

Modellierung der Gleislage am Beispiel der Längshöhe für den Ursache-Wirkung-Zusammenhang

Die Eisenbahninfrastrukturunternehmen in Deutschland stehen vor der Herausforderung, die Zustandsentwicklung ihrer Infrastruktur modellhaft abzubilden, damit Instandhaltungs- und Erneuerungsbedarfe im Kontext der Infrastrukturqualität prognostiziert werden können. In diesem Artikel wird beschrieben, wie ein solches Modell für die Gleislage auf Basis der Längshöhenabweichung aufgestellt werden kann.



1. Einleitung

In der 3. Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung (LuFV III) wurde zwischen der Deutschen Bahn AG und dem Bund vereinbart, dass die Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) ihre Infrastruktur in einem qualitativ hochwertigen Zustand erhalten und diesen verbessern [1]. Dabei kommt der Fragestellung, welche Qualität die EIU mit den verfügbaren Finanzmitteln überhaupt erzielen können, eine besondere Bedeutung zu. Eine Lösung ist die Entwicklung geeigneter Modelle, mit denen der Ursache-Wirkung-Zusammenhang (UWZ) [2, 3] zwischen eingesetzten Finanzmitteln für Ersatzinvestitionen und Instandhaltungs-

maßnahmen sowie der damit erzielbaren Infrastrukturqualität abgebildet werden können, siehe Bild 1.

Um genau diesen UWZ beschreiben zu können, wurden vom Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen (VIA) im Auftrag der DB Netz AG in den letzten Jahren bereits Prognose- und Risikomodelle für die Anlagenklassen Gleise, Brücken, Stellwerke, Bahnübergänge und Weichen aufgestellt. Darüber hinaus wurde zur Berechnung das UWZ-Werkzeug als prototypische Software programmiert.

Im Netz eines EIU liegen verschiedene Anlagenklassen vor, deren momentane Qualität aufzunehmen, abzubilden sowie zu prognostizieren ist, um daraus entspre-



Christopher Wink, M. Sc.
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Verkehrswissenschaftliches
Institut der RWTH Aachen (VIA)
wink@via.rwth-aachen.de



Saskia Bluhm, M. Sc.
Wissenschaftliche Mitarbeiterin
Institut für Wirtschaftsinformatik
und Marketing am Karlsruher
Institut für Technologie
saskia.bluhm@kit.edu



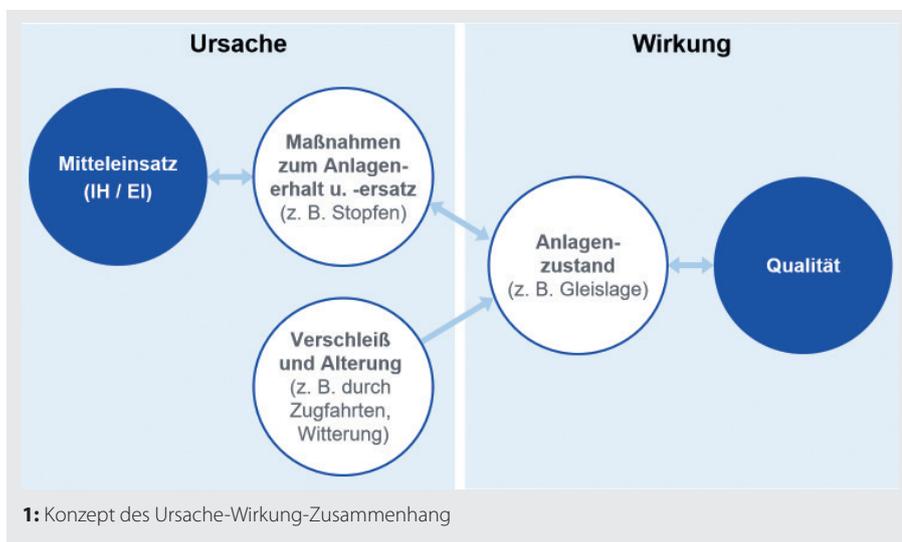
Tamme Emunds, M. Sc.
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Verkehrswissenschaftliches
Institut der RWTH Aachen (VIA)
emunds@via.rwth-aachen.de



Dr.-Ing. Björn Dickenbrok
Projektleiter „Weiterentwick-
lung des Ursache-Wirkung-
Zusammenhangs für die LuFV III“
DB Netz AG, Planung und
Segmentsteuerung,
Frankfurt am Main
bjoern.dickenbrok
@deutschebahn.com



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nils Nießen
Institutsleiter
Verkehrswissenschaftliches
Institut der RWTH Aachen (VIA)
nießen@via.rwth-aachen.de



chende Handlungsbedarfe abzuleiten. Dazu sind diejenigen Merkmale pro Anlagengruppe zu identifizieren, mit denen der Anlagenzustand umfassend abgebildet werden kann. Um den UWZ modelltechnisch zu beschreiben, werden das Abnutzungsverhalten und die Wirkung von Instandhaltungs- und Ersatzinvestitionsmaßnahmen betrachtet. Die Herausforderung besteht dabei insbesondere darin, das Abnutzungsverhalten und die Maßnahmenwirkung aus den verfügbaren Zustandsdaten abzuleiten.

Bei Gleisen gilt die Längshöhenabweichung, die auch Längshöhenfehler genannt wird und für die Infrastruktur der DB Netz AG gemäß Richtlinie 821 [4] regelmäßig gemessen wird, als maßgebendes Merkmal für die Gleislage. In diesem Artikel wird vorgestellt, wie mithilfe der erhobenen Messdaten der Längshöhenabweichung die für den UWZ benötigten Verschlechterungsfunktionen und die Wirkung von Maßnahmen der Gleise modelliert werden können.

2. Aufstellen der Verschlechterungsfunktionen

Die Gleislage wird für die Infrastruktur der DB Netz AG in Abhängigkeit von der Streckengeschwindigkeit alle 3 bis 18 Monate durch Messzugfahrten erhoben, sodass aus den letzten Jahren eine maschinenlesbare Historie der Messwerte vorliegt.

Da zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messfahrten stets auch Zustandsverbesserungen der Längshöhenabweichung aus durchgeführten Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen enthalten sein können, ist das Aufstellen von Verschlechterungsfunktionen in zwei Teilschritten unterteilt. Zunächst sind die Zeitpunkte in der Vergangenheit durchgeführter Maßnahmen zu identifizieren, um im nächsten Schritt den Verschlechterungsverlauf zwischen zwei Maßnahmen zu betrachten. Im nächsten Schritt werden aus den generierten Verschlechterungsverläufen die Funktionen zur Modellierung der Gleislageverschlechterung abgeleitet. Diese werden im vorgestellten UWZ-Modell spezifisch für fest definierte Geschwindigkeits- und Belastungs-Cluster erstellt. Dabei werden die Cluster aus einer Kombination von örtlich zulässiger Geschwindigkeit und der Streckenbelastung gebildet. Jede dieser beiden Größen wird in fünf verschiedene Ausprägungsklassen unterteilt. Die Klasse 1 beschreibt dabei eine sehr niedrige

Belastung bzw. Geschwindigkeit und die Klasse 5 eine sehr hohe Belastung bzw. Geschwindigkeit.

2.1. Datenauswahl und Datenvorverarbeitung

Um die Instandhaltungszyklen in den Clustern der Gleise zu modellieren, werden die mittleren Maßnahmenhäufigkeiten aus den Auftragsdaten für Instandhaltungsmaßnahmen der DB Netz AG aus den Jahren 2009 bis 2020 berechnet. Dazu werden feingranular die an den Gleisen durchgeführte Anzahl maschineller Durcharbeitungen (DUA) je Alter bestimmt. Die mittlere Maßnahmenhäufigkeit pro Abschnitt eines bestimmten Alters wird schließlich als Quotient aus der Maßnahmenanzahl je Alter und der Anzahl an Abschnitten dieses Alters bestimmt. Im nächsten Schritt wird eine quadratische Regressionsfunktion als beste Näherung an diese Daten angepasst, wobei die mittleren Maßnahmenhäufigkeiten über das Alter kumuliert aufgetragen sind. Mithilfe dieser Auswertungen können die durchschnittlichen Längen der Instandhaltungszyklen zwischen zwei aufeinanderfolgenden DUA-Maßnahmen über den gesamten Lebenszyklus einer Anlage ermittelt werden.

Für die Modellierung der Verschlechterungsfunktionen innerhalb der einzelnen Instandhaltungszyklen zwischen zwei aufeinanderfolgenden DUA-Maßnahmen können prinzipiell die Messwerte der Längshöhenabweichung des Integrierten Inspektionssystems (IIS) [5] oder des Continuous Track Monitorings (CTM) [6] verwendet werden. Die IIS-Messungen werden in definierten Inspektionsabständen mit speziellen Messzügen durchgeführt, während die CTM-Daten mithilfe entsprechend ausgestatteter Fahrzeuge im Regelbetrieb auf den befahrenen Strecken kontinuierlich erfasst werden. Aufgrund der deutlich höheren Datendichte mit potentiell täglichen Messwerten werden hier für die Modellierung der Verschlechterungsverläufe die CTM-Daten verwendet.

In den CTM-Daten sind für jeden Längshöhenmesswert unter anderem das zugehörige Messdatum, die Streckennummer, die Kilometrierung und Richtung sowie die Geschwindigkeit des Zuges angegeben. Diese Daten werden zudem mit weiteren Informationen zum Inbetriebnahmezeitpunkt sowie der zulässigen Streckengeschwindigkeit und der täglichen Streckenbelastung angereichert. Daraus lassen sich das Gleisalter zum jeweiligen Messzeit-

Der UWZ beschreibt den Zusammenhang zwischen eingesetzten Finanzmitteln und der damit erzielbaren Infrastrukturqualität.



punkt und die örtlichen Beurteilungsmaßstäbe (SR-Werte) [4] für die Längshöhe bestimmen. Neben dem SR_A (Einplanen einer Instandsetzungsmaßnahme) sind dort der SR_{100} (technischer/wirtschaftlicher Abnutzungsvorrat ist aufgezehrt, eine baldige Instandsetzung ist erforderlich) sowie der SR_{lim} , bei welchem ein Fehler mit betrieblichen Einschränkungen vorliegt, definiert.

Die CTM-Daten werden im nächsten Schritt in sogenannte Längshöhenmessreihen für 10 m-Abschnitte aufgeteilt. Damit kann für jeden Abschnitt separat ermittelt werden, wie sich die Längshöhenabweichung im betrachteten Zeitraum entwickelt hat. Diese Messreihen werden anschließend mit Hilfe einer MATLAB-Funktion [7] auf Stellen abrupter Verbesserung untersucht. Gefundene Verbesserungen werden als eine Maßnahmendurchführung interpretiert und die Daten vor bzw. nach diesem Zeitpunkt gesondert den entsprechenden Instandhaltungszyklen zugeordnet. Da die vorhandenen CTM-Daten einen Zeitraum von sieben Jahren umfassen, kann anhand einzelner Abschnitte nicht immer ein vollständiger Instandhaltungszyklus zwischen zwei aufeinanderfolgenden DUA-Maßnahmen nachgewiesen werden. Daher werden die Abschnitte getrennt nach den Clustern ausgewertet. Mittels einer Regressionsanalyse wird anschließend die durchschnittliche Verschlechterungsrate zwischen zwei Maßnahmen ermittelt.

2.2. Datenauswertung

Die Auswertung der kumulierten Maßnahmenhäufigkeiten über das Alter zeigt, dass sowohl mit höherer zulässiger Streckengeschwindigkeit als auch mit höherer Belastung die Abstände zwischen zwei Instandhaltungsmaßnahmen geringer werden. Dies entspricht den bekannten Mechanismen und wird daher als plausibel bewertet.

Aus den CTM-Daten ist erkennbar, dass sich eine Verschlechterung der

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für RWTH Aachen, KIT, DB Netz AG / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten genehmigt / © DVV Media Group GmbH

Längshöhenabweichung oftmals (annähernd) linear auf sehr niedrigem Niveau entwickelt. Zwischen solchen linearen Verläufen befinden sich sprunghafte Änderungen, siehe Bild 2. Bei einer sprunghaften Verschlechterung ist dies auf einen Gleislagefehler zurückzuführen, bei einer sprunghaften Verbesserung auf eine Maßnahme.

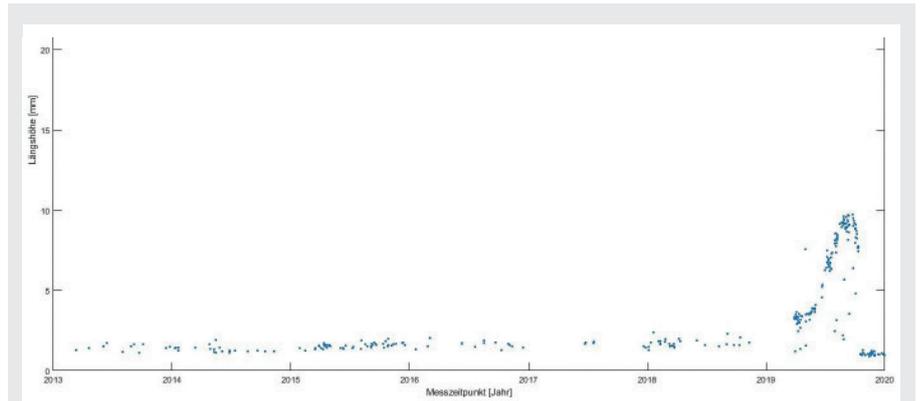
Meistens sind die aus den Messdaten ermittelten Verschlechterungsraten so gering, dass in einem typischen Lebenszyklus eines Gleises und damit auch innerhalb der zuvor bestimmten Instandhaltungszyklen keinerlei Durcharbeitung notwendig wäre. Auffällig ist zudem die meist sehr geringe Längshöhenabweichung im Bereich des SR_{Av} , bei welcher eine abrupte Verbesserung – also mutmaßlich eine Maßnahme – zu beobachten ist. Die Auftragsdaten zur Bestimmung der Länge der Instandhaltungszyklen basieren jedoch auf einer Maßnahmen-durchführung bei Erreichen des SR_{100} gemäß Richtlinie 821 [4]. Dies führt zu der Überlegung, die Verschlechterung durch eine Funktion zu modellieren, welche am Beginn über einen längeren Zeitraum die in den CTM-Daten sichtbare, sehr gute Gleislage sowie nach einem Initialfehler eine deutlich beschleunigte Verschlechterung abbilden kann.

Zwischen der Verschlechterungsrate und dem Gleisalter ist darüber hinaus ein positiver Zusammenhang erkennbar. Zudem wird durch die Auswertung deutlich, dass die Wahrscheinlichkeit einer hohen Verschlechterungsrate bei höherem Gleisalter und damit einer größeren Anzahl bereits durchgeführter Maßnahmen größer ist. Auch dies entspricht den bekannten Beobachtungen aus der Praxis.

2.3. Resultierende Verschlechterungsfunktionen

Werden nun die Auswertungen der Maßnahmenzeitpunkte und die Verschlechterungsverläufe zwischen den Maßnahmen zusammengeführt, so ergeben sich für jedes Cluster die für den UWZ benötigten Verschlechterungsfunktionen.

Da ein linearer Verschlechterungsverlauf zwischen den Maßnahmen das über lange Zeit niedrige Niveau überschätzt, werden für die Modellierung der Verschlechterung zwischen Maßnahmen Polynome sechster Ordnung der Form $f(x) = a \cdot x^6 + b \cdot x + c$ gewählt. Damit lassen sich sowohl die über einen längeren Zeit-



2: Beispielhafte Entwicklung einer Längshöhenabweichung

raum geringe Verschlechterungsrate nach Maßnahmen, als auch der sprunghafte Anstieg bei Auftreten eines Initialfehlers modellieren. Ein Polynom sechster Ordnung erlaubt eine realitätsnahe Modellierung der Zustandsentwicklung, da ihr quasilinearer Anteil am Beginn groß genug und die Steigung gegen Ende des Zyklus nicht zu stark ist. Da aus den Messdaten ersichtlich ist, dass der mittlere Anfangswert nach einer Maßnahme nicht beim Optimum von 0 mm liegt, wird dies ebenfalls in den Verschlechterungsfunktionen berücksichtigt.

Der Parameter b des Polynoms beschreibt die Verschlechterungsrate unmittelbar nach einer Maßnahmendurchführung in Abhängigkeit des Gleisalters und wird aus den Auswertungen der CTM-Daten bestimmt. Der Parameter c definiert die mittlere Höhe der Längshöhenabweichung am Anfang jedes Instandhaltungszyklus und wird entsprechend auf den halben Abnahmegrenzwert SR_0 gesetzt. Das Erreichen des SR_{100} am jeweiligen Ende eines Instandhaltungszyklus wird schließlich zur Bestimmung des Parameters a genutzt. In

Bild 3 sind beispielhaft die Funktionen eines Clusters dargestellt.

Die aufgestellten Funktionen werden in einem nächsten Schritt programmtechnisch in das bestehende UWZ-Werkzeug integriert und Berechnungen mit den definierten Testszenarien für das Gesamtnetz der DB Netz AG durchgeführt.

3. Plausibilisierung der aufgestellten Funktionen

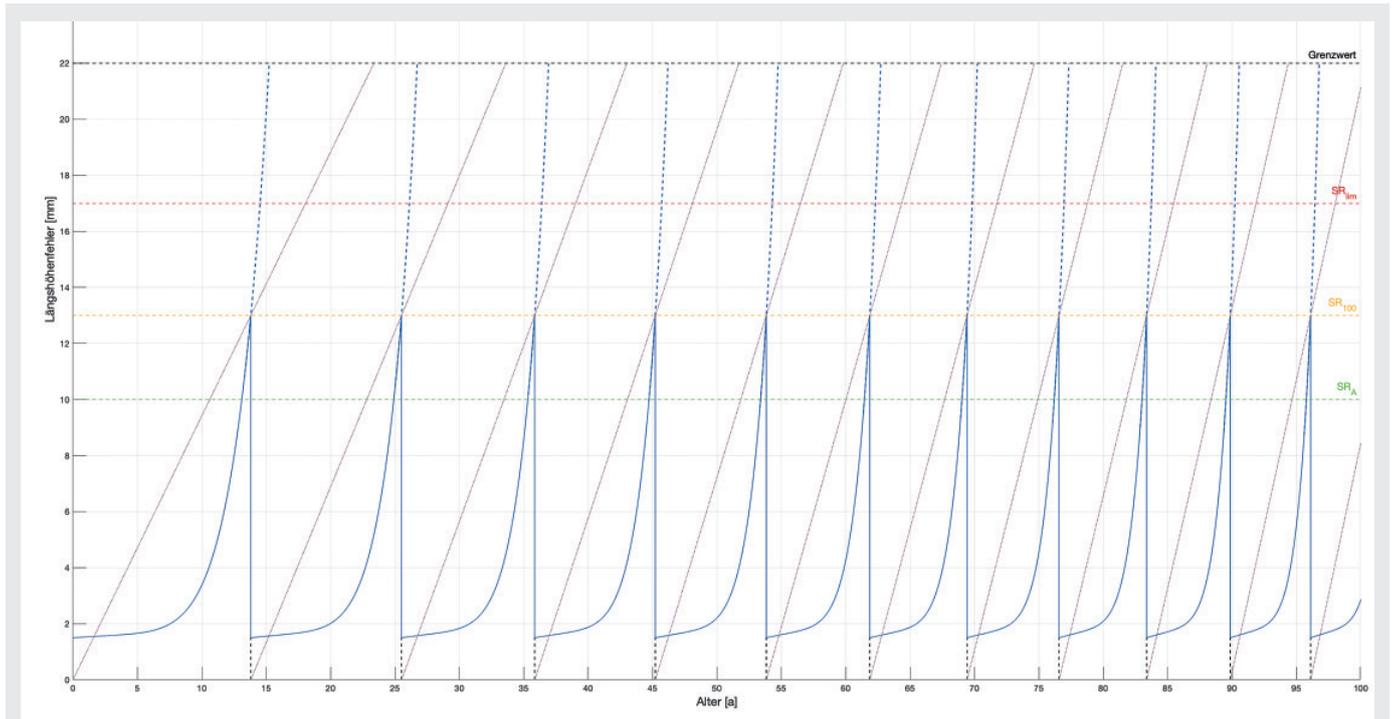
Um die Plausibilität der neuen Verschlechterungsfunktionen zu überprüfen, wird der Datenstand der Infrastruktur zum Ende des Jahres 2019 für das UWZ-Werkzeug genutzt. Die eingespielten Daten umfassen aufgeteilt in Abschnitte von 100 Metern Länge die jeweiligen Merkmale wie zulässige Geschwindigkeit, Belastung, Alter und Messwerte mit Messdatum. Von diesem Zustand ausgehend wird eine netzweite Prognose für den Gleiszustand zum Ende des Jahres 2020 berechnet. Mit Hilfe von Auftragsdaten über erfolgte Instandhaltungen werden die betrachteten Anlagen anschließend auf jene reduziert, die in den Monaten August bis Dezember (im UWZ-Werkzeug erfolgt die Prognose jährlich für einen Tag im Oktober) der Jahre 2019 und 2020 durch einen Messzug befahren und auf denen in diesen Jahren keine dokumentierten Instandhaltungsmaßnahmen der Gleislage durchgeführt wurden.

Zuerst wird für diese Abschnitte die Differenz der Messwerte zwischen den Jahren 2020 und 2019 gebildet, um so die tatsächlichen Verschlechterungen der Gleislage zu erhalten. Das Bild 4 zeigt, dass für über 40% der Abschnitte eine Abweichung von mindestens 1 mm zwischen 2019 und 2020 existiert. Außerdem sind obgleich des Aus-

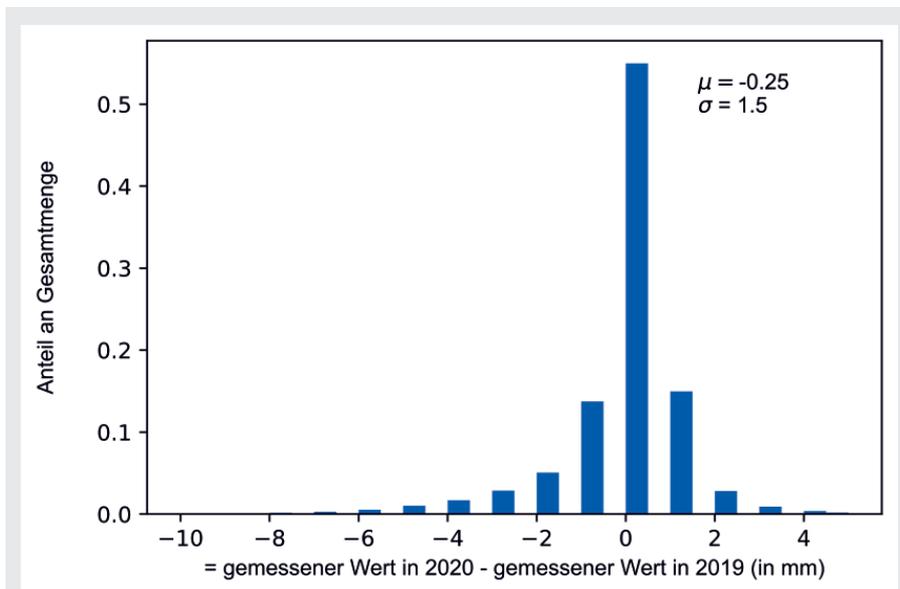
Sowohl mit höherer Streckengeschwindigkeit als auch mit höherer Belastung werden die Abstände zwischen zwei Instandhaltungsmaßnahmen geringer.



Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für RWTH Aachen, KIT, DB Netz AG / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten genehmigt / © DVV Media Group GmbH



3: Beispielhafte Verschlechterungsfunktion für Gleise mit einer zulässigen Geschwindigkeit von 81 – 120 km/h und einer Belastung von 10 000 – 30 000 t/d



4: Verteilung der Längshöhenänderung in den Messwerten zwischen den Jahren 2019 und 2020

Ungefähr 40% der Prognosen stimmen bis auf maximal 1 mm mit den gemessenen Werten überein. Insgesamt ist eine rechtsschiefe Verteilung zu erkennen und der Mittelwert liegt mit 2,79 mm rechts des optimalen Wertes von 0 mm. Die Standardabweichung beträgt 3,86 mm. Das deutet insgesamt darauf hin, dass die Prognose im Vergleich zu den Messdaten eine schnellere Verschlechterung unterstellt. Bedingt durch die scheinbaren Zustandsverbesserungen in den Messdaten sind die Abweichungen teilweise dadurch erklärbar, dass die aufgestellten Funktionen stets eine Verschlechterung der Gleislage mit zunehmender kumulierter Belastung bzw. dem Alter vorsehen. Die Dichtefunktion in Bild 6 zeigt weiterhin, dass die Längshöhenab-

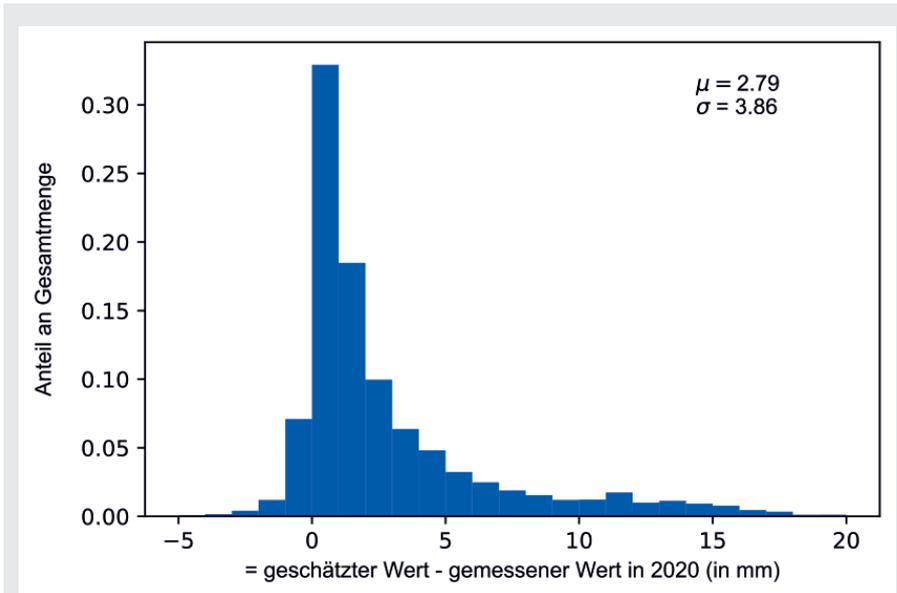
Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für RWTH Aachen, KIT, DB Netz AG /
 Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten
 genehmigt / © DVV Media Group GmbH

schlusses von Abschnitten mit Instandhaltungsaufträgen deutliche Anteile mit einer scheinbaren Verbesserung zu beobachten. Diese können beispielsweise aus dem angewendeten, nicht formtreuen Sehnemessverfahren resultieren. Die Genauigkeit der verfügbaren Daten liegt bei 1 mm, so-

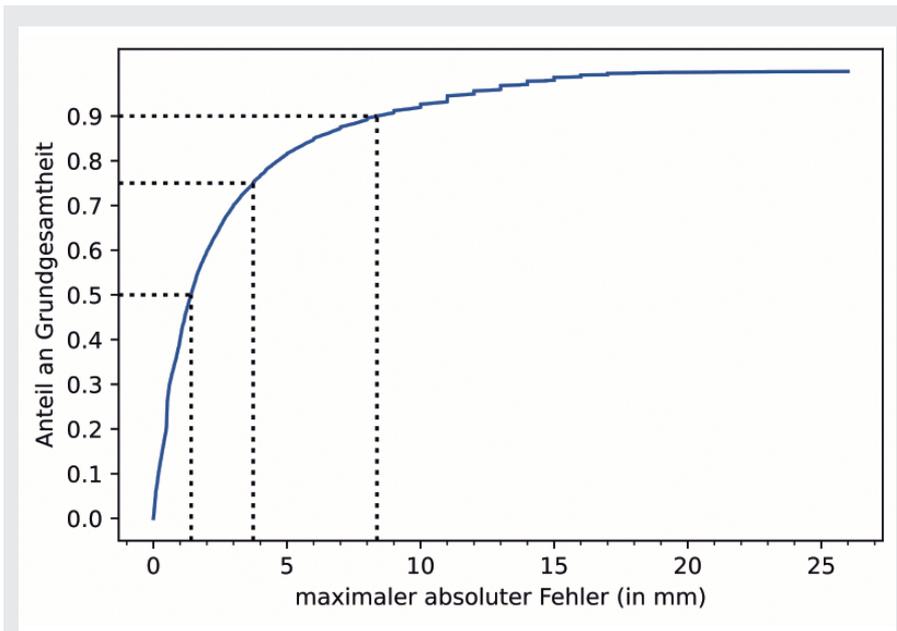
dass auch Rundungseffekte eine Rolle spielen können.

Im nächsten Schritt werden die berechneten Prognosewerte des Jahres 2020 mit den realen Messdaten desselben Jahres verglichen. Das Histogramm dazu ist in Bild 5 dargestellt.

Ein Polynom sechster Ordnung erlaubt eine realitätsnahe Modellierung der Zustandsentwicklung.



5: Verteilung der Längshöhendifferenz zwischen Prognose und Messwerten im Jahr 2020



6: Dichtefunktion der Abweichungen zwischen Prognose und Messwerten für das Jahr 2020

weichung zu 75% mit einem absoluten Fehler von weniger als 4 mm prognostiziert werden kann.

Neben dieser globalen Auswertung wurde auch eine clusterspezifische Plausibilisierung vorgenommen. Hierbei fielen die Cluster hoher Geschwindigkeiten sowie Cluster mittlerer Belastung systematisch mit einer geringeren Prognosegüte als das Gesamtnetz auf. Neben schwach besetzten Clustern mit geringer Datendichte können hier auch große Va-

rianzen z.B. in der Belastung, die derzeit nicht vollständig erfasst werden, ursächlich sein.

4. Fazit

Mit dem beschriebenen Verfahren als Kombination aus Gleismessdaten unterschiedlicher Quellen konnten Verschlechterungsfunktionen für die Gleislage auf Basis der Längshöhenabweichung zur Anwendung im UWZ modelliert werden. Die

Implementierung dieser Funktionen in das UWZ-Werkzeug ermöglicht die Prognose der Gleislageentwicklung in Abhängigkeit vom Mitteleinsatz für Ersatzinvestitionen und Instandhaltung. Eine detaillierte Plausibilisierung durch den Abgleich mit vorliegenden Messdaten der DB Netz AG über das Gesamtnetz des Jahres 2020 wurde im Anschluss daran erfolgreich durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem entwickelten Ansatz eine gute Prognose der Längshöhenabweichungen aufgestellt werden kann, sodass dieses Modell im weiteren Verlauf für den UWZ angewendet wird.

Literatur

[1] Eisenbahn-Bundesamt: Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung III.
 [2] Jacke, T.; Dickenbrok, B.; Friesen, N.; Grub, A.; Nießen, N.: Ursache-Wirkung-Zusammenhang: Zusammenhang zwischen Mitteleinsatz und Infrastrukturqualität abbilden. In: ETR – Eisenbahntechnische Rundschau 68 (2019) Nr. 9, S. 37 – 41.
 [3] 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.
 [4] DB NETZE: Richtlinie 821 „Oberbau inspizieren“.
 [5] Marx, L.; Moßmann, D.: Arbeitsverfahren für die Instandhaltung des Oberbaus. 7. Auflage. Berlin: Bahn-Fachverlag, 2011.
 [6] Wolter, K. U.; Erhard, F.; Gabler, H.; Hempte, T.: Fahrzeugseitige Überwachung der Infrastruktur im Regelbetrieb. In: ETR – Eisenbahntechnische Rundschau 63 (2014) Nr. 7+8, S. 32 – 36.
 [7] The MathWorks, Inc.: MATLAB®-Funktion „ischange“ – Find abrupt changes in data.

Summary

Modelling of track-position using the example of longitudinal height for the cause-effect relationship

For the cause-effect relationship between resources and quality, it is essential to model the wear and tear functions of the different infrastructure facilities close to reality. This is realized in the presented process for the track position by connecting data analysis of the measuring trains and an engineering approach. The resulting deterioration functions for the track-position provide a good prognosis and were implemented in the cause-effect-tool.