



In dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) geförderten Forschungsprojekts ELISA – Elektrischer, innovativer Schwerverkehr auf Autobahnen – wurde zwischen Mai 2019 und Dezember 2024 im Realbetrieb eine Pilotstrecke für die oberleitungsgebundene 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).

Die nachfolgenden Ausführungen fassen die wesentlichen Ergebnisse der zweiten Projektphase aus Sicht der Fahrzeughersteller zusammen. Insbesondere wird auf die Erkenntnisse zur Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit von O-Lkw und des Stromabnehmers (Pantograph) im Erprobungsbetrieb sowie einer Prognose der zukünftigen Verfügbarkeit von O-Lkw eingegangen. Darüber hinaus wird die basierend auf Expertengesprächen gewonnenen Erkenntnisse zur Einstellung der Fahrzeughersteller gegenüber alternativen Antriebstechnologien sowie insbesondere Electric Road System (ERS) aufgezeigt.

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 langsames 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 | Kofferaufbau |
| E-Maschine | 130 kW | 260 kW | 230 kW |
| Batteriekapazität | 18,5 kWh | 99 kWh | 297 kWh |
| Verbrennungsmotor | 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 Fahrzeughersteller

2.1. Technikbewertung von O-Lkw

Das Highway-System basiert auf bewährten Konzepten der elektrischen Energieversorgung, wobei die Besonderheit in der dynamischen Ladung ohne Spurbindung liegt. Die Einführung von O-Lkw stellt eine technische Innovation dar, die eine umfangreiche Erprobung erforderte, um Funktionalität, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit unter realen Bedingungen zu validieren. Mit der ersten Erprobung auf deutschen Autobahnen im Rahmen des Projekts ELISA wurde der Technologiereifegrad der O-Lkw durch die Weiterentwicklung im Laufe der Realerprobung von sechs bis sieben auf Stufe acht gesteigert. Dabei sind Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Instandhaltung essenzielle Faktoren, da Fahrzeugausfälle sowohl Kosten verursachen als auch wertvolle Erkenntnisse für Weiterentwicklungen liefern.

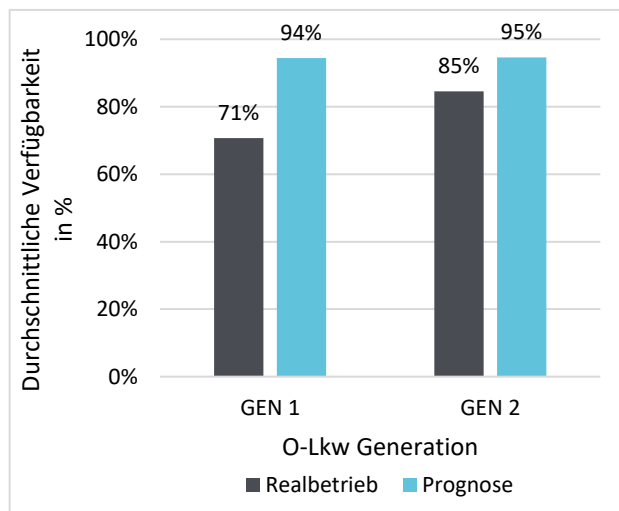
Für die Bewertung der Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Instandhaltung wurde begleitend zum Realbetrieb je O-Lkw ein Fahrzeugbetriebsstagebuch geführt. Kontinuierliche wurden fahrzeugbetriebsrelevante Informationen zum Zustand der Fahrzeuge und des Pantographen sowie Instandhaltungstage erfasst. Diese über einen Zeitraum von Ende Mai 2019 bis Ende Dezember 2024 gesammelten Daten

waren anschließend Basis für unterschiedliche Auswertungen.

Die ersten wesentlichen Ergebnisse der Auswertung sind die reale sowie die prognostizierte durchschnittliche monatliche Verfügbarkeit der O-Lkw. Die Definition der Verfügbarkeit der O-Lkw orientiert sich an Eberlin und Hock (2014, S. 69). Dort wird Verfügbarkeit als „das Verhältnis der Zeit, in der das System funktionsfähig ist, zur gesamten Zeit“ beschrieben. Übertragen auf den O-Lkw bezeichnet die Verfügbarkeit den Anteil der Tage, an denen das Fahrzeug regulär eingesetzt wurde, an allen Tagen, an denen ein Einsatz möglich gewesen wäre.

Für die reale Verfügbarkeit zeigen die Ergebnisse auf, dass die zweite Generation eine höhere Verfügbarkeit aufweist als die erste (Abbildung 1). Die durchschnittliche Verfügbarkeit der ersten Generation liegt bei 71 %, während die Verfügbarkeit der zweiten Generation mit 85 % höher liegt. Dies zeigt, dass fahrzeugtechnische Verbesserungen zu einer höheren Zuverlässigkeit der neueren Fahrzeuge geführt haben.

Für die Prognose der Verfügbarkeit serienreifer O-Lkw wurden Realdaten aus dem Fahrzeugbetriebsstagebuch bereinigt, um prototypenbedingte Ausfälle auszuschließen. Daraus ergab sich eine potenzielle Verfügbarkeit von etwa 94–95 % (Abbildung 1). Die verbleibende 5–6 % der Zeit ist für Wartung und Inspektion vorgesehen.

**Abbildung 1: Reale und prognostizierte Verfügbarkeit der O-Lkw Generationen (IVV 2025)**

Einzelne Fahrzeuge der ersten Generation zeigen eine positive Entwicklung von 65 % (2019) auf 90 % (2024), während ein anderer O-Lkw mit 34 % im Jahr 2024 die niedrigste Verfügbarkeit aller O-Lkw aufweist. Zudem treten bei einzelnen O-Lkw starke Schwankungen auf, was auf ungleichmäßige

Betriebsbedingungen oder technische Probleme hindeutet.

In der zweiten Generation hingegen weisen O-Lkw sehr hohe Verfügbarkeiten von 91 % bis 95 % auf, was auf eine deutlich verbesserte Betriebsbereitschaft schließen lässt.

Ein allgemeiner Trend über den gesamten Betriebszeitraum hinweg lässt sich nicht eindeutig feststellen, da sich die Verfügbarkeitswerte je nach Modell und Jahr unterschiedlich entwickeln. Insgesamt bestätigen die Daten jedoch, dass die zweite O-Lkw-Generation bereits zuverlässiger ist als die erste.

2.2. Technikbewertung des Pantographen

Siemens Mobility hat in diesem umfassenden Untersuchungs- und Evaluierungsansatz die operative Begleitung und Evaluation des Pantographensystems im praktischen Einsatz fokussiert. Zugleich wurde eine systemübergreifende Betrachtung zur Absicherung des Feldversuchs ergänzend durchgeführt. Dies betraf sowohl die Gesamtkonfiguration der O-Lkw als auch die spezifische Ausgestaltung der Oberleitungsinfrastruktur.

Die Analyse des Pantographensystems zeigt, dass es erfolgreich gelang, den Betrieb der neuartigen Pantographengeneration von Beginn der Betriebsversuche an auf einem hohen Leistungsniveau zu gewährleisten. Da die im Rahmen des ELISA-Projekts eingesetzten Pantographen die ersten Exemplare dieser prototypischen Baureihe darstellten, war die von Anfang an hohe Verfügbarkeit keineswegs selbstverständlich.

Die technische Verfügbarkeit des Pantographensystems konnte durch eine kontinuierliche Analyse des Systemverhaltens mithilfe des digitalen Analysewerkzeugs Railigent® und die systematische Ableitung von Optimierungsmaßnahmen nachhaltig verbessert werden. Durch diese Maßnahmen konnte die technische Verfügbarkeit des Systems während des gesamten Evaluationszeitraums signifikant gesteigert werden.

Hohe Verfügbarkeiten des Pantographen wurden zudem in speziellen Testbedingungen (Sondersituationen) nachgewiesen, wie etwa bei Stop- & Go-Verhalten, der temporären Abschaltung einzelner Unterwerke oder Überholmanövern bei niedrigen Geschwindigkeiten sowie dem frühzeitigen Wiedereinschwenken anderer Fahrzeuge.

2.3. Akzeptanz auf Seiten der Fahrzeughersteller

Im Rahmen der zweiten Projektphase wurde die Einstellungen von Fahrzeugherstellern zu verschiedenen alternativen Antriebstechnologien mit Hilfe von qualitativen Experteninterviews untersucht.

Aus den Ergebnissen zeigt sich eine deutliche Präferenz für batterie-elektrische Lkw, die als effizient, langlebig und gut in städtische sowie regionale Transporte integrierbar gelten. Die befragten Experten bewerten batterie-elektrische Lkw als zukunftsfähig und betonen die Reife der Technologie. Herausforderungen bestehen jedoch in der Bereitstellung geeigneter Ladeinfrastruktur – insbesondere für den Fernverkehr.

In diesem Zusammenhang rückt das Konzept der Electric Road Systems (ERS) in den Fokus. ERS ermöglichen dynamisches Laden während der Fahrt, z.B. über Oberleitungen, induktive Systeme oder Stromschienen. Insbesondere Oberleitungsladeinfrastruktur gilt unter den ERS als am weitesten fortgeschritten. Die Experten sehen in ERS eine sinnvolle Ergänzung zu stationären Ladelösungen, die die Reichweite erhöhen und Batteriegrößen reduzieren kann. Technisch zeigen sich ERS aus Sicht der Experten als grundsätzlich machbar, doch Herausforderungen bestehen hinsichtlich Standardisierung, Skalierbarkeit und Kosteneffizienz. Die Einführung von ERS sollte laut Experten gestaffelt erfolgen und sich zunächst auf Pilotstrecken mit hoher Verkehrsdichte konzentrieren. Eine enge Verzahnung mit autonomen Fahrtechnologien wird ebenfalls als strategischer Vorteil erkannt.

Gleichzeitig betonen die Experten die zentrale Rolle staatlicher Maßnahmen. Ohne politische Unterstützung, klare regulatorische Rahmenbedingungen und innovative Finanzierungsmodelle erscheint eine flächendeckende Umsetzung von ERS nicht realistisch. Die Rolle der Politik – z. B. durch Förderung, gesetzliche Zielvorgaben und koordinierte Infrastrukturplanung – wird als essenziell betrachtet.

Auch Stakeholder-Zusammenarbeit ist laut den Ergebnissen der Experteninterviews ein Schlüsselfaktor. Die Einführung von ERS erfordert die Kooperation zwischen Fahrzeugherstellern, Energieversorgern, Autobahnbetreibern und Politik. Dabei wird deutlich, dass unterschiedliche Akteure – inklusive der Öffentlichkeit – informiert und eingebunden werden müssen, um die Akzeptanz zu fördern. Transparente Kommunikation und Bürgerbeteiligung sind laut Experten zentrale Hebel, um anfänglicher Skepsis zu begegnen.

3. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die bisherigen Ergebnisse aus der zweiten Projektphase von ELISA II-B lassen optimistische Rückschlüsse auf die Zukunft des Einsatzes von O-Lkw zu. Die Integration der O-Lkw Generationen sowie die Verlängerung der Oberleitungsstrecke auf 12 km in südlicher Richtung haben die Einsatzmöglichkeiten signifikant erweitert. Die analysierten Daten belegen eine hohe Verfügbarkeit und verbesserte Zuverlässigkeit – insbesondere bei der neuen Generation von Pantographen und Lkw. Diese technischen Fortschritte, verbunden mit geringeren Wartungsanforderungen, deuten auf ein zunehmend robustes System hin. Auch die Analyse durch Siemens Mobility bestätigt die hohe Betriebssicherheit, selbst unter Sonderbedingungen. Für eine erfolgreiche großflächige Einführung bleibt jedoch die Akzeptanz durch Fahrzeughersteller entscheidend. Zwar zeigen Hersteller weiterhin eine klare Präferenz für batterie-elektrische Lkw, sehen aber im dynamischen Laden (ERS) ein sinnvolles Ergänzungskonzept. Dies eröffnet Perspektiven für eine technologieoffene Weiterentwicklung und mögliche Kombination verschiedener Antriebslösungen im Güterverkehr der Zukunft.

Die wichtigsten Erkenntnisse aus der Analyse der technischen Bewertung der O-Lkw sind:

- Im Projekt ELISA II-B konnten fundierte Erkenntnisse zur Gesamtverfügbarkeit des O-Lkw sowie zur spezifischen Leistungsfähigkeit des Pantographen gewonnen werden.
- Die durchschnittliche Verfügbarkeit der O-Lkw im Erprobungsbetrieb wurde insgesamt von Experten als hinreichend hoch bewertet.
- Die zweite O-Lkw-Generation zeigt eine höhere durchschnittliche Verfügbarkeit im Vergleich zur ersten Generation.

Ergänzt wurde die technische Bewertung der O-Lkw durch eine tiefergehende Analyse des Pantographen-Systems durch Siemens Mobility. Die Ergebnisse der Analyse der durch Siemens gesammelten und analysierten Realbetriebsdaten zeigen folgendes auf:

- Die Verfügbarkeit der Pantographen(-generationen) ist im Erprobungsbetrieb als hinreichend hoch zu bewerten.
- Die neue Pantographen-Generation (PAN 3.2) weist in Verbindung mit der neuen Lkw-Generation eine erhöhte Zuverlässigkeit auf.
- Der Pantograph weist auch in Sondersituationen hohe Verfügbarkeiten auf.
- Die Pantographenupdates haben einen positiven Effekt auf die Zuverlässigkeit des Pantographen.

Für die langfristige und großflächige Umsetzung des eHighway-Systems spielt die Akzeptanz durch die Fahrzeughersteller eine entscheidende Rolle. Zur Bewertung dieser Akzeptanz wurden Expertengespräche mit verschiedenen Vertretern von Fahrzeugherstellern geführt. Daraus lassen sich folgende zentrale Aussagen ableiten:

- Experten von Fahrzeugherstellern zeigen eine Tendenz, batterie-elektrische Lkw gegenüber anderen alternativen Antriebstechnologien zu bevorzugen.
- Experten von Fahrzeugherstellern sehen das Potenzial von dynamischem Laden (ERS) als zielführende Ergänzung zu anderen alternativen Antriebstechnologien.

4. Schrifttum und weiterführende Literatur

Eberlin, S., & Hock, B. (2014). *Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-03573-0>

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>. Zugriffen: 3. Oktober 2022

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., 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.

NOW GmbH (2023): Marktentwicklung klimafreundlicher Technologien im schweren Straßengüterverkehr [Online]. Verfügbar unter: <https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de/wp-content/uploads/2023/03/Marktentwicklung-klimafreundlicher-Techn.-im-schweren-Strassengueterverkehr-BARRIEREFREI.pdf>

5. Autorinnen und Autoren des Hinweispapiers

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

Danny Wauri, Siemens Mobility GmbH

Werner Pfiogl, Siemens Mobility GmbH

Bernhard Mayer, Siemens Mobility GmbH

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

6. Kontakt

Die Autobahn GmbH des Bundes

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

Siemens Mobility GmbH

Siemenspromenade 6
91052 Erlangen

Technische Universität Darmstadt

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

e-netz Süd Hessen AG

Forschung & Entwicklung
Dornheimer Weg 24
64293 Darmstadt