Baden-Württemberg elektrisiert

eWayBW



eWayBW II Working Paper 01/2025

Hardwarenahe Technologieerprobung durch erweiterte Tests am Rollenprüfstand

Autorinnen und Autoren:
Tobias Burgert (Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT)
Simon Dillmann (Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT)
Jan Bökelmann (Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT)

eWayBW II Working Paper 01/2025

Hardwarenahe Technologieerprobung durch erweiterte Tests am Rollenprüfstand

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Vorhabenträger:

Baden-Württemberg
MINISTERIUM FÜR VERKEHR

Herausgeber

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe

Projektpartner

Regierungspräsidium Karlsruhe
Südwestdeutsche Verkehrs-Aktiengesellschaft (SWEG)
Landkreis Rastatt

Konsortium Forschung eWayBW:
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)
PTV Transport Consult GmbH (PTV)
Forschungszentrum Informatik (FZI)
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT)

Assoziierte Partner

Spedition Fahrner GmbH
Huettemann Logistics GmbH
Casimir Kast Verpackung und Display GmbH
Mayr-Melnhof Gernsbach GmbH
Smurfit Kappa Baden Karton GmbH
Netze BW GmbH
Bundesanstalt für Straßenwesen
e-mobil BW GmbH
Verband Spedition und Logistik Baden-Württemberg

Ansprechpartner Projektgesamtleitung

Marcel Zembrot
Mobilitätszentrale BW
Verkehrsministerium Baden-Württemberg
E-Mail: marcel.zembrot@vm.bwl.de

Wissenschaftliche Begleitforschung

Prof. Dr. Martin Wietschel
Leitung Competence Center Energietechnologien und Energiesysteme

Dr. Aline Scherrer

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe
Telefon: +49 721 6809-254
E-Mail: martin.wietschel@isi.fraunhofer.de

Projekt-Webseite

https://ewaybw.de/

Bildnachweis

Deckblatt: Renata Sas

Zitierempfehlung

Burgert, T.; Bökelmann, J.; Dillmann, S.; (2025): Hardwarenahe Technologieerprobung durch erweiterte Tests am Rollenprüfstand. eWayBW II Working Paper 01/2025. Karlsruhe: Fraunhofer ISI (Hrsg.).

Veröffentlicht

03/2025

Hinweise

Dieser Bericht einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Die Informationen wurden nach bestem Wissen und Gewissen unter Beachtung der Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis zusammengestellt. Die Autorinnen und Autoren gehen davon aus, dass die Angaben in diesem Bericht korrekt, vollständig und aktuell sind, übernehmen jedoch für etwaige Fehler, ausdrücklich oder implizit, keine Gewähr. Die Darstellungen in diesem Dokument spiegeln nicht notwendigerweise die Meinung des Auftraggebers wider.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung 7

1 Einleitung 8

2 Aufbau der Oberleitungs-Ladeinfrastruktur am Rollenprüfstand 9
2.1 Beschreibung Rollenprüfstand 9
2.2 Aufbau Lademöglichkeit 9
2.3 Vergleich der Ladeinfrastruktur zwischen Prüfstand und realem Aufbau 12

3 Vorbereitung der Versuche 13
3.1 Hintergrund: Welche LKW werden getestet? 13
3.2 Ermittlung der Fahrwiderstandsbeiwerte 13
3.3 Diesel-LKW: Validierung des Übertrags zwischen Straße und Prüfstand 15
3.4 O-PHEV: Validierung der Oberleitungsanbindung 16

4 Ergebnisse 18
4.1 Ergebnisse: Diesel-LKW vs. O-PHEV 18
4.1.1 eWayBW: Shuttle-Fahrt von Logistikzentrum zu Papierfabrik 19
4.2 Ergebnisse: Rein elektrische Fahrt entlang der Pilotstrecke 21
4.3 Ergebnisse: Rein elektrische Fahrt auf weiteren Strecken 23

5 Zusammenfassung und Ausblick 26

6 Danksagung 28

Abbildungsverzeichnis 29

Tabellenverzeichnis 30

Kurzfassung

Auch wenn das novellierte Klimaschutzgesetz keine sektorspezifischen Emissionsreduktionsziele mehr enthält, ist es das erklärte Ziel der Bundesregierung, dass bis zum Jahr 2030 ungefähr ein Drittel der Fahrleistungen im schweren Straßengüterverkehr elektrisch oder durch strombasierte Kraftstoffe zurückgelegt werden. In diesem Zusammenhang werden in Deutschland unterschiedliche Antriebsoptionen diskutiert.

Die Erprobung von neuen Technologien im realen Umfeld ist dabei evident, um die Systeme auf ihre Serienreife zu überprüfen. Gerade beim eHighway-System sind diese Versuche mit einem hohen initialen Aufwand verbunden, um die notwendige Oberleitungsinfrastruktur aufzubauen. Ein einfacher Transfer der aufgebauten Strecke in ein neues Umfeld ist nicht ohne weiteres möglich. Das Ausschöpfen der Potenziale und der Beitrag des eHighway-Systems zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs bleibt in der Erprobung stets abhängig von der aufgebauten Infrastruktur. Für die Oberleitungstechnologie ist dies aktuell beschränkt auf drei Pilotstrecken in Deutschland, eine davon ist eWayBW in Baden-Württemberg. Mit dem Ziel, die aktuell verfügbare Generation der Oberleitungs-LKW auch in weiteren Umfeldsituationen erproben zu können, wurden im Rahmen von eWayBW daher erweiterte Tests auf einem Rollenprüfstand durchgeführt.

Zunächst muss dafür eine Oberleitungsinfrastruktur am Prüfstand geschaffen werden, die das technische Potenzial der heute verfügbaren LKW vollständig ausschöpfen kann. Dafür wird der Rollenprüfstand des Karlsruher Institut für Technologie – KIT mit einer elektrischen Ladeinfrastruktur ausgestattet, so dass der LKW über den Pantograph geladen werden kann. Als Referenz zur Bewertung der Emissionseinsparpotenziale werden zunächst Versuche mit dem Diesel-LKW durchgeführt, der aktuell auf der Strecke eingesetzt wird. Anschließend werden dieselben Versuche mit dem Oberleitungs-LKW durchgeführt. Dabei wird, entsprechend der realen Strecke, 15 % der Shuttle-Strecke mit Oberleitung ausgestattet. So können auf der Strecke ca. 20-30 % an lokalen THG-Emissionen eingespart werden. Im Folgenden wird die Oberleitungsstrecke sukzessive bis auf 50 % der Shuttle-Strecke erweitert. In diesem Zustand könnte rein elektrisch gefahren werden und dabei über die Oberleitung der Energiebedarf vollständig gedeckt werden. Somit wäre ein ladezustandsneutraler Umlauf möglich, ohne dabei auf eine zusätzliche stationäre Lademöglichkeit angewiesen zu sein.

Ferner wird gezeigt, dass die heutigen LKW auch auf längeren, bis zu 50 km langen Oberleitungsabschnitten ohne weitere Leistungseinbußen funktionieren. So kann am Prüfstand durch dynamisches Laden eine Fahrt von circa 160km Länge vollelektrisch und ladezustandstneutral zurückgelegt werden, bei der der Energiebedarf für die Strecke das 2-fache der verfügbaren Netto-Batteriekapazität des LKW beträgt.

Die Rollenprüfstandsversuche zeigen, dass die heute verfügbaren Oberleitungs-LKW in Verbindung mit der verfügbaren Oberleitungsinfrastruktur auch auf langen Strecken rein elektrisch fahren können, stets vor dem Hintergrund, dass dafür die Ladeinfrastruktur verfügbar sein muss. Ist dies nicht der Fall, bleibt das stationäre Laden.

1 Einleitung

Zur Reduktion der Treibhausgasemissionen ist eine Veränderung des Straßengüterverkehrs notwendig. Dabei spielen, neben der Vermeidung sowie der Verlagerung von Verkehr auf andere Verkehrsträger, beispielsweise die Schiene, alternative Antriebe für Nutzfahrzeuge eine entscheidende Rolle. Das Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur BMVI 2020) des Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur definierte daher 2020 Pfade zur Erprobung und Markteinführung batterieelektrischer LKW (BEV) im Regional- und Fernverkehr, Brennstoffzellen-LKW (FCEV) sowie Oberleitungs-LKW (HO).

HO-LKW, die zu den elektrischen Straßensystemen (ERS) zählen, nutzen eine Oberleitungsanlage als externe Energiequelle. Sie sind mit einem Pantograph ausgestattet, der während der Fahrt an eine Oberleitung angekoppelt wird und dem LKW elektrische Energie zur Verfügung stellen kann. Daneben verfügen HO-LKW über einen zweiten Antriebsstrang samt Energiespeicher, um auch auf Strecken ohne Oberleitungsanlage einsatzfähig zu sein. Dieser zweite Antriebsstrang kann entweder elektrisch sein (mit größerer Traktionsbatterie, O-PHEV) oder ein Verbrennungsmotor. In Zukunft sind auch Kombinationen mit einer Brennstoffzelle denkbar (Boltze et al. 2021). HO-LKW werden aktuell auf drei Teststrecken in Deutschland erprobt. Eine davon ist das Pilotprojekt eWayBW in Baden-Württemberg. Die Pilotstrecke verläuft zwischen den Städten Kuppenheim und Gernsbach-Obertsrot im Murgtal auf der B 462 und hat eine Gesamtlänge von rund 18 km, von denen 3,35 km in jeder Fahrtrichtung elektrifiziert sind. Auf der Pilotstrecke werden Papier und Karton im 24-Stunden-Betrieb an sieben Tagen pro Woche von Papierherstellern in Obertsrot zu Logistikzentren in Kuppenheim verbracht. Fünf LKW mit Oberleitungstechnologie werden auf der Strecke eingesetzt.

Die Erprobung von neuen Technologien im realen Umfeld ist evident, um die Systeme auf ihre Serienreife zu ertüchtigen. Gerade beim eHighway-System sind diese Versuche mit einem hohen initialen Aufwand verbunden, um die notwendige Oberleitungsinfrastruktur aufzubauen. Ein einfacher Aufbau der Oberleitungsinfrastruktur auf einer neuen Strecke ist nicht ohne weiteres möglich. Das Ausschöpfen der Potenziale und der Beitrag des eHighway-Systems zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs bleibt in der Erprobung stets abhängig von der aufgebauten Infrastruktur. Mit dem Ziel, die aktuell verfügbare Generation der Oberleitungs-LKW auch in weiteren Umfeldsituationen erproben zu können, wurden im Projektverlauf Versuche auf einem Rollenprüfstand durchgeführt.

Im Verlauf dieses Working Papers sollen folgende Fragestellungen beantwortet werden:

- Wie ist das Emissionsreduktionspotenzial im Vergleich zu konventionellen LKW?
- Wie müssen Oberleitungsabschnitte aufgebaut sein, damit diese das Potenzial der e-Highway Technologie zur Dekarbonisierung des straßengebundenen Güterverkehrs-maximieren?
- Können auch neue bzw. längere Strecken rein elektrisch zurückgelegt werden und so zur Entlastung der Park- und Lastkapazitäten beim stationären Laden beitragen?

2 Aufbau der Oberleitungs-Ladeinfrastruktur am Rollenprüfstand

Die Rollenprüfstandsversuche wurden auf dem Allrad-Akustik-Rollen-Prüfstand des KIT durchgeführt. Bisher gab es noch keine vergleichenden Prüfungen, bei der ein Oberleitungs-LKW während des Versuchs über den Pantograph elektrisch angebunden und damit geladen werden konnte. Dieser Abschnitt beschreibt den gesonderten Aufbau der dynamischen Ladeeinrichtung am Prüfstand.

2.1 Beschreibung Rollenprüfstand

Das Institut für Fahrzeugsystemtechnologien (FAST) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) betreibt einen Allrad-Akustik-Rollenprüfstand (AARP), der speziell für die Untersuchung schwerer Nutzfahrzeuge wie Lkw und mobile Arbeitsmaschinen konzipiert wurde. Der Prüfstand zeichnet sich durch seine hohe Flexibilität aus und ermöglicht individuell angepasste Versuche.

Beispiele hierfür sind die Untersuchung des Verhaltens des Antriebsstrangs hinsichtlich Leistung, Funktion und NVH (Noise, Vibration, Harshness), Studien zur Akustik des gesamten Fahrzeugs, sowie die Bewertung von Kühlung, Temperaturen, Effizienz und Kraftstoffverbrauch.

Technisch ist der Prüfstand mit vier angetriebenen Rollen ausgestattet, die jeweils von einem wassergekühlten Synchronmotor mit einer Nennleistung von 300 kW angetrieben werden. Die Antriebe sind für den Motor- und Generatorbetrieb in beiden Drehrichtungen ausgelegt. Im Dauerbetrieb können Fahr- und Bremskräfte von 70 kN pro Rad und Fahrzeuggeschwindigkeiten von bis zu 160 km/h abgebildet werden. Im Intervallbetrieb sind Kräfte von bis zu 110 kN pro Rad möglich. Die Steuerung des Prüfstands ermöglicht die Auswahl verschiedener Betriebsmodi wie Geschwindigkeitsregelung, Zugkraftregelung und Straßensimulation mit Fahrwiderständen aus Ausrollversuchen.

Ergänzt wird der Rollenprüfstand durch verschiedene Schnittstellen und weitere Peripherie: Ein Belüftungssystem ermöglicht die Raumklimatisierung, Frischluftzufuhr und die Simulation eines Fahrtwindes von bis zu 120 km/h. Je nach Bedarf kann der gesamte Raum beheizt oder gekühlt werden. Mit Hilfe von Hydraulikzylindern und Spannbändern können zusätzliche Achslasten von bis zu 10 t pro Achse simuliert werden. Zudem besteht die Möglichkeit, unterschiedlichste Systeme über Daten- und Leistungsschnittstellen an den Prüfstand anzubinden.

2.2 Aufbau Lademöglichkeit

Analog zur realen Strecke musste der LKW auch auf dem Allrad-Akustik-Rollen-Prüfstand mit Gleichstrom bei einem Spannungsniveau von ca. 670 V (DC) versorgt werden können. Dazu wurde, neben einem ausreichend dimensionierten Anschluss an das Niederspannungsnetz, auch ein geeigneter AC/DC-Wandler als Gleichstromquelle benötigt. Dieser musste in der Lage sein, im relevanten Spannungsbereich eine Dauerleistung von 150 kW (kurzzeitig 200 kW) zur Verfügung zu stellen.

Für die durchgeführten Tests wurde auf einen AFE-Schrank (Active Front End) des Herstellers SciMo zurückgegriffen, der neben der Erfüllung der Leistungsanforderungen auch über die erforderlichen Kommunikationsschnittstellen zur Interaktion mit Prüfstand und Fahrzeug verfügt. Die Spezifikationen der Gleichstromquelle sind Tabelle 1 zu entnehmen.

DC-Ausgangsspannung	60…800 V
Nenn-Einspeiseleistung	150 kW (kurzzeitig 180 kW)
AC-Anschluss	400 V AC, 3-phasig / 250 A
Kühlungsart	Wasserkühlung
Schnittstellen	Ethernet / CAN 2.0
Sonstige Eigenschaften	Potentialtrennung zum Netz, Isolationsüberwachung

Tabelle 1: Spezifikationen DC-Quelle (AFE-Schrank)

Der AFE-Schrank ist wassergekühlt ausgeführt und die Rückkühlung erfolgte über den im Prüfstand bereits vorhandenen Kaltwasserkreis mit einem zwischengeschalteten Temperiergerät vom Typ Regloplas P140M, um Kondenswasser im AFE-Schrank zu vermeiden. Zum Schutz der Leistungselektronik in LKW und AFE-Schrank vor Spannungsspitzen, die bei schnellen Lastwechseln auftreten können, wurde zusätzlich ein Bremschopper integriert, der die Spannung im DC-Kreis zuverlässig auf maximal 850 VDC begrenzte. Der Anschluss des AFE-Schranks an das Niederspannungsnetz erfolgte über einen eigenen Unterverteiler in der Prüfzelle (400 VAC / 250 A).

Zentral über dem Fahrerhaus des LKW wurde ein Gerüst aus Aluminium-Traversen mit den Abmessungen 6 x 5,5 x 3 m (BxHxT) aufgebaut (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Daran wurden als Oberleitungsattrappe zwei elektrisch von den übrigen Traversen isolierte, parallele Konstruktionsprofile befestigt, um dem Pantograph als mechanischen Anschlag zu dienen. Die beiden DC-Leitungen zwischen AFE-Schrank und LKW wurden am Gerüst entlang, zentral über das Fahrzeug geführt und direkt am Pantograph angeschlossen.

Abbildung 1: Gestell zur Montage der Oberleitungsatrappe

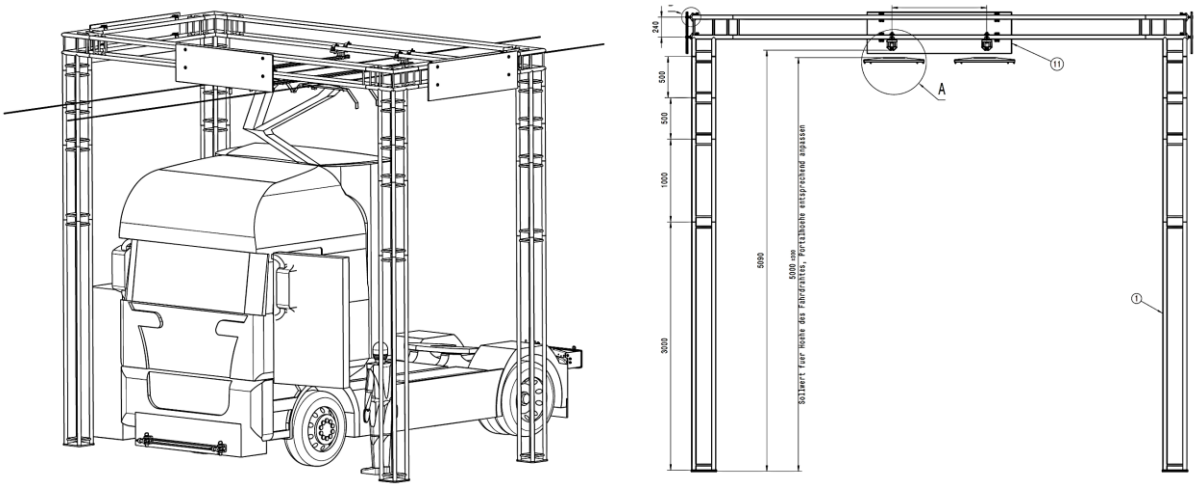
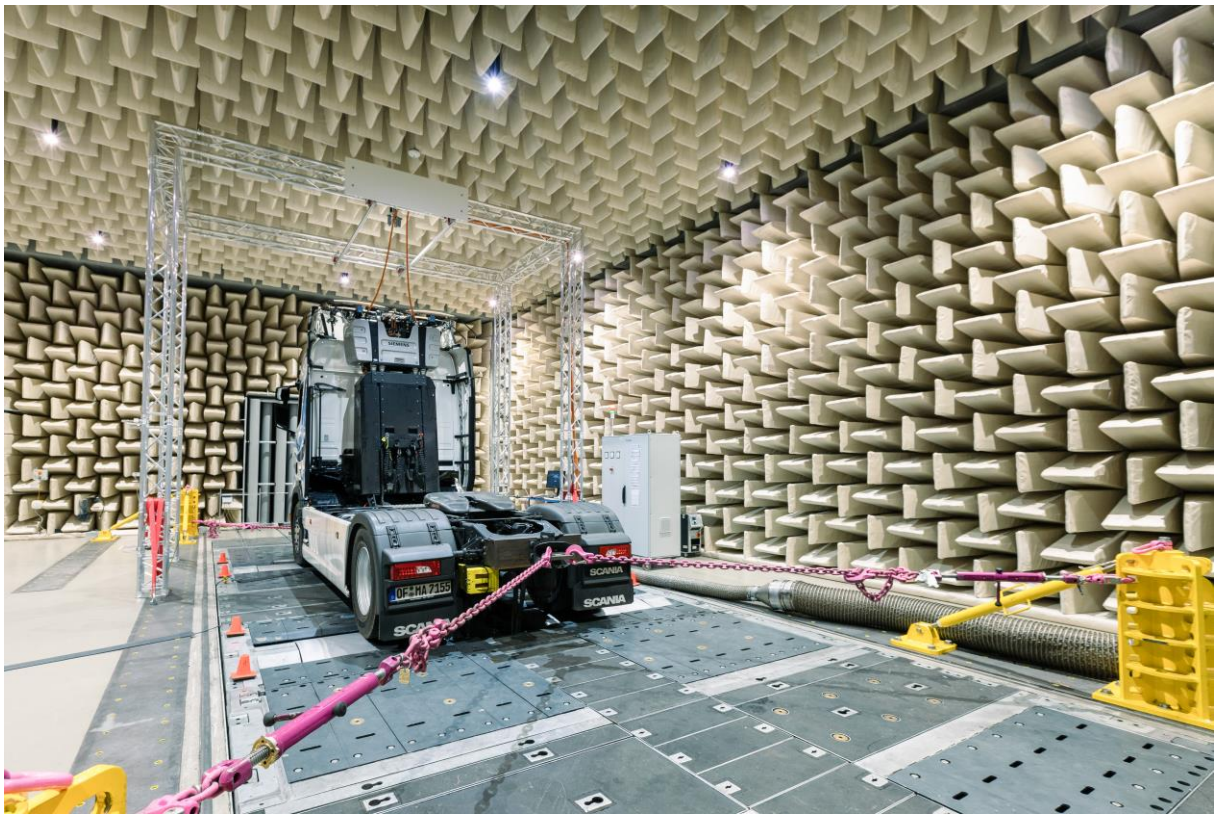


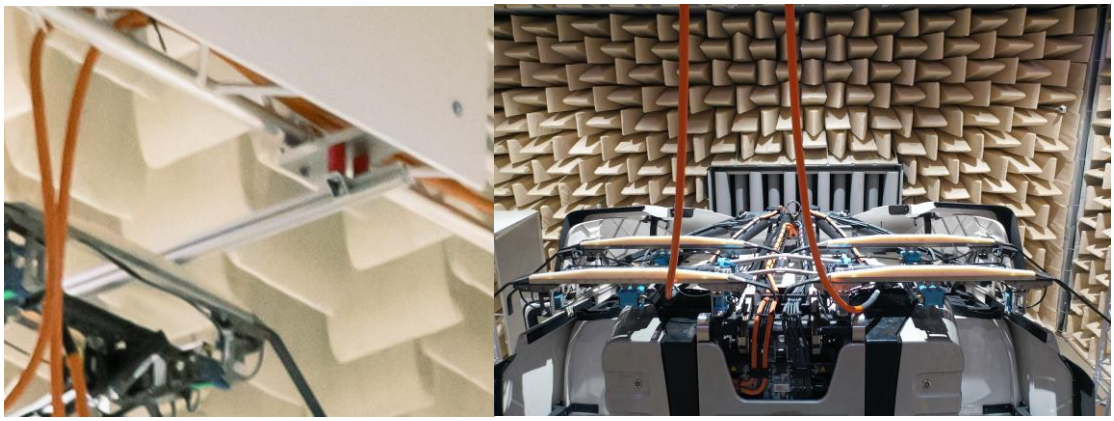
Abbildung 2: Finale Anbindung des Oberleitungs-LKW am Prüfstand



2.3 Vergleich der Ladeinfrastruktur zwischen Prüfstand und realem Aufbau

LKW-seitig war das Ziel, im Vergleich zum Straßentest so anwendungsnah wie möglich zu bleiben und ausschließlich absolut notwendige Anpassungen vorzunehmen. Bei denen im Projekt eingesetzten LKW erfolgt die Freigabe zum Hochfahren des Pantograph in zwei Schritten. Über eine Geozone wird definiert, ob sich der LKW in einem Streckenabschnitt mit Oberleitung befindet. Über den Spurhalteassistenten wird signalisiert, dass der LKW sich auf der rechten Fahrbahnseite befindet. Sind diese beiden Bedingungen erfüllt, bekommt der Fahrer die Freigabe des Pantograph im Cockpit angezeigt. Nun kann er durch manuelles Betätigen eines Schalters den Pantograph hochfahren. Sobald eine Spannung anliegt und ca. 600 V überschritten sind, öffnen LKW-seitig die Schütze und der LKW wird geladen. Die beiden Funktionen für die Freigabe mussten am Prüfstand deaktiviert werden. Um die Sicherheit bei diesen ersten Versuchen zu gewährleisten und um Spannungsspitzen zu vermeiden, wurde die Stromversorgung direkt an die Schleifleisten geschraubt. Die eigentlichen Schleifleisten wurden durch Kunststoffleisten ersetzt. Durch die zusätzliche Isolierung und Erdung des Oberleitungsgestells wurde sichergestellt, dass hier kein Potenzialübertrag stattfindet.

Abbildung 3: Anbindung der Spannungsversorgung zwischen Pantrograph und AFE (links) und das Andocken der Ersatz-Stromschienen an den Oberleitungs-Dummy bei ausgefahrenem Pantograph (rechts). (Eigene Aufnahme)



Mit Ausnahme des Deaktivieren der Freigabefunktionen wurden softwareseitig am LKW keine Anpassungen vorgenommen. Sobald der LKW laut Prüfprofil in einen Oberleitungsabschnitt einfährt, bekommt der Fahrer dies über das Prüfstandsdisplay angezeigt. Der Fahrer betätigt den Schalter zum Hochfahren des Pantograph. Sobald die Schleifleisten am Gestell anschlagen, wird die Spannungsversorgung am AFE aktiviert. Übersteigt die Spannung 600 V schließen die Schütze und der LKW wird über den DCDC-Wandler mit elektrischem Strom versorgt. Am Ende des Abschnittes wiederum wird die Spannungsversorgung abgeschaltet und der Pantograph wird wieder heruntergefahren.

3 Vorbereitung der Versuche

3.1 Hintergrund: Welche LKW werden getestet?

Die ersten fünf im Projekt eingesetzten Oberleitungs-LKW verfügen neben dem klassischen Verbrennungsmotor noch über einen zusätzlichen elektrischen Antriebsstrang. Dabei sind zwei E-Maschinen mit je bis zu 130 kW in das LKW-Getriebe integriert. Dies ermöglicht drei Fahrmodi: Rein elektrisches Fahren, Erhöhung der Systemleistung durch parallelen Betrieb von E-Maschine und Verbrennungsmotor und Laden der Hochvolt-Batterie im Generatorbetrieb der E-Maschinen über den Verbrennungsmotor. Zusätzlich kann während der Verzögerung des LKW die Hochvolt (HV)-Batterie durch regeneratives Bremsen über die E-Maschinen geladen werden. Das ursprüngliche Entwicklungsziel war, dass der Oberleitungs-LKW unter der Oberleitung rein elektrisch fährt. Minimale Lastspitzen und kurze Unterbrechungen der Oberleitungs-Abschnitte können rein elektrisch zurückgelegt werden. Abseits der Oberleitungen ergeben sich durch den Diesel-Antrieb keine Reichweiten- und Einsatzbeschränkungen im Vergleich zum konventionellen Diesel-LKW. Der besagte LKW hat eine 18.5 kWh – Batterie und kann damit ca. 10 km rein elektrisch fahren. Neben den bisher genannten Möglichkeiten kann die HV-Batterie auch über einen DC/DC-Wandler (Gleichstromwandler) direkt von der Oberleitung mit bis zu 30 kW geladen werden. Jedoch verfügt der LKW nicht über eine Ladebuchse und kann stationär damit nur über die Oberleitung geladen werden. In der Summe ergibt sich eine maximale Bezugsleistung von 290 kW aus der Oberleitung: Maximal 260 kW zur Abdeckung der Traktionsleistung und damit des rein elektrischen Betriebs des LKW und maximal 30 kW zum Nachladen der Batterie unter der Oberleitung.

Ab April 2024 kamen in eWayBW zwei Oberleitungs-LKW der dritten Fahrzeuggeneration zum Einsatz. Ein rein batterieelektrischer LKW und ein Plug-in Hybrid LKW. Besonderheit der beiden LKW ist, dass die gesamte Bezugsleistung der LKW über einen DC/DC-Wandler geleitet wird. Dieser ermöglicht eine Bezugsleistung von ca. 150 kW. Die Fahrdaten haben jedoch gezeigt, dass die Beschränkung bei 300 A liegt und daher je nach Spannungsniveau – bei eWayBW ca. 670 V – auch bis zu 200 kW möglich sind. Diese maximale Bezugsleistung ist somit geringer als bei der zweiten Generation, jedoch erhöht sich die maximal mögliche Ladeleistung der Batterie unter der Oberleitung. Zusätzlich können diese beiden LKW auch stationär an einer gängigen CCS-Schnellladesäule geladen werden. Der O-PHEV der dritten Generation ist auch Gegenstand der nachfolgenden Versuche.

Als Referenz dient ein reiner Diesel-LKW, wie er bis zu Projektbeginn auf der Shuttle-Strecke zum Einsatz gekommen ist.

3.2 Ermittlung der Fahrwiderstandsbeiwerte

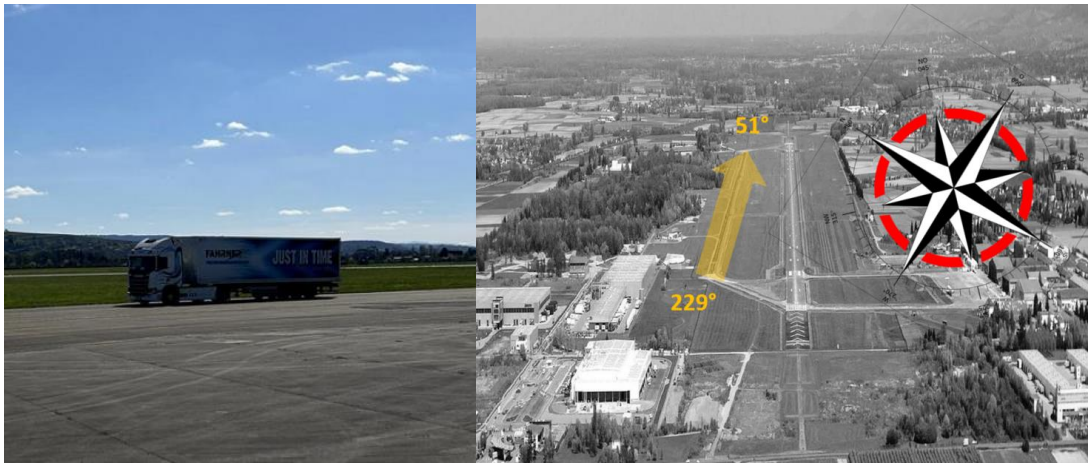
Um die LKW auf dem Rollenprüfstand testen zu können, müssen die Fahrwiderstände der Realfahrt ermittelt und auf den Prüfstand übertragen werden.

Hier gibt es zwei Verfahren, die je nach Behörde beide ihre Relevanz in der Zulassung und Emissionierung finden. Während die US Umweltbehörde EPA Ausrollversuche (Coast Down Tests - CDT) anwendet, so verfolgt Europa Tests bei zwei verschiedenen

Konstantgeschwindigkeiten (Constant Speed Test – CST), siehe (Delgado et al. 2019). Je nach Prozedur gibt es spezifische Anforderungen an die Versuchsstrecke, die Messtechnik und den Ablauf der Versuche. Auf Grund der örtlichen Gegebenheiten und der verfügbaren Messtechnik kommt im Projekt die CDT- Variante zum Einsatz. Die entsprechenden Ausrollversuche fanden auf dem Fluggelände in Lahr statt.

In eWayBW shuttlen die LKW in der Regel mit leerem Trailer vom Logistikzentrum zur Papierfabrik, um dann voll beladen wieder zum Logistikzentrum zurückzukehren. Um dies abbilden zu können, wird der LKW in zwei Varianten getestet: einmal mit leerem Trailer und einmal mit voll beladenem Trailer. Dabei werden die Versuche so lange wiederholt, bis die Geschwindigkeitsfelder 85-5 km/h in jede der beiden Fahrbahnrichtungen 4-mal durchfahren sind.

Abbildung 4: Ausrollversuche am Flugfeld in Lahr. O-PHEV LKW auf der Strecke (links) und Luftbild der Flugstrecke mit eingezeichneter Himmelsrichtung (rechts)



Die ermittelten Fahrwiderstands-Koeffizienten für die beiden LKW-Varianten sind in Tabelle 2 hinterlegt.

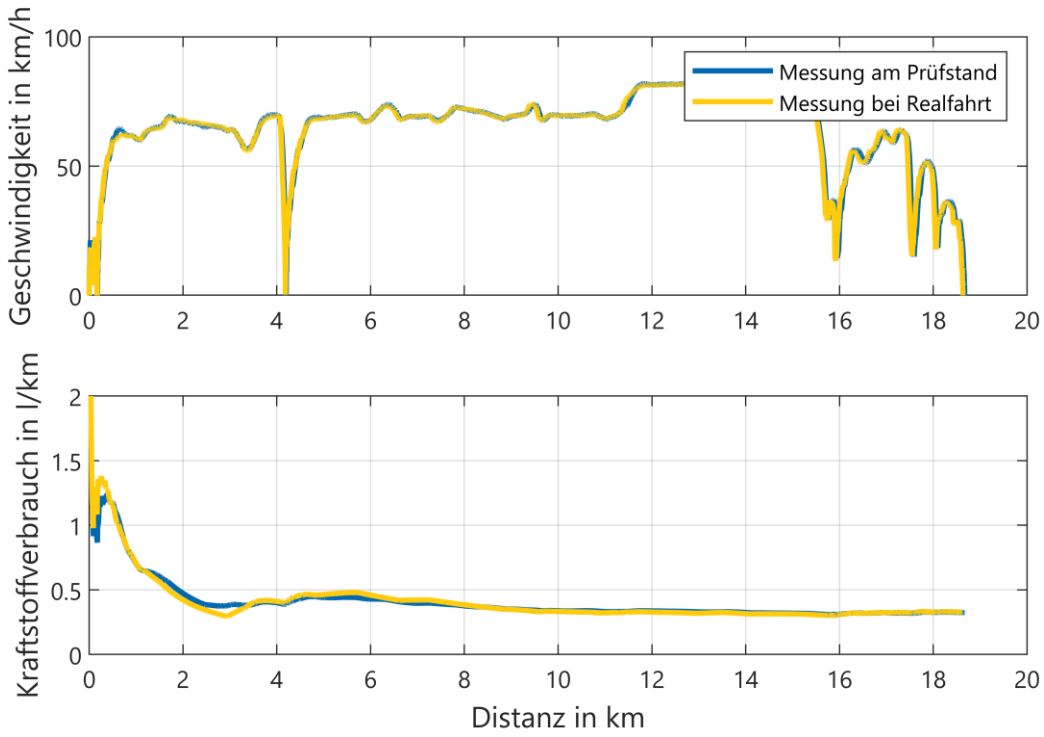
Tabelle 2: Durch Ausrollversuche am Flugfeld in Lahr ermittelte Fahrwiderstands-Koeffizienten.

LKW	Trailer Zustand	Gesamtgewicht [kg]	F0 [N]	F1 [N/kmh^{-1}]	F2 [N/(kmh^{-1})^2]
Diesel	unbeladen	14.720	1088,54	5,63	0,37
	beladen	36.860	1486,29	10,50	0,3
O-PHEV	unbeladen	17.940	967,52	2,31	0,27
	beladen	40.080	1.622,57	4,34	0,35

3.3 Diesel-LKW: Validierung des Übertrags zwischen Straße und Prüfstand

Zunächst wird die Validierung des Diesel-LKW betrachtet. Als Vorgabe dient das Geschwindigkeitsprofil, das während des Einsatzes im Shuttle-Verkehr aufgezeichnet wurde. Dafür werden am Prüfstand das Geschwindigkeitssignal und die Straßensteigung vorgegeben und der Fahrer folgt dieser Vorgabe. Abbildung 5 zeigt im oberen Vergleich die Vorgabe des Geschwindigkeitsprofils zur resultierenden Geschwindigkeit am Prüfstand. Dabei zeigt sich, dass der Vorgabe gut gefolgt werden kann. Interessanter ist jedoch der Vergleich zwischen dem aufgezeichneten Kraftstoffbedarf und dem resultierenden Kraftstoffverbrauch am Prüfstand. Über den gesamten Verlauf ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß von 96% bzw. im totalen Literverbrauch eine Abweichung von 2 % und kann daher als valide angenommen werden. Selbiges gilt auch für die erforderliche Antriebsleistung und sämtliche für den Energiebedarf erforderlichen Parameter. Dieses Ergebnis impliziert, dass die ermittelten Fahrwiderstands-Koeffizienten aus Tabelle 2 die reale Belastung der Versuchsstrecke sehr gut abdecken. Für den Abgleich zwischen O-PHEV und Rolle gilt dies gleichermaßen.

Abbildung 5: Diesel-LKW auf der Pilotstrecke - Geschwindigkeitsverlauf (oben) und spezifischer Kraftstoffverbrauch (unten) während einer Shuttle-Fahrt von der Papierfabrik zum Logistikzentrum der Spedition Fahrner. (eigene Darstellung)

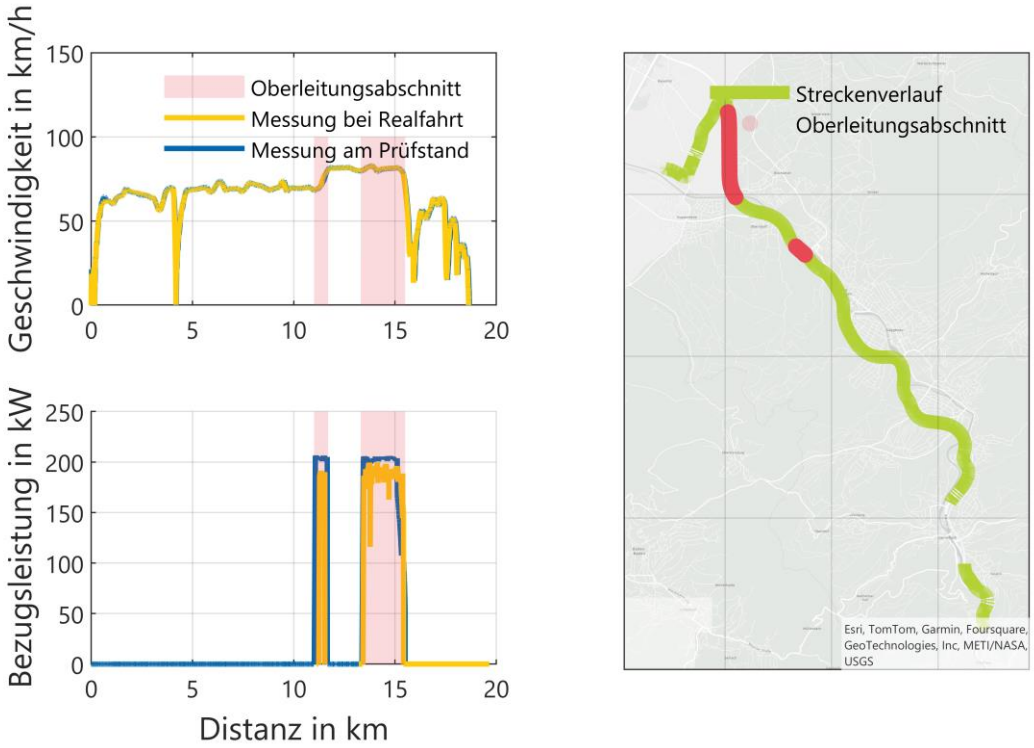


3.4 O-PHEV: Validierung der Oberleitungsanbindung

Für den O-PHEV ist neben der reinen Antriebsleistung auch entscheidend, ob das dynamische Laden am Rollenprüfstand ebenfalls erfolgen kann. Abbildung 6 zeigt das Geschwindigkeitsprofil für den Abgleich zwischen Realfahrt und Prüfstandsfahrt des O-PHEV, ebenfalls für eine Fahrt von der Papierfabrik zur Spedition. Im unteren Diagramm ist der Leistungsbezug aus der Oberleitung dargestellt. Dabei zeigt sich, dass Start- und Endpunkt des längeren Abschnittes sehr gut übereinstimmen. Jedoch ist der verbundene Anteil im kürzeren Abschnitt am Prüfstand deutlich höher. Im Pilotversuch konnte der kurze Abschnitt deutlich geringere Nutzungsgrade[1] erzielen als der längere Abschnitt, was durch mehrere Faktoren verursacht wurde: Bei kürzeren Abschnitten nimmt die Strecke bis der Pantograph hochgefahren ist generell einen größeren Anteil an und wirkt sich negativ auf den Nutzungsgrad aus. Eine zusätzliche Lichtsignalanlage an einer Kreuzung mitten im Oberleitungsabschnitt führte teilweiße zum Bremsen und wieder Anfahren. Ferner führt der Beginn des Oberleitungsabschnitts in einer Kurve dazu, dass das Nutzen des Pantograph sich für die Fahrer herausfordernd war. Am Prüfstand ist der Leistungsbezug zum einen etwas höher, zum anderen unterliegt er kleineren Schwankungen. Der Leistungsbezug wird durch zwei Variablen begrenzt: Spannungslage der Oberleitung und die Strombegrenzung des DC/DC-Wandlers. Der Pantograph in der aktuellen Ausbaustufe hat eine Begrenzung auf 600 A bei maximal 800 V. Die Spannungslage der Oberleitung im Pilotversuch lag bei ca. 670 V. Je nach LKW-Konfiguration konnten daher in den Pilotversuchen auch bis zu 400 kW über den Pantograph bezogen werden. Bei dem hier betrachteten O-PHEV geht jedoch sämtlicher Leistungsbezug über den DC/DC-Wandler und ist durch diesen aktuell auf 300 A beschränkt. Am Prüfstand konnte das Spannungsniveau über das AFE flexibel eingestellt werden. Um den Oberleitungsbetrieb auf realen Strecken nachzustellen, wurde das Spannungsniveau auf 670 V gestellt. Damit könnten am Prüfstand ebenfalls bis zu 210 kW bezogen werden.

[1] Nutzungsgrad: Das Verhältnis zwischen der Länge eines Oberleitungsabschnittes zu der Distanz, die der LKW tatsächlich mit der Oberleitung verbunden war

Abbildung 6: O-PHEV auf der Pilotstrecke - Geschwindigkeitsverlauf (oben links) und Leistungsbezug (links unten) während einer Shuttle-Fahrt von der Papierfabrik zum Logistikzentrum der Spedition Fahrner. (eigene Darstellung)



4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse: Diesel-LKW vs. O-PHEV

Für den Vergleich wird in sämtlichen Varianten dasselbe Geschwindigkeitsprofil zu Grunde gelegt. Für die allgemeinen Aussagen zur Kraftstoff- und Emissionseinsparung müssen mehrere Fahrten und der Einsatz über mehrere Monate und Umgebungsbedingungen hinweg verglichen werden. Hierfür gibt es den Pilotversuch auf der realen Strecke. Durch Umwelteinflüsse und stets unterschiedliche Fahrweise und Verkehrslage ist ein reproduzierbarer Vergleich zwischen nicht möglich. Am Prüfstand sind die Umgebungsbedingungen konditioniert und es kann mehrmals dasselbe Geschwindigkeitsprofil nachgefahren werden. Dies ermöglicht den reinen Vergleich von verschiedenen Varianten und Betriebsstrategien hinsichtlich ihrer Einsparpotenziale.

Im Folgenden werden die Varianten vorgestellt:

S-1) Diesel-LKW: Referenzverbrauch

Das in 3.3 gezeigte Geschwindigkeitsprofil wird abgefahren. Dabei fährt der LKW mit leerem Trailer von Kuppenheim zur Papierfabrik und vollbeladen die umgekehrte Strecke wieder zum Umschlagszentrum in Kuppenheim.

S-2) O-PHEV: Oberleitungs-LKW im Erhaltungsmodus, ohne Oberleitung

Der Oberleitungs-LKW fährt exakt das Szenario wie in der Diesel-LKW in S-1, also auch ohne dynamisches Laden über die Oberleitung. Dabei wird der Betriebsmodus des LKW so gewählt, dass der Ladezustand der Traktionsbatterie nahezu konstant gehalten wird: Erhaltungsmodus.

S-3) O-PHEV: Oberleitungs-LKW im Erhaltungsmodus, ohne Oberleitung, maximale Rekuperation durch Bremsung mit Retarder

Der Oberleitungs-LKW fährt dasselbe Geschwindigkeitsprofil, jedoch mit der Änderung, dass die Verzögerung, sprich der Bremsvorgang, hauptsächlich über den Retarder [2]durch den Fahrer erfolgt.

S-4) O-PHEV: Oberleitungs-LKW im Erhaltungsmodus, mit Oberleitung; Oberleitung wie auf der Strecke

Nun wird zusätzlich die Oberleitung genutzt. Dabei sind Abschnittslänge und Verteilung wie im realen Szenario auf der Pilotstrecke umgesetzt.

S-5) O-PHEV: Oberleitungs-LKW im Erhaltungsmodus, mit Oberleitung; Oberleitungsabschnitte verbunden

In diesem Szenario werden die beiden Oberleitungsabschnitte zu einem langen Oberleitungsabschnitt zusammengefasst und somit auch die Oberleitung an sich verlängert.

[2] Retarder: Eine verschleißfreie Dauerbremse. Kann vom Fahrer in verschiedenen Stufen über einen Hebel am Lenkrad betätigt werden. Beim konventionellen LKW wird die mechanische Energie in Wärme gewandelt und an die Umgebung abgegeben. Elektrische Antriebe ermöglichen die Rekuperation und damit das Laden der Hochvolt-Batterie.

S-6) O-PHEV: Oberleitungs-LKW im elektrischen Modus, ohne Oberleitung

In diesem Szenario wird wieder ohne Oberleitung gefahren. Im Vergleich zu S-3 wird nun jedoch nicht im Erhaltungsmodus gefahren, sondern rein elektrisch. Da keine dynamische Ladung über die Oberleitung erfolgt, muss der LKW im Nachgang stationär an einer Ladesäule geladen werden.

4.1.1 eWayBW: Shuttle-Fahrt von Logistikzentrum zu Papierfabrik

Abbildung 7 zeigt für die sechs vorgestellten Szenarien den jeweiligen Endenergiebedarf in kWh/km, getrennt ausgewiesen nach elektrischem und konventionellem Betrieb. Der Diesel-LKW hat auf der Fahrt einen spezifischen Endverbrauch von 0,28 l/km bzw. 2.69 kWh/km. Der O-PHEV fährt im Automatikmodus und ohne Oberleitung nur 1 % der Strecke rein elektrisch. Daher kommt auch er auf einen nahezu identischen Verbrauch von 0,28 l/km. Der Einfluss der Fahrweise auf den Energiebedarf ist bekannt und antriebsunabhängig auch ein großer Hebel bei der Einsparung. Beim konventionellen LKW wird der Retarder vornehmlich eingesetzt, um die Bremsen zu entlasten und so Verschleiß, aber auch Überhitzung zu reduzieren. Beim O-PHEV wird bei der Betätigung des Retarder-Bremshebels dosiert verzögert und der Großteil der Energie kann über den Generatorbetrieb der elektrischen Traktionsmaschinen in die HV-Batterie geladen werden. Durch die höhere Rekuperation konnte der LKW ca. 1 km zusätzlich an elektrischer Reichweite zurückgewinnen. In Kombination mit einer bewussten Automatikfahrt kann somit der Energiebedarf um 20 % gesenkt werden. In Szenario 4 werden nun die beiden Oberleitungsabschnitte so durchfahren, wie in eWayBW aufgebaut. Insgesamt war der LKW dabei 3,1 km mit der Oberleitung verbunden und hat dabei im Schnitt 2,3 kWh/km bezogen. Unter der Oberleitung fährt der LKW dabei rein elektrisch. Ansonsten ist weiterhin der Erhaltungsmodus aktiv, wodurch der LKW versucht, den Ladezustand der HV-Batterie zu halten. Insgesamt werden in diesem Szenario 30 % der Strecke rein elektrisch zurückgelegt. Dabei sinkt der Endenergiebedarf auf 2,04 kWh/km bzw. auf 75 % des Energiebedarfs im Vergleich zum Diesel-LKW. Im nächsten Szenario werden die beiden Oberleitungsabschnitte zusammengeschaltet, das heißt, es wird ohne Unterbrechung von Beginn Abschnitt 1 bis Ende Abschnitt 2 gefahren. Somit ergibt sich eine gesamte Oberleitungslänge von 4,7 km und damit 25 % der Gesamtstrecke. Trotz des höheren Bezugs kann der Gesamtenergiebedarf nur marginal verringert werden. Durch den Betrieb des LKW im Automatikmodus, hat die Betriebsstrategie des LKW ebenfalls einen hohen Einfluss auf das Ausnutzen des Einsparpotenzials. Das höchste Einsparpotenzial von ca. 60 % ergibt sich im rein elektrischen Fahrbetrieb. Hier sinkt der Endenergiebedarf auf 1,12 kWh/km.

Abbildung 7: Endenergiebedarf im Vergleich für Diesel-LKW (S-1) und fünf verschiedene Profile des O-PHEV auf der Pilotstrecke eWayBW

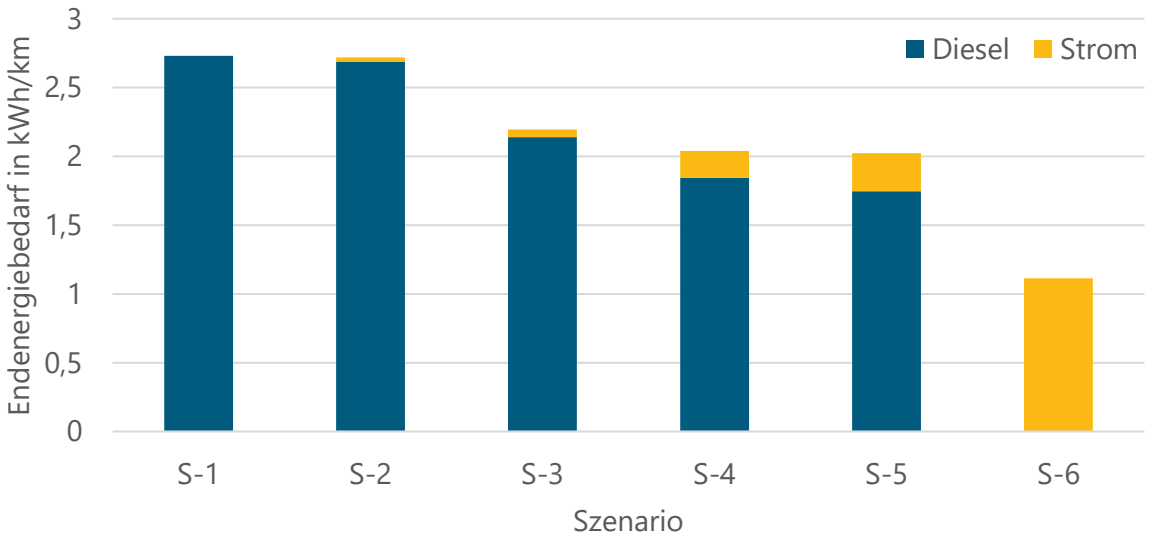
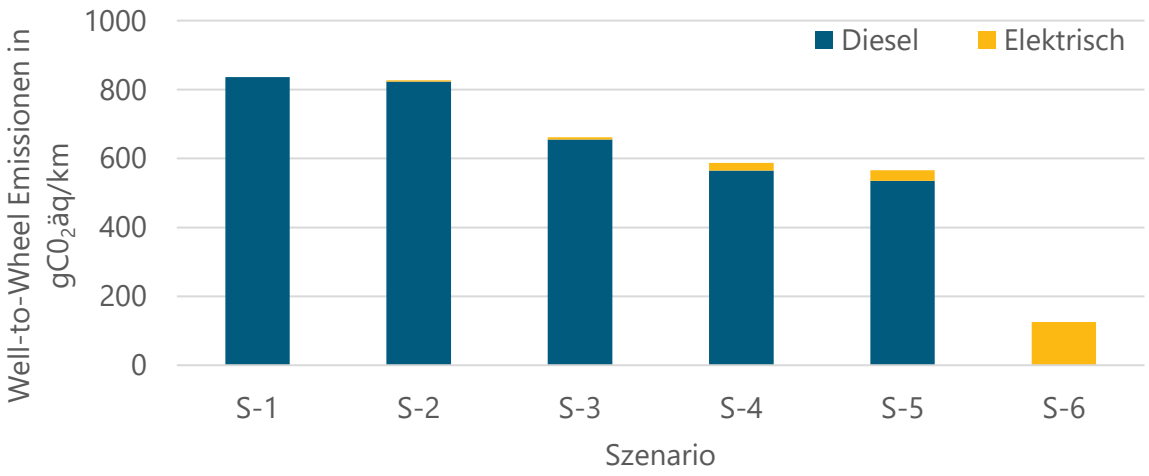


Abbildung 8 zeigt das Einsparpotenzial bezüglich THG-Emissionen. Dabei sind die Einsparpotenziale abhängig vom Strommix. Im Pilotprojekt konnte Strom aus regenerativen Quellen genutzt werden. Dennoch wird hier ein nicht ganz so optimistisches Szenario zu Grunde gelegt, sondern sich am Szenario GreenSupreme aus (Biemann et al. 2024) mit 113 $gC0_2äq/kWh$ orientiert. Dabei ergeben sich im rein elektrischen Szenario bis zu 85 % Einsparpotenzial.

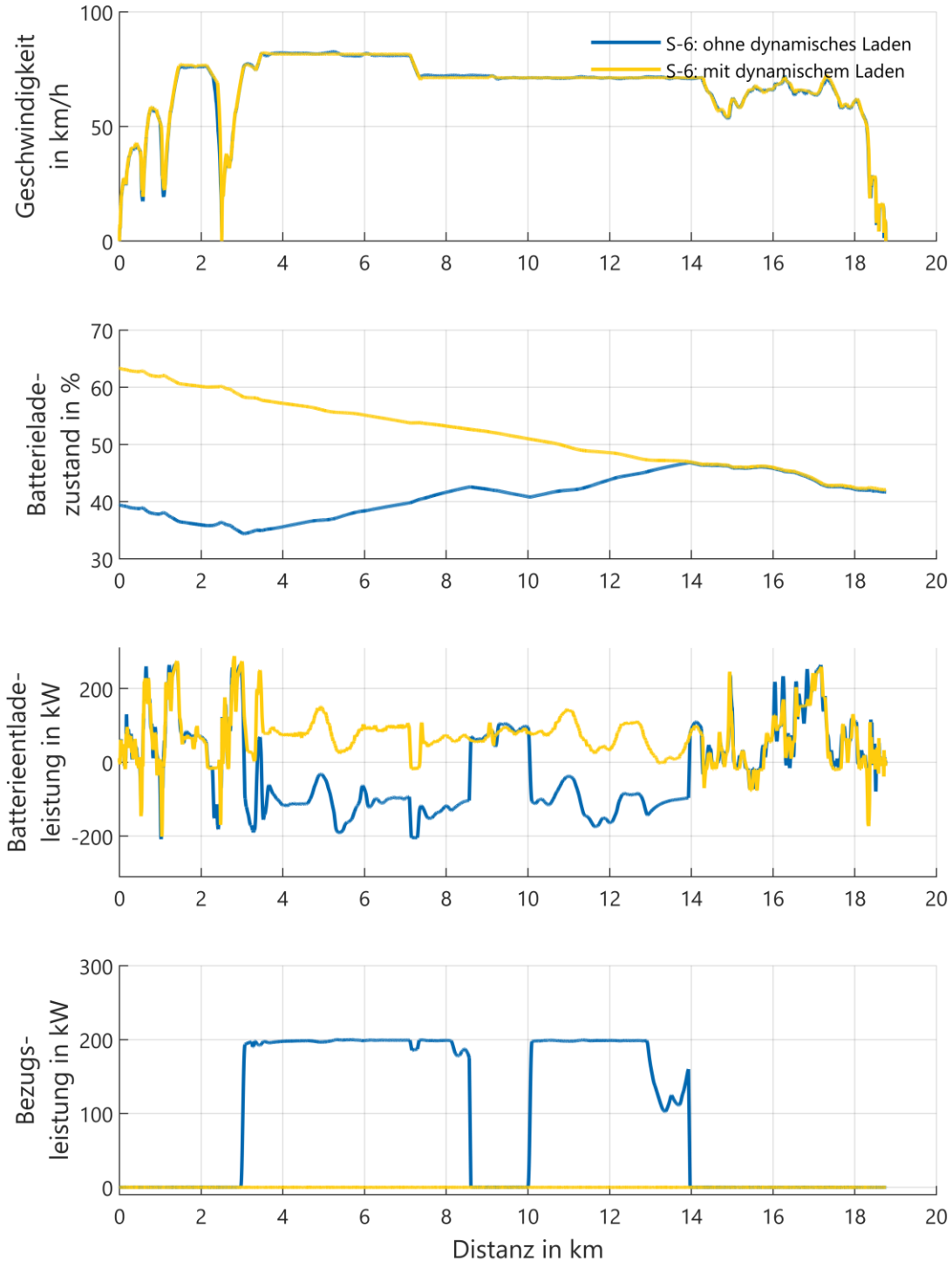
Abbildung 8: Well-to-Wheel - Emissionen in $CO_2äq/km$ im Vergleich für Diesel-LKW (S-1) und fünf verschiedene Profile des O-PHEV auf der Pilotstrecke eWayBW



4.2 Ergebnisse: Rein elektrische Fahrt entlang der Pilotstrecke

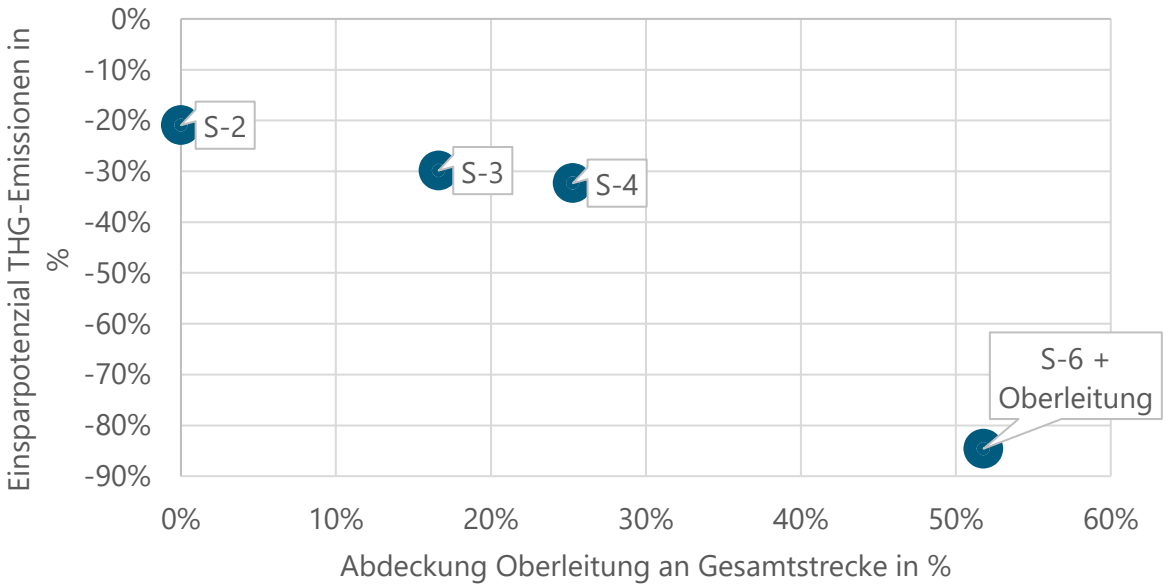
Szenario S-6 betrachtet den rein elektrischen Betrieb des O-PHEV, ohne dynamische Ladung während der Fahrt und erfordert daher eine stationäre Ladung nach Fahrtende, um den Ladezustand wieder auf den Ladezustand bei Start zu heben. In eWayBW konnte der Anteil, der stationär nachgeladen werden muss, durch die beiden vorhandenen Oberleitungsabschnitte reduziert werden. Allerdings ist der Anteil mit Oberleitungsabschnitten nur bei rund 15 % der Gesamtstrecke und in der vorhandenen Oberleitungsinfrastruktur- und Oberleitungs-LKW-Kombination nicht ausreichend, um komplett auf das stationäre Laden im rein elektrischen Betrieb zu verzichten. Hierfür wurden am Prüfstand die Oberleitungsabschnitte entlang der Pilotstrecke virtuell verlängert. Abbildung 9 zeigt, ergänzend zu der gelben Kurve der rein elektrischen Fahrt ohne Oberleitungsnutzung, zusätzlich eine blaue Kurve, die den Verlauf bei maximalem Ausbau der Oberleitung beschreibt. Das obere Diagramm zeigt den Geschwindigkeitsverlauf, der in beiden Fahrten nahezu deckungsgleich war. Lediglich beim Bremsvorgang nach knapp 3 km gibt es eine leichte Abweichung. Dennoch können die beiden Fahrten sehr gut miteinander verglichen werden. Die unterste Grafik zeigt die Bezugsleistung von der Oberleitung. Hier werden wiederum durchgehend ca. 200 kW erreicht. Im zweiten Abschnitt sinkt die Bezugsleistung gegen Ende hin ab. Das ist darauf zurückzuführen, dass die maximale Batterieladeleistung (siehe dritter Plot von oben) abhängig vom Ladezustand (siehe zweiter Plot von oben) begrenzt ist. Da die erforderliche Traktionsleistung in diesem Abschnitt ebenfalls sinkt, kann nur weniger als die eigentlich von der Oberleitung zur Verfügung stehende Leistung vom LKW aufgenommen werden. Im zweiten Plot von oben ist der Ladezustand der Hochvoltbatterie dargestellt. Die gelbe Kurve, also ohne dynamische Ladung, zeigt einen stetigen Abfall des Ladezustands von 63 % bei Fahrtbeginn hin zu 42 % bei Fahrtende. Die Differenz von 21 % entspricht ca. 21 kWh, die stationär nachgeladen werden müssen. Dahingegen zeigt die blaue Kurve den Ladezustandsverlauf mit dynamischer Ladung unter der Oberleitung. Unter den Oberleitungsabschnitten kann die Traktionsleistung, also die Leistung die direkt für die E-Maschinen zum Antrieb des LKW benötigt wird, nahezu in allen Bereichen direkt von der Oberleitung bezogen werden. Lediglich in den Beschleunigungsphasen und bei hohen Straßensteigung reichen die 200 kW nicht aus und es muss zusätzlich die Hochvolt-Batterie entladen werden. Im Mittel sind jedoch ca. 100 kW verfügbar, mit denen die Batterie unter der Oberleitung dynamisch geladen werden kann. In Summe werden 23 kWh geladen. Dies führt dazu, dass der Ladezustand bei Fahrtende mit 42 % leicht über dem Ladezustand bei Start von 40 % liegt. Das heißt im Umkehrschluss, dass die gesamte Fahrt rein elektrisch gefahren werden konnte und dennoch mehr Energie via Oberleitung geladen wurde, als auf der Strecke benötigt. Dies entspricht somit dem Maximalausbau der Oberleitung, ohne dass zusätzlich stationär geladen werden müsste. Maximaler Ausbau heißt im vorliegenden Fall, dass genau so viel Oberleitung aufgebaut wird, dass der LKW einen kompletten Umlauf ladezustandsneutral leisten kann. Mit dem O-PHEV wären hierfür beidseitig circa 9 km Oberleitungsstrecke erforderlich, was einer Gesamtabdeckung von 50 % der Shuttle-Strecke entspricht.

Abbildung 9: Szenariovergleich des Ladezustands für die rein elektrische Fahrt entlang der Pilotstrecke eWayBW - mit und ohne dynamischem Laden des O-PHEV während der Fahrt



Bezogen auf die Einsparpotenziale der LKW lässt sich also folgende abschließende Grafik für eWayBW und den hier eingesetzten Oberleitungs-LKW in Relation zum Diesel-LKW darstellen.

Abbildung 10: Einsparpotenzial an CO2-Emissionen des O-PHEV im Vergleich zum Diesel-LKW und in Abhängigkeit des Anteils der Strecke mit Oberleitung an der Gesamtumlaufstrecke



4.3 Ergebnisse: Rein elektrische Fahrt auf weiteren Strecken

Bisher unbekannt ist, wie sich die Oberleitungs-LKW auf längeren Strecken verhalten. Der längste Oberleitungsabschnitt ist im Projekt ELISA in Darmstadt aufgebaut. Durch die Verlängerung in einer Fahrbahnrichtung konnte der Oberleitungsabschnitt auf insgesamt 17 km erweitert werden. Sollten jedoch die Oberleitungs-LKW jemals im Fernverkehr eingesetzt werden, so wird davon ausgegangen, dass die einzelnen Abschnitte auch 50 km oder länger sein können. Was bisher fehlt, ist ein Dauertest der Einzelkomponenten im LKW im einsatznahen Szenario. Hierfür wurden am Prüfstand weitere Versuche durchgeführt.

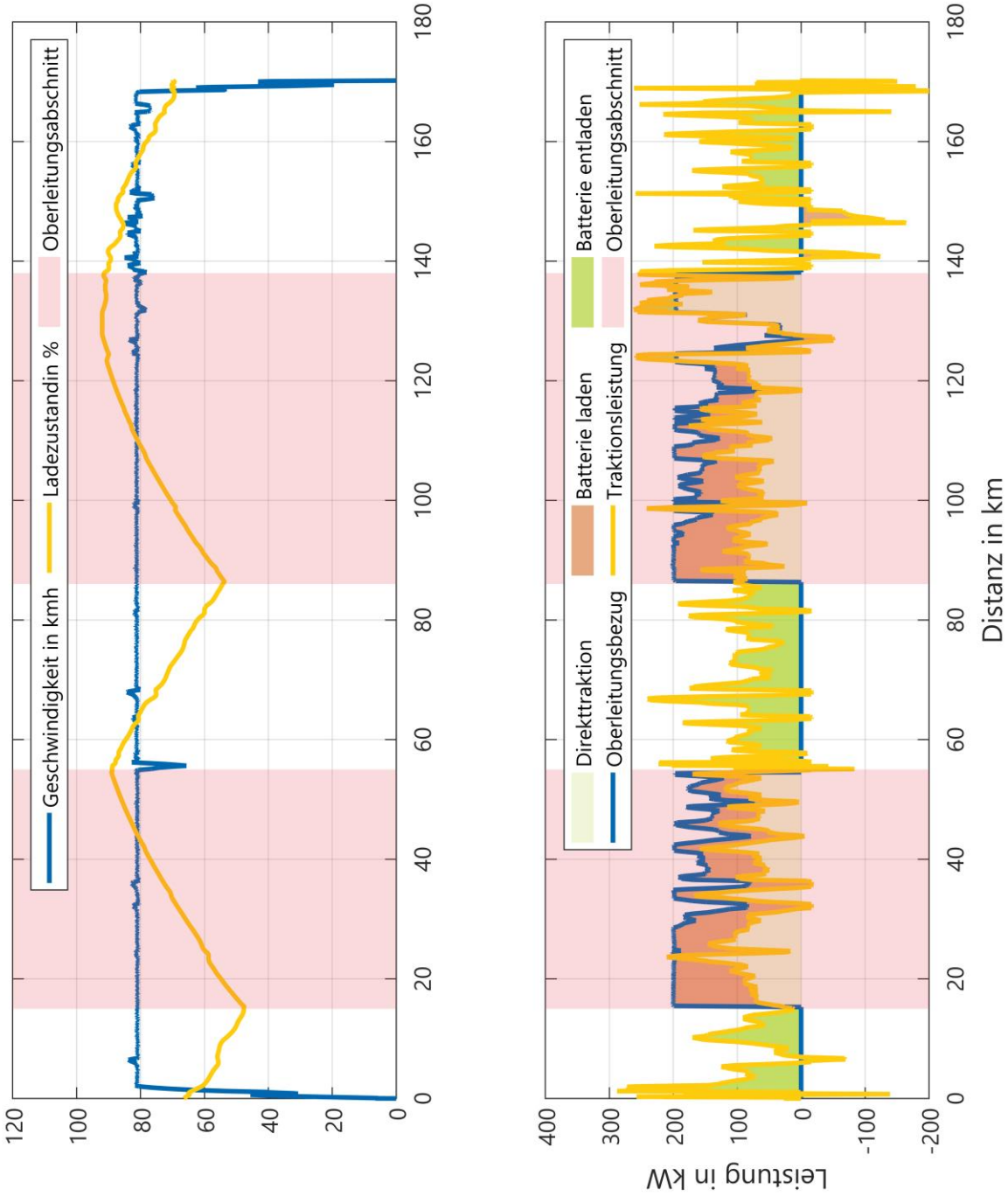
Mit Hilfe der am Fraunhofer ICT entwickelten Fahrsimulationsumgebung NASVM ((Burgert et al. 2019), (Cleven et al. 2024)) werden zunächst digitale Zwillinge der Oberleitungs-LKW erstellt. Anschließend können diese genutzt werden, um Sensitivitätsanalysen durchzuführen. So können Infrastrukturlänge und Anordnung der dynamischen Ladeinfrastruktur, sowie Position und Ladeleistung bei stationärer Ladeinfrastruktur variiert werden. LKW-seitig kann die verfügbare Batteriekapazität und maximalen Lade- und Entladeleistung angepasst werden. Dies war Gegenstand u.a. von zwei Abschlussarbeiten am Fraunhofer ICT während des Projektverlaufs. (Schmidt 2021) beschäftigt sich mit der optimierten Länge und Abfolge der Oberleitungsinfrastruktur auf diversen Strecken. (Baumann 2022) hingegen nimmt die Infrastruktur als gegeben

an und betrachtet einzelne Logistikrouten und deren Möglichkeiten hinsichtlich der Nutzung von Synergien bei stationärem und dynamischem Laden. Diese Vorarbeiten werden nun als Basis genutzt, um die Erprobung des realen LKW am Prüfstand auch auf anderen Strecken als den Pilotstrecken zu ermöglichen.

Mittels eines Streckengenerators können synthetische, aber realitätsnahe Geschwindigkeitsprofile generiert werden und so die Oberleitungsinfrastruktur auch an Strecken virtuell aufgebaut werden, die Stand heute, noch nicht mir realer Oberleitungsinfrastruktur ausgestattet sind. Ein mögliches Szenario ist dabei die Erweiterung der Strecke entlang der A1, die Gegenstand des Pilotversuchs FESH ist. Hierfür wird die Strecke zwischen dem Autobahndreick (AD) Bad Schwartau und Hamburg abschnittsweise mit Oberleitung versehen. Insgesamt werden ca. 50 % der Strecke mit Oberleitung aufgebaut.

Abbildung 11 zeigt den Geschwindigkeits- und Ladezustandsverlauf oben und den Leistungsbezug unten. Die Annahme, dass der LKW nahezu konstant die Zielgeschwindigkeit einhält, sorgt durch den Höhenverlauf dennoch dafür, dass die Traktionsleistung stets variiert. Im Mittel können auch hier wieder 100 kW in die Batterie geladen werden. Im Bereich von 125 km ist zu sehen, dass der LKW nahezu keine Traktionsleistung mehr benötigt, sondern in Teilen sogar rekuperiert, um das Gefälle ausgleichen zu können. Gleichzeitig ist auch die Batterie nahezu vollständig geladen. In Summe kann der LKW somit nur geringfügig Ladung von der Oberleitung aufnehmen und beim Ausbau wäre es eine Möglichkeit, diese 5 km auszusparen. Zu Beginn, zwischen den beiden Abschnitten mit Oberleitung und am Ende, liegen jeweils ca. 30-40 km, die rein aus der Batterie gefahren werden. Durch den ausgeglichenen Wechsel kann die Batterie schonend geladen werden und dennoch in einem minimalen Ladehub zwischen 50 % und 90 % gehalten werden. Die notwendige Abdeckung liegt auch hier wieder bei knapp 50 % der Gesamtstrecke. Insgesamt lag der Gesamtenergiebedarf auf der 170 km langen Strecke bei 181 kWh, im Mittel also bei 1,07 kWh/km. In den beiden Oberleitungsabschnitten, mit einer Gesamtlänge von 91 km, konnten 186 kWh geladen werden. Dies entspricht einem spezifischen Bezug von 2,05 kWh/km. Somit zeigt sich, dass mit den heute verfügbaren LKW auch längere Strecken a) rein elektrisch und b) auch an Oberleitungsabschnitten von mehr als 50km ohne weitere Leistungseinbußen zurückgelegt werden können und für den weiteren Ausbau eine Abdeckung von 50 % ausreichend wäre.

Abbildung 11: Rein elektrische und ladezustandsneutrale Fahrt des O-PHEV entlang der A1 zwischen AD Bad Schwartau und Hamburg als Verlängerung der Pilotstrecke FESH



5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Erprobung von neuen Technologien im realen Umfeld ist evident, um den Reifegrad der Systeme vor Serieneinführung zu überprüfen. Gerade beim eHighway-System sind diese Versuche mit einem hohen initialen sowie monetärem Aufwand verbunden, um die notwendige Oberleitungsinfrastruktur aufzubauen. Im Working-Paper wird aufgezeigt, wie die LKW hardwarenah und mit realitätsnahen Lastkollektiven auch für den Einsatz auf weiteren fiktiven Strecken erprobt werden können.

Hierfür wurde am Prüfstand eine Oberleitungs-Ladeinfrastruktur aufgebaut, so dass der LKW über den Pantograph während der Fahrt geladen werden kann. Um die Fahrwiderstände auf dem Rollenprüfstand abbilden zu können, wurden Ausrollversuche auf dem Flugfeld in Lahr durchgeführt.

Für die eigentlichen Versuche waren zwei LKW im Einsatz. Zunächst ein Diesel-LKW der Spedition Fahrner, wie er bis zu Projektbeginn eingesetzt wurde, um die Logistikaufgabe der Spedition Fahrner durchzuführen. Hierbei wurde mit leerem Trailer vom Logistikzentrum gefahren und mit voll beladenem Trailer wieder zurück. Der zweite LKW ist ein Oberleitungs-LKW (O-PHEV), der neben dem klassischen Dieselantrieb auch über einen rein elektrischen Antriebsstrang verfügt. Die Batterie kann, sowohl dynamisch über einen Pantograph als auch stationär, wie beim rein batterie-elektrischen LKW geladen werden. Der Vergleich von Rollenversuchen zu Realfahrten beim Diesel-LKW zeigt im spezifischen Kraftstoffverbrauch ein Bestimmtheitsmaß von 96 % und kann daher als valide betrachtet werden, was ebenfalls für den O-PHEV gilt. Zudem konnte auch das dynamische Laden validiert werden. Da am Prüfstand die Verbindung zwischen Oberleitung und Pantograph starr ausgeführt ist, kommt es am Prüfstand zu einem glatteren Verlauf der Anbindung und damit zu leichten Abweichungen in längeren Oberleitungsabschnitten.

Ohne das dynamische Laden bleibt dem O-PHEV der Vorteil der Rekuperation von Bremsenergie und somit eine maximale Einsparung an lokalen THG-Emissionen bei konsequenter Nutzung des Retarders von 20%. Ferner steigt der rein elektrische Fahranteil mit dem Anteil der Oberleitungsabschnitte an der Gesamtfahrt. In eWayBW sind dies ca. 15 %, daraus folgt eine CO2-Einsparung von ca. 30 %, was sich auch mit den Ergebnissen der Realfahrten deckt. Für eine maximale Einsparung von 85 % würde ein rein elektrischer Betrieb benötigt. Dies setzt in der aktuellen Kombination aus Fahrzeug- und Ladeinfrastruktur eine Abdeckung von 50 % an der Gesamtstrecke voraus. In eWayBW wäre dies ein beidseitiger Ausbau von ca. 9 km.

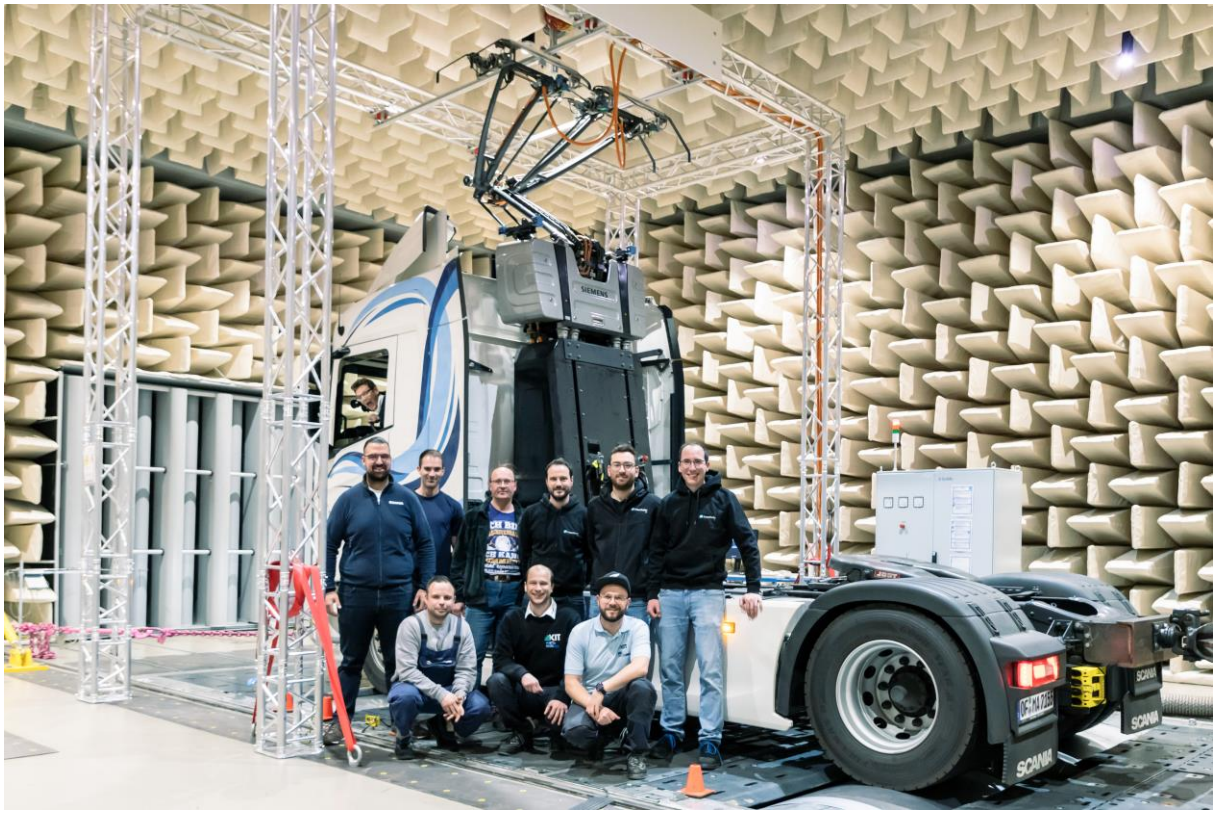
Über einen virtuellen Streckengenerator und Fahrzeugsimulationen wurden weitere Strecken aufgebaut und mit Ladeinfrastruktur ausgestattet. Stets mit dem Ziel, dass eine rein elektrische Fahrt mit möglichst wenig Oberleitungsinfrastruktur ermöglicht wird. Die resultierenden Strecken und Oberleitungsabschnitte dienten dann wiederum dem Prüfstand als Vorgabe. Beispielhaft wurde gezeigt, dass die heutigen LKW auch auf längeren, bis zu 50 km langen Oberleitungsabschnitten ohne weitere Leistungseinbußen funktionieren. So konnte am Prüfstand eine Fahrt entlang der A1 über 160 km vollelektrisch und ladezustandsneutral zurückgelegt werden, bei der der Energiebedarf für die Strecke das 2-fache der verfügbaren Netto-Batteriekapazität des LKW betragen hat.

Die Rollenprüfstandsversuche haben gezeigt, dass die heute verfügbaren Oberleitungs-LKW in Verbindung mit der verfügbaren Oberleitungs-Infrastruktur auch auf langen Strecken rein elektrisch fahren können, stets vor dem Hintergrund, dass dafür die Ladeinfrastruktur verfügbar sein muss. Ist dies nicht der Fall, bleibt das stationäre Laden. Solange politisch keine Entscheidung für den flächendeckenden Ausbau getroffen wird, sollte dennoch die rein elektrische Fahrt angestrebt werden. Kommt es im Hochlauf von rein batterieelektrischen LKW zu Engpässen bei der Ladeinfrastruktur, sei es beim Depotladen durch fehlende Netzkapazitäten oder auch der Bedarf an Stellplätzen beim Zwischenladen entlang der Hauptverkehrsadern, so kann die punktuelle Nachrüstung von Oberleitungen eine Möglichkeit sein. Auch hier gibt es bereits Bestrebungen für eine standardisierte Schnittstellenbeschreibung, um rein batterieelektrische LKW mit einem Pantograph für das dynamische Laden nachzurüsten.

6 Danksagung

Die Durchführung solcher Versuche bedarf der Zusammenarbeit von mehreren Institutionen. Auf diesem Wege nochmal ein großes Dankeschön:

- Knirsch | Julian Heinrich: Überführung LKW und Rückbau des Pantograph, Ausrollversuche
- Siemens Mobility GmbH | Eric Hartmann: Elektrische Anbindung am Pantograph, Überwachung des Pantograph während der Versuche
- Scania | Christer Thoren, Marcel Gregor: Bereitstellung O-PHEV, Softwareanpassung am LKW, Ersatzsteuergeräte-Abholung/Lieferung/Einbau, Ausrollversuche
- SciMo: | Marc Veigel, Maximilian Klug: Adaption des AFE für den Einsatz am Rollenprüfstand
- KIT-FAST | Stefan Herr, Michael Striy: Adaption LKW am Prüfstand, LKW-Fahrer bei den Versuchen, Einspielen der Fahrprofile



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gestell zur Montage der Oberleitungsatrappe 11

Abbildung 2: Finale Anbindung des Oberleitungs-LKW am Prüfstand 11

Abbildung 3: Anbindung der Spannungsversorgung zwischen Pantrograph und AFE (links) und das Andocken der Ersatz-Stromschienen an den Oberleitungs-Dummy bei ausgefahrenem Pantograph (rechts). (Eigene Aufnahme) 12

Abbildung 3: Ausrollversuche am Flugfeld in Lahr. O-PHEV LKW auf der Strecke (links) und Luftbild der Flugstrecke mit eingezeichneter Himmelsrichtung (rechts) 14

Abbildung 4: Diesel-LKW auf der Pilotstrecke - Geschwindigkeitsverlauf (oben) und spezifischer Kraftstoffverbrauch (unten) während einer Shuttle-Fahrt von der Papierfabrik zum Logistikzentrum der Spedition Fahrner. (eigene Darstellung) 15

Abbildung 5: O-PHEV auf der Pilotstrecke - Geschwindigkeitsverlauf (oben links) und Leistungsbezug (links unten) während einer Shuttle-Fahrt von der Papierfabrik zum Logistikzentrum der Spedition Fahrner. (eigene Darstellung) 17

Abbildung 6: Endenergiebedarf im Vergleich für Diesel-LKW (S-1) und fünf verschiedene Profile des O-PHEV auf der Pilotstrecke eWayBW 20

Abbildung 7: Well-to-Wheel - Emissionen in CO_2äq/km im Vergleich für Diesel-LKW (S-1) und fünf verschiedene Profile des O-PHEV auf der Pilotstrecke eWayBW 20

Abbildung 8: Szenariovergleich des Ladezustands für die rein elektrische Fahrt entlang der Pilotstrecke eWayBW - mit und ohne dynamischem Laden des O-PHEV während der Fahrt 22

Abbildung 9: Einsparpotenzial an CO2-Emissionen des O-PHEV im Vergleich zum Diesel-LKW und in Abhängigkeit des Anteils der Strecke mit Oberleitung an der Gesamtumlaufstrecke 23

Abbildung 10: Rein elektrische und ladezustandsneutrale Fahrt des O-PHEV entlang der A1 zwischen AD Bad Schwartau und Hamburg als Verlängerung der Pilotstrecke FESH 25

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Spezifikationen DC-Quelle (AFE-Schrank)..... 10
Tabelle 2: Durch Ausrollversuche am Flugfeld in Lahr ermittelte Fahrwiderstands-Koeffizienten. 14

1 Literatur

Baumann, P. (2022): Modellbasierte Entwicklung und Optimierung einer Modellbasierte Entwicklung und Optimierung einer Betriebsstrategie für elektrifizierte Nutzfahrzeuge mit stationärer und wegseitiger Lademöglichkeit. Masterarbeit, Universität Stuttgart (Hrsg.), Stuttgart.

Biemann, K.; Helms, H.; Münter, D.; Liebich, A.; Pelzeter, J.; Kämper, C.; Müller, J. (2024): Analyse der Umweltbilanz von Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieben oder Kraftstoffen auf dem Weg zu einem treibhausgasneutralen Verkehr. Heidelberg: Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/13_2024_texte_analyse_der_umweltbilanz_von_kraftfahrzeugen_0.pdf.

Boltze, M.; Lehmann, M.; Riegelhuth, G.; Sommer, H.; Wauri, D. (Hrsg.) (2021): Elektrifizierung von Autobahnen für den Schwerverkehr. Umsetzung des System eHighway. Bonn: Kirschbaum Verlag. ISBN: 9783781220539.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur BMVI (2020): Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge. Mit alternativen Antrieben auf dem Weg zur Nullemissionslogistik auf der Straße. Online verfügbar unter https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/gesamtkonzept-klimafreundliche-nutzfahrzeuge.pdf?__blob=publicationFile.

Burgert, T.; Dollinger, A.; Fischer, T. (2019): Methodology for modelling a plugin hybrid electric vehicle based on data logging. Lyon: EVS32.

Cleven, M.; Burgert, T.; Weimar, H.-J.; Frischholz, F.; Tübke, J. (2024): Proton-exchange membrane fuel cell system testing method utilizing a digital twin. In: 2024 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). 19-21 June 2024 (2024 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)), 6/19/2024 - 6/21/2024, Chicago, IL, USA. Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers, S. 1–4. https://doi.org/10.1109/ITEC60657.2024.10598860.

Delgado, O.; Rodriguez, F.; Zacharof, N. (2019): Comparison of Aerodynamic Comparison of Aerodynamic Drag Determination Procedures for HDV CO2 Certification. Online verfügbar unter https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/ICCT_aero_drag_briefing_20190814.pdf, zuletzt geprüft am 10.03.2025.

Schmidt, J. (2021): Methodik zum energetischen Vergleich verschiedener LKW-Antriebs- und Ladekonzepte. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (Hrsg.), Karlsruhe.