

Ein Digitaler Zwilling zur Prognose von Radverschleiß

Die Informationswertschöpfung mittels Digitalem Zwilling bietet eine praxistaugliche Lösung für die vorausschauende Instandhaltung.

SEBASTIAN WILBRECHT | MARTIN RUSCHER |
TOBIAS BREGULLA | MICHAEL HEINZ |
TILL TEGTMEIER | RENÉ HEYDER |
MICHAEL BEITELSCHMIDT | ARND STEPHAN

Die Prognose des Radverschleißes ist entscheidend für die vorausschauende Instandhaltung von Schienenfahrzeugen, wobei die Mehrkörpersimulation (MKS) in Kombination mit Verschleißmodellen eine Möglichkeit darstellt, um detaillierte Ergebnisse zu generieren. Allerdings ist der hohe Modellierungs- und Rechenaufwand ein Hindernis für die praxistaugliche Anwendung auf ganze Fahrzeugflotten. Daher wird das Konzept des Digitalen Zwillings vorgestellt, das wertvolle Informationen für präzise Radverschleißprognosen mittels Daten- und Minimalmodellen bietet und perspektivisch in das Radsatz-Management-System der Deutschen Bahn AG (DB) implementiert werden soll.

Notwendigkeit integrierter Radsatzinstandhaltung

Radsätze stellen den größten Kostentreiber in der Instandhaltung von Schienenfahrzeugen dar. Darüber hinaus sind sie sicherheitskritische Bauteile und unterliegen somit einer engen Überwachung und zustandsbasierten Instandsetzung anhand definierter Messgrößen, die automatisiert oder manuell erfasst werden. Die Durchführung entsprechender Wartungsmaßnahmen wird bei Überschreitung fest-

gelegter Betriebsgrenzmaße initiiert. Neben den Lebenszykluskosten ist insbesondere die Bedarfsplanung von Radsätzen entscheidend, um den gesamten Instandhaltungsprozess effizient und zuverlässig zu gestalten. Die integrierte Instandhaltung stellt eine Methode zur effizienten Wartung und Instandhaltung von Produktionsanlagen dar. Dabei besteht das Hauptziel darin, Produktionsanlagen in einem optimalen Zustand zu halten. Sie existiert in unterschiedlichen Ausprägungsformen und ist individuell auf die Bedürfnisse der Unternehmen angepasst [1].

Die Instandhaltungsstrategien von der klassischen schadensabhängigen bis zur prädiktiven Instandhaltung bauen aufeinander auf und nehmen an Komplexität und Integration in der Instandhaltungsplanung und -steuerung zu. Dabei gilt es stets ein Optimum zwischen dem Ausnutzen der individuellen Komponentenlebensdauer, der Fahrzeugverfügbarkeit und der Einhaltung aller Sicherheitsvorgaben zu identifizieren [2].

Die Optimierung der Instandhaltungsprozesse erfordert integrierte Prognosewerkzeuge für zahlreiche Drehgestellkomponenten und eine umfangreiche Datenbasis über jeden einzelnen Radsatz und den entsprechenden Betriebseinsatz [3]. Am Beispiel des Triebzugs der DB-BR 423, die von der DB als S-Bahn-Fahrzeug eingesetzt wird, soll in diesem Beitrag ein Ansatz vorgestellt werden, bei dem einfache, modellbasierte Werkzeuge mit Daten aus einem Radsatz-Messsystem zu einem Digitalen Zwilling kombiniert werden. Ziel ist es, eine effiziente und praxistaugliche Prognose von

Radverschleiß zu ermöglichen. Die generierten Prognosekennwerte helfen der Disposition perspektivisch bei der Einsatzplanung sowie der gezielten Fahrzeugzuführung in die Werke und können insbesondere bei der kurz- und mittelfristigen Planung unterstützen. Dabei sollen die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Schienenfahrzeugen verbessert und Instandhaltungswerke mittels präziser Prognosemodelle entlastet werden.

Der Digitale Zwilling zur Informationswertschöpfung

Der Digitale Zwilling ist ein Konzept, bei dem mithilfe digitaler Methoden eine virtuelle Repräsentation eines realen physischen Objekts oder Prozesses erstellt wird. Die Eigenschaften, das Verhalten und die Funktionen des realen Objekts oder Prozesses werden partiell oder vollständig abgebildet. Im digitalen Objekt werden dazu Modelle, Datenverarbeitung und Algorithmen eingesetzt. Über Schnittstellen werden kontinuierlich Daten, die durch Sensoren und Messungen gesammelt werden, vom realen zum digitalen Objekt übertragen. Diese Daten ermöglichen es dem Digitalen Zwilling, den aktuellen Zustand und das Verhalten des realen Gegenstücks widerzuspiegeln und Szenarien und Handlungsempfehlungen für die reale Welt zu generieren (Abb. 1).

Im Gegensatz zu klassischen Simulationsmodellen, die in der Regel von Berechnungsingenieuren erstellt und bedient werden, wird der Digitale Zwilling für Anwender entwickelt, die am realen Objekt arbeiten. Der Digitale Zwill-

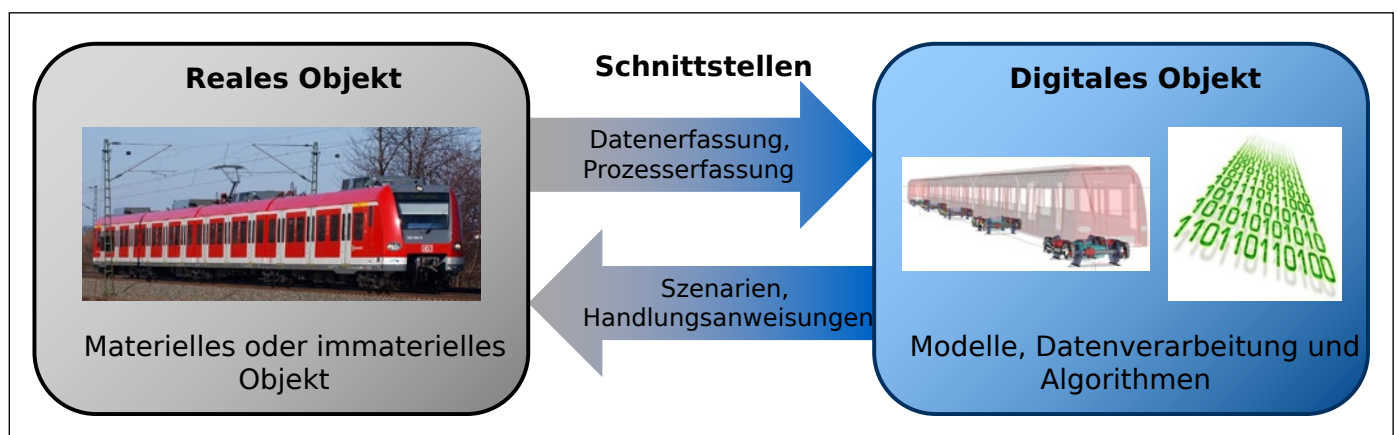


Abb. 1: Allgemeine Struktur eines Digitalen Zwillings

Quelle: „MdE“, Wikipedia, CC BY-SA 3.0 de, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9858236>

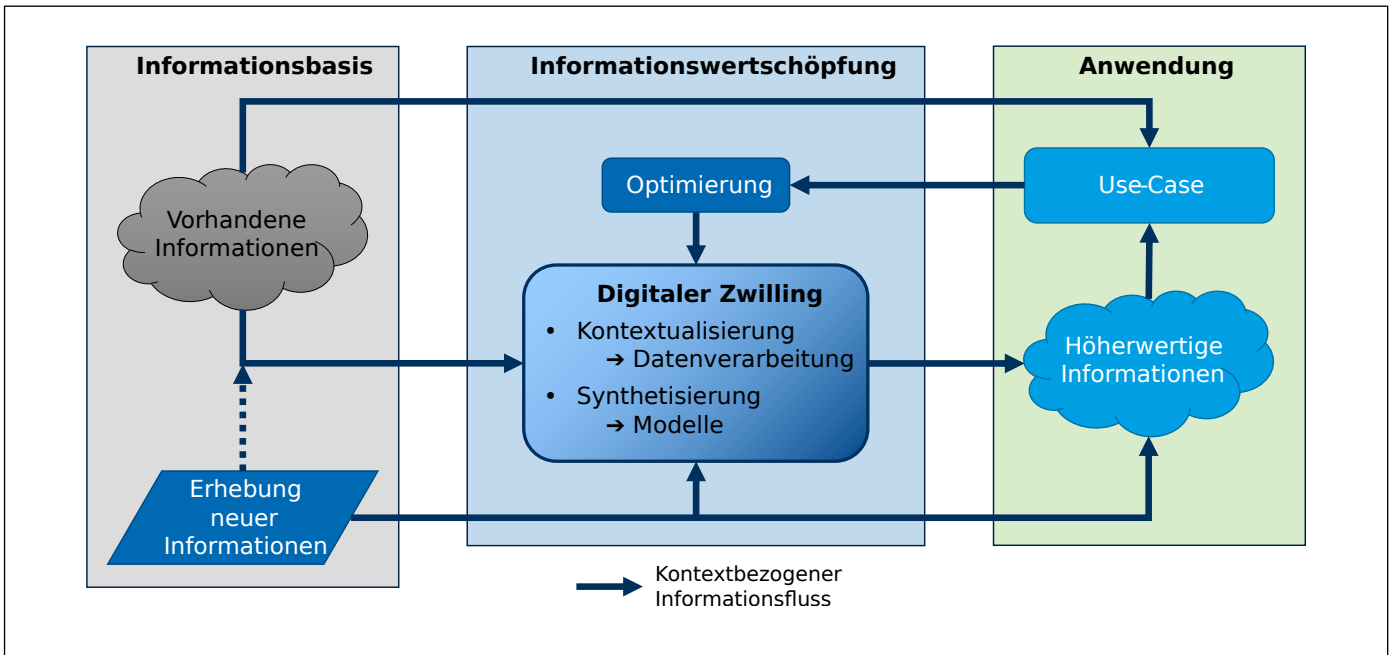


Abb. 2: Informationsfluss und -wertschöpfung mit dem Digitalen Zwilling

Quelle Abb. 2-7: eigene Darstellung

ling zur Radverschleißprognose wird daher für Anwender in der Instandhaltung oder Disposition von Schienenfahrzeugen entwickelt. Charakteristisch für den Einsatz Digitaler Zwillinge ist zudem ein Use Case, der höherwertige Informationen voraussetzt, die als vorhandene Informationsbasis nicht zur Verfügung stehen. Mittels Kontextualisierung (Datenverarbeitung) und Synthetisierung (Modelle) betreibt der Digitale Zwilling Informationswertschöpfung auf Basis der vorhandenen Informationen (Abb. 2).

Da es nicht möglich ist, Informationen beliebig aufzuwerten, müssen ggf. zusätzliche Informationen erhoben werden. Ein großer Vorteil ist, dass nicht zwingend die benötigte höherwertige Information erhoben werden muss, sondern die messtechnische Erhebung von Prozessdaten im Feld durch die Informationswertschöpfung dort ergänzt werden kann, wo sie nicht oder nur mit hohem Aufwand umsetzbar ist.

Konzeptionierung des Digitalen Zwillinges zur Radverschleißprognose

Der Digitale Zwilling zur Radverschleißprognose wird am Beispiel der DB-BR 423 entwickelt. Dieser besteht grundsätzlich aus einem Digitalen Master und einem Digitalen Schatten (vgl. Abb. 3) [3]. Dabei umfasst der Digitale Master alle verhaltensbeschreibenden Modelle des realen Objektes, welche sowohl mathematisch-physikalische als auch rein datenbasierte Charakteristiken aufweisen können. Zur Parametrisierung kommen dabei hauptsächlich Stammdaten zur Anwendung, die sich nicht oder nur selten ändern. Aus dem Digitalen Master lassen sich individuelle Instanzen generieren. Dabei handelt es sich um die eigentlichen virtuellen Repräsentationen

realer Objekte, wie beispielsweise der Radsätze oder Strecken. Mithilfe von Instanzverknüpfungen werden diese unter Berücksichtigung einer geeigneten Logik miteinander in Beziehung gesetzt. Einen weiteren wesentlichen Bestandteil des Digitalen Zwillinges bildet der Digitale Schatten. Dieser besteht aus Informationen, die einer hohen Dynamik unterworfen sind. Hierbei beschreiben Zustandsdaten die gegenwärtigen oder vergangenen Moment-

aufnahmen konkreter Zustände. Prozessdaten hingegen bilden gegenwärtige, vergangene und zukünftige Veränderungsprozesse der entsprechenden Zustände ab. Die Daten des Digitalen Schattens dienen einerseits dazu, Instanzen zu parametrieren, andererseits bilden sie die Grundlage dafür, mithilfe von Simulationen, statistischen Verfahren sowie anderen kontextualisierenden Methoden höherwertige Informationen zu erzeugen. Bezogen auf

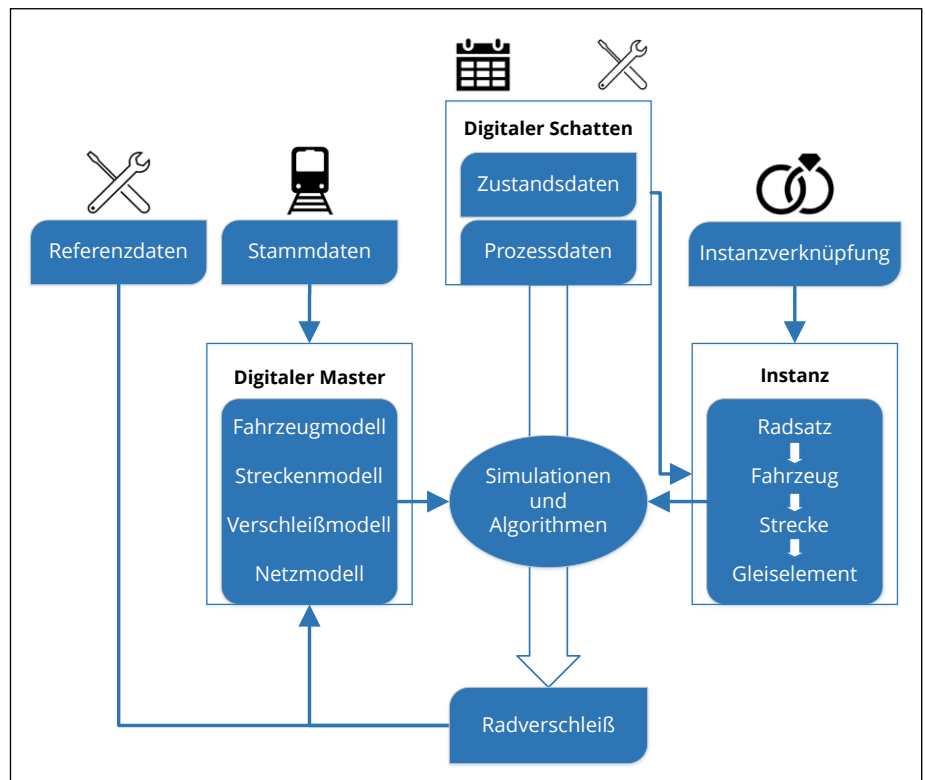


Abb. 3: Konzeptskizze des Digitalen Zwillinges zur Radverschleißprognose

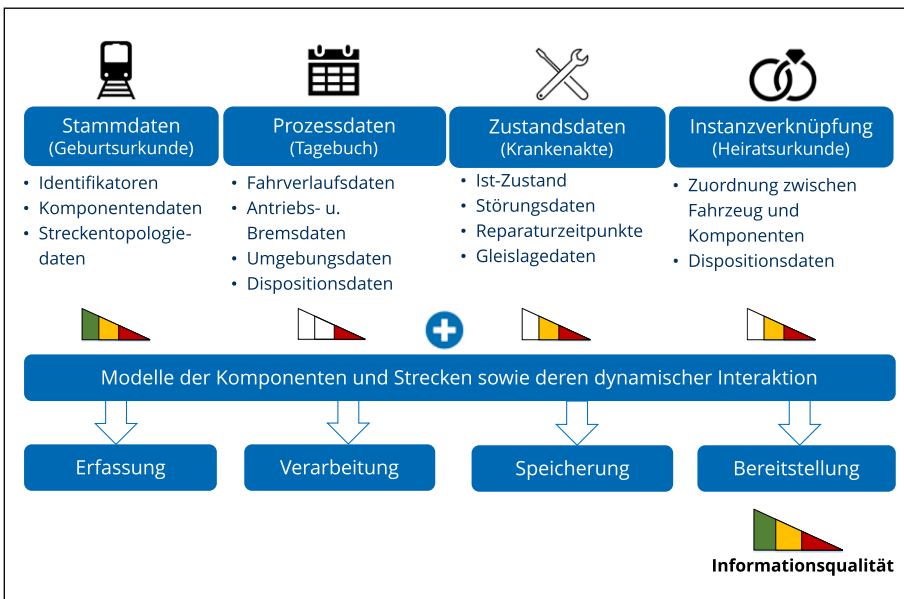


Abb. 4: Kategorisierte Informationsbasis des Digitalen Zwillings zur Radverschleißprognose

den Use Case der Radverschleißprognose entspricht dies Informationen über den perspektivischen Zustand konkreter Radsatzinstanzen. Diese können mit Daten aus dem realen Betrieb abgeglichen werden, um den Digitalen Master zu validieren und sich so sukzessiv möglichst präzisen Prognosen anzunähern. Der Betrieb eines Digitalen Zwillings erfordert eine IT-Infrastruktur, die insbesondere großen Wert auf die Verarbeitung und -speicherung von Daten aus unterschiedlichen Quellen legt. Nur eine geeignete Kompromisslösung zwischen einem Design für den konkreten Anwendungsfall und einer vollständigen Abstraktion stellt eine wirtschaftliche Skalierbarkeit sicher. Es hat sich gezeigt, dass sich eine grundlegende Unterteilung in Stamm-, Prozess- und Zustandsdaten sowie Instanzverknüpfungen als Grundlage für Prognosezwillinge anbietet (Abb. 4). Die Modellierung und der Aufbau

einer geeigneten Datenbasis ist im Allgemeinen eine signifikante Herausforderung bei der Entwicklung eines Digitalen Zwillings. Dies ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass Bestandsdaten häufig eine geringe Informationsqualität aufweisen. So sind die historischen Daten teilweise inhomogen, unvollständig, unpräzise oder nur schwer zugänglich. Um den Use Cases trotz dessen gerecht zu werden, müssen Informationen niedriger Qualität kompensiert werden. Am Beispiel der Erhebung realer Fahrverlaufsdaten soll die Kompensation eines signifikanten Informationsdefizites und somit die Bedeutung von Schnittstellen zwischen realem und virtuellem Objekt illustriert werden.

Für die Prognose des Radverschleißes werden realistische Fahrprofile in Form von örtlich aufgelösten Geschwindigkeitsprofilen als Lastannahme benötigt. Da das Auslesen des

Datenbusses der Fahrzeugleittechnik der DB-BR 423 zur kontinuierlichen Erfassung und Übertragung der erforderlichen Daten mit hohem technischem Aufwand verbunden ist [4] und zusätzliche Messmittel aufgrund zulassungsbedingter Hürden nicht installiert werden konnten, bestand die Notwendigkeit, die erforderlichen Prozessdaten mithilfe praxistauglicher Sensorlösungen in hinreichender Qualität zu erheben. Mit guter Näherung ist im S-Bahn-Betrieb von einem sich wiederholenden Geschwindigkeitsprofil zwischen benachbarten Haltestellen auszugehen. Somit können Informationen des dispositiven Fahrzeugeinsatzes sowie Streckennetzinformationen mit repräsentativen Geschwindigkeitsinformationen kontextualisiert werden. Zu diesem Zweck wurden streckenbezogene Geschwindigkeitsinformationen der DB-BR 423 erhoben. Hierbei kamen Smartphones aus dem Consumer-Bereich zum Einsatz. Die Open-Source-App phyphox [5] ermöglichte es, die verbauten Sensoren für manuell konfigurierbare Messungen zu nutzen. Neben GNSS-basierten Geoinformationen wurden zusätzlich Daten der Beschleunigungs-, der Magnetfeld- und der Drehratensensoren im gesamten Netz erfasst. Da auf einigen Streckenabschnitten, insbesondere in Tunneln, kein GNSS-Signal empfangen werden konnte, wurden resultierende Informationslücken mithilfe parallel erhobener Längsbeschleunigungsdaten über eine Sensordatenfusion kompensiert. Dieses Verfahren wurde zuvor anhand einer Referenzmessung auf Strecken mit durchgängigem GNSS-Signal verifiziert. Abb. 5 zeigt dieses Verfahren am Beispiel einer Linie des betrachteten Streckennetzes. Dabei entspricht v_{GNSS} der GNSS-Referenzgeschwindigkeit und v_x dem zeitlich integrierten Längsbeschleunigungsverlauf. Wie zu erkennen ist, gibt es eine Abweichung des integrierten Beschleunigungsverlaufes v_x von der Geschwindigkeitsmessung v_{GNSS} . Integrationsbedingt summieren sich Abweichungen der Beschleunigungen entlang der Strecke bzw. Fahrzeit auf und resultieren so in einem Abdriften des Geschwindigkeitssignals. Durch eine forcierte Nullung des integrierten Beschleunigungsverlaufes kann jedoch eine gute Übereinstimmung zwischen den beiden Verläufen \hat{v}_x und v_{GNSS} erreicht werden.

Flexible Minimalmodellbildung

Die Modelle des Digitalen Masters haben die Aufgabe, auf Basis perspektivischer Lastannahmen eine Prognose für den Radverschleiß zu generieren. Aus Betreibersicht müssen insbesondere die Betriebsgrenzmaße der Radsätze überwacht werden. Grenzmaße existieren unter anderem für den Durchmesser, die Spurkranzbreite sowie das Spurmaß. Da die Praxisanwendung des Digitalen Zwillings eine schnelle Prognosefähigkeit erfordert, muss das Modell möglichst recheneffizient ausgeführt sein. Daher wurden neben der nach dem Stand der Technik üblichen

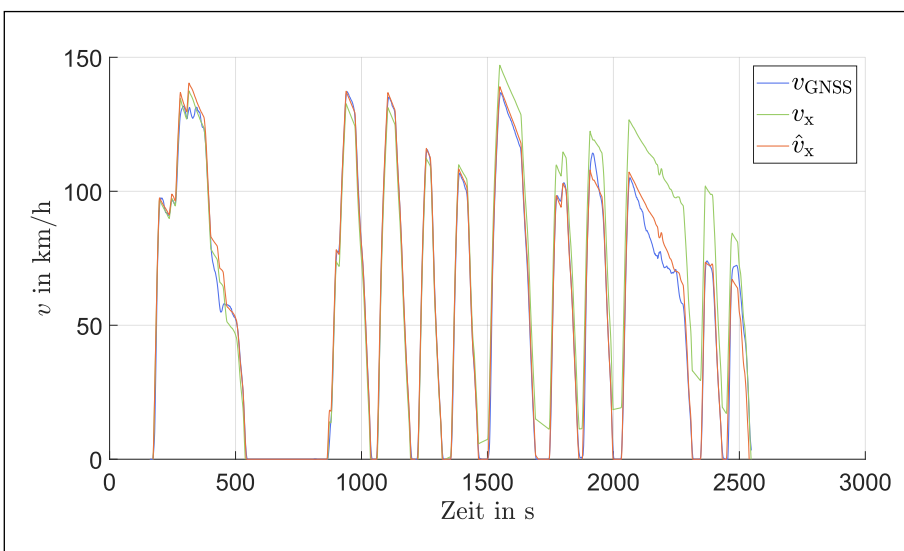


Abb. 5: Messdatenverarbeitung am Beispiel einer Linie des Streckennetzes

Mehrkörpersimulation (MKS) [6, 7, 8] auch Modellvereinfachungen und Minimalmodelle hinsichtlich ihrer Tauglichkeit für Digitale Zwillinge untersucht. Hierzu wird der Double-Loop-Ansatz gemäß Abb. 6 verwendet. Dabei wird ausgehend von einer Anforderungs- und Systemanalyse eine detaillierte physikalische Modellbildung als Referenz eingesetzt, um Systemwissen zu generieren. Das relevante Systemverhalten soll dann identifiziert und mit möglichst einfachen Modellansätzen beschrieben werden. Als Use-Case-spezifische Ausgabe wurden die Radprofilkennwerte (Durchmesser, Spurkranzbreite, Spurmaß, ...) festgelegt, die zur Überwachung der Betriebsgrenzmaße erforderlich sind.

Als Ergebnis mehrerer Iterationen mit dem Double-Loop-Ansatz hat sich die Verwendung von zwei Modulen als zweckmäßig erwiesen. Im ersten Modul berechnet ein Minimalmodell das Verschleißvolumen am Rad. Auf dieser Basis werden im zweiten Modul der zugehörige Verschleißort und damit die Radprofilkennwerte bestimmt.

Die Verschleißvolumenprognose ist physikalisch motiviert und berechnet das Verschleißvolumen V_w auf Basis des etablierten Verschleißmodells nach Krause und Poll. Eingangsgröße für das Verschleißmodell ist im Wesentlichen die Reibleistung im Rad-Schiene-Kontakt, aus der die Reibarbeit W_r und die Reibleistung pro Flächeneinheit p_r berechnet wird [9]:

$$V_w = I_w \cdot (p_r) \cdot W_r$$

Über den Proportionalitätsfaktor I_w wird ein temperaturinduzierter Übergang von mildem zu heftigem Verschleiß berücksichtigt, wobei die Grenze gemäß [9] bei $p_r = 4W/mm^2$ festgelegt ist.

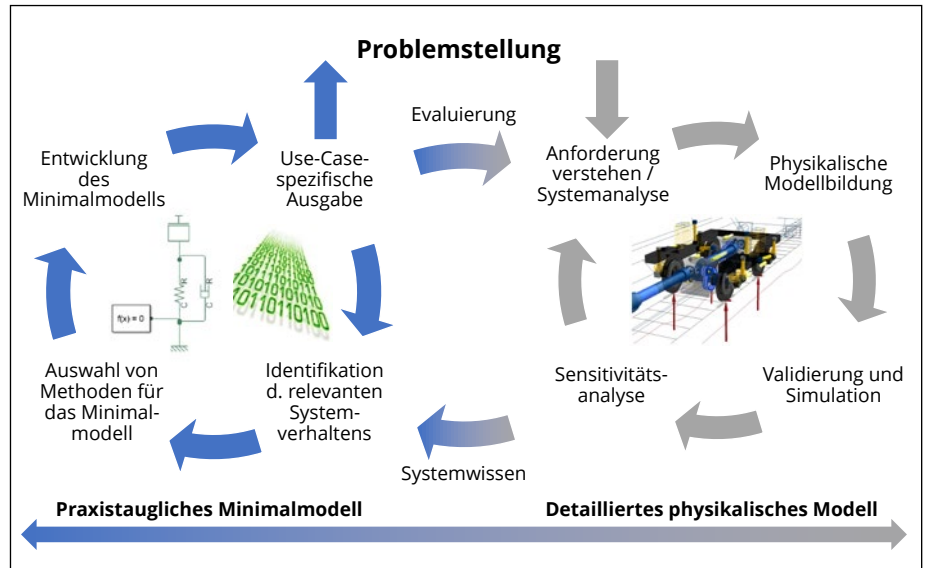


Abb. 6: Double-Loop-Ansatz für die Minimalmodellentwicklung

Zur Berechnung von Reibleistung und Reibarbeit wird ein linearer Modellansatz verwendet, der jeweils zwei Radsätze, ein Drehgestell und einen Wagenkasten als ein Vier-Massen-Modell mit der linearen Kontakttheorie von Kalker kombiniert. Damit lassen sich Längs- und Querdynamik sowie die Vorgänge im Rad-Schiene-Kontakt abbilden. Im Vergleich zu üblichen fahrzeugdynamischen MKS-Modellen von Schienenfahrzeugen ist der Freiheitsgrad und damit die Komplexität des mathematischen Gleichungssystems signifikant reduziert, wodurch eine effiziente Berechnung, auch für große Flotten, ermöglicht wird. Die Radprofilkennwert-Prognose ist datenbasiert, wobei die aktuellen und historischen

Radprofilkennwerte des Radsatz-Messsystems verwendet werden. Für jeden Radprofilkennwert K_n wird dabei eine Funktion f erstellt, die die Änderung des Radprofilkennwerts ΔK_n in Abhängigkeit von dem zuvor ermittelten Verschleißvolumen V_w ausdrückt:

$$\Delta K_n = f(V_w)$$

Ausgehend von einem Referenzzustand, der einem neuen oder reprofilierten Radsatz entspricht, lassen sich bei bekanntem Verschleißvolumen beispielsweise die Änderungen des Messkreisdurchmessers ΔdM , die Änderung der Spurkranzdicke ΔSd oder die Änderung des Spurmaßes ΔSr berechnen.

Der Blick in die Zukunft wird ermöglicht, indem das Verschleißvolumen für einen per-

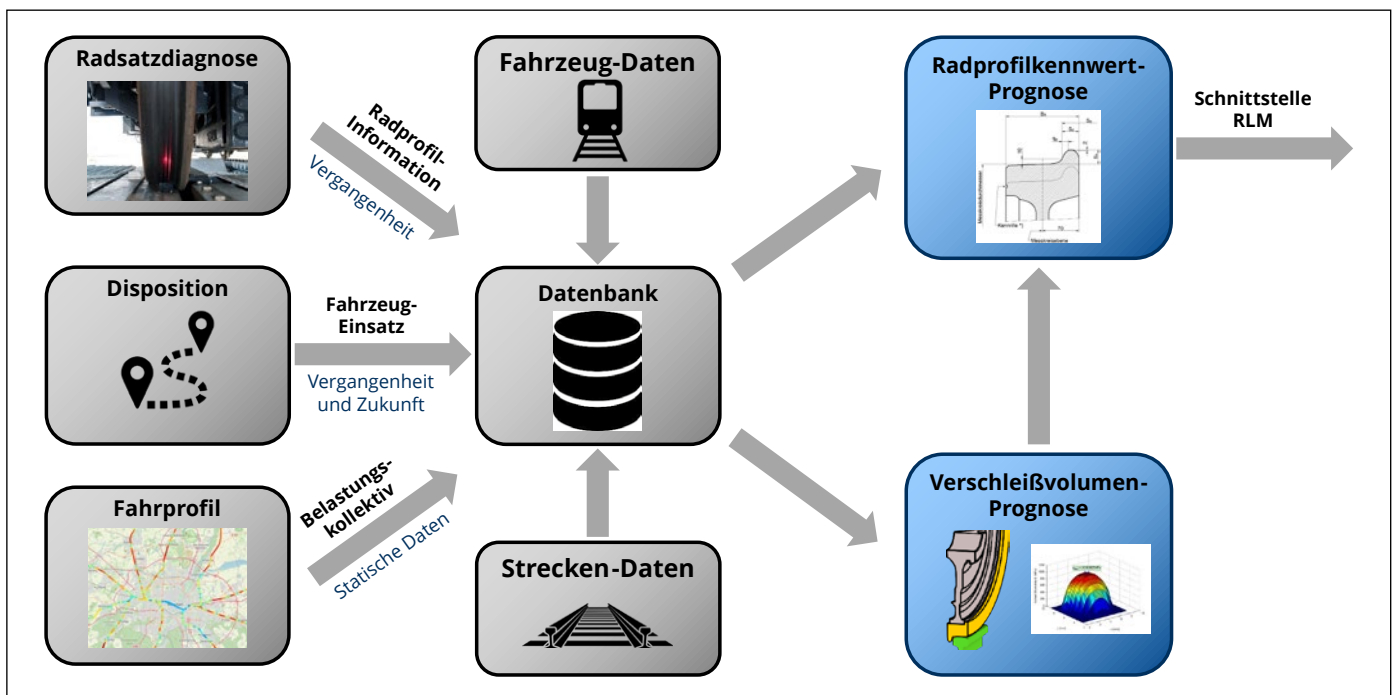


Abb. 7: Datengrundlage und Modellinteraktion des Digitalen Zwillings zur Radverschleißprognose

spektivischen Zustand mittels der Verschleißvolumenprognose ermittelt wird. Für einen Zeitraum in der Zukunft werden dazu die geplante Disposition und das zu erwartende Fahrprofil fahrzeugspezifisch festgelegt. Die Radprofilkennwert-Prognose gibt für diesen perspektivischen Zustand die Radprofilkennwerte aus, die direkt mit den Betriebsgrenzmaßen abgeglichen werden können. Abb. 7 fasst die definierte Datengrundlage und die Modellinteraktion zusammen.

Mit dem beschriebenen Ansatz lassen sich zukünftige Radprofilkennwerte bestimmen, die für eine Optimierung der Instandhaltungsprozesse verwendet werden können. Durch Anpassung der Disposition kann zudem auch Einfluss auf den Zeitpunkt der Radsatzinstandhaltung genommen werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Der Digitale Zwilling ermöglicht, über Kontextualisierung, Synthetisierung und sensorische Datenerhebung wertvolle Informationen für vorausschauende Instandhaltungsmaßnahmen zu generieren. Am Beispiel der Radverschleißprognose für die DB-BR 423 kann gezeigt werden, dass Minimalmodelle, die mit dem Double-Loop-Ansatz erzeugt wurden, perspektivische

Komponentenzustände für ganze Fahrzeugflotten berechnen können.

Die Entwicklung Digitaler Zwillinge ist ein interdisziplinärer Prozess, der umfassende betriebliche und technologische Kompetenzen vereint. Es ist daher wichtig, klare Ziele und Anforderungen zu definieren. Insofern sollte die Zielsetzung eine evolutionäre Verbesserung der Ausgangslage herbeiführen. Dazu gehört unter anderem auch, die Informationsbasis bezüglich der zweckgebundenen Informationsqualität zu bewerten und etwaige Defizite zu identifizieren. Ein bestehendes Defizit lässt sich häufig mit einfachen, aber Use-Case-spezifischen Maßnahmen kompensieren (z. B. die Erhebung von Fahrprofilen). Die Kombination datengetriebener und physikalischer Modellbildung zur Radverschleißprognose unterstreicht zusätzlich die Flexibilität des Konzepts Digitaler Zwilling.

Der Digitale Zwilling zur Radverschleißprognose ist so konzeptioniert, dass er in bestehende Softwareumgebungen implementiert und auf andere Baureihen skaliert werden kann. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Lebensdauer von Radsätzen und ihrer Antriebsgruppen auch signifikant durch andere Einflussfaktoren determiniert wird, welche in einem ganzheitlichen Digitalen Zwilling zu berücksichtigen

ist. Insbesondere sind für eine vorausschauende Instandhaltung weitere Use Cases zu betrachten sowie die erforderliche Informationswertschöpfungskette zu definieren. Es gibt einen Zielkonflikt zwischen einer hohen Fahrzeugverfügbarkeit und dem Ausnutzen der individuellen Komponentenlebensdauer. Der Digitale Zwilling bietet eine praxistaugliche Möglichkeit, um diesem Optimierungsproblem mit geeigneten Kompromisslösungen zu begegnen. ■

QUELLEN

- [1] Defèr, F.: „Datenbasierte zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung von Produktionsanlagen“, Aachen, Lehrstuhl für Produktionssystematik, 2022
- [2] Ermer, G.; Simroth, A.: „Planung der Infrastrukturinstandhaltung mit Predictive Maintenance“, Eisenbahntechnische Rundschau 7+8/2022
- [3] Stark, R.; Thoben, K.-D.; Gerhard, D.; Hick, H.; Kirchner, E.: WiGeP-Positionspapier: „Digitaler Zwilling“, 2020
- [4] DB Systemtechnik Fachabteilung TVE41, „MVB Testbericht Auslesen ET442 und 423“, 2021
- [5] Staacks, S.; Hütz, S.; Heinke, H.; Stampfer, C.: „Advanced tools for smartphone-based experiments: phyphox“, Physics Education, 2018
- [6] Bosso, N.; Magelli, M.; Zampieri, N.: „Simulation of wheel and rail profile wear: a review of numerical models“, in Rail. Eng. Science 30, 2022, p. 403–436
- [7] Schelle, H.: „Radverschleißreduzierung für eine Güterzuglokomotive durch optimierte Spurführung“, Dissertation, 2014
- [8] Ye, Y.; Sun, Y.; Dongfang, S.; Shi, D.; Hecht, M.: „Optimizing wheel profiles and suspensions for railway vehicles operating on specific lines to reduce wheel wear: a case study“, in Multibody Syst Dyn 51, 2021, p. 91–122
- [9] Krause, H.; Poll, G.: „Wear of wheel-rail surfaces“, in Wear 113, 1986, pp. 103–122



Dipl.-Ing. Sebastian Wilbrecht

Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Professur für Dynamik u.
Mechanismentechnik
TU Dresden, Dresden
sebastian.wilbrecht@tu-dresden.de



Dipl.-Ing. Martin Ruscher

Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Professur für Elektrische Bahnen
TU Dresden, Dresden
martin.ruscher@tu-dresden.de



Dipl.-Ing. Tobias Bregulla

Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Professur für Elektrische Bahnen
TU Dresden, Dresden
tobias.bregulla@tu-dresden.de



Michael Heinz

Teamkoordinator Data & Analytics
Business Line Digitale Produkte &
Services / CDO (TT.TVD)
DB Systemtechnik GmbH,
Frankfurt a. M.
michael.mc.heinz@deutschebahn.com



Till Tegtmeier

Fachexperte Radsätze
Center of Competence Bahntechnik
Vorstandsressort Digitalisierung &
Technik; Strategie, Innovation und
neue Technologien (TTS)
Deutsche Bahn AG, Berlin
till.tegtmeier@deutschebahn.com



Dr. René Heyder

Experte Bahntechnik,
Rad-Schiene-System
Center of Competence Bahntechnik
Vorstandsressort Digitalisierung &
Technik
Deutsche Bahn AG, Berlin
rene.heyder@deutschebahn.com



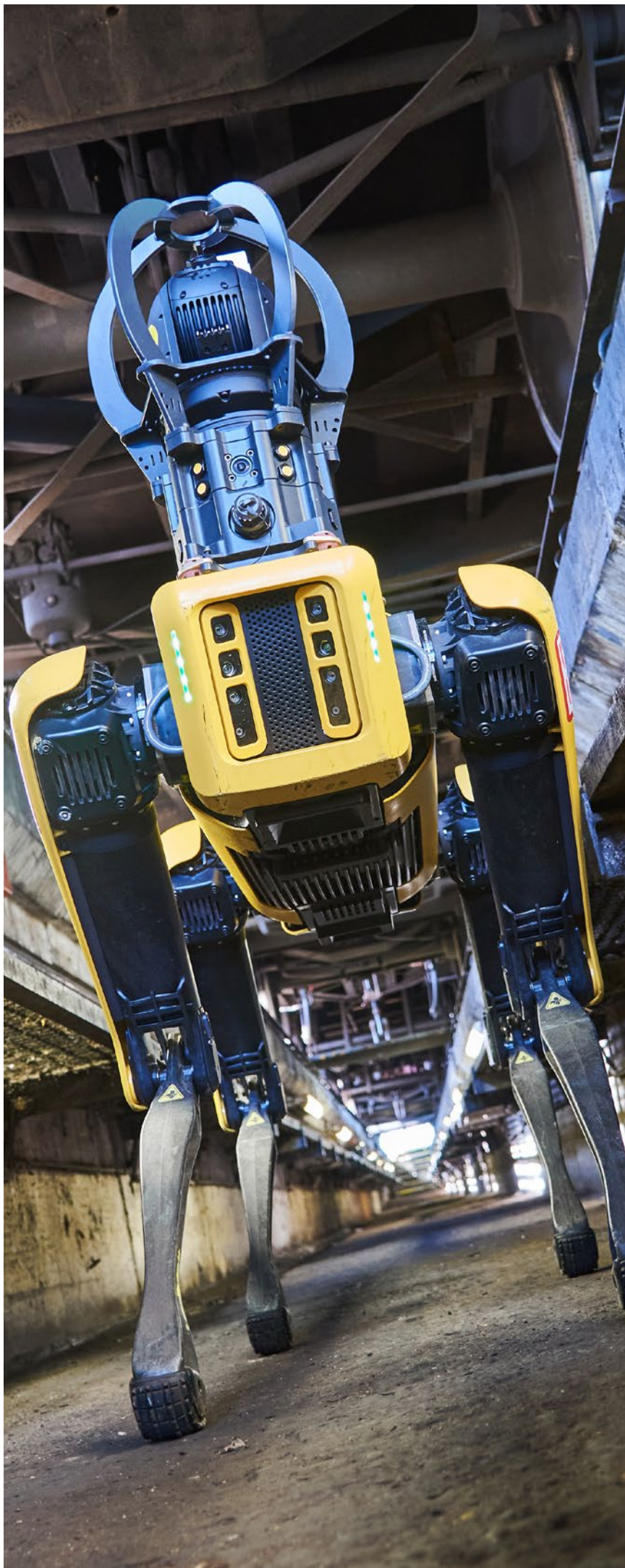
Prof. Dr.-Ing. Michael Beiteltschmidt

Lehrstuhlinhaber
Professur für Dynamik u.
Mechanismentechnik
TU Dresden, Dresden
michael.beiteltschmidt@tu-dresden.de



Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan

Lehrstuhlinhaber
Professur für Elektrische Bahnen
TU Dresden, Dresden
arnd.stephan@tu-dresden.de



DER **EI** EISENBAHN INGENIEUR

INTERNATIONALE FACHZEITSCHRIFT
FÜR SCHIENENVERKEHR & TECHNIK

Euro 32,60 | Januar 2024

1 | 24

Gleisbaumaschinen –
Einsparungen bei Energie und
Emissionen durch E-Antrieb

DB FZI –
Langfristplanung in der
Instandhaltung der DB

ATO –
Weiterentwicklung der
betrieblichen Regelwerke

Radverschleiß –
Predictive Maintenance
dank Digitalem Zwilling

Anschlussbahnen –
Wie kann ein zeitgemäßes
Regelwerk ausgestaltet sein

VDEI

14. Tiefbaufachtagung

14. – 15. Februar 2024
in Radebeul

HERAUSGEBER
VERBAND DEUTSCHER
EISENBAHN-INGENIEURE E.V.

VDEI