

# Planung der Infrastrukturinstandhaltung mit Predictive Maintenance

Die Eisenbahninfrastruktur ist eine der von der EU ausgewiesenen sogenannten „kritischen“ Infrastrukturen, die von wesentlicher Bedeutung für die Aufrechterhaltung wichtiger gesellschaftlicher Funktionen sind. An sie werden viele Anforderungen gestellt und sie muss zuverlässig sowie betriebssicher funktionieren. Dazu muss sie regelmäßig inspiziert und zum weiteren betrieblichen Erhalt instandgesetzt werden. Diese Instandhaltung wird derzeit zumeist planmäßig vorbeugend durchgeführt. Es wäre aber möglich, dies prädiktiv basierend auf der Zustandsbewertung durchzuführen. Dazu müssten die Instandhaltungsarbeiten selbst, aber auch die Planung und Steuerung angepasst werden. Dies wurde 2021 durch die DB Systemtechnik für das Deutsche Zentrum für Schienenverkehrsforschung (DZSF) im Rahmen der Studie „Systematisierung der Infrastruktur-Instandhaltungsplanung und Beschreibung der Anwendung von Predictive Maintenance“ untersucht. Nachfolgend werden die Anpassungen an der Planung und Steuerung vorgestellt.



## 1. Vorstellung der prädiktiven Instandhaltung

Im Allgemeinen werden im industriellen Umfeld vier Instandhaltungssysteme unterschieden, die nach dem Grad der Spezialisierung angeordnet werden [1]. Sie bauen zumindest für die Eisenbahninfrastruktur aufeinander auf. Das bedeutet, dass ein spezialisiert ausgeprägtes Instandhaltungssystem in der Regel nicht allein, sondern immer in Kombination mit weniger spezialisierten Strategien angewendet wird (Bild 1). Die schadensabhängige Instandhaltung, bei der eine Instandsetzung nur erfolgt, sofern ein Defekt vorliegt, kann für sich allein stehen. Die planmäßig vorbeugende Instandhaltung [2], bei der eine Instandsetzung erfolgt, sobald ein zeitlicher oder physischer Grenzwert überschritten ist, wird mit schadensabhängiger Instandhaltung kombiniert, z. B. bei Vandalismus. Die nächste Steigerung ist die zustandsbasierte Instandhaltung (engl. Condition Based Maintenance – CBM), bei der durch kontinuierliche Zustandserfassung mittels automatisierter Systeme (z. B. mittels Sensoren oder Kameras) die Erreichung

von Grenzen ohne manuelle Inspektionen erkannt wird. Eine weitere Spezialisierung der Instandhaltung stellt die prädiktive Instandhaltung (engl. Predictive Maintenance – PM) dar. Hierbei wird zusätzlich auf Grundlage der Daten aus der zustandsbasierten Instandhaltung durch Systemmodelle der Ausfallzeitpunkt von Infrastrukturelementen vorhergesagt.

## 2. Planung und Steuerung der Instandhaltung

Instandhaltungsmaßnahmen müssen sorgfältig geplant und in ihrer Ausführung gesteuert werden. Je spezialisierter das Instandhaltungssystem ist, desto komplexer sind die Planung und Steuerung der Instandhaltung. Einige Maßnahmen lassen sich nicht in ein spezialisierteres Instandhaltungssystem übertragen, ob aus der Aufgabe selbst heraus (z. B. altern manche Schmierstoffe zeitbasiert) oder aus Gründen der Effizienz. So ist z. B. die Investition in Sensorik für prädiktive Instandhaltung bei selten genutzten Anlagen möglicherweise nicht lohnend. Dies muss bereits bei der strategischen Planung und Ausrich-



### M. Eng. Georg Ermer

Seit November 2016 bei der DB Systemtechnik GmbH. Seit 2018 im Bereich Zustandsbasierte IH-Systeme, Prozesse & Technologien

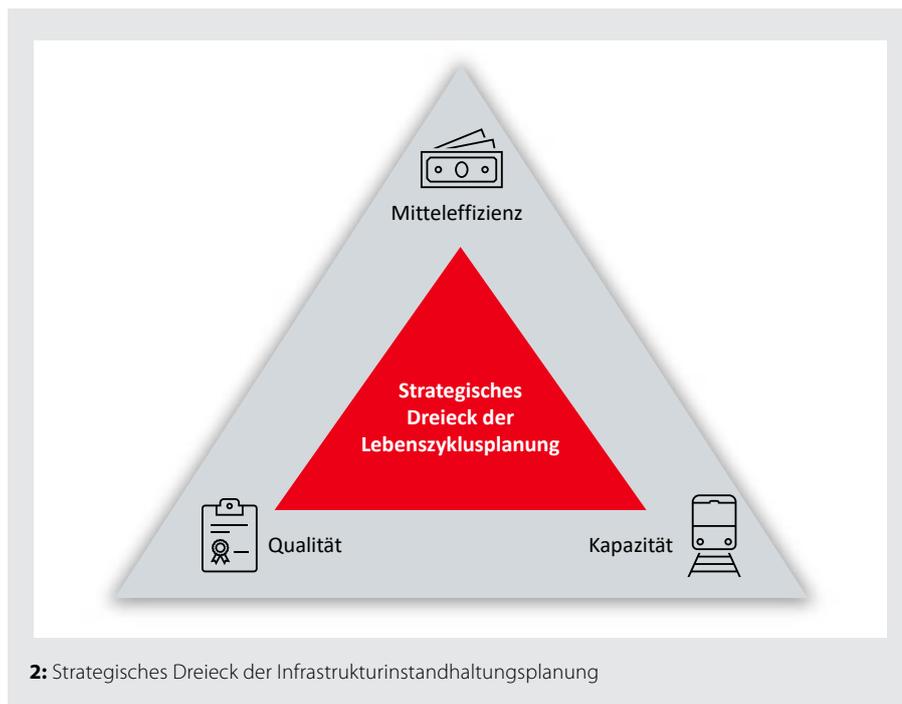
georg.ermer@  
deutschebahn.com



### Dipl.-Math. oec. Axel Simroth

Seit September 2020 tätig als Wissenschaftlicher Referent am Deutschen Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt, Forschungsbereich Digitalisierung, Automatisierung, Migration und Recht

SimrothA@dzsf.bund.de



tion des gesamten Instandhaltungskonzeptes beachtet werden. Da die Instandhaltungssysteme aufeinander basieren, ist es notwendig, bei der Einführung von prädiktiven Ansätzen die bestehende Planung und Steuerung zu ergänzen, statt sie komplett neu zu gestalten.

Die Instandhaltungsplanung und -steuerung unterstützt die Zielstellung, eine sichere und leistungsfähige Eisenbahninfrastruktur im Interesse der Kunden sowie eine wirtschaftliche Organisation im Eigen-

interesse (Mittelleffizienz) zu gewährleisten. Leistungsfähigkeit bedeutet in diesem Kontext eine ausreichend hohe Verfügbarkeit (Kapazität) und Zuverlässigkeit der Infrastruktur (Qualität), um den sicheren Betrieb zu gewährleisten [3]. Die Planung hat damit die Aufgabe, eine ideale Balance aller drei Zieldimensionen zu finden: die Sicherung einer hinreichenden Qualität des Netzes bei möglichst geringer Betriebseinschränkung und einer maximal effizienten Instandhaltungsdurchführung (minimaler

Ressourceneinsatz) unter den vorgegebenen Sicherheitsanforderungen (Bild 2).

**3. Systematisierung der Planung, Steuerung und Erweiterung durch prädiktive Instandhaltung**

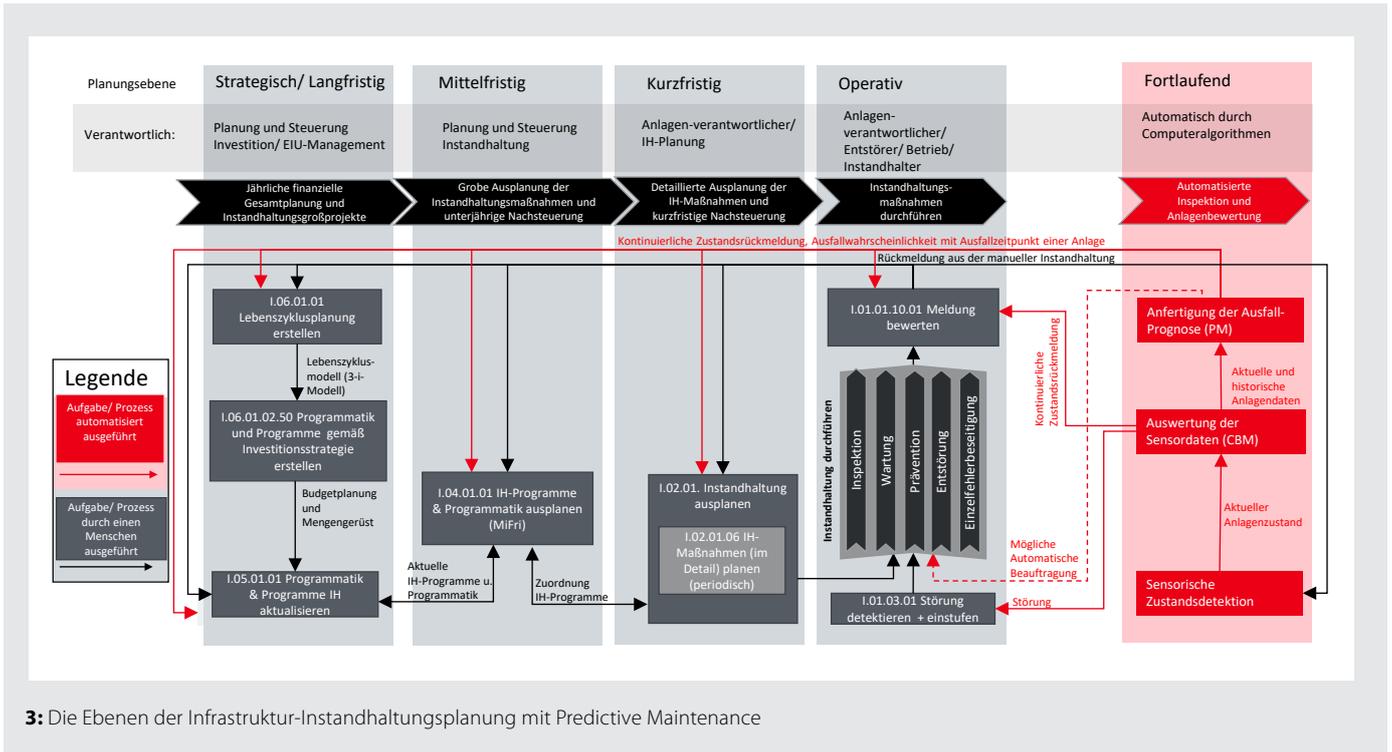
Die Planung und Steuerung teilen sich bei herkömmlicher planmäßigvorbeugender Instandhaltung in vier Ebenen auf [4]:

Die langfristige Planung identifiziert die zukünftigen Instandhaltungsbedarfe (hervorgerufen z.B. durch die Alterung von Bestandsanlagen) und damit verbundene strategische Großprojekte und schafft einen Handlungsrahmen für diese Arbeiten. Der Planungshorizont liegt hier typischerweise bei fünf Jahren und darüber hinaus.

Die Mittelfristplanung untersetzt die langfristige Planung, indem IH-Programme auf Regionen, Anlagengruppen und Jahresscheiben verteilt werden. Die Aktualisierung und Anpassung der Programme aus der langfristigen Planung erfolgt in der Mittelfrist für die kommenden fünf Jahre. In der kurzfristigen Planung werden die konkreten IH-Aufträge geformt und mit den Vorgaben aus der Mittelfristplanung vereint. So wird eine zielorientierte und priorisierte Maßnahmenplanung forciert.

Die Ebene des operativen Betriebes verantwortet die konkrete Ausführung der geplanten Instandhaltungsaufträge und das kurzfristige Reagieren auf Störungen. Nach abgeschlossener Instandhaltungsmaßnahme werden Rückmeldungen aus diesen Arbeiten für die Planung und Steuerung bewertet und das weitere Handeln daraus abgeleitet. Funktioniert die Anlage ordnungsgemäß, wird dies entsprechend in der Instandhaltungsplanung aufgenommen, andernfalls müssen weitere Instandsetzungsmaßnahmen erfolgen.

Diese bestehende Systematisierung der Instandhaltungsplanung wird durch die Möglichkeiten der prädiktiven Instandhaltung erweitert. Durch eine Automatisierung der Inspektion kann der Anlagenzustand in Hinblick auf die voreingestellten Grenzwerte automatisiert bewertet werden (CBM). Darüber hinaus kann aus dieser Zustandsdiagnose eine Prognose für den zukünftigen Anlagenzustand erstellt werden (PM). Die Ergebnisse der automatisierten Diagnose und Prognose werden dann der Planung und Steuerung zur Verfügung gestellt. Sofern gewünscht, könnten sich ergebende Instandhaltungsmaßnahmen auch automatisiert beauftragt werden.



Fasst man diese Planungs- und Steuerungsprozesse unter Mitwirkung einer prädiktiven und zustandsbasierten Instandhaltung zusammen, können die Planungsebenen um eine fortlaufende, automatische Ebene ergänzt werden, wie im folgenden Schema (Bild 3) dargestellt.

**4. Anwendung von PM in der Planung und Steuerung**

Durch ein kontinuierliches Monitoring der Anlage ist den Anlagenverantwortlichen der aktuelle Zustand (Health Index – siehe Bild 4) [5] bekannt. Dieser Index nimmt mit Dauer der Nutzung ab. Die Aufgabe der Planung und Steuerung ist es, den Zeitpunkt einer Instandhaltungsmaßnahme so zu terminieren, dass die Anlage möglichst lange ohne Einschränkungen genutzt werden kann. Eine Instandhaltungsmaßnahme sollte also möglichst kurz vor dem Ende der verbleibenden Lebens- bzw. Nutzungszeit (engl. Remaining Useful Lifetime — RUL [5] – siehe Bild 4) einer Anlage stattfinden. Der Verlauf der Verschlechterung einer Anlage bis zu diesem Zeitpunkt hängt dabei von der individuellen Anlage ab (z.B. verschleißt ein Relais anders als ein Weichenherzstück). Die Schätzung der RUL und damit die Bestimmung von IH-Intervallen basiert im planmäßigvorbeugenden Instandhaltungssystem auf Grundlage von

Erfahrungswerten. Unter den tatsächlichen Gegebenheiten kommt es aber immer wieder zu Abweichungen, wodurch Instandsetzungsmaßnahmen bisweilen zu früh oder zu spät terminiert werden. Ersteres führt zu erhöhten Kosten durch unnötige Gleissperrungen und damit Kapazitätseinschränkungen, letzteres führt zu Trassenbeschränkungen wie Langsamfahrstellen und damit zu Qualitätsverschlechterung.

Wird die Aufgabe der Bestimmung der RUL durch ein PM-System übernommen, so basiert diese auf kontinuierlicher Datenerfassung und einem anlagenspezifischen Verschleißmodell. Durch den kontinuierlichen Input kann die RUL fortgesetzt an den tatsächlichen Verschleiß angepasst werden. Da dies automatisiert geschieht, ist das bei geringem Ressourceneinsatz für viele Anlagen gleichzeitig möglich.

Die Modellcharakteristiken können entweder aus Expertenwissen und Erfahrungswerten abgeleitet werden (induktiv), aus datenbasierten Verfahren erlernt werden (deduktiv), oder es werden beide Ansätze zu hybriden Verfahren kombiniert [6]. Ziel der Modellierung ist es, den Zeitpunkt des Versagens und damit die RUL möglichst genau zu prognostizieren. Das Lebensende einer Anlage ist als Erreichen eines Zustandes zu sehen, ab dem die fehlerfreie und sichere Funktion inklusive des Toleranzbereichs nicht mehr gewährleistet

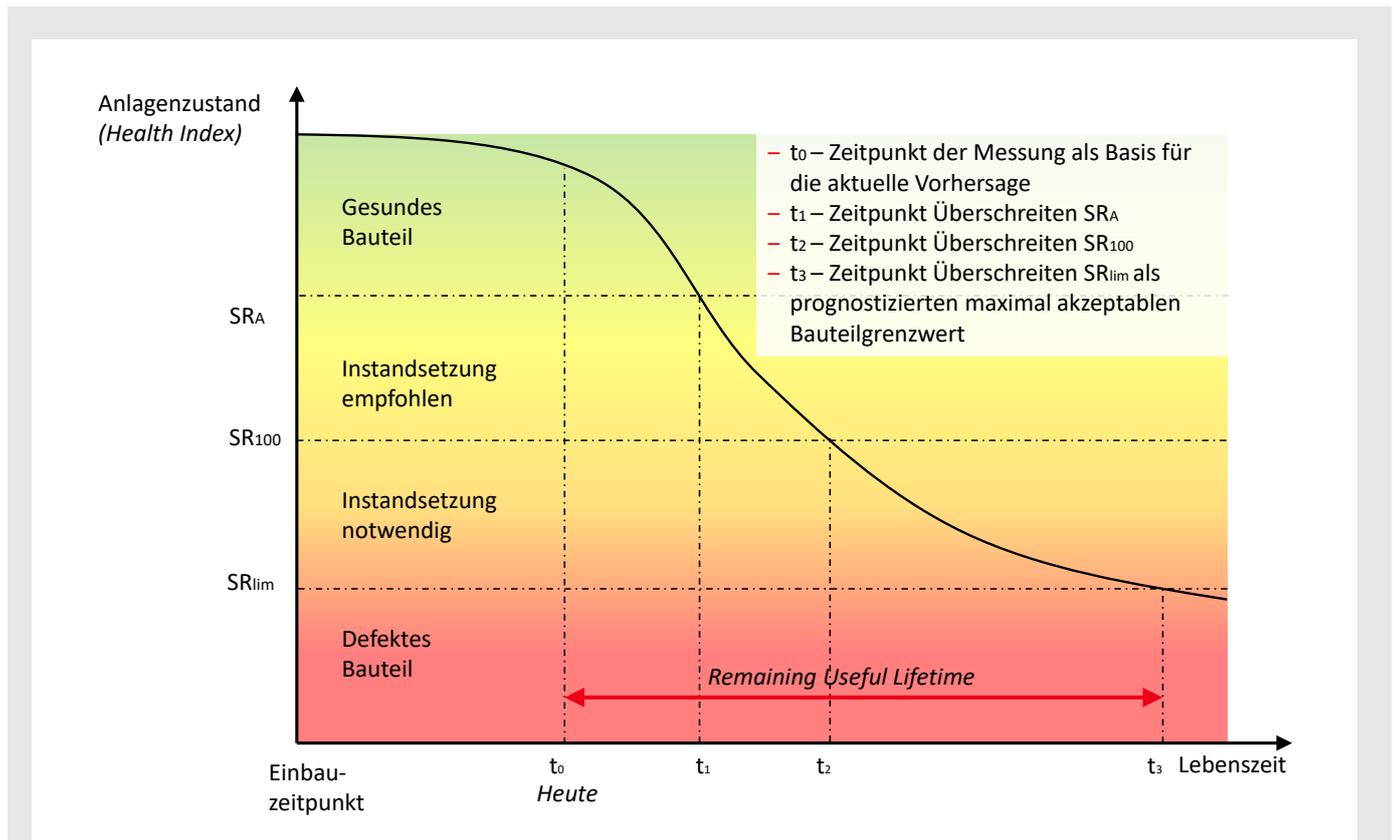
ist. Durch die kontinuierliche Datenaufzeichnung ist zudem das Verhalten einer Anlage in der Vergangenheit bekannt (Bild 4). Zur Verdeutlichung kann die Zustandsveränderung für den Anlagenverantwortlichen zusätzlich mit einer vereinfachenden Ampellogik unterlegt werden.

**5. Positiveffekte für die Instandhaltungsplanung und Steuerung**

Die Planung und Steuerung hat, wie beschrieben, zur Aufgabe, einen zuverlässigen und sicheren Betrieb bei hoher Mitteleffizienz zu organisieren. Durch den Einsatz von PM können diese drei Teilziele wie folgt verbessert werden:

Zunächst werden sich die Effekte durch PM in der operativen und kurzfristigen Planung und Steuerung durch einen höheren Vorlauf für Instandsetzungsmaßnahmen zeigen. Durch eine kontinuierliche Zustandsaufnahme werden Störungen direkt beim Auftreten erkannt und nicht erst durch die Meldung eines Mitarbeiters (z.B. Triebfahrzeugführers) oder schlimmstenfalls nach Eintreten eines Ereignisses im Betrieb. Dadurch werden die Zeitfenster für Eingriffe signifikant vergrößert.

Im Anschluss werden die positiven Effekte durch PM in der kurzfristigen und mittelfristigen Planung spürbar. Durch Rückmeldung des Health Indexes ist das in-



4: Verhalten und Zustand einer Anlage über ihre Lebenszeit

**Tabelle 1:** Verbesserungspotenziale durch prädiaktive Instandhaltung

	Mittleffizienz	Qualität	Kapazität
Langfristig	<ul style="list-style-type: none"> <li>bessere Budgetsteuerung durch vergrößerten Planungsvorlauf</li> <li>Langfristige Senkung der Lebenszykluskosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Weniger Störungen</li> <li>Weniger Ausfälle oder Einschränkungen (Lost Units)</li> <li>Systemische Herleitung von technisch-optimalen IH-Terminen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>bessere Kapazitätssteuerung durch vergrößerten Planungsvorlauf</li> </ul>
Mittelfristig	<ul style="list-style-type: none"> <li>Budgetengpässe werden früh und genau erkannt</li> <li>Planungsvorlauf vergrößert</li> <li>Verbesserte Planstandsüberwachung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Systematische Herleitung von technisch-optimalen IH-Maßnahmen</li> <li>Vermeidung von Überschreiten von IH-Grenzwerten</li> <li>Kontinuierliche Störungsvermeidung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zuverlässige Terminierung der Maßnahmen (keine kurzfristigen Änderungen)</li> <li>Keine Einschränkungen durch Schäden an der Trasse</li> </ul>
Kurzfristig	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kontinuierliche und automatisierte Zustandserkennung</li> <li>Bündelung verschiedener IH-Maßnahmen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Größere Planungshorizonte</li> <li>Kontinuierliche Überwachung der IH-Planung</li> <li>Kurzfristige Störungsvermeidung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Weniger Sperrungen durch Bündelung verschiedener IH-Maßnahmen</li> <li>Zuverlässige Terminierung der Maßnahmen</li> </ul>
Operativ	<ul style="list-style-type: none"> <li>Manuelle Inspektion und Sofortmaßnahmen reduziert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Störungen werden sofort erkannt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>IH-Maßnahmen können gebündelt werden</li> </ul>

dividuelle Verschleißmodell eines Bauteiles oder einer Anlage nachvollziehbar. Durch die Vorhersage der RUL ist der Health Index in die Zukunft planbar. Je nachdem, wie die Kriterien und Grenzwerte als Eingriffsschwellen gewählt werden, können die Instandsetzungsmaßnahmen genauer und gebündelt getaktet werden. Größere Maßnahmen (z.B. Präventionen) können frühzeitig verschoben und müssen nicht erst durch die kurzfristige Planung verlegt oder abgesagt werden. So entsteht für die kurz-

fristige Planung ein größerer Planungsvorlauf und damit eine Verlagerung in Richtung Mittelfristplanung. Kurzfristige und mittelfristige Planung arbeiten dadurch enger zusammen und die Ressourcen und Kapazitäten können unterjährig besser gesteuert werden.

Diese Effekte und Maßnahmen senken langfristig die Lebenszykluskosten, da die Effekte von IH-Maßnahmen über einen längeren Zeitraum exakt beobachtet und bewertet werden können. Sowohl zu frühe

als auch zu späte Eingriffe können zu irreversiblen Schäden führen, die langfristig durch den Einsatz von PM vermieden werden können.

Die positiven Effekte der Anwendung von PM werden in der Tabelle 1 zusammengefasst.

Die hier beschriebenen Verbesserungseffekte durch Digitalisierung und Automatisierung in der Instandhaltung mittels PM-Methoden werden sich nicht sofort zeigen. Das liegt daran, dass zu Beginn die Systeme

erst angelernt, validiert und verifiziert werden müssen. Erst anschließend kann die prädiktive Instandhaltung final eingeführt werden. Langfristig werden die zur Verfügung stehenden Mittel durch verbesserte Planung und Steuerung, gezieltere Durchführung und Bündelung von Maßnahmen sowie die Verringerung von manuellen Inspektionen effizienter eingesetzt. Zusammen mit dem Entfall verfrühter oder verspäteter Instandsetzung sorgt dies dann für eine höhere Verfügbarkeit sowie die damit verbundene Steigerung der Trassenkapazität. Ein Nebeneffekt ist eine erhöhte Ressourceneffizienz in der Planung und Steuerung durch die Automatisierung der dortigen Planungsprozesse.

### 6. Zusammenfassung

Eine genauere Vorhersage zur Erreichung von Grenzwerten und zur Restlebensdauer (RUL) sowie eine kontinuierliche, automatische Bewertung des Zustandes (Health Index) einer Infrastrukturanlage oder eines Bauteiles sind der eigentliche Nutzen von Predictive Maintenance (PM) für die Instandhaltungsplanung und -steuerung und entlasten diese. PM führt zu einem erweiterten Planungshorizont und mehr Vorlauf, wodurch die Planungsebenen dichter zusammenrücken. Dadurch steigen die Mitteleffizienz, die Trassenkapazität sowie insgesamt die Qualität und Zuverlässigkeit

der Infrastruktur und des Betriebs. Auch wenn diese Effekte erst verzögert eintreten, ist eine Einführung von PM ein zwingender Grundbestandteil für eine zukünftige zuverlässige Eisenbahninfrastruktur. Da PM als Erweiterung von bisherigen Instandhaltungssystemen auftreten wird, sind bisherige Strukturen nicht obsolet, sondern werden ergänzt – gleichsam entfallen oder verschieben sich einige Aufgaben.

Weitere Informationen zu dem Thema und die gesamte Studie inklusive Praxisbeispielen finden Sie auf der Seite des DZSF unter [www.dzsf.bund.de](http://www.dzsf.bund.de).

### Literatur

[1] v. Korflesch, Prf. Dr. H.; Linden, M.; Wick, N. (2018): Evaluation der Einsatz- und Forschungsgebiete von Predictive Maintenance anhand einer qualitativen Videoanalyse. Universität Koblenz, Landau, S. 28-36 abrufbar: <https://kola.opus.hbz-nrw.de/opus45-kola/frontdoor/deliver/index/docId/2067/file/WP18V3+NWick+Evaluation+der+Einsatz+und+Forschungsgebiete+von+Predictive+Maintenance+anhand+einer+qualitativen+Videoanalyse.pdf>

[2] Ackermann, Dr. H. (2019): „Instandhaltungs-Management- Systeme DB AG“; DB Systemtechnik GmbH. Brandenburg Kirchmöser, 2019. S. 24.

[3] Bilgram, V. (2019). Handlungsleitfaden 3-i(Q+K) Strategie, Version 1.0. DB Netz AG. S. 6-10.

[4] Firscher, L. (2020). Fachstrang I (Infrastruktur) des E2E DB Netz AG. DB Netz AG.

[5] NASA (2021): „Prognostics Performance Evaluation - NASA Official. National Aeronautics and Space Administration: <https://ti.arc.nasa.gov/tech/dash/groups/pcoe/prognostics-performance-evaluation/framework/>, abgerufen am 06 Oktober 2021

[6] Pecht, J.R.M (2010). A prognostics and health management roadmap for information and electronics-rich systems. Microelectronics Reliability Volume 50, Issue 3. S. 317-323.

### Summary

#### Planning of infrastructure maintenance by Predictive Maintenance

Railway infrastructure is one of the so-called “critical” infrastructures designated by the EU, which are essential for the maintenance of important social functions. It is subject to many requirements and must function reliably. To this end, it must be regularly inspected and maintained for operation. At present, this maintenance is mostly carried out on a planned, preventive basis. However, it would be possible to do this predictively based on the condition based maintenance approach. This would require adjustments to the maintenance work itself, as well as to planning and control. This was investigated in 2021 by DB Systemtechnik for the German Center for Rail Traffic Research (DZSF) as part of the study “Systematization of infrastructure maintenance planning and description of the application of predictive maintenance”. The adjustments to planning and control are presented in this article.



**Automatische Bremsprobe:**  
Jetzt verfügbar für den operativen Einsatz

**PJM**  
- Digitaler Schienengüterverkehr  
- Akkreditierte Prüfstelle ISO/IEC 17025  
- Engineering

**InnoTrans 2022:**  
Halle A / Stand 230

PJ Messtechnik GmbH  
PJ Monitoring GmbH  
[www.pjm.co.at](http://www.pjm.co.at)



**Weltweite Systemlösungen für den Schienenverkehr**