnittlich rund 106% mehr elektrische Energie als die Generation 1.

Auch für die rein elektrische Generation 3 konnten die Verbräuche elektrischer Energie ermittelt werden. Da nur zwei Fahrzeuge eingesetzt wurden, ist die Datengrundlage nicht so groß wie die der ersten Generationen. Im Generationsdurchschnitt verbraucht die Generation 3 rund 84 kWh/100km (79,99 kWh/100km für Brunhilde und 88,67 kWh/100km für Berta).

In einer Betrachtung der Verbräuche über die Projektlaufzeit fällt auf, dass die Kraftstoffverbräuche während der Nicht-Verfügbarkeit der Oberleitungsinfrastruktur ansteigen, während die Verbräuche elektrischer Energie sinken. Dies ist bei der Generation 2 ausgeprägter als bei der Generation 1.

2.5. Treibhausgasemissionseinsparung

Zusammenfassend zeigt sich, dass ein treibhausgasmissionsfreier Transport mit der Oberleitungstechnologie möglich ist.

Für die Ermittlung der Treibhausgas (THG)-emissionseinsparungen wurde auf Grundlage von Hilgers (2016) ein Vergleichsfahrzeug

herangezogen, welches einen Verbrauch von 35,11 l/100km aufweist. Für einen Vergleich mit der Generation 3 wurde ein Vergleichsfahrzeug mit 21,5 l/100km genutzt.

Die Treibhausgasemissionen der Fahrzeuge im Projekt setzen sich aus den Treibhausgasemissionen von der Erzeugung des Kraftstoffs sowie elektrischen Energie bis zur Nutzung für den Antrieb zusammen, der sogenannten Well-to-Wheel-Betrachtung. Auf Basis der DIN EN 16258:2012 sowie Icha and Lauf (2024) wurden Emissionsfaktoren pro Liter Kraftstoff sowie pro verbrauchter Kilowattstunde elektrischer Energie bei verschiedenen Strommixen ermittelt. Basierend auf diesen Emissionsfaktoren wurde die absolut eingesparten Treibhausgasemissionen sowie die prozentualen Einsparungen gegenüber den vorab definierten konventionellen Diesel-Lkw berechnet.

Abbildung 3 Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zeigt, dass die Generation 2 mehr Treibhausgasemissionen einspart als die Generation 1. Es werden Einsparungen der Generation 1 gegenüber einem konventionellen Fahrzeug von durchschnittlich 19,2% (zwischen 8,6% und 31,8%) ermittelt. Die Generation 2 ermöglicht Einsparungen von durchschnittlich 35,1% (zwischen 27,2 und 43,6%).

Die Einsparungen sind abhängig vom angenommenen Strommix und der elektrischen

Fahrleistung des Fahrzeugs. Mit ansteigendem Anteil erneuerbarer Energien im Strommix werden weniger Emissionen durch die Erzeugung elektrischer Energie produziert und weitere Einsparungen sind möglich. Aufgrund des geringen Anteils der Emissionen aus der Erzeugung der elektrischen Energie für die Generation 1 sind die Mehreinsparungen für den Strommix 2023 nur geringfügig höher. Die Generation 2 hingegen verbraucht deutlich mehr Strom, sodass der Anteil der Emissionen der Erzeugung elektrischer Energie höher ist. Die Einsparungen für den Strommix 2023 liegen daher zwischen 27,6% und 44,6%. Bei der Annahme von Ökostrom, also der Erzeugung der elektrischen Energie rein aus erneuerbaren Energien, können die Einsparungen der Generation 2 auf zwischen 32% und 56,2% gesteigert werden.

Die Fahrzeuge der Generation 3 sind aufgrund des rein elektrischen Antriebes sind ausschließlich abhängig vom Strommix, da keine Treibhausgasemissionen aus dem Einsatz von Diesel mehr entstehen. Unter Annahme des Strommixes von 2021 sind Einsparungen von 39 % möglich (Abbildung 4). Mit dem Strommix von 2023 werden Einsparungen von 44% erreicht. Unter Annahme von Ökostrom sind die O-Lkw der dritten Generation vollständig treibhausgasemissionsfrei.

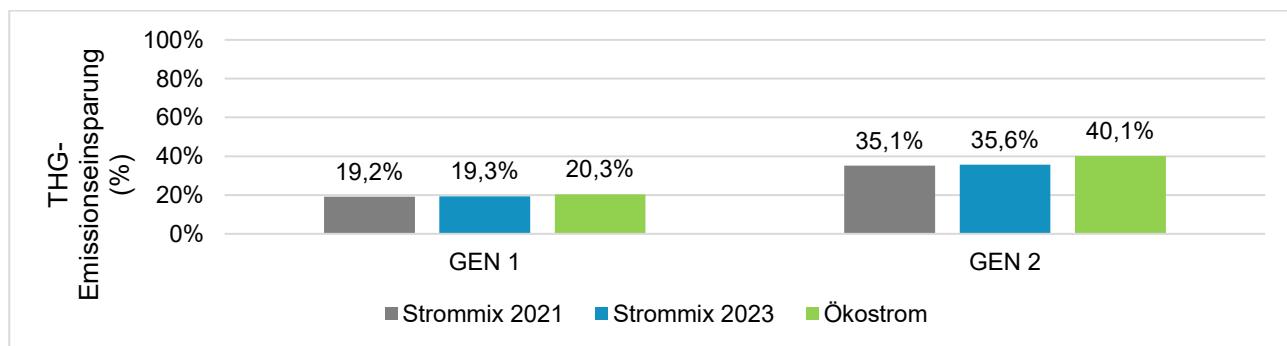


Abbildung 3: THG-Emissionseinsparungen der ersten und zweiten O-Lkw Generation (IVV 2025)

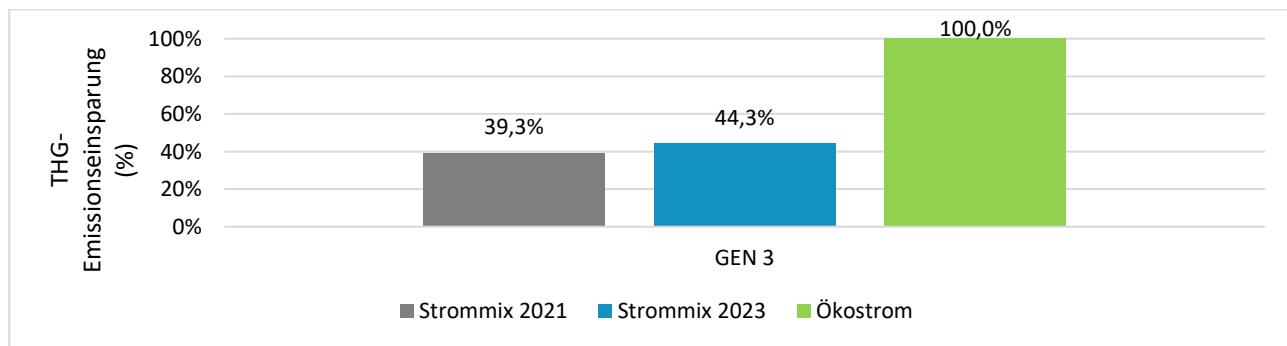


Abbildung 4: THG-Emissionseinsparungen der dritten O-Lkw Generation (IVV 2025)

2.6. Luftschatstoffemissionen und -immissionen

Bereits in der ersten Projektphase wurde anhand einer umfangreichen Life-Cycle-Analysis nachgewiesen, dass die neue Generation (Generation 2) von O-Lkw größere Einsparungen im Vergleich zur Generation 1 ermöglicht. Die erhöhte elektrische Fahrleistung wiegt die vergrößerten Emissionen aus der Herstellung der größeren Batterie der Fahrzeuge auf. Für die Berechnung der Luftschatstoffemissionen wurden die vom O-Lkw im Zeitraum Juli 2022 bis Dezember 2024 zurückgelegten Kilometer nach Betriebsmodus zu Grunde gelegt. Aus dem Handbook Emission Factors for Road Transport (HBEFA) wurden Emissionsfaktoren für verschiedene Luftschatstoffe entnommen. Die Emissionseinsparung wurde im Vergleich zu einem konventionellen Diesel-Lkw berechnet.

Generation 1 erzielte durchschnittlich 7 % Luftschatstoff-Einsparung, abhängig von der elektrischen Fahrleistung. Fahrzeuge mit höherem Anteil an elektrisch zurückgelegter Strecke konnten entsprechend mehr Luftschatstoffemissionen einsparen.

Generation 2 konnte im Schnitt 12 % der Luftschatstoffemissionen vermeiden. Besonders das Fahrzeug Steffi erreichte mit 24 % den höchsten Wert, dank hoher elektrischer Fahrleistung.

Generation 3, rein elektrisch betrieben, spart alle Emissionen aus der Verbrennung von fossilen Kraftstoffen ein. Sekundär-Emissionen (Abriebe von Bremsen und Reifen) bleiben jedoch bestehen.

Zusätzlich wurden die Emissionen durch den Pantographeneinsatz (Kontaktstelle zur Oberleitung) betrachtet. Der mechanische Abrieb von Fahrdrähten und Schleifleisten erzeugt ebenfalls Partikelemissionen, die mit experimentellen Werten abgeschätzt wurden. Es zeigte sich, dass diese Abriebe in PM10-Emissionen umgerechnet nur einen kleinen Anteil (etwa 9 - 11 %) der Partikelemissionen aus der Nutzung von fossilen Kraftstoffen ausmachen und daher nicht wesentlich ins Gewicht fallen, insbesondere bei gleichzeitig steigender elektrischer Fahrleistung.

Zusammengefasst, kann das eHighway-System zur Reduktion von Luftschatstoffemissionen beitragen insbesondere von Stickoxiden und Kohlenmonoxid. Der Erfolg ist dabei stark abhängig von der Höhe der elektrisch zurückgelegten Strecke.

Weiterhin wurde in verschiedenen Experimenten geprüft, ob die Emissionen der O-Lkw als

Immissionen anderer Verkehrsteilnehmer gemessen werden können und ob sich diese in verschiedenen Betriebsmodi unterscheiden. Dabei zeigt sich, dass eine Messung der Immissionen möglich ist und dass der Wechsel des Betriebsmodus von hybrid zu rein elektrisch sich in den Immissionswerten positiv widerspiegelt. Allerdings kann keine Aussage über die mögliche Höhe der Verringerung gemacht werden. Es wird erwartet, dass der vermehrte Einsatz von O-Lkw die Emissionen und damit auch die Immissionen von Luftschatstoffen verringert und dementsprechend einen positiven Beitrag zur Gesundheit der Verkehrsteilnehmer und der Lkw-Fahrer leisten kann.

2.7. Integration der OH-Lkw in Transportprozesse

Die Ergebnisse zur Analyse der Integrationsfähigkeit von O-Lkw in die unterschiedlichen UC zeigt auf, dass die O-Lkw für unterschiedliche Einsatzzwecke geeignet sind. Die Untersuchung zeigt, dass die O-Lkw derzeit insbesondere für den Nah- und Regionalverkehr genutzt werden, weil die Oberleitungsinfrastruktur räumlich begrenzt ist. Während die hybride erste und zweite Generation der O-Lkw auch im Fernverkehr eingesetzt werden kann, ist eine deutliche Effizienzsteigerung nur mit einem Ausbau der Oberleitungen möglich.

Die Integration der O-Lkw in bestehende Transportkettenstrukturen wurde erfolgreich nachgewiesen, insbesondere im Shuttle- und Verteilverkehr zwischen Frankfurt und Darmstadt, wo eine hohe Nutzungshäufigkeit aufgrund der existierenden Oberleitungsstrecke festgestellt wurde. Die O-Lkw konnten zudem für den Transport verschiedener Güterarten eingesetzt werden, wobei die fehlende Gefahrgutzulassung eine Einschränkung darstellt. Transportzeit und Termintreue wurden durch den Einsatz der O-Lkw nicht beeinflusst, und auch Be- und Entladeprozesse blieben unverändert.

Die Analyse der zweiten und dritten O-Lkw-Generation zeigt, dass eine zusätzliche stationäre Ladeinfrastruktur auf Betriebshöfen bei der zweiten O-Lkw Generation vorteilhaft und bei der dritten O-Lkw Generation erforderlich ist, insbesondere zur Reichweitenoptimierung während längerer Standzeiten.

Die Tourenplanung für O-Lkw unterscheidet sich von Diesel-Lkw hauptsächlich durch die Berücksichtigung der Oberleitungsinfrastruktur und der verfügbaren elektrischen Reichweite. Die Befragung des Managements ergab, dass in den meisten Einsatzszenarien keine Anpassungen der

Tourenplanung notwendig waren, mit Ausnahme einzelner Fälle, in denen die Tourenplanung zur Nutzung der Oberleitung optimiert wurde. Umwegkilometer aufgrund der Nutzung der Oberleitungsinfrastruktur wurden kaum festgestellt, sodass die Integration in bestehende Touren weitgehend ohne größere Anpassungen erfolgen konnte. Zudem konnte die Tourenplanungssoftware in den meisten Fällen mit geringem Aufwand angepasst werden, wodurch eine effiziente Einbindung der O-Lkw in den Betrieb möglich war.

Die Verfügbarkeit der Oberleitungsinfrastruktur spielt eine zentrale Rolle für den effizienten Einsatz von O-Lkw und umfasst sowohl die räumliche als auch die zeitliche Verfügbarkeit. Während die räumliche Verfügbarkeit durch den Feldversuch vorgegeben ist, konnte die zeitliche Verfügbarkeit durch den Oberleitungsbetreiber durch verschiedene Maßnahmen im Realbetrieb optimiert werden. Die Befragungen des Managements zeigen eine grundsätzlich positive Bewertung der räumlichen und zeitlichen Verfügbarkeit, wobei gleichzeitig ein Wunsch nach weiterem Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur erkennbar ist.

Die Ergebnisse des Feldversuchs ELISA liefern wichtige Erkenntnisse für den Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur und die Weiterentwicklung von O-Lkw in einer Kleinserie. Die hohe Integrationseignung im Shuttle- und Verteilerverkehr zeigt, dass ein gezielter Ausbau der Oberleitungsachsen entlang stark frequentierter

Routen die Wirtschaftlichkeit und Praxistauglichkeit erheblich verbessern könnte. Gleichzeitig verdeutlicht die begrenzte räumliche Verfügbarkeit der Infrastruktur den bestehenden Ausbaubedarf, insbesondere für einen möglichen Einsatz im Fernverkehr.

Die Erkenntnisse zu Tourenplanung, Abrechnungssystemen und Ladeinfrastruktur sind essenziell für die Weiterentwicklung standardisierter Prozesse, um den Einsatz von O-Lkw in der Praxis zu erleichtern. Ein schrittweiser Ausbau der Oberleitungen in Kombination mit der Einführung einer Kleinserie von O-Lkw könnte die Marktakzeptanz steigern und wertvolle weitere Betriebserfahrungen für eine langfristige Implementierung dieser Technologie liefern.

2.8. Wirtschaftlichkeit von O-Lkw

Transportunternehmen haben jahrzehntelange Erfahrung mit Diesel-Lkw, während alternative Antriebssysteme noch mit Unsicherheiten hinsichtlich Anschaffungs- und Betriebskosten verbunden sind. Da die Transportbranche unter starkem Kostendruck steht und Logistikunternehmen mit weiterhin hohen und steigenden Kosten rechnen, wird der Wechsel auf neue Technologien besonders preissensibel betrachtet. Die Wirtschaftlichkeit alternativer Antriebe wird häufig über die Gesamtbetriebskosten (TCO) bewertet, da sie langfristige Kosten berücksichtigen.

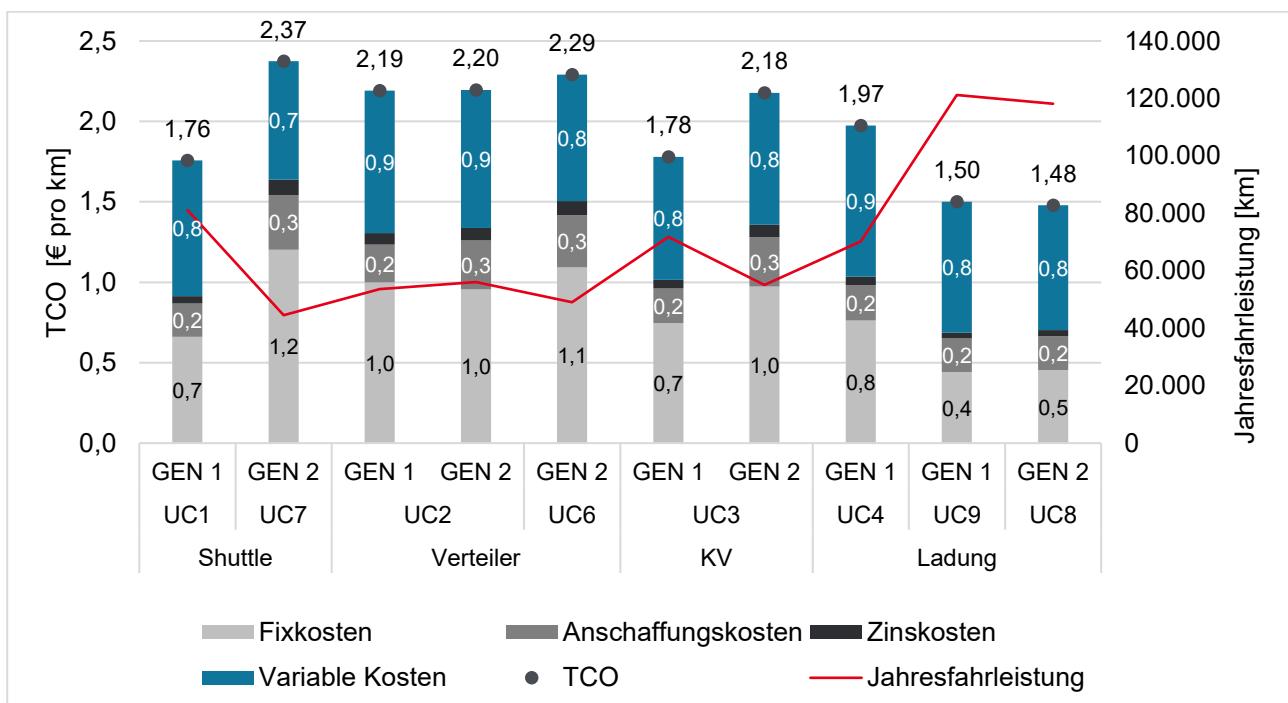


Abbildung 5 Gesamtbetriebskosten der im Realbetrieb eingesetzten O-Lkw (IVV 2025)

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von O-Lkw wurden basierend auf den Use Cases verschiedene Vergleichsszenarien entwickelt, die den Einsatz der Fahrzeuge in unterschiedlichen Transportkettenstrukturen widerspiegeln. Dazu wurden O-Lkw aus verschiedenen Generationen in vier Szenarien analysiert: Shuttleverkehr, Verteilerverkehr, kombinierter Verkehr und Ladungsverkehr. Die Gegenüberstellung der Fahrzeuge innerhalb dieser Szenarien ermöglicht einen direkten Vergleich der Betriebskosten und Fahrleistungen.

Die Ergebnisse der TCO-Berechnung zeigen, dass eine höhere Fahrleistung zu geringeren Gesamtbetriebskosten pro Kilometer führt, da die Fixkosten auf eine höhere Kilometerzahl verteilt werden, siehe Abbildung 2. Besonders Verteilerfahrzeuge weisen hohe TCO-Werte auf, was auf eine geringere Fahrleistung zurückzuführen ist, während Ladungsfahrzeuge aufgrund höherer Laufleistungen niedrigere Kosten pro Kilometer aufweisen. Trotz höherer Anschaffungskosten der zweiten O-Lkw-Generation zeigt sich, dass einzelne Fahrzeuge, wie „Angela“, dennoch die niedrigsten TCO erzielen, was auf eine effiziente Nutzung hinweist.

Die tiefergehende Analyse der variablen Kosten der UC verdeutlicht, dass die zweite Generation der O-Lkw einen höheren Anteil an Stromkosten aufweist, während die Dieselkosten im Vergleich zur ersten Generation gesunken sind. Insbesondere im Shuttleverkehr konnte der Dieserverbrauch deutlich reduziert werden, während der Kombinierte Verkehr (KV) aufgrund der geringen Fahrtenhäufigkeit unter der Oberleitung weniger Einsparungen erzielte. Der Vergleich der O-Lkw-Generationen zeigt, dass die zweite Generation durch eine größere elektrische Reichweite und niedrigere Energiekosten insgesamt günstigere TCO ermöglicht.

Ergänzend zu den UC wurden die O-Lkw Generationen mit einem Dieselreferenz-Lkw verglichen. Damit die Vergleichbarkeit unter den Generationen und dem Dieselreferenz-Lkw gewährleistet ist wurde die gleich Jahresfahrleistung angesetzt.

Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass die zweite Generation der O-Lkw bereits geringere Gesamtbetriebskosten (TCO) aufweist als die erste Generation (Abbildung 6). Während die Fixkosten gleichbleiben, unterscheiden sich die Anschaffungskosten, da die erste Generation günstiger in der Anschaffung ist. Dennoch sinken die variablen Kosten der zweiten Generation, was vor allem auf die größere elektrische Reichweite und die

damit reduzierten Energiekosten zurückzuführen ist. Damit erweist sich die zweite Generation insgesamt als wirtschaftlicher als die erste und ist bereits vergleichbar mit dem Einsatz eines Diesel-Lkw.

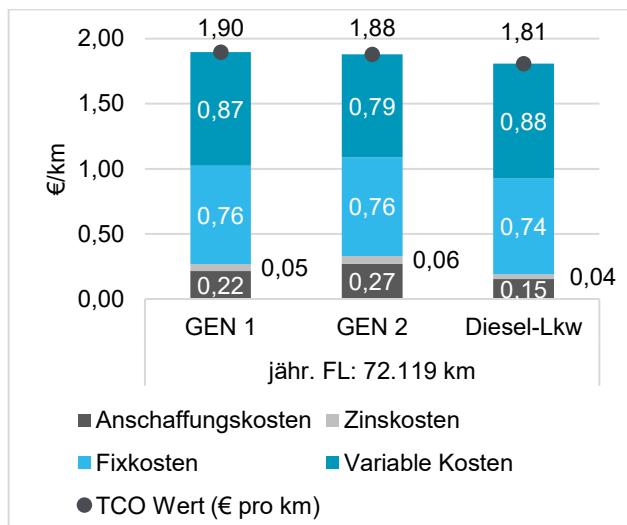


Abbildung 6: Gesamtbetriebskosten der ersten und zweiten O-Lkw Generation im Vergleich zu einem Diesel-Lkw (IVV 2025)

Die Bewertung der Gesamtbetriebskosten der dritten O-Lkw Generation zeigt, dass diese trotz höherer Anschaffungskosten geringere Gesamtbetriebskosten aufweist als ein vergleichbarer Diesel-Lkw (Abbildung 7). Im TCO-Modell ergibt sich ein Kostenvorteil von -0,12 ct/km zugunsten des O-BEV. Hauptgründe dafür sind die deutlich niedrigeren Energiekosten sowie der Wegfall der Lkw-Maut. Damit erweisen sich O-BEVs langfristig als wirtschaftlichere Alternative im Vergleich zum Diesel-Lkw.

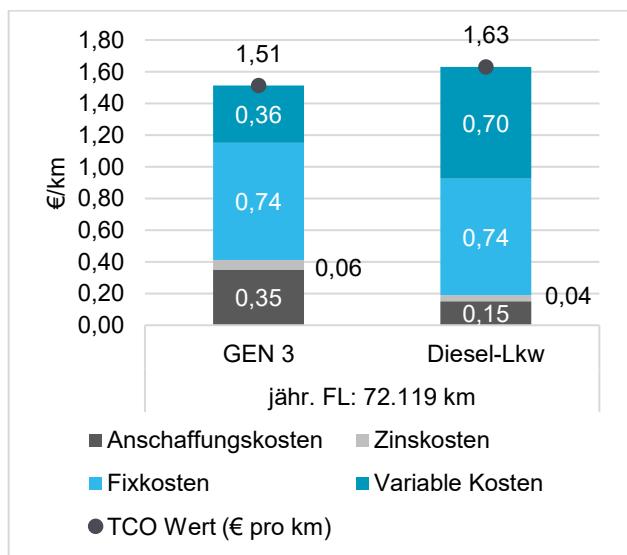


Abbildung 7: Gesamtbetriebskosten der dritten O-Lkw Generation im Vergleich zu einem Diesel- Lkw (IVV 2025)

2.9. Akzeptanz auf Seiten der Lkw-Fahrerinnen und Fahrer

Der Umstieg auf alternative Antriebssysteme bietet einerseits die Chance, CO₂-Emissionen zu reduzieren, bringt jedoch gleichzeitig neue technische Merkmale und eine veränderte Fahrzeugausstattung mit sich. Diese Neuerungen wirken sich nicht nur auf den operativen Betrieb der Lkw aus, sondern auch auf die Fahrer, die täglich mit den Fahrzeugen arbeiten und sie im Transportbetrieb einsetzen. Da der Fahrer eine zentrale Rolle für die Effizienz und den reibungslosen Einsatz von Lkw spielt, ist es essenziell, seine Perspektiven und Anforderungen in die Entwicklung und Implementierung neuer Antriebstechnologien einzubeziehen.

Besonderer Fokus der Bewertung der Fahrerakzeptanz lag außerdem auf der Erhebung und Analyse der Zufriedenheit der Fahrer mit den O-Lkw im Zeitverlauf, siehe Abbildung 8. Auf einer Skala von 1 (sehr unzufrieden) bis 8 (sehr zufrieden) bewerten die Fahrer die Fahrzeuggenerationen mit einem Mittelwert zwischen 5,8 und 7. Diese Werte befinden sich in der oberen Hälfte der Bewertungsskala. Daraus lässt sich schließen, dass die Fahrer eher zufrieden als unzufrieden mit dem O-Lkw sind. Darüber hinaus steigen die Fahrer der zweiten Generation bereits mit einer höheren Zufriedenheit ein als die Fahrer der ersten Generation. Weiterhin zeigt sich bei der zweiten Generation außerdem, dass die Zufriedenheit der

Fahrer kontinuierlich bis auf einen Wert von 7 von 8 Zufriedenheitspunkten ansteigt.

Weiterhin ergibt sich in Bezug auf die Benutzerfreundlichkeit ein überwiegend positives Bild. Besonders die Fahrerfahrung spielt eine entscheidende Rolle: Mit zunehmender Nutzung des Pantographen empfinden die Fahrer dessen Bedienung als zunehmend intuitiver und einfacher. Gleichzeitig berichten sie, dass die erforderliche Aufmerksamkeit beim Fahren eines O-Lkw im Vergleich zu einem Diesel-Lkw etwas höher liegt. Langfristig könnte jedoch die Automatisierung des An- und Abbügelsvorgangs des Pantographen dazu beitragen, die fahrerseitige Belastung zu reduzieren und die Handhabung weiter zu erleichtern.

Bei der Übertragung auf die Zukunftsfähigkeit der O-Lkw aus Sicht der Fahrer ist zu berücksichtigen, dass es sich bei dem Realbetrieb der O-Lkw im Rahmen des Feldversuchs um von den Transportunternehmen für den Einsatz ausgewählte Fahrer handelt. Die Mehrheit der Fahrer zeigte ein großes Interesse an der Technologie und war gewillt an der Erprobung teilzunehmen. Mit der Verbreitung des eHighway-Systems ist davon auszugehen, dass weniger Technologie und Innovationsaffine Fahrer die O-Lkw einsetzen werden. Es ist daher zielführend sobald eine größere Anzahl an O-Lkw in Betrieb genommen wird, die Befragung im größeren Stil zu wiederholen und anhand statistischer Analyse die Einflussgrößen erneut zu bewerten.

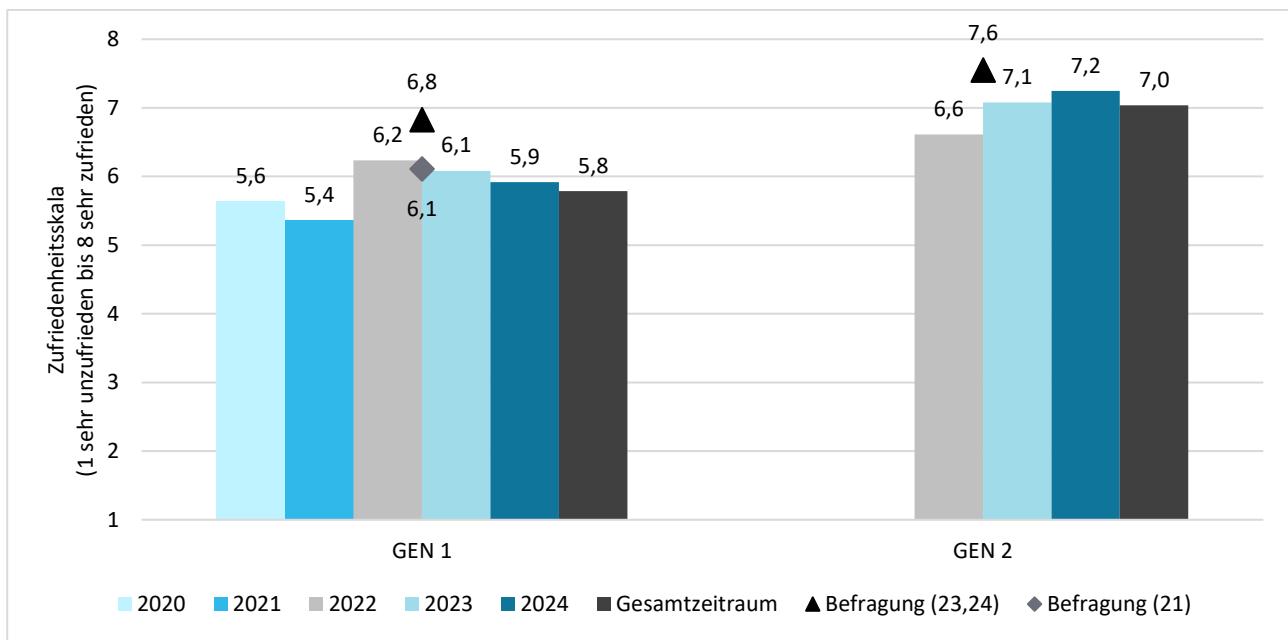


Abbildung 8: Fahrerzufriedenheit der O-Lkw Generationen (IVV 2025)

2.10. Akzeptanz auf Seiten des Managements

Die Einführung alternativer Antriebssysteme, wie der O-Lkw stellt eine zentrale Innovation in der Transportbranche dar. Besonders die Akzeptanz dieser Technologien auf Seiten des Managements der Transportunternehmen ist entscheidend, da sie durch individuelle Überzeugungen und Erfahrungen der Nutzer beeinflusst wird. Im Rahmen des Forschungsprojekts ELISA erhielten Transportunternehmen die Möglichkeit, den O-Lkw im Realbetrieb zu erproben und dessen Potenziale sowie Herausforderungen zu identifizieren.

Die Untersuchung zeigt, dass das Management der Transportunternehmen die O-Lkw insgesamt akzeptiert. Ebenfalls wurde nachgewiesen, dass die Akzeptanz des Managements von der ersten zur zweiten O-Lkw Generation steigt, siehe Abbildung 9.

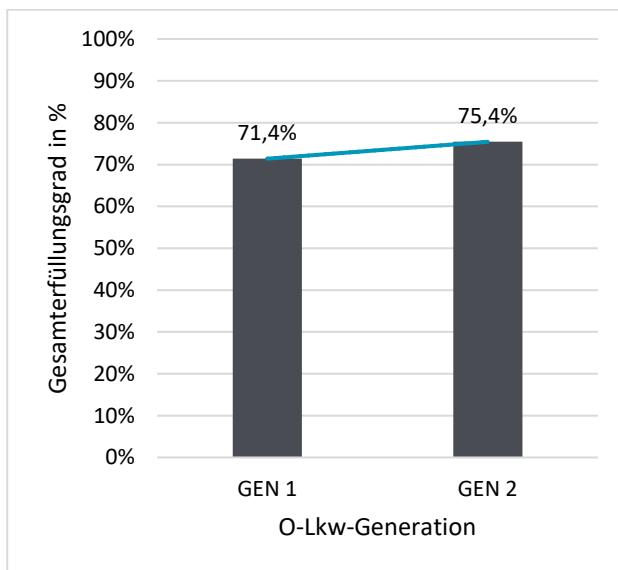


Abbildung 9: Gesamterfüllungsgrad der Akzeptanzkriterien aus Sicht des Managements (IVV 2025)

Zur Bewertung der Akzeptanz des Managements wurden verschiedene Einflussfaktoren berücksichtigt. Die Zufriedenheit mit den O-Lkw wurde über einen Zeitraum von mehr als drei Jahren erfasst und zeigte insgesamt eine überwiegend positive Bewertung, mit den meisten Werten im oberen Bereich der Skala. Die Erwartungserfüllung variiert je nach Einsatzszenario, wobei die Mehrheit der Transportunternehmen angibt, dass ihre Erwartungen eher erfüllt wurden, während in einigen Fällen Unzufriedenheit festgestellt wurde. Die wahrgenommene Zuverlässigkeit der O-Lkw wurde im Jahr 2025 höher bewertet als zu Beginn des Feldversuchs, insbesondere aufgrund der verbesserten Verfügbarkeit der zweiten O-Lkw-Generation, wenngleich die Zuverlässigkeit weiterhin

als niedriger im Vergleich zu Diesel-Lkw eingeschätzt wird. Sicherheitsbedenken gab es über den gesamten Projektzeitraum hinweg keine.

Hinsichtlich eines möglichen Imagegewinns durch den Einsatz von O-Lkw zeigten sich gemischte Einschätzungen, wobei einige Unternehmen einen positiven Effekt erwarten, während andere keinen wesentlichen Vorteil sehen. Neue Marktchancen durch den Einsatz von O-Lkw wurden bislang kaum realisiert, jedoch wird langfristig Potenzial für die Neukundenakquise gesehen. Der Einfluss der Wahrnehmung des eHighway-Systems in der Gesellschaft auf die Akzeptanz der Technologie blieb in der ersten Projektphase gering, nahm jedoch in der zweiten Befragung zu, was auf eine zunehmende gesellschaftliche Relevanz des eHighway-Systems hindeutet.

Die Verhaltensabsichten zeigen, dass zum Zeitpunkt der Befragungen keine Anschaffung eines O-Lkw geplant war, insbesondere aufgrund der begrenzten räumlichen Verfügbarkeit der Oberleitungsinfrastruktur und der hohen Anschaffungskosten. Gleichzeitig gaben einige Unternehmen an, dass sie bei einem flächendeckenden Ausbau der Oberleitungen eine Flottenanschaffung positiv bewerten würden. Die allgemeine Akzeptanz gegenüber dem eHighway-System ist weiterhin vorhanden, jedoch nahm die positive Bewertung im Verlauf der Projektphasen leicht ab.

Die Akzeptanz der dritten O-Lkw-Generation seitens des Managements lässt sich nur begrenzt bewerten, da der Fahrzeugeinsatz stark eingeschränkt war. Aufgrund fehlender stationärer Ladestationen sowie Oberleitungsinfrastruktur konnte mit der vorliegenden Batteriekapazität kein geeignetes langfristiges Tourenprofil in der Region identifiziert werden, sodass der O-Lkw der dritten Generation im Projekt ELISA nur kurzfristig eingesetzt wurde.

3. Schlussfolgerungen und Ausblick

Für einen zukunftsfähigen Einsatz von O-Lkw ist es entscheidend, dass diese die Anforderungen der Transportunternehmen für unterschiedliche Einsatzzwecke erfüllen, wirtschaftlich einsatzfähig sind und gleichzeitig der Energieverbrauch und THG-Emissionen reduziert werden. Für diesen Nachweis kommt die Begleitforschung des Realbetrieb zu den folgenden Erkenntnissen:

- Die hybriden O-Lkw-Generationen erfüllen grundsätzlich die Anforderungen der Transportunternehmen.
- Die rein-elektrische O-Lkw-Generation konnte auf der Teststrecke ELISA nur kurzfristig im Realbetrieb eines Unternehmens und anschließend für Forschungsfahrten eingesetzt werden. Herausforderung aus Sicht der angefragten Transportunternehmen aus der Region war die Kombination aus fehlenden Einsatzprofilen mit der Reichweite und der Konfiguration des O-BEV als 26-Tonner mit Kofferaufbau.
- Der Transport von Gefahrgütern ist aufgrund des Prototypenstatus der O-Lkw derzeit noch nicht realisierbar, erscheint jedoch zukünftig wahrscheinlich.
- Die O-Lkw verfügen über alle gängigen standardmäßigen Assistenzsysteme sowie über zusätzliche, speziell auf den Betrieb unter der Oberleitung zugeschnittene Systeme, die den Fahrer insbesondere beim Einsatz des Pantographen unterstützen.
- Die Gesamtreichweite der hybriden O-Lkw wird von den Transportunternehmen als ausreichend eingeschätzt. Dennoch besteht der Wunsch nach einer weiteren Erhöhung der elektrischen Reichweite, auch wenn diese bereits in der zweiten O-Lkw-Generation deutlich verbessert werden konnte.
- Im Gegensatz zu einem Diesel-Lkw werden hybride O-Lkw sowie rein-elektrische O-Lkw in verschiedenen Betriebsmodi betrieben, die den Kraftstoff- und Stromverbrauch beeinflussen.
- Die zweite O-Lkw Generation ermöglicht eine Kraftstoffreduktion und eine Steigerung des elektrischen Energieverbrauchs sowohl gegenüber der ersten und umso mehr gegenüber einem Diesel-Referenz-Lkw.
- Wird der O-Lkw rein-elektrisch betrieben ist ein treibhausgasemissionsfreier Transport möglich.
- Durch die vergrößerte Batterie, die Erhöhung der Leistungsfähigkeit der E-Maschine als auch die Verlängerung des Oberleitungsinfrastruktur spart im Durchschnitt die zweite O-Lkw Generation mehr THG-Emissionen als die erste O-Lkw Generation gegenüber einem Diesel-Referenz-Lkw.
- Es wird erwartet, dass der vermehrte Einsatz von O-Lkw die Luftschaadstoffemissionen verringert und sich dies positiv auf die Immissionsbelastung durch Lkw auf Verkehrsteilnehmende auswirkt.
- Die Gesamtbetriebskosten (TCO) eines O-Lkw sind mit denen eines Diesel-Lkw vergleichbar. Mit der Steigerung der Fahrleistung und der Erhöhung des elektrischen zurückgelegten Streckenanteils können die TCO weiter reduziert werden.
- Die O-Lkw werden von den Fahrern akzeptiert und im Projektverlauf sowie mit den neuen O-Lkw Generationen erhöhte sich die Fahrerakzeptanz. Die Fahrer fühlen sich mit der Nutzung der O-Lkw grundsätzlich wohl und das System wird nicht als anstrengend wahrgenommen.
- Der O-Lkw wird von dem Management der Transportunternehmen akzeptiert und sie sind mit dem eHighway-System zufrieden. Den weiteren Betrieb der O-Lkw sowie den Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur befürworten die beteiligten Transportunternehmen. Insofern ein flächendeckender Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur vorangetrieben wird, stehen die Transportunternehmen einer O-Lkw Flotte positiv gegenüber.

4. Schrifttum und weiterführende Literatur

Bremer, L., & Kassens-Noor, E. (2025). Framework for the implementation of an innovation corridor for road freight transport in Germany. *Transportation Research Procedia*, 82, 3900–3911. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.12.006>

Hilgers, M. (2016). Kraftstoffverbrauch und Verbrauchsoptimierung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-12751-0>

Icha, P., Lauf, T., & Kuhs, G. (2022). Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2021. (Umweltbundesamt, Hrsg.).

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-04-13_cc_15-2022_strommix_2022_fin_bf.pdf

Jöhrens, J., Lehmann, M., Bramme, M., Brauer, C., Bulenda, A., Burghard, U., et al. (2022). Aktuelle technische Erkenntnisse zum eHighway-System aus Feldversuch und Begleitforschung. <https://publica.fraunhofer.de/handle/publica/417609>. Zugegriffen: 3. Oktober 2022

Linke, R. (2024). Integration alternativer Lkw-Antriebssysteme bei Transportunternehmen - Entwicklung eines Bewertungsverfahrens am Beispiel von Oberleitungs-Hybrid-Lkw. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. Abgerufen von <https://doi.org/10.26083/tuprints-00029346>

Linke, R., Öztürk, Ö., & Kassens-Noor, E. (2024). Analysis of Technical and Operational Requirements of Alternative Drive Systems by Transport Companies: The Case of the Overhead Contact Line Truck. *Sustainability*, 16(8), 3276. <https://doi.org/10.3390/su16083276>

Linke, R., Wilke, J. K., Öztürk, Ö., Schöpp, F., & Kassens-Noor, E. (2022). The future of the eHighway system: a vision of a sustainable, climate-resilient, and artificially intelligent mega-project. *Journal of Mega Infrastructure & Sustainable Development*, 1–14. <https://doi.org/10.1080/24724718.2022.2131087>

Linke, R., Wilke, J. K., Schöpp, F., Öztürk, Ö., Bremer, L., Scheyltjens, M., & Kaßens-Noor, E. (2023). Das eHighway-System - Erkenntnisse aus der ersten Pilotphase der Oberleitungsteststrecke auf der A5. *Internationales Verkehrswesen*, (Ausgabe 3), 28–32.

Öztürk, Ö., Linke, R., Schöpp, F., & Kassens-Noor, E. (2025). Methodological approach to analyze vehicle data in electric road systems: case study – ELISA, the eHighway

project. *Transportation Research Procedia*, 82, 2724–2736. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.12.215>

Schöpp, F. (2024). Quantifizierung der Treibhausgasemissionen des oberleitungsgebundenen Straßengüterverkehrs (Dissertation). TU Darmstadt, Darmstadt. Abgerufen von <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/27013/>

Schöpp, F., Öztürk, Ö., Linke, R., & Boltze, M. (2022). Electrification of Road Freight Transport: Energy Flow Analysis of Overhead Line Hybrid Trucks. Gehalten auf der Transportation Research Board 101st Annual Meeting, Washington DC (United States). <https://trid.trb.org/view/1909495>. Zugegriffen: 2. Oktober 2022

Schöpp, F., Öztürk, Ö., Linke, R., Wilke, J. K., & Boltze, M. (2021a). Electrification of Road Freight Transport – Energy Consumption Analysis of Overhead Line Hybrid Trucks. Gehalten auf der Transportation Research Board 100th Annual Meeting, Washington DC (United States). <https://trid.trb.org/view/1759512>. Zugegriffen: 2. Oktober 2022

Schöpp, F., Öztürk, Ö., Linke, R., Wilke, J. K., & Boltze, M. (2021b). Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs - Kraftstoff- und Stromverbrauchsanalyse von Oberleitungs-Hybrid-Lastkraftwagen. *Internationales Verkehrswesen*, 73(03).

Schöpp, F., Öztürk, Ö., Wilke, J., Linke, R., & Kaßens-Noor, E. (2024). Impact of an eHighway on the directly emitted greenhouse gases by road freight transport. *Transport Policy*, 155, 300–308. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2024.07.011>

5. Autorinnen und Autoren des Hinweispapiers

Dr.-Ing. Regina Linke, Technische Universität Darmstadt, Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik

Laurenz Bremer, Technische Universität Darmstadt, Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik

Prof. Eva Kaßens-Noor, Ph.D. MIT, Technische Universität Darmstadt, Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik

6. Beteiligte Institutionen

Die Autobahn GmbH des Bundes

Geschäftsbereich Verkehrsmanagement,
Betrieb und Verkehr
Abteilung Verkehrsmanagement
Bessie-Coleman-Straße 7
60549 Frankfurt am Main

Technische Universität Darmstadt

Institut für Verkehrsplanung und
Verkehrstechnik (IVV)
Otto-Berndt-Straße 2
64287 Darmstadt

Siemens Mobility GmbH

Krauss-Maffei-Straße 2
80997 München

e-netz Südhessen AG

Forschung & Entwicklung
Dornheimer Weg 24
64293 Darmstadt