

ABLEITSTROMMESSUNG AN SILIKON-VERBUNDISOLATOREN IM FELDVERSUCH EHIGHWAY SCHLESWIG-HOLSTEIN

Markus Schiebel

Technische Universität Dresden, 01062 Dresden

Markus Werner

Technische Universität Dresden, 01062 Dresden

Markus Staub

Siemens Mobility GmbH, Siemenspromenade 6, 91058 Erlangen

Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan

Technische Universität Dresden, 01062 Dresden

Im Rahmen des Feldversuchs eHighway Schleswig-Holstein (FeSH) wurde an einer Oberleitungsanlage für elektrische LKWs beobachtet, dass sich auf Grund des witterungsbedingten Streumittelansatzes eine salzhaltige Fremdschicht auf den Anlagenisolatoren bildet, welche Kriechströme zur Folge hat. Um die auftretenden Ströme messtechnisch zu erfassen, wurde durch die Technische Universität Dresden und die Siemens Mobility GmbH ein dauerhaftes Messsystem entwickelt und an zwei Standorten in der Anlage installiert. Neben dem Aufbau des Messsystems sollen die angewandte Auswertemethodik und erste Ergebnisse aus den laufenden Untersuchungen dargestellt werden.

1. Einleitung

1.1. Projekthintergrund

Der Feldversuch eHighway Schleswig-Holstein ist ein Forschungsprojekt zur Erprobung einer zweipoligen DC-Oberleitungsanlage entlang der Autobahn zur kontinuierlichen Energieversorgung und Ladung elektrischer LKWs mit Traktionsenergiespeichern. Die Energieversorgung erfolgt über Unterwerke, welche an das Mittelspannungsnetz angebunden werden (vgl. Abbildung 1). Da im Gegensatz zu Bahnanwendungen die Schiene als elektrischer Rückleiter entfällt, sind sowohl Hin- als auch Rückleiter als getrennte Kettenwerke in der Oberleitungsanlage ausgeführt. Die Oberleitungsanlage wird derzeit mit einer Nennspannung von DC 600 V gemäß EN 50163 betrieben. Der Rückleiter wird punktuell an den Unterwerken geerdet. Die Fahrzeuge besitzen Stromabnehmer mit zwei voneinander isolierten Wippen, welche über Schleifleisten den Fahrdrabt kontaktieren. Entwickelt wurde das System von der Siemens Mobility GmbH.

Für die Begleitforschung des Feldversuchs an der Autobahn A1 zwischen Reinfeld und Lübeck wurde ein Konsortium aus Forschungs- und Entwicklungszentrum der Fachhochschule Kiel, Friedrich Schiller Universität Jena, Fachhoch-

schule Kiel, Hochschule Heilbronn, Avi EC Research, Siemens Mobility GmbH und der Technischen Universität Dresden gebildet. Am 01.02.2019 startete das Forschungsprojekt mit einer verlängerten Laufzeit bis 31.12.2024.

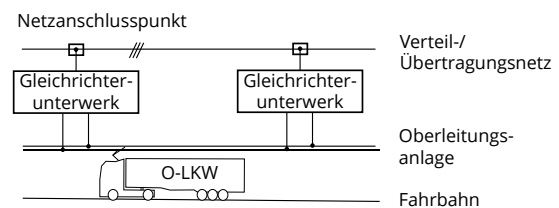


Abbildung 1 Aufbau der elektrischen Infrastruktur des Systems eHighway

1.2. Ausgangslage

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 50124-1 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.

1.3. Zielsetzung

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:

- Isolator typ und -eigenschaften
- Einbauposition und -richtung in Relation zu den Fahrspuren
- Witterungsbedingungen
- Streumiteleinsetz
- 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. Im Fachartikel werden das Messsystem sowie erste Messergebnisse dargestellt.

2. Aufbau des Messsystems

2.1. Anforderungen an die Messung

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

- Untersuchung/ Beurteilung von unterschiedlichen Referenzisolator typen in verschiedenen Einbaupositionen und -richtungen
- Messung des Ableitstromes über der Isolatoroberfläche mit einer Genauigkeit $< 1 \text{ mA}$

- 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 Aufzeichnung mit erhöhter Abtastrate der Strom- und Spannungsmessung
- Datenübertragung und Fernüberwachung des Messsystems

2.2. Messstandorte

Die Messsysteme wurden am Ausleger der bestehenden Oberleitungsanlage installiert (vgl. Abbildung 2). Für die Wahl der Standorte wurden die Kriterien Entwässerung und Windeinwirkung als Einflussgrößen auf die Ausbildung der Sprühfahne 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 mit einem Kriechweg von 305 mm und zwei 15 kV Verbundisolatoren mit einem Kriechweg von 570 mm ausgewählt. Die Isolatoren sind als Glattschirmprofil ausgeführt. Die Schirmhülle besteht aus HTV-Silikon. Für die Installation der Isolatoren und der Messtechnik wurde am Auslegerarm eine zusätzliche Hängesäule montiert. Die Positionen und deren Abkürzungen sind in Abbildung 2 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	Isolator typ

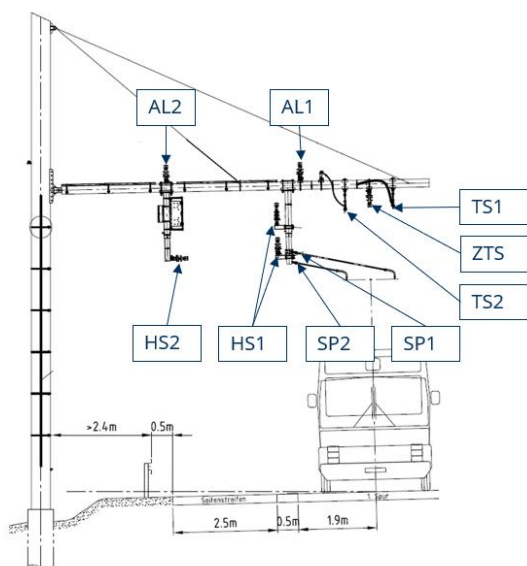


Abbildung 2 Codierung der Isolatorpositionen am Ausleger

Tabelle 2 Codierung des Isolortyps und der Einbau- richtung

Abkürzung Isolortyp	Beschreibung
H03	3 kV hängend
L03	3 kV liegend
S03	3 kV stehend
L15	liegend 15 kV
S15	stehend 15kV

In Abbildung 3 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 3 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 Messwertaufzeichnung mit erhöhter Abtastrate (1 kHz) erfolgt bei Überschreitung eines Stromgrenzwertes. Gesteuert wird die Messung über einen Mess-PC und die Software Labview.

2.3. 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 4 Erweitertes Messsystem an Messstandort Mast 46-18



Abbildung 5 Fahrbahnsensoren zur Messung des Salzgehaltes des Flüssigkeitsfilms

3. Auswertungsmethodik

3.1. Klassifizierung der Kriechströme

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

Tabelle 3 Klassifizierung der Kriechströme I

#	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.

3.2. Auswertung der Ableitstrombelastung und der Auftrittswahrscheinlichkeit

Zusätzlich zur Betrachtung des Zeitverlaufes der Messgrößen wurden statistische Auswertungsverfahren angewendet. Neben den allgemein

bekanntesten Methoden, beispielsweise der Erstellung von Verteilungen sowie der Bestimmung von Min-, Max-, Mittelwerten, wurden die Verfahren der zeitgewichteten Belastungsdauerkurve (ZBDK) und der 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 pro Zeitfenster über der Zeitfensterdauer. Eine detaillierte Beschreibung der ZBDK findet sich in [2]. Das Verfahren ermöglichte es, 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.

3.3. Zustandserfassung der Isolatoroberfläche und Fremdschichtbildung

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. Überschlüge unter-

sucht. Zudem sollen nach Abschluss der Messungen NSDD^a- und ESDD^b 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 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]

4. Erste Ergebnisse Winter 2022/23

4.1. Allgemeines

Für die weitere Auswertung wurden vier der insgesamt 18 Referenzisolatoren an beiden Standorten (ST) ausgewählt, um die gewonnen Erkenntnisse exemplarisch darzustellen.

Tabelle 4 Übersicht über die in der Auswertung betrachteten Referenzisolatoren

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

4.2. Ergebnisse der ZBDK und ZFH

Die Ergebnisse der ZBDK (vgl. Abbildung 6) 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).

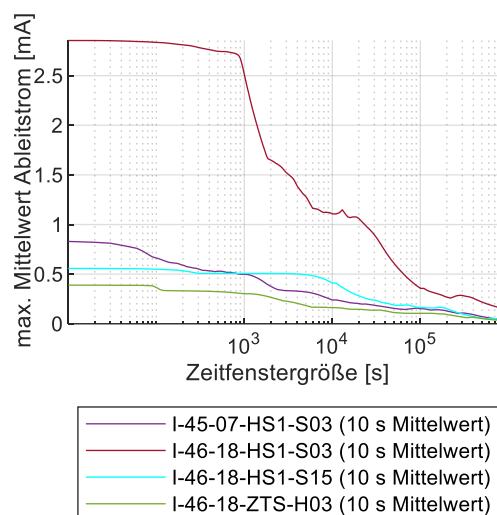


Abbildung 6 ZBDK der Ableitströme im Auswertungszeitraum Winter 22/23

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 Isolatortyp als auch die Einbauposition und -richtung einen signifikanten Einfluss auf die Höhe, Dauer und Auftretswahrscheinlichkeit der Ableitströme in verschiedenen Zeitbereichen haben.

^a Non-soluble deposit density – dt. Dichte nicht-löslicher Ablagerungen

^b Equivalent salt deposit density – dt. äquivalente Dichte der Salzablagerungen

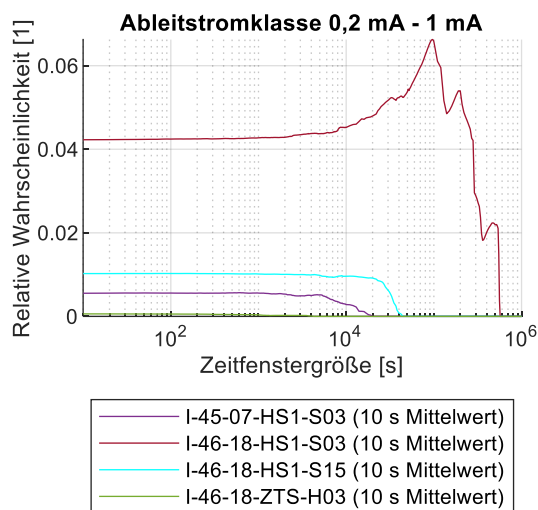


Abbildung 7 ZFH der Ableitströme im Auswertungszeitraum Winter 22/23

4.3. Einfluss der Witterung und des Streumiteleinsatzes

Über eine Wetterstation an der Versuchsstrecke konnte 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.

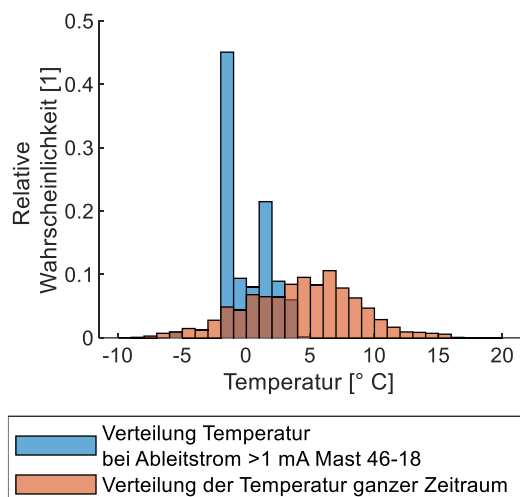


Abbildung 8 Vergleich der Temperaturverteilung im Auswertungszeitraum Winter 22/23

Bei der Auswertung der vorherrschenden Niederschlagsereignisse gemäß SYNOP-Code ergab sich eine größere Auftrittswahrscheinlichkeit von Ableitströmen bei leichtem Schneefall

und anderen Niederschlagsereignissen. Dahingegen ist bei keinem Niederschlag die Wahrscheinlichkeit für Ableitströme größer 1 mA geringer.

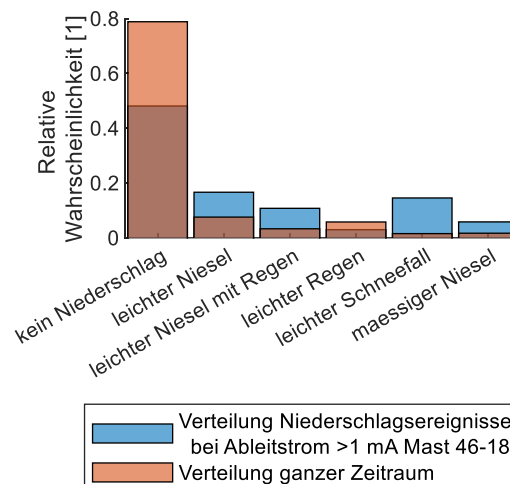


Abbildung 9 Vergleich der Niederschlagsverteilung im Auswertungszeitraum Winter 22/23

Nach Ende des Winters wurde von der dort ansässigen Autobahnmeisterei der Bericht über den Streumiteleinsatz 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 10 ist dieser Zusammenhang zwischen Niederschlag und Streumiteleinsatz (hier Sole 30/70^c) dargestellt. Weiterer Niederschlag kann zudem dazu führen, dass die salzhaltige Schicht auf den Isolatoren wieder abgewaschen wird und der Ableitstrom absinkt.

^c Auch als „Feuchtsalz 30“ bezeichnet. Mischungsverhältnis beträgt 70 Massenprozent Auftausalz und 30 Massenprozent Sole.

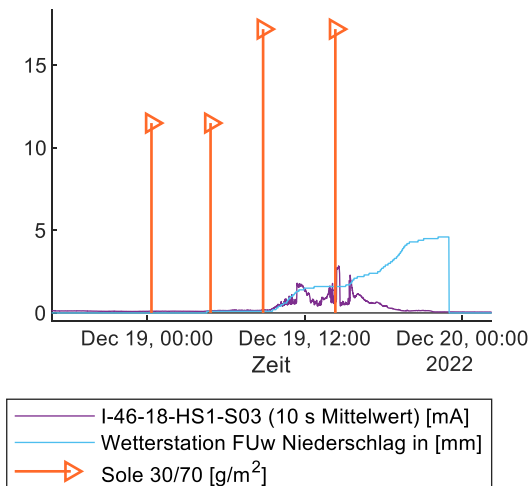


Abbildung 10 Zeitlicher Verlauf von Ableitstrom, Niederschlag und Streumitteleinsetzung

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

4.4. Ergebnisse der Isolatorzustandserfassung

Die Zustandserfassung der Isolatoren erfolgte in den Inspektionswochen im März 2023 und September 2023. Somit kann der Zustand nach der Jahreszeit Winter mit Streumitteleinsetzung und dem Frühling sowie Sommer unterschieden werden. Grundlegend konnten keine Anzeichen für Punktierungen oder 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 Sprühhichtung. 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 Hydrophobieklasse 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. Ledig-

lich die Isolatoren, welche liegend in Fahrtrichtung montiert sind, wiesen weiterhin gute Hydrophobieigenschaften auf. Es wird vermutet, dass die Sprühhichtung sich in Fahrtrichtung auf Grund des Fahrwindes bewegt und es so zu einer einseitig stärkeren Verschmutzung der Isolatoroberfläche 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 Transfer-eigenschaften des Isolatorwerkstoffes erkennbar.



Abbildung 11 Hydrophobieigenschaften eines Referenzisolators in Abhängigkeit der Fahrtrichtung

5. Fazit

Die ersten Zwischenergebnisse der laufenden Messungen zeigen, dass die durch die Fahrzeuge der Autobahn aufgewirbelte Sprühhichtung bei Niederschlag und Streumitteleinsetzung 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 Isolator-typ. 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. Vor allem die in Kapitel 2.3 beschriebene Erweiterung des Messsystems wird hierfür wichtige grundlegende Erkenntnisse liefern, um den Zusammenhang zwischen der Salzkonzentration des Flüssigkeitsfilms auf der Fahrbahn und den an den Isolatoren auftretenden Ableitströmen zu untersuchen. Aus den Ergebnissen könnte ein spezieller Salznebelversuch entwickelt werden, welcher die Randbedingungen im Nahbereich von Autobahnen widerspiegelt. Entsprechend stellen die im Artikel vorgestellten Ergebnisse einen ersten Zwischenstand dar.

6. Literaturverzeichnis

- [1] P. D.-I. R. Bärsch, „Polymere Isolier- und Funktionswerkstoffe für Hochspannungsisolatoren und Kabelgarnituren – Beanspruchungen, anwendungsspezifische Eigenschaften und Prüfverfahren,“ *RCC-Fachtagung, Tagungsband*, 2009.
- [2] P. D.-I. habil. Gerhard Hofmann und D.-I. S. Röhlig, „Zeitgewichtete Belastungsdauerkurve bei elektrischen Bahnen,“ *Elektrische Bahnen eb*, 1997.
- [3] C. Denner, *Sensitivitätsanalyse für die Begrenzung der Leistungsanforderungen von Antriebskomponenten im Bereich Powertrain und E-Drive*, 2016.
- [4] *DIN IEC/TS 60815-1 VDE V 0674-256-1:2021-01 Auswahl und Bemessung von Hochspannungsisolatoren für die Anwendung unter Verschmutzungsbedingungen*, 2021.
- [5] *DIN IEC/TS 62073 VDE V 0674-276:2016-11 Anleitung zur Messung der Hydrophobie von Isolatoroberflächen*, 2016.