

**FuE-Programm "Erneuerbar Mobil" des Bundesministerium für Wirtschaft und
Energie und Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und
Reaktorsicherheit**

Schlussbericht

Vorhabenbezeichnung:

**Elektrischer Straßengüterverkehr mit Oberleitungen und Batterien:
Rationalität, Kombinationen und Institutionendesign
(Planung, Finanzierung, Organisation, Regulierung) (ESOB-RKI)**

Zuwendungsempfänger / ausführende Stelle	<ul style="list-style-type: none">• Fachhochschule Erfurt, Institut Verkehr und Raum:<ul style="list-style-type: none">○ Professur Eisenbahnen (FHE-E)○ Professur Verkehrspolitik und Raumplanung (FHE-VR)• Bauhaus-Universität Weimar, Professur Infrastrukturwirtschaft und -management (BUW-IWM)
Förderkennzeichen	16EM5009-1 (FHE) / 16EM5009-2 (BUW)
Laufzeit des Vorhabens	01.09.2021 bis 28.02.2025 (FHE) und 31.12.2024 (BUW)
Berichtszeitraum	01.09.2021 bis 28.02.2025
Erstellungsdatum	

Ansprechpartner

- Fachhochschule Erfurt, Institut Verkehr und Raum, Professur Eisenbahnen (FHE-E), Prof. Dr. Michael Lehmann
FH Erfurt, Altonaer Straße 25, 99085 Erfurt, Tel.-Nr.: 0361-6700-6573 / 0176-23250305, michael.lehmann@fh-erfurt.de
- Fachhochschule Erfurt, Institut Verkehr und Raum, Professur Verkehrspolitik und Raumplanung (FHE-VR), Prof. Dr. Matthias Gather
FH Erfurt, Altonaer Straße 25, 99085 Erfurt, Tel.-Nr.: 0361/6700-6654, matthias.gather@fh-erfurt.de
- Bauhaus-Universität Weimar, Professur Infrastrukturwirtschaft und -management (BUW-IWM), Prof. Dr. Thorsten Beckers
Bauhaus-Universität Weimar, Marienstraße 7 A, 99423 Weimar, Tel.-Nr. 03643-58-4592 / 0163-8479465, thorsten.beckers@uni-weimar.de

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Zielstellung des Verbundprojekts	2
3	Darstellungen der Ergebnisse	2
3.1	AP 1) Erkenntnisstand zur langfristigen Bedeutung von O- und B-Lkw-Systemen im SGV sowie kurz-, mittel- und langfristige Implikationen und Handlungsempfehlungen (BUW, FHE)	2
3.1.1	TAP 1.1) Methodische Fragen zur gesamtwirtschaftlichen Bewertung von alternativen Systemen für den SGV unter Berücksichtigung von Unsicherheit (BUW)	2
3.1.2	TAP 1.2) Aufarbeitung und kritische Bewertung des aktuellen Forschungsstandes im Bereich ökonomischer / gesamtwirtschaftlicher Analysen alternativer Systeme für den SGV (BUW)	3
3.1.3	TAP 1.3) Qualitative Analysen zu Eignung und Kombinationsfähigkeit, zu Aufbaupfaden und zur internationalen Einbettung alternativer Systeme für den SGV (BUW).....	3
3.1.4	TAP 1.4) Übergreifende Beurteilung des Erkenntnisstandes zu alternativen Systemen für den SGV und Schlussfolgerungen (BUW).....	4
3.1.5	TAP 1.5) Institutionelle Herausforderungen bei der „Weiterverfolgung“ und Implementierung alternativer Systeme für den SGV, Zusammenfassung der Handlungsempfehlungen (BUW)	4
3.2	AP 2) Kombinationsszenarien von O- und B-Lkw-System (FHE).....	5
3.2.1	TAP 2.1) Detaillierte Ausarbeitung und Festlegung von AP2-Methodik und – Zielsystem (FHE).....	5
3.2.2	TAP 2.2) Grundlagen-Ermittlung (FHE)	5
3.2.3	TAP 2.3) Vorarbeiten für Analysen mit Verkehrsmodell / Modellanpassungen (FHE)	6
3.2.4	TAP 2.4) Definition von Basis-Szenarien (FHE)	6
3.2.5	TAP 2.5) Analyse von Basis-Szenarien (I): reines B-Lkw-System als Ausgangs-Szenario (FHE).....	7
3.2.6	TAP 2.6) Analyse von Basis-Szenarien (II): Kombinationsszenarien von B- und O-Lkw-Systemen (FHE)	7
3.2.7	TAP 2.7) Sensitivitätsanalysen zu den Basis-Szenarien (FHE).....	8
3.2.8	TAP 2.8) Vorgezogene, parallele und nachgelagerte Zusatz-Analysen (FHE)	8
3.2.9	TAP 2.9) Bewertung der Basis-Szenarien (FHE, BUW)	9
3.3	AP 3) Hochlauf-Pfade und internationale Einbettung (FHE, BUW)	10
3.3.1	TAP 3.1) Hochlauf-Pfade (bei zunächst nur nationaler Betrachtung) (FHE)	10
3.3.2	TAP 3.2) Internationaler Kontext (FHE)	10
3.3.3	TAP 3.3) Hochlauf-Pfade und internationale Einbettung (FHE)	11
3.4	AP 4) Zentrale (insbesondere institutionenökonomische und juristische) Fragen der Umsetzung des Aufbaus eines B- und O-Lkw-Systems (BUW, FHE)	12
3.4.1	TAP 4.1) Planung und Umsetzung des Stromnetzanschlusses von O-Infrastruktur (sowie ergänzend auch Ladeinfrastruktur) im Bereich der Fernverkehrsachsen (BUW).....	12
3.4.2	TAP 4.2) Organisation, Procurement-Ansatz und Betriebsführung bei O-Infrastruktur sowie Aufgabenwahrnehmung bezüglich Systemintegration bei O-Lkw-System (BUW).....	12
3.4.3	TAP 4.3) Instrumenten-Design des (effektiven und effizienten) gekoppelten Aufbaus von B- und O-Lkw-Systemen (u.a. Finanzierung, Bepreisung und ggf. Förderung, Lenkung) (BUW).....	14
3.4.4	TAP 4.4) Weitere Fragestellungen (TAP 4.4.a: Strombelieferung, Messwesen und damit einhergehende Vertriebsfragen; TAP 4.4.b: B- und O-Lkw-System übergreifende Vertriebsfragen) (BUW)	15
3.5	AP 5) Zusammenführen der Ergebnisse (FHE, BUW)	16

3.6	AP 6) Workshops (FHE, BUW).....	16
4	Darstellung wesentlicher Abweichungen zum Arbeitsplan.....	17
5	F&E-Ergebnisse von dritter Seite	19
6	Zukunftsaussichten und weiterer Forschungsbedarf.....	21
7	Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des BMWK und BMUB	22
8	Veröffentlichung der Ergebnisse	23
8.1	Bisherige Veröffentlichungen.....	23
8.2	Laufende Veröffentlichungen.....	23
9	Anlagen	23

1 Zusammenfassung

Der Straßengüterverkehr (SGV) steht vor einer grundlegenden Transformation, weg vom bisher dominierenden Dieselantrieb hin zu klimaneutralen Antriebssystemen. Im Forschungsvorhaben ESOB-RKI wurden zentrale Fragestellungen untersucht, die für eine effektive und effiziente Umgestaltung des SGV von besonderer Bedeutung sind.

Zum einen erfolgten verkehrliche, technisch-systemische und (wohlfahrts-)ökonomische Analysen, um die Rationalität verschiedener technologischer Optionen, deren Kombinationsmöglichkeiten sowie potenzielle Einführungspfade für zukünftige Systeme im SGV zu bewerten. Im Fokus standen Systeme des sogenannten „elektrischen Straßengüterverkehrs“ (ESGV), bei denen Strom direkt, also ohne Umwandlung in andere Energieträger, für den Fahrzeugantrieb genutzt wird. Dies setzt die Errichtung entsprechender Oberleitungs- und/oder Ladesäulen-Infrastruktur für Lkw voraus.

Zum anderen wurden institutionenökonomische und juristische Untersuchungen durchgeführt, die klären sollten, wie bestehende Institutionen genutzt oder neue geschaffen werden müssen, um die in den technisch-ökonomischen Analysen als vorteilhaft identifizierten Systeme effektiv und wirtschaftlich tragfähig umsetzen zu können. Dabei wurden Fragestellungen zur Planung, Finanzierung, Bepreisung sowie zur Organisation und Regulierung adressiert. Auch politische Transaktionskosten, die in Abhängigkeit von der institutionellen Ausgestaltung stark variieren konnten, wurden berücksichtigt.

Da beide Themenfelder eng miteinander verknüpft waren, wurde ESOB-RKI als integriertes Forschungsvorhaben angelegt. Ziel war es, fundiertes Wissen zu generieren und daraus Handlungsoptionen und Empfehlungen abzuleiten, die politischen Entscheidungsträgerinnen und -trägern in Legislative und Exekutive als Grundlage für die Transformation des SGV hin zur Klimaneutralität dienen konnten.

Das Projekt basierte auf der interdisziplinären Zusammenarbeit von drei Professuren: dem Eisenbahnwesen (Prof. Dr.-Ing. Michael Lehmann) und der Verkehrspolitik/Raumplanung (Prof. Dr. Matthias Gather) an der Fachhochschule Erfurt sowie der Infrastrukturwirtschaft und -management (Prof. Dr. Thorsten Beckers) an der Bauhaus-Universität Weimar. Ergänzend wurde juristische sowie energietechnische und -wirtschaftliche Expertise eingebunden, um die komplexen Forschungsfragen umfassend bearbeiten zu können.

2 Zielstellung des Verbundprojekts

Im Projekt ESOB-RKI wurden verschiedene technisch-systemische Optionen zur Transformation des Straßengüterverkehrs in Richtung Klimaneutralität umfassend analysiert. Im Fokus standen Wirtschaftlichkeitsanalysen der Systeme über den gesamten Lebenszyklus (TCO), die Bewertung von Wirkungsgraden sowie die Untersuchung möglicher Kombinationen von Oberleitungs-Lkw und batterieelektrischen Fahrzeugen. Besondere Bedeutung wurde der Integration dieser Systeme in das übergeordnete Energie- und Verkehrssystem sowie der Entwicklung realistischer Einführungspfade beigemessen, inklusive der Identifikation sogenannter „No-Regret“-Entscheidungen.

Ein zentrales Ziel bestand darin, die institutionellen Rahmenbedingungen für Entscheidungsprozesse und die Umsetzung technischer Lösungen zu untersuchen. Dazu zählten Fragestellungen zur Planung, Finanzierung, Kostenverteilung und Regulierung ebenso wie zur Eignung verschiedener Governance-Modelle. Auch die Rolle öffentlicher Akteure sowie Aspekte wie Flächenverfügbarkeit, Ladeinfrastruktur und mögliche Betreibermodelle wurden betrachtet.

Das übergeordnete Ziel des Projekts war es, Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträgern aus Politik und Verwaltung eine fundierte Wissensgrundlage bereitzustellen. Dies soll sie in die Lage versetzen, wirkungsvolle und wirtschaftlich tragfähige Maßnahmen zur Dekarbonisierung des SGV zu beschließen. Die Grundlage hierfür bildeten interdisziplinäre Analysen, die technische, ökonomische, institutionelle sowie rechtliche Perspektiven integrierten.

3 Darstellungen der Ergebnisse

3.1 AP 1) Erkenntnisstand zur langfristigen Bedeutung von O- und B-Lkw-Systemen im SGV sowie kurz-, mittel- und langfristige Implikationen und Handlungsempfehlungen (BUW, FHE)

Das AP 1 besteht aus insgesamt 5 Teilarbeitspaketen (TAP). Alle TAP konnten im in der Vorhabensbeschreibung vorgesehenen Umfang abgeschlossen werden (vgl. Abbildung 1). Der Umfang der Analysen, insbesondere im Hinblick auf Analysetiefe bei der Gegenüberstellung eines B- und eines OB-Lkw-Systems, wurde in Absprache mit dem Projektträger erweitert. Es wurden die (Zwischen-)Ergebnisse und Handlungsempfehlungen mit wichtigen Stakeholdern in Workshops diskutiert. Weiterhin wurden erschienene relevante Veröffentlichungen einbezogen. Die Verschriftlichung der Untersuchungen, der wesentlichen Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen wurde vollständig abgeschlossen. Die Ergebnisse des AP 1 sind in der Studie umfassend dargestellt, die im Anhang beigefügt ist.

3.1.1 TAP 1.1) Methodische Fragen zur gesamtwirtschaftlichen Bewertung von alternativen Systemen für den SGV unter Berücksichtigung von Unsicherheit (BUW)

In TAP 1.1 wurden zum einen Fragen der Granularität der Modellierung diskutiert und im Anschluss wurde der Beschluss gefasst, eine erweiterte VISUM-Lizenz zu beschaffen (siehe auch TAP 2.1).

Zum anderen wurden die Nachfragebedürfnisse im Straßengüterverkehr detailliert betrachtet und systematisiert. Eine differenzierte Betrachtung der Nachfragebedürfnisse dient schlussendlich dazu,

alternative Systeme hinsichtlich ihrer Eignung zur Deckung der Nachfragebedürfnisse bewerten zu können und das Zielsystem weiter zu konkretisieren. Ausgangspunkt für die Betrachtung stellte die stationäre Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Lkws dar, während die Berücksichtigung von dynamischer Ladeinfrastruktur in einem zweiten Schritt erfolgte. Die Nachfragebedürfnisse nach der Ladeinfrastruktur wurden nach Standorten und Restriktionen des Logistiksektors unterschieden und systematisiert aufbereitet. Wie bereits in der Vorhabenbeschreibung skizziert, finden im Rahmen des vom BMDV geförderten Forschungsvorhabens „Hochleistungsladen im Langstrecken-Schwerlastverkehr“ (HoLa) von der BUW-IWM Analysen zum Institutionendesign im Hinblick auf eine effektive und effiziente Bereitstellung der Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Lkw statt, sodass die vorgelagerten Untersuchungen in beiden Vorhaben berücksichtigt werden können.

Der methodische Hintergrund zur Analyse der Eignung alternativer Lkw-Systeme sowie zur Ableitung von (kurzfristigen) Handlungsempfehlungen bei Berücksichtigung der Option von sequentiellen Entscheidungsfällungen gemäß den Grundgedanken einer Systementwicklungsstrategie wurde aufgearbeitet. Dafür wurde zunächst der Untersuchungsgegenstand unter Berücksichtigung der Interdependenzen des SGV mit dem gesamten Energiesystem definiert. Weiterhin wurden Implikationen der europäischen Einbettung berücksichtigt. Nicht zuletzt wurde ein Zielsystem für die Beurteilung der Rationalität und Bedeutung von Lkw-Systemen und möglicher Kombinationen entwickelt (vgl. dazu auch TAP 2.1).

3.1.2 TAP 1.2) Aufarbeitung und kritische Bewertung des aktuellen Forschungsstandes im Bereich ökonomischer / gesamtwirtschaftlicher Analysen alternativer Systeme für den SGV (BUW)

Ziel des TAP 1.2 stellte die Auswertung der wesentlichen Studien zum Straßengüterverkehr hinsichtlich des methodischen Vorgehens sowie insbesondere der Berücksichtigung von Unsicherheiten von Schlüsselfaktoren dar. Dafür wurden die seit 2010 (und insbesondere seit 2017) veröffentlichten Studien zunächst nach ihrem Betrachtungsspektrum unterschieden. In einem nächsten Schritt wurden die methodischen Ansätze, abgebildete Schlüsselfaktoren inklusive der Berücksichtigung von Unsicherheiten hinsichtlich deren Ausprägung sowie die Ergebnisse der Analysen gegenübergestellt. Die Gegenüberstellung erfolgte vor allem auch mit Bezug zu den in TAP 1.1 aufgezeigten methodischen Fragen, sodass abschließend grundsätzliche (vorläufige) Schlussfolgerungen zur Eignung der im Rahmen der Studien untersuchten alternativen Systeme abgeleitet werden konnten.

3.1.3 TAP 1.3) Qualitative Analysen zu Eignung und Kombinationsfähigkeit, zu Aufbaupfaden und zur internationalen Einbettung alternativer Systeme für den SGV (BUW)

Die Arbeiten zum TAP 1.3 konnten basierend auf den Erkenntnissen aus TAP 1.1 und 1.2 abgeschlossen werden. Technologieoptionen und Lkw-Systeme wurden auch im Hinblick auf mögliche Kombinationen systematisiert und gegenübergestellt. Weiterhin wurden allgemeingültige und für die Lkw-Systeme spezifischen Herausforderungen in der Aufbauphase herausgearbeitet. Im Fokus stand die Ausgestaltung des eSGV, da mit diesem durch die hohe Effizienz der Großteil des SGV abgedeckt werden sollte. In diesem Kontext wurde ein Lkw-System, in dem batterieelektrische Lkw (B-Lkw) ausschließlich an punktförmiger Ladeinfrastruktur laden können (B-Lkw-System), möglichen OB-Lkw-Systemen gegenübergestellt, in denen sowohl punktförmige als auch Oberleitungen als linienförmige

Ladeinfrastruktur zur Energieaufnahme genutzt werden können. Im Rahmen des Systemvergleichs wurden Unsicherheiten hinsichtlich der technisch-systemischen Ausgestaltung und auch der Batteriekostenentwicklungen Rechnung getragen. Neben dem Vergleich von „harten Kostenkomponenten“ wurden Qualitätsunterschiede und weitere „weiche Kostenkomponenten“ ebenfalls diskutiert. Zudem wurde im Rahmen des TAP der Forschungs- und Erkenntnisstand zur Entwicklung des SGV in weiteren europäischen Ländern zusammengetragen. Auf dieser Grundlage konnten Einschätzungen zur Rationalität und Bedeutung von Lkw-Systemen und möglichen Kombinationen abgeleitet werden. Die Analyse zu Eignung und Kombinationsfähigkeit zu Aufbaupfaden und zur internationalen Einbettung alternativer Lkw-Systeme für den SGV ist in Absprache mit dem Projektträger deutlich umfangreicher als ursprünglich geplant erfolgt. Die Arbeiten weisen aber Synergieeffekte mit den TAP 2.1, 2.4, 3.2 und 4.1 auf. Daher konnte der ursprünglich geplante Arbeitsaufwand in den genannten TAP teilweise reduziert werden, sodass die Erweiterung des Umfangs des AP 1 insgesamt zu keinem Mehraufwand führt.

3.1.4 TAP 1.4) Übergreifende Beurteilung des Erkenntnisstandes zu alternativen Systemen für den SGV und Schlussfolgerungen (BUW)

Die Arbeiten zum TAP 1.4 konnten abgeschlossen werden. Zum einen wurde auf Grundlage der Ergebnisse der bisherigen TAP der Erkenntnisstand sowie auch bestehende Wissensdefizite zur Rationalität und Bedeutung von Lkw-Systemen aufgezeigt. Zum Umgang mit den bestehenden Wissensdefiziten wurden unter Rückgriff auf Grundgedanken einer Systementwicklungsstrategie, die den Wert des Flexibilitätserhalts hinsichtlich mehrerer möglicher Transformationspfade berücksichtigt, (kurzfristige) Handlungsempfehlungen für die Transformation des SGV abgeleitet. Die Handlungsempfehlungen umfassen auch Empfehlungen zu vertieften verkehrsplanerischen und – systemtechnischen Untersuchungen in AP 2 und AP 3, um den Wissensstand zu verbessern.

3.1.5 TAP 1.5) Institutionelle Herausforderungen bei der „Weiterverfolgung“ und Implementierung alternativer Systeme für den SGV, Zusammenfassung der Handlungsempfehlungen (BUW)

Im Anschluss an Workshops mit Stakeholdern wurden die aus den Untersuchungen resultierende Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen geschärft und durch den Einbezug relevanter Veröffentlichungen zusätzlich untermauert. Die Untersuchungen sowie die resultierenden wesentlichen Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen wurden größtenteils im Rahmen einer Studie verschriftlicht.

3.2 AP 2) Kombinationsszenarien von O- und B-Lkw-System (FHE)

Das AP2 konnte wie vorgesehen abgeschlossen werden.

3.2.1 TAP 2.1) Detaillierte Ausarbeitung und Festlegung von AP2-Methodik und –Zielsystem (FHE)

Die Arbeiten im TAP 2.1 erfolgten koordiniert mit dem AP 1 (TAP 1.1. und TAP 1.2) als gemeinsame vorgelagerte Untersuchung von BUW-IWM, FHE-E und FHE-VR. Eine wesentliche Voraussetzung und maßgebliche Rahmensetzung für die Festlegung der Methodik und des zu modellierenden Zielsystems stellte dabei die Wahl der geeigneten Verkehrsmodellierungssoftware dar. Nach eingehender Recherche, dem Abgleich der Erfordernisse und Zielsetzungen des Projektrahmens und unter Hinzuziehung verschiedener Expertisen am Institut und an der FHE, wurde die Verkehrsmodellierungssoftware PTV-VISUM ausgewählt. Hinsichtlich des Zielsystems können damit Modellierungsergebnisse erzeugt werden, die eine Vergleichbarkeit zu thematisch verwandten Studien aufweisen. Der Aufbau eines eigenen Verkehrsmodells bietet für alle Projektpartner eine gesteigerten Nachvollziehbarkeit, sowie Anpassungsmöglichkeiten für jegliche Modellierungsschritte und -szenarien. Durch den Beschluss zur Beschaffung einer erweiterten VISUM-Lizenz, war eine Mittelumwidmung notwendig.

Die Möglichkeit, verschiedene Ressourcen des Instituts beim Aufbau des Modells einbeziehen zu können, fand in der Festlegung der Untersuchungsmethodik und Datengrundlage ihren Niederschlag. Einbezogen wurden dabei Daten verschiedener Erhebungen, Statistiken und Prognosen wie der „Verkehrsverflechtungsprognose 2030“, „Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge“, „Verkehr europäischer Lastkraftfahrzeuge“, sowie der Erhebung „Kraftfahrzeuge in Deutschland“. Der räumliche Detaillierungsgrad wurde auf die Verkehrsverflechtungsprognose 2030 abgestimmt und umfasst 412 Landkreise und kreisfreie Städte in Deutschland, 36 europäische Seehäfen, sowie 153 ausländische Verkehrszellen. Um Kongruenz zur Verflechtungsprognose herzustellen, wurde darüber hinaus ein Verkehrsnetz der Bundesfernstraßen nach dem Bundesverkehrswegeplan 2030 aufgebaut. Ebenso daran orientiert war die Betrachtung aller Lkw-Klassen über 12t zulässigem Gesamtgewicht, sowie Fahrtweiten ausschließlich über 50 km.

Die Parameter für das Zielsystem wurden an der in AP1 erarbeiteten Kalkulationstabelle orientiert. Durch den eigenen Aufbau des Modells konnten diese jedoch iterativ überprüft und angepasst werden.

3.2.2 TAP 2.2) Grundlagen-Ermittlung (FHE)

Die Recherchen zu diesem TAP erfolgten im engen Austausch zwischen den Projektpartnern an FHE und BUW, sowie in wechselseitigem Bezug von AP1 und AP2. Die in TAP 2.1 festgelegte Untersuchungsmethodik weist dem Aufbau des Verkehrsmodells einen hohen Arbeitsumfang zu. Hierfür bildet die Grundlagen-Ermittlung die Voraussetzung und zugleich fortlaufende Form der Wissensaneignung. Die grundlegende Aufbereitung relevanter Informationen wurde im Verlauf des Modellaufbaus deshalb zusätzlich vertieft und erweitert. Wie in der Projektbeschreibung bereits dargestellt, fanden einzelne Arbeitsschritte, wie beispielsweise die Aufbereitung der verkehrlichen Grundlagen (b), somit in Überschneidung mit den Vorarbeiten und dem Aufbau des Verkehrsmodells

statt. Prozessschritte und Erkenntnisse aus themenverwandten Studien konnten auf diese Weise integriert und überprüft werden.

3.2.3 TAP 2.3) Vorarbeiten für Analysen mit Verkehrsmodell / Modellanpassungen (FHE)

Im Rahmen dieses TAP wurden grundlegende Arbeitsschritte zum Modellaufbau durchgeführt, insbesondere zur Überführung der Ausgangsdaten (Tonnenmatrizen) in ein Datenmodell zur Abbildung der Lkw-Fahrten. Hierzu mussten die bereits genannten Datensätze angepasst und einbezogen werden. Auf diese Weise werden beispielsweise die Leerfahrtenanteile und Ladungskennziffern der jeweiligen Gütergruppen berücksichtigt. Zentrale Parameter und deren Berechnung wie die *Aufwände für Ladezeiten, Flächen- und Mengenbedarfe für Ladeinfrastrukturen, max. Erreichbarkeiten von Ladeinfrastrukturen* sind dem Modellwerkstattbericht zu entnehmen. Überschneidungen hat dieses TAP mit TAP 2.5 und TAP 2.6 aufgewiesen.

3.2.4 TAP 2.4) Definition von Basis-Szenarien (FHE)

Auf Grundlage des aktuellen Erkenntnisstandes wurden zentrale Festlegungen getroffen und Zielhorizonte definiert. Als Ausgangsbasis für die Analysen wurde das reine B-Lkw-System „Basis-Szenario (I)“ erstellt. Hierfür wurde ein Expertenworkshop zur Validierung der getroffenen Annahmen zum Verkehrsmodell und zur Ermittlung der für ein 100%-B-Lkw-System notwendigen Ladeinfrastruktur in Q3/2023 durchgeführt. Die für das B-Lkw-System getroffenen Annahmen wurden dabei kritisch hinterfragt und entsprechend den Anmerkungen angepasst.

Auf Grundlage des validierten Basis-Szenarios, wurden die Kombinationsmöglichkeiten mit Oberleitung hinsichtlich von drei Zielhorizonte untersucht. Über eine Zielmatrix wurden diese in der Netzlänge und der Netzstruktur variiert.

Mit der Maximierung der Nachfrage unter der Oberleitung wurde ein erster Zielhorizont definiert, über den die Wirksamkeit eines Oberleitungssystems auf den am stärksten belasteten Fernstraßenabschnitten in Deutschland untersucht werden sollte. Hierbei wurde mit einer zusammenhängenden Netzstruktur gearbeitet, da die maximal belasteten Abschnitte kontinuierlich sind und nicht unterbrochen werden.

Den zweiten Zielhorizont bildete die Etablierung eines Oberleitungssystems, das eine möglichst hohe deutschlandweite Abdeckung ermöglicht. Hierdurch sollten die Erreichbarkeiten maximiert werden. Hinsichtlich dieses Zielhorizonts ist es sinnvoll mit einer abschnittswisen Netzstruktur zu arbeiten, da mit einer geringeren Gesamtlänge der Oberleitung eine höhere Anzahl von Verkehrsbezirken erreicht werden kann. Für die entfernungs-basierte Erreichbarkeitsuntersuchung wurde mit einem Workaround in Visum gearbeitet.

Die Betrachtung der europäischen Dimension und einer damit verbundenen maximalen Abdeckung der TEN-T Netze bildete den dritten Zielhorizont. Hierbei wurde ein Netz entwickelt, das die meistbelasteten TEN-T Streckenabschnitte beinhaltet

Die über die Zielhorizonte angepassten Basis-Szenarien bildeten das Ergebnis eines kontinuierlichen und iterativen Prozesses.

3.2.5 TAP 2.5) Analyse von Basis-Szenarien (I): reines B-Lkw-System als Ausgangs-Szenario (FHE)

Im Rahmen des Teilarbeitspakets 2.5 konnten die vorgesehenen Arbeiten erfolgreich abgeschlossen werden. Wesentliche Modellparameter der Energienachfrage je BAB-Kilometer waren:

- Streckenscharfe Verkehrsbelastung im Straßengüterverkehr
- Energieverbrauch je Lkw
- Verteilung von öffentlichem und privatem Laden

Innerhalb des "Basis-Szenarios (I)" erfolgte eine verkehrszellenscharfe Modellierung der Energienachfrage sowie des resultierenden Nachladebedarfs. Die daraus abgeleitete Dimensionierung der erforderlichen Ladeinfrastruktur wurde einer intensiven und differenzierten wissenschaftlichen Analyse unterzogen. Bei der Konzeption der Ladeinfrastruktur wurde eine methodische Unterscheidung zwischen zwei zentralen Ladetechnologien vorgenommen: dem Niedrigleistungsladen und dem Hochleistungsladen. Diese Differenzierung basiert auf unterschiedlichen Nutzungskonstellationen, insbesondere hinsichtlich des Übernachtladens sowie des Ladens während regulärer Lenkpausen. Eine detaillierte Dokumentation dieser Kategorisierung sowie der iterativen Methodologie bei der Entwicklung der Ladetechnologien wird im Modellierungs-Werkstattbericht präsentiert, welcher als integraler Bestandteil des Abschlussberichtes angefertigt wird.

Bezüglich der erforderlichen Stellflächen für das Nachladen von B-Lkw wurde unter Berücksichtigung zusätzlicher Forschungsarbeiten und Analysen eine verkehrszellenscharfe Quantifizierung der verfügbaren Stellflächen durchgeführt. Die Evaluation basierte auf einer systematischen Erfassung öffentlicher Parkmöglichkeiten, wobei sowohl Parkareale auf Parkplätzen mit WC-Anlagen (PWC), Rastanlagen als auch Autohöfen in die Analyse einbezogen wurden.

3.2.6 TAP 2.6) Analyse von Basis-Szenarien (II): Kombinationsszenarien von B- und O-Lkw-Systemen (FHE)

Das Teilarbeitspaket 2.6 konnte erfolgreich zum Abschluss gebracht werden. Die in Teilarbeitspaket 2.4 konzipierten und entwickelten Netzstrukturen, welche einer umfassenden Evaluierung in diesem Arbeitspaket unterzogen wurden, werden im Rahmen des Modellierungswerkstattberichts ausführlich dargestellt und erläutert.

Im Kontext des Teilarbeitspakets 2.6 erfolgte eine systematische Untersuchung und Bewertung der differenzierten Netzstrukturen anhand eines Kriterienkataloges. Zu diesem Zweck wurden detaillierte Ergebnisse und spezifische Teilanalysen zur Energienachfrage unter Oberleitungssystemen ermittelt und in Relation zur potenziellen Reduktion der erforderlichen Ladeinfrastruktur quantifiziert. Darüber hinaus wurden die signifikanten Auswirkungen auf die Stellplatzverfügbarkeit erfasst und in die Gesamtbetrachtung integriert.

Die Differenzierung hinsichtlich der verschiedenen Ladetechnologien erfolgte analog zum Vorgehen in TAP 2.5. Eine weiterführende Quantifizierung bezüglich des Reduktionspotenzials zwischen den unterschiedlichen stationären Ladetechnologien konnte aufgrund der komplexen Wechselwirkungen und der limitierten Datenbasis nicht mit der erforderlichen wissenschaftlichen Qualität vorgenommen werden.

Im Rahmen des Werkstattberichts wird eine umfassende Einordnung der Ergebnisse in die Gesamtanalyse der Kombinationsszenarien vorgenommen. Diese beinhaltet eine Plausibilisierung sowie eine Analyse hinsichtlich Wechselwirkungen und relevanter Aspekte der Implementierung.

3.2.7 TAP 2.7) Sensitivitätsanalysen zu den Basis-Szenarien (FHE)

Das TAP 2.7 konnte trotz Verzögerungen erfolgreich zum Abschluss gebracht werden. Die im Rahmen der wissenschaftlichen Analyse untersuchten Nutzungskonstellationen der Ladeinfrastruktur sowie die relevanten Batterieparameter zeigten eine signifikante Sensitivität im Hinblick auf die Gesamtsystemkosten.

Insbesondere im Kontext der Kombinationsszenarien wurde ein erheblicher Einfluss der Batteriegößen auf die Gesamtsystemkosten identifiziert. Diese Korrelation zeigte sich in einer Wechselwirkung zwischen technischen Parametern und ökonomischen Faktoren. Für die Implementierung der finalen Sensitivitätsanalysen wurden nach eingehender Evaluation die Parameter der Oberleitungssysteme als Untersuchungsvariablen gewählt. Diese Entscheidung basierte auf der Erkenntnis, dass die Entwicklungsprognosen hinsichtlich batterietechnischer Parameter (insbesondere bezüglich Lebensdauer und Kostenentwicklung) aufgrund der gegenwärtig limitierten Datenbasis und Unsicherheiten in der Technologieentwicklung nur unter beschränkten Datenqualitätsbedingungen erstellt werden können.

Im Rahmen einer systematischen Analyse wurden die Kippunkte der Systemauslegung hinsichtlich zentraler Parameterdimensionen (Durchdringungsraten des Pantographensystems und Nutzungsraten der Oberleitungsinfrastruktur) quantitativ bestimmt und in vier Szenarien abgebildet. Diese Szenarien werden im Kontext des Modellierungs-Werkstattberichts detailliert erläutert und hinsichtlich ihrer Implikationen sowie Anwendbarkeit diskutiert.

Eine Berücksichtigung potenzieller Bündelungseffekte bei Oberleitungssystemen wurde in der gegenwärtigen Modellierung exkludiert, da die Abbildung solcher Effekte im aktuellen Modellierungskontext nur unter erheblichen Unsicherheiten ermöglicht werden kann.

3.2.8 TAP 2.8) Vorgezogene, parallele und nachgelagerte Zusatz-Analysen (FHE)

Im Rahmen des Teilarbeitspakets 2.8 wurden umfassende Untersuchungen durchgeführt, mit besonderem Fokus auf die verkehrszellenscharfe Erfassung der Stellplatzkapazitäten für Lkw. Als Ergebnis wurde ein detaillierter, georeferenzierter Datensatz erstellt, der sowohl die Lage als auch die quantitative Stellplatzkapazität aller relevanten Parkmöglichkeiten dokumentiert.

Im Kontext dieses Teilarbeitspakets wurde zudem mittels einer Masterarbeit eine wissenschaftliche Analyse der spezifischen Herausforderungen, Risiken und Chancen beim Aufbau von Ladeinfrastruktur für B-Lkw vorgenommen. Die empirische Basis hierfür bildete eine strukturierte Befragung von Experten aus verschiedenen relevanten Sektoren, darunter Logistik, Energiewirtschaft, Fahrzeugherstellung sowie Wissenschaft.

Die in Tabelle 1 systematisch dargestellten Ergebnisse verdeutlichen, dass die Experten insbesondere eine zunehmende Flächenknappheit, verlängerte Planungsprozesse sowie unzureichende politische Steuerungsmaßnahmen als kritische Faktoren identifizieren. Als zentrale Herausforderungen wurden primär Kostenaspekte sowie die komplexe Technologiediffusion benannt, während als potenzielle Chancen vor allem Effizienzgewinne, Beiträge zur Netzstabilisierung sowie finanzielle Förderinstrumente herausgestellt wurden.

Tabelle 1 Expertenmeinungen zum Ausbau von LI für E-Lkw

Ausbau einer Ladeinfrastruktur für Lkw					
Risiken		Herausforderungen		Chancen	
Flächenknappheit	Die bestehende Anzahl an Lkw-Stellplätzen an Rastanlagen ist schon aktuell nicht ausreichend	Hohe Investitionskosten	Zusätzlich: Unklarheit über zukünftige, langfristige Rentabilität	Effizienzsteigerung durch MCS-Laden	Kürzere Ladezeiten; Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von E-Lkw
Infrastrukturausbau	Lange Dauer des Infrastrukturausbaus; Für Netzanschlüsse teilweise bis zu 10 Jahre Planungszeit erforderlich	Zukünftige Technologie	Wird sich langfristig das MCS-Laden oder Batterietauschsysteme durchsetzen? Oder wird es einen Mix aus beiden Technologien geben?	Netzstabilisierung/ Lastmanagement	Vermeiden von Netzüberlastungen – insbesondere durch flexible Ladezeiten
Standardisierung	Zu viele unterschiedliche Systeme; unklares, nicht einheitliches Abrechnungssystem	Bürokratische Herausforderungen	Verzögerungen beim Ausbau einer geeigneten Ladeinfrastruktur durch langfristige und komplexe Planungsprozesse	Kosteneffizienz/ Marktdruck	Umdenken bei Logistikunternehmen; Wechsel zu E-Mobilität
				AFIR-Regulierung/ Politische Förderungen	Politische bzw. gesetzliche Vorgaben tragen zum Markthochlauf bei

3.2.9 TAP 2.9) Bewertung der Basis-Szenarien (FHE, BUW)

Das spezifische TAP und die damit verknüpfte Bewertung der konzipierten Szenarien konnte erfolgreich zum Abschluss gebracht werden. Auf der Grundlage der durch einen iterativen Entwicklungsprozess optimierten Parameter sowie der ausgearbeiteten Oberleitungsnetzstrukturen wurde eine ökonomische Quantifizierung der verschiedenen Szenarien implementiert.

Diese Analyse umfasste eine systematische Erfassung relevanter Kostenfaktoren und eine differenzierte Betrachtung von Investitions- und Betriebskosten. Die resultierenden quantitativen Ergebnisse ermöglichten einen Vergleich der unterschiedlichen Szenarien hinsichtlich ihrer Effizienz und Implementierbarkeit.

Eine detaillierte und strukturierte Darstellung der Methodik, der berücksichtigten Kostenparameter sowie der generierten Ergebnisse wurde im Modellierungs-Werkstattbericht aufbereitet.

3.3 AP 3) Hochlauf-Pfade und internationale Einbettung (FHE, BUW)

Das AP3 verzeichnete einen um mehrere Monate verzögerten Projektstart. Nach einer entsprechenden Restrukturierung der Arbeitsplanung wurden alle Teilarbeitspakete erfolgreich abgeschlossen.

Die Aktivitäten fokussierten sich primär auf die Etablierung eines fundierten theoretischen Fundaments für die Beantwortung der entsprechenden Fragestellungen. Die Entwicklung und Modellierung der Hochlaufpfade erfolgte unter Integration und Berücksichtigung der in AP 2 generierten Ergebnisse, wodurch eine Verknüpfung der verschiedenen Projektkomponenten gewährleistet wurde.

3.3.1 TAP 3.1) Hochlauf-Pfade (bei zunächst nur nationaler Betrachtung) (FHE)

Bei der Konzeption der Hochlaufpfade wurden die im AP1 generierten Erkenntnisse integriert, die einen prioritären und beschleunigten Aufbau stationärer Ladeinfrastruktur als strategische "No-Regret-Entscheidung" identifizieren und empfehlen. Gemäß der entwickelten Strategie sollte die Implementation der stationären Ladeinfrastruktur nach einem flächendeckenden Grundprinzip erfolgen, während die Kapazitätserweiterung an spezifischen Standorten bedarfsorientiert und nachfragegesteuert vorgenommen werden sollte. Bezüglich der dynamischen Oberleitungs-Ladeinfrastruktur wurde ein zeitlich verzögerter Implementierungsansatz als vorteilhaft bewertet, wobei diese technologische Option kontinuierlich weiterentwickelt und als strategische Alternative aufrechterhalten werden sollte.

In die Entwicklung der nationalen Hochlaufpfade flossen zudem Ergebnisse aus dem AP 2 ein. Darüber hinaus wurden die Szenarien in Relation zu nationalen Zielvorgaben und Ankündigungen von Marktakteuren in Zusammenhang gesetzt, um ihre Realisierbarkeit und Kompatibilität mit dem politischen und wirtschaftlichen Umfeld zu gewährleisten.

3.3.2 TAP 3.2) Internationaler Kontext (FHE)

Aspekte der internationalen Integration des Aufbaus von stationärer oder dynamischer Ladeinfrastruktur für Lkw wurden bereits im Rahmen des AP 1 untersucht und hinsichtlich ihrer Relevanz grundsätzlich eingeordnet. Das Projektteam nahm an verschiedenen Veranstaltungen für Wissenschaft, Politik und Industrie teil, bei denen die internationale Koordination diskutiert wurde. Zudem wurden aktuelle Veröffentlichungen in diesem Bereich vorbereitend erfasst. Hierdurch wurde eine Ausgangsbasis geschaffen, auf der weitere Analysen aufbauen konnten.

Die innerdeutschen Aufbaupfade wurden mithilfe von gewählten Kriterien bewertet. Ein Kriterium dabei war die Übereinstimmung mit bestehenden TEN-T Korridoren. Diese haben eine übergeordnete Bedeutung für die internationale Einbettung und sind daher im Kontext des TAP 3.2 zu bevorzugen. Ausgewählte innerdeutsche Strecken, die ein Teil des TEN-T Netzes sind, werden dabei priorisiert.

Im Falle keines europaweit koordinierten Aufbaus von Oberleitung bzw. eines alternativen ERS-Systems müssen grenzüberschreitende Technologien eine größere Berücksichtigung finden. Allem voran handelt es sich dabei um stationäre Ladeinfrastruktur für B-Lkw.

Besonders relevant im internationalen Kontext ist die AFIR, die zum aktuellen Zeitpunkt keine konkreten Zahlen für den Aufbau eines ERS-Systems beinhaltet. Hierbei sollen in diesem TAP Empfehlungen zur

Anpassung und Quantifizierung des ERS-Ausbaus und der stationären Ladeinfrastruktur getroffen werden.

3.3.3 TAP 3.3) Hochlauf-Pfade und internationale Einbettung (FHE)

Im TAP 3.3 wurde im Rahmen der weiteren Untersuchungen zur Entwicklung des TEN-T Netzwerks umfassende Recherchen zu dessen Zielen sowie den zugrunde liegenden Regelwerken durchgeführt. Dabei wurde insbesondere der Arbeitsprozess an den TEN-T Regelungen analysiert, um die aktuellen Anforderungen an das europäische Straßennetzwerk vollständig abzubilden. Zur Visualisierung und weiteren Nutzung wurde das TEN-T Netz im GIS-Format digitalisiert, wodurch eine belastbare Grundlage für nachfolgende Projektschritte geschaffen wurde.

Ein zentraler Bestandteil der Untersuchungen war die Abgrenzung zwischen Europastraßen und dem TEN-T Netzwerk, um Unterschiede in Struktur und Funktion der beiden Systeme klar herauszuarbeiten. Darüber hinaus wurde eine umfassende Analyse der aktuellen Strategien und Planungen zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs in verschiedenen Ländern durchgeführt. Dies beinhaltete eine systematische Gegenüberstellung der jeweiligen nationalen Ansätze, insbesondere hinsichtlich batterieelektrischer Lkw, Oberleitungs-Lkw sowie wasserstoffbasierter Antriebsformen.

Die Untersuchung erfolgte sowohl aus einer nationalen als auch aus einer europäischen Perspektive, um potenzielle Auswirkungen und Herausforderungen der unterschiedlichen Strategien zu identifizieren. Dabei wurden nationale Zielsysteme sowie ein übergeordnetes europäisches Zielsystem betrachtet. Ein wesentliches Ergebnis dieser Analysen war die Notwendigkeit, mögliche Kompatibilitätsprobleme zwischen den verschiedenen Ansätzen zu erkennen und geeignete Maßnahmen zu ihrer Abmilderung zu entwickeln. Ein weiterer Fokus lag auf der integrierten Planung der Energieversorgung für Lkw und Pkw, wobei offene Fragen zur Infrastruktur und Energieverteilung identifiziert und weiterführend untersucht wurden.

3.4 AP 4) Zentrale (insbesondere institutionenökonomische und juristische) Fragen der Umsetzung des Aufbaus eines B- und O-Lkw-Systems (BUW, FHE)

Im AP 4 wurde die Ausgestaltung des institutionellen Rahmens für eine effektive und effiziente Transformation hin zum klimaneutralen SGV untersucht. Wie bereits im Projektantrag erwähnt, fanden erste Analysen zur institutionellen Ausgestaltung bereits parallel zur Bearbeitung der vorherigen AP statt. Denn institutionelle Herausforderungen von bestimmten Lkw-Systemen oder Kombinationen von Lkw-Systemen und diesbezügliche Unsicherheiten können sich auf die Eignung der alternativen klimaneutralen Lkw-Systeme sowie Kombinationen auswirken.

Durch die hohe Relevanz von technisch-systemischem Wissen sowie verfassungs-, europa- und vergaberechtlicher Expertise für die Ausgestaltung des institutionellen Rahmens wies dieses AP interdisziplinäre Elemente auf.

3.4.1 TAP 4.1) Planung und Umsetzung des Stromnetzanschlusses von O-Infrastruktur (sowie ergänzend auch Ladeinfrastruktur) im Bereich der Fernverkehrsachsen (BUW)

In diesem TAP wurden die Gestaltungsfragen zur technisch-systemischen Ausgestaltung von Stromnetzanschlüssen für die Oberleitungsinfrastruktur systematisiert sowie erste Vorschläge für eine organisatorische Lösung für die Planungsdurchführung und -umsetzung vorgedacht, wobei Interdependenzen zur stationären Ladeinfrastruktur berücksichtigt wurden. Die Bearbeitung des TAP 4.1 hing zu einem gewissen Umfang von den Erkenntnissen aus dem AP 2 ab, die Rückschlüsse auf einen vorzugswürdigen Umfang von Oberleitungsinfrastruktur ermöglichten. Ferner wurden Überlegungen im TAP 4.1 durch den Einbezug von Partnern mit energietechnischer und -wirtschaftlicher, aber auch rechtswissenschaftlicher Expertise geprüft und erweitert, sodass schließlich Handlungsempfehlungen für die (technisch-systemische) Planung sowie für die Organisation der Planungsdurchführung und -umsetzung von Stromnetzanschlüssen der Oberleitungsinfrastruktur abgeleitet werden konnten.

Es fand ein Workshop mit Consentec statt, die als Unterauftragnehmer mit energietechnischer und -wirtschaftlicher Expertise einbezogen wurden. In diesem Workshop wurden auf Grundlage der Vorarbeiten technisch-systemische Fragestellungen zu Netzanschlusskonzepten von Oberleitungs-Ladeinfrastruktur sowie punktförmige Ladeinfrastruktur diskutiert. Ferner wurden daraus resultierende Implikationen auf die Planung der Stromnetze im Allgemeinen und der Stromnetzanschlüsse für die Ladeinfrastruktur im Speziellen thematisiert. In diesem Kontext wurde auch die aktuelle Netzentgeltssystematik von Consentec dargelegt, die sich auf die betriebswirtschaftliche Bewertung verschiedener Netzanschlusskonzepte auswirken kann. Im Anschluss an den Workshop wurde von Consentec ein Beitrag zu den diskutierten Themen verfasst.

3.4.2 TAP 4.2) Organisation, Procurement-Ansatz und Betriebsführung bei O-Infrastruktur sowie Aufgabenwahrnehmung bezüglich Systemintegration bei O-Lkw-System (BUW)

Teil dieses TAPs war die Aufarbeitung der Aufgabenbereiche für die Bereitstellung von Oberleitungs-Infrastruktur sowie die Interdependenzen mit den Aufgabenbereichen für die Bereitstellung von

stationärer Ladeinfrastruktur. In diesem Kontext konnte gemäß den Überlegungen aus der Vorhabensbeschreibung auf Erkenntnisse aus dem HoLa-Projekt zurückgegriffen werden, in dem organisatorische Lösungen für die Bereitstellung von stationärer Ladeinfrastruktur entwickelt wurden, wobei auch übergreifende Fragen der Systemintegration im Allgemeinen und der Bedarf von Transportunternehmen nach Mobilitätsoptionen im Speziellen berücksichtigt wurden.

Im Rahmen einer engen interdisziplinären Zusammenarbeit mit juristischen Partnern wurde die Umsetzbarkeit aus ökonomischer Perspektive vorteilhafter organisatorischer Lösungsoptionen geprüft. Es wurde unter Berücksichtigung der verfassungs-, europa- und vergaberechtlichen Rahmenbedingungen die organisatorischen Lösungen (weiter)entwickelt oder Vorschläge zur Anpassung des Verfassungs-, Europa- und Vergaberechts erarbeitet, um eine aus gesamtwirtschaftlicher Sicht effektive und effiziente Bereitstellung der Oberleitungsinfrastruktur zu ermöglichen.

Der Aufbau von Oberleitungs-Ladeinfrastruktur setzt grundsätzlich eine weitgehend öffentliche zentrale Planung und somit auch Festlegung einer Aufbaustrategie (Gesamtlänge, Verortungsstrategie, Qualität) voraus. Diese Entscheidungen weisen Interdependenzen zum Finanzierungsmodell auf. Zur Einordnung von aus ökonomischer Sicht vorteilhaften Organisations- und Finanzierungsmodellen wurde die Rechtsanwälte Partnerschaft Wurster Weiss Kupfer (W2K) als Unterauftragnehmer einbezogen. Im Anschluss an mehrere Diskussionstermine wurde von W2K in einem Rechtsgutachten der europa- und verfassungsrechtliche Rahmen für die Organisation und Finanzierung der L-O-LI dargestellt. Folgend werden nur – in sehr verkürzter Weise – einige für die ökonomischen Untersuchungen wesentlichen Aspekte aufgezeigt.

Die juristischen Analysen zeigen auf, dass der Bund Eigentümer der Oberleitungs-Ladeinfrastruktur sein muss, die als Bestandteil der Bundesfernstraßen bzw. Bundesautobahnen anzusehen ist. Der Bund kann Private zur Aufgabenwahrnehmung einbeziehen, wobei die Aufgabenverantwortung beim Bund bleiben und somit stets eine Steuerfähigkeit des Bundes sichergestellt werden muss. Dies ist durch das Verfassungsrecht begründet, während sich bei Beachtung des EU-Rechts kein Widerspruch ergibt. Ferner sei darauf hingewiesen, dass der Einbezug der Autobahn GmbH unkompliziert machbar sein dürfte, solange diese nicht unternehmerisch tätig ist. Der Ausgestaltung des Einbezugs Privater werden dagegen – insbesondere durch das Beihilferrecht – Grenzen gesetzt. Die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Organisation der Strombelieferung sind davon abhängig, ob die Oberleitungs-Ladeinfrastruktur als ein Verteilnetz im Sinne der Energiebinnenmarkt-Richtlinie einzuordnen ist. Bei einer Einordnung als Verteilnetz ist eine freie Wahl des Stromlieferanten zu gewährleisten, sodass ein „Durchleitungs-Modell“ entwickelt werden muss. Es sei aber darauf hingewiesen, dass die Einordnung der Oberleitungs-Ladeinfrastruktur als Verteilnetz sehr zweifelhaft ist.

Das „Durchleitungs-Modells“ und somit der Ermöglichung der freien Wahl des Stromlieferanten wurde von Consentec aus der energiewirtschaftlichen Perspektive betrachtet. Der Beitrag von Consentec enthält eine Beschreibung möglicher Umsetzungsvarianten. Aufgrund der grundlegenden Parallelen wurde auch die Organisation der Strombelieferung im Bahnstromsystem dargelegt.

3.4.3 TAP 4.3) Instrumenten-Design des (effektiven und effizienten) gekoppelten Aufbaus von B- und O-Lkw-Systemen (u.a. Finanzierung, Bepreisung und ggf. Förderung, Lenkung) (BUW)

Zunächst konnten Untersuchungen aus AP 1 aufgegriffen werden, die bereits Potenziale und Herausforderungen einer sequentiellen Entscheidungsfällung zum Umgang mit Unsicherheiten adressieren. Weiterhin bestehen gemäß den Überlegungen in der Vorhabensbeschreibungen Synergien zwischen diesem TAP und dem HoLa-Projekt, in dem sowohl Finanzierungslösungen für stationäre Ladeinfrastruktur als auch Bepreisungsregime für die stationäre Ladeinfrastruktur thematisiert werden. Nach ersten Erkenntnissen dürfte die Durchsetzung von aus Gesamtsicht vorteilhaften Bepreisungsregeln für Oberleitungsinfrastruktur deutlich einfacher sein als für stationäre Ladeinfrastruktur. Die Wechselwirkungen zwischen dem Instrumenten-Design für stationäre und Oberleitungsinfrastruktur sowie die Interdependenzen zu den Arbeiten aus TAP 4.2 sind dabei stets mitzudenken.

Weiterhin wurde in der interdisziplinären Zusammenarbeit die Rationalität zusätzlicher staatlicher Eingriffe für einen effektiven und effizienten Aufbau von B- und OB-Lkw-Systemen untersucht, die Elemente der Lkw-Systeme neben der Ladeinfrastruktur betreffen und zum Beispiel an der Fahrzeuginvestition ansetzen.

Wenn die Entscheidung für ein OB-Lkw-System und somit den Aufbau von Oberleitungs-Ladeinfrastruktur getroffen wird, ist es aus ökonomischer Sicht sinnvoll, die Oberleitungs-Ladeinfrastruktur auch in einem größtmöglichen Umfang zu nutzen. Dadurch stellten sich Fragen zur Lenkung zwischen Oberleitungs-Ladeinfrastruktur und Säulen-Ladeinfrastruktur. In diesem Kontext sind insbesondere die Finanzierung und Bepreisung der (Oberleitungs-)Ladeinfrastruktur von Relevanz. Die Strombelieferung und die damit verbundenen Kosten werden dabei nicht berücksichtigt, da diese grundsätzlich in gleicher Weise für Oberleitungs- und Säulen-Ladeinfrastruktur anfallen dürften. In dem Rechtsgutachten des Unterauftragnehmers W2K werden u.a. die Rahmenbedingungen für verschiedene Finanzierungsmodelle für die Oberleitungs-Ladeinfrastruktur herausgearbeitet und im Hinblick auf die potenziellen Lenkungswirkungen diskutiert. Ferner werden weitere finanzielle Instrumente, die die Nutzung der Oberleitungs-Ladeinfrastruktur erhöhen könnten, thematisiert. Im Folgenden werden einige zentrale Aspekte kurz angesprochen.

Grundsätzlich ist eine Finanzierung der Oberleitungs-Ladeinfrastruktur über gesonderte Gebühren für die Nutzer, über die Lkw-Maut oder über Haushaltsmittel machbar. Da die Finanzierung über die Lkw-Maut oder Haushaltsmittel als Beihilfe für Transportunternehmen mit Lkw mit Pantographen eingeordnet werden dürfte, ist es zu empfehlen, das Finanzierungsmodell bei der EU-Kommission zu notifizieren und erst nach einer positiven Entscheidung umzusetzen. Diese Finanzierungsmodelle zeichnen sich beide durch die aus ökonomischer Sicht anzustrebende Lenkungswirkung aus, wenn die Säulen-Ladeinfrastruktur durch die Nutzer finanziert wird. Denn die Infrastrukturkosten würden nicht nur von den Nutzern der Oberleitungs-Ladeinfrastruktur getragen, sondern auf eine breitere Basis verteilt. Wenn die Finanzierung der Ladeinfrastruktur grundsätzlich über Nutzergebühren erfolgt, sind für die Oberleitungs-Ladeinfrastruktur Zuschüsse durch den Haushalt denkbar, um die Nutzergebühren zu senken und Lenkungseffekte zu erzielen. Dies dürfte bei der Verwaltung der Oberleitungs-Ladeinfrastruktur durch die Autobahn GmbH unkompliziert möglich sein, während sich beim

tiefgehenden Einbezug Privater beihilferechtliche Fragen stellen. Weiterhin könnte in Betracht gezogen werden, die Nutzer der Oberleitungs-Ladeinfrastruktur direkt zu fördern oder bei einem gemeinsamen Gebührensystem von Oberleitungs- und Säulen-Ladeinfrastruktur die Gebühren zu differenzieren, wobei der Differenzierung Grenzen gesetzt sind.

Eine umfassende und vertiefte Darstellung zu Finanzierungsmodellen und Instrumenten für eine aus ökonomischer Sicht anzustrebende Lenkung beinhaltet das Rechtsgutachten.

3.4.4 TAP 4.4) Weitere Fragestellungen (TAP 4.4.a: Strombelieferung, Messwesen und damit einhergehende Vertriebsfragen; TAP 4.4.b: B- und O-Lkw-System übergreifende Vertriebsfragen) (BUW)

Im Rahmen dieses TAP wurden weitere Fragestellungen der Umsetzung des Aufbaus eines B- und eines OB-Lkw-Systems vertieft beleuchtet. Vertiefungen zu Kapazitätsallokation im Allgemeinen und Reservierungssystemen für stationäre Ladeinfrastruktur im Speziellen wurden bearbeitet.

Fragen der Strombelieferung wurden integriert mit TAP 4.2 und 4.3 betrachtet. Fragen zum Vertrieb wurden im Rahmen des Projekts nicht vertiefter betrachtet, da im Laufe des Projekts dort kein Schwerpunkt gesetzt wurde.

3.5 AP 5) Zusammenführen der Ergebnisse (FHE, BUW)

Das Arbeitspaket 5 wurde vollständig abgeschlossen. Dieses Arbeitspaket konzentriert sich auf die systematische Zusammenführung und Dokumentation der in den vorherigen Projektphasen erarbeiteten Forschungsergebnisse.

Die methodische Vorgehensweise sieht vor, dass für die Arbeitspakete 1 und 2 ein eigenständiger, strukturierter Bericht erstellt wird, die sich in der Darstellung unterscheiden. Durch diese Dokumentation wird eine ganzheitliche Perspektive auf die Forschungsergebnisse ermöglicht.

3.6 AP 6) Workshops (FHE, BUW)

Für den Projekterfolg und die Richtigkeit der Ergebnisse waren externe Workshops unabdingbar. Ziel dabei war es, zum einen Informationen einzuholen, Zwischenergebnisse kritisch zu hinterfragen, sowie das Projekt und die damit verbundenen Erkenntnisse nach außen zu tragen. Im Projektzeitraum haben folgende externe Workshops und Treffen stattgefunden:

- Am 06.05.2022 wurde im Rahmen des Statustreffens von BUW, FHE und VDI/VDE die geplante Vorgehensweise sowie der aktuelle Stand der Kurzstudie im Rahmen des AP 1 vor- und zur Diskussion gestellt. Die Präsentationsunterlagen sind im Anhang I.
- Am 08.09.2022 wurde im Rahmen eines internen Workshops zur Kurzstudie der rote Faden sowie insbesondere die Gegenüberstellung des B- und des OB-Lkw-Systems diskutiert. Die Präsentationsunterlagen sind im Anhang I.
- Am 05.12.2022 war ein Workshop mit relevanten Stakeholdern (BMWK, VDI/VDE, BMDV, NLL, Autobahn GmbH, Infrastrukturhersteller, OEM, Logistik- und Speditionsunternehmen, Forschende) zur Kurzstudie „Technologieoptionen für den Straßengüterverkehr. Gesamtwirtschaftliche Rationalität, Kombinationsoptionen und kurzfristige Handlungsempfehlungen aus entscheidungstheoretischer Sicht“ geplant. Der Workshop wurde aufgrund von Krankheitsfällen im Team auf den 16.01.2023 verschoben werden. Die Präsentationsunterlage, das Papier sowie die Teilnehmenden Liste sind im Anhang II.
- Am 16.01.2023 fand ein Workshop zu den Untersuchungen sowie resultierenden Erkenntnissen und Handlungsempfehlungen des AP 1 mit relevanten Stakeholdern statt.
- Am 22.02.2023 wurde im Rahmen einer Summary for Policymakers der aktuelle Stand des Projektes dem Projektträger VDI/VDE sowie Herrn Scheffer als Vertreter des BMWK vorgestellt. Die Präsentationsunterlagen finden sich im Anhang I.
- Am 05.04.2023 erfolgte ein Treffen mit Fraunhofer IEE zur Abstimmung der Lkw-Szenarien im Rahmen des Projekts DeVKopSys2. Die Präsentationsunterlagen sind im Anhang II zu finden.
- Am 31.07.2023 fand ein Workshop zur Validierung der getroffenen Modellannahmen mit verschiedenen Stakeholdern (Fraunhofer ISI, ifeu, TU Dresden, Traffix) statt. Angeschlossen an den Workshop konnten die Modellparameter abschließend festgelegt werden. Die Unterlagen sind im Anhang III zu finden.
- Am 29.01.2024 fand ein Treffen mit dem Projektträger VDI/VDE zur Erstellung eines Policy Briefs statt. Die Unterlagen sind im Anhang zu finden
- Am 06.02.2024 erfolgte ein Treffen mit dem Projekt enERSyn zur Abstimmung einer möglichen Zusammenarbeit. Die Präsentationsunterlagen sind im Anhang zu finden.

- Am 20.03.2024 wurde im Rahmen eines Projekttreffens der aktuelle Stand des Projektes dem Projektträger VDI/VDE sowie Herrn Scheffer als Vertreter des BMWK vorgestellt. Die Präsentationsunterlagen finden sich im Anhang.
- Am 09.12.2024 fand ein Treffen mit der deutschen Versicherungswirtschaft statt. Die Unterlagen befinden sich im Anhang.
- Am 11.12.2024 wurden Ergebnisse im Rahmen der ELISA-Abschlusskonferenz präsentiert. Die Folien befinden sich ebenfalls im Anhang.
- Ferner hat das Projektteam regelmäßig an dem von WSP und Fraunhofer ISI organisierten „ERS Forum“ teilgenommen.

Neben den aufgelisteten Workshops fand eine Vielzahl von Projekttreffen innerhalb des Projektkonsortiums statt. Ferner wurden die Zwischenergebnisse auf durch Dritte organisierten Veranstaltungen zur Diskussion gestellt (vgl. Abschnitt 5).

4 Darstellung wesentlicher Abweichungen zum Arbeitsplan

Wie der Abbildung 1 zu entnehmen, befanden sich die Arbeiten weitestgehend im Plan bzw. im Zeitplan analog zum verspäteten Beginn der Arbeiten und der 6-monatigen kostenneutralen Verlängerung für die FHE sowie eine 4-monatige kostenneutrale Verlängerung der BUW annehmend. Die Arbeiten in AP 1 nahmen vor dem Hintergrund der Tiefe der Analysen und ihrer Relevanz für die verkehrspolitische Diskussion einen größeren Umfang ein, als zu Projektbeginn erwartet.

Die Interdependenzen der TAP in AP 2 erschwerten die eindeutige Trennung untereinander, was der Abbildung zu entnehmen ist. Das gesamte AP3 war in gewissem Maße ebenfalls vom AP2 abhängig und war daher ebenfalls verzögert gegenüber dem ursprünglichen Projektplan; allerdings wurden im Rahmen des AP 1 bereits umfangreiche (Vor-)Arbeiten für AP 3 durchgeführt. Ferner ist festzustellen, dass durch die intensive Arbeit im AP2 bereits eine Vielzahl der AP3-Fragestellungen im Vorhinein adressiert wurde. Weiterhin haben sich Verzögerungen bei den Vergaben von Unteraufträgen zur Einbeziehung juristischer Partner sowie Partner mit energietechnischem und -wirtschaftlichen Spezialwissen ergeben.

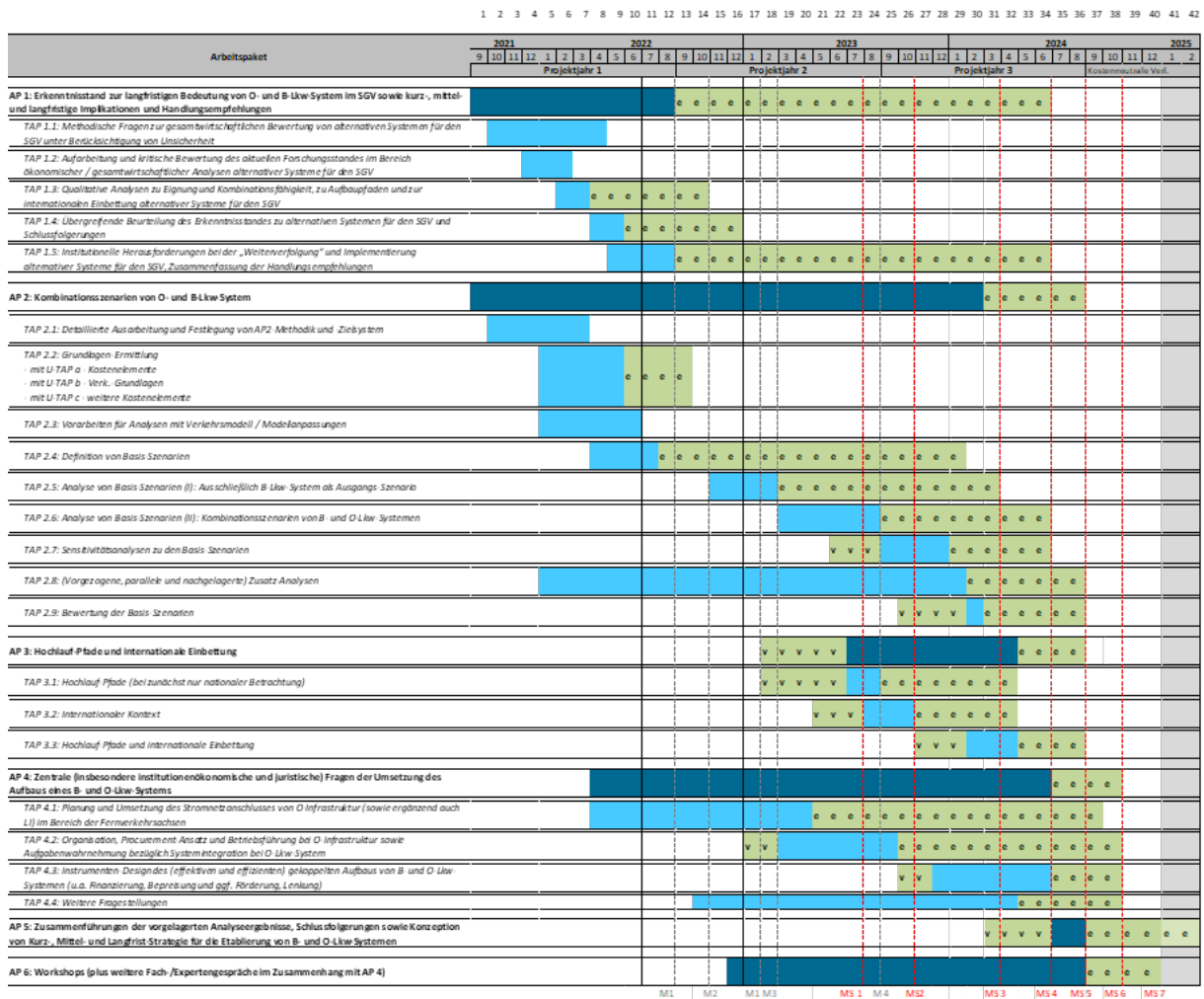


Abbildung 1 Ablaufplan Projekt ESOB-RKI inkl. Meilensteine

Änderungen der Aussichten für die Erreichung der Ziele des Vorhabens

Verzögerte Startzeiten (v), erweiterte Bearbeitungszeiten (e) und die kostenneutrale Verlängerung wurden im Zeitplan vermerkt. Einige Meilensteine wurden mit Verzögerung erreicht, jedoch hat dies keine Auswirkungen auf die Gesamterreichung der Projektziele.

Der erste Meilenstein bzw. der inhaltliche Abschluss vom AP1 konnte erreicht werden. Dabei konnte die Studie fertiggestellt und veröffentlicht werden. Die Ergebnisse des AP 1 wurden im Rahmen des Workshops bestätigt. AP2 und die damit verbundenen Vorarbeiten konnten im Q4/2023 abgeschlossen werden, dabei wurden Erkenntnisse aus dem Validierungsworkshop im Modell implementiert. Aufgrund der Wechselwirkungen der verschiedenen Basisszenarien in AP2 wurde AP3 mit leichter Verzögerung, in Q1/2024 abgeschlossen. Für AP4 trifft dies ebenfalls zu. Die weiteren für den Projekterfolg relevanten Meilensteine wurden entsprechend der kostenneutralen Verlängerung verschoben und erreicht. Anzumerken ist, dass die Unterauftragsvergabe in AP 4 aufgrund der hohen Komplexität der Vergaben verzögert war.

5 F&E-Ergebnisse von dritter Seite

Im Zuge dieses Projekts wurden kontinuierlich und gründlich Forschungsergebnisse sowie Veröffentlichungen von Dritten im Zusammenhang mit den Projekthaltungen recherchiert. Diese Informationen waren für die inhaltlichen Ergebnisse relevant und haben keine Änderung der (methodischen) Durchführung des Projekts oder der betrachteten Fragestellungen sowie der Gesamtzielsetzung bewirkt. Im nächsten Abschnitt sind die bedeutendsten Forschungserkenntnisse, Veröffentlichungen und Veranstaltungen von Dritten im Berichtszeitraum aufgeführt, die im Rahmen des ESOB-RKI-Vorhabens berücksichtigt wurden sowie bei denen Zwischenergebnisse präsentiert wurden.

Wesentliche Veranstaltungen:

- a) Oberleitungs-Vernetzungstreffen (Präsentation von Zwischenergebnissen)
- b) BMDV-Konferenz: Ladeinfrastrukturkonferenz, Klimafreundliche Nutzfahrzeuge
- c) Transport Logistics
- d) European Electric Road Systems Symposium (Eigene Präsentation zur AP1-Studie im Anhang)
- e) World Road Congress (PIARC) (Eigene Paper und Poster zu AP 1 und AP 2 sowie Präsentation zu AP 1 im Anhang)
- f) Transport Research Arena (Eigene Paper und Poster zu und AP 2)
- g) Tensions of Europe (Konferenzbeitrag)

Wesentliche Veröffentlichungen:

- a) Task-Force „Dynamisches und stationäres Laden mithilfe der Oberleitungstechnologie“ des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV)
- b) Task-Force „Backcasting – Ladeinfrastruktur für schwere Nutzfahrzeuge“ des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) (Abschluss Dez 2021)
- c) Innovationscluster des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV)
- d) Nationale Plattform Zukunft der Mobilität. AG 6 (2021): Schwere Nutzfahrzeuge. Standards und Normen für alternative Antriebe.
- e) Widegren, F., Helms, H. et al. (2021): Ready to go? Technology Readiness and Life-cycle Emissions of Electric Road Systems. A discussion paper from the COLLERS2 project.
- f) BCG (2021): Klimapfade 2.0. Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft.
- g) BMDV (2022): Fortschrittsbericht zum Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge
- h) Die Bundesregierung (2022): Masterplan Ladeinfrastruktur II der Bundesregierung
- i) Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur (2022): Einfach laden an Rastanlagen
- j) Fredrik Widegren, Hinrich Helms, Florian Hacker, Matts Andersson, Till Gnann, Marcus Eriksson, Patrick Plötz (2022): Ready to go? Technology Readiness and Life-cycle Emissions of Electric Road Systems. A discussion paper from the COLLERS2 project International Transport Forum (2022): Decarbonising Europe's Trucks: How to Minimise Cost Uncertainty
- k) Florian Hacker, Julius Jöhrens, Daniel Speth, Robert Wallace (2022): Mögliche Ausbauschritte für eine Oberleitungsinfrastruktur für den Straßengüterverkehr in Deutschland. Eine

kriterienbasierte Analyse. Hintergrundpapier im Rahmen des Projekts BOLD (Begleitforschung Oberleitungs-Lkw in Deutschland). Berlin, Heidelberg, Karlsruhe: Öko-Institut, ifeu, Fraunhofer ISI.

- l) K. Göckeler, J. Heinzemann, F. Hacker, L. Lesemann, L. Ziegler, T. Bernecker (2022): Anforderungen der Logistikbranche an einen Umstieg auf klimaschonende Fahrzeugtechnologien. Ergebnisbericht einer standardisierten Befragung. Zweiter Teilbericht des Forschungs- und Dialogvorhabens StratES. Berlin, Heilbronn: Öko-Institut, Hochschule Heilbronn.
- m) ITF (2022): Decarbonising Europe's Trucks. How to Minimise Cost Uncertainty. International Transport Forum Policy Papers, No. 107, OECD Publishing, Paris.
- n) D. Speth, S. A. Funke (2022): Comparing Options to Electrify Heavy-Duty Vehicles. Findings of German Pilot Projects.
- o) J. Rogstadius (2022): Interaction Effects between Battery Electric Trucks, Electric Roads and Static charging Infrastructure. Results from high resolution simulation of goods transport on the Swedish road network during 2020-2050.
- p) Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur (2023): Einfach laden am Depot.
- q) Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur (2023): Einfach E-Lkw laden (User Journey).
- r) Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie – NOW GmbH (2023): Marktentwicklung klimafreundlicher Technologien im schweren Straßengüterverkehr. Auswertung der Cleanroom-Gespräche 2022 mit Nutzfahrzeugherstellern.
- s) K. Göckeler, I. Steinbach, W. K. Görz, F. Hacker, R. Blanck, M. Mottschall (2023): StratES – Szenarien für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs. Studie auf Basis von Markthochlaufmodellierungen. Dritter Teilbericht des Forschungs- und Dialogvorhabens StratES. Berlin: Öko-Institut.
- t) F. Hacker, J. Jöhrens, M. Gather, M. Hartwig, T. Gnann, K. Göckeler, P. Plötz, M. Lehmann (2023): Expansion Strategies for Electric Road Systems (ERS) in Europe. A working paper from the COLLERS2 project.
- u) W. Shoman, S. Yeh, F. Sprei, P. Plötz, D. Speth (2023): Battery electric long-haul trucks in Europe: Public charging, energy, and power requirements. Transportation Research Part D
- v) J. Menter, T.-A. Fay, A. Grahle, D. Göhlich (2023): Long-Distance Electric Truck Traffic: Analysis, Modeling and Designing a Demand-Oriented Charging Network for Germany; World Electric Vehicle Journal, Bd. 14, Nr. 8, S. 205.
- w) C. de Saxe, D. Ainalis, J. Miles, P. Greening, A. Gripton, C. Thorne, D. Cebon (2023): An electric road system or big batteries: Implications for UK road freight, Transportation Engineering, vol. 14, 100210. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2023.100210>
- x) Traffix, Umweltbundesamt, e7 energy (2023): Guidelines enabling renewable energy supply for zero emission road traffic infrastructure. Finaler Bericht
- y) PIARC - Task Force 2.2 Electric Road Systems (2023): Electric road systems. A route to net zero. A PIARC technical report.
- z) Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur (2024): Lade-Use-Cases

- aa) NOW (2024): Marktentwicklung klimafreundlicher Technologien im schweren Straßengüterverkehr. Auswertung der Cleanroom-Gespräche mit Nutzfahrzeugherstellern 2024.
- bb) Hacker, F., Le Cofguillé, J., Göckeler, K., Minnich, L., Ziegler, L., Dolinga, T. (2024): Elektrifizierung von schweren Nutzfahrzeugen und Aufbau von Ladeinfrastruktur. Entwicklungsperspektiven und Handlungsempfehlungen aus Sicht von Nutzfahrzeugherstellern und Ladeinfrastrukturexperten.
- cc) Jöhrens, J., Allekotte, M., Heining, F., Werner, M., Ruscher, M., Schill, W.-P. (2024): Komplementärtechnologien zu BEV-Lkw. Ein techno-ökonomischer Vergleich.
- dd) Gaete-Morales, C., Jöhrens, J., Heining, F., Schill, W.-P. (2024): Power sector effects of alternative options for de-fossilizing heavy-duty vehicles. Go electric and charge smartly. In: Cell Reports Sustainability.
- ee) Plötz, P., Andersson, M., Scherrer, A., Johansson, E. (2024): The possible future of electric road systems in Europe – time to decide and act. In: Environmental Research. Infrastructure and Sustainability.
- ff) Link, S., Stephan, A., Speth, D., Plötz, P. (2024): Rapidly declining costs of truck batteries and fuel cells enable large-scale road freight electrification. In: nature energy.
- gg) Speth, D., Plötz, P. (2024): Depot slow charging is sufficient for most electric trucks in Germany. In: Transportation Research Part D.
- hh) Sachverständigenrat (2024): Güterverkehr zwischen Infrastruktur-Anforderungen und Dekarbonisierung. Frühjahrsgutachten 2024.
- ii) J. Rogstadius (2024): Utilization and Economic-Environmental Impacts of Future Electric Road Systems for Heavy Trucks in Sweden. Göteborg: RISE Research Institutes of Sweden AB

Die Relevanz, der im Rahmen des ESOB-RKI-Vorhabens behandelten Fragestellungen, wurde durch die Veranstaltungen und Veröffentlichungen untermauert.

6 Zukunftsaussichten und weiterer Forschungsbedarf

Zukunftsperspektive batterieelektrischer Lkw:

Eine zentrale Fragestellung besteht in der Bewertung der langfristigen Durchsetzungsfähigkeit batterieelektrischer Lkw im Straßengüterverkehr. Angesichts kontinuierlich sinkender Batteriepreise und gleichzeitig steigender Energiedichte sowie technischer Reife von Batteriespeichersystemen stellt sich die Frage, ob batterieelektrische Lkw eine dominante Rolle im zukünftigen Antriebsmix einnehmen können. Diese Entwicklung ist vor dem Hintergrund von Skaleneffekten, technologischem Fortschritt und regulatorischen Rahmenbedingungen zu analysieren.

Erweiterung der Analyse auf unterschiedliche Lkw-Gewichtsklassen:

Die bisherigen Betrachtungen konzentrieren sich überwiegend auf schwere Nutzfahrzeuge im Fernverkehr. Eine Ausweitung der Analysen auf weitere Gewichtsklassen, etwa leichte und mittelschwere Lkw, erscheint sinnvoll, da diese Fahrzeugsegmente eine wichtige Rolle im regionalen Verteilerverkehr sowie im städtischen Logistikbereich spielen. Dabei gilt es, Unterschiede in Nutzungsmustern, Infrastrukturbedarfen sowie ökonomischen Rahmenbedingungen systematisch zu untersuchen.

Berücksichtigung globaler geopolitischer Entwicklungen und internationaler Rahmenbedingungen:

Globale Konflikte und geopolitische Spannungen – beispielsweise im Hinblick auf Rohstoffverfügbarkeit (z. B. Lithium, Kobalt, Seltene Erden) oder Handelsbeziehungen – können erheblichen Einfluss auf die Transformation des Güterverkehrs nehmen. Ebenso ist die internationale Einbettung direktelektrischer Straßengüterverkehrssysteme (z. B. Oberleitungs-Lkw-Systeme, ERS) zu vertiefen. Hierbei sind Fragen der technischen Standardisierung, grenzüberschreitenden Infrastrukturanbindung sowie der Harmonisierung politischer Strategien im europäischen Kontext zentral.

Einflüsse von Automatisierung und digitaler Steuerung:

Die fortschreitende Automatisierung des Straßengüterverkehrs, insbesondere durch automatisiertes bzw. autonomes Fahren, kann die ökonomische Bewertung verschiedener technischer Systemlösungen maßgeblich verändern. Hierzu zählen etwa Auswirkungen auf Betriebskosten, Fahrzeugverfügbarkeit, Auslastung und Energieeffizienz. Eine Integration automatisierter Fahrfunktionen in bestehende oder geplante Systeme des elektrischen Güterverkehrs könnte zudem neue Anforderungen an Infrastruktur, Steuerungssysteme und regulatorische Rahmenbedingungen mit sich bringen.

7 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des BMWK und BMUB

Das Forschungsprojekt ESOB-RKI leistete in mehreren zentralen Themenfeldern einen relevanten Beitrag zur Zielerreichung der förderpolitischen Leitlinien der beiden am Förderprogramm beteiligten Bundesministerien. Im Kern adressierte das Projekt zentrale Herausforderungen im Kontext der Transformation des Straßengüterverkehrs hin zu einem klimaneutralen System und trug damit unmittelbar zur Umsetzung der Ziele des Klimaschutzplans 2050 der Bundesregierung bei.

Ein wesentlicher Beitrag bestand in der systematischen Analyse und Darstellung, wie ein vollständig klimaneutraler Straßengüterverkehr in seiner finalen Ausbaustufe technisch, ökonomisch und institutionell gestaltet werden kann. Dabei wurden verschiedene alternative Antriebstechnologien hinsichtlich ihrer langfristigen Einsatzfähigkeit evaluiert und Entscheidungsgrundlagen für die Auswahl geeigneter Endtechnologien entwickelt. Diese technologiebezogenen Empfehlungen basierten auf umfassenden verkehrlichen, ökonomischen sowie systemtechnischen Bewertungen und ermöglichen eine differenzierte, evidenzbasierte Unterstützung politischer Entscheidungsprozesse.

Darüber hinaus wurden im Rahmen des Projekts institutionenökonomische Analysen durchgeführt, die aufzeigten, wie bestehende institutionelle Strukturen angepasst bzw. neue Institutionen geschaffen werden sollten, um die identifizierten Zielsysteme effektiv und effizient umsetzen zu können. Dies umfasst Aspekte der Planung, Finanzierung, Regulierung und Steuerung auf unterschiedlichen politischen und administrativen Ebenen.

Ein weiterer zentraler Erkenntnisgewinn des Projekts bestand in der quantitativen Dimensionierung des Ladeinfrastrukturbedarfs für elektrische Antriebssysteme im Straßengüterverkehr, insbesondere für batterieelektrische Lkw und Oberleitungssysteme. Auf Basis verkehrlicher Szenarien konnten konkrete Anforderungen an die räumliche Verteilung und technische Auslegung von Ladeinfrastrukturen formuliert werden. Daraus ergaben sich zugleich wichtige Anknüpfungspunkte für die Netzausbauplanung, sowohl hinsichtlich des Ausbaus straßenseitiger Energieinfrastrukturen (z. B.

Ladepunkte an Rastanlagen, Autohöfe) als auch im Hinblick auf die Integration in das überregionale Stromnetz. Diese Erkenntnisse sind von unmittelbarer Relevanz für die Versorgungs- und Infrastrukturplanung im Zuge der Mobilitätswende.

8 Veröffentlichung der Ergebnisse

8.1 Bisherige Veröffentlichungen

- Kiefer L./ Gather M./ Lehmann M./ Werchohlad M. (2023): Determination of charging infrastructure requirements -Handling direct electric road freight transport in Germany in 2030-. Proceedings 2023 JSAE Annual Congress (Spring), Yokohama, Japan.
- Grüter, C. / Beckers, T. / Jäkel, K. / Bieschke, N. / Lehmann, M. (2023): Balancing missed opportunities and stranded assets. Guiding principles of strategy development and implementation for climate neutral road freight transport from an economic point of view. Proceedings of the XXVII World Road Congress, Prague, Czech Republic.
- Kiefer L./ Gather M./ Lehmann M./ Werchohlad M. (2023): Modelling principles and approaches for the evaluation of combination scenarios of stationary and dynamic charging infrastructure for road freight transport in Germany. Proceedings of the XXVII World Road Congress. Prag, Czech Republic.
- Werchohlad M./ Lehmann M. (2024): A Catenary System for Heavy Duty Trucks: German Research Perspectives on Rationality and Barriers in a European Context [Konferenzbeitrag], Tensions of Europe, Frankfurt (Oder), Germany.
- (2025): Trend Scenarios for a Stationary Charging Infrastructure to Handle Direct Electric Road Transport in Germany in Lecture Notes in Mobility, Transport Transitions: Advancing Sustainable and Inclusive Mobility, C. McNally, P. Carroll, B. Martinez-Pastor, B. Ghosh, M. Efthymiou, and N. Valantasis-Kanellos, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, pp. 506–511.

8.2 Laufende Veröffentlichungen

- ZEV-Rail angenommen und zur Veröffentlichung vorgesehen:
Werchohlad M./ Lehmann M./ Gather M./ Kiefer L.: Szenarien zur Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs, Eingelangt: 6.3.2025. Veröffentlichung im Heft 2025-6,7.
- Artikel in der Zeitschrift für Verkehrswissenschaft

9 Anlagen

Zum Abschlussbericht gehören folgende Anlagen:

- Anlage 1: Grüter, C.; Beckers, T.; Lehmann, M.; Jäkel, K.; Bieschke, N.; Pfaff, H.: Technologieoptionen für den klimaneutralen Straßengüterverkehr: Gesamtwirtschaftliche Rationalität, Kombinationsoptionen und kurzfristige Handlungsempfehlungen aus entscheidungstheoretischer Sicht. ESOB-RKI – Ergebnisstudie AP1. Weimar, Erfurt, Berlin, 2025.
- Anlage 2: Kiefer, L.; Werchohlad, M.; Gather, M.; Lehmann, M.: ESOB-RKI: Elektrischer Straßengüterverkehr mit Oberleitungen und Batterien - Modellaufbau und Ergebnisse der Modellrechnungen. ESOB-RKI – Ergebnisstudie AP2. Erfurt, 2025.
- Anlage 3: ESOB-RKI – Symposium am 11.2.2025. Sammelmappe der Vorträge zu den Projektergebnisse. AP1-AP5. Erfurt, Weimar, Berlin, 2025.