



In dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Forschungsprojekt „Elektrischer, innovativer Schwerverkehr auf Autobahnen“ (ELISA II-B) wird der Realbetrieb einer Pilotstrecke mit oberleitungsgebundener Energieversorgung und der Nutzung durch elektrisch angetriebene Nutzfahrzeuge im öffentlichen Straßenraum erprobt. ELISA zeichnet sich unter anderem durch einen ganzheitlichen, interdisziplinären Evaluationsansatz des eHighway-Systems im Zusammenwirken mit seiner Systemumwelt aus. Das notwendige Fundament hierfür bildet der Feldversuch, für den ein Teilabschnitt der Bundesautobahn BAB 5 zwischen Frankfurt am Main und Darmstadt beidseitig mit einer Oberleitung über je fünf Kilometer Länge ausgestattet wurde. Über den Untersuchungszeitraum zwischen Mai 2019 und Juni 2022 wurde das eHighway-System fahrzeug- und infrastrukturseitig getestet und eine Vielzahl relevanter verkehrs- und energietechnischer, ökologischer, ökonomischer und akteurspezifischer Aspekte, die für einen möglichen Ausbau des Systems relevant sein können, gemeinsam mit Wissenschafts- und Industriepartnern evaluiert.

Dieses Hinweispapier richtet sich an Transporteure. Relevante Kernergebnisse zur Erfüllung der Anforderungen von Transporteuren an Oberleitungs-Hybrid-Lkw (OH-Lkw) hinsichtlich Leistungsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und Verfügbarkeit werden dargestellt. Dabei werden insbesondere Hinweise zur Integrierbarkeit der OH-Lkw in Transportketten, die allgemeine technische Eignung von OH-Lkw, die Änderungen in der Tourenplanung aufgrund des Einsatzes von OH-Lkw, die durchschnittlichen Kraftstoff- und Stromverbräuche, THG-Emissionen von OH-Lkw sowie die Akzeptanz des eHighway-Systems bei Fahrern, Disponenten und dem Management von Transportunternehmen zusammengetragen.

1. Inhaltsverzeichnis

1. Inhaltsverzeichnis	1
2. Systembeschreibung eHighway	1
3. Hinweise für Transporteure	3
4. Schlussfolgerungen und Ausblick.....	9
5. Schrifttum und weiterführende Literatur	9
6. Autorinnen und Autoren des Hinweispapiers ..	9
7. Beteiligte Institutionen.....	9

2. Systembeschreibung eHighway

Der fortwährende Klimawandel erfordert zügiges Handeln. Zukunftsfähige Lösungen werden benötigt. Hiervon betroffen ist vor allem der Verkehrssektor, im Speziellen der Transportsektor. Viele Lösungsansätze werden diskutiert und derzeit erprobt. Als besonders interessant zeigt sich mehr und mehr die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs mittels Oberleitungen. Die Kombination der Effizienz der Schiene mit der Flexibilität der Straße nutzt das als „eHighway“ bezeichnete System zur kontinuierlichen Stromversorgung von Lastkraftwagen während der Fahrt geschickt aus: Sogenannte Oberleitungs-Hybrid-Lastkraftwagen (OH-Lkw) werden neben



ihrem traditionellen Verbrennungsmotor mit einer elektrischen Maschine, einer Batterie sowie einem Stromabnehmer – dem sogenannten Pantograph – ausgestattet. Straßenseitig wird eine Oberleitungsinfrastruktur errichtet. Sobald ein Streckenabschnitt mit verfügbarer Oberleitungsinfrastruktur von einem OH-Lkw erreicht wird, wird durch den Pantographen eine kraftschlüssige Verbindung zwischen OH-Lkw und Oberleitung hergestellt – das Fahrzeug bezieht nun Strom aus der Oberleitung und fährt elektrisch. Zeitgleich wird die im Fahrzeug verbaute Batterie geladen. Endet der mit dem eHighway-System ausgestattete Streckenabschnitt oder soll ein vorausfahrendes, langsames Fahrzeug überholt werden, wird der Pantograph abgesenkt. Der OH-Lkw bezieht seine Energie nun aus der aufgeladenen Batterie. Aufgrund der Feldversuchscharakteristik ermöglicht derzeit noch ein Verbrennungsmotor die Überwindung auch größerer Entfernungen – perspektivisch wird dieser mit einem fortschreitenden Netzausbau an Bedeutung verlieren und später nicht mehr notwendig sein. Eine Dekarbonisierung des aktuell noch immer durch den Verbrennungsmotor geprägten Straßengüterverkehrs rückt durch einen effizienten Ausbau des eHighway-Systems in greifbare Nähe [Lehmann et al. 2021].

Das eHighway-System wird zum gegenwärtigen Zeitpunkt in Deutschland auf drei Teststrecken untersucht. Vor allem die hessische Teststrecke („ELISA“) nimmt eine Vorreiterrolle ein: Als erste seiner Art wird hier das eHighway-System im realen Straßenverkehr umfassend evaluiert.



Bild 1: ELISA-eHighway-Teststrecke BAB 5 zwischen Frankfurt am Main und Darmstadt [IVV, 2021]

Die auf der ELISA-Teststrecke errichtete Oberleitungsinfrastruktur bezieht elektrische Energie aus zwei Gleichrichterunterwerken, welche an das Mittelspannungsnetz angeschlossen sind. Die

eigentliche Oberleitungsanlage setzt sich u.a. zusammen aus Masten, Ausleger, Tragseil und Fahrdrabt. Insgesamt sind etwa fünf Kilometer Autobahnstrecke je Fahrtrichtung zwischen der Anschlussstelle Langen/Mörfelden und der Anschlussstelle Weiterstadt mittels Fahrdrabt elektrifiziert. Hierzu wurden in einem Abstand von bis zu 57 Metern insgesamt 223 Maste parallel zum äußeren Fahrbahnrand und 6 Maste im Bereich der Tank- und Rastanlage Gräfenhausen in Mittellage errichtet [Giebel, Hahn 2021]. Eine einseitige Erweiterung der ELISA-Teststrecke in Fahrtrichtung Süden um etwa 7 Kilometer wird bis Mitte 2023 realisiert.

Zwischen Mai 2019 sind schrittweise fünf OH-Lkw der ersten Generation in den Realbetrieb bei fünf diversifizierten Transportunternehmen gestartet. Bei den OH-Lkw der ersten Generation handelt es sich um Sattelzugmaschinen der Scania Baureihe R450 A4x2NB R17N. Diese sind mit einem parallelen Hybridantrieb ausgestattet. Im Wesentlichen besteht die in den OH-Lkw verbaute Technik aus einem 450 PS starken Verbrennungsmotor, einer 130 kW starken E-Maschine, einer 18,5 kWh-Batterie und dem Pantographen.

Bezeichnung	OH-Lkw-Konfiguration
Generation	Generation 1.1 und 1.2
Fahrzeugtyp	Scania R450 A4x2NB
Fahrerkabine	R17N (nur Notliege)
Antrieb	Parallelhybrid
Leistung des Verbrennungsmotors (Diesel)	450 PS (Tankgröße: 300 dm ³)
Leistung der E-Maschine	130 kW
Batterie	18,5 kWh
Abmessung	Gesamtlänge inkl. Sattelaufleger: 16,85 m Höhe: 3,95 m Länge: 6,1 m Breite: 2,55 m
Leergewicht der Sattelzugmaschine	9,1 - 9,2 t
Zulässiges Gesamtgewicht des Sattelzugs	41,786 t (KV: 44 t)

Tabelle 1: Technische Informationen der ersten OH-Lkw-Generation [IVV, 2021]

3. Hinweise für Transporteure

3.1. Technische Eignung der OH-Lkw für Transporteure

Sattelzüge sind aufgrund des hohen Fahrleistungsanteils auf Autobahnen für das eHighway-System von besonderer Bedeutung [Bäumer et al. 2014]. Daher ist die Auslegung der ersten Generation von OH-Lkw als Sattelzugmaschine (SZM) für den Straßengüterfernverkehr zielführend. Die im Feldversuch eingesetzten OH-SZM ähneln einer hybriden SZM. Entscheidende Unterschiede zwischen OH-SZM und konventionellen SZM sind der Verbaute Pantograph und zugehörige Aufbau, das Eigengewicht der OH-SZM und die Länge des OH-Sattelzugs. Im Vergleich zu einem konventionellen Diesel-Lkw ist die SZM des OH-Lkws aufgrund der Auslegung ihres Antriebsstrangs bestehend aus einem Dieselmotor und einer E-Maschine sowie des zusätzlich installierten Pantographen und der Batterie ca. 1,8 t schwerer. Um Zuladungseinbußen aufgrund der zusätzlichen Komponenten zu vermeiden, wurde für die erste OH-Lkw-Generation eine Zulassung mit einem max. zulässigen Gesamtgewicht von 41,8 t (44 t im Kombinierten Verkehr) erwirkt. Der OH-Lkw inklusive Trailer weist insgesamt eine Länge von ca. 16,85 m auf. Somit überschreitet die Gesamtlänge des Sattelzugs die gesetzlich zugelassene Länge von 16,5 m um 0,35 m. Auch hierfür konnte eine Ausnahmegenehmigung erwirkt werden, so dass der OH-Lkw problemlos mit allen konventionellen Trailer-Typen betrieben werden kann. Aus Sicht der Transporteure wurden die OH-Lkw mit allen standardmäßigen und notwendigen Assistenzsystemen ausgestattet. Darüber hinaus verfügen die OH-Lkw über ein oberleitungsspezifisches Assistenzsystem, den sogenannten „Catenary Keep Assist“, der die Fahrer

bei der Fahrt mit dem Pantographen unter der Oberleitung zusätzlich unterstützt.

Beim Betrieb der OH-Lkw wurde beobachtet, dass diese während der Nutzung des Pantographen mit regulären Fahrgeschwindigkeiten von 80-85 km/h unter der Oberleitungsanlage betrieben werden. Es entstehen somit keine Veränderungen der Tourendauern aufgrund des Einsatzes von OH-Lkw. Aufgrund der Ausstattung des OH-Lkws 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 eines OH-Lkws vergleichbar mit der Reichweite eines konventionellen Lkws. In Abhängigkeit des zukünftig verfügbaren Oberleitungsnetzes ist zu erwarten, dass OH-Lkw sogar über größere Reichweiten verfügen werden als konventionelle Lkw, da die Oberleitung als Range-Extender dienen kann.

3.2. Betriebsmodi von OH-Lkw

Die OH-Lkw der ersten Generation können in verschiedenen sogenannten *Betriebsmodi* operieren. Unterschieden werden der Hybrid-Standardmodus, der Elektrisch-Standardmodus, der Hybrid-Oberleitungsmodus (mit und ohne Laden der Batterie), der Elektrisch-Oberleitungsmodus (mit und ohne Laden der Batterie), der Hybrid-Zwangslademodus sowie der Elektrisch-Zwangsmodus. Darüber hinaus finden Übergänge zwischen dem Wechsel zweier Betriebsmodi statt. Die Zusammensetzung der Betriebsmodi hängt von der Rekuperation, der Länge und dem Ausnutzungsgrad einer Oberleitungsinfrastruktur, der aufgenommenen elektrischen Energie während der angebugelten Fahrt sowie der Lage der elektrifizierten Strecke(n) im Fahrtverlauf, ab. Das Bild 2 zeigt das Zusammenspiel der Betriebsmodi eines OH-Lkws der ersten Generation auf.

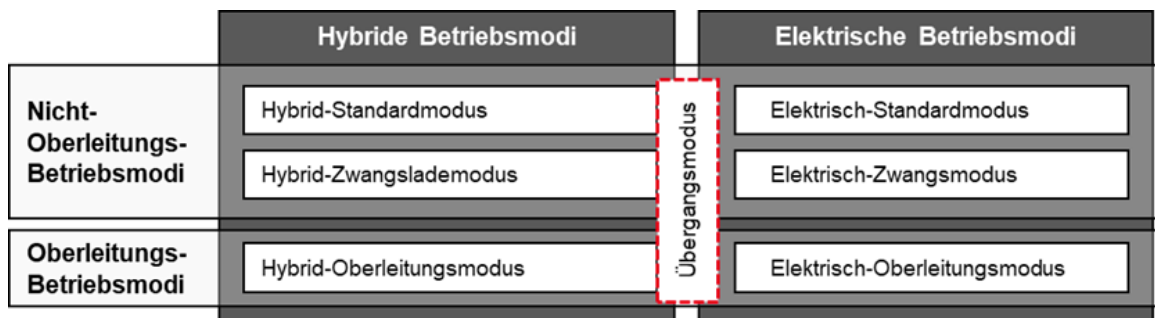


Bild 2: Betriebsmodi der ersten OH-Lkw-Generation [IVV, 2021]

Hinweis: Die Zwangsbetriebsmodi konnten aufgrund unzureichender Datenlage bislang nicht datenbasiert differenziert, sondern lediglich in Forschungsfahrten nachgewiesen werden. Fahrabschnitte, die grundsätzlich einem der beiden Zwangsbetriebsmodi zugeordnet werden würden, werden bislang den jeweiligen Standardbetriebsmodi zugeordnet.

3.3. Kraftstoff- und Stromverbrauch

Wird der Pantograph unter der Oberleitung ausgefahren und ausreichend Strom aus der Oberleitung bezogen, fährt der OH-Lkw rein elektrisch – es wird kein Dieselkraftstoff benötigt. Der Stromverbrauch beträgt bei konstant bleibender Geschwindigkeit (ca. 85 km/h) im ebenen Gelände und mittlerer Auslastung eines Fahrzeugs in etwa 1-1,3 kWh je Kilometer. In manchen Situationen, beispielsweise zur Aufrechterhaltung der Betriebstemperatur des Verbrennungsmotors, für die Bedienung von Nebenaggregaten oder zur Überwindung größerer Fahrwiderstände, schaltet sich bei den OH-Lkw der ersten Generation in ELISA der Verbrennungsmotor gelegentlich noch zu. Der Dieselverbrauch bleibt dennoch auch in diesen Situationen gering – bis zu 5 Litern auf 100 Kilometern sind möglich. Zeitgleich wird die Batterie geladen. Etwa 0,25 Kilowattstunden je Kilometer werden von den OH-Lkw der ersten Generation durch die Batterie aufgenommen.

Abseits der Oberleitungsstrecke bezieht der OH-Lkw die elektrische Energie aus der im Fahrzeug verbauten Batterie. Der OH-Lkw kann nach wie vor elektrisch fahren, es wird kein Dieselkraftstoff benötigt. Ist die Batterie entladen oder aber der Leistungsbedarf zu hoch, schaltet sich der Verbrennungsmotor hinzu und übernimmt auch wesentliche Anteile an der Traktion. Zurückzuführen ist dies zum aktuellen Zeitpunkt auf die noch recht geringe Leistungsfähigkeit der E-Maschine. Der Dieselverbrauch liegt nun – abseits des mit Oberleitung ausgestatteten Streckenabschnitts – im Durchschnitt zwischen 25 und 30 Liter je 100 Kilometer.

Die Betrachtung des Zusammenspiels aller verschiedenen Betriebsmodi über eine definierte Zeit oder definierte Streckenlänge lässt auf den Gesamtverbrauch der OH-Lkw schließen. Dieser ist, trotz der aktuellen Feldversuchscharakteristik mit vergleichsweise kurzer Oberleitungsinfrastruktur, bereits merklich geringer als der eines vergleichbaren konventionellen Diesel-Lkw. Der durchschnittliche Gesamtverbrauch von OH-Lkw hängt jedoch stark von dem Anteil der mit Oberleitungen elektrifizierten Streckenabschnitte, gemessen an einer insgesamt zurückgelegten Strecke, ab. Im aktuellen Testbetrieb beträgt dieser elektrifizierte Streckenanteil im Mittel über alle fünf Fahrzeuge nur etwa 5-10%. Die damit verbundenen Diesel-Kraftstoffeinsparungen eines OH-Lkws gegenüber einem konventionellen Lkw liegen in einer

ähnlichen Größenordnung. Ein höherer Anteil von mit Oberleitungen elektrifizierten Streckenabschnitten innerhalb der von einem OH-Lkw zurückgelegten Strecken werden sich mindestens proportional auf die damit verbundenen Diesel-Kraftstoffeinsparungen auswirken. Werden in Zukunft weitere Streckenabschnitte mit einer Oberleitungsinfrastruktur ausgestattet, können Diesel-einsparungen in Höhe von bis zu 100% erzielt werden. Hierbei wird aufgrund der im Fahrzeug verbauten Batterie keine durchgehende Elektrifizierung notwendig sein [Schöpp et al. 2021a, Schöpp et al. 2021b, Schöpp et al. 2022].

In der nachfolgenden Abbildung werden die charakteristischen Energieverbrauchskennwerte eines OH-Lkws der ersten Generation, basierend auf über 514.584 ausgewerteten Kilometern und differenziert nach Betriebsmodi, dargestellt.

3.4. THG-Emissionen

Die Auswertungen der Realbetriebsdaten der OH-Lkw bestätigen, dass die Nutzung des eHighway-Systems zu messbaren Einsparungen von Treibhausgasemissionen führt. Es wurde festgestellt, dass insbesondere die Länge der elektrifizierten Strecke sowie der Strommix die Höhe der möglichen Einsparungen an Treibhausgasen beeinflusst. Je mehr Oberleitungsinfrastruktur ein OH-Lkw im Verhältnis zu seiner Gesamtfahrstrecke nutzen kann, desto höher ist der Anteil der oberleitungsbasierten Betriebsmodi. Je höher der Anteil der oberleitungsbasierten Betriebsmodi ist, desto mehr elektrische Energie kann geladen werden, die wiederum für das vollelektrische Fahren auf einer nicht-elektrifizierten Strecke verwendet werden kann. Je mehr Abschnitte der OH-Lkw vollelektrisch fahren kann, desto weniger Treibhausgase werden emittiert. Das eHighway-System kann unter optimalen Voraussetzungen Einsparungen an Treibhausgasemissionen in Höhe von bis zu 100% ermöglichen. Aufgrund des im OH-Lkw verbauten elektrischen Energiespeichers ist es dabei nicht notwendig, über ein durchgehendes Oberleitungsnetz zu verfügen. Eine Plug-in-Ladefunktion stellt ferner eine sinnvolle Ergänzung der technischen Konfiguration des OH-Lkws dar, um auch die Fahrt vom Ausgangsort bis zum Beginn einer Oberleitungsstrecke möglichst elektrisch zurücklegen zu können. Die nachfolgende Abbildung gibt Aufschluss über die charakteristischen Treibhausgasemissionskennwerte eines OH-Lkws der ersten Generation, differenziert nach Betriebsmodi.

Charakteristische Kraftstoff- und Stromverbrauchskennwerte eines OH-Lkws*

Hybrid-Standardmodus		Hybrid-Oberleitungsmodus (mit Laden)	
Kraftstoffverbrauch	30,55 l/100 km	Kraftstoffverbrauch	3,30 l/100 km
Stromverbrauch	11,55 kWh/100 km	Stromverbrauch	102,40 kWh/100 km
Aufnahme elektrischer Energie aus externer Quelle	0,00 kWh/100 km	Aufnahme elektrischer Energie aus externer Quelle	125,77 kWh/100 km
Laderate (von extern)	0,00 kWh/100 km	Laderate (von extern)	23,38 kWh/100 km
Elektrisch-Standardmodus		Hybrid-Oberleitungsmodus (ohne Laden)	
Kraftstoffverbrauch	0,00 l/100 km	Kraftstoffverbrauch	3,30 l/100 km
Stromverbrauch	80,85 kWh/100 km	Stromverbrauch	102,40 kWh/100 km
Aufnahme elektrischer Energie aus externer Quelle	0,00 kWh/100 km	Aufnahme elektrischer Energie aus externer Quelle	102,40 kWh/100 km
Laderate (von extern)	0,00 kWh/100 km	Laderate (von extern)	0,00 kWh/100 km
Übergangsmodus		Elektrisch-Oberleitungsmodus (mit Laden)	
Kraftstoffverbrauch	0,13 l/100 km	Kraftstoffverbrauch	0,00 l/100 km
Stromverbrauch	58,39 kWh/100 km	Stromverbrauch	111,46 kWh/100 km
Aufnahme elektrischer Energie aus externer Quelle	0,00 kWh/100 km	Aufnahme elektrischer Energie aus externer Quelle	138,42 kWh/100 km
Laderate (von extern)	0,00 kWh/100 km	Laderate (von extern)	26,86 kWh/100 km
		Elektrisch-Oberleitungsmodus (ohne Laden)	
		Kraftstoffverbrauch	0,00 l/100 km
		Stromverbrauch	111,46 kWh/100 km
		Aufnahme elektrischer Energie aus externer Quelle	111,46 kWh/100 km
		Laderate (von extern)	0,00 kWh/100 km

* Die dargestellten Werte basieren auf 514.584 km im Realbetrieb und sind abhängig von der zugrunde liegenden technischen Konfiguration der OH-Lkw.

Bild 2: Charakteristische Kraftstoff- und Stromverbrauchskennwerte eines OH-Lkws [IVV, 2022]**Charakteristische Treibhausgasemissionskennwerte eines OH-Lkws**

Betriebsmodus des OH-Lkws	Dieselverbrauch	Aufnahme elektrischer Energie aus externer Quelle	Treibhausgasemissionen (Well-to-Wheel)		Treibhausgasemissionen (Tank-to-Wheel)
	[l/100 km]	[kWh/100 km]	[g CO ₂ e/km]	[g CO ₂ e/km]	[g CO ₂ e/km]
Hybrid-Standardmodus	30,55	0,00	962,30*	962,30**	757,61
Elektrisch-Standardmodus	0,00	0,00	0,00*	0,00**	0,00
Hybrid-Oberleitungsmodus (mit Laden)	3,30	125,77	103,94*	713,94**	81,83
Hybrid-Oberleitungsmodus (ohne Laden)	3,30	102,40	103,94*	600,57**	81,83
Elektrisch-Oberleitungsmodus (mit Laden)	0,00	138,32	0,00*	670,86**	0,00
Elektrisch-Oberleitungsmodus (ohne Laden)	0,00	111,46	0,00*	540,59**	0,00
Übergangsmodus	0,13	0,00	4,07*	4,07**	3,19
Konventioneller Diesel-Lkw (zum Vergleich)	31,40***	0,00	989,10*	989,10**	778,72

* berechnet mit „Dieselkraftstoff (7% Biodieselanteil)“ und „100% Ökostrom“

** berechnet mit „Dieselkraftstoff (7% Biodieselanteil)“ und Strommix „Deutschland, 2021, inkl. Vorkette“

*** Annahme

Die dargestellten Werte sind abhängig von der zugrunde liegenden technischen Konfiguration der OH-Lkw.

Bild 3: Charakteristische Treibhausgasemissionskennwerte eines OH-Lkws [IVV, 2023]

3.5. Integration der OH-Lkw in Transportprozesse

Unterschiedliche Unternehmensstrukturen und Abläufe von Transport- und Logistikprozessen können einen Einfluss auf die Integrierbarkeit von OH-Lkw bei Transportunternehmen haben. Die Ergebnisse der Analyse des Einsatzes von OH-Lkw im Realbetrieb zeigen, dass drei der fünf aktuell betriebenen OH-Lkw im Vor- oder Nachlauf einer Transportkette eingesetzt werden und zwei weitere OH-Lkw im Direktverkehr. Einer der drei im Vor- oder Nachlauf eingesetzten OH-Lkw wird darüber hinaus im Kombinierten Verkehr eingesetzt.

Auch die Struktur der Transportfahrten variiert zwischen den OH-Lkw. So wird ein OH-Lkw im Verteilerverkehr eingesetzt, und die vier weiteren OH-Lkw fungieren als Zustell- oder Abholfahrt. Zwei der OH-Lkw, welche Zustell- oder Abholfahrten durchführen, werden täglich als Shuttle zwischen zwei vordefinierten Standorten mit hoher Frequenz eingesetzt. Im Projektverlauf hat sich gezeigt, dass sich insbesondere Shuttle-Verkehre besonders eignen, da sich dadurch eine deutliche Einsparung an Kraftstoff und somit auch CO₂ ermöglichen lässt.

Die Auswertungen der Expertengespräche und schriftlichen Befragungen des Managements der Transporteure und der Fahrerinnen und Fahrer zeigen auf, dass durch den Einsatz von OH-Lkw keine Änderungen in der Transportzeit auftreten. Im zeitlichen Verlauf kam es zu ungeplanten Fahrzeugausfällen die jedoch durch Ersatzfahrzeuge ausgeglichen werden konnten. Insgesamt gibt die Mehrheit an, dass keine Veränderungen in der Termintreue festgestellt wurden.

Mit den OH-Lkw werden derzeit unterschiedlichste Güter transportiert. Zu diesen Gütern gehören Dispersionsfarbe, temperaturempfindliche Güter wie Lebensmittel, Dünnschlamm und Profile für den Trockenbau. Herausfordernd gestaltet sich derzeit noch der Transport von Schüttgütern, die mit einem Kipper befördert werden müssen, sowie von Gefahrgütern, für die die Sattelzugmaschine derzeit aufgrund des Prototypenstatus nur eingeschränkt zugelassen ist.

Die erste Generation von OH-Lkw sieht keine Plug-In-Funktion vor, daher bedarf es keiner zusätzlichen Einrichtungen für den OH-Lkw an Umschlagpunkten oder auf dem Betriebshof der Transporteure.

Zukünftige Oberleitungs-Lkw können mit einer Plug-In Funktion ausgestattet werden, um zusätzliche elektrische Energie während längerer Standzeiten, z.B. beim Be- und Entladen, aufnehmen zu können.

Eine zusätzliche stationäre Ladeinfrastruktur kann somit weitere Vorteile hinsichtlich Emissions-einsparungen zukünftiger Oberleitungs-Lkw bieten.

3.6. Tourenplanung von OH-Lkw

Der Einsatz von OH-Lkw führt zu einem Umdenken in der Tourenplanung. Für einen optimierten Einsatz von OH-Lkw muss bei der Tourenplanung sowohl die räumliche als auch die zeitliche Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage berücksichtigt werden. Der Einsatz der ersten Generation von hybriden Oberleitungs-Lkw mit einem zusätzlichen Verbrennungsmotor bietet den Transporteuren derzeit ausreichend Flexibilität. Mit einem kontinuierlichen Ausbau von Oberleitungsinfrastruktur kann die Flexibilität im Fahrzeugeinsatz aufrechterhalten werden und der Verbrennungsmotor wird obsolet.

Zur Arbeitserleichterung für Disponenten und zur Vermeidung von Umwegkilometern ist zukünftig die Integration der verfügbaren Oberleitungsinfrastruktur sowie die technischen Eigenschaften der Oberleitungs-Lkw in die Tourenplanungssoftware der Transporteure hilfreich. Dargestellt werden könnten beispielsweise Fahrzeugreichweiten, Batterie-füllstand, verfügbare sowie geschulte Fahrerinnen und Fahrer. Darüber hinaus sollten die Disposition und die Fahrerinnen und Fahrer mittels eines Informationssystems über Abschaltungen der Oberleitungsanlagen informiert werden.

3.7. Anschaffungskosten für OH-Lkw

Die derzeit im Feldversuch eingesetzte Oberleitungs-Lkw sind Prototypen zur erstmaligen Erprobung der eHighway-Technologie im Realbetrieb. Den Transporteuren werden die Fahrzeuge derzeit über einen Full-Service-Leasingvertrag zur Verfügung gestellt. Eine Einschätzung seitens der Fahrzeughersteller zu den zukünftigen Anschaffungskosten von OH-Lkw ist bisher nicht bekannt.

Die Rückmeldungen der am Projekt beteiligten Transporteure zeigen auf, dass ein Kauf eines OH-Lkw mit der bestehenden Oberleitungsinfrastruktur noch nicht in Frage kommt. Mit dem Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur wären die Unternehmen langfristig bereit, für einen Preis bis 150.000 € einen OH-Lkw anzuschaffen. Positiv beeinflusst würde ihre Entscheidung durch Kaufprämien, anhaltende Mautbefreiung oder -reduktion, eine ermäßigte Kraftfahrzeugsteuer sowie die zusätzliche Förderung von ergänzender stationärer Ladeinfrastruktur.

Für die Einführungsphase des eHighway-Systems wäre die Bereitstellung von OH-Lkw nach einem „Baukasten-System“ möglich, welches Transporteuren ermöglicht individuelle Oberleitungs-Lkw zusammenzustellen. Variabel wären in diesem Fall der Fahrzeugtyp (SZM vs. Lastzug), die Batteriegröße sowie der Einbau eines zusätzlichen Verbrennungsmotors zur Erweiterung der Reichweite.

3.8. Betriebskosten für OH-Lkw

Die Betriebskosten für einen OH-Lkw werden in fixe und variable Betriebskosten unterteilt.

Fixe Betriebskosten

Die fixen Betriebskosten für OH-Lkw sind vergleichbar mit den Kosten für konventionellen Lkw. Zusätzliche fixe Kosten entstehen derzeit lediglich für die Entsendung von Fahrerinnen und Fahrer zu einer eintägigen Fahrerschulung. Zukünftig könnten sich Veränderungen hinsichtlich der Versicherungskosten und der Kraftfahrzeugsteuer ergeben.

Variable Betriebskosten

Die variablen Betriebskosten eines OH-Lkw werden maßgeblich geprägt durch den Strom- und Dieselverbrauch (inkl. AdBlue) und die Mautkosten. Aufgrund der derzeit geringen Batteriegröße und Länge der Oberleitungsinfrastruktur sind die Einsparung für Dieselposten noch gering. Den Transporteuren entstehen hingegen keine zusätzlichen Stromkosten, da diese über das Projekt finanziert werden. Darüber hinaus sind die OH-Lkw bislang mautbefreit und somit entstehen keine Mautkosten für den Einsatz. Nach Einschätzung der am Projekt beteiligten Transporteure sind die Kosten für den Einsatz der OH-Lkw vergleichbar mit den Kosten für den Einsatz eines Diesel-Lkw, vereinzelt geben die Transporteure in der schriftlichen Befragung an, dass die Betriebskosten ca. 5% geringer liegen als für einen Diesel-Lkw.

3.9. Akzeptanz auf Seiten der Lkw-Fahrerinnen und Fahrer

Aktuell bedarf es zur Bedienung eines OH-Lkws einer separaten, eintägigen Fahrerschulung. Die Fahrerschulungen gliedern sich in einen theoretischen, mit Hintergrundinformationen zur Fahrzeugtechnik und Oberleitungsinfrastruktur und einen praktischen Teil, mit individueller begleiteter Fahrpraxis auf der Teststrecke. Die theoretische Fahrerschulung wird gemeinsam von dem Pantographen-Herstellenden (Siemens), dem Fahrzeugherstellenden (Scania) und dem

Oberleitungsanlagenbetreibenden (Autobahn GmbH) durchgeführt.

Aufgrund des Aufbaus des Antriebsstrangs als auch des Einsatzes des Pantographen unter der Oberleitung unterscheidet sich die Bedienung eines OH-Lkws von einem konventionellen Lkw, hat jedoch große Ähnlichkeiten mit der Bedienung eines Hybrid-Lkws. Die wichtigsten Modi und deren Bedienung für den Oberleitungsbetrieb stellen der Hybrid- und der Elektrische-Oberleitungsmodus dar. Für deren Einstellung und als Information zum Fahrzeugzustand stehen den Fahrerinnen und Fahrern sowohl verschiedene Schalter, verschiedene Kontrollleuchten in der Instrumententafel sowie unterstützende Assistenzsysteme zur Verfügung.

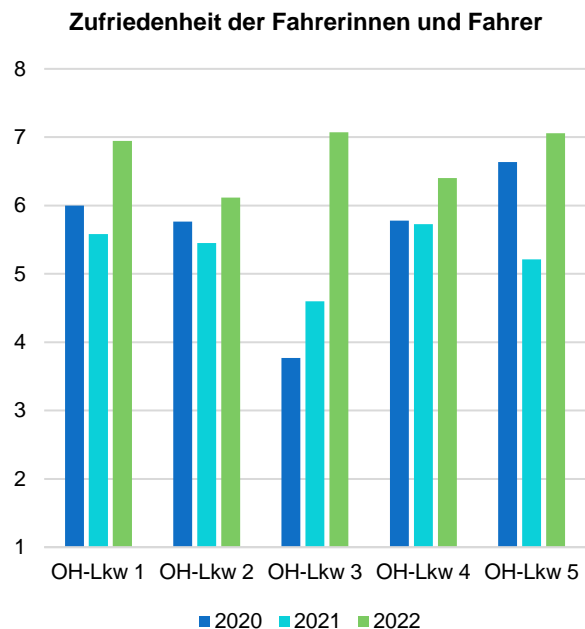


Bild 3: Bewertung der Zufriedenheit mit den OH-Lkw durch Fahrerinnen und Fahrer (Skala: 1 (sehr unzufrieden) – 8 (sehr zufrieden)) [IVV, 2023]

Die Erkenntnisse aus dem Einsatz der OH-Lkw im Realbetrieb zeigen, dass die aktuellen OH-Lkw-Fahrerinnen und -Fahrer insgesamt zufrieden mit dem OH-Lkw sind (Bild 3). Außerdem empfinden die Fahrerinnen und Fahrer die Fahrt mit dem OH-Lkw als sehr abwechslungsreich. Die Auswertungen zeigen, dass für die Fahrt mit den OH-Lkw im Vergleich zu einem konventionellen Lkw ein höheres Maß an Aufmerksamkeit notwendig ist. Mit zunehmender Fahrpraxis mit Pantographen unter der Oberleitungsanlage nehmen die Fahrerinnen und Fahrer die Bedienung jedoch als weniger anstrengend wahr. Weiterhin fühlen sich die Fahrerinnen und Fahrer sicher bei der Fahrt mit angehängtem Pantographen und empfinden die

Unterstützung durch den „Catenary Keep Assist“ und die Pantographenkamera als hilfreich. Aus den Erhebungen geht hervor, dass alle Fahrerinnen und Fahrer den OH-Lkw gerne fahren und sich für die Technik interessieren. Darüber hinaus kann sich die Mehrheit der Fahrerinnen und Fahrer vorstellen, den OH-Lkw auch auf längeren Autobahnstrecken mit Pantographen zu fahren, und sind an dem langfristigen Einsatz des OH-Lkws interessiert.

3.10. Akzeptanz auf Seiten der Disposition

Die Disposition von OH-Lkw stellt ein Novum für Transportplanerinnen und -planer dar. Durch Veränderungen in der Flexibilität des Fahrzeugeinsatzes und der Berücksichtigung der Oberleitungsanlage in der Tourenplanung werden Transportplanerinnen und -planer vor neue Herausforderungen gestellt. Daher zeigt sich zum aktuellen Zeitpunkt ein geteiltes Bild hinsichtlich der Zufriedenheit mit dem Einsatz von OH-Lkw. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass mit der aktiven Einbindung der Transportplanerinnen und -planer in die Fuhrparkgestaltung, der Erhöhung der Zuverlässigkeit der OH-Lkw sowie der Bereitstellung von erweiterten Tourenplanungssystemen die Zufriedenheit erhöht werden kann. Diese Annahme wird bestärkt durch die Erkenntnis, dass die Mehrheit der Transportplanerinnen und -planer angeben, den OH-Lkw gerne zu disponieren und sich für die Technik des OH-Lkw interessieren.

3.11. Akzeptanz auf Seiten der Transporteure (Management)

Die Akzeptanz auf Seiten des Managements der Transporteure wird von allen zuvor genannten Faktoren, wie der technischen Eignung und der Wirtschaftlichkeit von OH-Lkw, der Einsparungspotentiale von Kraftstoff und Emissionen sowie der Akzeptanz auf Seiten der Disposition und der Fahrerinnen und Fahrer beeinflusst.

Insgesamt zeigt die Auswertung des über den Testbetrieb kontinuierlich erhobenen Zufriedenheitswerts eine mittlere bis hohe Zufriedenheit des Managements. Unterschiede zwischen den Bewertungen der Beteiligten werden festgestellt; diese können auf die Einsatzart und die unterschiedlich hohe Verfügbarkeit der OH-Lkw zurückgeführt werden.

Eine wichtige Rolle für den Einsatz der OH-Lkw-Prototypen spielt der technische Support seitens des Fahrzeugherstellenden für das Management. Im Projektverlauf hat sich gezeigt, dass eine Steigerung der Akzeptanz mit der Einbindung der Transporteure

in die Weiterentwicklung und Behebung von Störfällen erzielt wird.

Weiterhin gibt das Management der Transporteure an, dass ihre Erwartungen an den OH-Lkw grundsätzlich erfüllt wurden. Ihre Einstellung gegenüber dieser Technologie wird durch das geteilte Meinungsbild in der Gesamtgesellschaft hinsichtlich des Nutzenbeitrags zur Erreichung der Klimaschutzziele durch das eHighway-System nicht negativ beeinflusst.

Die Befragten geben an, dass sie durch den derzeitigen Einsatz des OH-Lkw keine Neukunden gewinnen konnten. Ein Teil der Befragten geht jedoch davon aus, durch den langfristigen Einsatz von OH-Lkw Neukunden zu gewinnen. In diesem Zusammenhang spielen sicherlich die Wahrnehmung des eHighway-Systems in der Öffentlichkeit und unter Transporteuren, die Verfügbarkeit der OH-Lkw sowie der Ausbauzustand eine entscheidende Rolle.

Zum aktuellen Zeitpunkt kommt für die Transporteure die Anschaffung eines eigenfinanzierten OH-Lkw nicht in Betracht. Begründet wird dies mit der begrenzten Einsatzmöglichkeit des OH-Lkw. Mit dem Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur und der Erhöhung der elektrischen Reichweite der OH-Lkw zeigt sich eine positive Einstellung der Transporteure hinsichtlich der Anschaffung einer OH-Lkw-Flotte.

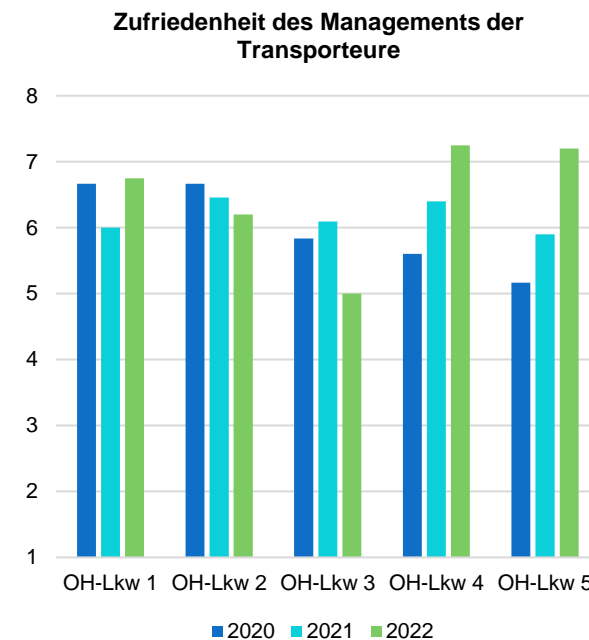


Bild 4: Bewertung der Zufriedenheit mit den OH-Lkw durch das Management (Skala: 1 (sehr unzufrieden – 8 (sehr zufrieden)) [IVV, 2023]

4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Über einen Zeitraum von Mai 2019 bis Juni 2022 konnten im Pilotversuch ELISA umfangreiche Erkenntnisse zum Realbetrieb von OH-Lkw bei Transporteuren gewonnen werden. Wichtige Erkenntnisse, wie die Machbarkeit der technischen Eignung der OH-Lkw für Transporteure, die Integrierbarkeit von OH-Lkw in bestehende Logistik- bzw. Transportprozesse sowie wichtige Kennwerte zu Kraftstoff- und Stromverbräuchen sowie Treibhausgaseinsparungen basierend auf Realbetriebsdaten der OH-Lkw konnten erzielt werden. Durch die kontinuierliche wissenschaftliche Begleitung konnte die Akzeptanz des OH-Lkws auf Seiten der Fahrerinnen und Fahrer, der Disposition sowie des Managements der Transporteure erfasst und bewertet werden.

Trotz dieser umfangreichen Evaluation bedarf es der weiteren Erforschung aus Sicht der Transporteure, da mit der kontinuierlichen Auslieferung weitere Oberleitungs-Lkw seit Juli 2022 auch neue, verbesserte technische Eigenschaften verbunden sind. Es ist davon auszugehen, dass mit der neuen Fahrzeugkonfiguration größere elektrische Reichweiten und deutlich höhere THG-Emissionseinsparungen gemessen werden können. Darüber hinaus wird sich auch der Ausbau der Oberleitungsanlage auf insgesamt 17 km auf die Einsparungspotentiale, die Tourenplanung oder die Notwendigkeit des Ausbaus von automatisierten Informationssystemen für Fahrerinnen und Fahrer sowie die Disponenten auswirken.

5. Schrifttum und weiterführende Literatur

Giebel, S.; Hahn, G. (2021): B.4 Technische Gestaltung. In: Elektrifizierung von Autobahnen für den Schwerverkehr. Umsetzung des Systems eHighway. M. Boltze, M. Lehmann, G. Riegelhuth, H. Sommer, D. Wauri (Hrsg.), Kirschbaum Verlag, Bonn (2021), 150-153.

Lehmann, M.; Wauri, D.; Sommer, H.; Boltze, M. (2021): A.1 Systemdefinition und Systemüberblick zum eHighway. In: Elektrifizierung von Autobahnen für den Schwerverkehr. Umsetzung des Systems eHighway. M. Boltze, M. Lehmann, G. Riegelhuth, H. Sommer, D. Wauri (Hrsg.), Kirschbaum Verlag, Bonn (2021), 150-153.

Schöpp, F.; Öztürk, Ö.; Linke, R.; Wilke, J.; Boltze, M. (2021b): Electrification of Road Freight Transport – Energy Consumption Analysis of Overhead Line Hybrid Trucks. Transportation Research Board 100th Annual Meeting, Washington, D.C., USA.

Schöpp, F.; Öztürk, Ö.; Linke, R.; Wilke, J.; Boltze, M. (2021b): Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs. Kraftstoff- und Stromverbrauchsanalyse von Oberleitungs-Hybrid-Lastkraftwagen. In: Internationales Verkehrswesen, Ausgabe 3 | 2021.

Schöpp, F.; Öztürk, Ö.; Linke, R.; Boltze, M. (2022): Electrification of Road Freight Transport – Energy Flow Analysis of Overhead Line Hybrid Trucks. Transportation Research Board 101st Annual Meeting, Washington, D.C., USA.

Bäumer, M., Hautzinger, H. Pfeiffer, M., Stock, W., Lenz, B. Kuhnimhof, T., Köhler, K. (2014): Fahrleistungserhebung 2014 – Inländerfahrleistung, Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), Verkehrstechnik Heft V 290.

6. Autorinnen und Autoren des Hinweispapiers

Regina Linke, Technische Universität Darmstadt, Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik
Ferdinand Schöpp, Technische Universität Darmstadt, Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik
Özgür Öztürk, Technische Universität Darmstadt, Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik
Eva Kaßens-Noor, Technische Universität Darmstadt, Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik
Danny Wauri, Siemens Mobility GmbH

7. Beteiligte Institutionen

Die Autobahn GmbH des Bundes
 Geschäftsbereich Verkehrsmanagement,
 Verkehr und Betrieb
 Abteilung Verkehrsmanagement –
 Verkehrszentrale Deutschland
 Bessie-Colemann-Straße 7
 60549 Frankfurt am Main

Siemens Mobility GmbH
 Siemenspromenade 6
 91052 Erlangen

Technische Universität Darmstadt
 Institut für Verkehrsplanung und
 Verkehrstechnik
 Otto-Berndt-Straße 2
 64287 Darmstadt

e-netz Süd Hessen AG
 Forschung & Entwicklung
 Frankfurter Straße 110
 64293 Darmstadt