# Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für RWTH Aachen / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrucke für Besucher der Seiten genehmigt von DVV Media Group, 2019

## Ursache-Wirkung-Zusammenhang: Zusammenhang zwischen Mitteleinsatz und Infrastrukturqualität abbilden

Der vorliegende Artikel beschreibt den Aufbau der Module und eines prototypischen Softwarewerkzeugs zur Beschreibung des Ursache-Wirkung-Zusammenhangs zwischen einzusetzenden Investitions- sowie Instandhaltungsmitteln und der erzielbaren Infrastrukturqualität. Für die Umsetzung wurden sowohl Prognose- als auch Risikomodelle für Gleise, Brücken, Weichen, Stellwerke und Bahnübergänge aufgestellt.

#### **Einleitung und Motivation**

Der Infrastrukturbetreiber DB Netz AG stellt Anlagen zur Verfügung, die von Eisenbahnverkehrsunternehmen genutzt werden. Dabei kommt der Infrastrukturqualität eine große Bedeutung zu, da eine maximale Verfügbarkeit der Anlagen eine Grundvoraussetzung bildet, um Fahrplantrassen vermarkten und Zugfahrten durchführen zu können. Die Messung der Infrastrukturqualität erfolgt anhand von Qualitätskennzahlen, z.B. Verspätungsminuten oder Infrastruktureinschränkungen. [1]

Ursache

Um die Verfügbarkeit der Infrastruktur zu gewährleisten, bewirtschaftet die DB Netz AG ihre Anlagen durch Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen. Hierfür werden unter anderem von der öffentlichen Hand im Rahmen der Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung (LuFV) Mittel für Ersatzinvestitionen zur Verfügung gestellt. [2] Um einen qualitätsoptimalen Mitteleinsatz gewährleisten zu können, sollen mit Hilfe des Ursache-Wirkung-Zusammenhangs (UWZ) die resultierenden Qualitätskennzahlen (QKZ) in Abhängigkeit der eingesetzten Finanzmittel für Instandhaltung

Wirkung



**Tobias Jacke, M. Sc.**Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Verkehrswissenschaftliches
Institut der RWTH Aachen (VIA)
jacke@via.rwth-aachen.de



**Dr.-Ing. Björn Dickenbrok**DB Netz AG, Produktionsplanung und -steuerung, Frankfurt (Main) bjoern.dickenbrok
@deutschebahn.com



Nadine Friesen, M. Sc. Wissenschaftliche Mitarbeiterin Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen (VIA) friesen@via.rwth-aachen.de



1: Logische Kette des Zusammenhangs zwischen Mitteleinsatz und Qualität

und Alterung

(z. B. durch

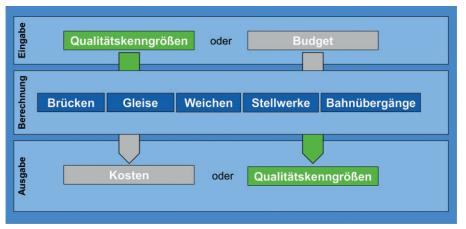
Zugfahrten, Witterung)



Alexandra Grub, M. Sc. Wissenschaftliche Mitarbeiterin Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen (VIA) grub@via.rwth-aachen.de



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



2: Übersicht der Module zur Berechnung des UWZ

und Erneuerung in einem Rechenmodell abgebildet werden (siehe Bild 1).

Das seit 2012 bei der DB Netz AG eingesetzte Modell der integrierten Investitionsund Instandhaltungsstrategie (3-i Modell) ermittelt den erforderlichen technischen Bedarf an Erneuerungs- und Instandhaltungsmitteln für definierte Qualitätsniveaus auf Basis von Lebenszyklusmodellen. [3] Mit Hilfe des 3-i Modells kann der UWZ allerdings nicht hinreichend genau abgebildet werden, da mit den Lebenszyklusmodellen nicht dargestellt werden kann, welche Qualitätsänderung durch einen geänderten Mitteleinsatz zu erwarten ist oder wie bei gewünschtem Qualitätsniveau der Mitteleinsatz optimiert werden kann.

Bei der Entwicklung des neuen Ansatzes wurden in einem ersten Schritt die maßgeblichen Qualitätskenngrößen und Merkmale des Anlagenzustands sowie in einem zweiten Schritt die jeweils relevanten Anlagentypen identifiziert, die in der Vergangenheit am stärksten die maßgeblichen Qualitätskenngrößen beeinflusst haben. Anschließend wurden in Abhängigkeit von den erhobenen Zustandsdaten für Brücken und Gleise Prognosemodelle entwickelt, die die Veränderung der betrachteten Merkmale des Anlagenzustands einbeziehen. Für Weichen, Stellwerke und Bahnübergänge wurden jeweils risikobasierte Modelle zur Beschreibung des Ausfallverhaltens der Anlagen entwickelt.

Im Rahmen einer Kooperation zwischen der DB Netz AG und dem Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen wurde ein prototypisches Softwarewerkzeug entwickelt. Mit diesem Werkzeug lässt sich anhand der berechneten Prognosen für den Anlagenzustand

und der vorliegenden Störungsrisiken für jeden Anlagentyp die optimale Menge an durchzuführenden Maßnahmen bestimmen. Dies führt dazu, dass entweder die erforderlichen Kosten minimiert oder die erreichbare Qualität maximiert wird. Eine schematische Darstellung des Aufbaus ist in Bild 2 dargestellt.

#### Module auf Basis von Prognoseansätzen

Die Prognoseansätze für Brücken und Gleise haben zum Ziel, ein oder mehrere Merkmale des Anlagenzustands in ihrem Verschlechterungsverhalten abzuschätzen. Durch die Beschreibung des zukünftigen Zustandsverhaltens ist es möglich, Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen für kommende Zeitscheiben sinnvoll abzuleiten. Bei Brücken wird dabei die Zustandskategorie der Einzelanlage, bei Gleisen der Längshöhenfehler des Oberbaus, bei Schienen die Risstiefe und der Abnutzungsvorrat zur Beschreibung des Bauwerkszustands prognostiziert.

#### Modul Brücken

Das Ziel des Moduls Brücken ist die systematische Auswahl von Brücken, um vorgegebene Qualitätsziele zu erreichen. Hierfür wurde ein vierstufiges System erstellt, welches die Instandhaltung und Erneuerung von Brücken hinsichtlich der Zielgrößen Durchschnittsalter, durchschnittliche Zustandskategorie Brücken (ZK) und die Anzahl der voll- und teilerneuerten Brücken (QKZ ZuB) der Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung priorisieren kann. [2] Die vier Stufen gliedern sich wie folgt auf:

- 1. Aktuelle Zustandsbewertung
- 2. Zustandsprognose (ohne zustandsverbessernde Maßnahmen)
- 3. Priorisierung
- 4. Maßnahmenauswahl

Bei der Prognose der Zustandsentwicklung von Brücken wurden für verschiedene Brückenbauarten anhand von historischen Daten und Expertenwissen durchschnittliche Basis-Verschlechterungsfunktionsverläufe über das Alter erstellt. Bild 3 zeigt beispielhaft eine Verschlechterungsfunktion für Stahlbetonbrücken. Dabei werden die vorgeschriebenen Inspektions- und Wartungsmaßnahmen und nur minimale Instandhaltungsmaßnahmen unterstellt, um die Stand-, Betriebs- und Verkehrssicherheit $\stackrel{0}{\leftarrow}$ der Brücken sicherzustellen. Im Laufe des 💆 Lebenszyklus durchschreiten die Brücken dabei die Zustandskategorien gemäß der ermittelten Verschlechterungsfunktion. Zum nächst wird der vorliegende Zustand jeder an der vorliegende zustand jeder zustand zustand zu der vorliegende zustand zustand zustand zu der vorliegende zu der vorliegend Lebenszyklus durchschreiten die Brücken Brücke anhand der aktuell vorliegenden Zustandskategorie bestimmt. Dabei be-E kommen die Brücken – basierend auf ihrem tatsächlichen Zustand – ein fiktives Alter zugeordnet, welches dem entsprechenden Alter des vorhandenen Zustands im Modellö entspricht.

Der UWZ kann für einen frei wählbaren zukünftigen Zeitraum bestimmt werden. Die Berechnungen werden für jede
Jahresscheibe erneut durchgeführt. Dazug
wird das fiktive Alter der Brücken auf das
betrachtete Jahr erhöht und anhand der
Prognose der korrespondierende Zustand

Für die Brücken kann sowohl eine kleine oder große Instandhaltungsmaßnahme
als auch eine Erneuerung eingeplant werden. Diese Maßnahmen setzen jeweils das
fiktive Alter unterschiedlich stark herunter
und entsprechend die Zustandskategorie

Durch die Beschreibung des zukünftigen Zustandsverhaltens ist es möglich, Instandhaltungsund Erneuerungsmaßnahmen für kommende Zeitscheiben sinnvoll abzuleiten.

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für RWTH Aachen / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrucke für Besucher der Seiten genehmigt von DVV Media Group, 2019

herauf. Erneuerungen lassen sich dabei nur für Brücken der Zustandskategorie 3 und 4 durchführen, um zu verhindern, dass bei zu hohem Budget sehr junge Brücken unwirtschaftlich erneuert werden.

Diese möglichen Maßnahmen für die Einzelbrücken werden in einer Gesamtliste für alle Brücken zusammengefasst und nach dem Nutzen bezüglich der gewählten Oualitätskenngröße (Durchschnittsalter, durchschnittliche ZK oder OKZ ZuB) oder dem Verhältnis von Kosten und Nutzen sortiert. Aus dieser Liste werden nun, beginnend mit der Maßnahme mit dem größten Nutzen, solange Maßnahmen ausgewählt, bis entweder das Qualitätsziel erreicht oder das Budget aufgebraucht ist. Wird beispielsweise nach der Anzahl voll- und teilerneuerter Brücken priorisiert, so werden zunächst die kleineren, kostengünstigeren Brücken erneuert.

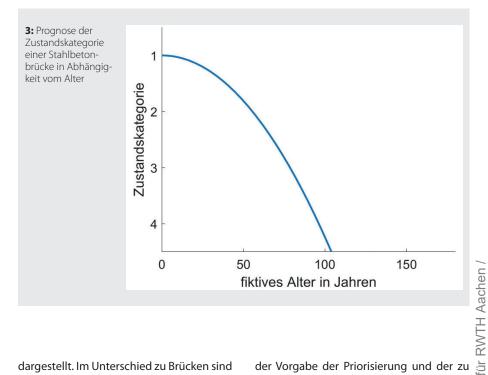
Am Ende des Berechnungszyklus im Modul Brücken entstehen somit Ergebnislisten mit den durchgeführten Maßnahmen, der erreichten Qualität in allen Qualitätskenngrößen und dem notwendigen Budget für Erneuerung und Instandhaltung.

#### **Modul Gleise**

Wie auch im Modul Brücken, kann im Modul Gleise für jedes zu prognostizierende Jahr entweder ein Instandhaltungs- und ein Ersatzinvestitionsbudget oder ein Qualitätsziel vorgegeben werden. Der UWZ kann für Gleise die Qualitätskenngrößen QKZ Gleislage, Anzahl Gleislagefehler, Anzahl Langsamfahrstellen (La), Anzahl La-Bestehenstage, Anzahl Infrastrukturmängel (Anz-I) oder Theoretischer Fahrzeitverlust (ThFzV) berücksichtigen. Die jeweiligen Grenzwerte sind der Richtlinie 821 der DB Netz AG entnommen. [4]

Der grundlegende Prozess des Moduls ist ebenfalls vierstufig aufgebaut und beruht auf denselben Prinzipien wie im Modul Brücken. Dieses Prinzip ist in Bild 4

Der UWZ kann für einen frei wählbaren zukünftigen Zeitraum bestimmt werden.



dargestellt. Im Unterschied zu Brücken sind im Modul Gleise die Prognose und die Maßnahmenpriorisierung deutlich komplexer. Durch die Anwendung unterschiedlicher Prognosen für die Gleislage, die Risstiefe und den Abnutzungsvorrat der Schienen, muss bereits bei der Maßnahmenpriorisierung eine Aggregation stattfinden, um sinnvolle Maßnahmenpakete auswählen zu können.

Auch im Modul Gleise entstehen jahresscharfe Ergebnislisten, welche die erreichbaren Qualitätsziele zu gegebenem Budget oder die notwendigen Budgets bei vorgegebenen Qualitätszielen ausgeben. Hervorzuheben ist hierbei, dass bei

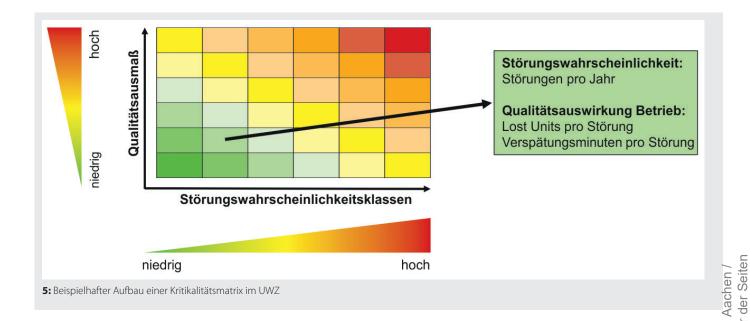
der Vorgabe der Priorisierung und der zu erreichenden Qualitätsziele eine Kenngröße ausgewählt werden muss. Die weiteren Qualitätskenngrößen werden dann aus den Berechnungen abgeleitet.

#### Module auf Basis von Risikoansätzen

Die Basis der im UWZ umgesetzten Risikomodelle für Weichen, Stellwerke und Bahnübergänge sind sogenannte Kritikalitätsmatrizen, wie sie in der DIN EN 13306 definiert werden. [5] Ähnliche Ansätze zeigen die bei der SBB umgesetzte Strategie RAM@Bahnnetz [6] und die DB-Strategie RAM Weiche [7].

4: Ablauf einer Iteration im Modul Gleise START Prognose der Zustandsgröße Zustandsgröße ZIEL Maßnahmen-Neue auswahl Zustandsgröße Maßnahmenpriorisierung und Durchführung

www.eurailpress.de/etr ETR | September 2019 | NR.9 **39** 



In Bild 5 ist der generelle Aufbau einer Risikomatrix dargestellt. Im verwendeten Ansatz wird die Risikoeinstufung auf der Abszisse (Störungswahrscheinlichkeit in Anzahl Störmeldungen) und Ordinate (Qualitätsausmaß bei einer Störung in Anzahl Verspätungsminuten je Störmeldung) vorgenommen. Ziel dieser Risikomatrizen ist es, die jeweils vorliegende Anlagengrundgesamtheit hinsichtlich vergleichbarer Eigenschaften zu ordnen. Das Ergebnis der Einordnung sind demzufolge Kohorten vergleichbarer Anlagen, welche nach ihrer Zustandsentwicklung, Ausfallprognose und dem Qualitätsausmaß ausgewertet

Nach der Einordnung der Anlagen in Risikostufen für die Störungswahrscheinlichkeit werden aus den jeweils sechs Kohorten Verschlechterungsfunktionen zur Prognose der Störungsentwicklung abgeleitet. Hierbei wird mit Hilfe der Anlagen einer jeweiligen Kohorte, mittels des Ausfallverhaltens jeder Einzelanlage in Abhängigkeit des Alters, eine Regressionsfunktion des Ausfallverhaltens aufgestellt.

werden können.

Ziel dieser Risikomatrizen ist es, die jeweils vorliegende Anlagengrundgesamtheit hinsichtlich vergleichbarer Eigenschaften zu ordnen.

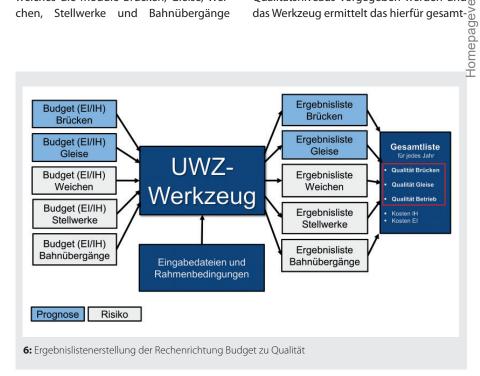
Durch die Auswertung der entstehenden Verspätungsminuten und Lost Units mit Hilfe der Risikoeinstufung der Anlagen auf der Ordinate, können nun den errechneten Ausfällen betriebliche Auswirkungen zugeordnet werden. Durch diese Verrechnung können ausfallreduzierende Maßnahmen direkt über die betrieblichen Kenngrößen priorisiert werden.

### **Aufbau des Prototyps**

Zur Berechnung des UWZ wurde ein prototypisches Softwarewerkzeug entwickelt, welches die Module Brücken, Gleise, Weichen, Stellwerke und Bahnübergänge

abbildet und vereint. Das Werkzeug kann, abbildet und vereint. Das Werkzeug kann, abbildet und die erzielte Qualität eines Wetzbereichs treffen.

Dazu muss dem Werkzeug der zu be- bewertende Anlagenbestand mit allen für die Berechnungen benötigten Anlagenmerk wertende Anlagenbestand mit allen für die Berechnung können je Anlagentyp malen übergeben werden. Für jedes Jahr der Berechnung können je Anlagentyp Budgets für Ersatzinvestitionen und Instandhaltung vorgegeben werden, sodass mulge Werkzeug die damit maximal erreich baren Qualitätsniveaus ermittelt. Alternature bereich sie des Jahr in Anlagentyp und können gestellt der Berechnung können je Anlagentyp und Verstellt der Ve baren Qualitätsniveaus ermittelt. Alternative können auch für jedes Jahr je Anlagentype Qualitätsniveaus vorgegeben werden und



40

Das Werkzeug kann somit Aussagen über das gesamte benötigte Budget und die erzielte Qualität eines Netzbereichs treffen.

haft benötigte Instandhaltungs- und Erneuerungsbudget.

Mit den gewählten Eingangsgrößen rechnet das prototypische Werkzeug modular in den einzelnen Untermodulen und gibt in jedem der Module eine Ergebnisliste mit den durchgeführten Maßnahmen, dem verwendeten Budget und den erzielten Qualitätskenngrößen aus. Diese werden dann vom Verrechnungsmodul zu einer gesamten Ergebnisliste verknüpft.

Bild 6 stellt schematisch die Eingangsgrößen und die Ausgabelisten des Werkzeugs für die Rechenrichtung "Budget zu Qualität" dar.

#### **Fazit**

Im Rahmen der Kooperation der DB Netz AG und des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen konnte mit Hilfe eines prototypischen Softwarewerkzeugs gezeigt werden, dass sich ein Zusammenhang zwischen der Qualität der Anlagen und den eingesetzten Instandhaltungssowie Ersatzinvestitionsmitteln quantifizieren lässt. Dazu wurde die Qualitätswirkung der natürlichen Degradation sowie der Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen mit Risiko- und Prognosemodellen bestimmt, um so die Auswirkungen des Geldeinsatzes aber auch eines fehlenden Einsatzes abschätzen zu können. Somit kann der für ein vorgegebenes Qualitätsniveau nötige Finanzbedarf

zur Instandhaltung und Erneuerung der Anlagentypen Brücken, Gleise, Weichen, Stellwerke und Bahnübergänge ermittelt werden. Weiterhin lässt sich auch die maximal erreichbare Qualität bei gegebenem Budget bestimmen. Erste Beispielrechnungen zeigen für den Anlagenbestand der DB Netz AG nachvollziehbare Ergebnisse.

www.eurailpress.de/archiv/infrastrukturqualitaet/

#### Literatur

[1] Bosch, R.; Beck, R.: Qualitätsorientierte Erneuerung des Bestandsnetzes. In: Deine Bahn 45 (2017), Nr. 5, S. 8 – 13

[2] Eisenbahn-Bundesamt: Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung II

[3] Gramer, M.: Die integrierte Investitions- und Instandhaltungsstrategie (3-i) bei der DB Netz AG. In: ETR – Eisenbahntechnische Rundschau (2013), Nr. 12. S. 12–15

[4] DB NETZE: Richtlinie 821, "Oberbau inspizieren" [5] Norm DIN EN 13306. 2017. DIN EN 13306: Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung [6] Meier, M.; Messerli, M.: RAM@Bahnnetz – differenzierte Verfügbarkeit im gesamten Bahnnetz. In: Signal + Draht 106 (2014), Nr. 6, S. 13 – 18 [7] Lange, S.; Koriath, H.; Hempe, T.: RAM Weiche – ein verfügbarkeitsorientierter Ansatz. In: Eisenbahn Ingenieur Kompendium (EIK) (2018), S. 15 – 32

#### Summar

## Cause-effect-link: Portray the connection between allocation of resources and infrastructure quality

The cause-effect link between investment and maintenance resources as well as the infrastructure quality can be portrayed and calculated by help of the developed prototypical software tool as well as by forecast and risk models. This includes the modules tracks, bridges, points, signal boxes and level crossings. So, the evaluation of different maintenance and financing concepts is possible as well.



41