



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

Dieses Hinweispapier richtet sich an Energieversorgungsunternehmen (EVU). Relevante Kernergebnisse aus dem Projekt ELISA werden aufgezeigt. Insbesondere werden Hinweise zur Stromversorgung der ELISA-Testanlage ausgesprochen. Darüber hinaus werden die netztechnischen Auswirkungen durch den Betrieb des Oberleitungssystems aufgegriffen und dargelegt. Ein weiterer Bestandteil, den dieses Hinweispapier umfasst, sind Ausführungen zum potenziellen Aufbau und der Anwendung eines modellhaften Abrechnungssystems. Hinweise zur Akzeptanz des eHighway-Systems auf Seiten der Energieversorgungsunternehmen werden ebenfalls zusammengetragen.

1. Inhaltsverzeichnis

1. Inhaltsverzeichnis 1

2. Systembeschreibung eHighway 1

3. Hinweise für EVU..... 3

4. Schlussfolgerungen und Ausblick..... 9

5. Schrifttum und weiterführende Literatur 10

6. Autorinnen und Autoren des Hinweispapiers 10

7. Beteiligte Institutionen..... 10

2. Systembeschreibung eHighway

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



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

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



Bild 1: ELISA-eHighway-Teststrecke BAB 5 zwischen Frankfurt am Main und Darmstadt

Die auf der ELISA-Teststrecke errichtete Oberleitungsinfrastruktur bezieht elektrische Energie aus zwei Gleichrichterunterwerken, welche an das Mittelspannungsnetz angeschlossen sind. Die eigentliche Oberleitungsanlage setzt sich u.a. zusammen aus Masten, Ausleger, Tragseil und Fahrdrabt. Insgesamt sind etwa fünf Kilometer Autobahnstrecke je Fahrtrichtung zwischen der

Anschlussstelle Langen/Mörfelden und der Anschlussstelle Weiterstadt mittels Fahrdrabt elektrifiziert. Hierzu wurden in einem Abstand von bis zu 57 Metern insgesamt 223 Masten parallel zum äußeren Fahrbahnrand und 6 Masten im Bereich der Tank- und Rastanlage Gräfenhausen in Mittellage errichtet [Giebel, Hahn 2021]. Eine einseitige Erweiterung der ELISA-Teststrecke in Fahrtrichtung Süden um etwa 7 Kilometer wird bis Mitte 2023 realisiert.

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

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

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

3. Hinweise für EVU

3.1. Umgang mit Lastspitzen

Im Zuge des Evaluationszeitraums vom 09.05.2019 bis zum 30.06.2022 lag der durchschnittliche Grundlastverbrauch der ELISA-Versuchsanlage bei 2,93 kWh/15min. Hierbei verursachte der OH-Lkw einen durchschnittlichen Verbrauch von 4,64 kWh je Fahrt. Als Datengrundlage für die Analyse der Netzbelastung durch die ELISA-Versuchsanlage diente hier eine hochauflösende Power-Quality-Messung, welche die Netzzustandsdaten an jedem Netzverknüpfungspunkt zum Mittelspannungsnetz erfasst.

Auf Basis der Datenanalyse und wie in Bild 3 aufgezeigt, wurde eine direkte Kausalität zwischen dem An- und Abbügeln von OH-Lkw an die Oberleitung und Netzauswirkungen im vorgelagerten Mittelspannungsnetz nachgewiesen. Mit steigender Bezugsleistung der O-Lkw bzw. OH-Lkw und dem in Kausalität zusammenhängenden steigenden Gleichzeitigkeitsfaktor der Oberleitungsanlage, könnten kritische Netzzustände entstehen, für die geeignete Maßnahmen entwickelt werden müssen, um negative Rückwirkungen im vorgelagerten Mittelspannungsnetz zu vermeiden.

Um unvorhersehbare Lastspitzen zu reduzieren, gibt es nach aktuellem Stand der Wissenschaft und Technik zwei Möglichkeiten. Diese belaufen sich auf Demand Side Management und Energiepufferspeicherung. Bei einem Demand Side Management könnte die Ladeleistung der O-Lkw und OH-Lkw in Rahmen hoher Nachfrage mittels Steuerung reduziert werden. Aufgrund des zeitlich eingeschränkten Ladekorridors der O-Lkw sollte eine Leistungsreduzierung durch die Oberleitungsanlage nur im Falle eines kritischen Netzzustandes im vorgelagerten Mittelspannungsnetz möglich sein. Die andere Möglichkeit wäre die Reduzierung von Lastspitzen mithilfe eines Energiepufferspeichers. Ein Energiespeicher kann eine effiziente Integration der Oberleitung, auch in schwach ausgebauten Netzgebieten, ermöglichen und die Energiebereitstellung in Starklastzeiten reduzieren, wie es bereits bei Schnellladeparks in der Elektromobilität Anwendung findet.

Während der gesamten Betriebszeit der ELISA-Versuchsanlage sind keine unzulässigen Netzzurückwirkungen in Form von Flickern entstanden. Die in der DIN EN 61000-3-11:2000 beschriebenen Grenzwerte wurden nicht überschritten. Eine höhere Frequenz der Oberleitungsanlage wäre bei der aktuellen Bezugsleistung der O-Lkw und OH-Lkw aus Netzbetriebssicht möglich. Ferner kann auch zukünftig mit einer abschätzbaren Netzbelastung gerechnet werden. Diese These stützt sich auf die bereits

langfristig erhobenen Daten der Autobahnauslastung, die Energiebezugskennzahlen der O-Lkw und OH-Lkw und die hieraus zu errechnenden Standardlastprofile. Hierauf beruhend, ist von einer festen Planbarkeit bei der Netzdimensionierung auszugehen, was eine Überdimensionierung des Anschlussnetzes verhindern kann. Weitere Erkenntnisse sollen durch das Projekt ELISA III und die Streckenverlängerung sowie die Hinzunahme von weiteren O-Lkw bzw. OH-Lkw gewonnen werden.

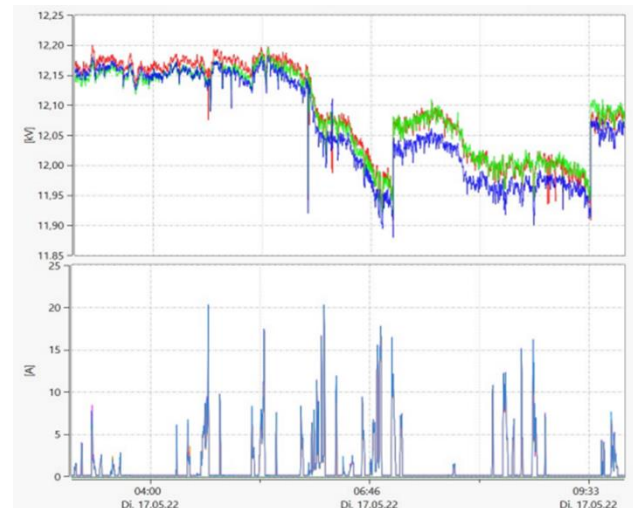


Bild 2: An- und Abkopplungsereignis einer Forschungsfahrt, gemessen mit PQ-Box

Aus dem Abschnitt „Umgang mit Lastspitzen“ gehen die folgenden Hinweise für den Netzbetrieb und die Netzplanung hervor:

- Ankopplung- und Abkopplung der OH-Lkw haben Auswirkung auf das angeschlossene Mittelspannungsnetz.
- Da aktuell keine Volllastdaten für das eHighway-System vorliegen, ist dieser Fall nicht bewertet worden.
- Gemäß Normung EN 50160 und den aktuellen Betriebsdaten entstehen bei dem Betrieb der ELISA-Versuchsanlage keine kritischen Netzzustände im vorgelagerten Mittelspannungsnetz.
- Auf Basis der guten Planbarkeit des hohen Gleichzeitigkeitsfaktors ist mit einer effizienten Integration der Electric Road Systems (ERS)-Oberleitungstechnologie in die Mittelspannungsnetze zu rechnen.
- Für das neue Flexibilitätspotenzial der Oberleitungsanlage müssen geeignete Maßnahmen zur Aufrechterhaltung des Netzbetriebs entwickelt werden.

3.2. Untersuchung der Strombereitstellung

Für die Stromversorgung der ELISA-Versuchsanlage wurden verschiedene Energieversorgungsmodelle bewertet. Diese Modelle gewährleisten eine einfache und zeitunabhängige Stromversorgung über den Markt. Das erste umsetzbare Modell zur Energieversorgung beschafft Energie über den Spotmarkt und hat den Vorteil, dass auch kleine Strommengen von 6 MWh autonom beschafft werden können. Dieses Modell ermöglicht es, flexibel auf Nachfrageschwankungen von +/- 0,25 MW pro Stunde zu reagieren. Das Modell kann entweder für sich stehen oder durch das Average-Modell ergänzt werden. Das Average-Modell bezieht sich auf die tägliche Beschaffung im Jahr vor der physikalischen Lieferung. Durch eine Modellergänzung können prognostizierte Lastprofile erstellt werden, was zu einer frühen Beschaffung und somit zu einer Senkung der Stromkosten führen kann. Durch eine strategische Beschaffung könnten auch monatliche Tranchen erworben werden, um eine zuverlässige Versorgung sicherzustellen.

Die Beschaffung von Spitzenmengen, die zum Beispiel durch Verkehrsanomalien wie Staus entstehen können, stellt eine besondere Herausforderung dar. Je komplexer die Prognose und je schwankender die Nachfrage von Stunde zu Stunde ist, desto eher muss die Beschaffung auf kurzfristige Märkte (Intraday) verschoben werden. Im Intraday-Bereich gibt es jedoch Chancen und Risiken, die die Kostenabschätzung erschweren. Hierfür ist ein zuverlässiges Standardlastprofil erforderlich, damit kosteneffizient eingekauft werden kann. Abhängig vom Verbrauchsprofil der Versuchsanlage kann flexibel reagiert und Modellsynergien genutzt werden.

Aus diesem Abschnitt gehen die folgenden Hinweise für die Energiebeschaffung hervor:

- Für eine kosteneffiziente Energiebeschaffung muss ein verifiziertes Standardlastprofil oder Prognosemodell der ERS-Oberleitungsanlage entwickelt werden.
- Auf Basis der aktuellen Datengrundlage ist eine tagesunabhängige Energiebeschaffung für die ERS-Oberleitungsanlage über die Energiemärkte unproblematisch.

3.3. Potential zur dezentralen Stromversorgung

Damit die Möglichkeiten der dezentralen Energieversorgung durch erneuerbare Energien evaluiert werden können, müssen sowohl die erzeugten als auch die verbrauchten Energiemengen betrachtet werden. Hierzu wurden im ersten Schritt reale Lastenprofile der ELISA-Versuchsanlage erhoben und mit realen

Daten aus Photovoltaik- und Windkraftanlagen abgeglichen. Die Lastenprofile der Versuchsanlage gingen aus den Leistungskennlinien der vergangenen drei Jahre hervor. Hierfür wurde zunächst eine Wahrscheinlichkeitsverteilung erstellt, die die Wahrscheinlichkeit einer Fahrt an der ELISA-Versuchsanlage innerhalb eines 15-Minuten-Abschnittes eines OH-Lkw evaluiert.

Die Erkennung einer Fahrt fand über einen höheren Verbrauch als den Grundlastverbrauch der Oberleitungsanlage statt. Mit Hilfe dieser Wahrscheinlichkeitsverteilung wurde im nächsten Schritt ein Verbrauchsprofil erstellt. Dieses ergibt sich aus dem Verrechnen der Wahrscheinlichkeiten mit dem durchschnittlichen Energiebezug je Fahrt, welcher zwischen dem 09.05.2019 und dem 30.06.2022 bei rund 4,64 kWh lag.

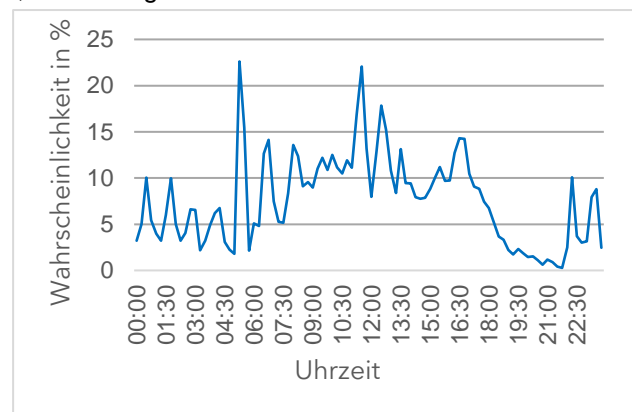


Bild 3: Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Fahrt an der Oberleitung

Anschließend wurde das Verbrauchsprofil der ELISA-Versuchsanlage mit dem Erzeugungsprofil von einem 1,3 MWp großen Solarpark und einer 3 MW starken Windkraftanlage in regionaler Nähe verglichen. Wie aus Bild 4 zu entnehmen, liegt der durchschnittliche Abdeckungsgrad der Photovoltaikanlage bei rund 44 % in den Frühjahr- und Sommerquartalen. In den Herbst- und Winterquartalen erreicht der Solarpark lediglich einen Abdeckungsgrad von etwa 30 %.

Die Schwankungen im Abdeckungsgrad des Photovoltaikparks sind auf die Jahreszeiteffekte zurückzuführen, die für Photovoltaikanlagen charakteristisch sind. Mit einem durchschnittlichen Abdeckungsgrad von nahezu 78 %, welcher auch über das Jahr hinweg ein gutes Niveau behält, erreicht die Windkraftanlage einen besseren Abdeckungsgrad als die Photovoltaikanlage. Der höhere durchschnittliche Abdeckungsgrad zeigt sich hier vor allem in den Herbst- und Wintermonaten sowie in den Nachtzeiten. Bei der aktuellen Datenlage ist das Erzeugungsprofil der

Windkraftanlage besser mit dem Verbrauchsprofil der Oberleitungsanlage zu harmonisieren.

Eine ganzheitliche Abdeckung durch die Energieträger Wind- und Solarkraft ist jedoch nach aktuellem Stand der Technik nicht zu erreichen. Bei aktueller Frequentierung durch die OH-Lkw lässt sich dennoch eine positive Tendenz auf die Kompatibilität mit erneuerbaren Energieerzeugern ableiten.

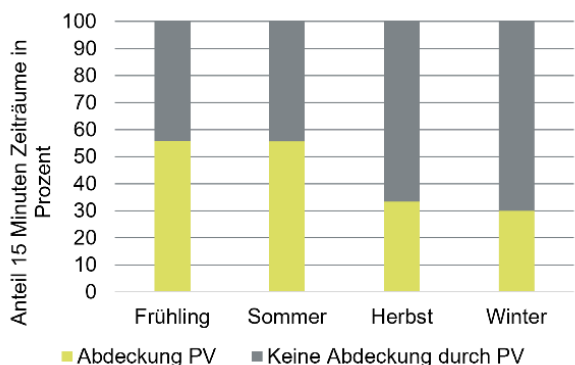


Bild 4: Diagramm Abdeckungsgrad Photovoltaikpark

Um das Potenzial der dezentralen Stromversorgung durch erneuerbare Energien auch mit einer höheren Frequentierung der Anlage abschätzen zu können, wurde im nächsten Schritt ein synthetisches Lastprofil generiert. Dieses wurde auf Basis der aktuellen Verbrauchswerte und der Wahrscheinlichkeitsverteilung erstellt. Bei der Parametervariation des synthetischen Lastprofils wurden die Erzeugungsdaten der Photovoltaik- und Windkraftanlagen aus einem Durchschnittsjahr verwendet. Außerdem wurde die Anzahl der OH-Lkw für jeden Tag als identisch angenommen und Wochenendeffekte vernachlässigt. Der Verbrauch pro Fahrt in einem 15-Minuten-Abschnitt wurde mit 4,64 kWh veranschlagt und es wurde ein Grundlastverbrauch von 2,93 kWh angenommen. In den synthetischen Lastprofilen wurden, aufbauend auf den Annahmen, verschiedene Parametervariationen getroffen. Einerseits wurde die Anzahl der OH-Lkw-Fahrten an einem Tag schrittweise von 0 bis 1000 erhöht, andererseits wurde eine Leistungssteigerung bzw. -reduzierung der Energieerzeuger von 5 % bis 100 % simuliert. Aus der Simulation der Variation dieser beiden Größen ergab sich eine Matrix aus variierenden Abdeckungsgraden. Bezogen auf die Photovoltaikanlage mit 1,3 MWp, liegt dieser zwischen 44 % und 30 % bei 0 und 1000 Fahrten täglich. Bei der Windkraftanlage mit 3 MW liegt der simulierte Abdeckungsgrad zwischen 77 % und 56 % bei 0 und 1000 Fahrten am Tag. Auffallend hierbei ist, dass selbst mit gesteigerter Erzeugungsleistung keine vollständige Abdeckung des Bedarfes zu erreichen ist.

Um eine Jahresabdeckung von 100 % zu erreichen, wurde die Integration eines Energiespeichers in das System evaluiert und simuliert. Hierbei wurde das Betriebsmodell „Peak-Shaving“ gewählt, welches vor allem für gewerbliche Verbraucher zunehmend von Interesse ist. Um Lastspitzen abfangen zu können, wurde zunächst die höchste gemessene Spitzenlast von 237,5 kW/15 min gewählt, um ausgehend davon einen potenziellen Energiespeicher zu dimensionieren. Sofern die gewählte Größe in der Simulation keine 100 %ige Abdeckung ergab, wurde der Speicher um weitere 100kWh erweitert und die Simulation erneut gestartet. Hieraus ergab sich, dass für die ganzheitliche Abdeckung des Energiebedarfs mittels PV-Anlage bei 2 MWp, je nach Anzahl der täglichen Fahrten, zwischen 0,1 MWh und 2 MWh Speicherkapazität benötigt werden. Bei einer Windkraftanlage mit 2 MW Leistung reichen schon etwa 0,1 MWh bis 0,5 MWh aus.

Im Hinblick auf neue und zukünftige Generationen von O-Lkw bzw. OH-Lkw muss das Verbrauchsprofil erneut bewertet werden. Maßgeblich ist hierbei die potenziell höhere Auslastung durch größere Akkus und stärkere Elektromotoren. Es lässt sich jedoch festhalten, dass es mithilfe von Energiespeichern durchaus möglich ist, die ELISA-Versuchsanlage vollständig durch fluktuierende, erneuerbare Energieerzeuger zu betreiben.

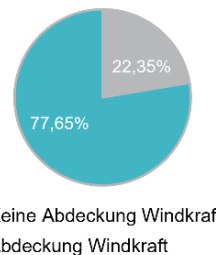


Bild 5: Diagramm Abdeckungsgrad Windkraft

Aus diesem Abschnitt gehen die folgenden Hinweise für die dezentrale, auf erneuerbaren Energien beruhende Stromversorgung hervor:

- Bei der Energieversorgung der ELISA-Versuchsanlage zeigen sich deutliche Jahreszeiteffekte bei der Energiebereitstellung durch Windkraft und Photovoltaik.
- Auf Basis der fehlenden Grundlastabdeckung in Nachtzeiten ist die Versorgung durch eine Photovoltaikanlage wie erwartet problematisch.
- Trotz der besseren Abdeckung durch die Windkraftanlage kann eine vollständige Abdeckung der ELISA-Versuchsanlage nur durch den Einsatz von Energiespeichern verwirklicht werden.
- Trotz der effizienten Ein- und Ausspeicherung der Energiemengen im Rahmen des ELISA-Versuchsanlagen-Gleichstromsystems sollten lokale Standortbedingungen berücksichtigt werden.

3.4. Aufbau eines modellhaften Abrechnungssystems für den Feldversuch

Bei der Erarbeitung eines Abrechnungssystems für die ERS-Versuchsanlage wurden die technischen, rechtlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen des Energiemarktes berücksichtigt. Basierend auf der rechtlichen Einordnung der ERS-Oberleitung in ein (geschlossenes) Verteilnetz, fand zunächst eine Untergliederung in eine Kundenanlage oder in einen Letztverbraucher statt. Sollte das ERS-Oberleitungssystem als (geschlossenes) Verteilnetz oder Kundenanlage eingestuft werden, wäre eine Abrechnung aufgrund der regulatorischen und rechtlichen Rahmenbedingungen sehr kostenintensiv. Beispielhaft zu nennen sind hier die kurz aufeinander folgenden Lieferantenwechsel der OH-Lkw bzw. O-Lkw, die aus energiewirtschaftlicher Sicht schwierig umzusetzen wären.

Wenn die Oberleitungsanlage als Letztverbraucher

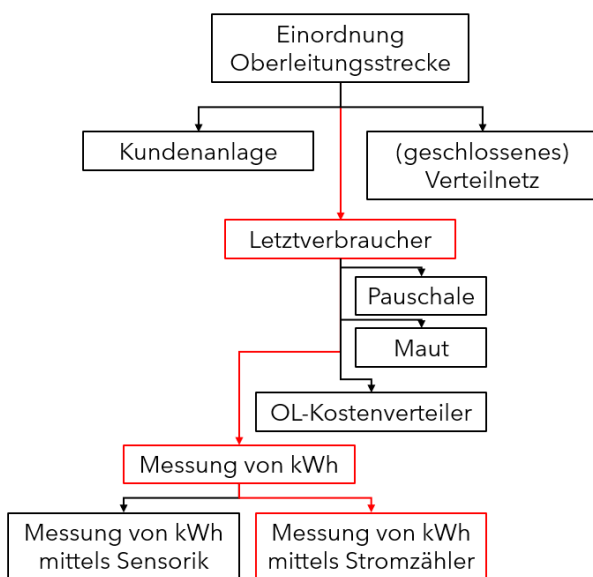


Bild 6: Schaubild versch. Abrechnungsvarianten

eingestuft würde, gäbe es vier mögliche Abrechnungsvarianten. Diese umfassen die Abrechnung, basierend auf dem Verbrauch von Kilowattstunden (kWh), die Abrechnung über die Verteilung der Oberleitungskosten, die Abrechnung durch Integration in die Maut und die Pauschalabrechnung.

Für die Abrechnung der Oberleitungsnutzung auf Basis von kWh können zwei Möglichkeiten genutzt werden: Entweder wird ein Energiemengenzähler aus der Energiewirtschaft installiert oder es werden die Messwerte der verbauten Sensoren im Lkw genutzt.

Alternativ zur Abrechnung auf kWh-Basis gibt es die Option einer Kostenverteilung der

Oberleitungsnutzung auf Basis von genutzten Oberleitungseinheiten. Hierbei werden keine Energiekosten abgerechnet, sondern die Nutzung der Einheiten, basierend auf einem Verbrauchsschlüssel, an die Endkunden weitergegeben. Eine weitere Möglichkeit ist die kilometerabhängige Abrechnung als Straßennutzungsgebühr (Maut). Alternativ hierzu kann auch eine Pauschalabrechnung für Oberleitungsnutzer herangezogen werden, welche auf einer Einmalkalkulation basiert. Die Vor- und Nachteile dieser Varianten wurden von energiewirtschaftlichen Experten bewertet und in verschiedenen Kategorien eingeteilt. Eine Schwäche der Abrechnung auf Basis von Sensordaten ist der hohe Aufwand im Hinblick auf die Datenaufbereitung. Bei der Abrechnung auf Basis von Oberleitungseinheiten fällt dieser Aufwand jedoch weg. Kritisch zu bewerten ist allerdings die schlechte Kostenplanbarkeit für Spediteure, da die Kosten erst am Ende der Abrechnungsperiode bekanntgegeben werden. Zudem werden in diesem Modell keine Anreize für Energieeinsparungen gesetzt.

Die Evaluierung der verschiedenen Abrechnungsvarianten hat somit ergeben, dass die Abrechnung von Kilowattstunden auf Fahrzeugebene mit einem Energiezähler die gerechteste und am schnellsten umsetzbare Variante ist. Eine Verbrauchsmessung auf Basis eines Zählers ist notwendig, um das Abrechnungssystem effizient in die energiewirtschaftlichen Prozesse einzubinden. Das Konsortium hat sich für diese Variante entschieden und eine entsprechende Eingabe beim Projektträger wurde positiv bewertet. Diese soll nun in der Praxis erprobt werden.

Aus diesem Abschnitt gehen die folgenden Hinweise für die Messung und Abrechnung der ELISA-Versuchsanlage hervor:

- Die marktwirtschaftlichen Prozesse der Energiewirtschaft können nur bei einer rechtlichen Einordnung der ELISA-Versuchsanlage als Letztverbraucher eingehalten werden.
- Zur Einhaltung des Mess- und Eichrechts und einer effizienten Einbindung in die energiewirtschaftlichen Prozesse ist eine Messeinrichtung auf den OH-Lkw bzw. O-Lkw nötig.

3.5. ELISA-Rollenmodell

Im Rollenmodell von ELISA fungiert die straßengebundene Oberleitung als Letztverbraucher. Dabei wird die Annahme getroffen, dass es pro Oberleitungsabschnitt nur einen Netzbetreiber sowie zu einem Zeitpunkt nur einen Stromlieferanten gibt. Im Zuge des Versorgungsmodells nimmt hierauf beruhend der O-Lkw die Rolle eines nachgelagerten Endkunden an der Oberleitung ein. Die rechtlichen Vorschriften des EnWG gelten hier bis zum Netzverknüpfungspunkt der Oberleitung. In Bezug auf die Oberleitung sind die aktuell geltenden Geschäftsprozesse zur Kundenbelieferung mit Elektrizität anwendbar.

muss die Rolle des Mobilitätsanbieters eingeführt werden. Die am Netzverknüpfungspunkt installierten Messeinrichtungen sind Grundlage für den späteren Abrechnungsprozess. Der grundzuständige Messstellenbetreiber oder wettbewerbliche Messstellenbetreiber übernimmt hier den Zählerbetrieb der Übergabemessungen.

Durch die Installation von Zählern auf den O-Lkw, welche beim späteren Abrechnungsprozess benötigt werden, entsteht eine weitere notwendige Rolle für die Messstellenbetreiber der O-Lkw. Die Zählerdaten werden über den Zählerbetreiber (z.B. On-Board-Unit (OBU)-Betreiber Maut oder auch klassische Messstellenbetreiber) an den ERS-Betreiber weiter-

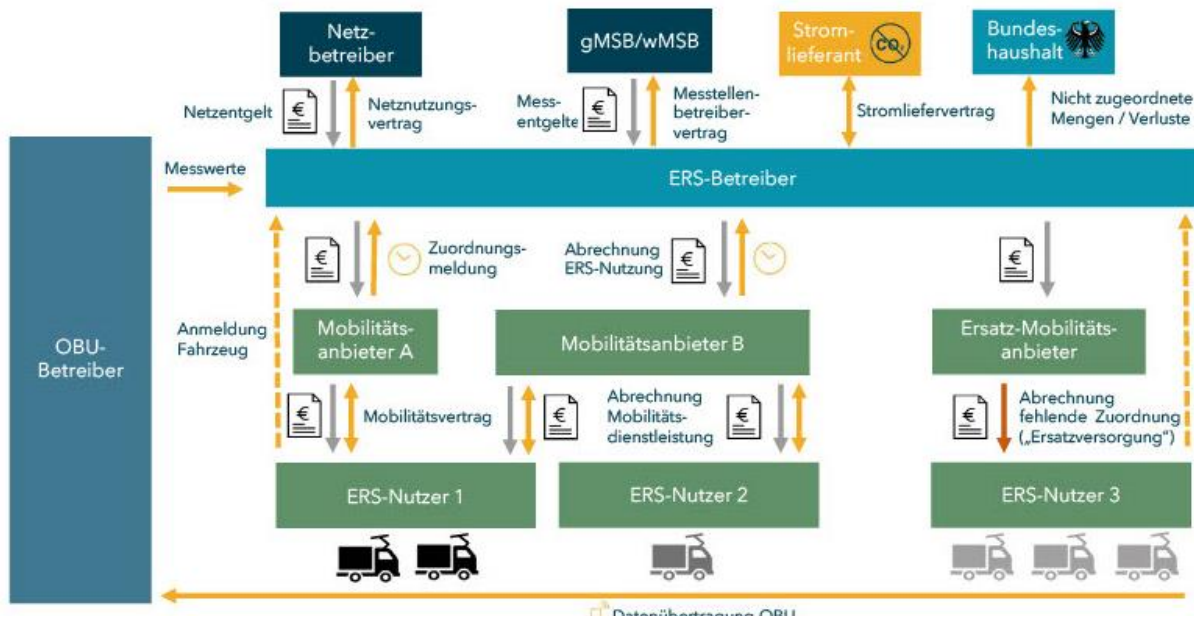


Bild 7: Schematische Darstellung des ELISA-Rollenmodells

Neben dem Netzbetreiber und dem Stromlieferanten der Oberleitungsanlage bildet die Rolle des Mobilitätsanbieters eine wichtige Grundlage des in Bild 8 visualisierten Rollenmodells ab. Die Rolle des Mobilitätsanbieters ist vergleichbar mit der Rolle des E-Mobility Providers (EMP) bei den stationären Ladesäulen. Synchron zum EMP nimmt der Mobilitätsanbieter hier die zentrale Rolle bei der Energiekostenabrechnung der Spediteure ein und gilt als „Single point of Contact“ für diese. Wie in Bild 8 dargestellt, ergibt sich ein entscheidender Unterschied durch die Vielzahl der O-Lkw, welche sich gleichzeitig mit der Oberleitungsanlage verbinden können, gegenüber dem klassischen EMP bei stationären Ladesäulen. Hierbei übernimmt der Mobilitätsanbieter auf Basis bestehender Verträge mit dem Spediteur die Kostenverrechnung gegenüber dem Oberleitungsbetreiber. Auf Basis der bestehenden Komplexität im Zuordnungsprozess und um Wettbewerb zu ermöglichen,

geleitet. Schließlich ordnet der ERS-Betreiber die einzelnen Verbrauchsmengen den Fahrzeugen und Mobilitätsanbietern zu und übermittelt diese an die jeweiligen Mobilitätsanbieter. Dazu und für die ordnungsgemäße Nutzung der Oberleitung muss der ERS-Nutzer (z.B. ein Spediteur) das Fahrzeug einmalig direkt beim ERS-Betreiber anmelden bzw. registrieren. Der ERS-Betreiber bildet die Datendrehscheibe für die Abwicklung der Anmeldung, der Nutzung und deren Abrechnung. Der ERS-Betreiber schließt einen Stromliefervertrag mit einem Stromlieferanten und zusätzlich einen Netznutzungsvertrag mit dem zuständigen Netzbetreiber ab. Der ERS-Betreiber zahlt die Netznutzung sowie die Stromlieferung und entlastet sich durch die Weiterverrechnung an den Mobilitätsanbieter. Dabei hat er keine Gewinnerzielungsabsicht. Zusätzlich bildet er in seiner Funktion als Datendrehscheibe die An- und Abmeldungen der Mobilitätsanbieter in Form von

Zeitscheiben für die Zuordnung der Mobilitätsanbieter und ERS-Nutzer ab. Damit hat nur er allein eine Gesamtsicht auf die vertragliche Zuordnung der ERS-Nutzer und deren Oberleitungsnutzung. Überdies informiert er ggf. über die Beendigung einer Zuordnung. Hierbei benötigt der ERS-Betreiber die Zuordnungsinformationen, um die Nutzung der Oberleitung gegenüber den Mobilitätsanbietern verrechnen zu können. Die Rolle des ERS-Betreibers wird in diesem Modell nur einmalig besetzt.

Eine weitere wesentliche Aufgabe ist die Durchführung des „Clearings“ für sich überschneidende Anmeldungen. Bei Anmeldung und bereits bestehender Folgeanmeldung informiert der ERS-Betreiber die Mobilitätsanbieter, zu welchem Zeitpunkt eine Folgeanmeldung vorliegt. Für den Fall, dass der ERS-Betreiber bei einer Anmeldung eine bereits bestehende Zuordnung feststellt, ist für die Vertragsauflösung eine „Zwangsabmeldung“ denkbar. Des Weiteren stellt der ERS-Betreiber im Rahmen des Clearing-Prozesses nicht zugeordnete Zeiträume fest.

Aus diesem Abschnitt gehen die folgenden Hinweise für die Ausgestaltung des Rollenmodells hervor:

- Das Rollenmodell der ELISA-Versuchsanlage harmonisiert mit den aktuellen energiewirtschaftlichen Marktprozessen und lässt sich kosteneffizient in den Markt integrieren.
- Um Wettbewerb zu ermöglichen, muss die Rolle des Mobilitätsanbieters eingeführt werden.
- Der ERS-Betreiber sollte durch eine staatliche Stelle betreut werden und nicht gewinnorientiert agieren.

3.6. Akzeptanz auf Seiten der Energieversorgungsunternehmen

Im Zuge einer Evaluation der Akzeptanz von straßengebundener Oberleitungstechnologie wurden Mitarbeitende verschiedener Branchen im Energiesektor befragt [Hein et al. 2023]. Die hierbei befragten Zielgruppen beliefen sich auf Interessensverbände, Mitarbeitende von großen und kleinen Unternehmen der Energiebranche sowie Vertretende von energiewirtschaftlichen Verbänden. Aus den 77 ausgewerteten Fragebögen ging hervor, dass alle energiewirtschaftlichen Rollen in der Befragung vertreten sind. Diese belaufen sich u.a. auf Netzbetreibende, Lieferanten, Messstellenbetreibende und Dienstleistende für Marktrollen der Energiewirtschaft.

Im ersten Schritt wurden die Teilnehmer nach der Zukunftsfähigkeit der Oberleitungstechnologie für ihr eigenes Geschäftsfeld befragt. Hierbei ergaben sich 38 Stimmen für „Ja“, 18 Stimmen für „Nein“ sowie 20 Stimmen für „Unentschlossen“. Mit rund 62 %

positiven Antworten in der Gruppe der Lieferanten sowie 67 % bei Messstellenbetreibern, spiegelt sich die Zukunftsfähigkeit wider, da es sich bei diesen Gruppen um zwei der wichtigsten originären Rollen für den Betrieb der Oberleitungsanlage handelt. Abgeschlossen wurde die Akzeptanzbefragung mit der Frage, ob der Ausbau der Oberleitungstrecke in Deutschland in Zukunft gewünscht ist. Hierbei sprachen sich über 70 % für einen Ausbau aus, lediglich 6,5 % waren dagegen. Der Rest war unentschlossen. Demnach zeichnet sich ein positives Stimmungsbild der gesamten Energiebranche bzgl. der Oberleitungstechnologie ab.

Die zukunftsfähige Eignung einer neuen Technologie hängt auch davon ab, ob sie den Umweltzielen gerecht wird und ob sie sich problemlos in bestehende Infrastrukturen integrieren lässt. Dies ist ein bedeutender Indikator für die langfristige Planbarkeit. Die durchgeführte Branchenumfrage bestätigte diese Anforderungen, da die Befragten erhebliche Potenziale in der Nutzung von Oberleitungen zur Elektrifizierung des Schwerverkehrs erkannten. Unabhängig davon wurden aber auch Hemmnisse ersichtlich.

In einem anderen Teil der Umfrage sollten die Befragten verschiedene Transporttechnologien für einen nachhaltigen straßengebundenen Schwerlasttransport nach ihrem Potenzial auf einer Skala von 1 bis 5 einordnen. Hierbei ergab sich ein ähnlich hohes Potenzial für Hybridfahrzeuge mit Oberleitung und Brennstoffzelle, Hybridfahrzeuge mit Batterie und Brennstoffzelle, Wasserstofftechnologie, Batterie-on-board-Technologie sowie die Oberleitungstechnologie. Die Bewertung der Battery-Swap-Methode fiel aufgrund ihres hohen Ressourcenbedarfs weniger vielversprechend aus. Beim Vergleich der Oberleitungstechnologie, die als bestehende Hybridtechnologie mit stationärer Ladesäule genutzt wird, mit der Wasserstofftechnologie, wurde letztere nur knapp übertroffen. Die Umfrage zeigte, dass die ressourceneffiziente Nutzung bei der Energiebereitstellung und Energiegenerierung sowie die schnelle Umsetzung als Indikator für die Vorreiterrolle der Oberleitungstechnologie dienen.

Hierbei ist auch die hohe Planbarkeit des Gleichzeitigkeitsfaktors hervorzuheben. Dieser Faktor ermöglicht eine feste Berechnung der Netzbelastung, die eine Überdimensionierung des Netzes verhindert. Im Zuge einer weiterführenden Befragung von Experten bezüglich der möglichen Kritikalitäten im Kontext ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit wurden einige zu bedenkende Punkte genannt.

Eine große Herausforderung stellt demnach der administrative Aufwand dar, der mit dem Bau einer

straßengebundenen Oberleitungsanlage verbunden ist. Hier müssen frühzeitig klare Prozesse entwickelt werden, um unnötige Kosten zu vermeiden. Auch die Energieabrechnung stellt eine Herausforderung dar, da eine kostenintensive Abrechnung als wahrscheinlich eingestuft wird. Um hier eine effiziente Abrechnung zu gewährleisten, sollten bestehende energiewirtschaftliche Abrechnungskonzepte herangezogen werden.

Trotz dieser Herausforderungen sehen Experten der Energiebranche aber hohe Potenziale der straßengebundenen Oberleitungstechnologie in der Reduzierung der Schadstoffemissionsbelastung, der Reduzierung der Importabhängigkeit bei fossilen Brennstoffen und dem Erreichen der Klimaschutzziele bis 2030. Insgesamt zeigt sich, dass die straßengebundene Oberleitungstechnologie als eine vielversprechende Option für einen nachhaltigen Schwerverkehrstransport angesehen wird, jedoch müssen noch einige Herausforderungen bewältigt werden, um die Technologie erfolgreich umzusetzen.

Dr. Marie-Luise Wolff, Präsidentin des Bundesverbandes der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW)

4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Zuge der allgemeinen Stromversorgung der Oberleitungsanlage konnten mit den zugrundeliegenden Daten und der Hochfrequentierung des Mengengerüsts der O-Lkw verschiedene Versorgungsszenarien der ELISA-Versuchsanlage im Realbetrieb evaluiert werden. Hierauf beruhend kann die Stromversorgung der Oberleitungsanlage unproblematisch und tageszeitunabhängig bereitgestellt werden. Eine besondere Herausforderung stellt die dezentrale, auf erneuerbaren Energien beruhende Stromversorgung dar. Hierbei bietet die Oberleitungsanlage ein neues Flexibilitätspotenzial im Energiemarkt. Um dieses markteffizient einzubinden, müssen geeignete Maßnahmen definiert werden. Eine starke zeitliche und örtliche Konzentration des Bedarfs an Ladeleistung kann zu Lastspitzen führen, für die insbesondere Netzverknüpfungspunkte in der Nähe der Autobahn nicht ausreichend dimensioniert sind. Wie aus den Messkampagnen hervorging, konnte eine direkte Kausalität zwischen einem Anbügel- oder Abbügelereignis eines OH-Lkw an die Oberleitung und eine darauf zurückzuführende Netzauswirkung im vorgelagerten Mittelspannungsnetz nachgewiesen werden. Mit steigenden Skaleneffekten, etwa die steigende Bezugsleistung der O-Lkw oder die Erhöhung der Gleichzeitigkeitsfaktoren, könnten hier zukünftig kritische Netzzustände entstehen. Als Folge können einerseits Überlastung der Betriebsmittel (Netzengpässe), als auch unzulässig hohe oder niedrige Netzspannungen auftreten. In beiden Fällen müssen technische Gegenmaßnahmen getroffen werden, um die Netzstabilität und damit die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Hier werden Lösungen benötigt, die eine möglichst umfassende Integration der Oberleitungsanlagen in die Stromverteilnetze ermöglichen, gleichzeitig aber Beeinträchtigungen der Qualität vermeiden und die Zuverlässigkeit der Versorgung mit elektrischer Energie sicherstellen. Unterstützend hierfür muss ein zuverlässiges Standardlastprofil auf Basis von realen Daten evaluiert werden. Festzuhalten ist dennoch, dass bei der aktuellen Frequentierung und den Leistungskennwerten der OH-Lkw zu keinem Zeitpunkt kritische Netzengpässe oder Energieversorgungsengpässe auftraten und die Hinzunahme weiterer OH-Lkw und O-Lkw in den Pilotbetrieb möglich ist. Neben der noch ausstehenden Bewertung der Oberleitung als Flexibilitätspotenzial im Energiemarkt, bietet die rechtliche Einordnung und das Rollenkonzept in einem Abrechnungsmodell einen hervorzuhebenden Betrachtungsaspekt.

Da primär die individuelle Abrechnung pro O-Lkw zu favorisieren ist, wurde ein Schwerpunkt auf eine Abrechnung basierend auf der im OH-Lkw verbauten Sensorik sowie einer Fakturierung auf Grundlage der Messwerte eines Energiezählers gelegt. Nach Prüfung der verschiedenen möglichen Abrechnungsvarianten hat sich die Variante der Abrechnung von Kilowattstunden auf Fahrzeugebene mit einem Zähler für die gerechteste und die am schnellsten umsetzbare Variante herausgestellt. Eine Verbrauchsmessung auf Basis eines

und Vorstandsvorsitzende der ENTEGA AG, unterstützt die positive Haltung aus der Branchenbefragung:

„Die Mobilitätswende muss zügig Fahrt aufnehmen. Beim Schwerlastverkehr kann die Oberleitungstechnologie hier einen entscheidenden Beitrag zum Erreichen der Klimaschutzziele leisten. Umso wichtiger ist es, dass die Politik klare Rahmenbedingungen für die Technologie setzt, um bestehende Potenziale zu nutzen und den Marktakteuren Planungssicherheit zu geben.“

Aus diesem Abschnitt gehen die folgenden Hinweise für die Ausgestaltung des Marktdesigns hervor:

- Für zukünftige Umsetzungen der Oberleitungstechnologie müssen politische Rahmenbedingungen gesetzt und ordnungspolitische Instrumente zur Verfügung gestellt werden.
- Die Akzeptanz unter den originären Rollen der Energiewirtschaft reicht aus, um Prozesse umzusetzen und Wettbewerber zu finden.

Standardzählers aus der Energiewirtschaft ist daher aus abrechnungstechnischer Sicht dringend notwendig, um sowohl einen Vergleich zur vorhandenen Sensorik zu ermöglichen, als auch das Abrechnungssystem in die energiewirtschaftlichen Prozesse einbinden zu können. Hier besteht die Möglichkeit, einen Mobilitätsanbietenden in den allgemeinen Abrechnungsprozess zu integrieren, welcher die Abwicklung des Abrechnungsprozesses für den Vertragspartner des Stromlieferanten gegenüber den einzelnen Transportunternehmen übernehmen könnte.

Basierend auf den Ergebnissen der Akzeptanzbefragung lässt sich eine positive Haltung der Energiewirtschaft gegenüber der Oberleitungstechnologie ableiten. Hervorzuheben ist hier sowohl die hohe erkannte Zukunftsfähigkeit im eigenen Geschäftsfeld als auch die wohlwollende Haltung gegenüber einem Ausbau. Als größte Chance der straßengebundenen Oberleitungstechnologie ist hier gleichermaßen die Reduzierung der Schadstoffemissionsbelastung, wie auch die Reduzierung der Importabhängigkeit bei fossilen Brennstoffen und das Einhalten der Klimaschutzziele 2030 zu nennen. Große Herausforderungen sieht die Branche in den die Oberleitung tangierenden Genehmigungsverfahren und den rechtlichen Rahmenbedingungen. Umso wichtiger ist es, vor einem Markthochlauf die nötigen Rahmenbedingungen zu klären. Hervorzuheben ist des Weiteren die gering angesehene Herausforderung der energetischen Verluste in Verbindung mit den hohen Potenzialen für die Reduzierung der Importabhängigkeit von fossilen Brennstoffen.

5. Schrifttum und weiterführende Literatur

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

Hein, C.; Lerchl-Mitsch, K.; Wilke, J. K. (2023): Akzeptanz für straßengebundene Oberleitungstechnologie. Magazin für die Energiewirtschaft, Ausgabe 1 | 2023, VDE Verlag GmbH (2022), 16-19.

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

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

6. Autorinnen und Autoren des Hinweispapiers

Christian Hein, e-netz Südhessen AG
David Petermann, e-netz Südhessen AG
Kerstin Lerchl-Mitsch, e-netz Südhessen AG
Kirstin Chesi, e-netz Südhessen AG
Alexander Hepp, e-netz Südhessen AG
Matthias Schneider, e-netz Südhessen AG
Luc Paul Oelke, e-netz Südhessen AG
Jens Schwarz, COUNT+CARE GmbH & Co. KG
Maximilian Burger, COUNT+CARE GmbH & Co. KG
Christoph Stenner, citiworks AG
Ralf Erdmann, ENTEGA Plus GmbH
Jürgen K. Wilke, Technische Universität Darmstadt, Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik

7. Beteiligte Institutionen

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

Siemens Mobility GmbH
 Siemenspromenade 6
 91052 Erlangen

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

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