

FuE-Programm "Erneuerbar Mobil" des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)

Schlussbericht

Vorhabenbezeichnung:

**Feldversuch eHighway in Schleswig-Holstein
– Teilvorhaben Siemens Mobility GmbH -**

Laufzeit des Vorhabens:

vom: 01.09.2021

bis: 31.12.2024

Zuwendungsempfänger:

(Auflistung aller Verbundpartner)

Siemens Mobility GmbH

Siemenspromenade 6

91058, Erlangen

Förderkennzeichen:

(FKZ's entsprechend der links angegebenen Verbundpartner)

16EM5007-1

1 ZUSAMMENFASSUNG

Der vorliegende Schlussbereich der Siemens Mobility GmbH (SMO) zum Fördervorhaben 16EM5007-1 enthält eine Übersicht über die im Forschungsprojekt durchgeführten Untersuchungen und eine Auswertung der Ergebnisse. Dabei wird in Kapitel 2 zunächst kurz die Zielstellung des Forschungsvorhabens beschrieben. Anschließend enthält Kapitel 3 die Zusammenfassung der in den einzelnen Arbeitspaketen (AP) erzielten Ergebnisse. Eine Übersicht über die Gesamtstruktur des Forschungsprojektes FeSH2b ist in der Vorhabensbeschreibung bzw. dem Projektantrag gegeben. Dort sind auch ein Meilenstein- sowie ein Zeitplan aufgeführt. Die Kapitel vier bis acht enthalten Abweichungen zum ursprünglichen Arbeitsplan, eine Einordnung der Projektergebnisse zum internationalen Stand der Technik, den geleisteten Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Bundes sowie eine Übersicht über die erfolgten Veröffentlichungen im Projekt.

AP 1.1 Operativer Betrieb des Pantographen-Systems

Im Arbeitspaket 1.1 wurde die Performance der Feldversuchs-Lkw und ihrer Pantographen kontinuierlich analysiert. Die SMO nutzte hierfür die cloudbasierte Plattform Railigent. Die Datenerfassung erfolgte über Sensoren und den CAN-Bus der Fahrzeuge. Diese Rohdaten wurden zunächst auf einer SD-Karte zwischengespeichert und anschließend via Mobilfunkverbindung an die Railigent-Datenbank in der Cloud gesendet. Innerhalb der Plattform wurden die Rohdaten mittels interner Algorithmen verarbeitet und in CSV-Dateien umgewandelt. Dies ermöglichte eine detaillierte Verknüpfung der Pantographen-Daten mit den Fahrzeugdaten.

Im Laufe des Projekts wurden verschiedene Berichte erstellt, die sowohl kurzzeitige Betrachtungen (letzten 24 Stunden) als auch langfristige Trendanalysen über Jahre hinweg ermöglichten. Insgesamt wurden sechs unterschiedliche Report-Typen entwickelt, die eine präzise Verfolgung der Leistungsdaten der Pantographen ermöglichten. Ein besonderer Fokus lag auf den Fahrten unter der Oberleitung und den dabei erzielten Kilometern. Über die gesamte Projektlaufzeit hinweg legten die Testfahrzeuge insgesamt 53.000 km unter der Oberleitung zurück.

Ein zentrales Problem war die Verschlechterung der Performance in den Wintermonaten, hauptsächlich bedingt durch Salzablagerungen auf den Pantographen, die zu Isolationsfehlern führten. Durch verschiedene Hardware- und Software-Nachrüstungen konnten diese Auswirkungen jedoch deutlich reduziert werden. Insgesamt konnte die Verfügbarkeit der Pantographen auf durchschnittlich 87% gesteigert werden, was angesichts des Pilotstatus der Systeme eine beeindruckende Leistung darstellt.

AP 1.2 Digital Track Capturing

Im Rahmen des Arbeitspakets 1.2 wurde ein Kamera- und Laser-basiertes Vermessungssystem eingesetzt, um die Infrastruktur digital zu erfassen. Dieses System, das auf die Dachreling eines Fahrzeugs montiert wurde, ermöglichte eine präzise digitale Vermessung der Anlage während der Durchfahrt. Die gesammelten Messpunkte wurden anschließend zu einem digitalen Modell der Anlage verarbeitet, das die Höhen- und Seitenlage aller sichtbaren Anlagenteile darstellt.

Erste Testfahrten auf der Siemens-eigenen Versuchsanlage in Groß Dölln und später auf der FeSH-Feldversuchsstrecke zeigten vielversprechende Ergebnisse. Die digitalen Modelle und die daraus generierten Reports unterstützten die Inspektion und Wartung der Anlage erheblich, indem sie genaue Messdaten lieferten und potenzielle Problemstellen identifizierten.

AP 1.3 LF-Modulation in der Oberleitungsinfrastruktur

Das Arbeitspaket 1.3 beschäftigte sich mit der Erprobung der Übertragung von Anlagenzuständen und Streckeninformationen mittels Low-Frequency-Signalen (LF-Signalen). Hierfür wurden sowohl infrastrukturseitig Signalgeneratoren als auch fahrzeugseitig Empfangsgeräte installiert. Erste Tests auf der Versuchsanlage in Groß Dölln zeigten, dass die Übertragung von LF-Telegrammen grundsätzlich möglich ist.

Die Tests wurden weiter auf der FeSH-Anlage durchgeführt, wobei verschiedene Modulationsarten und Datenraten erprobt wurden. Es zeigte sich, dass eine Übertragung von Streckeninformationen mit einer ausreichend hohen Datenrate möglich ist. Allerdings traten Herausforderungen wie Signalstärke und Störungen durch die Leistungselektronik auf, die weiter optimiert werden müssen.

AP 1.4 Untersuchungen zum Alterungsverhalten von Isolatoren

Während des Betriebes der Oberleitungsanlage zeigte sich, dass die Isolatoren des eHighway besonderen, bislang unbekanntem Umgebungsanforderungen ausgesetzt sind, was teilweise auch zu Störungen führte. Infolgedessen wurde im AP 1.4 gemeinsam mit der TU Dresden ein Langzeitversuch entwickelt und über der Autobahn installiert, der das Alterungsverhalten der Isolatoren analysiert. Die nach zwei Winterperioden gewonnenen vielfältigen Messdaten wurden ausgewertet und gemeinsam mit Forschungspartnern aus Wissenschaft und Industrie bewertet.

AP 2.1 Bewertung Netzqualität bei Einspeisung / Energieversorgung durch Gleichrichterunterwerk und Forschungsunterwerk

Im Arbeitspaket 2.1 wurde die Netzqualität und der Einfluss des DC-Netzes auf das vorgelagerte AC-Netz untersucht. Hierzu wurden die Unterwerke mit hochauflösender Messtechnik ausgestattet und Testfahrten durchgeführt. Erste Analysen zeigten, dass bei steigendem Leistungsbezug durch Oberleitungs-Lkw die Spannungsqualität verbessert wird, was durch einen sinkenden THDu-Wert (Oberschwingungsgesamtverzerrung der Spannung) angezeigt wird.

Zusätzlich unterstützte Siemens Mobility die Untersuchungen durch eigene Testfahrten, bei denen verschiedene Lastszenarien an der Oberleitung nachgestellt wurden. Diese Testfahrten wurden auch zur detaillierten Auswertung des Pantographenverhaltens genutzt.

AP 2.2 Untersuchungen ausgewählter Aspekte zu Systemerweiterung und Systemausbau

Das Arbeitspaket 2.2 war ursprünglich als Mitarbeit an einem ähnlichen Arbeitspaket beim Forschungspartner TU Dresden geplant. Aufgrund von Projektverzögerungen und Ressourcenverfügbarkeiten wurden die Arbeiten jedoch verschoben und teilweise eingeschränkt. Die Bearbeitung war für das letzte Jahr des gemeinsamen Forschungsprojektes geplant und hat sich mit der Projektverlängerung entsprechend zeitlich nach hinten verschoben.

2 ZIELSTELLUNG DES FORSCHUNGSPROJEKTES

Die Siemens Mobility GmbH (SMO) als technischer Entwickler des eHighway-Systems beteiligt sich als Projektpartner an dem laufenden Forschungsvorhaben FeSH2b einerseits im Rahmen des Forschungs- und Evaluationsprogramms, indem eine Evaluation aus Sicht der Oberleitungsinfrastrukturerrichter vorgenommen und die gewonnenen Erkenntnisse dokumentiert und publiziert werden. Andererseits legt die SMO einen Schwerpunkt auf den operativen Betrieb des durch SMO entwickelten Pantographensystems, um einerseits die Verfügbarkeit/Zuverlässigkeit des Systems im Rahmen des Feldversuchs zu gewährleisten und andererseits Weiterentwicklungen auf Basis der Projektergebnisse anstoßen zu können. Hier geht es insbesondere um das Zusammenwirken des Pantographensystems mit der OL-Anlage unter Berücksichtigung und Bewertung der spezifischen Anwendungsbedingungen auf der A1. Andere Themenfelder der SMO fokussieren auf Tests und Erprobungen in den Bereichen Zustandserfassungen und -bewertungen, betriebliche Sicherheit, sowie Material- und Werkstoffeigenschaften. Daneben dient die SMO aufgrund der großen Erfahrungen auf dem Gebiet der elektrischen Bahnenergieversorgung durch Oberleitungsanlagen als Ansprechpartner für elektro- und fahrzeugtechnische Fragestellungen.

Im Projekt FeSH1 wurde die Oberleitungsanlage auf der Bundesautobahn 1 (BAB) errichtet.

Das Gesamtforschungsprojekt FeSH2 unter Federführung des FuE Zentrums der FH Kiel startete bereits im Jahr 2019. Es ist eingeteilt in einen Teil FeSH2a, der sich mit dem Betrieb der Oberleitungsanlage befasst, sowie einen Teil FeSH2B, der die wissenschaftliche Begleitforschung beinhaltet. Die durch das Projekt FeSH2 angestrebten Ziele leiten sich vorrangig aus dem Betrieb einer Pilotanlage im öffentlichen Straßenraum sowie aus dem realitätsnahen, elektrischen Betrieb der OH-Lkw in einem bestehenden Verkehrssystem ab. Insgesamt trägt das Projekt FeSH2 im Einklang mit den Elektromobilitäts-Agenden des Bundes erheblich zu dem übergeordneten, gesamtgesellschaftlichen Ziel bei, für alle Verkehrsträger bzw. Transportprofile innerhalb der nächsten Jahre einsatzbereite und zuverlässige Elektrifizierungsoptionen zur Verfügung zu haben..

Es lassen sich die folgenden Ziele für das Teilprojekt FeSH2b ableiten:

Hinsichtlich der späteren Ausweitung der elektrifizierten Netzabschnitte soll FeSH2 wertvolle Erkenntnisse zu planerischen, verkehrlichen, straßenbaulichen und straßenbetrieblichen Aspekten liefern:

- Das System eHighway soll nach straßenbaulichen und straßenbetrieblichen Kriterien im realen Verkehrssystem und im Zusammenwirken mit bestehenden Strategien des Verkehrsmanagements evaluiert werden. Dadurch soll ein valides Gesamtkonzept für den infrastrukturseitigen Handlungsbedarf bei der Realisierung oberleitungsgebundener Antriebskonzepte im elektrifizierten Güterverkehr erstellt werden.

In Bezug auf das eHighway-System hat das Projekt FeSH2b die folgenden technischen Ziele:

- Es sollen Aussagen zu Funktionalität und Zuverlässigkeit der Fahrzeug- und Infrastruktursysteme im Realbetrieb getroffen werden.

Weiterhin ist die Integrationsfähigkeit der OH-Lkw in bestehende logistische Prozesse zu belegen:

- Für Transporteure relevante wirtschaftliche Grundlagen zum Einsatz von OH-Lkw sollen erforscht werden.

Schließlich sollen Grundlagen für einen späteren Systemausbau geschaffen werden:

- Das begleitende Forschungs- und Evaluationsprogramm soll alle relevanten verkehrstechnischen, energietechnischen, ökologischen, ökonomischen und rechtlichen Aspekte erfassen (z.B. Wirtschaftlichkeits- und Umweltkennwerte, insbesondere Energiebedarf, Emissionen und Betriebskosten).

- Empfehlungen für den späteren Systemausbau sollen formuliert und zusammen mit den weiteren Erkenntnissen aus dem Projekt in zielgruppenspezifischen Hinweispapieren dokumentiert werden.
- Während der Projektlaufzeit sollen weitere Transporteure zu einer Teilnahme am Feldversuch motiviert werden, um damit eine Weiterführung des Betriebs der Teststrecke über die Projektlaufzeit hinaus und möglichst auch einen ersten Ausbau der Teststrecke zu unterstützen.

Die SMO hat sich durch einen eigenen Forschungsantrag im Jahr 2021 an das Projekt FeSH2b angeschlossen. Der vorliegende Schlussbericht enthält entsprechend die Inhalte, die durch SMO erarbeitet wurden. Anknüpfend an die beschriebenen Ziele des bestehenden Projektes FeSH2b sind im nachfolgenden Kapitel 3 die geplanten Arbeitspakete und Forschungsinhalte beschrieben, die Siemens Mobility in das Projekt einbringt.

3 ERGEBNISSE DER EINZELNEN ARBEITSPAKETE

3.1 AP 1.1 Operativer Betrieb des Pantographen-Systems

Im AP.1 wurde durch die Siemens Mobility GmbH (SMO) kontinuierlich die Performance der Feldversuchs-Lkw an der Feldversuchsstrecke analysiert und in wöchentlichen Durchsprachen mit den Forschungspartnern der FH Kiel abgeglichen. Dabei wurden sowohl Kurzzeit- als auch Langzeittrends und Fehlerbilder identifiziert und analysiert sowie regelmäßige Reports erstellt. Bei SMO wurde für diese Analysen die cloudbasierte Plattform Railigent eingesetzt und entsprechend in ihrem Funktionsumfang erweitert.

Die Datenerfassung erfolgte über die Aufzeichnung der Sensordaten des Pantographen sowie ausgewählter Fahrzeugparameter über den CAN-Bus des Fahrzeuges. Diese Rohdaten wurden an das Kommunikationsmodul CMP, welches im PAN verbaut ist, gesendet. Dort erfolgte eine Zwischenspeicherung auf einer SD-Karte, um bei fehlender Mobilfunkverbindung keine Datenverluste hinnehmen zu müssen. Anschließend wurden diese Rohdaten via Mobilfunkverbindung an die in der Cloud befindliche Railigent-Datenbank gesendet.

Innerhalb dieser Plattform wurden die Rohdaten mittels interner Algorithmen geclustert und in CSV-Dateien umgewandelt. Mit dieser Methodik konnten alle relevanten PAN-Daten mit den Fahrzeugdaten verknüpft und fahrzeugspezifisch abgelegt werden. Zu Diagnosezwecken konnten so Sensordaten auf Millisekunden Basis betrachtet werden. Da eine derart hohe Auflösung nur in vereinzelt Fällen notwendig wurde, entschied man sich, für das Dashboard der Railigent-Plattform nur Sekundenwerte für die Darstellung verschiedenster Parameter heranzuziehen. Hierdurch konnte die auf Spotfire basierende Oberfläche performant gehalten und die sehr großen Datenvolumina gehandhabt werden.

Im Rahmen der kontinuierlichen Datenauswertung zu den Fahrzeugen und Pantographen wurden im Berichtszeitraum kontinuierliche Ergänzungen an den Railigent-Reports durchgeführt, um die Möglichkeiten der Auswertungen den sich ändernden Ansprüchen zu entsprechen.

So konnten in der finalen Ausbaustufe sechs unterschiedliche Reports erzeugt werden, die von kurzzeitigen Betrachtungen (letzten 24Std.) bis hin zu Trendanalysen über ganze Jahre hinweg alle Möglichkeiten zur Analyse der PAN-Performance anboten.

Der Schwerpunkt der Analysen richtete sich dabei immer auf die Leistungsdaten der Pantographen, wobei gerade die Fahrten an der Oberleitung und die dabei erzielten Kilometer ein wichtiger Parameter zur Beurteilung der Pantographen Performance war. So konnte über die gesamte Projektlaufzeit eine Strecke von 53.000 km (alle Testfahrzeuge) an der Oberleitung zurückgelegt werden.

Die Reports teilen sich dabei in zwei unterschiedliche Schwerpunkte auf. So dienten die Reports wie eH_DrivingPerformance_Tracks_only, eH_DrivingPerformance, eH_MonthlyReport-DrivingPerformance und eHFeldversuch_TrendAnalyse zur Analyse der Fahrten aller Testfahrzeuge mit ihren Pantographen. Diese Berichte ermöglichten eine präzise Verfolgung der Leistungsdaten und halfen dabei, die Effizienz und Zuverlässigkeit der Pantographen kontinuierlich zu verbessern.

Der zweite Teil der Reports eH_DAPSV_Trends, eH_CurrentPanStates fokussierte sich hingegen mehr auf kurzfristige Ereignisse bezüglich Fehlermeldungen und Sensordaten und lieferte wichtige Erkenntnisse zu aufgetretenen Fehlermeldungen, die gerade im Hinblick auf präventive Wartung oder erste Diagnose für die Feld Service Ingenieure wertvolle Erkenntnisse lieferten. Diese Berichte halfen dabei, potenzielle Probleme frühzeitig zu identifizieren und proaktive Maßnahmen zu ergreifen, um Ausfälle zu minimieren und die Zuverlässigkeit der Pantographen Systeme weiter zu erhöhen.

Neben den auf Railigent basierten Auswertungen wurde noch ein zusätzliches auf Matlab basiertes System zur Analyse der Sensordaten auf Basis von Millisekunden Werte einzelner Sensordaten zum Einsatz gebracht. Mit Hilfe dieses Tools DAPSV (Detaillierte Analyse PAN System Verhalten) konnten komplexe Probleme identifiziert werden, Muster in Fehlerbildern erkannt werden und wertvolle Rückmeldungen für die Entwicklungsschritte abgeleitet werden.

Das DAPSV Tool erfüllte somit einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Pantographen Performance über die verschiedenen Iterationsschritte der PAN-Entwicklung. Durch detaillierte Analysen konnten Schwachstellen frühzeitig erkannt und gezielte Maßnahmen zur Optimierung der Systeme abgeleitet werden. Diese tiefgehenden Einblicke waren besonders wertvoll für die kontinuierliche Weiterentwicklung und Anpassung der Pantographen an reale Einsatzbedingungen.

Eine weitere Erkenntnis aus dem Railigent Trend Report zeigt die positive Entwicklung der Pantographen im Hinblick auf die angebügelter Fahrten an der Oberleitung. So konnten gerade zum Ende des Projektes die kontaktierten Kilometer an der Oberleitung verbessert und sehr konstant gehalten werden.

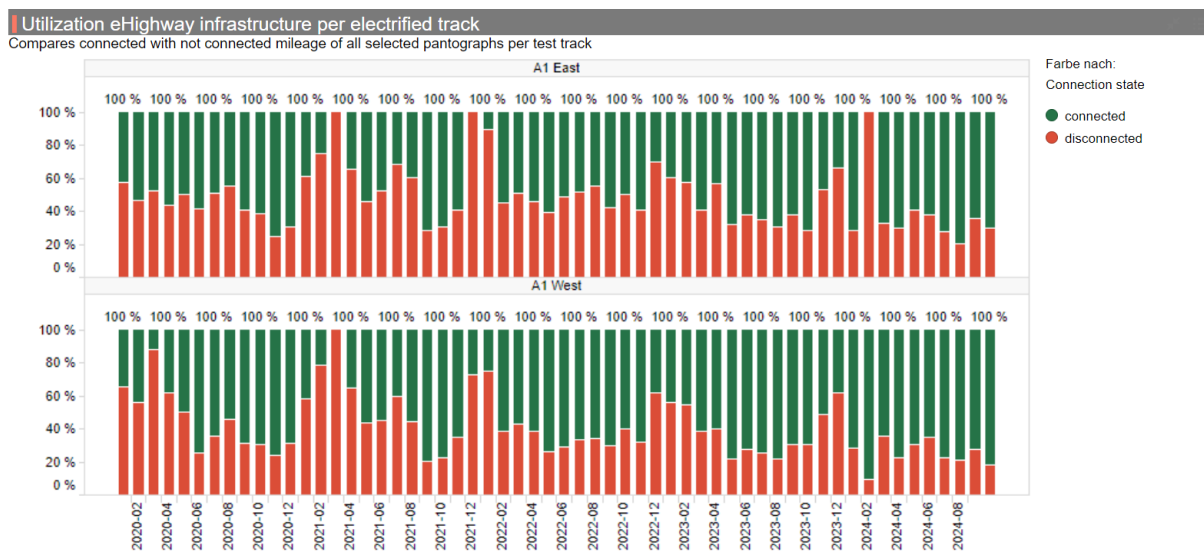


Abbildung 1 Nutzung der Oberleitung über den Projektverlauf

Die Grafik zeigt aber auch, dass gerade in den Wintermonaten eine Verschlechterung des Nutzungsgrades eintrat. Diese waren schwerpunktmäßig auf die Ablagerung von Salz auf dem Pantographen und die damit einhergehende Fehlerhäufigkeit von Isolationsfehlern durch Brückenbildung zwischen den verschiedenen Isolationslayern zurückzuführen. Wie in der Grafik zu sehen, konnte durch verschiedene Hard- und Software-Nachrüstpakete die Auswirkungen deutlich reduziert werden jedoch bis zum Projektende nicht vollumfänglich gelöst werden.

Durch kontinuierliche Verbesserungen an der Hardware und Software der PAN konnte die Verfügbarkeit der Pantographen insgesamt gesteigert werden. Diese Optimierungen haben die Zuverlässigkeit der Systeme erheblich erhöht, was dazu führte, dass die Testfahrzeuge unter realen Bedingungen effizienter betrieben wurden. Die Einführung neuer Testfahrzeuge hat zusätzliches Potenzial genutzt, da hier fahrzeugspezifische Weiterentwicklungen mit zur Erhöhung der Performance beitrugen. Der Nutzungsgradvergleich zu Projektbeginn und -Ende verdeutlicht diese Entwicklung, dies wird in den folgenden Monatsauswertungen und einer 3-Monatsübersicht exemplarisch dargestellt.

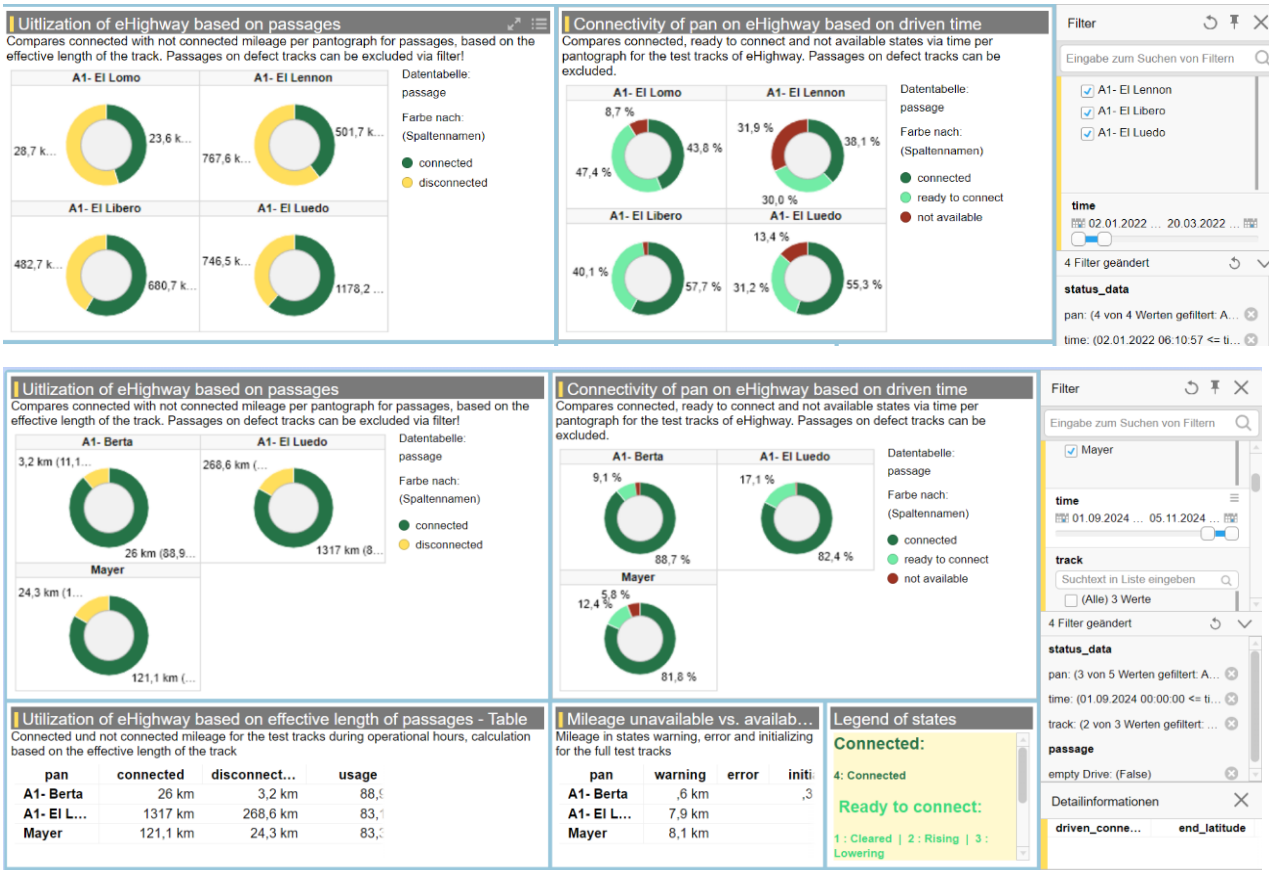


Abbildung 2 Auswertung Nutzungsgrad der Oberleitung zu Projekt Begin versus Ende der Projektlaufzeit

Nachfolgend sind die einzelnen Verfügbarkeiten der Pantographen je Fahrzeug noch einmal aufgeführt. Bei der Berechnung wurde nicht der klassische Ansatz von

$$\text{Verfügbarkeit} = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}}$$

gewählt, sondern ein Vergleich der Zeiten beim Befahren der Teststrecken herangezogen. So wurde zum Beispiel beim Erreichen der Teststrecke überprüft, ob der PAN technisch in Lage war anzubügeln. War dies nicht möglich, wurde dies als Ausfallzeit bewertet.

Dies hat zur Folge, dass die MTBR (Mean Time to Repair) hier einen entscheidenden Faktor spielt. Aufgrund der begrenzten Service- und Ersatzteilkapazitäten war eine kurzfristige Reparatur der Pantographen nicht immer gegeben, was zur Folge hatte, dass es mehrfach zu Fahrten über den eHighway kam, ohne dass der PAN anbügeln konnte. Dies führt zwangsläufig zu einer reduzierten Verfügbarkeit und ist nicht mit den Reaktionszeiten im späteren operativen Betrieb zu vergleichen.



Betrachtet man alle Pantographen und den gesamten Testzeitraum des Forschungsprojektes, so erhält man eine mittlere Verfügbarkeit von 87% über alle Pantographen. Diese Zahl ist beeindruckend, insbesondere wenn man bedenkt, dass die Pantographen während dieser Zeit einem Pilotstatus unterlagen, was bedeutet, dass sie noch in der Entwicklungs- und Testphase waren.

Mit den bisherigen Erkenntnissen und kontinuierlichen Verbesserungen ist somit damit zu rechnen, dass die Verfügbarkeit in einem späteren Serienprodukt nochmal deutlich über die jetzt schon erzielten 87% hinausgehen wird.

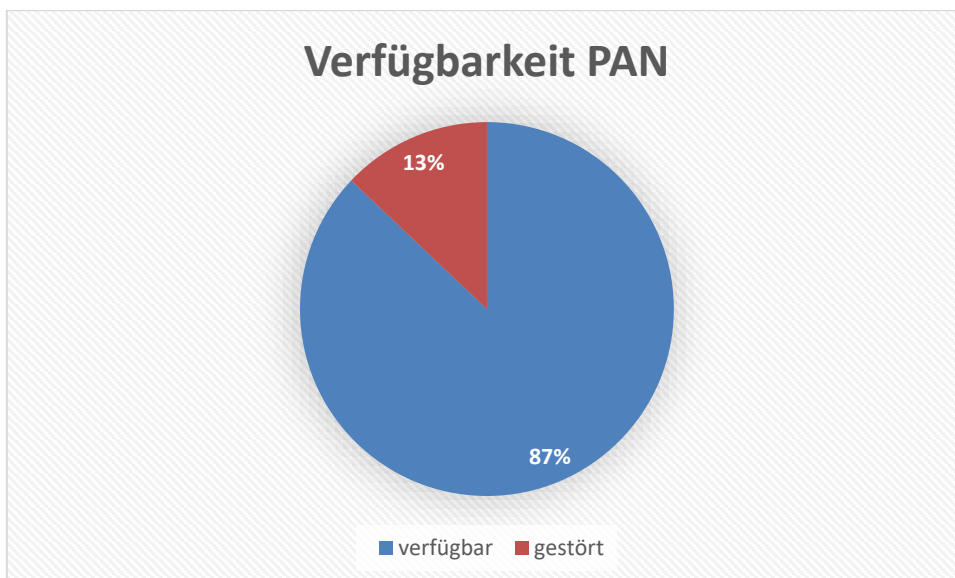


Abbildung 3 Mittlere Verfügbarkeit über alle Pantographen während der gesamten Testphase

Fazit zum Arbeitspaket:

Im Arbeitspaket 1.1 wurden die Leistungsdaten und Fehlermeldungen von Pantographen umfassend analysiert. Zwei verschiedene Herangehensweisen bei Report-Typen wurden verwendet: einer zur kontinuierlichen Überwachung der Fahrten aller Testfahrzeuge und einer zur kurzfristigen Analyse von Fehlermeldungen und Sensordaten. Ergänzt wurde dies durch ein Matlab-basiertes System zur detaillierten Sensordatenanalyse, das zur Identifikation komplexer Probleme und zur Verbesserung der Pantographen beitrug. Trotz einiger Herausforderungen, insbesondere im Winter durch Salzablagerungen, konnte durch kontinuierliche Optimierungen die Verfügbarkeit der Pantographen auf durchschnittlich 87% gesteigert werden. Die Einführung neuer Testfahrzeuge und gezielte Hardware- und Software-Updates haben die Zuverlässigkeit der Systeme erheblich erhöht und die Effizienz unter realen Einsatzbedingungen verbessert.

3.2 AP 1.2 Digital Track Capturing

3.2.1 Zielstellung des Vorhabens

Eine technische Neuerung, die im Rahmen der Begleitforschung untersucht wird, ist der Einsatz eines Digital Track Capturing Systems (DTC). Dabei handelt es sich um ein Kamera- und Laser-basiertes Vermessungssystem, das, auf die Dachreling eines regulären Fahrzeuges montiert, bei Durchfahung der Anlage eine digitale Vermessung vornimmt. Die gesammelten Messpunkte werden anschließend am Computer zu einem digitalen Modell der Anlage verarbeitet, aus dem die Höhen- und Seitenlage aller sichtbaren Anlagenteile, also vor allem der Fahrleitung, hervorgeht. Dieses, in der Bahntechnik durch Siemens Mobility bereits angewandte System, soll bei erfolgreicher Erprobung perspektivisch die Inspektion der Anlage vereinfachen und teil-automatisieren und durch Computer-generierte Alarmmeldung bei Unterschreitung von Schwellwerten (bspw. Fahrdrathöhenlage), den Instandhaltungsaufwand auf diese Problemstellen konzentrieren. In einem ersten Schritt wurden für den Anwendungsfall Autobahn Messmetriken entwickelt, die eHighway Spezifika, wie beispielsweise die gemessene Fahrbahnquerneigung oder den Abstand der beiden Kettenwerke zueinander, enthalten. Anschließend

wurden erste Testfahrten auf der Siemens-eigenen Versuchsanlage in Groß Dölln (VA GD) durchgeführt (vgl. Abbildung 4).



Abbildung 4 - DTC Befahrung auf der Versuchsanlage Groß Dölln

3.2.2 Erprobung auf der FeSH Strecke

Im Nachgang erfolgte im Frühjahr 2022 eine Befahrung der FeSH-Feldversuchsstrecke durch das DTC System. Im Anschluss wurden die Rohdaten in ein digitales Streckenmodell verarbeitet und in einen Report der Anlage gespeist. Dieser Report, der als interaktive .html-Version auch die genaue Analyse einzelner enthält Messquerschnitte erlaubt, wurde dem Anlagenbetreiber in Vorbereitung der Inspektion übergeben.

Grundlage der Auswertung ist eine eine eigens definierte Messmetrik für zweipolige Oberleitungsanlagen auf geeigneten Ebenen (Autobahnen), die in Abbildung 5 dargestellt ist.

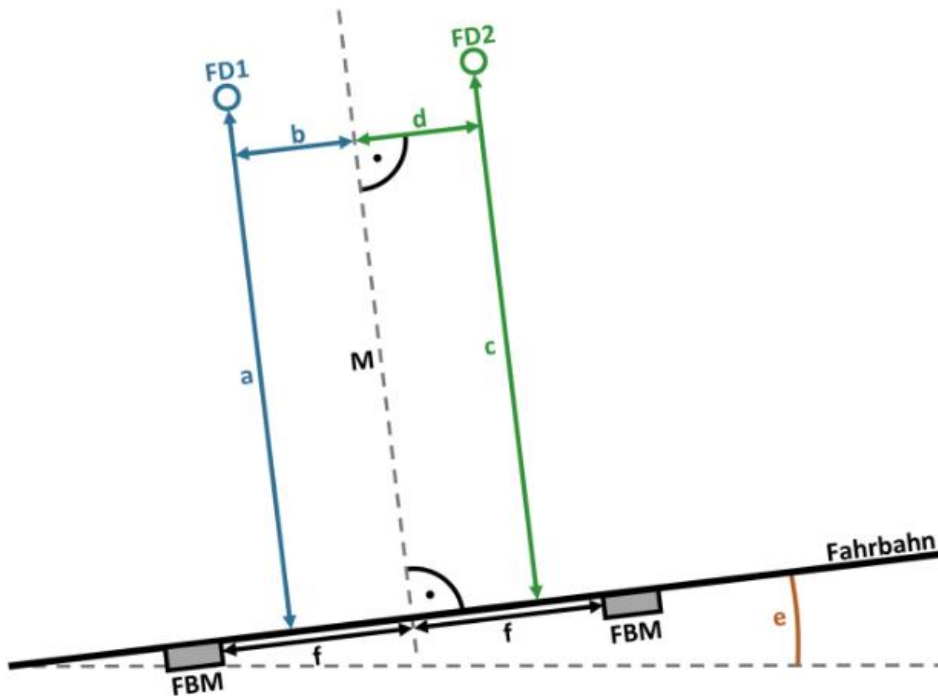


Abbildung 5 - Messmetrik der DTC Auswertung

In Abbildung 6 ist beispielhaft die Lage der Fahrdrahthöhen der beiden Kettenwerke in Richtungsfahrbahn Lübeck (aufsteigende Kilometrierung) dargestellt.

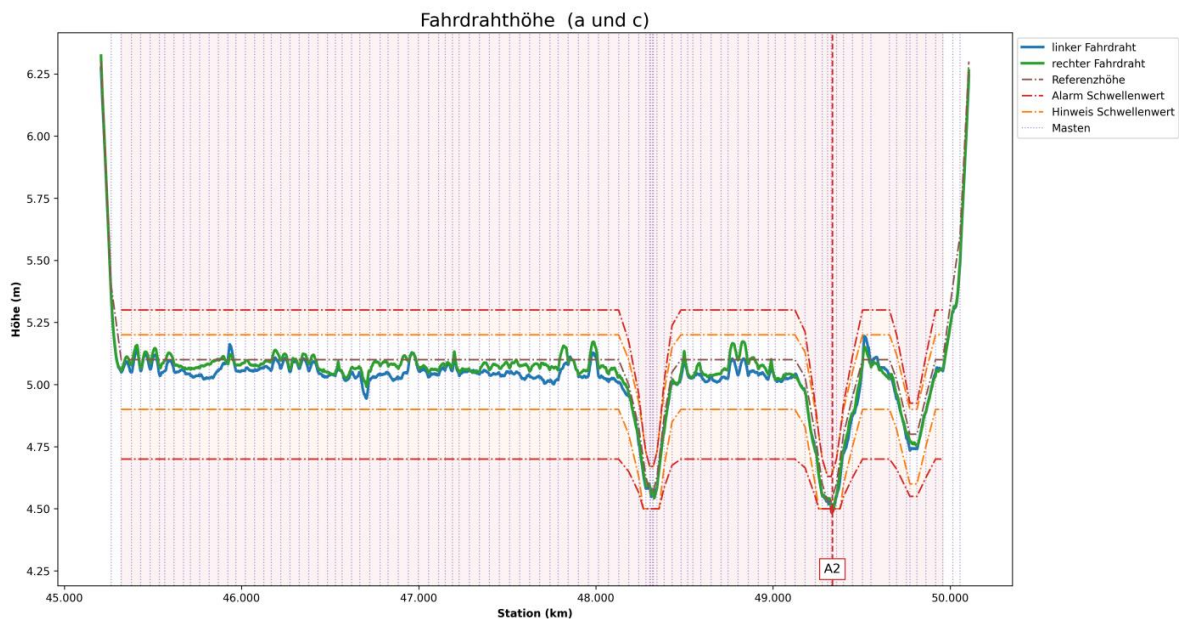


Abbildung 6 - Vergleich der Fahrdrahthöhen - Auszug aus dem DTC Report

Ebenfalls aus der Abbildung zu erkennen ist, dass für die hier beispielhafte Höhenlage Grenzwerte definiert wurden, bei deren Überschreitung eine Hinweis- bzw. eine Alarmmeldung erzeugt werden. In der Abbildung wurde exemplarisch die Alarmmeldung A2 generiert. Für jede Hinweis- und Alarmmeldung stehen im Report gesonderte Detailinformationen bereit.

Die im Report generierten Meldungen wurde während der Anlageninspektion im Frühjahr 2022 mit Unterstützung der FH Kiel gegen manuell, mit einem Lasermessgerät, erfasste Messwerte verglichen,

wobei sich herausgestellt hat, dass die softwareseitige Verarbeitung, vor allem im Bereich der neuartigen Deckenstromschienen unter den Brücken, mitunter noch fehlerhaft ist.

Die generierten Alarme und Hinweise werden unter Angabe von Auslösegrund und Geoposition am Berichtsende in einer Tabelle zusammengefasst (vgl. Abbildung 7).

ID	Typ	Grund	Kritischster Wert	Position	Seite	Länge
A1	Alarm	Differenz der Fahrdrathöhen zu groß (>80 mm)	116.189 mm	49.587 km	beide	28.65 m
A2	Alarm	Differenz der Fahrdrathöhen zu groß (>80 mm)	94.091 mm	45.860 km	beide	280.23 m
H1	Hinweis	Fahrdrath zu hoch	33.603 mm > Schwell.	49.586 km	links	19.03 m
H2	Hinweis	Differenz der Fahrdrathöhen zu groß (>60 mm)	62.332 mm	49.499 km	beide	6.41 m
H3	Hinweis	Differenz der Fahrdrathöhen zu groß (>60 mm)	74.414 mm	47.737 km	beide	33.84 m
H4	Hinweis	Differenz der Fahrdrathöhen zu groß (>60 mm)	62.226 mm	47.675 km	beide	11.26 m
H5	Hinweis	Differenz der Fahrdrathöhen zu groß (>60 mm)	70.205 mm	47.616 km	beide	29.96 m
H6	Hinweis	Differenz der Fahrdrathöhen zu groß (>60 mm)	69.732 mm	47.565 km	beide	25.18 m
H7	Hinweis	Differenz der Fahrdrathöhen zu groß (>60 mm)	66.411 mm	47.201 km	beide	10.64 m
H8	Hinweis	Fahrdrath zu hoch	4.653 mm > Schwell.	46.029 km	links	4.45 m
H9	Hinweis	Fahrdrath zu hoch	20.329 mm > Schwell.	45.388 km	beide	9.65 m

Abbildung 7 - Übersichtstabelle der Alarm- und Hinweismeldungen

Aus Ressourcenverfügbarkeitsgründen konnten während der beiden Inspektionstermine der Anlage keine weiteren DTC Befahrungen der Oberleitungsinfrastruktur durchgeführt werden. Allerdings wurden im Hintergrund bei der Software der Infrastrukturelemente Verbesserungen eingeführt, welche eine höhere Genauigkeit bei der Erkennung ermöglichten.

3.3 AP 1.3 LF-Modulation in der Oberleitungsinfrastruktur

3.3.1 Zielstellung des Vorhabens und Beschreibung des Ansatzes

Die Erkennung von mit Oberleitungen elektrifizierten Straßenabschnitten basiert derzeit auf bei den Fahrzeugherstellern hinterlegten Geodaten. Diese lässt nur eine grobe Lokalisierung der Oberleitungsanlage zu. Vor dem Anbügeln an die Oberleitung wird somit zusätzlich das Signal des Spurassistenten benötigt, welches wiederum keinen Rückschluss auf ein Befahren der tatsächlich elektrifizierten Spur zulässt. Somit wird zusätzlich eine Sichtprüfung mit Bestätigung durch die Fahrzeuglenker abgefragt. Da keine Kommunikation vor dem Anbügelvorgang zwischen Fahrleitung (FL)-Infrastruktur und OH-Lkw stattfindet, ist der aktuelle Betriebszustand der Oberleitungsanlage zu diesem Zeitpunkt unbekannt. Eine Vorab-Übertragung des Anlagenzustandes und insbesondere einer Strecken-ID zur Nutzung in einem Zugangs- und Abrechnungssystem ermöglicht langfristig eine herstellerunabhängige, automatisierte fahrzeugseitige Erkennung des elektrifizierten Streckenabschnitts mit gleichzeitiger Übergabe von Betriebsparametern von der Infrastruktur an das Fahrzeug, z.B. aktuell zulässiger Leistungs-/Strombezug.

Ein sehr vielversprechender Ansatz für die Übertragung des Anlagenzustandes ist die sog. LF-Modulation, bei der ein Low-Frequency-Signal (LF-Signal) in die Fahrdrähte der FL-Kettenwerke oder alternativ über einen weiteren Draht eingespeist wird. Für die Technologieevaluation war die Erprobung in einer Feldversuchsanlage unter realen Anwendungsbedingungen von elementarem Nutzen.

Zur Erprobung der Detektion und Zustandsübertragung einer Fahrleitungsanlage wurde sowohl infrastrukturseitig eine Einspeisung eines Signals als auch fahrzeugseitig ein Gerät zur Erkennung des zu detektierenden Signals installiert. Hierbei erfolgte eine erste Pilotierung und Validierung des Übertragungskonzeptes auf der Versuchsanlage Groß Dölln. Zur weiteren Konzeptvalidierung war eine Erprobung unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen, Anlagentopographien und Streckencharakteristika erforderlich. Diese wurde auf der Anlage FeSH durchgeführt. Hierzu werden in diesem Arbeitspaket entsprechende LF-Signalgeneratoren und Entkopplungselemente in die Unterwerke eingebracht.

Im Fokus der Untersuchungen stand die Erprobung zur Übertragung eines sogenannten LF-Telegrammes, welches Daten zum Anlagenzustand und Streckeninformationen (Strecken-ID) enthält. Die Übertragung erfolgte als Broadcast aus der Anlage an das Fahrzeug. Ferner sollten die Auswirkungen der von Anlagenkomponenten hinsichtlich der Übertragbarkeit und Detektierbarkeit des LF-Signals untersucht werden.

Die Modulation einer Strecken-ID zur Identifikation des befahrenen Speiseabschnittes sollte zusätzlich zur GNSS-Lokalisierung des Fahrzeuges erfolgen. Perspektivisch sollte mit Hilfe der Strecken-ID z.B. die Zuordnung des Energieverbrauchs des Lkw-seitigen Stromzählers auf einen definierten Speise- und Streckenabschnitt möglich werden. Somit wäre auch die durch den Lkw bezogene Leistung einem Netzbetreiber / Stromlieferanten zuzuordnen. Die Untersuchungen zur Strecken-ID dienen somit auch als Baustein für die Entwicklung eichrechtskonformer Abrechnungssysteme.

Die Auswertung und Validierung erfolgte mit einem speziell ausgestatteten OH-Lkw (El Facil) als Erprobungsträger. dies war keiner der Feldversuchs-Lkw im Speditionseinsatz.

3.3.2 Vorab-Evaluierung auf Versuchsanlage in Groß-Dölln (Vorarbeiten vor Beginn FeSH2b, Juni 2022)

Zur Vorab-Evaluierung wurde zunächst auf der Testanlage Groß-Dölln eine Probeinstallation zur grundsätzlichen Machbarkeit der Signaleinkopplung- und Detektion realisiert.

Hierzu wurde im Unterwerk ein Signalgenerator (Typ Powerlink IP, Fa. Siemens AG) sowie zugehörige Koppelkondensatoren (Ankopplungseinheit, AKE) installiert.

Zur Vermeidung von Signalsenken (im Unterwerk) und Reflexionen (am Leitungsende) wurde unterwerksseitig eine Induktivität (Drossel) im Speisekreis und an den Endpunkten der Oberleitungsanlage zusätzlich R+C – Glieder installiert (Terminalwiderstände).

In Abbildung 8 ist die Einspeisung des LF-Signals im Unterwerk dargestellt. Das Signal wird im Gleichtakt auf Hin- und Rückleiter gegen Masse eingespeist. Die Drossel (2 x 250µH) sorgte dafür, dass das eingespeiste LF-Signal nicht im Inverter und/oder gegen Erde kurzgeschlossen wird, ein Koppelkondensator und die Ankoppeleinheit (graues Gehäuse) sorgen für das Abblocken der DC-Spannung sowie die Anpassung der Fahrleitungsimpedanz auf die Generatorimpedanz von 50 Ohm. Die Eingangsimpedanz der Fahrleitung ergibt sich im Wesentlichen aus der Parallelschaltung der beiden Abschlusselemente, die an beiden Leitungsenden gegen Masse geschaltet wurden, siehe Abbildung 9.

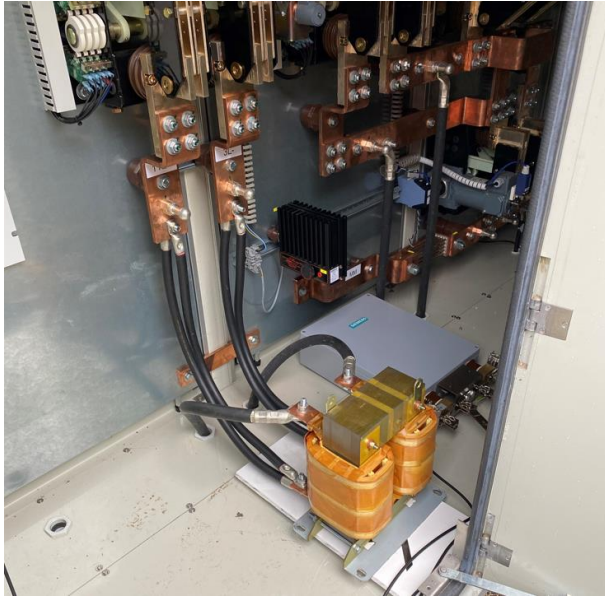


Abbildung 8 - Drossel und Ankoppeleinheit im Unterwerk

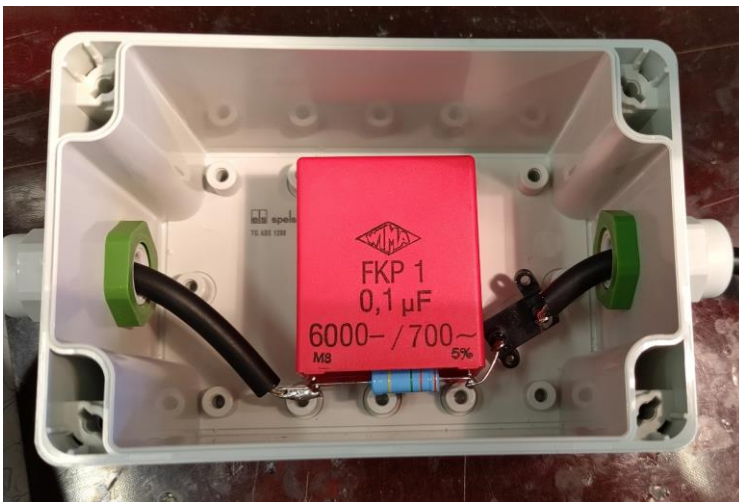


Abbildung 9 - Abschlusselement mit 330 Ohm-Widerstand und HV-Kondensator mit Bleeder-Widerstand

Fahrzeugseitig wurden die folgenden Installationen pantographenseitig durchgeführt:

- Neosid 3D-Spulen zum Signalempfang
- Installation eines Picoscopes zur Signalaufnahme

Die grundsätzliche Machbarkeit der Übertragung von Anlagenzuständen und einer Strecken-ID wurde somit bereits im Rahmen dieser Vorabaktivitäten gezeigt.

Änderungen nach Vorab-Untersuchungen

Der Signalgenerator Powerlink IP wurde auf Grund seiner bereits bestehenden industriellen Verwendung und Tauglichkeit zum Einsatz im Feld ausgewählt, erwies sich allerdings hinsichtlich der Flexibilität der zu übertragenden Signale als nicht geeignet. Für die weiteren Versuche wurde daher auf frei konfigurierbare Laborgeräte (Software Defined Radios, SDR) zurückgegriffen.

Die Signalverarbeitungskette ist in Abbildung 10 (Signalerzeugung) und Abbildung 11 (Empfang) dargestellt. Es kommt ein SDR vom Typ Red Pitaya zum Einsatz, die Signalverarbeitungsblöcke werden mit GNU-Radio realisiert. Das System ist in der Lage verschiedene Modulationsarten (BPSK, QPSK) mit einer variablen Datenrate zu erzeugen und zu empfangen.

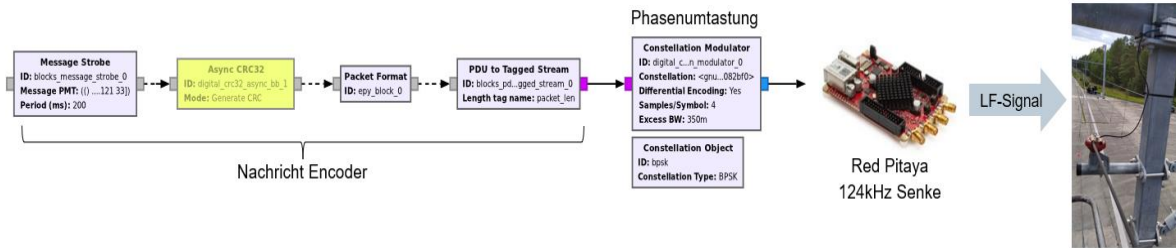


Abbildung 10 - Blockschaltbild der LF-Signalerzeugung

Die Versuche auf der Siemens-eigenen Versuchsanlage in Groß Dölln wurden mit verschiedenen Bitraten im QPSK (Quadratur-Phasenmodulation) und BPSK (Bi-Phasenmodulation) -Modus durchgeführt. Im QPSK-Modus werden pro Sendesymbol zwei Bits kodiert, im BPSK-Modus nur eines. BPSK ist jedoch technisch einfacher umzusetzen. Eine Voruntersuchung der Übertragungsstrecke zeigte, dass eine nutzbare 3 dB-Bandbreite von gut 5 kHz zur Verfügung steht, im Wesentlichen begrenzt durch die resonante Auslegung der Neosid-Empfangsspulen am Lkw.

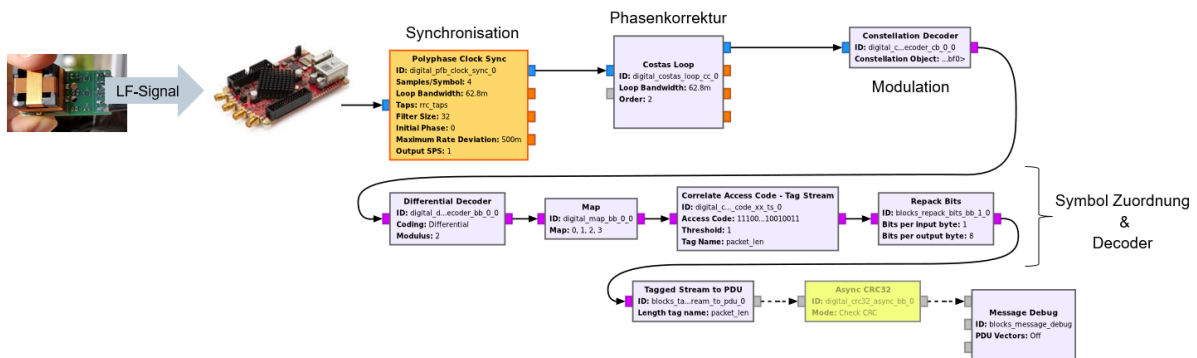


Abbildung 11 - Blockschaltbild des LF-Signalempfängers

Die besten Ergebnisse wurden bei einer Übertragung eines BPSK-Testsignals mit einer Rate von 5 kbit/s erzielt. Bei 10 kbit/s kam es bereits zu Signalverzerrungen, aber es war trotzdem entlang der gesamten Strecke in Groß Dölln ein Empfang möglich, wie in Abbildung 12 dargestellt.

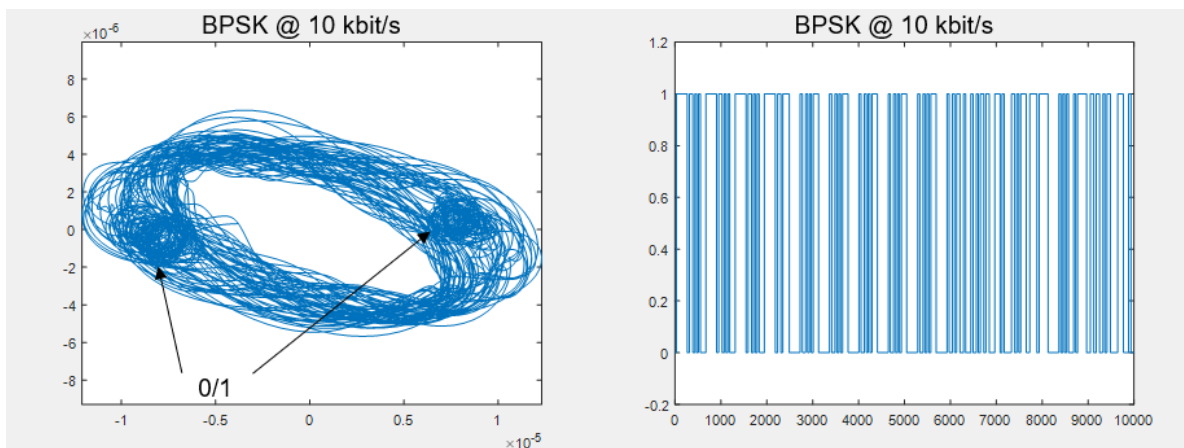


Abbildung 12 - Konstellationsdiagramm und dekodierte Bitfolge des 10 kbit/s-BPSK-Signals nach Übertragung in Groß Dölln

Damit wurde gezeigt, dass eine Übertragung von Streckeninformationen vom Unterwerk zu einem Lkw über ein LF-Signal prinzipiell und mit einer ausreichend hohen Datenrate und somit auch die Übertragung von Strecken-IDs möglich ist.

3.3.3 Einkopplungskonzept für die Anlage FeSH

Im Rahmen der in der VHB beschriebenen Aktivitäten wurde ein Konzept zur Einkopplung von Low Frequency (LF) Modulierten Signalen in die Oberleitung (RiFa Hamburg) mit den Projektpartnern und dem Anlagenverantwortlichen abgestimmt. Dieses Das Konzept ist in Abbildung 13 dargestellt. Im Unterwerk 1 erfolgt die Einspeisung auf den Hin- und Rückleiter der Richtungsfahrbahn Hamburg über Koppelkondensatoren und eine Siemens Ankoppeleinheit AKE-200. Die Drosseln in Richtung Unterwerk sorgen dafür, dass das LF-Signal nicht gegen Erde kurzgeschlossen wird. An den Enteisungsschaltern and den Leitungsenden werden jeweils Abschlusselemente montiert, die einen definierten Widerstand gegen Erde realisieren. Die Querkupplung zwischen beiden Richtungsfahrbahnen muss für die Versuche geöffnet werden.

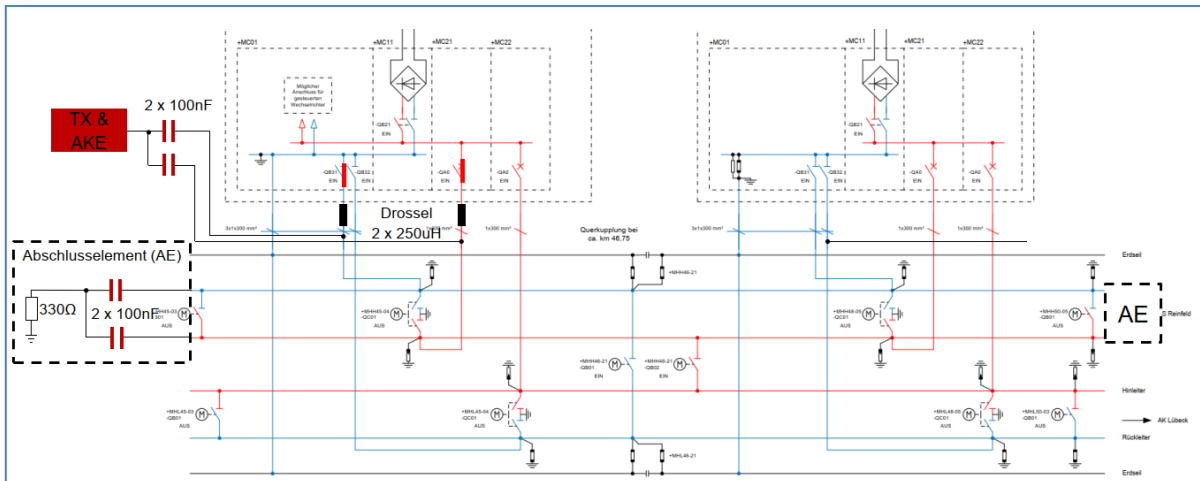


Abbildung 13 - Konzept zur Signal-Einkopplung und zum Leitungsabschluss, Quelle des Planes: FuE Zentrum FH Kiel

Insgesamt sind also an der Anlage zu ändern/hinzuzufügen:

- Signalgeneratoren bzw. Software Defined Radio (SDR) als Signalquelle im Unterwerk
- Drosselspule, Ankoppeleinheit und Koppelkondensatoren im Unterwerk
- RC-Glieder (Abschlusselemente) an beiden Enden der zu „beschallenden“ Oberleitungsabschnitte

Die Installation der Abschlusselemente erfolgte bereits in der Nacht vom 20. auf den 21. September 2022 während einer regulären Anlagenwartung (siehe Abbildung 14).



Abbildung 14 - Installierte Abschlusselemente im FeSH-Testfeld

3.3.4 Evaluierung auf der FeSH-Strecke (April 2023)

Der Testbetrieb fand am 25. April 2023 statt. In Abbildung 15 ist der Aufbau im Unterwerk dargestellt: Ein Red Pitaya SDR generiert ein BPSK-Signal mit einem Test-Telegramm. Da der Red Pitaya nur eine sehr geringe HF-Leistung abgeben kann, wird das Signal durch einen Verstärker geführt, danach Tiefpassgefiltert und dann über die Siemens AKE-200 (Ankoppereinheit) und Koppelkondensatoren auf den Fahrdrabt geleitet. Bei optimaler Anpassung (d.h. eine reelle Last von 50 Ohm) sollte der Verstärker eine Leistung von etwa 2W abgeben.

In der Praxis zeigte sich eine deutliche Fehlanpassung des Fahrdrabtes, so dass die Leistung zum Schutz des Endstufentransistors deutlich auf ca. 250 mW verringert wurde. Die Ursachen der Fehlanpassung sind vielfältig: Der Übertrager in der AKE-200 wurde für eine Streckenseitige Impedanz von 150 Ohm eingestellt, unter der Annahme, dass am Speisepunkt im Wesentlichen die beiden parallelgeschalteten Abschlusselemente (je 300 Ohm) impedanzbestimmend sein sollten. Bereits in Groß Dölln hatte sich aber gezeigt, dass es unter anderem durch die Drossel und die nicht zu vernachlässigenden Kabellängen zu Impedanztransformationseffekten kommt. Diese sich überlagernden Effekte sind schwer abzuschätzen, aber könnten aufgrund der nun durchgeführten Impedanzmessungen dazu verwendet werden, eine optimierte Anpassschaltung zu entwerfen.

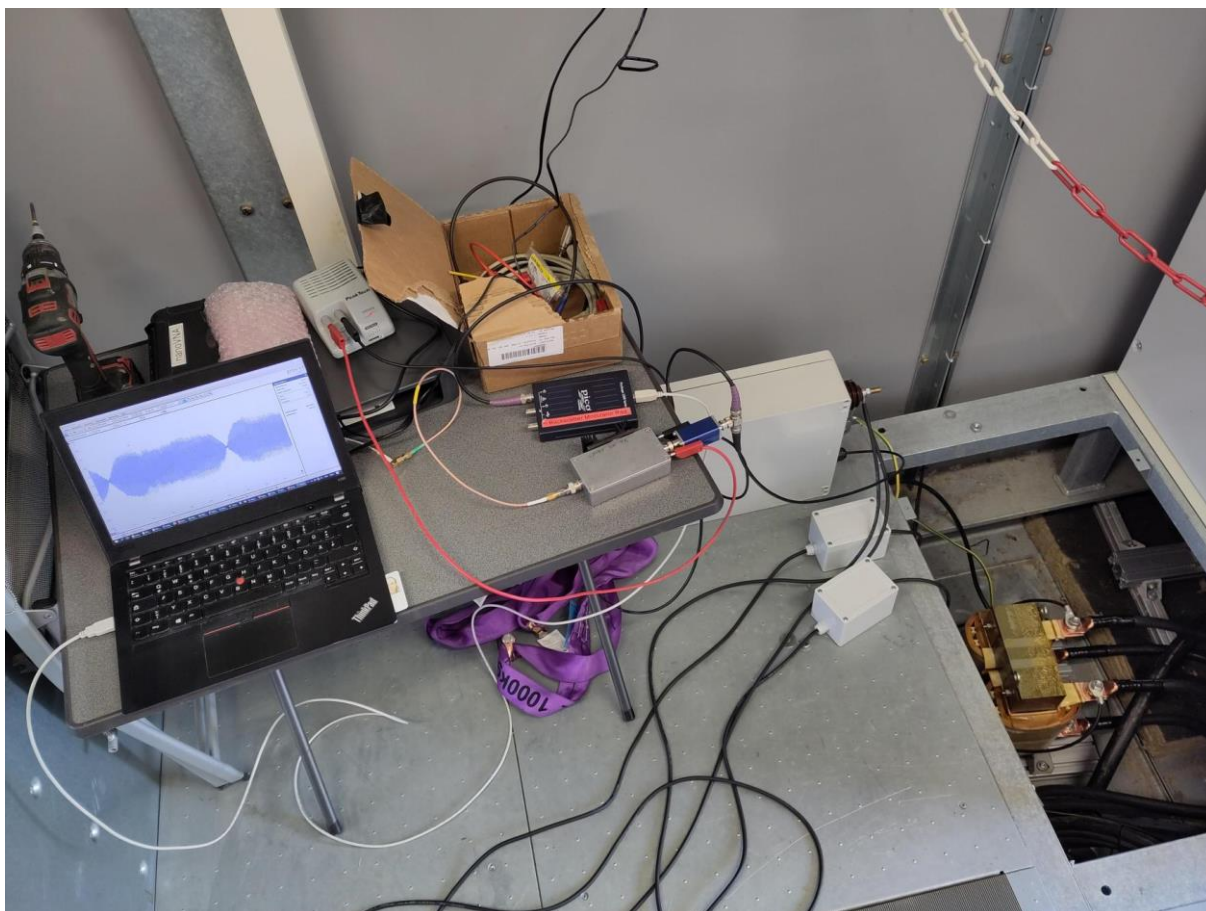


Abbildung 15 - Signalgenerator (Red Pitaya SDR), Verstärker, Ankoppereinheit, Koppelkondensatoren und Drosselspule im Unterwerk

Die Einspeisung erfolgte gemäß Planung im Gleichtakt auf der RiFa HH. Die Trennschalter der Querkopplungen zwischen den beiden Fahrrichtungen wurden geöffnet, so dass das Signal aktiv nur auf dieser Fahrbahn eingespeist wurde.

Auf dem Dach des Fahrzeugtrailers wurde auf der in Fahrtrichtung rechten Seite eine Neosid 3D-Spule installiert und die Anschlussleitungen in das Führerhaus geführt, wo das Signal mit einem SDR empfangen und aufgezeichnet wurde (vgl. Abbildung 16).



Abbildung 16 - Ansicht der auf dem Trailer temporär angebrachten Neosid 3D-Spule

Durchgeführte Testfahrten

Am 25. April 2023 wurden 10 Testfahrten durchgeführt. Da die Autobahnausfahrt Reinfeld wegen Bauarbeiten gesperrt war, wurde jeweils an den Ausfahrten Bad Oldesloe und dem AK Lübeck gewendet. Die LKW-Position wurde konstant mit einem GPS-Tracker festgehalten um die Aufnahmen des SDR-Empfängers später mit den Geopositionen verbinden zu können.



Abbildung 17 - Ansicht der Eisenbahnbrücke mit Deckenstromschiene

Fahrten in RiFa Hamburg (HH) - „LF beschallter“ Oberleitungsabschnitt

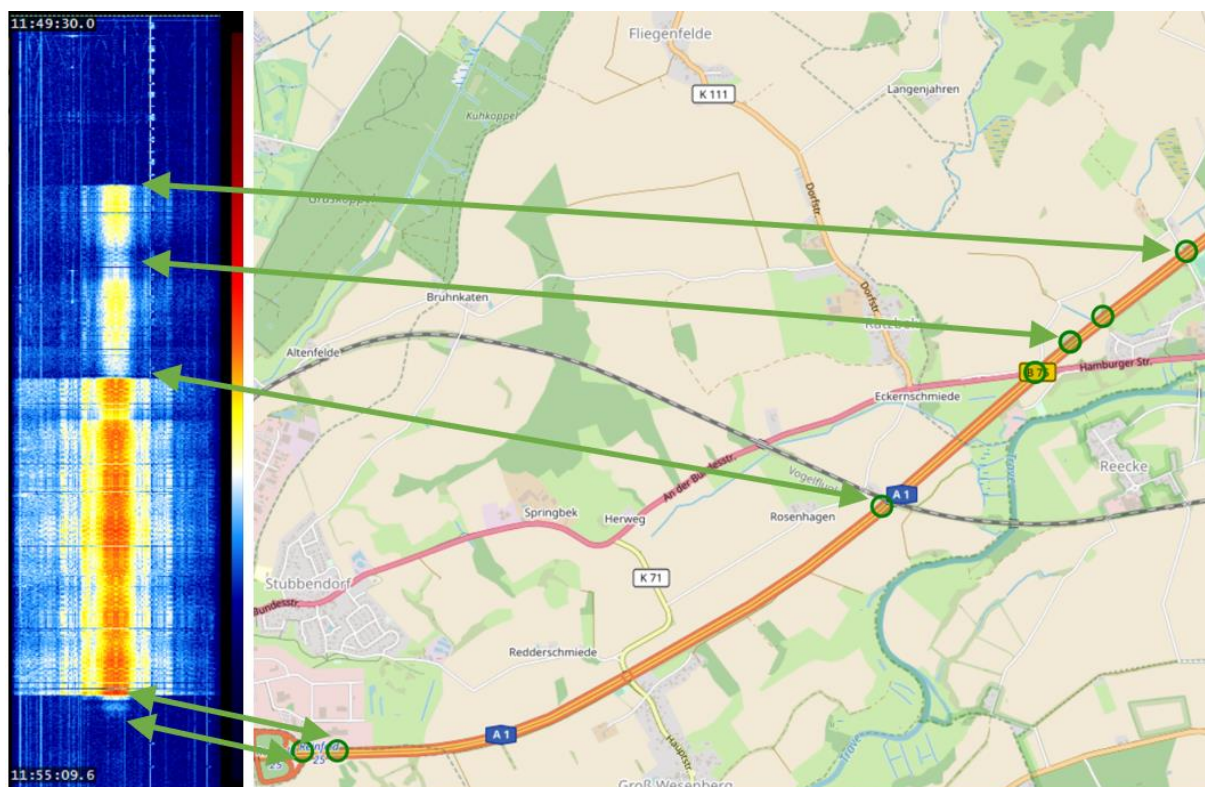


Abbildung 18 - Leerfahrt RiFa HH ohne Leistung

In Abbildung 18 ist eine Leerfahrt (ohne Leistungsübertragung) vom AK Lüneburg in Richtung Hamburg dargestellt (also die „beschallte“ Fahrbahn). Auf der linken Seite ist das aufgenommene Spektrogramm („Wasserfalldiagramm“) dargestellt, auf der rechten Seite die Strecke mit Markierungen einiger Punkte.

Vor Beginn der Oberleitung ist das Spektrogramm überwiegend dunkelblau (sehr niedriger Signalpegel, kein LF-Signal von der Strecke), zu sehen ist hier aber z. B. bei 129 kHz das Signal von DCF-49 (Senderstandort Mainflingen bei Frankfurt).

Ab Fahrdrabtbeginn ist das LF-Signal schlagartig mit einem gutem Signalpegel (gelb/rot) zu sehen. Die Signalstärke ist aber nicht konstant, sondern sinkt bis zum markierten Punkt (600 m) deutlich ab, um dann wieder anzusteigen. Ab der Eisenbahnbrücke mit Deckenstromschiene steigt das Signal plötzlich um über 10 dB an, und bleibt dann bis zum Ende der Strecke mit einem sehr hohen Signalpegel (wenn auch mit regelmäßigen Schwankungen) erhalten. Am Streckenende ist das Signal noch weitere 200m nachweisbar, aber deutlich abgeschwächt.

Eine weitere Fahrt auf der RiFa HH ist in Abbildung 19 dargestellt. Hier ergibt sich dasselbe Bild.

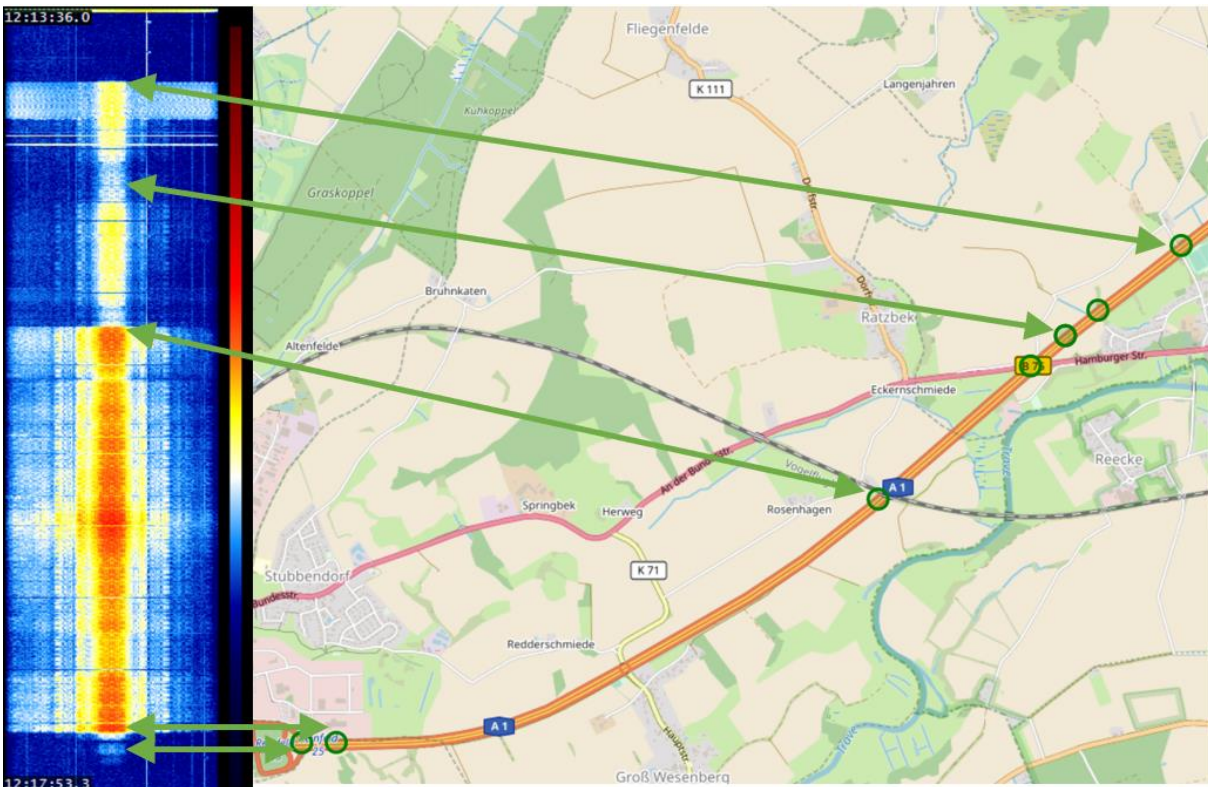


Abbildung 19 - Fahrt mit RiFa HH, ohne Leistungsübertragung

In Abbildung 20 ist die Leistungsübertragung über fast die gesamte Streckenlänge aktiv. Besonders im nördlichen Streckenabschnitt (geringe Signalstärke) ist zu erkennen, dass das LF-Signal von Störsignalen komplett überlagert wird. Diese Störsignale bringen einerseits eine Erhöhung des Grundrauschens um ca. 10 dB mit sich, und enthalten zusätzlich frequenzvariable diskrete Störlinien, die bis zu 40 dB über dem Nutzsignal liegen. Auch hier kann wieder ein deutlicher Signalanstieg nach der Eisenbahnbrücke beobachtet werden, nach dem das LF-Signal konstant über dem Rauschen liegt. Das Signal ist auch hier Schwankungen unterworfen. Ab der Eisenbahnbrücke liegt das erste Minimum bei ca. 550 m, das zweite ausgeprägte Minimum liegt etwa 600 m vor dem Leitungsende.

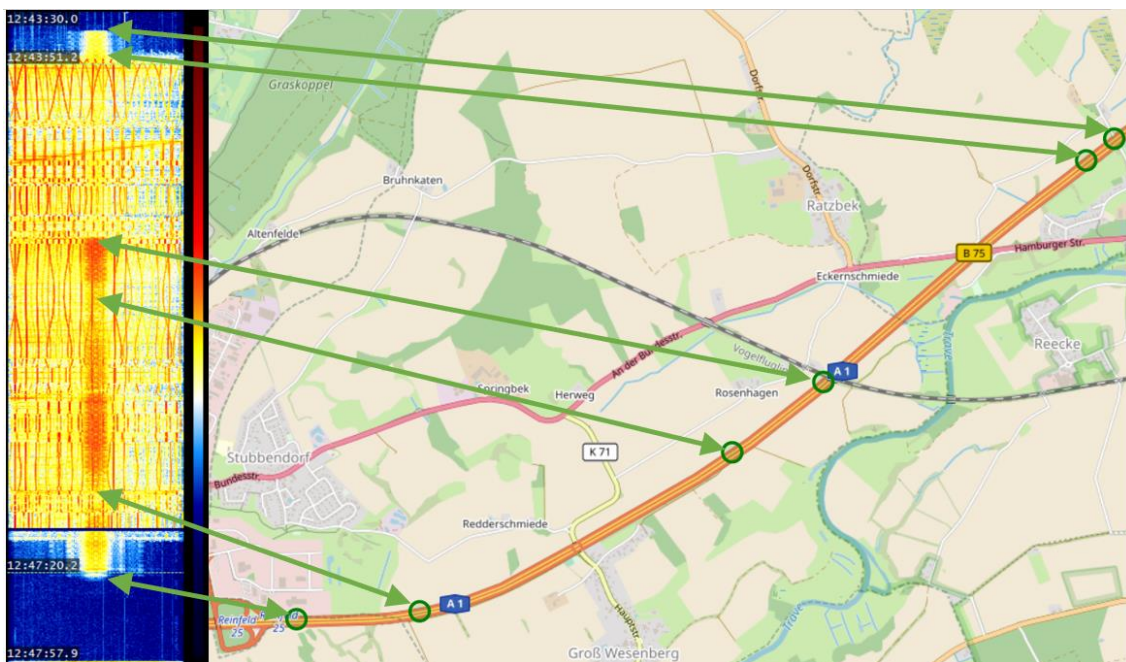


Abbildung 20 - Fahrt in RiFa HH mit Leistungsübertragung

Weitere Fahrten in Richtung Hamburg wurden durchgeführt, aber werden hier nicht im Detail beschrieben, da sich im Wesentlichen die gleichen Effekte nochmals bestätigten.

Fahrt in RiFa Lübeck (HL), – „nicht beschallter“ Oberleitungsabschnitt - Pantograph zum Teil abgebügelt

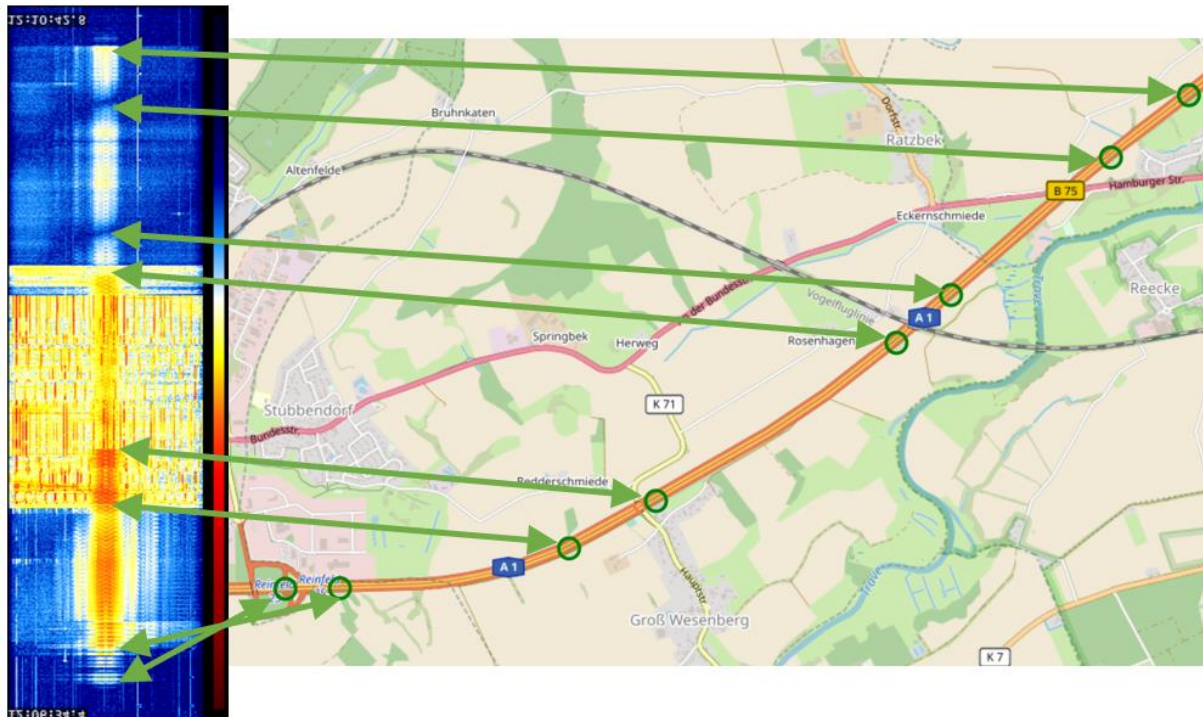


Abbildung 21 - Fahrt in Richtung HL

Das Wasserfalldiagramm ist zur besseren Lesbarkeit hier auf den Kopf gedreht. Diese Fahrt (vgl. Abbildung 21) geht in RiFa HL, d.h. auf der nicht beschallten Fahrtrichtung; trotzdem ist das LF-Signal mit einem recht guten Pegel zu empfangen. Die Fahrt beginnt an AS Reinfeld mit einem sehr starken Signal. Nach dem Anbügeln ist ein deutliches Störspektrum zu sehen, das sich mit dem LF-Signal überlagert. Es gibt ca. 500m vor der Eisenbahnbrücke ein Minimum, ab der Eisenbahnbrücke gibt es dann konstant einen deutlich niedrigeren Pegel (wie auch auf der anderen Fahrspur). Etwa hier wird auch abgebügelt. Im weiteren Verlauf sind zwei sehr ausgeprägte Minima zu erkennen, die etwa 1650 m und 550 m vom Leitungsende (bzw. Von der Position der Abschlusselemente) entfernt liegen.

3.3.5 Ergebnisdiskussion

1. Trennung der Fahrtrichtungen: Die Kopplung zwischen beiden Fahrtrichtungen ist trotz des geöffneten Querverbinders sehr stark. Eine Einspeisung von separaten Signalen pro Fahrtrichtung auf der gleichen Frequenz wäre vermutlich nicht möglich.
2. Nicht konstanter Feldstärkeverlauf (Minima und Sprung an Eisenbahnbrücke): Bereits im Unterwerk wurde festgestellt, dass die Anpassung am Speisepunkt nicht ganz den Erwartungen entsprach, wodurch die verfügbare Sendeleistung um etwa 10 dB verringert wurde. Die Signalstärken entlang der Strecke geben weitere Hinweise darauf, dass hier noch Potenzial zur Optimierung besteht. Bei einer am Ende korrekt abgeschlossenen Leitung wäre die Erwartung, dass sich entlang der Leitung einen konstanter Empfangspegel ergibt. Die Beobachtungen zeigen jedoch, dass es jeweils ca. 550m (entsprechend einer viertel Wellenlänge) von den Leitungsenden aus, sowie danach jeweils 1100m weiter, Minima gibt. Diese sind durch Reflexion der Welle am Leitungsende zu erklären. Die dort reflektierte Welle überlagert sich eine Viertelwellenlänge (und danach jede halbe Wellenlänge) nach Leitungsende destruktiv mit der hinlaufenden Welle. Weiterhin wird der Pegel nördlich der Eisenbahnbrücke mit der Deckenstromschiene

schlagartig um über 10 dB schwächer. Es besteht die Vermutung, dass an dieser Stelle eine so hohe Kapazität von der Fahrleitung zur Erde besteht, dass hier das Signal fast kurzgeschlossen wird. Das würde auch ein sehr starkes Signal kurz vor diesem Punkt erklären (da wir das Magnetfeld messen und an der Kurzschlussstelle ein hoher Strom fließt), und das Minimum ca. eine viertel Wellenlänge weiter südlich davon. Eine Beeinflussung durch die Eisenbahnstromversorgung scheint an dieser Stelle wegen des Fehlerbildes unwahrscheinlich.

3. Signalstärke und Störungen: Bei den Leerfahrten (ohne angebügeltem Pantographen) konnte das LF-Signal über die gesamte Streckenlänge empfangen werden. Das Signal zu Rausch-Verhältnis (SNR) lag dabei zwischen ca. 5 dB (in den Minima im nördlichen Teil) bis gut 40 dB (im südlichen Teil). Ein SNR von 5 dB entspricht einer Bitfehlerrate von etwa 10^{-2} , also einem Bitfehler pro 100 übertragenen Bits; bei einem SNR von 40 dB sind praktisch keine Bitfehler mehr vorhanden. Durch Verwendung einer Kanalkodierung mit Vorwärts-Fehlerkorrektur (Hinzufügen von Redundanzen) kann eine sichere Datenübertragung auch bei einer Fehlerrate von 10^{-2} gewährleistet werden. Die Leistungsübertragung sorgt für eine deutliche Verringerung des SNRs bzw. einen Anstieg der Störungen um 20 - 30 dB. Dadurch ist der Empfang des LF-Signals nicht mehr auf der gesamten Strecke gegeben, besonders auf dem nördlichen Abschnitt nach der Eisenbahnbrücke war bei den Versuchen das Signal komplett von den Störungen überlagert.

4. Störungen durch andere Fahrzeuge: Bei einer Fahrt wurde das LF-Spektrum aufgenommen, während ein vorausfahrender LKW angebügelt, der eigene LKW jedoch nicht angebügelt gefahren ist. Bei einem Abstand von ca. 100 m zwischen den Fahrzeugen war kein nennenswertes Störspektrum mehr erkennbar. Ein Einfluss auf die Signalstärke konnte nicht festgestellt werden.

3.3.6 Fazit und Ausblick

Prinzipiell konnte gezeigt werden, dass die Übertragung von LF-Telegrammen von der Infrastruktur zum LKW möglich ist. Die kritischen Punkte sind einerseits Signaleinbrüche durch Fehlanpassungen entlang der Leitung, andererseits Störungen, die bei der Leistungsübertragung entstehen.

Eine deutliche Verbesserung der Leistungsanpassung und somit Verhinderung von Reflexionen kann allein durch eine Optimierung der Auslegung der Abschlusselemente, Koppelkondensatoren und der Ankoppeleinheit erreicht werden. Die größte Herausforderung dürfte hier die jedoch die Deckenstromschiene unter der Eisenbahnbrücke sein, die aktuell für das LF-Signal wie ein Kurzschluss nach Erde zu wirken scheint.

Bezüglich der Störungen durch die Leistungselektronik dürfte sich die Situation bereits deutlich entspannen, wenn die Anpassung der LF-Einspeisung optimiert würde, was eine Erhöhung des Signalpegels von 10 ... 30 dB bewirken würde. Weiterhin könnte hier eine Optimierung der Empfangsspule helfen: Durch eine geschickte Platzierung, Ausrichtung und/oder magnetische Schirmung besteht hier das Potenzial, das Empfangssignal deutlich zu verbessern.

Bei den Versuchen wurde aus praktischen Gründen eine Unterwerksdrossel mit einer maximalen Dauerstrombelastbarkeit von 400 A eingesetzt. Dies war ausreichend, um einen LKW zu versorgen. Eine Drossel, die den vollen Bemessungsstrom der FeSH-Anlage tragen sollte, müsste entsprechend hochskaliert werden und wird entsprechend teurer und schwerer.

Grundsätzlich bleibt ebenso der Einfluss von verschiedenen Varianten des Eingangsstromkreises der OH-Fahrzeuge ein signifikanter beeinflussender Faktor, der bei dem Einsatz von Fahrzeugen vielfältiger Hersteller schwer beherrschbar sein wird.

Im parallellaufenden Förderprojekt ELONSO im Unterpaket PAN.3 wurde ein Vergleich von Kommunikationstechnologien auch unter dem Aspekt Zugangsbeschränkung und Deaktivierung von Teilnehmern vorgenommen. Hierbei zeichnet sich auch unter Security-Aspekten eine Entscheidung für die 4G/5G Technologie ab. Die LF-Modulation ist durch die einseitige Kommunikationsrichtung für eine solche

Anwendung nicht geeignet und es bietet sich eine Integration der in diesem Paket vorgesehenen Funktionen in 4G/5G Kommunikation über eine entsprechende Datenbank an.

Durch diese Integration werden ohnehin auf dem Fahrzeug erforderliche Hardware-Komponenten genutzt und Synergien auf Basis bestehender Technologien zur Sicherheit in der Datenkommunikation genutzt.

Die im Rahmen des Forschungsprojektes FeSH2b zu untersuchende technische Machbarkeit der Übertragung eines LF-Signales über die Oberleitungsanlage wurde erprobt und erfolgreich nachgewiesen.

3.4 AP 1.4 Untersuchungen zum Alterungsverhalten von Isolatoren

3.4.1 Zielstellung des Vorhabens

Hinweis: Das AP zur Untersuchung der Isolatoren ist im separaten Förderantrag der SMO aus 2019 enthalten. Kurz nach Beginn der Arbeiten wurde der Forschungspartner TU Dresden in die Bearbeitung des AP eingebunden sodass das AP gemeinsam bearbeitet wurde. Durch die Kooperation mit der TU Dresden konnte der Detailgrad von Untersuchung und Auswertung wesentlich erweitert werden. An dieser Stelle deshalb vielen Dank für die mehrjährige tolle Zusammenarbeit.

Während des Anlagenbetriebs wurde im Winter 2020/21 Schäden an mehreren Isolatoren in der Oberleitungsanlage festgestellt. Die Schadensbilder der verbauten Gießharzisolatoren deuteten auf eine mechanische Entfestigung infolge von Ableitströmen hin, obwohl die Isolatoren nach Bahnnorm EN 50124 für die höchste Verschmutzungsstufe korrekt ausgelegt wurden. Auf Grund des Auftretens der Schäden im Winter und einer salzhaltigen Fremdschichtbildung wurde vermutet, dass die Ursache in einer streumittelhaltigen Sprühnebelwolke, welche durch den Verkehr aufgewirbelt wird, liegt. In einer Sofortmaßnahme wurden die Gießharzisolatoren der Oberleitungsanlage durch Silikon-Verbundisolatoren mit längerem Kriechweg, sowie besseren Werkstoff- und Hydrophobieigenschaften ersetzt.

Um die Entstehung und Auswirkung der Ableitströme an den Anlagenisolatoren in Abhängigkeit der vorherrschenden neuartigen Randbedingungen auf Autobahnen zu untersuchen, wurde im Rahmen des Forschungsprojektes ein zusätzliches Arbeitspaket für die Untersuchungen geschaffen. Folgende zu untersuchende Zielgrößen wurden ausgewählt:

- Zeitlicher Verlauf der Ableitströme
- Untersuchung der Fremdschichtbildung
- Mechanische Festigkeit der Isolatoren nach Abschluss der Versuche
- Alterung der verwendeten Werkstoffe sowie Veränderung der Hydrophobieigenschaften

Als Randbedingungen für die Zielgrößen wurden identifiziert:

- Isolatortyp und -eigenschaften
- Einbauposition und -richtung in Relation zu den Fahrspuren
- Witterungsbedingungen
- Streumiteleinsatz
- Verkehrsdichte auf den Fahrspuren

Im Dezember 2021 wurde begonnen ein dauerhaftes Messsystem an der Anlage zu konzeptionieren, welches es ermöglicht die Zielgrößen zunächst im Realbetrieb zu erfassen. Die finale Inbetriebnahme des Messsystems erfolgte im Dezember 2022.

3.4.2 Aufbau des Messsystems

Für die Konzeptionierung des Messsystems wurden zunächst die grundlegenden Anforderungen gesammelt:

- Untersuchung/ Beurteilung von unterschiedlichen Referenzisolatortypen in verschiedenen Einbaupositionen und -richtungen

- Messung des Ableitstromes über der Isolatoroberfläche mit einer Genauigkeit < 1 mA
- Messung der elektrischen Spannung über den Isolatoren
- Messung der Umgebungstemperatur und Luftfeuchte im Nahbereich der Isolatoren
- Kontinuierliche Messwerterfassung der 10 s Mittelwerte
- Trigger für eine hochfrequente Aufzeichnung der Strom- und Spannungsmessung
- Datenübertragung und Fernüberwachung des Messsystems

Die Messsysteme wurden am Ausleger der bestehenden Oberleitungsanlage installiert (vgl. Abbildung 22). Für die Wahl der Standorte wurden die Kriterien Entwässerung und Windeinwirkung als Einflussgrößen auf die Ausbildung der Sprühhahne der Fahrzeuge ausgewählt. Die Auswahl fiel auf folgende Standorte:

- Mast HL 45-07: Geringe Querneigung, Senke in der Längsneigung und exponierte Lage
- Mast HL 46-18: Geringe Querneigung, Senke in der Längsneigung und windgeschützte Lage durch Lärmschutzwand

Als Referenzisolatoren wurden sieben 3 kV Verbundisolatoren und zwei 15 kV Verbundisolatoren ausgewählt. Für die Installation der Isolatoren und der Messtechnik wurde am Auslegerarm eine zusätzliche Hängesäule montiert. Die Positionen und deren Abkürzungen sind in Abbildung 22 dargestellt. Die Bezeichnung der Isolatoren erfolgt gemäß der in Tabelle 1 und Tabelle 2 beschriebenen Codierung.

Tabelle 1 - Codierung der Referenzisolatoren

XX-XX-	XXX-	XXX
Messstandort (Mastnummer)	Position	Isolatortyp

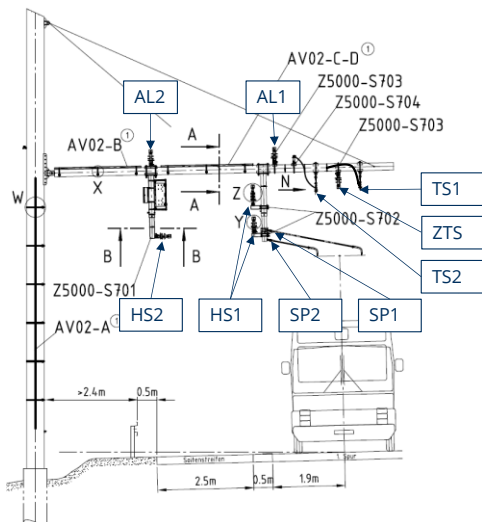


Abbildung 22 - Codierung der Isolatorpositionen am Ausleger

Tabelle 2 Codierung des Isolatortyps und der Einbaurichtung

Abkürzung Isolatortyp	Beschreibung
H03	3 kV hängend
L03	3 kV liegend

S03	3 kV stehend
L15	liegend 15 kV
S15	stehend 15kV

Eine beispielhafte Bezeichnung für einen stehenden 3 kV Isolator an der Hängesäule 1 des Mast 45-07 wäre also: „45-07-HS1-S03“.

In Abbildung 23 ist beispielhaft ein Referenzisolator abgebildet. Das in der Abbildung rechte Ende des Isolators ist das aktive, also das an die Oberleitungsspannung angeschlossene Ende. Auf dem Schirm am linken, geerdeten Ende wurde eine Kupferschelle montiert, die zum Abgriff des Stromes dient, welcher über die Oberfläche fließt. Von der Kupferschelle führt ein Kabel zu einem Trennverstärker vom Typ Knick P 43000, welcher vom Hersteller so modifiziert wurde, dass er bei einer Arbeitsspannung bis 2,2 kV Ströme im Messbereich zwischen – 100 mA bis + 100 mA mit einem Verstärkungsfehler von 0,3 % erfassen kann.



Abbildung 23 - Anschluss der Referenzisolatoren an die Fahrleitungsspannung und Schelle zum Abgriff des Ableitstromes

Zusätzlich werden noch folgende Messgrößen erfasst:

- Spannung über den Referenzisolatoren
- Umgebungslufttemperatur
- relative Luftfeuchtigkeit

Die Messwertaufzeichnung der Sensorsignale erfolgt über eine NI Messkarte vom Typ USB 6210. Um die auftretende Datenmenge zu reduzieren, erfolgt die dauerhafte Aufzeichnung in Form von 10 s Mittelwerten. Die hochfrequente Messwertaufzeichnung (1 kHz) erfolgt bei Überschreitung eines Stromgrenzwertes. Gesteuert wird die Messung über einem Mess-Pc und die Software Labview.

3.4.3 Erweiterung des Messsystems

Im Herbst 2023 wurde das Messsystem an Mast HL 46-18 um zusätzliche Sensorik der Firma Vaisala erweitert. Die in die Betonfahrbahn und am Ausleger installierten Sensoren können, unter vielen Weiteren, die folgenden Messwerte erfassen bzw. berechnen:

- Salzkonzentration der Flüssigkeit in der Fahrspur
- Flüssigkeitsfilmdicke der Fahrspur
- Menge der ausgebrachten Streumittel pro Flächeneinheit
- Partikeldichte in der Luft / Sichtweite
- Windgeschwindigkeit- und Windrichtung im Nahbereich der Isolatoren

Dies ermöglicht weitere Erkenntnisse zur auftretenden Salznebelbelastung der Isolatoren.



Abbildung 24 - Erweitertes Messsystems an Messstandort Mast 46-18



Abbildung 25 - Fahrbahnsensoren zur Messung des Salzgehaltes des Flüssigkeitsfilms

3.4.4 Auswertungsmethodik

Als Auswertungsgrundlage für die gemessenen Ströme wurden diese in 3 Klassen eingeordnet.

Tabelle 3 Klassifizierung der Kriechströme

#	Klassengrenzen	Beschreibung
1	$0 \leq I < 1 \text{ mA}$	Keine Schädigung der Oberfläche zu erwarten
2	$1 \text{ mA} \leq I < 10 \text{ mA}$	Ableitströme können Schädigungen verursachen, Degradation der Werkstoffeigenschaften [1]
3	$I \geq 10 \text{ mA}$	Ableitströme verursachen Schädigungen

Die Klassifizierung dient zur Einordnung der auftretenden Kriechströme. Die real an den Isolatoren auftretenden Schäden können von den Klassengrenzen abweichen, da vielfältige Einflussfaktoren hierbei eine Rolle spielen.

Zusätzlich zur Betrachtung des Zeitverlaufes der Messgrößen wurden statistische Auswertungsverfahren angewendet. Neben den allgemein bekannten Methoden, beispielsweise der Erstellung von Verteilungen sowie der Bestimmung von Min-, Max-, Mittelwerten, wurden das Verfahren der zeitgewichteten

Belastungsdauerkurve (ZBDK) und Zeitfensterhäufigkeit (ZFH) angewandt. Diese sollen kurz beschrieben werden.

Zur Einordnung der auftretenden Ströme an den Isolatoren hinsichtlich der Dauer und der maximalen Größe wurde mit der ZBDK ein Verfahren gewählt, welches ursprünglich im Bahnbereich dazu entwickelt wurde elektrische Betriebsmittel zu dimensionieren. Für die Auswertung einer zeitabhängigen Größe wird ein Zeitfenster der Dauer Δt über die Gesamtdauer T verschoben. Dabei wird im ersten Schritt die Zeitfensterdauer Δt in der Größe des kleinsten Zeitschritts gewählt. Mit jeder Iteration wird das Zeitfenster kontinuierlich erhöht bis das Zeitfenster die Gesamtdauer T oder wahlweise eine geringere zu betrachtende Dauer erreicht hat. Innerhalb der Iterationen wird das Zeitfenster über der zeitabhängigen Größe verschoben und für jedes Zeitfenster der arithmetische Mittelwert oder wahlweise andere statistische Größen berechnet. Anschließend wird das Maximum aller Mittelwerte für ein Zeitfenster gebildet und abgespeichert. Als Ergebnis ergibt sich eine Funktion der Maximalwerte der Zeitfenster über der Zeitfensterdauer. Eine detaillierte Beschreibung der ZBDK findet sich in [2]. Das Verfahren ermöglichte die maximal auftretenden Ableitströme hinsichtlich ihrer Dauer für die einzelnen Referenzisolatoren zu vergleichen.

Da für die Auswertung neben der maximal auftretenden Belastung auch die Häufigkeit der Ereignisse relevant ist, wurde als zusätzliches Verfahren die Auswertung der ZFH gewählt. Hierfür werden Belastungsklassen definiert und anschließend bezogen auf die Auswertungsgesamtdauer berechnet, mit welcher Häufigkeit der berechnete statistische Wert eines Zeitfensters der ZBDK auftritt. Eine weiterführende Beschreibung ist in [3] gegeben.

Neben der dauerhaften Messung der Ableitströme und deren Randbedingungen erfolgt im Intervall von ca. sechs Monaten im Rahmen der Anlageninspektion eine Erfassung des Isolatorzustandes. Dabei werden von allen Seiten Bilder der Isolatoren aufgenommen und die Oberfläche auf Verschmutzungsablagerungen oder Anzeichen für Punktierungen bzw. Überschläge untersucht. Zudem sollen nach Abschluss der Messungen NSDD¹- und ESDD² Messungen gemäß DIN IEC/TS 60815-1 durchgeführt werden. [4] Um zudem ein zeitabhängiges Monitoring der NSDD- und ESDD-Werte ohne Beeinflussung der Messung zu erreichen, werden in den Inspektionen zusätzliche Wischproben an den Schirmen benachbarter und vergleichbarer Anlagenisolatoren genommen. Die Proben werden zudem chemisch analysiert, um die Anteile der Kohlenstoffverbindungen sowie kationische und anionische Bestandteile zu messen. Als weitere Eigenschaft der Silikon-Verbundisolatoren wurden die Hydrophobieigenschaften der Referenz- und Anlagenisolatoren untersucht. Als Verfahren zur Bestimmung der Hydrophobieklasse nach DIN IEC/TS 62073 wurde der Sprühtest gewählt. [5]

3.4.5 Erste Ergebnisse Winter 2022/23

Nachfolgend sind die Zwischenergebnisse nach dem Winter 2022/23 (nachfolgend: „erster Winter“) Für die weitere Auswertung wurden vier der insgesamt 18 Referenzisolatoren an beiden Standorten (ST) ausgewählt, um die gewonnen Erkenntnisse darzustellen.

Tabelle 4 Übersicht über die in der Auswertung betrachteten Referenzisolatoren

Isolatorkürzel	Isolatortyp und -position	Messstandort
45-07-HS1-S03	stehender 3 kV Isolator an Hängesäule nahe der Fahrspur auf Höhe des Fahrdrachts	entwässerungsschwach, exponierte Lage

¹ Non-soluble deposit density – dt. Dichte nichtlöslicher Ablagerungen

² Equivalent salt deposit density – dt. äquivalente Dichte der Salzablagerungen

46-18-HS1-S03	stehender 3 kV Isolator an Hängesäule nahe der Fahrspur auf Höhe des Fahrdrachts	entwässerungsschwach, neben Lärmschutzwand
46-18-HS1-S15	stehender 15 kV Isolator an Hängesäule nahe der Fahrspur	entwässerungsschwach, neben Lärmschutzwand
46-18-ZTS-H03	hängender 3 kV Isolator mittig über der Fahrspur auf Höhe der Tragseile	entwässerungsschwach, neben Lärmschutzwand

Die Ergebnisse der ZBDK (vgl. Abbildung 26) zeigen, dass der Isolator 46-18-HS1-S03 mit über 2,5 mA die höchste Ableitstrombelastung über dem gesamten ausgewerteten Zeitbereich besitzt. Im Bereich bis 1000 s folgt der Isolator 45-07-HS1-S03 mit gleicher Einbauposition und -richtung aber anderem Messstandort. Im gleichen Zeitbereich darunter liegt der 15 kV Isolator 46-18-HS1-S15 mit etwas höherer Einbauposition und deutlich längerem Kriechweg. Im Zeitbereich über 1000 s liegt dieser oberhalb von 45-07-HS1-S03. Der Isolator 46-18-ZTS-H03 direkt über der Fahrspur weist die geringste Belastung auf. Die Kriechstromwerte liegen überwiegend innerhalb der Klasse 1 und vereinzelt in der Klasse 2 (vgl. Tabelle 3).

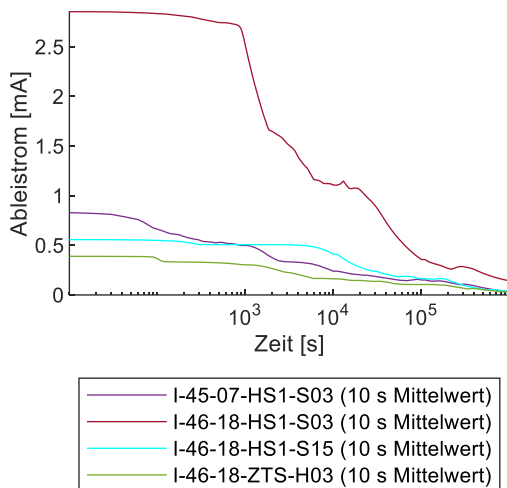


Abbildung 26 - ZBDK der Ableitströme im Auswertungszeitraum Winter 22/23

Für die Verläufe der ZFH wurde die Klasse 0,2 mA bis 1 mA gewählt. In dieser liegen die Ströme signifikant oberhalb des zu erwartenden Messfehlers. Die Obergrenze von 1 mA ergibt sich aus der allgemeinen Klassifizierung der Ableitströme. Bei der relativen Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Ableitströme zeigt sich, dass der Isolator 46-18-HS1-S03 den höchsten Wert bei einer Dauer von 10⁵ s, also ca. 3 h, aufweist. Eine Spitze tritt dann auf, wenn zwei Zeitfenster zusammenfallen, deren Mittelwert innerhalb der Klassengrenzen liegt. Die Wahrscheinlichkeiten für die Isolatoren 46-18-HS1-S15 und 45-07-HS1-S03 liegen deutlich unterhalb und weisen zudem geringere Zeitfenstergrößen auf. Der Isolator 46-18-ZTS-H03 weist nahezu keine Auftretswahrscheinlichkeit auf.

Zusammenfassend lässt sich aus den Ergebnissen der ZBDK und ZFH ableiten, dass sowohl der Messstandort, der Isolortyp als auch die Einbauposition und -richtung einen signifikanten Einfluss auf die Höhe, Dauer und Auftretswahrscheinlichkeit der Ableitströme in verschiedenen Zeitbereichen haben.

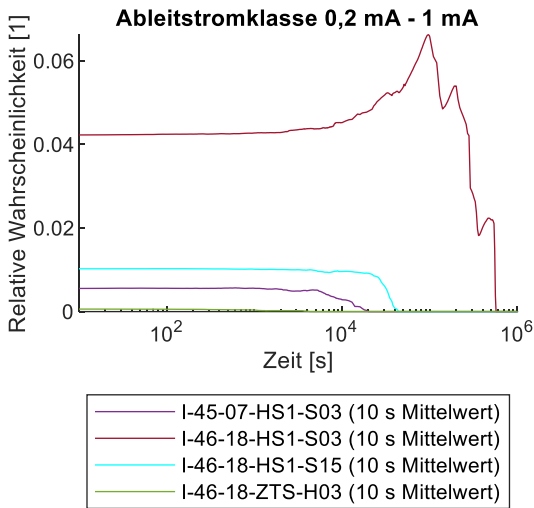


Abbildung 27 - ZFH der Ableitströme im Auswertungszeitraum Winter 22/23

Über eine Wetterstation an der Versuchsstrecke könnte der Einfluss der Witterung untersucht werden. Der Auswertungszeitraum beschränkt sich dabei auf den Winter 2022/23. Die Auswertung der Umgebungslufttemperatur zeigte zunächst, dass Ableitströme größer 1 mA überproportional oft bei Temperaturen knapp unter oder über 0 °C auftreten.

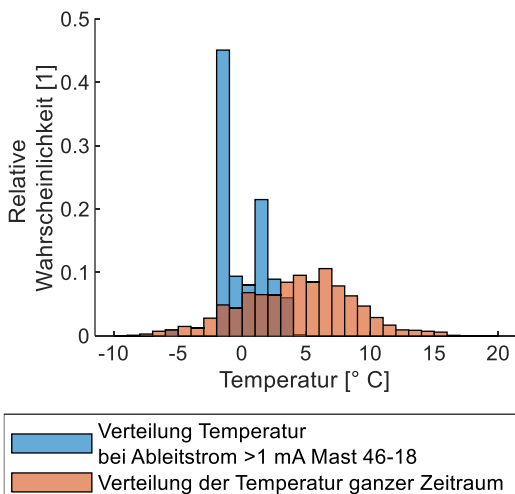


Abbildung 28 - Vergleich der Temperaturverteilung im Auswertungszeitraum Winter 22/23

Bei der Auswertung der vorherrschenden Niederschlagsereignisse gemäß SYNOP-Code ergab sich eine größere Auftretswahrscheinlichkeit von Ableitströmen bei leichtem Schneefall und anderen Niederschlagsereignissen. Dahingegen ist bei keinem Niederschlag die Wahrscheinlichkeit für Ableitströme größer 1 mA geringer.

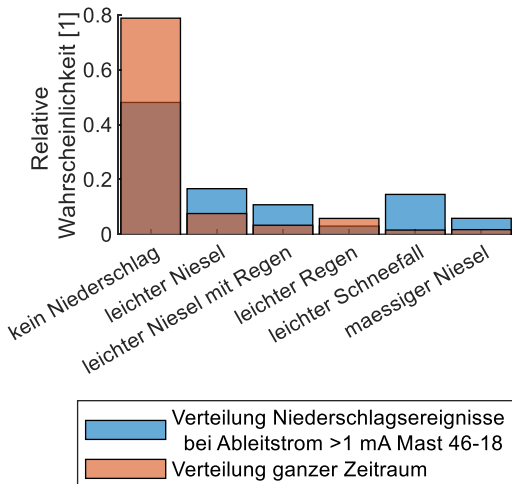


Abbildung 29 - Vergleich der Niederschlagsverteilung im Auswertungszeitraum Winter 22/23

Nach Ende des Winters wurde von der dort ansässigen Autobahnmeisterei der Bericht über den Streumittel Einsatz für die Auswertung zur Verfügung gestellt. An mehreren Stellen im Zeitverlauf zeigte sich, dass Ableitstromereignisse dann auftreten, wenn Streumittel ausgebracht wurden und anschließend Niederschlag folgt oder bereits vorausgegangen war. Werden nur Streumittel ausgebracht oder es tritt nur Niederschlag auf, ist kein Ableitstromereignis zu verzeichnen. In Abbildung 30 ist dieser Zusammenhang zwischen Niederschlag und Streumittel Einsatz (hier Sole 30/70³) dargestellt. Weiterer Niederschlag kann zudem dazu führen, dass die salzhaltige Schicht auf den Isolatoren wieder abgewaschen wird und der Ableitstrom absinkt.

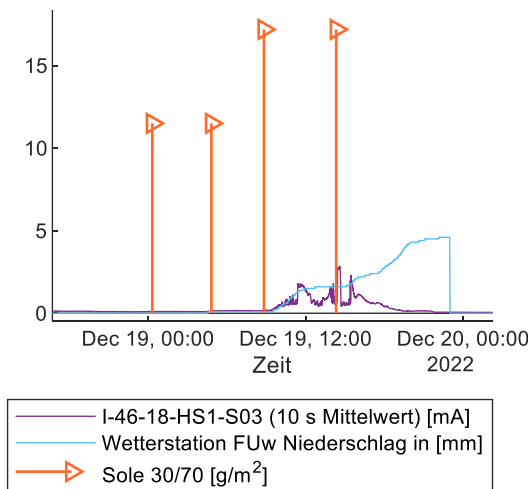


Abbildung 30 - Zeitlicher Verlauf von Ableitstrom, Niederschlag und Streumittel Einsatz

Als Ergebnis aus der Untersuchung der Witterungsbedingungen und des Streumittel Einsatzes lässt sich ableiten, dass die Ableitströme mit hoher Wahrscheinlichkeit durch den Streumittel Einsatz in Kombination mit Niederschlag verursacht werden.

Die Zustandserfassung der Isolatoren erfolgte in den Inspektionswochen im März 2023 und September 2023. Somit kann der Zustand nach der Jahreszeit Winter mit Streumittel Einsatz und dem Frühling sowie Sommer unterschieden werden. Grundsätzlich konnten keine Anzeichen für Punktierungen oder

³ Auch als „Feuchtsalz 30“ bezeichnet.

Mischungsverhältnis beträgt 70 Massenprozent Auftausalz und 30 Massenprozent Sole.

Flashover/-under an den Referenzisolatoren gefunden werden. Für die Auswertung der Wischproben an den Anlagenisolatoren liegen derzeit nur die Ergebnisse der ESDD- und NSDD-Werte sowie der chemischen Analyse aus dem Zeitraum zwischen dem Tausch der Isolatoren im Jahr 2020 und der Probenahme in 2023 vor. Sowohl die Werte für die ESDD als auch die für NSDD liegen im mittleren Bereich. Die Auswertung der chemischen Analyse läuft derzeit noch. Bei der Durchführung der Sprühtests an den Referenzisolatoren zeigte sich zunächst eine Abhängigkeit der Hydrophobieigenschaften von der Sprührichtung. Auf der Seite entgegen der Fahrtrichtung war die Oberfläche hydrophiler als im Windschatten. Als maßgebend für den Zustand wurde die Seite entgegen der Fahrtrichtung gewählt. Die Auswertung der Sprühtests ergab, dass nach dem Winter die Hydrophobiekategorie für die von Ableitströmen über 0,5 mA betroffenen Isolatoren im Bereich zwischen 6 und 7 lag. Die restlichen Isolatoren ließen sich in die Klassen 4-5 einordnen. Lediglich die Isolatoren, welche liegend in Fahrtrichtung montiert waren wiesen weiterhin gute Hydrophobieigenschaften auf. Es wird vermutet, dass die Sprühfahne sich in Fahrtrichtung auf Grund des Fahrwindes bewegt und es so zu einer einseitig stärkeren Verschmutzung der Isolatorenoberfläche kommt. Die im September 2023 durchgeführten Sprühtests nach den Frühlings- und Sommermonaten ergaben bei nahezu allen Isolatoren eine um 1 bis 2 Klassen bessere Hydrophobie der Oberfläche. Folglich ist nach der starken Fremdschichtbildung im Winter eine Hydrophobiewiederkehr auf Grund der Transfereigenschaften des Isolatorwerkstoffes erkennbar.



Abbildung 31 - Hydrophobieigenschaften eines Referenzisolators in Abhängigkeit der Fahrtrichtung

3.4.6 Ergebnisse Winter 2023/24

Die Analyse der Isolatoren nach dem zweiten Winter 2023/24 (nachfolgend „zweiter Winter“) folgt der gleichen Auswertelogik wie nach dem ersten Winter. Zusätzlich wurden die Isolatoren nach ihrer De-Installation aus dem Feldversuch noch durch die FH Zittau untersucht.

Durch die in 3.4.3 beschriebene Erweiterung des Messsystems konnten die Umgebungsbedingungen sehr genau erfasst werden. Entsprechend sind in Abbildung 32 die Zeitverläufe der Straßenoberflächentemperatur, der Filmdicke auf der Fahrbahn sowie der Streumittelmenge dargestellt. Es wird ersichtlich, dass sich der Feuchtigkeitsfilm auf der Straße überwiegend im flüssigen Aggregatzustand befindet und erwartungsgemäß nur in den kälteren Perioden als Schnee- oder Eisfilm ausbildet.

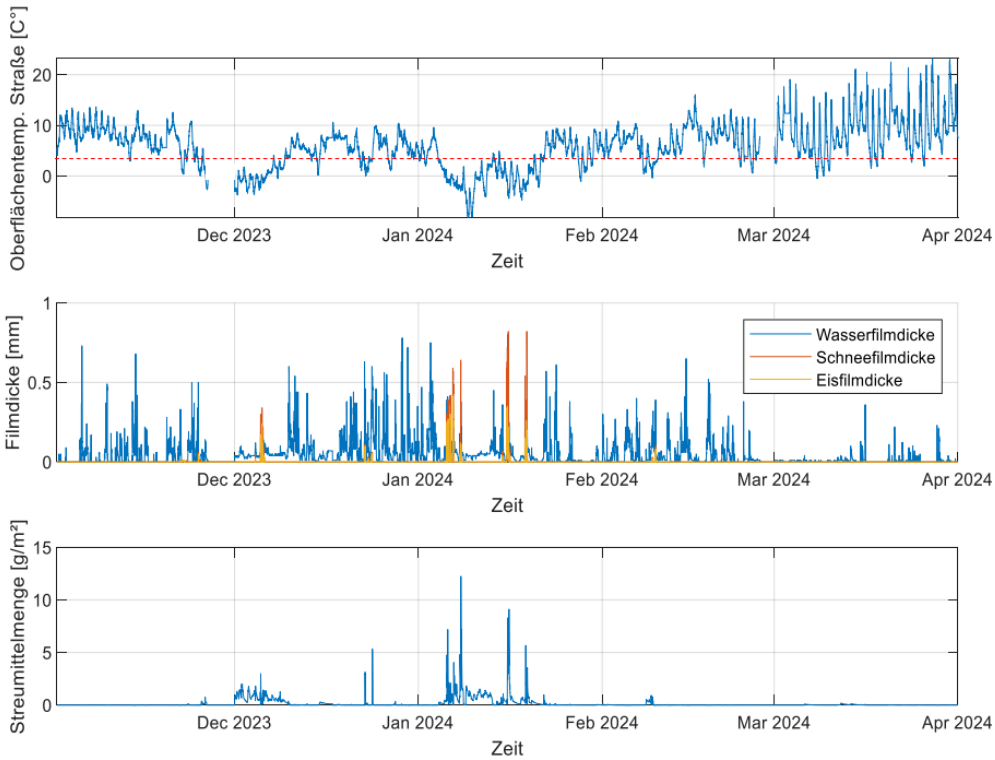


Abbildung 32 - Übersicht Umgebungsbedingungen im zweiten Winter

Die Abfrage der ausgebrachten Streumittelmenge und deren Zusammensetzung bei der zuständigen Autobahnmeisterei erweitere die Untersuchungen zusätzlich (vgl. Abbildung 33).

	Winter 22/23	Winter 23/24
Fahrten	125	349
Sole (22% Salzgehalt)	8150 l (1,8 t Salz)	4700 l (1 t Salz)
Trockensalz	1125 g/m ² (68 t)	2514 g/m ² (151 t)

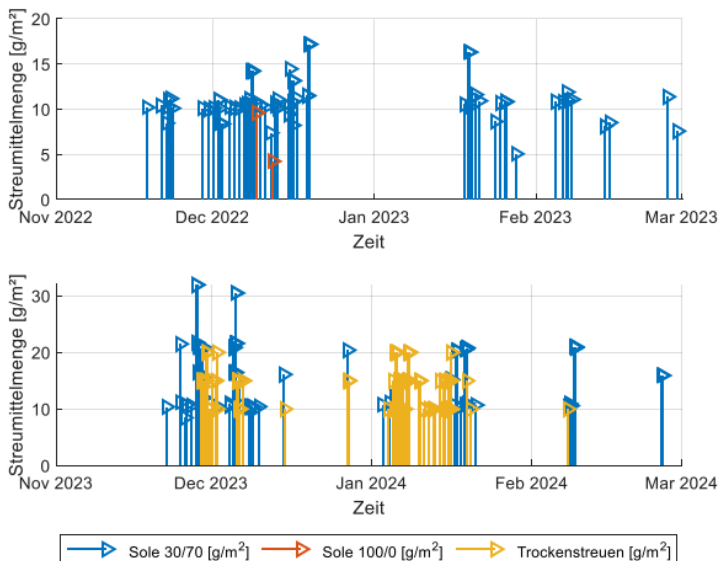


Abbildung 33 - Streumiteleinsatz entlang des Autobahnabschnittes

So zeigt der Vergleich mit dem ersten Winter, dass im zweiten Winter deutlich mehr Streumittelfahrten durchgeführt wurden. Allerdings wurde im zweiten Winter deutlich weniger Feuchtsalz bzw. Sole (58 % des Vorjahres) und dafür deutlich mehr Trockensalz (223 % des Vorjahres) ausgebracht. Die genannten Absolutwerte beziehen sich jeweils auf die ausgebrachte Menge des befahrenen Autobahnabschnittes. Da dieser laut Straßenmeisterei jedoch in beiden Wintern gleich war, erlauben die Zahlen einen qualitativen Vergleich der beiden Winterperioden.

In Abbildung 34 sind Verteilungen des Fahrbahnzustandes sowie der Sichtweite dargestellt, die bei Ableitstromereignissen von mehr als 1 mA auftreten. Wie zu erwarten, treten relevante Ableitströme überwiegend auf wenn die Fahrbahn nass („wet“) bzw. feucht („moisty“) ist. Die Sichtweite ist bei auftretenden Ableitströmen überwiegend gering (Nebelbildung).

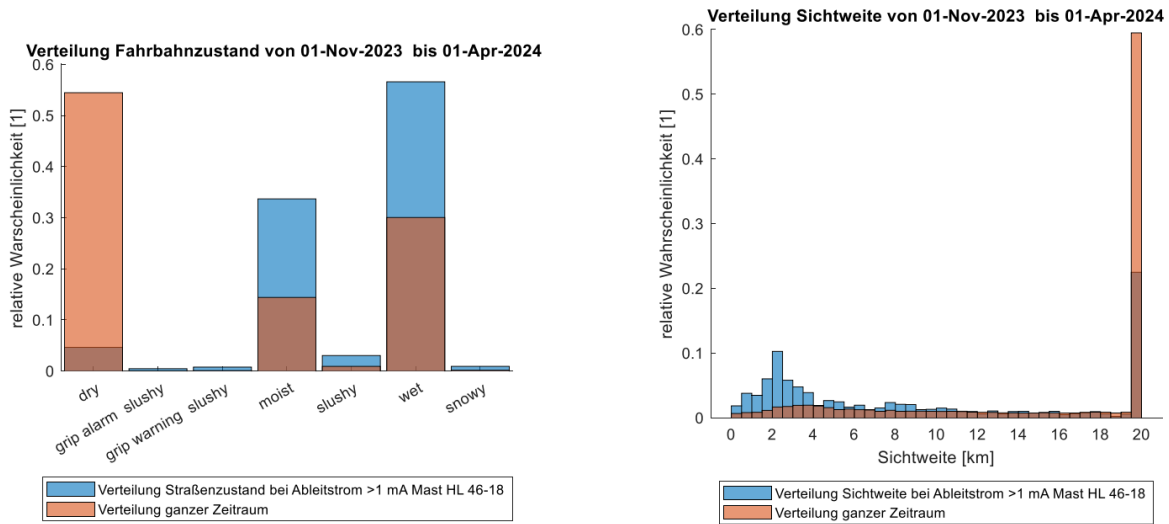


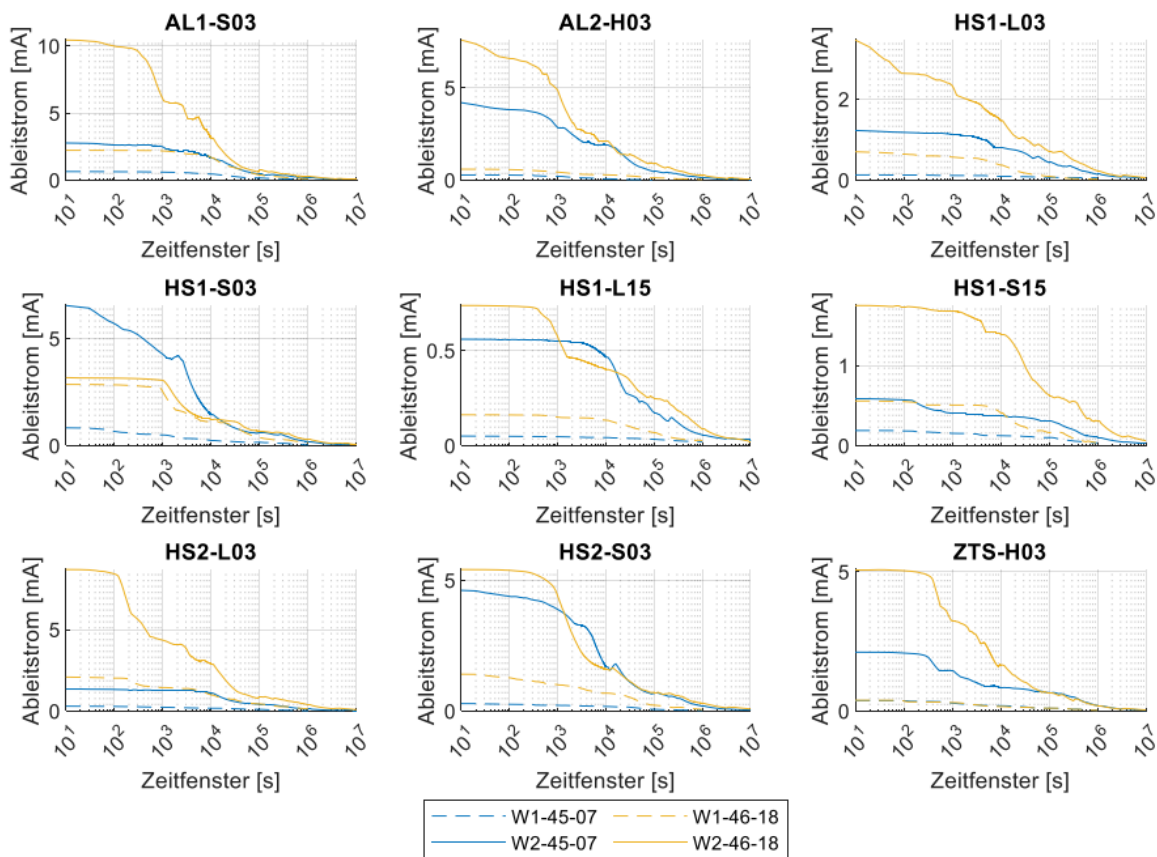
Abbildung 34 - Randbedingungen bei Ableitstromereignissen größer als 1 mA

Zentrale Untersuchungsgröße zur Bewertung der Belastung der Isolatoren ist der Ableitstrom über den Isolierkörper. Dessen zeitliche Verläufe und deren Auftreten wurden auch nach dem zweiten Winter mit der ZBDK und ZFH (vgl. Abschnitt 3.4.4) analysiert. Eine vergleichende ZBDK der hochauflösenden Messwerte mit der Daueraufzeichnung hat keine signifikanten Abweichungen ergeben, woraus sich schließen lässt, dass relevante Ableitstromereignisse im Sekundenbereich auftreten und eine hochfrequente Analyse nicht notwendig ist.

In Abbildung 35 ist eine Übersicht über die ZBDK (Daueraufzeichnung) der verschiedenen Isolatoren und beide Winterperioden dargestellt. Nachfolgend sind jeweils eine vor Beginn der Versuche aufgestellte Forschungshypothese und eine datengestützte Antwort darauf dargestellt:

- These: *Im zweiten Winter treten höhere Ableitströme auf als im Winter.*
Grundsätzlich treten an nahezu allen Isolatoren im zweiten Winter teilweise deutlich höhere Ableitströme auf als im ersten Winter. Dies liegt vermutlich an einer bereits im ersten Winter stattgefundenen Schädigung der Isolierung der Isolatoren.
- These: *Isolatoren, die sich weiter von der Fahrbahn entfernt befinden weisen geringere Ableitströme auf.*
Im Gegenteil wies der 3 kV Isolator AL1-S03, der stehend auf dem Auslegerrohr im Bereich der Hängesäule 1 angeordnet ist, die höchsten Ableitströme auf. Andere Isolatoren, die ebenfalls in verschiedenen Höhen angeordnet sind weisen hingegen teilweise gleiche Ableitströme auf.
- These: *Die Schallschutzwand am Maststandort 46-18 hat einen Einfluss auf die Ableitströme.*
In der Tat sind die am Standort 46-18 auftretenden Ableitströme höher als am Maststandort 45-07. Dahinter wird eine Art Tunnelwirkung der Schallschutzwand vermutet, die zumindest einseitig die durch Fahrzeuge und Wind aufgewirbelte Gischt mechanisch reflektiert und so zu einer höheren Partikelbelastung führt.

- *These: Stehend eingebaute Isolatoren weisen höhere Ableitströme auf als liegend eingebaute Isolatoren.*
Abgesehen von HS2-L03 haben die anderen beiden liegend eingebauten Isolatoren durchaus geringere Ableitströme als die stehend eingebauten Isolatoren. Vermutlich liegt dies darin begründet, dass sich bei stehenden Isolatoren eine Schirmwirkung einstellt, die bei Niederschlag ein Abwaschen von leitfähigen Ablagerungen auf der Isolatoroberfläche verhindert.
- *These: Die 15 kV Isolatoren weisen keine Ableitströme auf.*
Obwohl die 15 kV Isolatoren mit einem Mindestkriechweg von 570 mm bei einer Systemspannung von 670 V über einen spannungsbezogenen Kriechweg von 850 mm/kV verfügen, der weit oberhalb der in DIN EN 50124-1 definierten extremen Betriebsbedingungen (48 mm/kV) liegt, traten auch an den 15 kV Isolatoren vereinzelt Kriechströme auf. Wenn auch wesentlich geringer als an den 3 kV Isolatoren. Dies unterstreicht die Neuartigkeit der sich aus dem Anwendungsfall Autobahn und Gleichstromanwendung ergebenden Belastung der Bauteile.



Zeitraum W1 12/22 – 03/23
 Zeitraum W2 11/23 – 03/24

Abbildung 35 - Übersicht über die ZBDK der verschiedenen Isolatoren in beiden Winterperioden

Im Rahmen der Inspektionen wurden Sprühtests zur Bestimmung der Hydrophobiekategorie der Isolatoroberfläche durchgeführt (vgl. Abbildung 36). Die verschiedenen Zeitpunkte März 2023, September 2023 und April 2024 sind farblich gegeneinander abgegrenzt. Bereits nach dem ersten Winter (März 2023) waren viele Isolatorenoberflächen hydrophil. Bis zum zweiten Untersuchungszeitpunkt im September 2023 hatten sich an einzelnen Isolatoren Verbesserungen der Oberflächencharakteristik hin zur Hydrophobie eingestellt, aber nach dem zweiten Winter wiesen nahezu alle Isolatoren erneut eine hydrophile Oberfläche auf.

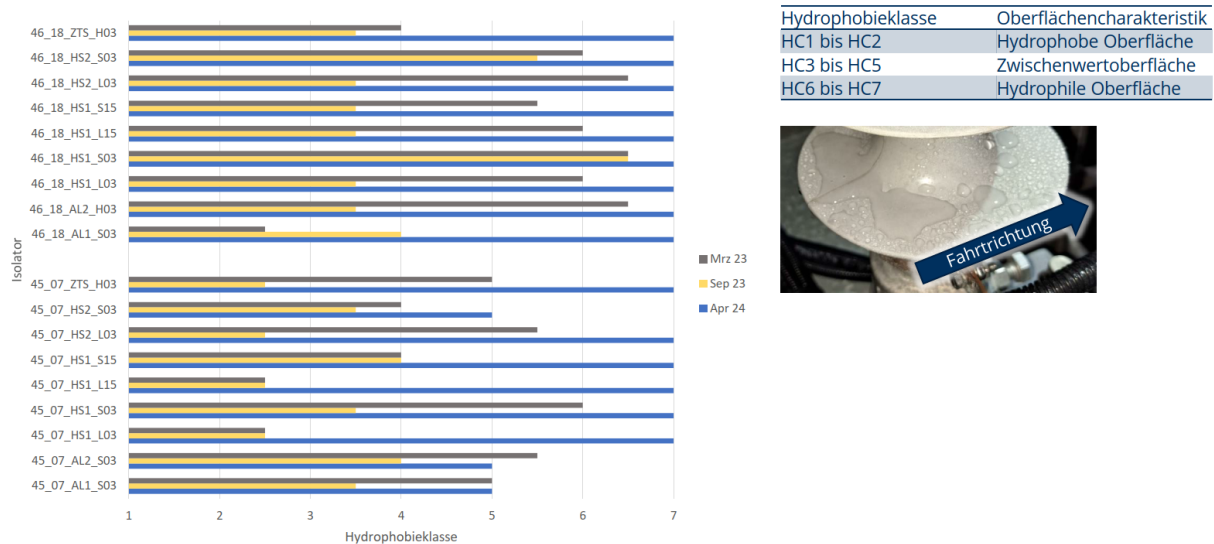


Abbildung 36 - Übersicht über die Hydrophobie der Isolatoroberflächen

3.4.7 Fazit der Untersuchungen

Die ersten Zwischenergebnisse der laufenden Messungen zeigen, dass die durch die Fahrzeuge der Autobahn aufgewirbelte Sprühfahne bei Niederschlag und Streumittel Einsatz eine salzhaltige Flüssigkeitsfilmbildung zur Folge hat, welche zu Ableitströmen führt. Wichtige Einflussgrößen für die Höhe, Dauer und Häufigkeit der Ableitströme sind die Entwässerungssituation der Autobahn, die Einbauposition und -richtung sowie der Isolatortyp. Mit dem Ziel den Anteil rein elektrischer LKWs zu erhöhen, werden zunehmend elektrische Anlagen, wie zum Beispiel Oberleitungsanlagen, Freileitungen oder Ladestationen, an Autobahnen installiert. Für die Auslegung der Anlagen wird es entscheidend sein, die vorherrschenden Verschmutzungsbedingungen zu kennen.

Gespräche mit polymertechnischen Forschungsinstitutionen wie der FH Zittau sowie den Herstellern und Prüfern von Isolatoren haben gezeigt, dass das sich im Feldversuch gezeigte Alterungsverhalten der Isolatoren bis dato unbekannt war und großes Potential für weitere Grundlagenforschung bietet. Beispielsweise könnte als erster Schritt aus den im Feldversuch gewonnenen Ergebnissen ein spezieller Salznebelversuch entwickelt werden, welcher die Randbedingungen im Nahbereich von Autobahnen widerspiegelt. Vor dem Hintergrund der geplanten Trassenbündelung von Freileitungen und Autobahnen kommen solchen Untersuchungen große Bedeutung auch abseits der eHighway Anwendung zu.

3.5 AP 2.1 Bewertung Netzqualität bei Einspeisung / Energieversorgung durch Gleichrichterunterwerk und Forschungsunterwerk

Im Arbeitspaket ist die aktive Mitwirkung der SMO an der Arbeitsgruppe der FH Kiel unter der Leitung von Prof. Hinrichs enthalten. Ziel ist es eine vergleichende Untersuchung und Bewertung der unterschiedlichen Unterwerkstypen, im Feldversuch ist neben den standardmäßigen Dioden-Gleichrichterunterwerken auch ein Forschungsunterwerk installiert. Letzteres ermöglicht eine Rückspeisung aus dem DC Netz der eHighway Anlage in das öffentliche AC Netz. Zielstellung des AP war es ein Bewertungskonzept für die Netzintegration von Unterwerken zu erstellen, aus der sich eine Handlungsempfehlung für Technologie und Netzanbindung der Unterwerke ableiten lässt. Dafür wurden die Unterwerke durch die FH Kiel mit hochauflösender Messtechnik ausgestattet.

Aufgrund der schlechten Verfügbarkeit der Feldversuchs-Lkw und der nur geringen elektrischen Leistung, welche die Fahrzeuge aus dem DC Netz bezogen bzw. in dieses zurückgespeist haben, wurden in 2023

durch die Arbeitsgruppe nur erste Grob-Analysen zur Netzqualität und zum Einfluss des DC Netzes auf das vorgelagerte AC Netz durchgeführt, wobei SMO im Rahmen der virtuellen Arbeitsgruppentreffen bei der Analyse und Interpretation der aufgezeichneten Messwerte unterstützen konnte. Beispielhaft ist in Abbildung 37 der Wirkleistungs- und THDu-Verlauf am Netzanschlusspunkt (NAP) für eine ausgewählte Forschungsfahrt am 01. August 2023 dargestellt. Der THDu-Wert gibt die Oberschwingungsgesamtverzerrung der Spannung gegenüber der Grundschwingung an und bietet einen vereinfachten Kennwert inwiefern die Spannung verzerrt bzw. „verunreinigt“ wird. Entsprechend sind niedrige THDu-Werte anzustreben. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass bei steigendem Leistungsbezug am NAP durch energiebezogene Oberleitungs-Lkw der THDu-Wert sinkt, die Spannungsqualität also steigt.

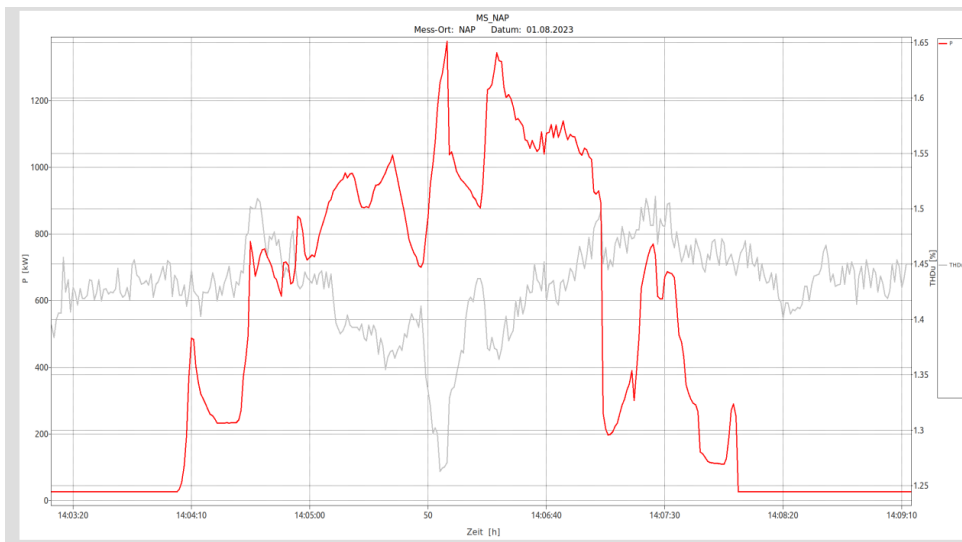


Abbildung 37 - Wirkleistung und Total Harmonic Distortion Faktor der Spannung (THDu) im NAP, Quelle: FH Kiel

In Abgrenzung dazu ist in Abbildung 38 der Verzerrungsfaktor THDia des Stromes am NAP dargestellt.



Abbildung 38 - Wirkleistung und Total Harmonic Distortion Faktor des Stroms (THDia) im NAP

Zusätzlich unterstützte SMO die Untersuchungen mit der Durchführung eigener Testfahrten, bei denen der SMO-Test-Lkw El Facil verschiedene Lastszenarien an der Oberleitung nachstellte. Die Testfahrten

wurden ebenfalls für eine detaillierte Auswertung des Pantographenverhaltens per Railigent (AP 1.1) verwendet.

3.6 AP 2.2 Untersuchungen ausgewählter Aspekte zu Systemerweiterung und Systemausbau

Die Bearbeitung des AP war als Mitarbeit an einem beim Forschungspartner TU Dresden ähnliches Arbeitspaket beplant. In Absprache mit dem Forschungspartner TU Dresden, bei dem die gemeinsamen Arbeiten im AP 2.4 Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit der Oberleitungsinfrastruktur abgebildet sind, wurden die Arbeitsinhalte zum AP im Kalenderjahr 2022 beruht. Entgegen der Planung wurden die Arbeiten im Kalenderjahr 2023 auch nicht wieder gestartet. Die Bearbeitung war für das letzte Jahr des gemeinsamen Forschungsprojektes geplant und hat sich mit der Projektverlängerung entsprechend zeitlich nach hinten verschoben. Im Zuge der bei Siemens Mobility erfolgten Hibernisierung der eHighway Technologie wurden dann auch die Arbeitsinhalte an geplanten Förschungsprojekten eingeschränkt. Dies betraf letztendlich auch das AP 2.2 zu Systemerweiterung und Systemauf.

4 ABWEICHUNGEN ZUM ARBEITSPLAN

Wie im Verwertungsplan des Förderprojektes FeSH2b (FKZ: 16EM5007-1) beschrieben, bestanden erhebliche wirtschaftliche Erfolgsrisiken der eHighway Technologie aufgrund der großen Abhängigkeit von politischen Rahmensetzungen beim Aufbau der benötigten Infrastruktur, die nur sehr bedingt von den Projektbeteiligten beeinflusst werden können. Die Umsetzung der geplanten Innovationscluster⁴ in Deutschland war eine grundlegende Voraussetzung für die erfolgreiche Einführung der Technologie auf deutschen, aber auch europäischen Autobahnen, da von einer starken Signalwirkung Deutschlands auf andere europäische Länder ausgegangen werden musste. Nachdem auch zu Beginn des Kalenderjahres 2024 eine Entscheidung zur Umsetzung der Innovationscluster inklusive Oberleitungsinfrastruktur aufgrund der dazugehörigen Haushaltslage des Bundes noch immer ausstand, wurde eine zeitnahe großflächige Umsetzung als eher unwahrscheinlich eingeschätzt. Folglich war der Verwertungsplan für das Projekt FeSH2b inhaltlich neu zu bewerten.

Trotz der Errungenschaften wurden bis zu diesem Zeitpunkt keine größere öffentliche Autobahn-Anwendung der Technologie angestoßen, so dass die Siemens Mobility GmbH sich, da die Technologie einen Status erreicht hat, mit dem sie marktreif ist und heute eingesetzt werden könnte, entschieden hat, das Engagement vorerst zu pausieren.

Die Dynamic Charging (eHighway) Technologie steht damit potenziellen Kunden weltweit auf dem derzeitigen Stand zur Verfügung. Der Umfang der fortgeführten Aktivitäten hatte zum Ziel, die technischen Ziele in einen sinnvoll abgerundeten Zustand zu überführen, damit die erarbeiteten Lösungen bei Start einer großflächigen Anwendung kurzfristig abgerufen und angewendet werden können

Aufgrund dieser Neubewertung und einiger neu gewonnener Erkenntnisse in den verschiedenen Arbeitspaketen hat sich für die Siemens Mobility GmbH ein Anpassungsbedarf (Kürzung in einigen Arbeitspaketen) ergeben. Diese Änderungen wurden dem Fördermittelgeber in Änderungsanträgen mitgeteilt.

⁴ https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/presse/104-karte-innovationscluster.pdf?__blob=publicationFile

5 VERGLEICH DER PROJEKTERGEBNISSE ZUM INTERNATIONALEN STAND DER TECHNIK

Die übergeordneten Ziele des Forschungsprojektes, die da waren

- datengestützte Analyse der Performance des Pantographen im Feldversuch
- Entwicklung und Erprobung von einzelnen Systemtechnologien

wurden erreicht. Eine detaillierte Beschreibung ist Kapitel 3 zu entnehmen.

Das AP 1.1 hat feldversuchsbegleitend den Pantographen ausgewertet und in Verbindung mit Fahrzeughersteller, LKW Fahrer und anderen Begleitforschungsteilnehmern eine signifikante Performancesteigerung des Pantographensystems erzielt.

Die Adaption des aus der Bahntechnik stammenden DTC Systems im AP 1.2 auf den eHighway hat ebenfalls Neuheitswert und wurde so bislang noch nicht durchgeführt. Das System sowie die nachgelagerte Auswertung wurden erfolgreich eingesetzt. Gleiches gilt für die Verwendung eines LF-Signals zur Datenübermittlung in Oberleitungsanlagen im AP 1.3.

Eine vergleichbare Entwicklung eines eHighway-Systems ist aktuell aus China bekannt geworden. Auswertungen anhand von Bildmaterial und wenigen Eckdaten zeigen, dass die Arbeiten sich aber noch in einem frühen Stadium bewegen. Die Pantographenentwicklung scheint noch am Anfang zu sein, das gezeigte Testumfeld erlaubt nur mittlere Geschwindigkeiten an der Oberleitung, welche für den alltäglichen Einsatz noch nicht ausreichend sind. Die erkennbaren Eckdaten des Systems sind vergleichbar mit dem hier geförderten Anwendung

Zusätzlich wurde das Gesamtsystem in verschiedenen internationalen und nationalen Normungsdokumenten verankert, die sowohl die Infrastruktur des eHighway als auch den neuartigen beschreibt und somit einen Stand der Technik schafft. Die normungsbegleitenden Arbeitsgruppen wurden von SMO geleitet und im Wesentlichen inhaltlich vorangetrieben.

6 ZUKUNFTSAUSSICHTEN UND WEITERER F&E-BEDARF

Die Erprobung und wissenschaftliche Begleitforschung der eHighway Technologie im Förderprojekt FeSH2b hat wichtige Erkenntnisse für die Bewertung der technologischen Reife des Systems, seiner Zukunftsaussichten sowie weiterem FuE-Bedarf geliefert. So wurden die während der Betriebsevaluation des Pantographen kontinuierlich gesammelten Felddaten für Optimierungen von Hard- und Software des Pantographensystems verwendet. Zusätzlich konnten Verbesserungsvorschläge für den Fahrzeugpartner Scania bzgl. der elektrischen Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Pantograph gewonnen werden. Die in den AP 1.2 und AP 1.3 untersuchten Technologien zur Vermessung der Oberleitungsanlage bzw. der Signalübertragung über eben jene haben ihre Parxistauglichkeit unter Beweis gestellt und könnten für zukünftige Anwendungsfälle eingesetzt werden. Besonderer FuE-Bedarf hat sich aus den Ergebnissen des AP 1.4 ergeben. Die sich aus den komplexen Umgebungsanforderungen der Autobahn einstellenden Belastungen der Oberfläche der Isolatoren sind auch fachübergreifend bislang unbekannt. Vor dem Hintergrund der in Zukunft zunehmenden Trassenbündelung von Freileitungsanlagen und Autobahnen hat das Thema jedoch auch für andere Technikdomänen als die Bahntechnik Relevanz, weswegen die Forschungspartner der TU Dresden und der FH Zittau sowie der Komponentenhersteller Siemens Energy hier weitere FuE-Projekte planen.

Hinsichtlich der Zukunftsaussichten des Gesamtsystems ergibt sich ein gemischtes Bild. Die für Deutschland bzw. Schweden geplanten größeren Pilotanlagen (DE: „Innovationskorridore“ bzw. SE: „ERS Piloten“) wurden aus verschiedenen wirtschaftlichen sowie politischen Gründen gestoppt mit derzeit unklarer Perspektive auf Weiterverfolgung. Entsprechend sind bei der SMO weitere Entwicklungsarbeiten an den Komponenten für eine eHighway-Anwendung gestoppt. Somit ergibt sich für diesen Anwendungsfall ab dem nächsten Kalenderjahr kein weiterer F&E-Bedarf. Die Ergebnisse sind aber bei Änderung der Marktlage kurzfristig wiederverwendbar. Allerdings ist es gelungen das eHighway System in verschiedenen nationalen und internationalen technischen Standards zu verankern, was einen grenzüberschreitenden, interoperablen Betrieb in Zukunft ermöglichen würde. Darüber hinaus wird beispielsweise die zentrale Systemkomponente des zweipoligen Pantographen im Einsatz bei Sonderanwendungen abseits des eHighway (konkret beim Thema Mining) weiter gepflegt. Zusätzlich besteht aus China starkes Interesse eine größere eHighway Anlage (>1 000 km) zu realisieren und auch aus den Niederlanden sind konkrete Bestrebungen bekannt verschiedene Frachtkorridore mit der eHighway Technologie auszustatten.

7 BEITRAG ZU DEN FÖRDERPOLITISCHEN ZIELEN DES BUNDES-MINISTERIUMS FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT (BMUB)

Das Projekt FeSH2b wurde durch das BMUB im Rahmen des Förderprogrammes Erneuerbar Mobil5 gefördert. Die Förderinitiative fokussiert auf Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, die die energie- und klimapolitischen Potenziale der Elektromobilität erschließen und gleichzeitig zur Stärkung der Wettbewerbsposition deutscher Industriebranchen beitragen. Ein Schwerpunkt liegt auf „Feldversuchen in ausgewählten Fahrzeugsegmenten und Anwendungsbereichen“. Diesem Schwerpunkt wird FeSH2b durch die Erprobung des Systems eHighway voll gerecht. Die Integration von Eisenbahninfrastruktur in den Straßenverkehrsraum und die gleichzeitige Kombination von schwerer Straßenfahrzeugtechnik mit neu entwickelten Stromabnehmersystemen bieten in Summe viele Synergiepotentiale, um den schweren Straßengüterverkehr mittelfristig und ökonomisch zu decarbonisieren. Weitere Vorteile bietet der Ansatz den Oberleitungs-Lkw nicht als Fahrzeug- oder Energieversorgungs- sondern als Gesamtsystem zu erproben und weiterzuentwickeln. Durch diesen gesamtlichen Ansatz wird die Integrationsfähigkeit in das bereits bestehende System Straßenverkehrstechnik zusätzlich erhöht.

Allgemein ist selbst mit dem geänderten Umfang des Förderprojekts der Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des BMUB weiterhin gegeben. Die im Rahmen dieses Förderprojekts weiterentwickelten Techniken stehen einer weiteren Anwendung der eHighway-Technologie bei einem zukünftigen Einsatz zur Verfügung, und sind abrufbar archiviert. Sollte sich aus dem Klimaschutzprogramm der Bundesregierung die Anwendung eHighway als wichtiger Zusatzbaustein zur Reduktion der verkehrlich bedingten Emissionen ergeben, kann dieser ohne lange Vorlaufzeit effizient zum Einsatz kommen. Nach wie vor liegt mit der eHighway-Technik eine einfache Lösung vor, bei hoher nationaler Wertschöpfung, im Rahmen der gemeinsamen Initiativen zur Elektromobilität, schnell entsprechende Anwendungen im Bereich Elektrotraktion und Ladung umzusetzen.

Nachdem es nach wie vor weltweit keine in diesem Bereich so weit entwickelte Lösung für die OL-gebundene Elektrotraktion auf Straßen gibt, handelt es sich bei der hier beschriebenen eHighway-Anwendung um ein Technologiefeld in welchem Europa eine Vorreiterrolle einnehmen kann.

Die förderpolitischen Ziele wurden somit auf den verschiedenen Ebenen Anwendungsfall (Elektromobilität), Wettbewerbsfähigkeit (Produkt) und Innovation (im Verbund mit den Partnern aus Wirtschaft und Forschung) vollumfänglich erreicht. Es bedarf nur einer Fortsetzung in einem entsprechend geförderten Rahmen (Entscheidungsfindung, politische Weichenstellungen).

⁵ <https://www.erneuerbar-mobil.de/foerderprogramme/das-foerderprogramm-erneuerbar-mobil>

8 DARSTELLUNG DER ERFOLGTEN ODER GEPLANTEN VERÖFFENTLICHUNG DES ERGEBNISSES

Die Projektergebnisse wurden in den folgenden Konferenzen bzw. Fachbeiträgen teilweise bereits veröffentlicht:

- *Elektrische Straßensysteme – Sicherstellung der Interoperabilität durch Normierungsaktivitäten*; Staub, M.; Lehmann, M.; in eb – Elektrische Bahnen 8 (2022)
Zusätzlich: gleichlautender Vortrag auf: DC rail power supply (DCRPS) 2022, Leipzig.
- *DC-Elektrifizierung von Autobahnen – Einblicke in die Begleitforschung des Feldversuchs FeSH*; Stephan, A.; Werner, M.; Schiebel, M.; in eb – Elektrische Bahnen 1-2 (2024).
Zusätzlich: gleichlautender Vortrag auf: DC rail power supply (DCRPS) 2022, Leipzig.
- *eHighway – Aktualisiertes Systemdesign des dynamischen Ladens im StraßengüterverkehrH*; Staub, M.; in eb – Elektrische Bahnen 7 (2024).
Zusätzlich: gleichlautender Vortrag auf: DC rail power supply (DCRPS) 2024, Leipzig.
- *Autobahnen unter (Gleich-) Strom – Was kommt auf uns zu?*; Stephan, A.; Werner, M.; Schiebel, M.; in eb – Elektrische Bahnen 7 (2024).
Zusätzlich: gleichlautender Vortrag auf: DC rail power supply (DCRPS) 2024, Leipzig.
- *Ableitstrommessung an Silikonverbundisolatoren im Feldversuch eHighway Schleswig-Holstein*; Schiebel, M.; Staub, M.; Vortrag auf 3. Fachtagung polymere Isolierstoffe in der Elektrotechnik; 2024; Zittau.
- *Von der Bahn zur Autobahn – Technologietransfer Oberleitung*; Schiebel, M.; Werner, M.; Vortrag auf 6. ÖVG-Kongress Fahrstromanlagen; 2024; Wien (AT).

Darüberhinaus gehende Veröffentlichungen sind derzeit nicht geplant.

9 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abkürzung	Bedeutung
AP	Arbeitspaket / Arbeitsschwerpunkt
BAB	Bundesautobahn
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
DIN	Deutsches Institut für Normung
DTC	Digital Track Capturing
ELANO	Elektrisch angetriebene Nutzfahrzeuge an Oberleitungen
ENUBA	Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen
FeSH	Feldversuch eHighway in Schleswig-Holstein
FH	Fachhochschule
FL	Fahrleitung, siehe auch OL
FuE	Forschung und Entwicklung
GNSS	Global Navigation Satellite System
GuR	Gefahren und Risiko
IGBT	Insulated Gate Bi-Polar Transistor
KPI	Key Performance Indicators
LF	Low Frequency
Lkw	Lastkraftwagen
MELUND	Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitales des Landes Schleswig-Holstein
MWATT	Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Arbeit, Technologie und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein
OH-Lkw	Oberleitungshybrid-Lkw
OL(A)	Oberleitung-(sanlage)
OL-Lkw	Oberleitungs-Lkw
PAN	Pantograph
SMO	Siemens Mobility GmbH
TU	Technische Universität
(VA) GD	(Siemens eHighway Versuchsanlage) in Groß Dölln

Abbildung 1 Nutzung der Oberleitung über den Projektverlauf	7
Abbildung 2 Auswertung Nutzungsgrad der Oberleitung zu Projekt Beginn versus Ende der Projektlaufzeit.....	8
Abbildung 3 Mittlere Verfügbarkeit über alle Pantographen während der gesamten Testphase	10
Abbildung 4 - DTC Befahrung auf der Versuchsanlage Groß Dölln	11
Abbildung 5 - Messmetrik der DTC Auswertung.....	12
Abbildung 6 - Vergleich der Fahrdrathhöhen - Auszug aus dem DTC Report	12
Abbildung 7 - Übersichtstabelle der Alarm- und Hinweismeldungen.....	13
Abbildung 8 - Drossel und Ankoppeleinheit im Unterwerk	15
Abbildung 9 - Abschlusselement mit 330 Ohm-Widerstand und HV-Kondensator mit Bleeder- Widerstand	15
Abbildung 10 - Blockschaltbild der LF-Signalerzeugung	16
Abbildung 11 - Blockschaltbild des LF-Signalempfängers	16
Abbildung 12 - Konstellationsdiagramm und dekodierte Bitfolge des 10 kbit/s-BPSK-Signals nach Übertragung in Groß Dölln	16
Abbildung 13 - Konzept zur Signal-Einkopplung und zum Leitungsabschluss, Quelle des Planes: FuE Zentrum FH Kiel	17
Abbildung 14 - Installierte Abschlusselemente im FeSH-Testfeld.....	17
Abbildung 15 - Signalgenerator (Red Pitaya SDR), Verstärker, Ankoppeleinheit, Koppelkondensatoren und Drosselspule im Unterwerk	18
Abbildung 16 - Ansicht der auf dem Trailer temporär angebrachten Neosid 3D-Spule	19
Abbildung 17 - Ansicht der Eisenbahnbrücke mit Deckenstromschiene	19
Abbildung 18 - Leerfahrt RiFa HH ohne Leistung.....	20
Abbildung 19 - Fahrt mit RiFa HH, ohne Leistungsübertragung.....	21
Abbildung 20 - Fahrt in RiFa HH mit Leistungsübertragung.....	21
Abbildung 21 - Fahrt in Richtung HL.....	22
Abbildung 22 Codierung der Isolatorpositionen am Ausleger	25
Abbildung 23 Anschluss der Referenzisolatoren an die Fahrleitungsspannung und Schelle zum Abgriff des Ableitstromes.....	26
Abbildung 24 Erweitertes Messsystems an Messstandort Mast 46-18	27
Abbildung 25 Fahrbahnsensoren zur Messung des Salzgehaltes des Flüssigkeitsfilms	27
Abbildung 26 ZBDK der Ableitströme im Auswertungszeitraum Winter 22/23.....	29
Abbildung 27 ZFH der Ableitströme im Auswertungszeitraum Winter 22/23	30
Abbildung 28 Vergleich der Temperaturverteilung im Auswertungszeitraum Winter 22/23	30
Abbildung 29 Vergleich der Niederschlagsverteilung im Auswertungszeitraum Winter 22/23	31
Abbildung 30 Zeitlicher Verlauf von Ableitstrom, Niederschlag und Streumitteleinsatz	31
Abbildung 31 Hydrophobieigenschaften eines Referenzisolators in Abhängigkeit der Fahrtrichtung	32
Abbildung 32 - Wirkleistung und Total Harmonic Distortion Faktor der Spannung (THDu) im NAP, Quelle: FH Kiel	37
Abbildung 33 - Wirkleistung und Total Harmonic Distortion Factor des Stroms (THDia) im NAP.....	37