

Ursache-Wirkung-Zusammenhang zwischen Mitteleinsatz und erzielter Infrastrukturqualität am Beispiel von Brücken

Jacke, Tobias^{1,*}, Dr.-Ing. Dickenbrok, Björn², Friesen, Nadine¹,
Grub, Alexandra¹, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nießen, Nils¹

¹ Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen (VIA)

² DB Netz AG, Frankfurt (Main), I.NPP

Zusammenfassung

Die Wirkung von Instandhaltungs- und Erneuerungsmitteln auf die Qualität von Eisenbahninfrastruktur ist nur schwer quantifizierbar. Daher wurde ein Modell zur Abbildung des Ursache-Wirkung-Zusammenhangs (UWZ) entwickelt, welches den Einfluss der eingesetzten Mittel auf die Infrastrukturqualität beschreibt. [1] Darauf aufbauend wurde ein prototypisches Rechenwerkzeug erstellt, welches den UWZ für die Infrastruktur der DB Netz AG abbildet. [2] Die betrachtete Infrastruktur umfasst dabei die relevanten Anlagenarten Brücken, Gleise, Weichen, Stellwerke und Bahnübergänge. Für diese Anlagenarten wurden jeweils separate Modelle entwickelt, welche den UWZ mittels Prognoseansätzen (Brücken und Gleise) sowie Risikoansätzen (Weichen, Stellwerke und Bahnübergänge) abbilden. Die vorliegende Ausarbeitung beschreibt die Abbildung des UWZ am Beispiel des Prognosemodells für die Zustandsentwicklung von Brücken.

Keywords: Infrastrukturfinanzierung, Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung, Qualitätskennzahlen, Brücken, Prognosemodell, Risikomodell, Ersatzinvestition, Erneuerung, Instandhaltung, Infrastrukturzustand, Zustandsentwicklung

1 Einleitung zum Ursache-Wirkung-Zusammenhang

Die DB Netz AG ist der größte Eisenbahninfrastrukturbetreiber in Deutschland. Um die Verfügbarkeit des Netzes auf einem hohen Niveau zu halten, sind Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen elementar. Hierfür werden überwiegend sowohl Mittel der Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung zwischen Bund und DB AG für die Erneuerung als auch Eigenmittel der DB AG für die Instandhaltung verwendet, um das Netz in einem guten Zustand zu erhalten. [3] Diese Mittel zielgerichtet und wirtschaftlich einzusetzen, ist eine der Hauptaufgaben in der Instandhaltungs- und Erneuerungsplanung der DB Netz AG. [4]

Basis für die bisherige Mittelverteilung ist die integrierte Investitions- und Instandhaltungsstrategie (3-i), welche mit Hilfe von qualitätsbasierten Lebenszyklusmodellen den Mittelbedarf über die erwartete Lebensdauer der Anlagen ausweist. [5, 6] Diesen Lebenszyklusmodellen wird ein definierter Qualitätsverlauf unterstellt. Damit ist es nicht möglich, die Qualitätsveränderungen bei verändertem Mitteleinsatz abzubilden. Diese Wechselwirkung zwischen Mitteleinsatz und Qualität modellhaft abzubilden, ist eine der Kernaufgaben des entwickelten UWZ, welcher schematisch in *Abbildung 0-1* dargestellt ist. Der Zusammenhang wird hierbei über den individuellen Anlagenzustand hergestellt, welcher mittels Verschleiß- und Risikomodellen in die Zukunft extrapoliert und durch den Mitteleinsatz für Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen verbessert werden kann.

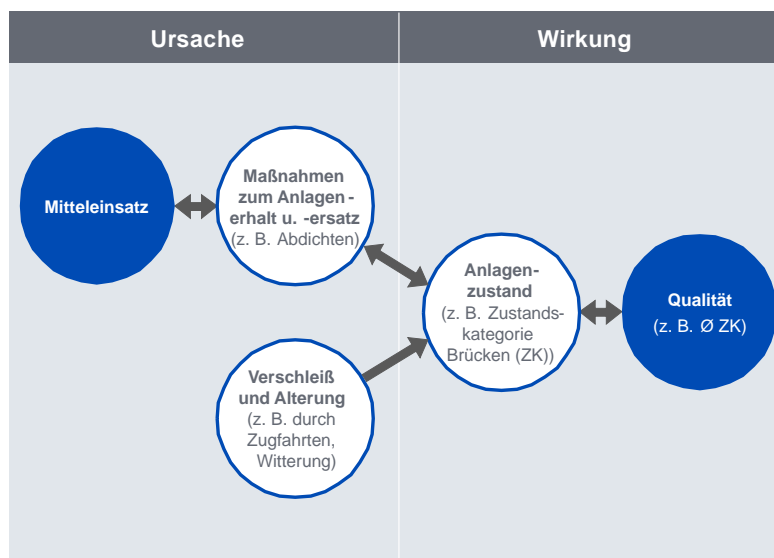


Abbildung 0-1: Schematische Darstellung des Ursache-Wirkung-Zusammenhangs zwischen Mitteleinsatz und Infrastrukturqualität

Im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsvorhabens wurde das Verkehrswissenschaftliche Institut der RWTH Aachen durch die DB Netz AG beauftragt, Modelle zur Beschreibung eines Ursache-Wirkung-Zusammenhangs in einem großen verkehrsträgerübergreifenden Benchmark zu sondieren und daraus Ansätze für die Nutzung bei der DB

Netz AG abzuleiten. [1] Darauf aufbauend wurde ein prototypisches Rechenwerkzeug entwickelt, welches auf Basis von Prognose- und Risikomodellen modular für die Anlagenarten Gleise, Brücken, Weichen, Stellwerke und Bahnübergänge den UWZ bidirektional berechnen kann. [2] Mit diesem prototypischen Rechenwerkzeug können sowohl notwendige Budgets bei vorgegebenen Qualitätszielen als auch erzielbare Qualitäten bei vorgegebenen Budgets ermittelt werden. [7] Die vorliegende Ausarbeitung beschreibt den UWZ anhand des Vorgehens im Modul Brücken.

2 Modul Brücken

Der wesentliche Vorgang im Modul für die Anlagenart Brücken innerhalb des UWZ-Werkzeugs ist die logische Auswahl von Brücken, um vordefinierte Ziele zu erreichen. Hierfür wurde ein vierstufiges System entwickelt, welches die Instandhaltung und Erneuerung von Brücken hinsichtlich der Zielgrößen Durchschnittsalter, durchschnittliche Zustandskategorie Brücken (\emptyset ZK) und Anzahl voll- und teilerneuerter Brücken der Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung mit dem Bund (QKZ ZuB) priorisieren kann.

Die vier Stufen (vgl. *Abbildung 0-2*) gliedern sich wie folgt auf:

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

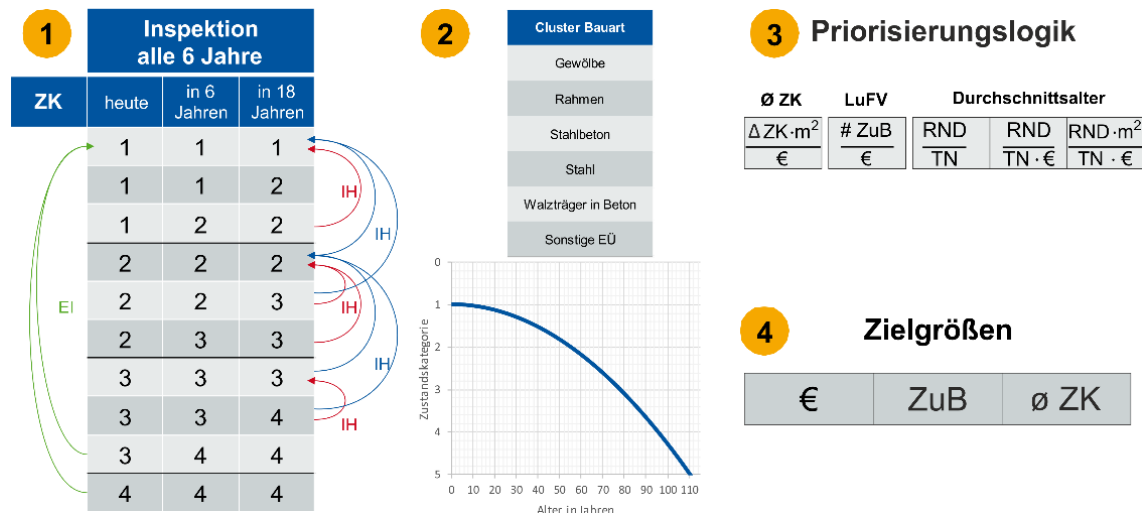


Abbildung 0-2: Vierstufiges Ablaufschema des Moduls Brücken

Anhand der vier Stufen soll das Modul Brücken im Folgenden vorgestellt werden.

2.1 Aktuelle Zustandsbewertung

In *Abbildung 0-2* sind unter dem Punkt 1 die möglichen Resultate von Inspektionen an Brücken der DB Netz AG dargestellt. Die Inspektion einer Brücke erfolgt alle 6 Jahre

und bewertet den Zustand mittels einer Zustandskategorie zwischen 1 und 4. Die Zustandskategorien geben einen Hinweis auf den wirtschaftlichen Aufwand für die Instandhaltung. So bedeutet 1 „neuwertig“ und 4 „nicht mehr wirtschaftlich instand zu halten“. Dabei ist eine Brücke der Zustandskategorie 4 immer noch verkehrs-, betriebs- und stand-sicher.

Zusätzlich hierzu wird bei einer Inspektion eine Prognose des Gesamtzustandes der Brücke in 6 Jahren und in 18 Jahren getätigt, sodass hierdurch Brücken derselben Zustandskategorie nach ihrer erwarteten Zustandsentwicklung unterschieden werden können. Somit werden Brücken mit Hilfe der drei Zustandskategorien beschrieben – der heutige Zustand sowie der prognostizierte Zustand in 6 beziehungsweise in 18 Jahren.

Bei der Auswahl der Maßnahmen Ersatzinvestition (EI) oder Instandhaltung (IH) ist zu berücksichtigen, in welcher Kategorie sich eine Brücke vor der Maßnahme befindet. Hierbei gilt es zu beachten, dass Brücken der Zustandskategorie 4 nur noch zur Ersatzinvestition vorzusehen sind. Zudem werden Brücken der Kategorie (3-4-4) ebenfalls für die Erneuerung vorgesehen, da bei diesen die wirtschaftliche Instandhaltung bereits bei der nächsten Inspektion nicht mehr gegeben sein wird. Brücken der Zustandskategorien (1-1-1) bis (3-3-4) werden durch Instandhaltungsmaßnahmen in ihrem Zustand verbessert, oder die Restnutzungsdauer verlängert.

2.2 Zustandsprognose

Um die Entwicklung einer Brücke über den gesamten Lebenszyklus zu beschreiben, wurden bereits im Jahr 1992 Standardalterungskurven je Bauart von der Firma Ernst Basler & Partner AG entwickelt (vgl. *Abbildung 0-3*), welche die Verschlechterung der Zustandskategorien ohne Instandhaltungsmaßnahmen aufzeigen sollen. [8] Diese Alterungskurven ermöglichen es theoretisch, die Zustandsentwicklung der Brücken zwischen zwei Maßnahmen zu prognostizieren und somit Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen zu planen (vgl. Schritt 2 in *Abbildung 0-2*). Im Rahmen der Projektbearbeitung wurden die Hypothesen dieser Standardalterungskurven hinsichtlich der technischen Nutzungsdauer einer Anlage und der theoretischen Verweildauer innerhalb einer Zustandskategorie angepasst.

Da der Alterungsverlauf von Brückenbauwerken von der Bauart abhängig ist, werden im UWZ diese gemäß der in *Abbildung 0-2* im Schritt 2 dargestellten Clusterung gruppiert. Der Einfluss von weiteren Clusterkriterien, wie der Belastung bei Stahlbrücken oder des Kreuzungspartners, wurde mittels einer Bestandsdatenauswertung analysiert. Auf Basis der vorliegenden Daten konnte kein plausibler Einfluss der Belastung oder des Kreuzungspartners auf den Alterungsverlauf festgestellt werden.

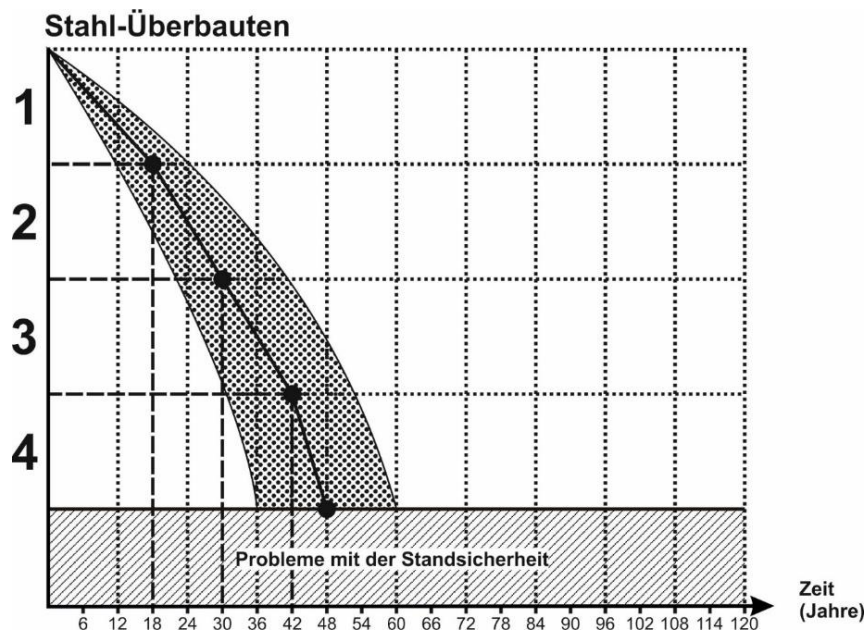


Abbildung 0-3: Standard-Alterungskurve für den Überbau aus Stahl [8]

Zur Prognose der Degradation einer Brücke wird die Historie der Zustandskategorien von 2001 bis 2017 betrachtet. Für die Auswertungen werden nur Brücken mit einer Zustandskategorie betrachtet, für die die aktuelle Zustandskategorie mit der prognostizierten in 6 und 18 Jahren übereinstimmt. Für die Zustandskategorien mit einer von der aktuellen Zustandskategorie abweichenden prognostizierten Zustandskategorie in 6 oder 18 Jahren müsste einerseits eine zeitliche, andererseits aber auch eine auf den Zustand bezogene Komponente einbezogen werden, was zu Uneindeutigkeiten führen kann.

Für diese Zustandskategorien wird für jede Bauform getrennt das mittlere Brückenalter bestimmt. Basierend auf [8] und eigenen Auswertungen ergibt sich als Modell eine quadratische Funktion. Hierbei ist der Punkt (1-1-1) (aktuelle Zustandskategorie - Prognose 6 Jahre - Prognose 18 Jahre) auf 0 Jahre festgesetzt und die Regressionsparabel bestimmt sich durch die Mittelwerte für die Zustandskategorien (2-2-2), (3-3-3) und (4-4-4) sowie durch das mittlere Alter bei Erneuerung aus den vorhandenen Erneuerungsdaten. Der Abstand zu diesen Punkten wird bezüglich der Summe der quadratischen Abweichung minimiert. Diese angepassten Kurven sind im Modell hinterlegt.

In *Abbildung 0-3* ist beispielhaft die Standard-Alterungskurve für Überbauten aus Stahl gegeben. [8] Hierbei ist ohne Instandhaltung bereits im Durchschnitt nach etwa 48 Jahren die Standfestigkeit der Brücke beeinträchtigt. Die Lebensdauer einer Brücke mit Instandhaltung ist jedoch deutlich länger und wird durch das durchschnittliche Alter bei Erneuerung abgebildet. Diese Verschlechterungsfunktionen sind beispielhaft für Stahlbrücken (Ältestes Bauteil aus Überbau und Unterbau) in *Abbildung 0-4* dargestellt.

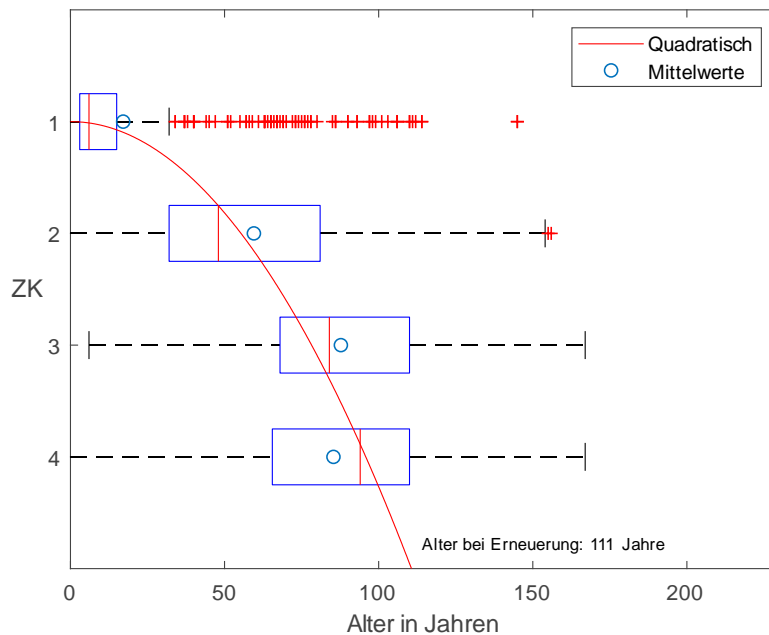


Abbildung 0-4: Auswertung der realen Verteilung der Zustandskategorien von Stahlbrücken mit Instandhaltung

Um die durchschnittliche Nutzungsdauer mit Instandhaltung und die Alterungskurve ohne Instandhaltung in Einklang zu bringen, wird der Ansatz des „fiktiven Brückenalters“ abhängig vom aktuellen Zustand gewählt. Dabei entspricht das fiktive Alter nicht dem tatsächlichen Bauwerkalter, sondern dem im Modell hinterlegten zustandsbasierten Alter der Modellbrücke. Das fiktive Alter ergibt sich hierbei durch den Schnittpunkt des jeweiligen Zustandes mit der Alterungskurve. Dieses fiktive Brückenalter ermöglicht es zudem, die nicht über einen entsprechend langen Zeitraum vorliegende Datenhistorie zu Instandhaltungsmaßnahmen auszugleichen und vermeintlich gute Brücken mit vermeintlich schlechten vergleichbar zu machen. Der Einfluss der teilweise besseren Instandhaltungshistorie wird damit ausgeglichen.

Mithilfe der Zustandsprognose (Verschlechterungsfunktion) wird das Modell in die Lage versetzt, die Zustandsentwicklung abzuschätzen und Szenarien für Instandhaltungsstrategien zu entwickeln. Gekoppelt mit den Anlageneigenschaften ist es zudem möglich, auf Anlagenebene eine Priorisierung der Maßnahmen vorzunehmen.

2.3 Priorisierung

Zur Bewertung der verschiedenen theoretisch möglichen Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen ist es elementar, ein Bewertungsschema zu entwickeln. Das Bewertungsschema gibt an, welcher Nutzen mit einer Maßnahme in Bezug auf die Verbesserung des Zustands erreicht werden kann (vgl. Schritt 3 in *Abbildung 0-2*). Sind die Maßnahmen

und die Mengen bekannt, kann über Einheitspreise der monetäre Gesamtaufwand angegeben werden. Für die Anlagenart Brücken werden Maßnahmenbündel, welche aus verschiedenen Instandhaltungsaktivitäten bestehen, bauform- und zustandsabhängig definiert, um den Zustand einer Brücke entweder um eine Zustandskategorie zu verbessern oder die Verweildauer des Bauwerks innerhalb der bestehenden Zustandskategorie zu verlängern. Die Zielkategorie nach einer Instandhaltungsmaßnahme ist immer die beste Prognose für 6 und 18 Jahre innerhalb der jeweiligen Zustandskategorie (vgl. *Abbildung 0-2* Abschnitt 1; (1-1-1), (2-2-2), oder (3-3-3)). Eine Ersatzinvestition (Neubau) versetzt das Bauwerk immer in die Kategorie (1-1-1).

Es gilt weiterhin der Zusammenhang, dass zur Verbesserung des Zustandes beispielsweise von einer Kategorie (3-3-4) auf (2-2-2) ein größerer Maßnahmenumfang notwendig ist, als bei einer Verbesserung von (3-3-3) auf (2-2-2). Das erste beispielhafte Maßnahmenbündel ist somit teurer als das zweite. Durch diese Unterscheidung lässt sich eine Priorisierung über die Wirkung und Kosten eines Maßnahmenbündels realisieren.

Zur Bewertung der Maßnahmenbündel werden Priorisierungslogiken angewendet, welche die Maßnahmenbündel der Brücken hinsichtlich gezielter Fragestellungen nach Nutzen sortieren können. So wird für die Qualitätsgröße QKZ ZuB die Erneuerung einer Brücke je Kosten aufgetragen. Ziel dieser Qualitätskenngröße aus der LuFV ist es, möglichst viele Bauwerke voll oder teil zu erneuern, sodass hierbei vor allem günstige Ersatzinvestitionsmaßnahmen priorisiert werden. Wichtig in dieser Bewertung ist, dass sich die voll- und teilerneuterten Bauwerke um mindestens eine Zustandskategorie verbessern. [3] Durch die momentane Bewertung der Brücken über eine gesamthafte Zustandskategorie, kann zurzeit noch nicht zwischen voll- und teilerneuterten Brücken unterschieden werden, da die Wirkung einer Teilerneuerung, beispielsweise die Erneuerung aller Überbauten, im Modell nicht abgebildet werden kann. Daher wird im aktuellen Stadium des Prototyps nur die Vollerneuerung priorisiert.

Bei der Qualitätsgröße der durchschnittlichen Zustandskategorie (\emptyset ZK) wird die Verbesserung der Zustandskategorie zusätzlich mit der Bauwerksfläche gewichtet. Zudem wird hier gesamthaft der Zustand aller Brücken bewertet, sodass im Gegensatz zur QKZ ZuB auch Instandhaltungsmaßnahmen relevant werden. Diese Priorisierung wird daher auch Instandhaltungsmaßnahmen gewichten, welche über alle Brücken gesehen den größten Nutzen bei der Verbesserung der durchschnittlichen Zustandskategorie in Abhängigkeit von den eingesetzten Mitteln generieren.

Zuletzt kann die Senkung des fiktiven zustandsbasierten Durchschnittsalters über den Vergleich der gewonnenen technischen Nutzungsdauer je Kosten priorisiert werden. Dieses Kriterium ist relevant, da die beiden weiteren Qualitätskenngrößen den Faktor Nachhaltigkeit ausklammern. In der QKZ ZuB ist es ratsam, möglichst viele kleine Brücken

zu erneuern und dafür das Budget zu optimieren; Instandhaltungsmaßnahmen werden hierbei vernachlässigt. Im Gegensatz dazu werden bei der durchschnittlichen Zustandskategorie (\emptyset ZK) nur diejenigen Brücken priorisiert, welche beim vorgegebenen Geldeinsatz die größte Wirkung bezogen auf die Gesamtfläche aller Brücken erzeugen. Demgegenüber priorisiert der Faktor Durchschnittsalter den Geldeinsatz je Jahr gewonnener technischer Nutzungsdauer. Hierbei werden die Maßnahmen entsprechend dem Lebenszyklus der Brücke ausgewählt, um jeweils den größtmöglichen Nutzen zu erzielen.

2.4 Maßnahmenauswahl

Bei der Auswahl der Maßnahmen gilt es, unterschiedliche Anforderungen zu berücksichtigen und das jeweilige Optimierungsproblem dahingehend anzupassen. Unter Punkt 4 in *Abbildung 0-2* ist das Optimierungsproblem in Form der drei Zielgrößen dargestellt. Die drei Optimierungsfelder Kosten (€), Anzahl voll- oder teilerneuerter Brücken (QKZ ZuB) und durchschnittliche Zustandskategorie Brücken (\emptyset ZK) sind teilweise konträr zueinander, sodass eine Auswahl der Zielgröße notwendig wird.

Die durchschnittliche Zustandskategorie (\emptyset ZK) stellt eine DB Netz-interne Qualitätskenngröße dar, welche den Zustand einer Brücke mit der Bauwerksgröße gewichtet. Hiernach sind besonders diejenigen Bauwerke von Relevanz, welche besonders groß sind und bei geringem Maßnahmenbedarf eine Verbesserung in der Zustandskategorie erhalten. Daher bevorzugt der Maßnahmenkatalog besonders diejenigen großen Brücken, welche in der Durchschnittsbildung die meiste Auswirkung haben und nicht diejenigen, welche klein sind, aber dafür einen schlechten Zustand aufweisen. Zudem erfolgt die Qualitätssteuerung über Instandhaltungsmaßnahmen, da diese im Verhältnis günstiger als Erneuerungsmaßnahmen sind.

Umgekehrt wird bei der QKZ ZuB innerhalb der LuFV gefordert, dass sich eine vorgegebene Anzahl Brücken durch Voll- und Teilerneuerung um mindestens eine Zustandskategorie verbessert. [3, 9] Zur Erfüllung dieser Anforderung eignen sich nach dem Modell besonders kleine Brücken, welche mit möglichst geringem Erneuerungsbudget um mindestens eine Zustandskategorie verbessert werden können. Hier kommt es allein auf die Menge der Brücken an. Somit steht diese Optimierung teilweise im Gegensatz zur durchschnittlichen Zustandskategorie (\emptyset ZK).

Um eine nachhaltige Lösung sowohl zur Erfüllung der QKZ ZuB als auch zur Optimierung der durchschnittlichen Zustandskategorie ausgeben zu können, wird eine Kombination der Priorisierungslogiken notwendig. Ziel dieser Optimierung ist es, bei einem vorgegebenen Budget sowohl einen Anteil zur Erfüllung der QKZ als auch eine gute durchschnittliche Zustandskategorie zu erhalten. Hierbei wird der Fokus auf die langfristige Wirkung (Nachhaltigkeit) der Maßnahmen an den Brücken gelegt, indem der Nutzen der

Maßnahme über die gewonnene zusätzliche durchschnittliche Nutzungsdauer beschrieben wird.

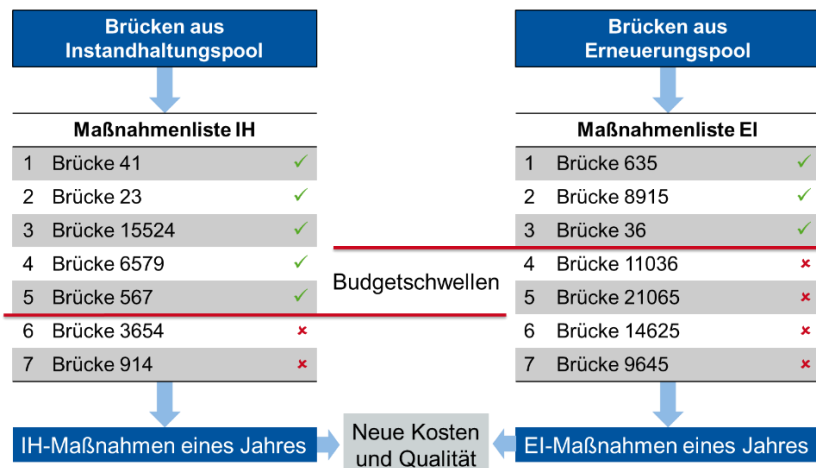


Abbildung 0-5: Vorgehen bei der Maßnahmenauswahl nach der Priorisierung

Das Ergebnis der Maßnahmenauswahl ist eine Aussage, wie viele Ersatzinvestitions- oder Instandhaltungsmaßnahmen für Brücken zur Erreichung einer gewissen Qualität vorzusehen sind oder bei einem gewissen Budget vorgesehen werden können. Dabei werden auch ohne zustandsverbessernde Maßnahmen laufende Kosten, beispielsweise für Inspektion und Wartung, für das jeweilige Bauwerk berücksichtigt. Wichtig hierbei ist, dass der Nutzer im Vorhinein eine Strategie vorgibt, nach welcher die Maßnahmenpakete der Brücken sortiert werden sollen. Den Umfang der individuellen Maßnahme je Brücke bestimmt hierbei sowohl die Wirkung auf die Qualitätskenngröße als auch die Kosten (Menge-mal-Preis-Logik).

Im dargestellten Schritt in *Abbildung 0-5* werden die priorisierten Maßnahmen dem vorgegebenen Budget gegenübergestellt, um die Menge an durchzuführenden Maßnahmenpaketen zu bestimmen. Diese Menge wirkt sich je Jahresscheibe direkt auf die zu erwartende Qualität aus. Das Modell stößt pro betrachteter Jahresscheibe einen Durchlauf an, um die Entwicklung der Qualitätskenngrößen ableiten zu können. Über die Definition eines Zielhorizontes ist es zudem möglich, eine Zielqualität je Jahresscheibe vorzugeben und die hierfür erforderlichen jährlichen Budgets zu errechnen.

3 Ausgewählte Ergebnisse des Moduls Brücken

Im Rahmen des Tests und der Validierung des UWZ-Werkzeugs zeigte sich, dass das Modul Brücken plausible Ergebnisse liefert. Im Folgenden wird eine Auswahl vorgestellt. Exemplarisch soll die Rechenrichtung „Budgets sind gegeben – Qualität wird berechnet“ einmal mit einem festen Budgetszenario und unterschiedlichen Priorisierungslogiken

(Variante 1-3) sowie einer festen Priorisierungslogik und unterschiedlichen Budgetszenarien (Szenario 1-5) vorgestellt werden. Die Varianten unterscheiden sich hierbei in der Auswahl der Priorisierungslogik. Die Variante 1 priorisiert gezielt für die Qualitätskenngröße der durchschnittlichen Zustandskategorie (\bar{ZK}), Variante 2 nach der Anzahl voll- oder teilerneuerter Brücken (QKZ ZuB) und die Variante 3 nach der Maximierung der Restnutzungsdauer.

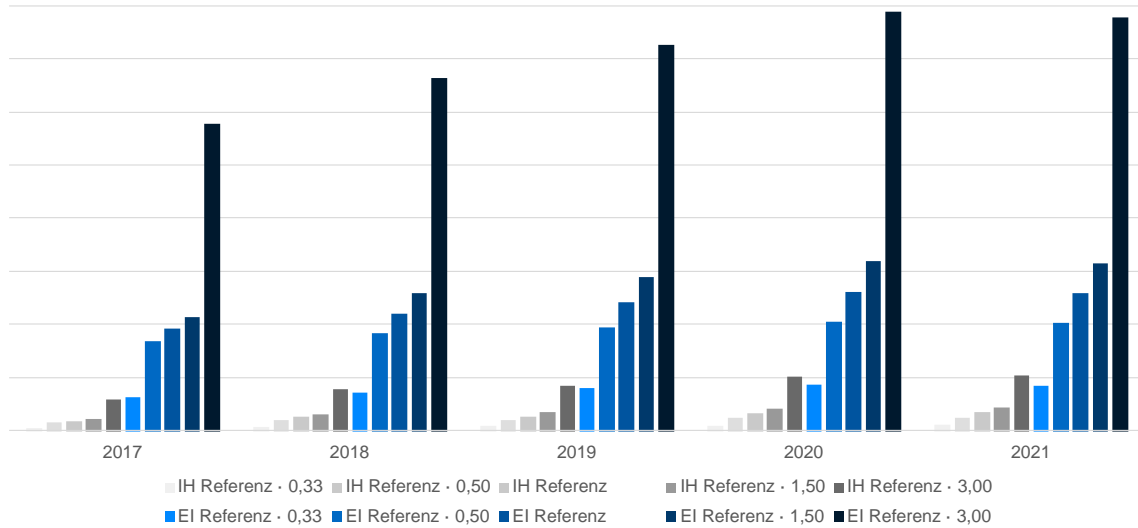


Abbildung 0-6: Übersicht der vorgegebenen Budgetverteilung zur Testung des Moduls Brücken (Budgetszenarien 1-5)

In Abbildung 0-6 sind die Eingangsgrößen für die Instandhaltungs- und Erneuerungsbudgets der Rechenrichtung „Budgets sind vorgegeben – Qualität wird berechnet“ für den Testlauf des Moduls Brücken dargestellt. Hierbei existiert ein Referenzszenario, welches wie dargestellt in Alternativszenarien faktorisiert wird. Dies soll testen, wie das Modul auf weniger und mehr qualitätsverbesserndes Budget reagiert.

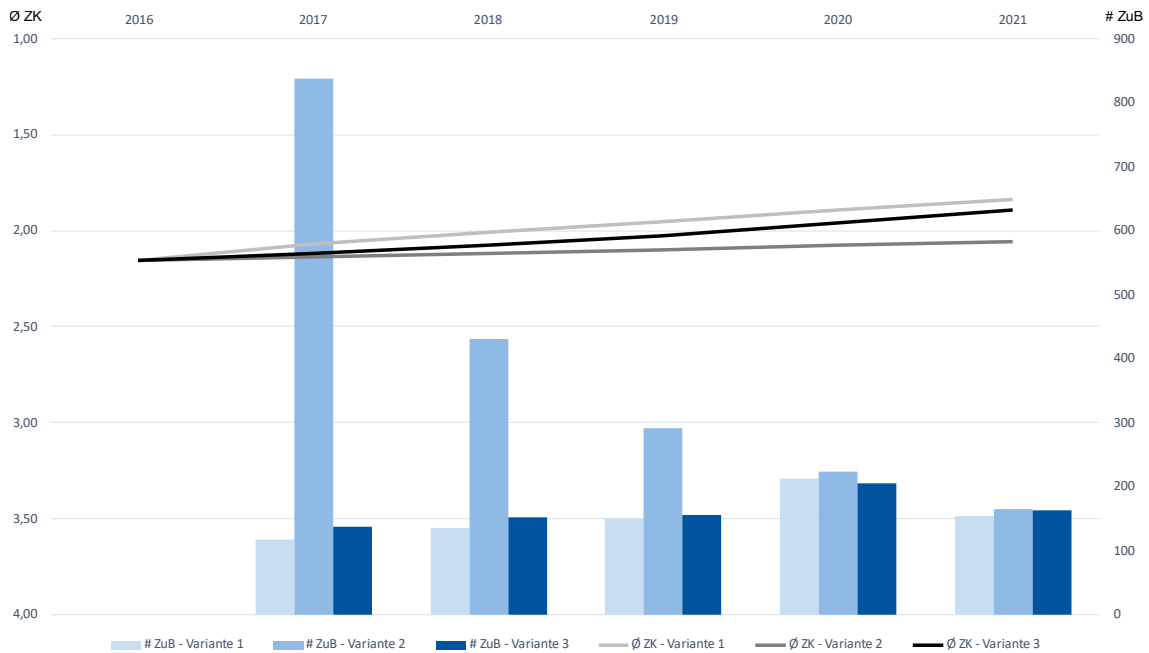


Abbildung 0-7: Ergebnisse für die durchschnittliche Zustandskategorie und QKZ ZuB der Varianten 1 bis 3

In *Abbildung 0-7* sind nun die errechneten Qualitätsgrößen für das Referenzszenario aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, dass in allen drei Varianten eine Verbesserung der durchschnittlichen Zustandskategorie ($\bar{\text{ZK}}$) eintritt. Hierbei bietet bei gleichem Budget die Variante 1 den größten Qualitätshub, da hier die Priorisierungslogik perfekt zur Zielgröße passt. Eine Verbesserung der $\bar{\text{ZK}}$ ist auch in den Varianten 2 (Priorisierung ZuB) und 3 (Optimierung der Restnutzungsdauer) eingetreten, jedoch liegt hier der Fokus einmal auf der Maximierung der Anzahl zu erneuernder Brücken und einmal auf der Reduzierung des fiktiven Gesamtanlagenalters.

Bei den voll- und teilerneuterten Brücken zeigt sich, dass die Priorisierung der Variante 2 die meisten Brücken ausweist. Bei dieser Priorisierung werden vor allem kleine Brücken mit geringem finanziellem Aufwand erneuert. Die übrigen Varianten weisen deutlich weniger erneuerte Brücken bei demselben Budget auf. Jedoch liegt auch hier der Fokus bei anderen Zielgrößen.

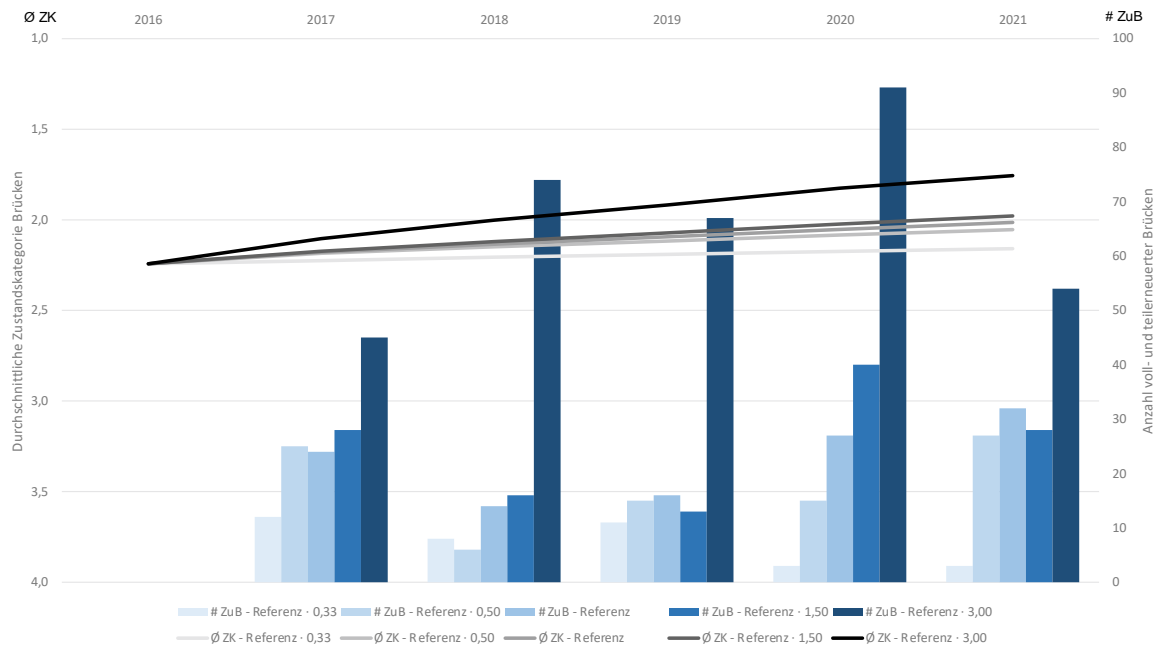


Abbildung 0-8: Ergebnisse für die durchschnittliche Zustandskategorie und QKZ ZuB der Budgetszenarien 1-5

In der Auswertung in *Abbildung 0-8* für einen beispielhaften Regionalbereich zeigt sich, dass die Budgetszenarien bei der zur Priorisierung passenden Qualitätsgröße $\bar{Z}K$ das erwartete Ergebnis zeigen. Das geringste qualitätsverbessernde Budget weist die geringste Qualität auf. Umgekehrt weist das größte Budget auch die beste Qualität aus. Es fällt jedoch auf, dass selbst bei geringem Budget zunächst eine Qualitätsverbesserung eintritt, da das Budget zusätzlich zur Wartung und Pflege für Qualitätsverbesserung vorgesehen ist. Rechnungen über 30 Jahre haben gezeigt, dass sich diese Tendenz umkehrt, da die Brücken im Modell altern und ab einem gewissen Punkt das Budget nicht ausreicht, diese Verschlechterung zu kompensieren.

Bei der Anzahl der voll- und teilerneuerter Brücken zeigt sich ein diverses Bild. Dadurch, dass nicht per se die günstigsten, sondern sinnvollsten Brücken für die $\bar{Z}K$ priorisiert werden, kommt es bei fast allen Varianten zu unterschiedlichen Anzahlen an erneuerten Brücken. Lediglich die Variante mit dem dreifachen Budget erneuert immer die meisten Brücken. Hierbei ist zu beachten, dass sich das sogenannte „Rucksackproblem“ an der Budgetschwelle zeigt. Da die Brücken nicht nach Kosten alleine, sondern nach Nutzen für die $\bar{Z}K$ je Kosten priorisiert sind, können große teure Brücken priorisiert werden, welche das Budget übersteigen. In diesem Fall werden Brücken nachpriorisiert, welche weiter unten in der Liste stehen. So ist es möglich, dass in Varianten mit weniger Budget mehr Brücken erneuert werden. Diese haben dann jedoch in Summe einen geringeren Einfluss auf die $\bar{Z}K$, welches auch die Qualitätsverläufe widerspiegeln.

4 Fazit und Ausblick

Wie die Ergebnisse der Validierung des Moduls Brücken zeigen, lässt sich mit Hilfe von Prognoseansätzen der Ursache-Wirkung-Zusammenhang zwischen Mitteleinsatz und Infrastrukturqualität herleiten. Es zeigt sich, dass das Modell individuell auf unterschiedliche Budgetszenarien, und genauso auf unterschiedliche Fragestellungen der Priorisierung reagieren kann. Die berechneten Ergebnisse sind unter den vorgegebenen Randbedingungen plausibel. Zudem stellt sich heraus, dass bei der Auswahl der Priorisierung Augenmerk auf die gewünschte Zielgröße gelegt werden muss. Nur wenn die Priorisierungslogik mit der Zielgröße harmoniert, werden auch sinnvolle Ergebnisse erzielt. Ähnliche Ergebnisse zeigen auch das Prognosemodul für Gleise und die Risikomodule für Weichen, Stellwerke und Bahnübergänge.

Das prototypische Rechenwerkzeug kann um weitere Module ergänzt werden. So ist es denkbar, ein Modul für Oberleitung, sowie ein Modul für Tunnel zu erstellen. Je mehr Anlagenarten abgedeckt werden, desto mehr Budget kann mittels des UWZ bewertet werden. Mit den aktuellen Modulen lassen sich laut interner DB Netz-Auswertung je nach Zielgröße bereits 84 – 100 % der DB Netz-internen sowie LuFV-Kenngrößen mit Bezug zur DB Netz AG abbilden.

Zukünftig muss der UWZ von der modellhaften idealen Welt mehr in Richtung Realität weiterentwickelt werden. So sind aktuell noch unbegrenzte Instandhaltungs- und Erneuerungsmengen möglich. Gerade unter Berücksichtigung eines für den Kunden möglichst verträglichen Bauvolumens und des Planungsvorlaufs von Maßnahmen, wären solche Ad-hoc-Pakete nicht realistisch umsetzbar. Daher gibt der UWZ aktuell aus, was theoretisch möglich wäre. Die Berechnung der Abweichung zu dieser Zielgröße durch die vorhandene Instandhaltungs- und Erneuerungsplanung könnte zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit genutzt werden. Zusätzlich müssten die Aspekte des kundenfreundlichen Bauens Einfluss in das Modell finden, da zur Erhaltung von Restkapazitäten für Zugfahrten meist teurere Bauverfahren umgesetzt werden müssen. Dies ist aktuell Stand der Forschung in der Eisenbahnbetriebswissenschaft. [10]

Literaturverzeichnis

- [1] NIEBEN, N. ; FRIESEN, N. ; MEIRICH, C. ; WALKE, T.: *Ursache-Wirkung-Zusammenhang: Mitteleinsatz / Infrastrukturqualität : Vorstudie Maßnahmenwirkung*. Gutachten im Auftrag der DB Netz AG. Aachen, 2017 (unveröffentlicht)
- [2] NIEBEN, N. ; FRIESEN, N. ; GRUB, A. ; JACKE, T.: *Ursache-Wirkung-Zusammenhang: Mitteleinsatz / Qualität : Hauptstudie Erstellung Prototyp*. Gutachten im Auftrag der DB Netz AG. Aachen, 2018 (unveröffentlicht)
- [3] EISENBAHN-BUNDESAMT: *Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung II* (idF v. 1. 1. 2015) (2015-01-01). URL https://www.eba.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Finanzierung/LuFV/Einstellen_LuFV_II.pdf?__blob=publicationFile&v=3 – Überprüfungsdatum 2018-11-05
- [4] BOSCH, R. ; BECK, R.: *Qualitätsorientierte Erneuerung des Bestandsnetzes*. In: *Deine Bahn* 45 (2017), Nr. 5, S. 8–13
- [5] GRAMER, M.: *Die Instandhaltung im Rahmen der 3-i Strategie bei der DB Netz AG*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau (ETR)* 59 (2010), Nr. 4, S. 166–169
- [6] GRAMER, M.: *Die integrierte Investitions- und Instandhaltungsstrategie (3-i) bei der DB Netz AG*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau (ETR)* 62 (2013), Nr. 12, S. 12–15
- [7] JACKE, T. ; DICKENBROK, B. ; FRIESEN, N. ; GRUB, A. ; NIEBEN, N.: *Ursache-Wirkung-Zusammenhang: Zusammenhang zwischen Mitteleinsatz und Infrastrukturqualität abbilden*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau (ETR)* 68 (2019), Nr. 9, S. 37–41
- [8] ERNST BASLER & PARTNER AG: *Instandhaltungskonzept Brücken*. Basel, 1992
- [9] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR; FERLEMANN, Enak (Mitarb.): *Bericht des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur zum Infrastrukturzustands- und entwicklungsbericht (IZB) 2016 der Deutschen Bahn AG (DB AG)*. Berlin, 12.10.2018
- [10] JACKE, T.: *Möglichkeiten zur Reduzierung der Betriebseinschränkungen von Baustellen* (Fachtagung Eisenbahnrecht und Technik (FET)). Frankfurt (Main), 09.04.2019. URL https://www.eba.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Vortraege/2019_FET/2019-04_09_Fachtagung_Eisenbahnrecht_und_Technik_Moeglichkeiten_zur_Reduzierung_der_Betriebseinschraenkungen_von_Baustellen.pdf?__blob=publicationFile&v=5

Autoren



Jacke, Tobias

Tobias Jacke studierte bis 2015 Bauingenieurwesen an der RWTH Aachen und arbeitet seitdem als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen im Bereich Eisenbahnbetriebswissenschaft, welchen er seit 2018 als Gruppenleiter vertritt.



Dickenbrok, Björn

Dr.-Ing. Björn Dickenbrok studierte bis 2004 Bauingenieurwesen an der RWTH Aachen und promovierte anschließend am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen. Seit 2010 arbeitet er bei der DB Netz AG unter anderem als Teilprojektleiter „Ursache-Wirkung-Zusammenhang“ und aktuell als Leiter des Teams „Data Science @ DB Netz AG“.



Friesen, Nadine

Nadine Friesen studierte bis 2016 Mathematik an der RWTH Aachen und arbeitet seitdem als Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen im Bereich Eisenbahnbetriebswissenschaft.



Grub, Alexandra

Alexandra Grub studierte bis 2017 Mathematik an der RWTH Aachen und arbeitet seitdem als Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen im Bereich Eisenbahnbetriebswissenschaft.



Nießen, Nils

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nils Nießen leitet seit 2013 das Verkehrswissenschaftliche Institut der RWTH Aachen. Nach dem Studium des Bauingenieurwesens und der Wirtschaftsgeographie an der RWTH Aachen promovierte er dort 2008. Anschließend war er Projekt-Ingenieur bei HaCon in Hannover und Geschäftsführer der VIA Consulting & Development GmbH.