

Prognose der Zustandsentwicklung von Oberleitungsanlagen

Datenanalyse zur Entwicklung eines möglichen Prognoseansatzes für die Zustandsentwicklung von Oberleitungsanlagen

LEONIE MEINERZHAGEN | FELIX LAMPE |
CHRISTOPHER WINK | BJÖRN DICKENBROK |
NILS NIESSEN

Für Eisenbahninfrastrukturunternehmen wie die DB InfraGO AG (DB) besteht die Herausforderung darin, die Infrastruktur in einem qualitativ hochwertigen Zustand zu erhalten oder diesen zu verbessern [1]. Um die Entwicklung dieses Zustands und die Auswirkungen von Erneuerungs- oder Instandhaltungsmaßnahmen zu bewerten, sind Prognosemodelle essenziell. Vor diesem Hintergrund wurde das Verkehrswissenschaftliche Institut der RWTH Aachen (VIA) von der DB beauftragt, die für die Oberleitungsanlagen vorhandenen Daten zu analysieren und Ansätze für ein mögliches Prognosemodell zu entwickeln.

Netzzustandsnote und Ursache-Wirkung-Zusammenhang

Um den Zustand des Schienennetzes gesamtweit zu bewerten und zu veranschaulichen, wurde von der DB die Netzzustandsnotenlogik entwickelt. Diese bezieht die qualitativen Zustandsmerkmale nahezu aller Einzelanlagen der Schieneninfrastruktur ein. Dabei werden die Anlagentypen der Gleise, Weichen, Brücken, Tunnel, Stützbauwerke, Stellwerke, Bahnübergänge und Oberleitungsanlagen betrachtet [2]. Mit Ausnahme der Oberleitungsanlagen wurden für die Leitgrößen der oben genannten Anlagentypen vom VIA im Auftrag der DB bereits entsprechende Prognosemodelle erarbeitet [3, 4, 5, 6]. Diese wurden zur Erstellung eines Ursache-Wirkung-Zusammenhangs entwickelt, der den Zusammenhang zwischen eingesetzten Finanzmitteln für Ersatzinvestitionen und Instandhaltungsmaßnahmen und der damit erzielbaren Infrastrukturqualität aufzeigt, bilden aber genauso die Grundlage für eine Prognose der Netzzustandsnote [7]. Mit dem Ziel, diese Prognose auch für den noch ausstehenden Anlagentyp der Oberleitungen zu ermöglichen, werden die bei der DB vorhandenen Stammdaten und Zustandsdaten analysiert und Ansätze für ein mögliches Prognosemodell vorgestellt.

Datengrundlage

Die Oberleitungsanlagen bestehen aus verschiedenen baulichen und technischen

Komponenten. Für die vorliegenden Untersuchungen sind die Oberleitungsmasten und die Nachspannlängen relevant. Als Nachspannlängen werden die Oberleitungsverbindungen bezeichnet, sie entsprechen also dem Fahrdrabt. Dabei unterscheidet sich die Länge des Fahrdrabts aufgrund der Nachspannung am Übergang verschiedener Drahtabschnitte von der Länge der darunterliegenden Gleise. Zu den jeweiligen Masten und Nachspannlängen stehen aus dem SAP-System der DB eine Vielzahl verschiedener Stammdaten wie beispielsweise das Alter oder die Streckennummer zur Verfügung. Hinzukommen Zustandsdaten, die entweder den Masten oder den Nachspannlängen zugeordnet sind. Der Untersuchung der Oberleitungsanlagen liegen Daten aus den Jahren 2015 bis 2022 zugrunde.

Für die Analyse möglicher Zustandsprognosen sind besonders die Daten zu Zustandsbewertungen und sogenannte Meldungen relevant. Unter Meldungen sind im diesem Zusammenhang Störmeldungen, Befundmeldungen oder Kurzschlussmeldungen zu verstehen. Diese gehen von der jeweiligen Anlage aus und sind auf unterschiedlichste Ursachen zurückzuführen. Beispiele hierfür sind Kurzschlüsse, die durch Vögel verursacht werden, Probleme durch Verschmutzung oder Vegetation, menschliches Fehlverhalten und Materialermüdung oder Verschleiß. Störmeldungen, Befundmeldungen und Kurzschlussmeldungen werden im Nachfolgenden übergeordnet als Systemmeldungen bezeichnet, wurden aber im Rahmen der Analyse unabhängig voneinander untersucht. Zustandsbewertungen sind für die Mastfundamente und für Betonmaste in den SAP-Stammdaten hinterlegt. Die Bewertung findet bei der DB im Rahmen einer regelwerkskonformen Zustandsprüfung statt, bei der die Mastfundamente oder Betonmasten auf Schäden zu prüfen sind. Anschließend werden die Mastfundamente in eine Schadensstufe von null (keine Schäden) bis drei (schwere Schäden) und die Betonmasten in eine Schadensklasse von eins (keine Schäden) bis vier (schwere Schäden) eingestuft [8].

Zur Überprüfung des Fahrdrabts wird die Fahrdrabtdicke in regelmäßigen Abständen gemessen und im integrierten Instandhaltungssystem der DB dokumentiert. Diese Messungen werden für die vorliegenden Aus-

wertungen herangezogen. Dabei wird von einer Betrachtung der genauen Fahrdrabtlage in Bezug auf das Gleis abgesehen, um verschiedene Effekte unabhängig voneinander zu betrachten. Ein Messpunkt beschreibt jeweils die Dicke in Millimetern eines Fahrdrabtes für einen bis zu 25 m langen Abschnitt einer Nachspannlänge. Dabei wird nicht jeder Messpunkt jährlich gemessen, sodass je nach Jahr die Fahrdrabtdicken unterschiedlicher Messpunkte vorliegen.

Insgesamt werden acht verschiedene Bauformen des Fahrdrabts von Oberleitungen unterschieden. Diese unterscheiden sich in den für den Fahrdrabt verwendeten Materialien sowie vor allem im Querschnitt des Fahrdrabts. Da 94,7 % der Messungen sich auf den Fahrdrabt mit dem Nennquerschnitt 100 mm², was einer Nenndicke von 12 mm entspricht, beziehen, werden die Auswertungen zur Fahrdrabtdicke für diese Bauform vorgestellt. Allen Auswertungen geht eine ausführliche Datenaufbereitung voraus.

Hypothesen & Methoden

Um die Basis für ein Prognosemodell für die Entwicklung der Oberleitungsanlagen zu erarbeiten, werden zwei Metriken verwendet. Generelle Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Kennzahlen werden zunächst mittels des „Predictive Power Score“ (PPS) untersucht. Der PPS liefert einen Wert zwischen 0 und 1, wobei ein höherer Wert einer besseren Korrelation entspricht [9]. Zusätzlich werden ausgewählte Kennzahlen mittels statistischer Korrelation untersucht, um einen möglichen linearen Zusammenhang zwischen zwei Variablen zu quantifizieren.

Die Vermutung liegt nahe, dass mit zunehmendem Alter der Anlagenzustand schlechter wird und die Fahrdrabtdicke aufgrund von bspw. Korrosion abnimmt. Hinzu kommt, dass der Pantograph zur Stromversorgung der Züge während der Fahrt dauerhaft mit einem gewissen Anpressdruck an der Oberleitung entlang gleitet, sodass davon auszugehen ist, dass die Fahrdrabtdicke mit der Anzahl an Zugfahrten abnimmt. Dementsprechend stehen bei der vorliegenden Untersuchung die folgenden Hypothesen im Fokus:

1. Störmeldungen, Befundmeldungen und/oder Kurzschlussmeldungen nehmen mit zunehmendem Anlagenalter und/oder geringerer Fahrdrabtdicke zu.

2. Die Schadenseinstufung von Mastfundament und/oder Betonmast wird mit zunehmendem Anlagenalter schlechter.
3. Die Fahrdradtdicke nimmt mit der Anzahl der Zugfahrten ab.
4. Die Fahrdradtdicke nimmt mit dem Anlagenalter ab.

Um Hypothese 4, die Veränderung der Fahrdradtdicke in Abhängigkeit vom Anlagenalter, zu untersuchen, werden zusätzlich Zeitreihenmessungen ausgewertet. Dafür werden Messreihen der Fahrdradtdicke aus verschiedenen Jahren für die jeweiligen Strecken miteinander verglichen.

Ergebnisse

Auswertung Hypothese 1

Eine Abhängigkeit der Anzahl von Systemmeldungen vom Anlagenalter oder der Fahrdradtdicke kann auf Basis der vorhandenen Daten nicht nachgewiesen werden. Weder für Störmeldungen noch für Befundmeldungen oder Kurzschlussmeldungen lässt sich ein eindeutiger Zusammenhang erkennen. Die Untersuchung der Korrelation aller numerischer Eingangsfelder zu der Anzahl der jeweiligen Systemmeldung mittels PPS lie-

fert keinen ausgeprägten Zusammenhang. Auch im Rahmen der statistischen Korrelation ist kein Zusammenhang zwischen der Anzahl der jeweiligen Systemmeldung und dem Alter oder der Fahrdradtdicke erkennbar. Eine mögliche Ursache hierfür ist, dass Systemmeldungen häufig aufgrund zufälliger Einflüsse auftreten. Kurzschlussmeldungen sind beispielsweise fast ausschließlich auf zufällige Ereignisse wie den Kontakt mit Vögeln zurückzuführen.

Auswertung Hypothese 2

Auch die Auswertung der Schadenseinstufung von Mastfundament und Betonmast stellt keine gute Grundlage für ein Prognosemodell dar. Eine Untersuchung der Korrelationen aller numerischen Eingangsfelder zu der Schadensklasse Betonmaste mittels PPS liefert lediglich eine mittelstarke Korrelation zur Schadstufe des Mastfundaments und eine leichte Korrelation zu Feldern, die im Zusammenhang mit dem Anlagenalter stehen. Dies deutet darauf hin, dass Schäden am Fundament und Mast häufig gleichzeitig auftreten. Ein leichter Zusammenhang zwischen der Schadensklasse Betonmaste und dem Anlagenalter kann durch statis-

tische Korrelation bestätigt werden, allerdings nicht eindeutig genug, um auf dieser Basis ein Prognosemodell zu erstellen. Hinzu kommt, dass die Schadenseinstufung in den SAP-Stammdaten überschrieben wird, sobald neue Erkenntnisse vorliegen. Dementsprechend kann keine Historie der Zustandsentwicklung einzelner Anlagen untersucht werden.

Auswertung Hypothese 3

Um die Entwicklung der Fahrdradtdicke in Abhängigkeit von der Anzahl der Zugfahrten auszuwerten, werden die jährlichen Zugfahrten einer Strecke mit dem Anlagenalter multipliziert und wird ein Zusammenhang zwischen der Fahrdradtdicke und der Anzahl der Zugfahrten anschließend mittels statistischer Korrelation näher untersucht. Die Auswertung liefert allerdings unerwartet keine erkennbare Korrelation. Eine mögliche Ursache hierfür ist, dass das Material der Schleifleisten des Pantographen in der Regel weicher ist als das des Fahrdrachts. Daraus lässt sich schließen, dass die Verschleißerscheinungen in erster Linie den Stromabnehmer betreffen und nicht den Fahrdracht [10]. Dennoch ist dieses Ergebnis

HÖCHSTE EISENBAHN FÜR SPANNENDE AUFGABEN

Als Teil unseres Expertenteams für baubetriebliches Controlling bist du bei VÄTH & SCHMIDT maßgeblich an der erfolgreichen Umsetzung anspruchsvoller Bahnprojekte in unseren Büros in Stuttgart, Berlin, Bremen und Köln beteiligt.

Vielseitige Projekte:

Von Hochgeschwindigkeitsstrecken bis hin zu spektakulären Infrastrukturprojekten.

Spannende Tätigkeiten:

- Bauablaufanalysen
- Ingenieurdienstleistungen
- Nachtragsmanagement
- Bauzeitgutachten

Kontinuierliche Weiterentwicklung:

Wir fördern Deine berufliche Entwicklung und bieten Dir vielfältige Weiterbildungsmöglichkeiten sowie eine langfristige Perspektive.



VÄTH & SCHMIDT

Baubetriebliches Controlling



Entdecke jetzt Deine
Karrierechancen!

www.vaeth-schmidt.de



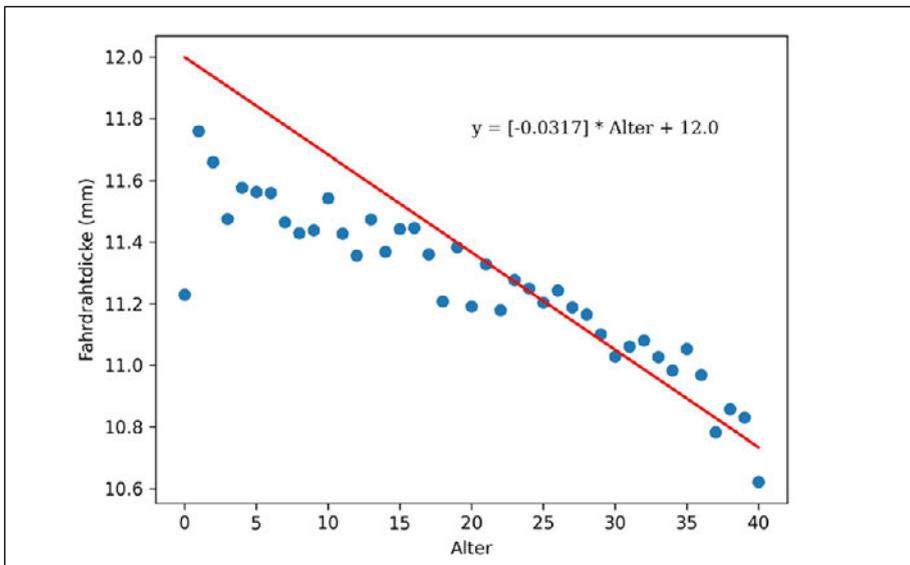


Abb. 1: Entwicklung der Fahrdrahtdicke in Abhängigkeit vom Fahrdrahtalter

kritisch zu hinterfragen. Aus der Auswertung der Fahrdrahtdicke in Abhängigkeit von der Anzahl der Zugfahrten können dementsprechend keine eindeutigen Rückschlüsse auf den Verschleiß des Fahrdrahts gezogen und kann somit auch kein datenbasierter Ansatz für eine aussagekräftige Prognose der Fahrdrahtdicke abgeleitet werden.

Auswertung Hypothese 4

Zur Untersuchung der Fahrdrahtdicke in Abhängigkeit vom Anlagenalter werden aufgrund der Datenbasis alle Anlagen bis zu einem Anlagenalter von 40 Jahren betrachtet. In Abb. 1 ist die Fahrdrahtdicke in Abhängigkeit vom Fahrdrahtalter aufgetragen. Mit einer Regression durch die einzelnen Messpunkte lässt sich der Zusammenhang anschaulich darstellen. Bei der Regression wird der Achsenabschnitt der Regression, also bei einem Alter von 0 Jahren, auf die Nenndicke fixiert. Für die gezeigte Regression in Abb. 1 wird aus Gründen der Übersichtlichkeit für jedes Alter eine durchschnittliche Fahrdrahtdicke gebildet und im Graphen aufgetragen. Es zeigt sich, dass der Verschleiß der Fahrdrahtdicke über das Alter linear modelliert werden kann. Auffällig ist jedoch, dass zu Beginn des Lebenszyklus die Nenndicke im Durchschnitt nicht erreicht wird. Eine mögliche Ursache hierfür ist die falsche Zuordnung der Bauart und der damit verbundenen Soll-Nenndicke in den Daten, sodass vereinzelt auch Fahrdrähte mit einer Nenndicke von 80 mm in die Berechnungen ein-

gehen. Die Abnutzungsrate des Fahrdrahtes kann anhand dieser Regression bestimmt werden und liegt im vorliegenden Fall bei 0,0317 mm pro Jahr.

In einem weiteren Schritt werden zur Untersuchung der Entwicklung der Fahrdrahtdicke in Abhängigkeit vom Alter die Messreihen aus verschiedenen Jahren miteinander verglichen. Für jeden Messpunkt wird dafür die Differenz der Fahrdrahtdicke (FD) zwischen zwei Messzeitpunkten ausgewertet. Um die Abnutzung pro Jahr (A) zu erhalten, wird diese Differenz anschließend durch die Differenz der Messjahre (MJ) dividiert. Die Berechnung ist in Formel (1) dargestellt, wobei i und j zwei unterschiedliche Jahre darstellen.

$$A = \frac{FD_i - FD_j}{MJ_i - MJ_j} \tag{1}$$

Durch Bildung des Medians aus diesen Ergebnissen lässt sich eine allgemeine jährliche Abnutzungsrate bestimmen. Der Median ist in diesem Fall besser geeignet als das arithmetische Mittel, da der Median Ausreißer weniger stark berücksichtigt. Über alle Differenzen wird so eine Abnutzungsrate von 0,0326 mm pro Jahr ermittelt.

Nach DB-Richtlinie 997.0149 soll ein Fahrdraht dann erneuert werden, wenn an mehr als fünf Messtellen einer Nachspannlänge eine Reduzierung des Querschnitts um mindestens 20 % erfolgt ist [11]. Hierfür sind bei der DB Fahrdrahtdicken festgelegt, ab de-

nen diese Abnutzung eintritt [12]. Anhand der berechneten Abnutzungsrate lässt sich die Zeit bis zur Erneuerung des Fahrdrahts somit prognostizieren. Ein Vergleich der aus den Daten abgeleiteten Abnutzungsrate des Fahrdrahtes sowie der modellhaften Zeitspanne bis zu einer Erneuerung des Fahrdrahtes auf Basis der Verschleißrate ist in Tab. 1 dargestellt.

Es zeigt sich, dass die Abnutzungsrate aus der Regression im Vergleich zu der Abnutzungsrate aus den Messreihen um lediglich 2,76 % abweicht. Beide Auswertungen resultieren in einem sehr ähnlichen Verhalten des Fahrdrahtes. Dementsprechend eignet sich eine Abnutzungsrate als Basis für ein Prognosemodell der Fahrdrahtdicke.

Räumliche Verschiebungen bei Messreihen

Die Untersuchungen zeigen, dass in den Daten der Messreihen, also bei der Betrachtung gleicher Streckenabschnitte über mehrere Jahre, räumliche Verschiebungen erkennbar sind. Diese sind bedingt durch Ungenauigkeiten der Wegmessung bei der Datenerhebung. Bei der Auswertung der Messreihen werden die Fahrdrahtdicken gleicher Kilometrierungen verglichen. Es kann jedoch aufgrund von Messungenauigkeiten zu Verschiebungen kommen, sodass trotz gleicher angegebener Kilometrierung nicht die exakt gleichen Örtlichkeiten miteinander verglichen werden. In Abb. 2 ist für einen beispielhaften Streckenabschnitt die Fahrdrahtdicke aus zwei Messreihen verschiedener Jahre über die Kilometrierung dargestellt. Eine Reduzierung dieser Verschiebung durch eine optimierte Datenerhebung oder eine automatisierte algorithmische Korrektur sollte angestrebt werden, um die Genauigkeit der vorgenommenen Auswertungen zu verbessern.

Fazit und Ausblick

Die umfassende Untersuchung der breiten Datenbasis zu den Oberleitungsanlagen zeigt, dass ein Prognosemodell für die Oberleitungsanlagen der DB derzeit lediglich für die Fahrdrahtdicke durch das Ansetzen einer jährlichen Abnutzungsrate hergeleitet werden kann. Für die anderen Kennzahlen der Oberleitungsanlagen kann in den Daten kein fachlich plausibles Abnutzungsverhalten modelliert werden.

Eine Abhängigkeit der Anzahl von Störmeldungen, Befundmeldungen oder Kurzschlussmeldungen vom Anlagenalter oder der Fahrdrahtdicke kann auf Basis der vorhandenen Daten nicht nachgewiesen werden. Die Auswertung der Schadenseinstufung von Mastfundament und Betonmast stellt ebenfalls keine gute Grundlage für ein Prognosemodell dar. Auch aus der Auswertung der Fahrdrahtdicke in Abhängigkeit von der Anzahl der Zugfahrten lässt sich un-

| Abnutzungsrate [mm/Jahr] | | Jahre bis Erneuerung [a] | |
|--------------------------|-----------|--------------------------|-----------|
| Regression | Messreihe | Regression | Messreihe |
| 0,0317 | 0,0326 | 88 | 85,6 |

Tab. 1: Vergleich der Abnutzungsraten unterschiedlicher Auswertungsansätze

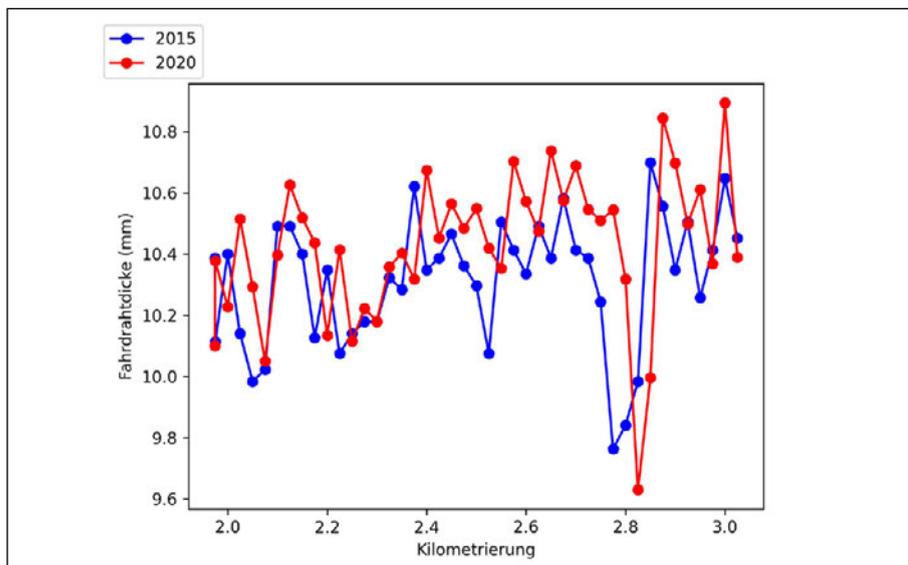


Abb. 2: Mögliche Phasenverschiebung am Beispiel einer Nachspannlänge

erwartet kein eindeutiger Zusammenhang erkennen. Dieses Ergebnis lässt sich teilweise darauf zurückführen, dass der Hauptverschleiß durch Abrieb den Pantographen betrifft und nicht den Fahrdrabt, dennoch ist es kritisch zu hinterfragen. Rückschlüsse auf den Verschleiß des Fahrdrabts können sehr gut anhand der Untersuchungen der Fahrdrabtdicke in Abhängigkeit vom Anlagenalter gezogen werden. Sowohl

anhand der Untersuchung mittels Regressions als auch durch die Auswertung von Zeitreihen kann eine jährliche Abnutzungsrate des Fahrdrabts bestimmt werden. Beide Methoden liefern hier sehr ähnliche Ergebnisse. Dementsprechend bietet die Prognose der Fahrdrabtdicke durch das Ansetzen einer jährlichen Abnutzungsrate einen geeigneten Ansatz für ein aussagekräftiges Modell zur Prognose des Zustands von Oberleitungen. ■

QUELLEN

- [1] Eisenbahn-Bundesamt: Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung III
- [2] Netzzustandsbericht Fahrweg 2022. <https://www.dbinfrago.com/resource/blob/12636182/e8fa5bda445e0d32ecf5d47623e2b5bd/Netzzustandsbericht-DB-InfraGO-AG-2022-data.pdf>, 05.04.2024 um 14:45
- [3] Wink, C.; Bluhm, S.; Emunds, T.; Dickenbrok, B.; Nießen, N.: Modellierung der Gleislage am Beispiel der Längshöhe für den Ursache-Wirkung-Zusammenhang. In: ETR - Eisenbahntechnische Rundschau 12/2021, S. 43 - 47
- [4] Emunds, T.; Wink, C.; Lempp, M.; Monem, K.; Dickenbrok, B.; Nießen, N.: Predicting interlocking malfunctions for the railway network in Germany. In: Transport Research Procedia 72 (2023), S. 2481 - 3488
- [5] Jacke, T.; Dickenbrok, B.; Friesen, N.; Grub, A.; Nießen, N.: Ursache-Wirkung-Zusammenhang: Zusammenhang zwischen Mitteleinsatz und Infrastrukturqualität abbilden. In: ETR - Eisenbahntechnische Rundschau 9/2019, S. 37 - 41
- [6] Jacke, T.; Dickenbrok, B.; Friesen, N.; Grub, A.; Nießen, N.: Ursache-Wirkung-Zusammenhang zwischen Mitteleinsatz und erzielter Infrastrukturqualität am Beispiel von Brücken. In: IRSA2019: Tagungsband, Proceedings: 2nd International Railway Symposium Aachen, 26.11.2019 - 28.11.2019, Aachen, Deutschland, S. 28 - 42
- [7] Wink, C.; Dickenbrok, B.; Lampe, F.; Lempp, M.; Meinerzhagen, L.; Hausberg, T.; Nießen, N.: Herstellen des Ursache-Wirkung-Zusammenhangs zwischen Mitteleinsatz und Netzzustandsnote. In: IRSA2023: Tagungsband, Proceedings: 4th International Railway Symposium Aachen, 22.11.2023 - 23.11.2023, Aachen, Deutschland, S. 618 - 631
- [8] Horstmann, S.: Oberleitungsanlagen. Exportiert am 05.07.2023, DB Netz AG
- [9] Wetschorek, F.: RIP correlation. Introducing the Predictive Power Score. <https://towardsdatascience.com/rip-correlation-introducing-the-predictive-power-score-3d90808b9598>, 05.04.2024 um 14:45
- [10] Deutzer, M.; Richter, T.: Systemuntersuchungen – Fahrleitung, Schleifleiste, Stromabnehmer. In: Wissenschaftliche Beiträge 1/1997, Technische Fachhochschule Wildenau, S. 14-19
- [11] Richtlinie 997.0149 | Oberleitungsanlagen instand halten Toleranzen, Grenzmaße und Korrosionsschutz: Version 4.1 - Gültig ab 01.11.2021, 997.0149, DB Netz AG
- [12] Deutsche Bahn AG Elektro und Maschinentechnik, „Abnutzung von Fahrdrähten 80 bis 120 mm“: Verwendbar für Regeloberleitungen der DB,“ Halle, Jun. 1998



Leonie Meinerzhagen, M.Sc.
Wissenschaftliche Mitarbeiterin
Verkehrswissenschaftliches Institut
RWTH Aachen, Aachen
meinerzhagen@via.rwth-aachen.de



Felix Lampe, M.Sc.
Experte Netzzustandsnote
DB InfraGO AG, Frankfurt a.M.
felix.lampe@deutschebahn.com



Christopher Wink, M.Sc.
Gruppenleiter
Eisenbahnbetriebswissenschaft
Verkehrswissenschaftliches Institut
RWTH Aachen, Aachen
wink@via.rwth-aachen.de



Dr.-Ing. Björn Dickenbrok
Leiter Infrastrukturzustandsbewertung
DB InfraGO AG, Frankfurt am Main
bjoern.dickenbrok@deutschebahn.com



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nils Nießen
Institutsleiter
Verkehrswissenschaftliches Institut
RWTH Aachen, Aachen
niessen@via.rwth-aachen.de

Technische und wirtschaftliche
Fachinformationen für
Bahn-Professionals



www.eurailpress.de

**JETZT
INFORMIEREN**