

Hinweispapier für Oberleitungsinfrastrukturbetreiber

Betrachtungszeitraum: 07.2022 – 12.2024



In dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) geförderten Forschungsprojekts ELISA (Elektrischer, innovativer Schwererverkehr auf Autobahnen) wurde zwischen Mai 2019 und Dezember 2024 im Realbetrieb eine Pilotstrecke für die oberleitungsgebundene Energieversorgung von elektrisch angetriebenen Nutzfahrzeugen im öffentlichen Straßenraum erprobt. Der Realbetrieb des sogenannten eHighway-Systems wurde von einer wissenschaftlichen Evaluation begleitet. Die Forschung im Rahmen des Projekts ELISA zeichnet sich durch einen ganzheitlichen und interdisziplinären Evaluationsansatz aus, der das eHighway-System im Zusammenspiel mit seiner Systemumwelt analysiert. Wichtige Erkenntnisse aus der ersten Projektphase (Mai 2019 bis Juni 2022) wurden bereits in den Hinweispapieren zur ersten Phase veröffentlicht. Das aktuelle Hinweispapier berücksichtigt nun insbesondere die Ergebnisse der zweiten Projektphase (Juli 2022 bis Dezember 2024).

Dieses Hinweispapier richtet sich an Oberleitungsinfrastrukturbetreiber. Aufbauend auf den Knergebnissen zum Anlagenbetrieb im Projekt ELISA werden wesentliche Erkenntnisse aus der Realbetriebserprobung der ELISA-Oberleitungsanlage für zukünftige Betriebskonzepte erörtert. Insbesondere werden Hinweise zum Betrieb einer in Abschnitte und Segmente eingeteilten Oberleitungsinfrastruktur gegeben. Darüber hinaus werden die Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage im Projektzeitraum aufgezeigt und Fragestellungen zur Leitstelleneinrichtung und zu Infrastrukturkosten erörtert.

1. Stand der Technik

Mit dem Abschluss der ersten Projektphase und dem Betrieb der ersten 10 Kilometer Oberleitung konnte die Funktionalität des eHighway-Systems im Autobahnumfeld nachgewiesen werden. Die Errichtung und der Betrieb im öffentlichen Straßenraum sind sicher, zuverlässig und ohne nachhaltige Auswirkungen auf den Verkehrsfluss umsetzbar. Die betrieblichen Prozesse, die in Einklang mit den zuständigen Gefahrenabwehrbehörden und dem ausführenden Operatorenpersonal des Kontrollraums der Verkehrszentrale Deutschland erarbeitet und eingeführt wurden, haben sich als stabil, wirksam und komplikationsfrei erwiesen.

Mit dem Ausbau der ELISA-Oberleitungsanlage auf 17 Kilometer (5 Kilometer in nördliche und 12 Kilometer in südliche Fahrtrichtung) und der Aufnahme der neuen O-Lkw Generationen in den

Realbetrieb konnten in der zweiten Projektphase diese Erkenntnisse weiter verifiziert werden.

Die erweiterte Oberleitungsanlage ist über vier Gleichrichterunterwerken, die an das Mittelspannungsnetz angeschlossen sind, verbunden. Die Hauptaufgabe der Gleichrichterunterwerke besteht in der Versorgung der Oberleitung mit dem Fahr- und Ladestrom durch Umwandlung und Anpassung der Spannung aus dem Mittelspannungsnetz. Darüber hinaus dienen die Gleichrichterunterwerke auch zur Steuerung und Überwachung der Oberleitungsanlage. Weitere wesentliche Komponenten der Oberleitungsinfrastruktur sind die Masten, Ausleger, Tragseil und Fahrdraht. Hierzu wurden in einem Abstand von etwa 42 Metern insgesamt 404 Masten parallel zum äußeren Fahrbahnrand sowie sechs Masten im Bereich der Tank- und Rastanlage Gräfenhausen in Mittellage errichtet.

2. Hinweise für Oberleitungsinfrastrukturbetreiber

2.1. Oberleitungsanlagenbetrieb

Ziel der Oberleitungsinfrastruktur ist es, das dynamische Laden von O-Lkw zu ermöglichen und so einen flexiblen, alltagstauglichen Einsatz vergleichbar mit konventionellen Lkw zu gewährleisten. Im Rahmen der ersten Projektphase wurden auf zwei fünf Kilometer langen Streckenabschnitten erste Betriebserfahrungen gesammelt und analysiert. Die Verfügbarkeit der Anlage war durch verschiedene Faktoren wie Inspektionen, unfallbedingte Abschaltungen, straßenbetriebliche Maßnahmen und Wetterereignisse eingeschränkt. Die Analyse zeigte, dass durch gezielte Maßnahmen – etwa die Bündelung von Wartungsarbeiten, die Verlagerung geplanter Abschaltungen sowie den Aufbau robusterer Prozesse – eine Verfügbarkeit von mindestens 96 % erreichbar ist. Dieses Ziel wurde auch durch Expertenschätzungen bestätigt.

Die zweite Projektphase verfolgte das Ziel, die Auswirkungen der Streckenverlängerung auf insgesamt 12 Kilometer in Fahrtrichtung Süden auf Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Oberleitungsinfrastruktur zu untersuchen. Im Fokus stand dabei die Frage, ob die angestrebte Mindestverfügbarkeit von 96 % auch bei längerer Strecke erreicht werden kann und ob sich die Häufigkeit sowie Art der Ausfallursachen verändert. Ergänzend wurde ebenfalls die Zuverlässigkeit der Anlage analysiert, insbesondere

die Zeitspanne zwischen zwei Ausfällen im Realbetrieb. Die Analyse sollte zudem aufzeigen, inwiefern Lerneffekte zur Reduktion störungsbedingter Ausfallzeiten beitragen und ob durch die Verlängerung neue Herausforderungen entstehen.

Die Auswertung des Anlagenbetriebstagebuchs zur Bewertung der Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage zwischen 2020 und 2024 zeigt, dass sich der Betrieb – trotz unterschiedlicher Abschaltungsursachen und Ausbaurbeiten – auf einem hohen Niveau stabilisieren konnte (Abbildung 1). Besonders nach dem Abschluss der Streckenerweiterung im August 2023 ließ sich ein kontinuierlicher Anstieg der Verfügbarkeit beobachten, mit durchgehendem Betrieb der Oberleitungsanlage zwischen dem 15. August und der geplanten Abschaltung am 30. Dezember 2024. Während im Jahr 2023 infolge der Ausbaurbeiten und technische Störungen deutliche Verfügbarkeitsverluste zu verzeichnen waren, erreichte die Anlage in der Folgezeit Werte zwischen 70 und 100 % in beiden Fahrtrichtungen. Unter Ausklammerung des mehrwöchigen Ausfalls Ende 2023 bis Anfang 2024 ergab sich für die verlängerte Strecke eine mittlere Verfügbarkeit von rund 92 %. Dieser Wert kann – unter Berücksichtigung des langfristig angestrebten Ziels von 96 % – als hinreichend hoch angesehen werden.

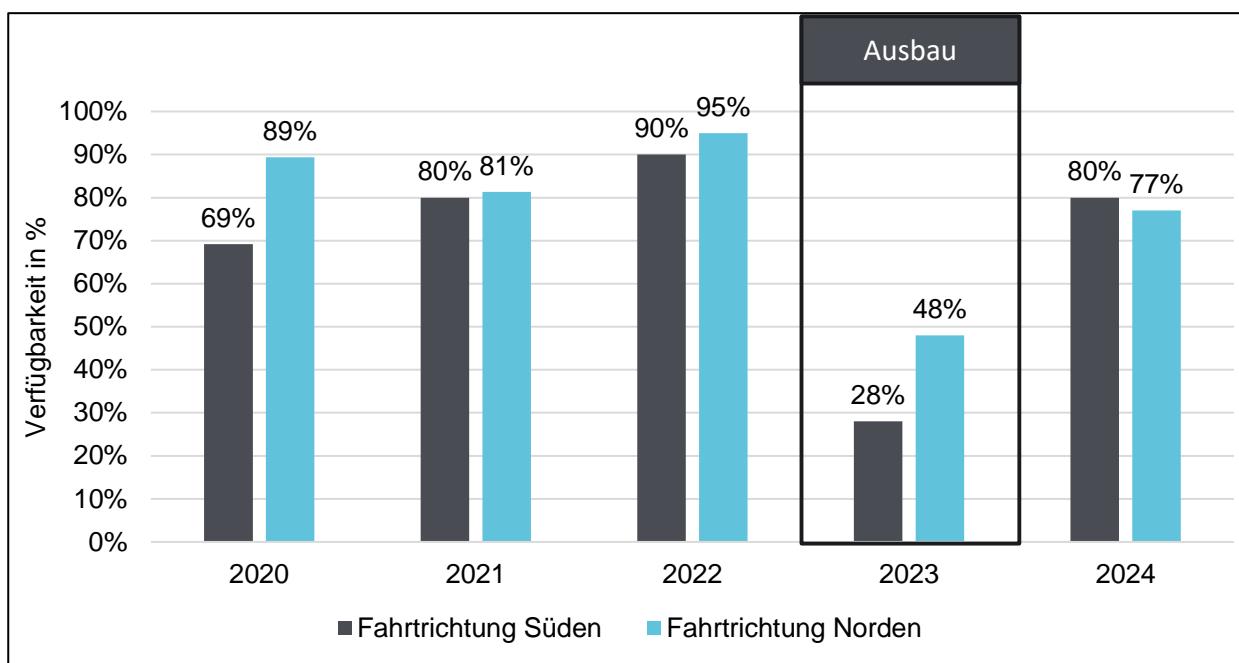


Abbildung 1: Durchschnittliche jährliche Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage je Fahrtrichtung (IVV 2025)

Die tiefergehende Analyse der Betriebsunterbrechungen zwischen 2020 und 2024 zeigt, dass insbesondere arbeitsbedingte Ausfälle – etwa im Zusammenhang mit dem Streckenausbau – zu den längsten Ausfalldauern führten (Abbildung 2). Unfallbedingte Abschaltungen traten dagegen häufiger auf, hatten jedoch meist eine deutlich kürzere Dauer. Im Zuge der Streckenverlängerung konnte keine signifikante Zunahme unfallbedingter Abschaltungen festgestellt werden.

Inspektions- und wartungsbedingte Ausfälle nahmen mit der Verlängerung der Teststrecke zu, da größere Anlagen umfangreichere Wartungsmaßnahmen erforderten. Störungsbedingte Ausfälle konnten in der ersten Projektphase reduziert werden, stiegen jedoch in den ersten Monaten nach Inbetriebnahme der verlängerten Oberleitungsstrecke zunächst wieder an. Dies ist auf neue technische Herausforderungen im Realbetrieb zurückzuführen. Im letzten Betriebshalbjahr war dieser Trend allerdings wieder rückläufig.

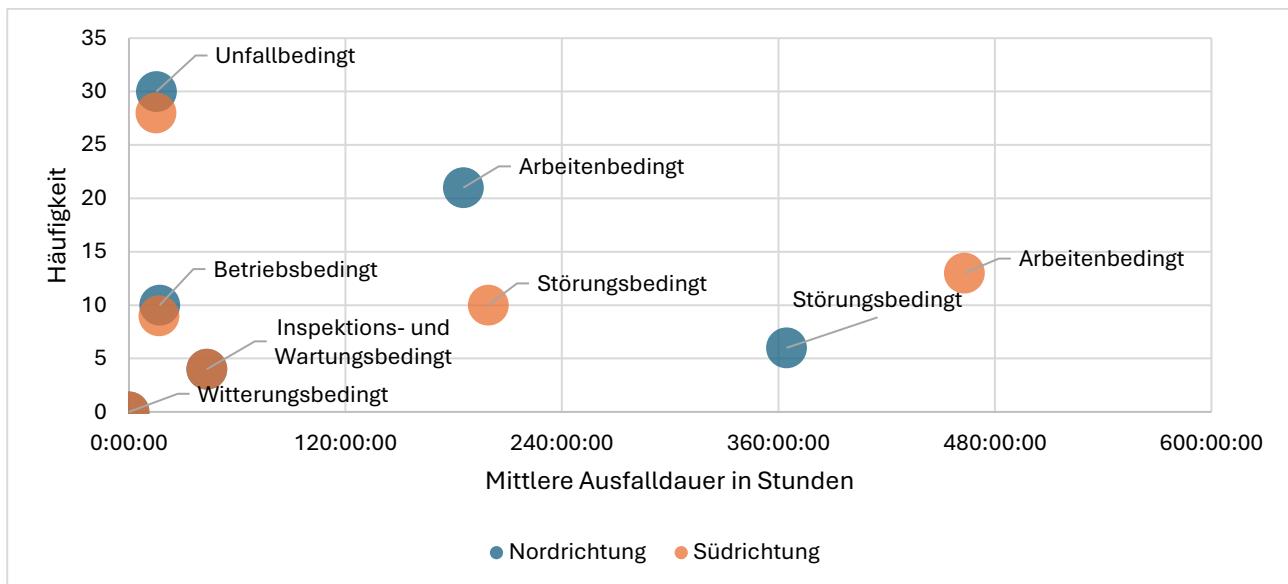


Abbildung 2: Zusammenhang mittlere Ausfalldauer und Häufigkeit der Ausfallursachen (IVV 2025)

In der zweiten Projektphase wurde auch die Zuverlässigkeit der Oberleitungsanlage analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Zuverlässigkeit der Oberleitungsanlage im Verlauf des Realbetriebs deutlich verbessert hat. Die mittlere Zeit zwischen zwei Ausfällen (MTBF) lag in Fahrtrichtung Süden bei rund 397 Stunden und wies insgesamt einen positiven Trend auf. Gleichzeitig konnte die durchschnittliche Dauer von Ausfällen (MTTR) im Jahr 2024 im Vergleich zu den Vorjahren gesenkt werden.

Eine wichtige Erkenntnis aus der Begleitung des Realbetriebs der Oberleitungsanlage und der Analyse der Oberleitungsanlagendaten ist, dass die alleinige Abschaltung der jeweils betroffenen Fahrtrichtung – anstelle einer beidseitigen Abschaltung – die Gesamtverfügbarkeit deutlich erhöht. Übertragen auf den weiteren Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur bedeutet dies, dass eine Segmentierung der Anlage ebenfalls einen positiven Effekt auf die Verfügbarkeit haben kann, da bei störfallbedingten Abschaltungen jeweils nur das

betroffene Segment betroffen wäre. Ergänzend lässt sich die Verfügbarkeit weiter steigern, indem entweder zusätzliches Personal oder eine Systemlösung mit Befugnis zur Wiedereinschaltung durch das Operatorenpersonal rund um die Uhr implementiert wird, um Ausfallzeiten zu minimieren. Insgesamt erscheint mit zunehmender Betriebserfahrung und abgeschlossenem Ausbau eine Stabilisierung und Reduktion der Ausfallzeiten realistisch.

2.2. Segmentierung des eHighway-Systems

Ein wichtiger Baustein für den zukünftigen Betrieb eines Oberleitungsinfrastrukturnetzes ist die Einteilung der Infrastruktur in (Oberleitungs-) Segmente und (Oberleitungs-) Abschnitte. Dies erhöht die Verfügbarkeit der Oberleitungsinfrastruktur, da für jedes abschaltungsbedingende Ereignis lediglich das betroffene Segment abgeschaltet werden muss.

Ein Abschnitt wird in ein oder mehrere unterbrechungsfreie Segmente unterteilt. Der Abschnitt stellt somit die übergeordnete Einheit dar und ist

räumlich vom nächstgelegenen Abschnitt getrennt. Darüber hinaus sind für jeden Abschnitt eindeutig definierte Zuständigkeiten hinsichtlich des Betriebspersonals festgelegt (Verantwortliche Elektrofachkraft, Betrieb, elektrotechnisch unterwiesene Personen, Operatorpersonal etc.), die für alle Segmente gleich sind.

Ein Segment ist dem Abschnitt untergeordnet und separat ein- und ausschaltbar. Es kann einen oder mehrere Einspeisepunkte aufweisen. Beim Betrieb der Anlage wird der Übergang zwischen einzelnen Segmenten von den Fahrern nicht bemerkt. Idealerweise entspricht die Länge eines Segments einer standardisierten Regellänge.

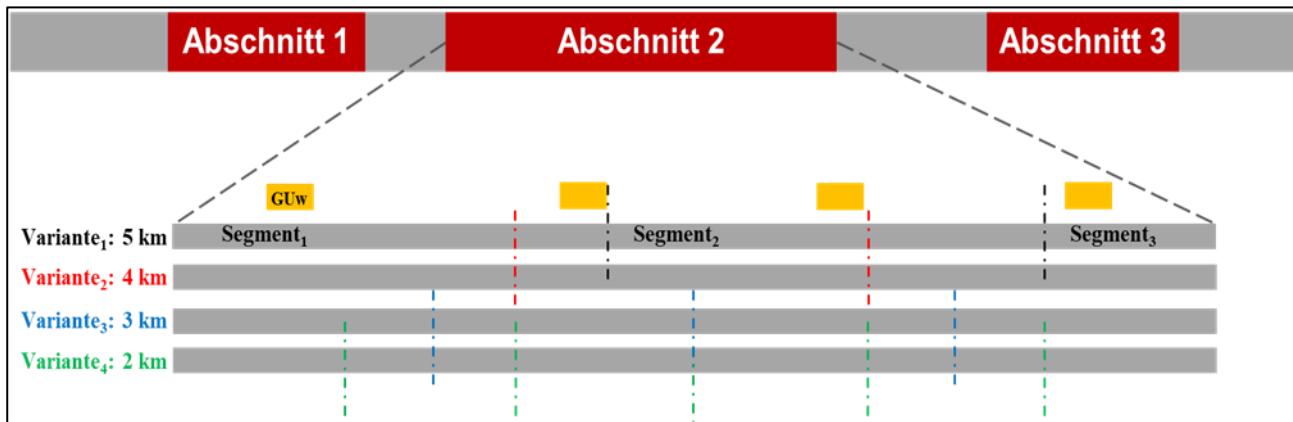


Abbildung 3: Abschnitte und beispielhaft verschiedene lange Segmente innerhalb eines Abschnitts (Die Autobahn GmbH, 2025)

In Abbildung 3 ist der Unterschied zwischen einem Segment und einem Abschnitt grafisch dargestellt. Der Abschnitt 2 stellt dabei beispielhaft einen 12 Kilometer langen Abschnitt der Oberleitungsinfrastruktur dar. Die vier grauen Balken zeigen vier verschiedene mögliche Segmentlängen. Die Gleichrichterunterwerke repräsentieren die Unter spannwerke, die innerhalb des Abschnitts vorhanden sind. Die Grafik verdeutlicht, dass zwischen zwei Abschnitten eine räumliche Trennung besteht (beispielsweise eine Anschlussstelle oder eine umweltplanerische Ausschlusszone), während zwei Segmente untermischungsfrei aufeinander folgen.

Um Hinweise auf die Ausgestaltung des Betriebs eines Oberleitungsnetzes auf Autobahnen zu gewinnen, wurden an zwölf ausgewählte Fachpersonen zugeschnittene Fragebögen versendet sowie ergänzende Experteninterviews durchgeführt (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Die unterschiedlichen Hintergründe und Perspektiven der Befragten – etwa aus Planung, Bau und Betrieb von Oberleitungsinfrastruktur für Lkw oder ÖPNV – ermöglichen einen umfassenden Blick auf die relevanten Rahmenbedingungen für die Segmentierung des Oberleitungsnetzes. Neben den Expertengesprächen und Fragebögen flossen auch die Rettungstransport-hubschrauber-Studie (Grosse, et al) aus ELISA III sowie die Ergebnisse des Workshops Session 3 „Betrieb der Oberleitung“ vom

Netzwerktreffen der Oberleitungsforscher vom 11.12.2024 in die Betrachtung ein.

Auf Basis der Befragungsergebnisse wurden wesentliche Rahmenbedingungen für den Betrieb eines größeren Oberleitungsnetzes identifiziert. Zudem wurden die Expertinnen und Experten um eine erste Einschätzung zur optimalen Segment- und Abschnittslänge sowie den sich daraus ergebenden Auswirkungen auf die Betriebs- und Störfallprozesse gebeten.

Die Ergebnisse lieferten wichtige Anhaltspunkte für die Einteilung in Oberleitungsabschnitte und -segmente sowie für die Planung und den Betrieb zukünftiger Oberleitungsstrecken.

Tabelle 1: Übersicht der Befragten

Thema	Fr.	Exp.
ELISA-Betriebsverantwortlicher: Infrastrukturbetrieb	X	X
Netzbetreiber/Netzanschlusspunkte (VNB)	X	X
Pantograph/Stromversorgung der Lkw	X	-
Batterie und Verbrauch der Lkw (OEM)	X	-
Oberleitungsinfrastruktur und Stromversorgung	X	-
Grundlagen des Oberleitungsbetriebs (ÖPNV)	X	X
Leitung Kontrollraumpersonal	X	X
Durchführung Bau der Oberleitung	X	X
Technische Planung: Bau der Oberleitung	X	X
Baurecht und Planfeststellungsverfahren	-	X
Feuerwehrkräfte auf dem Oberleitungsstreckenabschnitt	X	X
BETSiE eHighway-Nachfrageabschätzungstool	X	-

Folgende einschlägige **Rahmenbedingungen** wurden basierend auf den Befragungen identifiziert:

Betriebliche Rahmenbedingungen

Rahmenbedingung 1: Maximale Entfernung des Streckenabschnitts vom Betriebspersonal

Betrieblich: Die verantwortliche Elektrofachkraft (DIN VDE 1000-10) und die Betriebsverantwortlichen sollten maximal zwei Stunden bei normalem Verkehr bis zum Abschnitt benötigen. Das Schaltpersonal sollte maximal 45 Minuten bei normalem Verkehr benötigen.

Rahmenbedingung 2: Anzahl der zu betreuenden Abschnitte je Rolle der am Betrieb beteiligten Personen

Betrieblich: Die verantwortliche Elektrofachkraft und die Betriebsverantwortlichen können so viele Abschnitte betreuen, wie innerhalb von zwei Stunden erreicht sind. Das schaltberechtigte Personal sollte maximal zwei Abschnitte betreuen.

Rahmenbedingung 3: Einbindung der Autobahnmeistereien

Betrieblich: Das Personal der Autobahnmeisterei liefert im Falle von Unfällen einen wichtigen betrieblichen Beitrag und kann evtl. auch direkt im Betrieb involviert sein als elektrotechnisch unterwiesene Person mit Schaltberechtigung.

Planerisch: Zuständigkeitsgrenzen der Autobahnmeistereien sollten als Orientierung für Abschnittsgrenzen dienen.

Rahmenbedingung 4: Zusammenarbeit mit Rettungskräften / Eindeutige Zuordnung der Segmente

Betrieblich: Bei Abschaltung durch Operatoren sollte automatisierte Meldungen über abgeschaltete Segmente an die Rettungskräfte erfolgen. Eine eindeutige Markierung von ein- bzw. ausgeschalteten Segmenten in der Bedienoberfläche und vor Ort erhöht die Sicherheit im Zusammenhang mit Segmentabschaltungen.

Technisch: Ausstattung mit LEDs, die den Schaltzustand des jeweiligen Segments anzeigen. Ggf. sind Abschaltterminals für die Rettungskräfte und lückenlose Kamerabeobachtung sinnvoll.

Planerisch: Eine frühzeitige Einbindung aller zuständigen Rettungskräfte zur Abstimmung der Prozesse ist erforderlich. Beispielsweise verläuft allein die ELISA-Teststrecke über drei Feuerwehr-zuständigkeitsbereiche.

Rahmenbedingung 5: Leitstellenintegration in Verkehrszentralen

Betrieblich: Der Betrieb aus Verkehrszentralen ist grundsätzlich möglich. In der Hochlaufphase ist dies voraussichtlich gut integrierbar. Die Oberleitungsabschnittsgrenzen sollten sich unter anderem an den Zuständigkeitsgrenzen von Verkehrszentralen orientieren.

Technisch: Die Schaffung eines Arbeitsplatzes für Oberleitungsbetrieb in der jeweiligen Verkehrszentrale ist Voraussetzung für die Leitstellen-integration.

Planerisch: Abschnittsgrenzen sind entsprechend der Zuständigkeitswechsel der Verkehrszentrale einzuplanen.

Technische Rahmenbedingungen

Rahmenbedingung 6: Verlust nutzbarer Oberleitungsstrecke beim Anbügelvorgang

Technisch: Eine höhere Abschnittslänge verringert den Anteil der sogenannten Verluststrecke beim Anbügeln (ca. 150 Meter je An- und Abbügelvorgang), also jenen Teil der Oberleitung, der während des Ausfahrens des Pantographen nicht genutzt werden kann. Weiterentwicklungen des Pantographensystems tragen ebenfalls zur Reduktion dieses Verlusts bei.

Rahmenbedingung 7: Technische Grenzen maximaler Segmentlänge/Spannungsniveau im Fahrdrift

Technisch: Bei besonders kurzen Segmenten stehen Kosten und Nutzen aufgrund von Streckentrenner in keinem guten Verhältnis. Bei besonders langen Segmenten (>10 Kilometer) wird eine Segmentgrenze aus elektrotechnischen Gründen erforderlich, um einen Spannungsabfall zu vermeiden und die Anzahl angebügelter Lkw pro Segment nicht zu groß werden zu lassen. Ein höheres Spannungsniveau erlaubt längere Segmente und verbessert die Leistungsübertragung.

Betrieblich: Ein höheres Spannungsniveau hat höhere betriebliche Anforderungen zur Folge, da es erhöhte Arbeitssicherheitsanforderungen nach sich zieht.

Planerisch: Die Segmentlängen sollten in Abhängigkeit von Unterwerksstandorten/Netzanschlusspunkten und erwarteter Oberleitungs-Lkw-Dichte sowie Streckentopologie (eine höhere Steigung bedarf einer höheren Leistung je Lkw) zusammen mit dem Anlagenerrichter geplant werden.

Rahmenbedingung 8: Bauliche Perspektive bei Errichtung eines segmentierten Oberleitungsnetzes

Technisch: Der Ausbau bestehender Anlagen im laufenden Betrieb ist möglich. Grundlage für die Planung von Abschnitten und Segmenten sind bauliche Zwangspunkte (z. B. Anschlussstellen, Brücken), verkehrliche Parameter (Lkw-Verkehrsstärke) sowie räumliche Gegebenheiten (z. B. Netzanschlusspunkte, Standorte für Unterwerke). Ergänzend ist aus baulicher Perspektive ein größeres Baufeld unter Wegnahme eines Fahrstreifens wünschenswert.

Planerische Rahmenbedingungen

Rahmenbedingung 9: Aussparung anspruchsvoller Streckenabschnitte

Planerisch: Bei der Planung von Abschnitten sollte geprüft werden, ob organisatorische Grenzen so gelegt werden können, dass dabei besonders aufwändig zu elektrifizierende Streckenabschnitte nach Möglichkeit ausgespart werden. Zu häufige Oberleitungsunterbrechungen sollten dabei aufgrund geringerer Ausnutzung der Fahrleitung bei häufigen Anbügelvorgängen vermieden werden. Kleinere Unterbrechungen innerhalb eines Abschnittes sind dabei möglich.

Rahmenbedingung 10: Ausstattung der Feuerwehren

Planerisch: Feuerwehren sind frühzeitig in die Planung neuer Oberleitungsabschnitte einzubinden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Voraussetzungen hinsichtlich vorhandener Ausrüstung und Erfahrung im Umgang mit Oberleitungen von Feuerwehr zu Feuerwehr variieren und ein Oberleitungsabschnitt in der Regel die Zuständigkeit mehrerer Feuerwehren berührt wird. Die Zuständigkeitsgrenzen sollten dabei ebenfalls bei der Planung der Abschnitte berücksichtigt werden.

Rahmenbedingung 11: Verfügbarkeit von Netzanschlusspunkten an Mittel- und Hochspannungsnetz

Planerisch: Die Verfügbarkeit geeigneter Netzanschlusspunkte ist bei der Streckenplanung zu berücksichtigen. Eine frühzeitige Einbindung der zuständigen Verteilnetzbetreiber ist erforderlich. Zuständigkeitsgrenzen der Netzbetreiber sollten bei der Planung von Segmentgrenzen beachtet werden. Gegebenenfalls muss neue Ladeinfrastruktur gemeinsam mit zusätzlichen Netzkapazitäten geplant werden – dies gilt sowohl für stationäres als auch für dynamisches Laden.

Rahmenbedingung 12: Planfeststellung oder Entfall

Planerisch: Bei der Planung neuer Oberleitungsabschnitte kann zunächst geprüft werden, ob ein Entfall der Planfeststellung möglich ist. Voraussetzung für ein effizientes, beschleunigtes Planungsverfahren ist der Ausschluss von Tabuzonen (z. B. Wasserschutz, Flora/Fauna) sowie die Beteiligung von Trägern öffentlicher Belange.

Rahmenbedingung 13: Verfügbarkeit von Landeflächen für Rettungstransporthubschrauber entlang von Oberleitungsabschnitten

Planerisch: Die Bedeutung der Luftrettung für die jeweils zu elektrifizierende Strecke ist bei der Planung zu berücksichtigen. Es sollten geeignete Landeflächen geschaffen werden, wie sie in der Studie zu Rettungstransporthubschraubereinsätzen des IKEM (Grosse et al., 2022) beschrieben sind. Die Festlegung von Abschnittsgrenzen sollte auch unter Berücksichtigung der Anforderungen des streckenbezogenen Rettungskonzepts erfolgen.

Abschließende Einschätzungen Segment- und Abschnittslänge:

Betrieblich: Aus den Fragebögen und Expertengesprächen geht hervor, dass betriebliche Faktoren, die die Abschnittslänge beeinflussen, hauptsächlich mit der Erreichbarkeit der Streckenabschnitte und der Zuständigkeitsgrenzen von Autobahnmeistereien und Rettungskräften zusammenhängen. Je länger ein durchgehend elektrifizierter Abschnitt, desto weiter ist die Strecke für einen hypothetischen Einsatz und desto mehr Rettungskräfte und Autobahnmeistereien müssen in die Abstimmung der für den Abschnitt gültigen Prozesse eingebunden werden. Bei Segmenten erschwert eine zu kurze Länge die eindeutige Zuordnung von Ereignissen und kann zur Mitabschaltung angrenzender Segmente führen. Zu lange Segmente hingegen vergrößern den abgeschalteten Anteil bei Störungen und wirken sich negativ auf die Verfügbarkeit aus.

Abschnittslänge (betrieblich): **20 - 30 Kilometer**

Segmentlänge (betrieblich): **3 - 5 Kilometer**

Technisch: Technische Rahmenbedingungen haben einen direkten Einfluss auf die Abschnitts- und Segmentlängen. Abschnittslängen werden von den erschwerenden Begebenheiten baulicher Natur entlang des Streckenabschnitts beeinflusst, wie zum Beispiel Brücken mit niedrigen Durchfahrthöhen oder Anschlussstellen sowie von der Verfügbarkeit von Netzanschlusspunkten beeinflusst. Je länger der durchgehend zu elektrifizierende Abschnitt, desto mehr solcher Zugangspunkte werden passiert. Die Segmentlänge wird von den elektrotechnischen Rahmenbedingungen beeinflusst. Längere Segmente können Spannungsabfälle verursachen und erfordern ggf. mehrere Gleichrichterunterwerke, was das Schaltkonzept komplexer macht.

Die technische Abschnittslänge ist abhängig von baulichen Begebenheiten wie zum Beispiel Brücken, oder Anschlussstellen. Aus diesem Grund lässt sie sich nicht konkret beziffern, sondern muss anhand

der beschriebenen Rahmenbedingungen festgelegt werden.

Segmentlänge (technisch): idealerweise **1 - 3 km**

Auch die planerische Segmentlänge, die von planerischen, organisatorischen und rechtlichen Einflüssen wie zum Beispiel Zuständigkeitsgrenzen oder Umweltschutzonen abhängig ist, lässt sich nicht konkret beziffern, sondern ist anhand der beschriebenen Rahmenbedingungen festzulegen.

2.3. Einrichtungskosten der Leitstelle und der Oberleitungsinfrastruktur

Im Rahmen der Untersuchung ökonomischer Fragestellungen wurde die zukünftige Kostenentwicklung der Leitstelleninfrastruktur beim Ausbau des eHighway-Systems untersucht. Als Orientierung dienen hier die Erkenntnisse aus ELISA III, da hier erstmals eine Oberleitungsstrecke um etwa sieben Kilometer verlängert wurde. Dabei werden die Erfahrungen aus ELISA I und ELISA III sowie Experteneinschätzungen herangezogen, um Prognosen über zukünftige Kostenentwicklungen zu ermöglichen.

Die Erfahrungen aus der Erweiterung der ELISA zeigen, dass sich die Einrichtungskosten für die Leitstelleninfrastruktur mit fortlaufendem Ausbau des eHighway-Systems verringern. Solange die bestehende Leitstelleninfrastruktur für neu hinzukommende Strecke genutzt werden kann, bleiben die Kosten zunächst weitgehend konstant. Der Vergleich der tatsächlich angefallenen Kosten zwischen den Projekten ELISA I und ELISA III zeigt, dass die Einrichtungskosten relativ zur Streckenlänge mit der Erweiterung in ELISA III nicht gestiegen sind. Dies stützt die Annahme, dass bei einem umfangreichen Ausbau die Kosten pro Kilometer sinken können.

Eine zentrale Erkenntnis aus der Kostenbetrachtung der Errichtung und Erweiterung der ELISA-Anlage ist, dass die Kosten für die Infrastruktur mit ca. 1,7 Mio. € pro Kilometer im Rahmen der Prognosen liegen, die in verschiedenen Studien zuvor genannt wurden. Der Vergleich der Infrastrukturkosten pro Kilometer zwischen den Abschnitten ELISA I und ELISA III zeigt jedoch, dass die Kosten für die kürzere Ausbaustrecke von ELISA III höher ausfielen als für die ursprünglichen zehn Kilometer von ELISA I.

Dieser Unterschied lässt sich durch verschiedene Faktoren erklären:

1. Sonderanforderungen: Ein erheblicher Anteil der Mehrkosten stammt von der speziellen Ausführung von Masten an der Anschlussstelle Langen/Mörfelden sowie der unterbrechungsfreien Elektrifizierung. Zusätzlich entstanden Kosten durch Anpassungen am elektrischen Systemkonzept.
2. Technische und bauliche Faktoren: Die Projektkosten sind abhängig von technischen und baulichen Gegebenheiten. Bei der Erweiterung mussten beispielsweise mehrere Brücken sowie Anschlussstellen gekreuzt werden, was trotz kürzerer Streckenlänge höhere Kosten für die Befestigung und Erdung des Fahrdrähts mit sich brachte. Da in ELISA III nur eine Fahrtrichtung elektrifiziert wurde, blieb das Potenzial der neu errichteten Gleichrichterunterwerke ungenutzt – diese könnten auch die Gegenrichtung versorgen.
3. Planung und Organisation: Faktoren wie Planungsleistungen, spezielle Werkzeuge und Baustellenmanagement erhöhen die Kosten, ohne dass diese direkt mit der Streckenlänge in Verbindung stehen.

Es kann nicht pauschal davon ausgegangen werden, dass die Kosten pro Kilometer mit zunehmendem Ausbau des Systems sinken. Vielmehr zeigen die Unterschiede zwischen ELISA I und ELISA III, dass lokale Gegebenheiten und die Art der Planung einen entscheidenden Einfluss auf die Kostenentwicklung haben.

2.4. Integration Leitstelle in Verkehrszentralen

Die Integration der ELISA-Leitstelle in die Verkehrszentrale hatte keinen erheblichen Einfluss auf die laufenden Kosten der Verkehrszentrale. Um einen wirtschaftlichen Betrieb der ELISA-Oberleitung zu gewährleisten, wurden die Leitstellenaufgaben in die regulären Aufgaben des Kontrollraumpersonals integriert. Trotz der dadurch hinzukommenden Aufgabe ergaben sich nur geringe zusätzliche laufende Kosten, da der Anteil der ELISA-Arbeitsstunden an den Gesamtarbeitsstunden der 24/7-Schichten des Kontrollraums minimal war (maximal 0,05 %). Die für ELISA zusätzlich eingestellten Mitarbeitenden bearbeiteten auch allgemeine Aufgaben, wodurch Synergien zwischen dem Betrieb der ELISA-Anlage und dem Verkehrsmanagement erzielt wurden.

Ein Vergleich mit den Kosten, die bei einer Auslagerung der Betriebsführung an ein Drittunternehmen angefallen wären, zeigt, dass die

gewählte Lösung – trotz zusätzlichem Personal- und Hardwarebedarf – deutlich kostengünstiger ist.

2.5. Standardisierung des Umgangs mit vom eHighway-System betroffenen Rettungskräften

Die Evaluation der Betriebsprozesse des ELISA-Systems sowie die Zusammenarbeit der beteiligten Feuerwehren (Darmstadt, Mörfelden-Walldorf und Frankfurt) bestätigen, dass die Erkenntnisse aus dem bisherigen Betrieb die Standardisierung der Arbeitsabläufe von Rettungskräften auf Oberleitungsstrecken ermöglichen. Obwohl regionale Unterschiede in den Gefahrenabwehrstrukturen bundesweit einheitliche Störfallprozesse erschweren, zeigen die Erfahrungen, dass durch die frühzeitige Einbindung aller relevanten Rettungskräfte in die Planung einheitliche Betriebsprozesse zumindest für Oberleitungsabschnitte definierter Länge erfolgreich umgesetzt werden können – vorausgesetzt, die notwendigen organisatorischen und technischen Voraussetzungen sind gegeben.

2.6. Akzeptanz der am Oberleitungsanlagenbetrieb beteiligter Akteure

Im Jahr 2019 wurde auf der A5 in Deutschland erstmals eine Oberleitungsanlage im Rahmen des Projekts ELISA in Betrieb genommen. Mit diesem Schritt wurde auch die Funktion eines Oberleitungsanlagenbetreibers geschaffen, die von der Autobahn GmbH übernommen wurde. Als Betreiber der Straßeninfrastruktur lag die Verantwortung für den Betrieb der ELISA-Teststrecke naheliegenderweise ebenfalls bei der Autobahn GmbH. Zu den zentralen Aufgaben des Oberleitungsanlagenbetreibers zählten unter anderem die Überwachung und Steuerung des Betriebs über eine Leitstelle, die Durchführung von Ein- und Abschaltungen der Oberleitungsanlage (zum Beispiel bei Anfragen durch Gefahrenabwehrbehörden) sowie die Koordination von Inspektionen, Wartungs- und Reparaturmaßnahmen. Darüber hinaus war der Betreiber für die Information der Projektpartner, insbesondere der Transportunternehmen, über betriebliche Änderungen zuständig.

Diese Aufgaben beeinflussten maßgeblich die Akzeptanz des eHighway-Systems bei den beteiligten Akteuren. Eine Schlüsselrolle spielt dabei das Leitstellenpersonal, das die Anlage im täglichen Betrieb überwacht und steuernd eingreift. Die Ursachen für Abschaltungen, etwa witterungsbedingte Störungen oder Eingriffe von Behörden, waren dabei von besonderem Interesse. Ziel des Evaluationsansatzes war es, die Wahr-

nehmung des Anlagenbetriebs, insbesondere in Bezug auf Ausfallursachen und Verfügbarkeit, sowie die generelle Einstellung gegenüber einem zukünftigen Ausbau des Systems bei den beteiligten Akteuren zu erheben. Hierzu wurde zwischen September und Oktober 2024 eine digitale Expertenbefragung mittels Fragebogen durchgeführt. Der Fragebogen umfasste zwölf Fragen zu Themen wie persönliche Erfahrungen mit der Oberleitungsinfrastruktur, Einschätzungen zu Ausfallursachen, Validierung von Datenauswertungen, Bewertung der Verfügbarkeit sowie Haltung zur Technologie. Insgesamt wurden fünf Experten aus dem Projektumfeld befragt, darunter Mitarbeitende des Oberleitungsanlagenbetreibers, des Oberleitungsanlagenerrichters sowie des Energieversorgers. Alle Befragten verfügten über mehr als fünf Jahre Erfahrung im Bereich eHighway. Die Ergebnisse zeigen eine hohe Zustimmung zur technischen Verfügbarkeit der Oberleitungsanlage: Alle Experten hielten eine Verfügbarkeit von über 98 % langfristig für realistisch.

Ein weiteres zentrales Ergebnis betrifft die Einschätzung der Experten hinsichtlich der Ausfallursachen: Witterungsbedingte Störungen und Eingriffe durch Gefahrenabwehrbehörden wurden

von den Experten als häufiger und schwerwiegender eingeschätzt, als sie tatsächlich laut Anlagendaten auftraten. Besonders Abschaltungen durch Gefahrenabwehrbehörden wurden im Projektverlauf als besonders störend wahrgenommen, obwohl ihre tatsächliche Ausfalldauer gering war. Dies lässt darauf schließen, dass bestimmte Arten von Betriebsunterbrechungen mit hohem organisatorischem Aufwand subjektiv stärker wahrgenommen werden. Die Einschätzungen zu betriebsbedingten und wartungsbedingten Unterbrechungen zeigten hingegen eine teils überschätzte Ausfalldauer, obwohl die Experten direkt in Wartung und Betrieb eingebunden waren.

Ein weiterer Aspekt war die Bedeutung personeller Verfügbarkeit: Die Mehrheit der Experten stimmte der Einschätzung zu, dass eine durchgehende Verfügbarkeit von Personal mit Befugnis zur Wiedereinschaltung die Anlagenverfügbarkeit deutlich verbessern könnte. Abschließend lässt sich festhalten, dass alle befragten Experten eine positive Haltung gegenüber dem eHighway-System einnahmen. Sie engagierten sich aktiv im Projekt und befürworten den weiteren Ausbau der Oberleitungs-technologie.

3. Schlussfolgerungen und Zukunftsaussichten

Der Oberleitungsinfrastrukturbetreiber der ELISA-Anlage war der erste Betreiber einer Oberleitungsanlage auf einer deutschen Autobahn. Die Betriebsvorbereitung war mit besonderen Herausforderungen verbunden, da keine Erfahrungswerte vorlagen und einzelne rechtliche Aspekte zunächst abschließend geklärt werden mussten.

Darüber hinaus musste ein speziell auf die Anforderungen eines eHighway-Systems ausgerichtetes Störfallmanagement entwickelt und implementiert werden. Die in diesem Zusammenhang entwickelten Prozesse haben sich im Laufe der fünfeinhalb Jahre seit Aufnahme des Betriebs immer wieder als stabil, wirksam und komplikationsfrei erwiesen und werden sowohl von Seiten des Leitstellenpersonals in der Verkehrszentrale als auch von Seiten der beteiligten Rettungskräfte als gut funktionierend eingeschätzt. Basierend auf den Erkenntnissen aus Bau und Betrieb sowie unter Beteiligung verschiedener Experten innerhalb und

außerhalb des Projektkonsortiums konnten wichtige Hinweise für den Aufbau und die Organisation eines über die Feldversuche hinausgehenden Betriebs von Oberleitungsinfrastruktur in Deutschland gewonnen werden.

Die Integration der eHighway-Leitstelle in die Verkehrszentrale Deutschland hat sich als zielführend erwiesen. Der damit verbundene Mehraufwand hinsichtlich Materials und Personals blieb überschaubar.

Obwohl regionale Unterschiede in den Gefahrenabwehrstrukturen bundesweit einheitliche Störfallprozesse erschweren, zeigen die bisherigen Erfahrungen, dass durch die frühzeitige Einbindung aller relevanten Rettungskräfte in die Planung einheitliche Betriebsprozesse zumindest für Oberleitungsabschnitte definierter Länge erfolgreich umgesetzt werden können, sofern die dafür notwendigen Voraussetzungen geschaffen werden.

4. Schrifttum und weiterführende Literatur

Wilke, J. K., Schöpp, F., Linke, R., & Kaßens-Noor, E. (2024): Hinweise zum Ausbau einer Oberleitungsinfrastruktur auf Autobahnen zur Elektrifizierung des Straßenverkehrs. Straßenverkehrstechnik, Kirschbaum Verlag, 68, 806–813.

Wilke, J. K. (2025): Verfügbarkeit und Ausfallursachen von Oberleitungssystemen auf Autobahnen - Empfehlungen

zum Netzausbau und zum Betrieb (Dissertation). Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik, Darmstadt. Abgerufen von <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/30018/>

Grosse B., Claes F., Prof. Lehmann M., Prof. Kühnel C. u. a. (2022): Einsatz von Rettungshubschraubern im Bereich von eHighways“, Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität (IKEM), Studie im Auftrag der Autobahn GmbH

5. Autorinnen und Autoren des Hinweispapiers

Dr. Achim Reußwig, Die Autobahn GmbH des Bundes

Susanne Schulz, Die Autobahn GmbH des Bundes

Dominik Gurske, Die Autobahn GmbH des Bundes

Dr. Özgür Öztürk, Die Autobahn GmbH des Bundes

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

Laurenz Bremer, Technische Universität Darmstadt, Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik

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

6. Kontakt

Die Autobahn GmbH des Bundes

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

Technische Universität Darmstadt

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

Siemens Mobility GmbH

Krauss-Maffei-Straße 2
80997 München

e-netz Südhessen AG

Forschung & Entwicklung
Dornheimer Weg 24
64293 Darmstadt