

# Planbarer Umgang mit der außerplanmäßigen Instandhaltung von Eisenbahnfahrzeugen – Paradoxon oder Chance?

## Algorithmus zur Herleitung eines vorhersagbaren Schadindex unter wirtschaftlicher Berücksichtigung betrieblicher Ressourcen

Der vorliegende Artikel fokussiert sich auf die außerplanmäßige Instandhaltung und beschreibt die methodische Herleitung eines mathematischen Modells um den Schädigungszustand, also den Grad der Schädigung einer Flotte von Eisenbahnfahrzeugen, in eine valide Korrelation mit vorhandenen betrieblichen Ressourcen zu bringen. Diese Wechselbeziehung wird in eine allgemeingültige Kennzahl, den Schadindex überführt und mittels eines geeigneten Prognosemodells in seinem zeitlichen Verlauf vorhersagbar dargestellt. Mit einer systematischen Anwendung des Schadindex erhalten Eisenbahnverkehrsunternehmen mehr Handlungsspielräume zur Verfolgung ihrer strategischen und wirtschaftlichen Ziele.

### 1. AUSGANGSPUNKT

Wettbewerb prägt den liberalisierten Eisenbahnmarkt in Europa und macht unternehmerisches Denken und Handeln der Eisenbahnverkehrsunternehmen im Fern-, Nah- oder Güterverkehr sowie der Fahrzeughalter und deren Instandhalter erforderlich. Für das erfolgreiche Bestehen in einem durch Wettbewerb umkämpften Markt ist das Erzielen wettbewerbsfähiger Kosten von entscheidender Wichtigkeit. Darüber hinaus sind nicht nur die Betrachtung der Gesamtkosten sondern vielmehr auch die unternehmerische Auseinandersetzung mit dem Zusammenspiel einzelner Kostenpositionen notwendig. Die Gesamtkosten für den Betrieb einer Eisenbahnfahrzeugflotte setzen sich im Wesentlichen aus den folgenden Kostenpositionen zusammen:

- Infrastrukturbenutzung
- Energiekosten
- Fahrpersonal
- Investitionen
- Instandhaltung der Fahrzeugflotte
- Betriebliche Behandlung der Fahrzeugflotte
- Sonstige Kosten für Verwaltungs- und Managementaufgaben

Gestaltungsspielräume von Unternehmen lassen sich von beeinflussbaren und wenig bis gering beeinflussbaren Kosten unterscheiden. Nicht beeinflussbar sind eingekaufte Leistungen monopolistisch agierender Dienstleister, wie Entgelte für die Benutzung der Eisenbahninfrastruktur. Wenig beeinflussbare Kosten sind allgemein eingekaufte oder stark reglementierte Leistungen, wie Kosten für tariflich gebundenes Fahrpersonal. Beeinflussbar sind Kostenpositionen, die im direkten unternehmerischen Einfluss stehen. Dazu zählen alle Kostenpositionen die durch konzeptionelle Anpassung der internen Abläufe verändert werden können. Die Kosten für die Beschaffung großer technischer Anlagen, wie Eisenbahnfahrzeuge und Anlagen für die Instandhaltung sowie Kosten für den Verwaltungs- und Managementbereich sind ebenso beeinflussbar wie die Instandhaltungs- und Behandlungskonzepte. Insofern bedeutet Wettbewerb im Eisenbahnmarkt auch ein Wettbewerb der Konzepte. Dabei ist der Anteil der Fahrzeuginstandhaltung, mit mehr als einem Fünftel an den beeinflussbaren Kosten, ein wichtiger Erfolgsfaktor.

Planmäßige und wiederkehrende Wartung, Instandsetzung nach Unfall oder Vandalismus sowie außerplanmäßige Wartung



**Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Siegmann**  
Leiter des Fachgebiets Schienenfahrwege und Bahnbetrieb der Technischen Universität Berlin  
jsiegmann@railways.tu-berlin.de

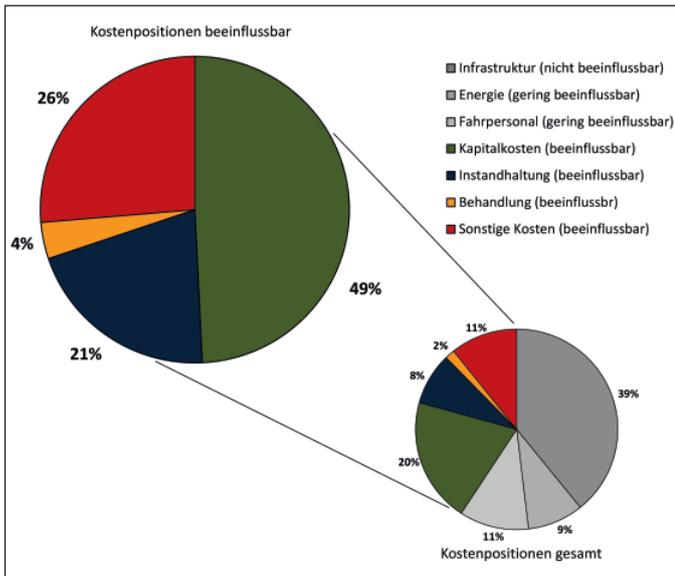


**Prof. Dr.-Ing. Klaus-Martin Melzer**  
TH Wildau  
kmmelzer@th-wildau.de



**Dr.-Ing. Ingo Heinrich**  
Leiter Vergabemanagement NRW, DB Regio AG  
ingo.heinrich@deutschebahn.com

und Reparatur infolge von technischen Mängeln charakterisieren die Instandhaltung von Eisenbahnfahrzeugen. In der Literatur wird das Verhältnis zwischen planmäßiger und außerplanmäßiger Instandhaltung umfangreich diskutiert. Unabhängig von der gewählten Instandhaltungsstrategie müssen Eisenbahnverkehrsunternehmen mit »



**BILD 1:** Anteil Kostenpositionen für den Betrieb einer Eisenbahnflotte<sup>1)</sup>

1) Kostenpositionen gemittelt aus 18 SPNV-Wettbewerbsverfahren

einem mehr oder minder großen Anteil an außerplanmäßigen Instandhaltungsaufwendungen umgehen. Ein Außerplananteil von 75 % an der Instandhaltung<sup>2)</sup> ist dabei in der Praxis häufig keine Seltenheit. Mit Blick auf die geringen Handlungsspielräume eines Unternehmens auf die für den Betrieb einer Eisenbahnflotte notwendigen Gesamtkosten, stellt der Umgang mit der außerplanmäßigen Instandhaltung demnach eine wichtige unternehmerische Herausforderung dar.

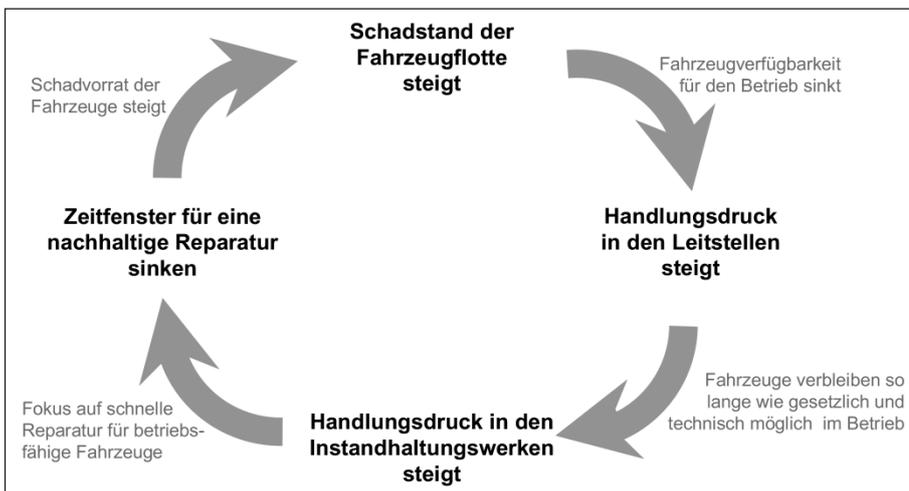
Zahlreiche Untersuchungen der Instandhaltungsaufwendungen für komplexe technische Anlagen beschreiben einen Anstieg dieser Aufwendungen über die Zeit. Dabei wird der Verlauf in unterschiedlichsten Ausformungen dargestellt. Bei umfangreichen Analysen zu den Verläufen von Ausfallraten in der zivilen Luftfahrt wurde herausgefunden, dass die Ausfallrate über die Zeit in

Abhängigkeit der Komplexität des technischen Systems steigt<sup>3)</sup>. Untersuchungen im Zusammenhang mit Schienenfahrzeugen haben ebenfalls gezeigt, dass die Häufigkeit der außerplanmäßigen Instandhaltung mit zunehmendem Fahrzeugalter deutlich ansteigt. Relative Kostensteigerungen für die außerplanmäßige Instandhaltung übersteigen meist auch die statistisch gemittelten Steigerungsraten der entsprechenden Branchen. Fällt ein technisches System aufgrund einer Störung aus, wird dieser Ausfall wirtschaftlich relevant, sobald das technische System für die Erbringung einer Leistung benötigt wird. Im Falle einer wiederholten oder permanenten Unterschreitung definierter Verfügbarkeitswerte kommt es in einem, an wirtschaftlichen Zielen orientierten, nichtmonopolistischen Eisenbahnmarkt auch zu negativen monetären Effekten. Nicht- oder Schlechtleistung

2) Instandsetzung nach Unfall, Serienschäden sowie Hauptuntersuchungen sind nicht enthalten

3) vgl. Matyas, Kurt, 2013, S. 36-38

**BILD 2:** Teufelskreis Fahrzeugverfügbarkeit



vertraglich geschuldeter Verkehre werden von den Auftraggebern penalisiert und von Fahrgästen negativ bewertet, außerdem zeigt eine dauerhafte schlechte Betriebsqualität eine entsprechende Wirkung auf die Bereitschaft der Auftraggeber zur zukünftigen Zusammenarbeit.

Bei der Dimensionierung eines gesamthaften Eisenbahnbetriebssystems<sup>4)</sup> bestimmen die entsprechenden betrieblichen Ressourcen aus dem Zusammenspiel der Zeitfenster im Fahrzeugumlauf und in den Instandhaltungswerken die Möglichkeiten der Durchführung einer außerplanmäßigen Instandhaltung. Eine Vergrößerung der Zeitfenster für die Instandhaltung im Fahrzeugumlauf kann beispielsweise durch den Einsatz zusätzlicher Reservefahrzeuge und in den Instandhaltungswerken durch die Einführung zusätzlicher Handwerkerschichten erzielt werden. Umgekehrt verringert der Verzicht auf Reservefahrzeuge oder die Einsparung von Handwerkerschichten die Möglichkeiten einer außerplanmäßigen Instandhaltung. Steigt der Umfang notwendiger außerplanmäßiger Instandhaltungsaufwendungen über die Zeit an, werden die, neben den Zeitfenstern für die Planinstandhaltung, zusätzlich zur Verfügung stehenden Zeitfenstern im gleichen Umfang geringer. Der Handlungsdruck in den Leitstellen, alle Zugleistungen trotz fallender Fahrzeugverfügbarkeit disjunktiv abzudecken, wächst dabei stetig. Bedingt durch dieses Spannungsfeld zwischen Betrieb und Instandhaltung richtet sich der Fokus in den Instandhaltungswerken auf eine schnelle Reparatur der Schäden. Betriebliche Zeitfenster für eine nachhaltige Bearbeitung aller Fahrzeugschäden werden geringer, was wiederum einen steigenden Schadstand und den damit verbundenen erhöhten Bedarf an der außerplanmäßigen Instandhaltung nach sich zieht. Ein Teufelskreis.

Befindet sich eine Eisenbahnflotte in dem Teufelskreis der Fahrzeugverfügbarkeit wird ohne einen betrieblichen Eingriff der Grad der Schädigung kontinuierlich steigen. Da sich eine Anpassung der Wartungsstrategie innerhalb eines Lebenszyklus der Eisenbahnfahrzeuge oft als zeitlich träge erweist und unter wettbewerbsgeprägtem Druck die betrieblichen Ressourcen vielfach möglichst gering dimensioniert werden, dreht sich dieser Teufelskreis, mit starkem Einfluss auf das Schädigungsverhalten der Fahrzeugflotte, häufig immer schneller.

4) als Eisenbahnbetriebssystem wird hier das Zusammenspiel verschiedener Planungsgrößen (wie Anzahl und Art der Eisenbahnfahrzeuge, Lage der Instandhaltungswerke im Netz, Fahrplankonzept, Dienstschichtenkonzept, Regeln bei der Instandhaltung) in einem geschlossenen System bezeichnet

## 2. ZUSAMMENHANG ZWISCHEN VERFÜGBARKEIT UND SCHÄDIGUNGS-VERHALTEN

Eine wichtige Kennzahl für die Steuerung der Betriebsqualität von Eisenbahnverkehrsunternehmen wird aus der Fahrzeugverfügbarkeit gebildet. Als tagesscharfe Ganglinie, abgetragen über die Zeit, kann so das Unterschreiten zuvor festgelegter Schwellenwerte (Gw) überwacht oder mit vergangenen Perioden verglichen werden. Die Fahrzeugverfügbarkeit wird von zahlreichen Rahmenbedingungen beeinflusst. Störungen im täglichen Betrieb der benutzten Eisenbahninfrastruktur, Verspätungsauswirkungen, Ausfall von Betriebspersonal sowie technische Ausfälle der eingesetzten Eisenbahnfahrzeuge sind hier beispielhaft zu nennen. Mit dem dargestellten Teufelskreis der Fahrzeugverfügbarkeit steigt ohne weiteren steuernden Eingriff der Einfluss von technischen Fahrzeugstörungen auf die Fahrzeugverfügbarkeit über den gesamten Lebenszyklus des Eisenbahnfahrzeugs stark an. Die Kenntnis der Zeitpunkte in denen der Grad der Schädigung unmittelbare Auswirkung auf die Fahrzeugverfügbarkeit hat, ist wünschenswert um gezielt wirtschaftlich sinnvolle Maßnahmen einleiten zu können.

Eine Flotte von Eisenbahnfahrzeugen (Fg) setzt sich aus drei Teilflotten zusammen. Die Teilflotte zur Erbringung der geforderten Fahrplanleistungen ( $Fg_{fpl}$ ) wird für die Bedienung aller Fahrten der zugehörigen Fahrpläne benötigt. Zur Abdeckung von Kapazitätsspitzen im Personenverkehr können Waggons und Lokomotiven oder Triebwagen zu Zugverbänden zusammengekuppelt werden. Die entsprechenden Fahrzeuge werden der Teilflotte zur Erbringung der geforderten Zugbildung ( $Fg_{trak}$ ) zugeordnet. Die dritte Teilflotte bildet sich aus den Reservefahrzeugen ( $Fg_{res}$ ). Anzahl und Zusammensetzung dieser dritten Teilflotte sind stark abhängig von der gewählten Instandhaltungsstrategie und den betrieblichen Anforderungen. Hierzu zählen auch eine Ermittlung der Anteile aus der plan- und außerplanmäßigen Instandhaltung sowie eine Berechnung weiterer betrieblicher Ressourcen wie die zur Verfügung stehenden Zeitfenster für die Fahrzeuginstandhaltung. Reservefahrzeuge können außerdem zur Stabilisierung des Fahrplans im Verspätungsfall vorgesehen werden. Abgeleitet aufgrund langjähriger Erfahrungen im Flottenmanagement sowie auf Grundlage des beschriebenen Spannungsverhältnisses zwischen Eisenbahnbetrieb und der nachhaltigen Instandhaltung von Eisenbahnfahrzeugen, gliedert sich deren Verfügbarkeit in drei Phasen auf. Ein angenäherter sinusför-

miger Verlauf zeigt dabei saisonale, häufig durch jahreszeitlich bedingte Fahrzeugschäden getriebene, wiederkehrende Effekte.

Die einzelnen Verfügbarkeitsphasen einer Flotte von Eisenbahnfahrzeugen grenzen sich untereinander in Schwellenwerten (Gw) ab und unterscheiden sich in ihrem Charakter dabei wie folgt:

### Phase Planleistung

In dieser Phase werden alle geforderten Fahrplanleistungen abgedeckt sowie die Zugbildung im geplanten Umfang gebildet. Für die planmäßige Instandhaltung steht ausreichend Zeit zur Verfügung. Fälle von außerplanmäßigen Instandhaltungsaufwendungen werden in freien Zeitlagen abgearbeitet. Die Fahrzeugreserve ist ausreichend dimensioniert.

### Phase Schlechtleistung

Können in Folge von Fahrzeugausfällen häufig Teile der geplanten Zugbildung nicht mehr zusammengestellt werden, befindet sich die Fahrzeugverfügbarkeit in einer Phase der Schlechtleistung. In den Hauptverkehrszeiten werden zum Beispiel nicht mehr alle notwendigen Sitzplätze angeboten. Es kommt zu Qualitätseinbußen. Der Fokus bei der Instandhaltung liegt auf einer notwendigen Reparatur zur zeitnahen Rückkehr in den Planzustand. Freie Zeitlagen zur nachhaltigen Reparatur aller Fahrzeugschäden beschränken sich auf die Zeit, in der der Verkehr nach Plan erbracht wird. Werden diese Zeitlagen so gering, dass nicht mehr alle Schäden abgearbeitet werden können, ist eine dauerhafte Rückkehr in die Phase der Planleistung ohne betriebliche Beeinflussung, wie Einsatz zusätzlicher Reservefahrzeuge oder Einführung weiterer Handwerkerschichten in den Instandhaltungswerken, nicht umsetzbar.

### Phase Nichtleistung

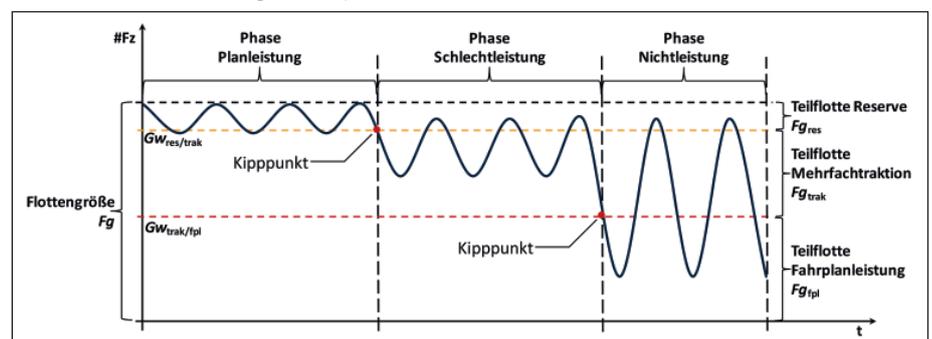
Steigen die Fahrzeugausfälle in dem Maße an, dass einzelne Fahrplanfahrten nicht mehr erbracht werden können, kommt es zu Zugausfällen. Die Fahrzeugverfügbarkeit

befindet sich dann in einer Phase der Nichtleistung. Der dadurch ausgelöste große Handlungsdruck in den Instandhaltungswerken lässt eine nachhaltige Reparatur der schadhafte Fahrzeuge häufig nicht mehr zu. Die in dieser Phase hohe Anzahl an nichteinsatzfähigen Eisenbahnfahrzeugen ermöglicht, durch Wegfall der eigentlichen Planinstandhaltung von schadhafte abgestellten Fahrzeugen, weitere Zeitfenster für die Abarbeitung der dringlichsten Schäden. Die Phase der Nichtleistung wechselt so nach kurzer Zeit in die Phase der Schlechtleistung zurück. Ohne weitere betriebliche Beeinflussung pendelt sich die Fahrzeugverfügbarkeit, mit einem Wechsel zwischen den Phasen der Schlecht- und der Nichtleistung, auf einem gleichbleibend schlechten Niveau ein.

In jedem komplexen technischen System wirken zahlreiche Komponenten und Teilsysteme unterschiedlich zusammen. Auftretende Störungen an einer Komponente bedeuten häufig noch keinen Ausfall des gesamten Systems. Steigt die Anzahl der einzelnen Störungen an verschiedenen Komponenten oder Teilsystemen, so steigt auch die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls des Gesamtsystems. Außerdem bestehen Zusammenhänge zwischen den Komponenten untereinander. Die Schädigung einer Komponente oder innerhalb eines Teilsystems führt, zeitlich versetzt, als Folgeschaden zu Schädigungen weiterer Teilsysteme, was wiederum den Ausfall des gesamten Systems hervorrufen kann. Beispielsweise können Antriebsanlagen mit Verbrennungsmotoren an Kühl- oder Schmiermittelkomponenten Schäden in Form von Undichtigkeiten aufweisen, wobei das Gesamtsystem der Antriebsanlage weiterhin funktionsfähig bleibt. Wird dieser Fehler mittelfristig nicht behoben sind auch größere Folgeschäden möglich. So können die austretenden Flüssigkeiten die Motorenaufhängungen beschädigen, was zum Ausfall der gesamten Anlage führt und eine entsprechende Instandsetzung notwendig macht.

Auf Grundlage der gängigen Methodik »

**BILD 3:** Idealierte Verfügbarkeitsphasen einer Eisenbahnflotte



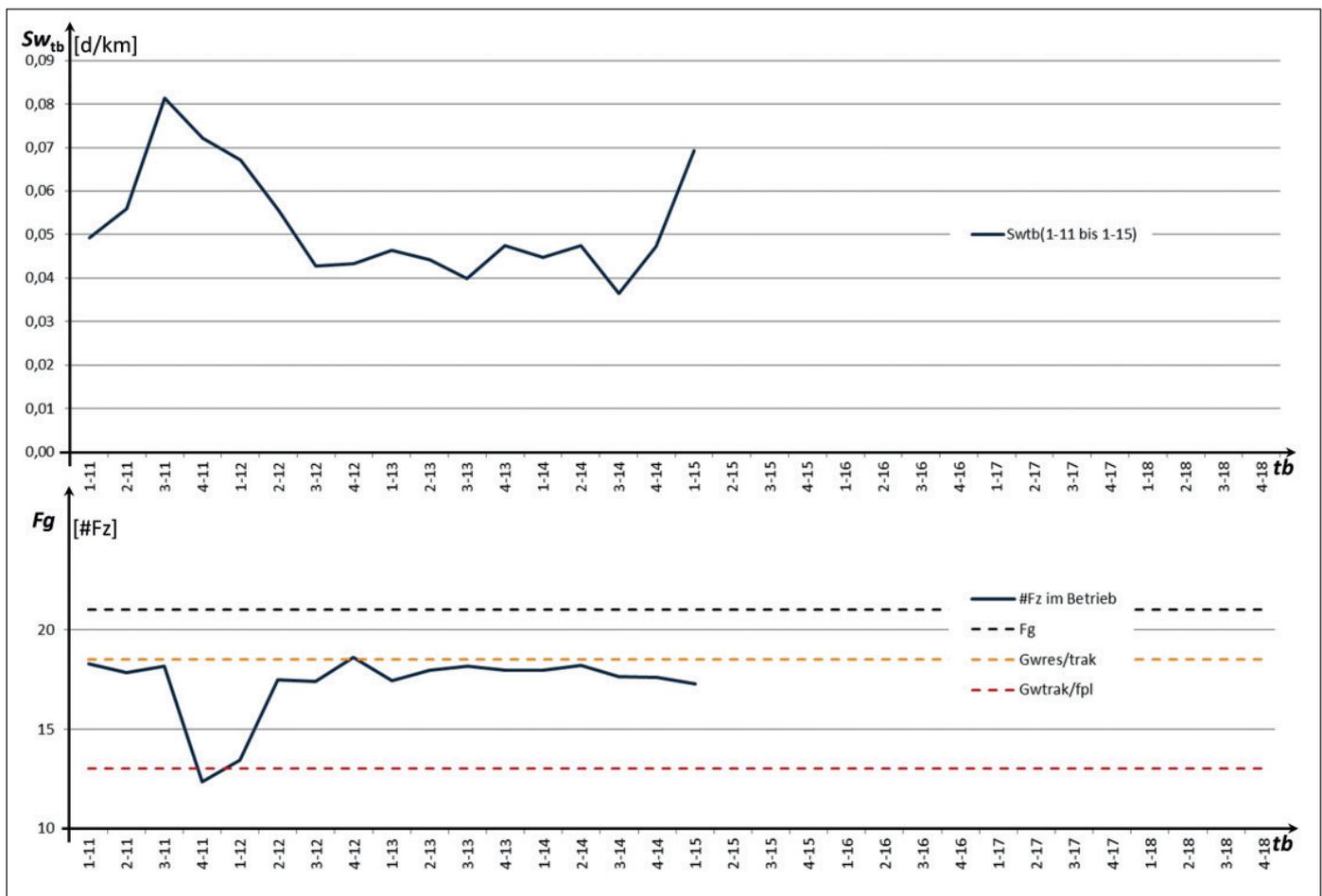


BILD 4: Schadwert und Fahrzeugverfügbarkeit am Beispiel einer Flotte Dieseltriebwagen

zur Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) stellt der hier neu hergeleitete Schadwert ( $Sw_{tb}$ ) eine allgemeingültige Aussage zum Schädigungszustand einer Eisenbahnflotte dar. Der Schadwert ( $Sw_{tb}$ ) wird dabei aus der Summe einzelner Teilschadwerte innerhalb der Betrachtungszeit ( $tb$ ) gebildet. Ein Teilschadwert bildet den Schadwert für die Behebung einer einzelnen Störung ab. Im Wesentlichen wird dazu zur Berechnung das Produkt aus der Schadensbehebungszeit mit einem Gewichtungsfaktor gebildet und zur Darstellung der Allgemeingültigkeit durch diverse Faktoren, wie Flottengröße und durchschnittliche Tageslaufleistung des betroffenen Fahrzeuges geteilt.

Die hier verwendete Datenbasis zur Berechnung und Abbildung der absoluten Schadwerte in den zeitlichen Verläufen sowie die Abbildung der dementsprechenden Fahrzeugverfügbarkeit, wurde dabei aus voneinander unabhängigen, getrennten Systemen gespeist<sup>5)</sup>. Die Betrachtungszeit wurde dabei in Quartale aufgeteilt. Die Ergebnisse zeigen einen stark signifikanten Zusammen-

hang zwischen der Fahrzeugverfügbarkeit und dem neu aufgestellten Schadwert, was die gewählten Ansätze als valide erscheinen lässt. Bei längeren Betrachtungszeiträumen ist ein zeitlicher Versatz zwischen der Veränderung des absoluten Schadwerts und der Veränderung der Fahrzeugverfügbarkeit zu beobachten. So ist im Falle einer erkennbaren Verschlechterung der Schadwerte dieser Zusammenhang in der Praxis als eine Art Frühwarnsystem anzuwenden.

### 3. RESSOURCENGRENZE IM EISENBAHNBETRIEB

Die turnusmäßige Planinstandhaltung von technischen Anlagen kann allgemein nur ordnungsgemäß durchgeführt werden, wenn die dafür vorgesehenen Ressourcen in ausreichender Anzahl und zur vorgesehenen Zeit zur Verfügung stehen. Für einfache technische Anlagen wird mindestens ein Mitarbeiter, der die Instandhaltungsarbeiten durchführt, benötigt. Mit steigender Komplexität der Anlagen steigt auch der Anspruch an die Instandhaltung sowie an die für die Instandhaltung vorgesehenen Ressourcen. Beispielsweise können

für die vorgesehene Planinstandhaltung spezielle Werkzeuge benötigt werden, die nur begrenzt zur Verfügung stehen oder ausgewählte Arbeitsinhalte einer Instandhaltungsmaßnahme erfordern bestimmte Mitarbeiterqualifikationen, die nicht jeder Mitarbeiter aufweist. Technisch komplexe Anlagen, die nicht an einem festen Ort installiert sind sondern sich durch Mobilität charakterisieren lassen, benötigen häufig einen fest zugewiesenen Ort zur Durchführung der geplanten Instandhaltungsmaßnahme. So werden bestimmte Planinstandhaltungen von Luftfahrzeugen in einem dafür vorgesehenen Hangar durchgeführt, für Wasserfahrzeuge wird zeitweise ein Trockendock benötigt und für Eisenbahnfahrzeuge in zahlreichen Anwendungsfällen der Planinstandhaltung ein entsprechendes Instandhaltungswerk. In der überwiegenden Anzahl der Fälle können technische Anlagen in der Zeit der Instandhaltung für ihren eigentlichen Einsatzzweck nicht weiter genutzt werden. Instandhaltung macht somit bei unternehmerisch eingesetzten Anlagen stets eine wirtschaftliche Betrachtung der durch die Instandhaltung hervorgerufenen Ausfallzeiten notwendig. Mit Blick auf eine erfolgreiche Instandhaltung zu einem

<sup>5)</sup> Schadwert aus Instandhaltungssystemen, Fahrzeugverfügbarkeit aus betrieblichen EDV-Systemen

geplanten Zeitpunkt bilden im Eisenbahnbetrieb folgende Ressourcen ein wichtiges Zusammenspiel:

- Fahrzeugumlauf
- Mitarbeiter Instandhaltung
- Arbeitsmittel Instandhaltung

Im Umgang mit diesen Ressourcen ist die Instandhaltung durchzuführen, wobei die Möglichkeit für eine außerplanmäßige Instandhaltung abhängig von den gesamthaft zur Verfügung stehenden Ressourcen, abzüglich derer für die Planarbeiten ist.

Die Durchführung einer außerplanmäßigen Instandhaltung unterliegt somit betrieblichen Grenzen. Diese einzelnen Ressourcengrenzen können jeweils in einem zahlenbasierten System dargestellt werden, um so die objektive Vergleichbarkeit herzustellen und abschließend einen Ansatz für die Bestimmung der maßgeblichen Ressourcengrenze aufzuzeigen.

#### 4. PROGNOSEMODELLE, SCHADWERTGRENZEN UND HERLEITUNG EINES SCHADINDEXES

Die belastbare Vorhersage des Schädigungsverhaltens einer Eisenbahnflotte macht ein valides Prognosemodell notwendig. In der Literatur werden für die Instandhaltung im Rahmen von Prognosen der Ausfallraten von Anlagen und Komponenten zahlreiche Berechnungsmethoden beschrieben. Abgeleitet werden diese aus dem mathematischen Bereich der Statistik.

Zur beispielhaften Darstellung eines prognostizierten Schadwerts ( $Sw_{tb}^*$ ) sind an dieser Stelle Berechnungen welche saisonale Verläufe innerhalb eines Jahres und auch Überlagerungen mit zyklischen Schwankungen in einem mehrjährigen Abstand berücksichtigt, gewählt worden.

Die Herstellung einer Korrelation zwi-

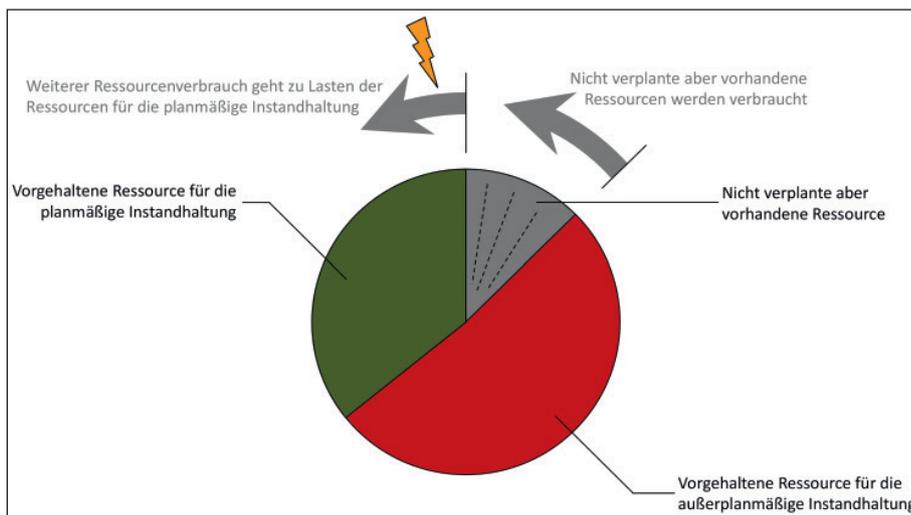


BILD 5: Verbrauch für die Instandhaltung wichtiger Ressourcen

schenden den betrieblichen Ressourcengrenzen und dem Schädigungsverhalten macht die Herleitung der Schädwertgrenzen notwendig. Hierfür ist die mathematische Funktion des Grades der Schädigung in ihrem zeitlichen Verlauf zu bestimmen ( $Sw_{(tb)}$ ). Dabei dienen zur Auffindung eines Zeitpunktes, an dem der Schädwert eine entscheidende Ressourcengrenze erreicht, relevante Änderungen seines tendenziellen Verlaufes. Die abstrakte Entwicklung des Schädigungsverhaltens als Ganglinien kann in ihrer Tendenz, mittels Regressionsberechnung über das Verfahren der kleinsten Fehlerquadrate, in einem sehr gut handhabbarem Maße abstrahiert und somit eine Reduktion der Komplexität herbeigeführt werden. In einem aus der Trendfunktion abgebildeten Graphen stellt die Steigung den jeweiligen Zuwachs des Schädwerts dar. Im Grunde wird somit die Geschwindigkeit der Zu- und Abnahme des Grades der Schädigung einer Fahrzeugflotte ablesbar. Wie oben erläutert, kommt es bei der Verfügbarkeit von Eisenbahnfahrzeugen zu Übergängen zwischen den drei Phasen

Planleistung, Schlechtleistung und Nichtleistung. Für den Zusammenhang zwischen Schädigungsverhalten und der Fahrzeugverfügbarkeit bedeutet dies im Einzelnen:

#### Phase Planleistung

In dieser Phase werden alle geforderten Fahrplanleistungen abgedeckt sowie die Zubildung im geplanten Umfang gebildet. Der Grad der Schädigung ( $Sw_{tb}$ ) befindet sich dauerhaft auf einem niedrigen Niveau. Die Geschwindigkeit, in der sich der Schädwert ändert ist dabei sehr gering. Eine eventuelle Verschlechterung des Flottenzustands, mit Ansteigen des Schädwerts ( $Sw_{tb}$ ) ohne Beobachtung des Schädigungsverhaltens bleibt solange unentdeckt, bis der Grad der Schädigung die entsprechende Grenze erreicht ( $SwG_{res/trak}$ ) und die Fahrzeugverfügbarkeit in die Phase der Schlechtleistung wechselt.

#### Phase Schlechtleistung

Können in Folge von Fahrzeugausfällen häufig Teile der Zubildung nicht mehr angeboten werden, befindet sich die »

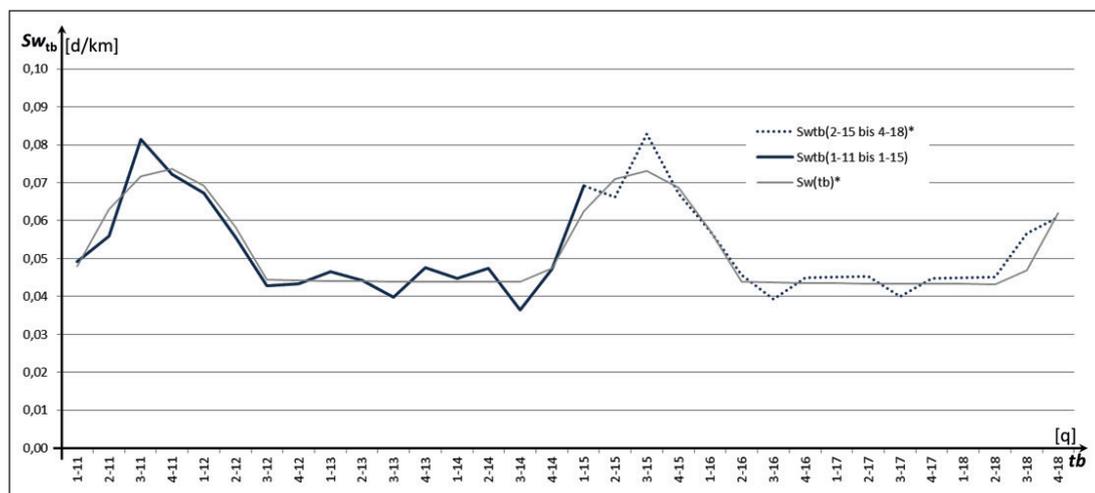


BILD 6: Schädwert und Schädwertprognose am Beispiel einer Flotte Dieseltriebwagen

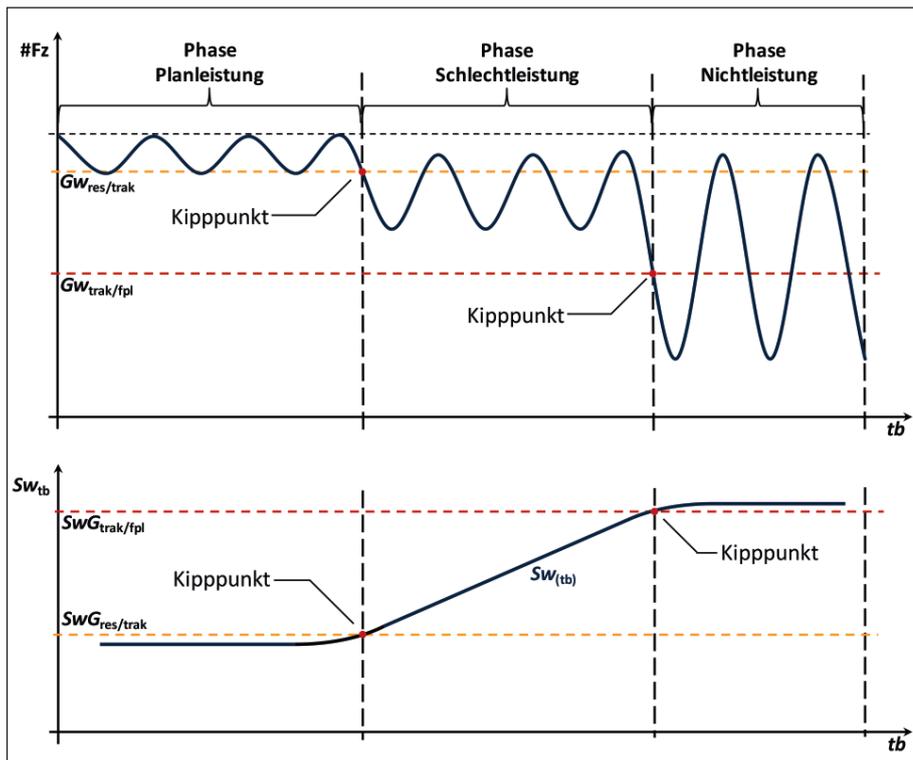


BILD 7: Geschwindigkeitswechsel bei Änderung des Schadwerts

Fahrzeugverfügbarkeit in einer Phase der Schlechtleistung. Der Grad der Schädigung (Sw<sub>tb</sub>) erreicht ein hohes Niveau. Zeitfenster für die außerplanmäßige Instandhaltung werden geringer. Die Geschwindigkeit, mit der sich der Grad der Schädigung (Sw<sub>tb</sub>) ändert ist stark erhöht. Ohne weitere Anpassungen ist eine Rückführung in die Planphase nicht möglich. Eine weitere Verschlechterung des Flottenzustands, mit einem ungebremsten Ansteigen des Schadwerts (Sw<sub>tb</sub>) ohne Beobachtung des Schädigungsverhaltens bleibt solange unentdeckt, bis der Grad der Schädigung die nächste Grenze erreicht (Sw<sub>G<sub>trak/fpl</sub></sub>) und die Fahrzeugverfügbarkeit in die Phase der Nichtleistung wechselt.

**Phase Nichtleistung**

Steigen die Fahrzeugausfälle in dem Maße so an, dass einzelne Fahrplanfahrten nicht mehr erbracht werden können, kommt es zu Zugausfällen. Die Fahrzeugverfügbarkeit befindet sich dann in einer Phase der Nichtleistung. Der Schadwert (Sw<sub>tb</sub>) erreicht kurzzeitig das höchste Niveau und nimmt anschließend wieder bis auf eine Höhe aus der Phase der Schlechtleistung ab. Die Geschwindigkeit in welcher der Grad an Schädigung (Sw<sub>tb</sub>) verändert wird, ist deutlich niedriger als in der Phase der Schlechtleistung. Ausgefallene Eisenbahnfahrzeuge stehen in dieser Phase dem Eisenbahnbetrieb nicht mehr zur Verfügung, was den Ausfall

von Planleistungen auch in der Instandhaltung nach sich zieht. Zeitfenster für die außerplanmäßige Instandhaltung sind in der Phase der Nichtleistung wieder in höheren Maßen vorhanden. Die Fahrzeugverfügbarkeit fällt dementsprechend wieder in die Phase der Schlechtleistung zurück, wobei ein Pendeln zwischen den Phasen der Schlechtleistung und der Nichtleistung wahrscheinlich ist.

Die Übergänge zwischen den drei verschiedenen Verfügbarkeitsphasen sind durch einen Geschwindigkeitswechsel bei der Veränderung des Schadwerts (Sw<sub>tb</sub>) gekennzeichnet. Die mathematische Funktion des Grads der Schädigung (Sw<sub>(tb)</sub>) verändert an diesen Stellen ihre Steigung, was auf einen Kippunkt hindeutet. In diesen Kippunkten ändert sich der Grad der Schädigung dramatisch. Hieraus abgeleitet befinden sich die Schadwertgrenzen (Sw<sub>G</sub>) auf der Höhe der entsprechenden Kippunkte.

Für die Auswahl einer geeigneten mathematischen Funktion zur Darstellung der tendenziellen Entwicklung des Schadwerts (Sw<sub>tb</sub>) über den gesamten Betrachtungszeitraum haben sich, aufgrund der saisonalen Schwankungen des Schadwerts (Sw<sub>tb</sub>), lineare Funktionen als ungeeignet herausgestellt. Auch einseitig nach oben oder unten geöffnete Funktionen, wie logarithmische oder quadratische Ansätze, können den komplexen Verlauf des Schadwerts (Sw<sub>tb</sub>) nur sehr bedingt in seiner Tendenz wiedergeben. Polynomfunktionen niedrigerer Ordnung weisen im Rahmen ihrer parametrisierten Modulation nur geringe Möglichkeiten auf. Polynomfunktionen ab einem vierten Ordnungsgrad zeigen einen guten Kompromiss aus mathematischer Handhabbarkeit und Komplexitätsreduktion.

Mit den Ansätzen zur Herleitung der relevanten Grenzen des Schädigungsverhaltens einer Flotte von Eisenbahnfahrzeugen (Sw<sub>G<sub>res/trak</sub></sub> und Sw<sub>G<sub>trak/fpl</sub></sub>) sowie der hier skizzierten Verfahren zur Ermittlung der Schad-

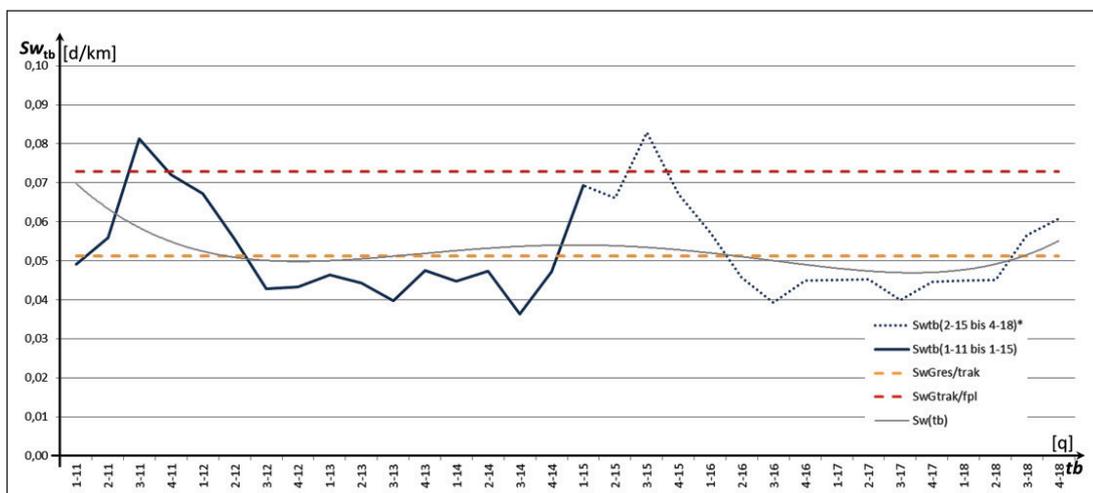


BILD 8: Schadwertgrenzen am Beispiel einer Flotte Dieseldieseltriebwagen

werte ( $Sw_{tb}$ ) und deren Fortschreibung in die Zukunft ( $Sw_{tb}^*$ ), wird ein Schadindex ( $Si_{tb}$ ) innerhalb der Betrachtungszeit mit einer recht einfachen Verhältnisformel gebildet. Dabei wird die Indexbasis mit der Grenze des Schadwerts im Übergang zwischen der Planphase und der Phase der Schlechtleistung ( $Sw_{G_{res/trak}}$ ) gewählt. Mit Hilfe der Transformation des Schadwerts ( $Sw_{tb}$  und  $Sw_{tb}^*$ ) in einen entsprechenden Schadindex ( $Si_{tb}$  und  $Si_{tb}^*$ ) sind die Eisenbahnfahrzeuge somit untereinander zu vergleichen. Unterschiedliche Niveaus bei der Schadwertbetrachtung der einzelnen Fahrzeugflotten sind so ausgeglichen.

## 5. SCHADINDEX BEI ANPASSUNG DER BETRIEBLICHEN RESSOURCEN

Mit dem, in seinem zeitlichen Verlauf, dargestellten Schadindex sind verschiedene Eisenbahnfahrzeugflotten, in ihrem vergangenen und zukünftigen Agieren in den entsprechenden Eisenbahnbetriebssystemen, miteinander vergleichbar. Gelingt es, die zukünftige Entwicklung des Schadindex über eine Anpassung der betrieblichen Ressourcen zu beeinflussen, so besteht die

Möglichkeit das Eisenbahnbetriebssystem zeitgerecht, also zum wirtschaftlich bestmöglichen Zeitpunkt, zu optimieren. Es können sozusagen verschiedene Zustände in der Zukunft simuliert werden. Dabei sind Anpassungen der maßgeblichen Ressource von Anpassungen bei den nichtmaßgeblichen Ressourcen zu unterscheiden.

Als maßgebliche Ressourcengrenze wird in diesem Artikel diejenige betriebliche Grenze bezeichnet, welche durch außerplanmäßige Instandhaltungsarbeiten am ehesten erschöpft wird. Kommt es nach Erschöpfung der maßgeblichen betrieblichen Ressource zu weiteren Fällen der außerplanmäßigen Instandhaltung, so werden für die Durchführung der außerplanmäßigen Arbeiten Planarbeiten ausfallen. Der hergeleitete Schadindex bildet das Zusammenspiel des Grads der Schädigung einer Eisenbahnfahrzeugflotte mit den entsprechenden betrieblichen Ressourcen ab. Eine Anpassung der maßgeblichen betrieblichen Ressource ( $R_g$  zu  $R_g^*$ ) hat dabei großen Einfluss auf den Schadwert und damit auch auf den Schadindex. Für den Fall, dass zum Beispiel die Anzahl der Mitarbeiter in einem Instandhaltungswerk eine maßgebliche Ressource darstellt, stehen mittels Einplanung

zusätzlicher Handwerkerschichten in den Instandhaltungswerken mehr Möglichkeiten für Arbeiten im Bereich der außerplanmäßigen Instandhaltung zur Verfügung. Dies ist bis zur Erschöpfung dieser erweiterten Ressource durchführbar. Eine Veränderung der maßgeblichen Ressourcengrenze hat eine nachhaltige Anpassung des prognostizierten Schadwerts ( $Sw_{tb}^*$ ) in seinem Verlauf zur Folge. Wird eine maßgebliche Ressource in einem Eisenbahnbetriebssystem erweitert senkt sich der Schadwert. Bei Abzug von Bestandteilen der maßgeblichen Ressource steigt der Schadwert in seinem zeitlichen Verlauf. Dabei wird die Tendenz des zukünftigen Schadwerts ( $Sw_{tb}^*$ ) für den gewählten Zeitabschnitt ( $t_{bm}, t_{bn}$ ) in senkrechter Richtung entsprechend in dem Maße verschoben, wie sich die maßgebliche Ressourcengrenze verändert. Das Maß der Veränderung ist über eine mathematische Anpassung der Schadwertfunktion ( $Sw_{tb}^*$ ) darzustellen.

Wird zu einem gewählten zukünftigen Zeitpunkt ( $t_{bm}$ ) eine Anpassung einer betrieblichen Ressource, welche nicht als maßgebliche Ressource definiert wurde vorgenommen, so führt dies auch zu einer Veränderung des zukünftigen Schad- »

**O|W|S** SERVICE  
FÜR SCHIENEN-  
FAHRZEUGE

Reparatur. Fertigung. Entwicklung.



### QUALITÄTSWERKSTATT FÜR SCHIENENFAHRZEUGE

In unserer Werkstatt für Nahverkehrszüge, Reisezugwagen, Diesellokomotiven, Güterwaggons, Gleisbaumaschinen und Schienenfahrzeuge aller Art bieten wir Ihnen unter anderem:

- Wartung, Instandhaltung, Reparaturen, Fristungen, Modernisierung und Redesign
- GFK, Kleben, Sandstrahl- und Lackierarbeiten
- Fertigung und eigenes Entwicklungsteam
- alle wesentlichen Zertifikate, u. a. ECM, VPI, Schweißarbeiten gem. DIN EN 15085-2 CL1, ZfP nach DIN 27201-7:2006 und Kleben nach DIN 6701-2 (Klasse A1)
- **NEU!** Modernisierung älterer Stopfmaschinen

OWS Oberpfälzische Waggon-Service GmbH  
Zur Centralwerkstätte 11 | 92637 Weiden  
T +49 961 398943-0 | [www.ows-weiden.de](http://www.ows-weiden.de)

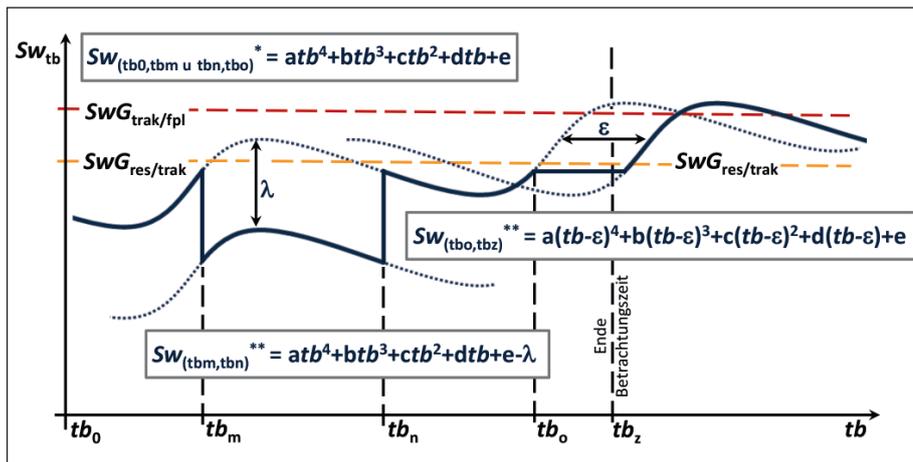


BILD 9: Schadwert bei kombinierter Anpassung

werts ( $Sw_{tb}^{**}$ ). Liegt beispielsweise die maßgebliche Ressourcengrenze bei den Mitarbeitern in den Instandhaltungswerken, die Anpassung soll allerdings ausschließlich durch Erhöhung des Reservefahrzeugbestands erfolgen obwohl die maßgebliche Ressourcengrenze bereits erreicht wurde, so kommt es lediglich zu einer kurzzeitigen Verbesserung der Situation. In diesem Fall werden die zusätzlichen Reservefahrzeuge trotz Erschöpfung der maßgeblichen Ressource eingesetzt. Begründet aus den fehlenden Möglichkeiten Fahrzeugschäden abzuarbeiten, wird auch der Schädigungszustand zusätzlicher Reservefahrzeuge weiter stetig steigen. Das Zufügen einer nichtmaßgeblichen Ressource bewirkt eine kurzzeitig verbesserte Situation, was mittels einer Verschiebung des Schadwerts in waagerechter Richtung gezeigt wird. Der oben skizzierte Teufelskreis wird verlangsamt aber nicht unterbrochen. Auch in diesem Fall kann der Grad der Veränderung durch eine entsprechende Anpassung der Schadwertfunktion ( $Sw_{(tb)}^*$ ) erfolgen.

Durch die Kombination der unterschiedlichen Anpassungsmöglichkeiten in verschiedenen Zeitabschnitten, können, in einem iterativen Verfahren, optimale Verläufe erzielt werden.

In der Grafik durchbricht die Trendfunktion des prognostizierten Schadwerts ( $Sw_{(tb)}^*$ ) zu einem Zeitpunkt ( $tb_m$ ) die maßgebliche Grenze ( $SWG_{res/trak}$ ) und befindet sich ab dann in einem zeitlichen Abschnitt ( $tb_m, tb_n$ ) der Schlechtleistung. Es folgt eine Phase der Planleistung ( $tb_n, tb_o$ ), mit anschließendem deutlichem Anstieg über eine erneute Phase der Schlechtleistung, bis hin zum Durchschreiten der Grenze zur Nichtleistung ( $SWG_{trak/fpl}$ ) und schlussendlich das Erreichen des Endes der Betrachtungszeit ( $tb_z$ ). Eine Anpassung der maßgeblichen Ressourcengrenze für den ersten Abschnitt der Schlechtleistung ( $tb_m, tb_n$ ) ermöglicht eine Verschiebung der Trendfunktion in senkrechter Richtung ( $Sw_{(tb_m, tb_n)}^{**}$ ). Zum Ende der Betrachtungszeit ( $tb_z$ ) ist mittels Anpassung einer nichtmaßgeblichen Ressourcengrenze die Schadwerttrendfunktion so in waage-

rechter Richtung verschoben ( $Sw_{(tb_o, tb_z)}^{**}$ ), dass ein Durchbrechen der maßgeblichen Grenze erst außerhalb des Betrachtungszeitraums liegt. Nachdem der vorhergesagte Schadwert ( $Sw_{tb}^*$ ) mit der Kombination der vorgestellten Verfahren angepasst wurde, folgt die Transformation des simulierten Schadwertes ( $Sw_{tb}^{**}$ ) in einen entsprechenden Schadindex ( $Si_{tb}^{**}$ ) analog der oben beschriebenen Verfahren.

## 6. ALGORITHMUS ZUR HERLEITUNG EINES VORHERSAGBAREN SCHADINDEXES

Heute wird ein Algorithmus im Gabler Wirtschaftslexikon als „eine präzise, d.h. in einer festgelegten Sprache abgefasste, endliche Beschreibung eines allgemeinen Verfahrens unter Verwendung elementarer Verarbeitungsschritte zur Lösung einer gegebenen Aufgabe“<sup>6)</sup> bezeichnet. Algorithmen finden dabei in unterschiedlichsten Bereichen moderner, wissenschaftlicher und industrialisierter Wirkungskreise Anwendung. Beispiele reichen von der Automatisierungstechnik, über die naturwissenschaftliche Forschung bis hin zu Verschlüsselungstechnologien in der Datenverarbeitung. An dieser Stelle wird ein Algorithmus zur Herleitung eines vorher-sagbaren Schadindex für eine Flotte von Eisenbahnfahrzeugen unter wirtschaftlicher Berücksichtigung betrieblicher Ressourcen grob skizziert. Dabei werden die vorher beschriebenen Verfahren in einer systematischen Darstellung zusammengefasst<sup>7)</sup> und schrittweise dargelegt.

Zur Voraussetzung der Berechnungen werden Fälle in denen eine außerplanmä-

6) Gabler Wirtschaftslexikon, Algorithmus, 2016

7) Darstellungsform abgeleitet aus DIN 66001, 1983

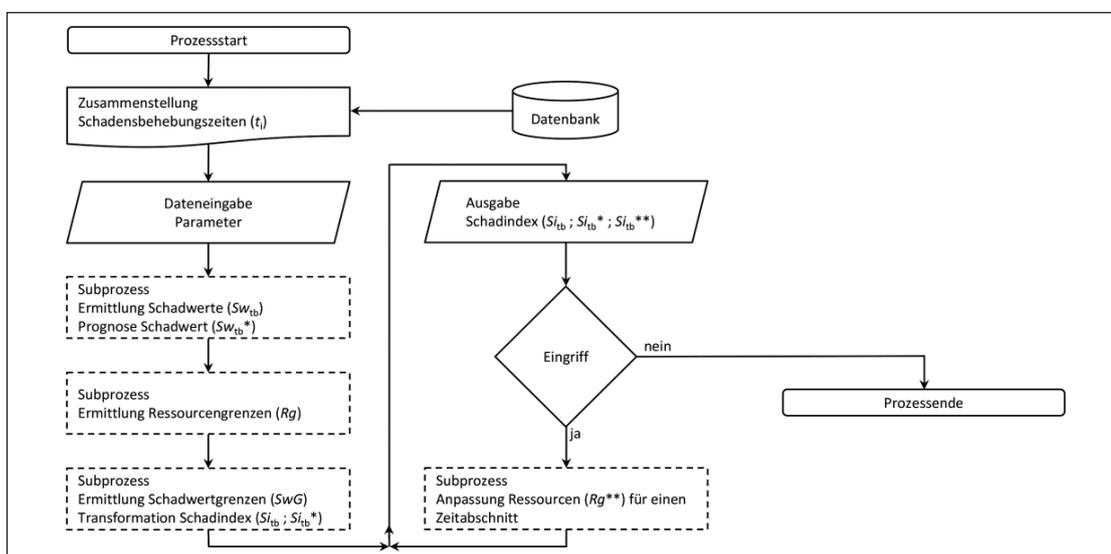


BILD 10: Algorithmus für einen vorhersagbaren Schadindex

ßige Instandhaltung an einer Flotte von Eisenbahnfahrzeugen durchgeführt wurde als Datenbasis benötigt. Nachdem die Schadensbehebungszeiten zusammengetragen wurden erfolgt die Eingabe der notwendigen Parameter, wie beispielsweise die Flottengröße, der Betrachtungszeitraum sowie notwendige Einflussgrößen zur Berechnung der betrieblichen Ressourcen. Gefolgt von den Subprozessen zur Herleitung eines vorhandenen und prognostizierten Schadindex, wird dieser ausgegeben. Die mögliche Anpassung des zukünftigen Schadindex wird über einen iterativen Prozess gelöst. Ist ein wirtschaftliches und betriebliches Optimum erzielt, endet der Algorithmus.

In den vorherigen Absätzen sind die Berechnungsansätze für die Herleitung eines allgemeingültigen, in seinem zeitlichen Verlauf für die Vergangenheit und die Zukunft abbildbaren, Schadindex zu einem Algorithmus zusammengefasst. Der Grad der Schädigung einer Flotte von Eisenbahnfahrzeugen, die in einem definierten Eisenbahnbetriebssystem verkehrt, ist so für Eisenbahnverkehrsunternehmen wiederholbar und standardisiert zu jedem Zeitpunkt ablesbar. Auch eine systematische Simulation der Auswirkungen einer Anpassung von betrieblichen Ressourcen ist mit Anwendung des vorgestellten Algorithmus effektiv möglich. Mitarbeiter aus der Instandhaltungsplanung bekommen dementsprechend ein neues Arbeitsmittel zur Verfügung, welches die vorhandenen Planungswerkzeuge um den Aspekt der Vorhersage außerplanmäßiger Instandhaltungsaufwendungen im Mittel- bis Langfristzeitraum ergänzt.

## 7. AUSBLICK

Planbarer Umgang mit der außerplanmäßigen Instandhaltung von Eisenbahnfahrzeugen, Paradoxon oder Chance? Der Duden beschreibt ein Paradoxon als „etwas, was einen Widerspruch in sich enthält.“<sup>8)</sup> Dieser Fachartikel reißt diesen Widerspruch an und hat in der Tatsache, dass gerade die außerplanmäßige Instandhaltung die betriebliche Stabilität extrem gefährden kann ihren Ausgangspunkt. Das wirtschaftliche Potential bei einer konsequenten Praxisarbeit mit einem vorhersagbaren Schadindex rechtfertigt sicher einen weiteren Forschungsaufwand in diesem Bereich. Wobei der Schwerpunkt zukünftiger Entwicklungsfelder ausdrücklich in der weiteren EDV-technischen Vollautomatisierung des vorgestellten Algorithmus liegen sollte. Praktiker aus dem Gebiet der Instandhaltung diskutierten

in jüngster Vergangenheit den möglichen wirtschaftlichen Mehrwert aus einem systematischen Umgang mit digitalen Technologien im Rahmen der Verarbeitung und Analyse von sehr großen Datenmengen, welche mit herkömmlichen Methoden nicht mehr auszuwerten sind. Die Debatte zu Big Data hat also mittlerweile längst Einzug in die Entwicklung moderner Instandhaltungssysteme erhalten. Planbarer Umgang mit der außerplanmäßigen Instandhaltung von Eisenbahnfahrzeugen, Paradoxon oder Chance? Nicht nur die Kenntnis des vergangenen und zukünftigen Schädigungsverhaltens von Eisenbahnfahrzeugen, sondern gerade die Möglichkeit auf den Mangelverlauf zu einem ökonomisch optimalen Zeitpunkt mit definierten Ressourcenanpassungen einwirken zu können, schafft für Unternehmen in einem stark umkämpften Eisenbahnmarkt wesentliche neue Handlungsspielräume. In-

sofern sehen die Autoren im systematischen Umgang mit dem scheinbaren Paradoxon, die Außerplanmäßigkeit planmäßig zu gestalten, eine große Chance. ◀

### Literatur und Internet

#### DIN 31051, 2012:

Grundlagen der Instandhaltung, Beuth Verlag Berlin

#### DIN 66001, 1983:

Informationsverarbeitung Sinnbilder und ihre Anwendung, Beuth Verlag Berlin

#### Duden, Paradox, 2017:

[www.duden.de/rechtschreibung/paradox#b2-bedeutung-1.html](http://www.duden.de/rechtschreibung/paradox#b2-bedeutung-1.html)

Zugriff vom 04.01.2017

#### Gabler Wirtschaftslexikon, Algorithmus, 2016:

[www.wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/algorithmus.html](http://www.wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/algorithmus.html)

Zugriff vom 17.10.2016

#### Heinrich, Ingo, 2017:

Planbarer Umgang mit der außerplanmäßigen Instandhaltung

Dissertation TU Berlin, Springer Gabler Verlag, Wiesbaden

#### Matyas, Kurt, 2013:

Instandhaltungslogistik Qualität und Produktivität steigern, 5. Auflage, Carl Hanser Verlag München Wien

## ► SUMMARY

Predictable handling of unscheduled maintenance of rail vehicles – paradox or chance? Algorithm to derive a predictable damage index with due regards to economic aspects and operational resources.

Competition characterises the liberalized railway system market in Europe and requires entrepreneurial thinking and acting of railway companies operating long distance, regional and cargo transport. Thereby, dealing with vehicle maintenance is an important factor of success. This paper focuses on the unscheduled maintenance. It describes the methodical derivation of a mathematical model to transfer the damage conditions, i.e. the level of damage of a fleet of railway vehicles, into a valid correlation with available operational resources. This relation is transmitted into a generally applicable key indicator referred to as index of damage. An appropriate prognosis model illustrates this index and predicts its progress over time. The prognosis also considers the opportunity of an iterative adaption of the operational resources. This allows simulating future damage behaviour of a fleet of railway vehicles depending on a changing number of vehicles or varying temporary staff on shiftwork in the maintenance centres. Applying the damage index systematically allows railway companies to expand their room for manoeuvre in order to achieve their strategic and economic objectives. A mere reacting on unexpected vehicle breakdowns turns into a proactive operating in order to prevent failures before they occur.



**faigle**

GLEITEINLAGEN, GLEITPLATTEN & BREMSGESTÄNGEBUCHSEN

- \_ absolute Wartungsfreiheit
- \_ hohe Langlebigkeit
- \_ Schonung umliegender Teile
- \_ gutes Preis-/Leistungsverhältnis

moving forward

8) Duden, Paradox, 2017