

Prognoseverfahren zur Gleislageabweichung bei Einzelfehlern

Erhöhung der Wirtschaftlichkeit der Netzinstandhaltung durch **prognosebasierte Fehlerüberwachung**

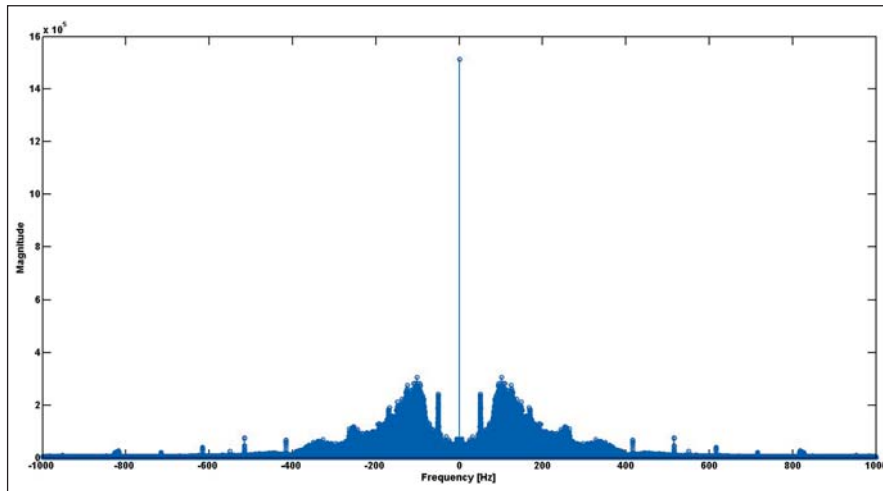


Abb. 1: Symmetrische Spektralanalyse eines Beschleunigungssignals mit hohem niederfrequentem Anteil

Christian Linder
Christoph Lackhove
René Schenkendorf

Die zentrale Aufgabe jedes Schieneninfrastrukturbetreibers ist die adäquate Instandhaltung des Fahrweges sowie dessen Bereitstellung für den Betrieb. Dabei muss das Instandhaltungsmanagement sowohl sicherheitsrelevanten als auch wirtschaftlichen Herausforderungen genügen. Da der sichere Betrieb gegenüber der wirtschaftlichen Effizienz zu Recht priorisiert behandelt werden muss, besteht große Nachfrage nach kostenoptimierenden Verfahren bei Beibehaltung der Sicherheit. Das von der EU geförderte Projekt „Augmented Usage of Track by Optimisation of Maintenance, Allocation and Inspection of Railway Networks“ (AutoMain) adressiert u. a. die Entwicklung von Verfahren und Methoden zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit auf Basis von **prognoseorientierten** Instandhaltungsstrategien. Dieser Artikel fasst insbesondere Ergebnisse aus

dem Bereich der Oberbauinstandhaltung zusammen. Im Folgenden wird zunächst gezeigt, wie sich die entwickelte Methodik in die bestehende Instandhaltung einbettet, bevor diese dann detailliert beschrieben und ein Ausblick gegeben wird.

Aktuelle Verfahren der Netzinstandhaltung

Die für die Netzinstandhaltung anzuwendenden Verfahren und Beurteilungsmaßstäbe sind in Regelwerken und Normen definiert. So beschreiben unter anderem die EU-Norm EN13848 [1] auf europäischer und die DB-Konzernrichtlinie (KöRil) 821.2001 [2] auf nationaler Ebene Verfahren und Grenzwerte für den Oberbau. Auf Basis dieser Regelwerke werden für die Beurteilung des Oberbaustandes bei der Deutschen Bahn AG (DB AG) innerhalb vorgeschriebener Regelinspektionen Messwerte, z. B. der Gleisgeometrie, ermittelt und anhand eines dreigliedrigen Grenzwertsystems (Störgrößen/Reaktionssystem = SR-Werte) beurteilt. Sollten die Messparameter

die jeweiligen SR-Schwellwerte überschreiten, sind geeignete Gegenmaßnahmen einzuleiten:

- SR_A : Als Aufmerksamkeitsgrenze definiert, bedingt dieser Schwellwert die Einleitung der Instandsetzungsplanung nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten.
- SR_{100} : Da 100 % des Abnutzungsvorrates erschöpft sind, muss die Instandsetzung bis zur nächste Regelinspektion stattgefunden haben.
- SR_{LIM} : Bei Überschreitung ist eine Beeinträchtigung der Funktionalität des Fahrweges zu erwarten. Das Einrichten von Langsamfahrstellen bis hin zur Streckensperrung sind mögliche Folgen. Die Instandsetzung muss unmittelbar erfolgen.

Die konkreten Werte für die jeweiligen SR-Grenzen sind dabei ebenso von der Streckengeschwindigkeit abhängig wie der zeitliche Abstand zwischen den Regelinspektionen. Die Tab. 1 und 2 verdeutlichen dies tabellarisch. Tab. 2 zeigt, dass beispielsweise Hauptgleise mit einer zugelassenen Streckenhöchstgeschwindigkeit von $V_{max} > 160$ km/h mindestens alle drei Monate mit einem Gleismessfahrzeug vermessen werden müssen. Im Zeitraum zwischen den einzelnen Prüfungen ist der Streckenzustand jedoch unbekannt. Das bedeutet, dass Gleisfehler mit rascher Fehlerentwicklung bei Entdeckung bereits weit fortgeschritten sein können, was eine sofortige Instandsetzung auslöst. Eine Einplanung der erforderlichen Ressourcen, wie Instandsetzungsteams und -maschinen, ist in einem solchen Fall aufgrund der gezwungenermaßen kurzen Reaktionszeit mit unverhältnismäßig hohem wirtschaftlichem Aufwand verbunden.

Erfassung der Messdaten

Prinzipiell wären kürzere Inspektionsintervalle mit dem Ziel einer quasi-kontinuierlichen Infrastrukturüberwachung für eine kosteneffiziente Instandhaltung vorteilhaft. Sich schnell entwickelnde Fehlerbilder

			für die örtlich zugelassene Geschwindigkeit gemäß VzG bzw. VzG NeiTech [km/h]				
Beurteilungsmaßstab	Prüfgröße	Einheit	$V \leq 80$	$80 < V \leq 120$	$120 < V \leq 160$	$160 < V \leq 230$	$V > 230$
SRA	Längshöhe	[mm]	12	10	8	6	5
SR100	Längshöhe	[mm]	15	13	11	9	7
SRLim	Längshöhe	[mm]	21	17	14	11	9

Tab. 1: Geschwindigkeitsabhängige Beurteilungsmaßstäbe (SR-Werte) gemäß [2] (gekürzt)

könnten so frühzeitig identifiziert und in die Instandhaltungsplanung eingebunden werden. Dafür wäre jedoch eine höherfrequente und flächendeckendere Datenerfassung durch dedizierte Messzüge notwendig. Da dies aber ebenfalls relativ teuer wäre, müssen alternative Verfahren für die Datenerhebung gefunden werden, um eine kostengünstigere Instandhaltung zu realisieren. Im Folgenden wird ein solcher Ansatz betrachtet.

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) hat im Rahmen des von der EU geförderten Forschungsprojektes AutoMain in Kooperation mit der #DB AG und anderen europäischen Partnern u. a. ein Prognoseverfahren zur Überwachung der Schienenlängshöhe entwickelt. Der grundlegende Gedanke hierbei ist, eine auf Prognosemodellen basierende Instandhaltungsstrategie zu entwickeln, welche weitestgehend auf den Einsatz spezieller Messzüge verzichtet. Vielmehr soll die Datengrundlage durch im Regelbetrieb befindliche und mit Inertialsensorik ausgerüstete Fahrzeuge gewonnen werden. Dies bedeutet, dass zusätzlich zu den Daten der regulären Messzugfahrten, die in mehrmonatigen Abständen aufgezeichnet werden, eine Datenreihe pro Streckenbefahrung der planmäßig verkehrenden Lok anfällt. Durch diesen Ansatz der kontinuierlichen Gleisüberwachung (Continuous Track Monitoring – CTM) liegt eine deutlich dichtere Datengrundlage vor, die es ermöglicht, kostenoptimierte Instandhaltungsstrategien, wie z. B. Prognose basierte Verfahren umzusetzen, indem durch Anwendung entsprechender Algorithmen sowie statistischer Modelle Prognosen abgeleitet werden. Nachstehend werden diese Ergebnisse detaillierter beschrieben.

Von der Beschleunigung zum Versatz durch Integration

Die durch die Inertialsensorik gewonnenen Rohdaten liegen zunächst als Beschleunigungswerte des Fahrgestells in Längshöhenrichtung in $[m/s^2]$ vor. Um nun eine Aussage über die Abweichung des Gleises in Längshöhe zu treffen, müssen diese Daten zunächst durch zweifaches Integrieren in Versatzdaten transferiert werden.¹ Dieser mathematisch zunächst recht simple Zusammenhang, gestaltet sich in der Anwendung echter Messdaten jedoch schwierig, da die Rohdaten sowohl durch niederfrequente Effekte wie Sensordrift als auch durch hochfrequente Rauschteile beeinflusst werden. Abb. 1 zeigt die Spektralanalyse des Beschleunigungssignals. Es ist deutlich zu er-

¹ Laufende Forschungen deuten darauf hin, dass der Zusammenhang zwischen wirklicher Störgröße der Gleisgeometrie (hier die Längshöhenauslenkung) und der Fahrzeugreaktion nicht linear ist. Aus Ermangelung geeigneter Modelle wurde hier angenommen, dass das Fahrgestell des Fahrzeuges 1:1 auf die Gleisgeometrie reagiert.

Regelinspektionsabstände der Hauptgleise				
$V \leq 80$	$80 < V \leq 120$	$120 < V \leq 160$	$160 < V \leq 230$	$V > 230$
18 Monate	12 Monate	6 Monate	3 Monate	3 Monate

Tab. 2: Geschwindigkeitsabhängige Regelinspektionsabstände gemäß [2] (gekürzt)

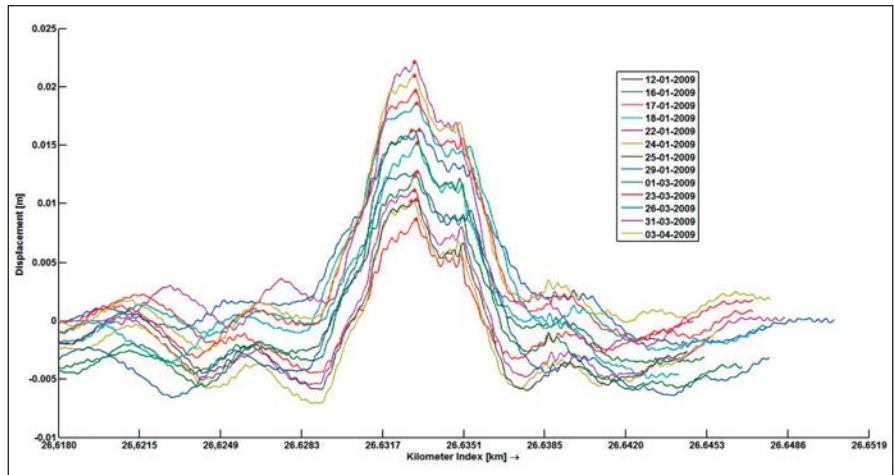


Abb. 2: Ausschnitte aus den Versatzdaten zu 13 verschiedenen Zeitpunkten am Streckenkilometer 26,635. Hier wird ein ca. 10 m langer Einzelfehler analysiert. Die roten Punkte markieren jeweils die Amplitude.

kennen, dass das Signal einen ausgeprägten niederfrequenten Anteil besitzt, der hier als Sensordrift interpretiert wird. Bereits eine geringe Fehlerbehaftung der Rohdaten kann einen großen Einfluss auf die Qualität der resultierenden Versatzdaten haben. Dies gilt insbesondere für den niederfrequenten Sensordriftanteil. Ohne adäquate Vorverarbeitung der Rohdaten akkumuliert sich der Sensordrift beim Integrieren in kürzester Zeit zu einem nicht zu vernachlässigen Fehlerterm auf. Die Versatzdaten wären unbrauchbar. Abhilfe soll die im Rahmen dieses Projektes entworfene Datenprozessierungskette schaffen. Diese sieht vor, dass vor jedem Integrationsschritt die statischen Frequenzanteile herausgefiltert werden. Durch Anwendung geeigneter Hochpass-Filtermethoden der digitalen Signalverarbeitung können die niederfrequenten Signalanteile kompensiert und das resultierende Signal integriert werden. Der Einsatz von numerischen Integratoren sorgt zusätzlich dafür, dass die ebenfalls vorhandenen hochfrequenten Störanteile des Nutzsignales gedämpft bzw. herausgefiltert werden. Die Parametrisierung des Filters muss hierbei anhand von Messungen dedizierter Messzüge validiert und plausibilisiert werden, so dass eine Betrachtung der Absolutwerte erfolgen kann. Die aus der zweifachen Integration hervorgehenden Versatzdaten in vertikaler Richtung sind dann gemäß der KoRil821 auswertbar.

Beurteilung der Versatzdaten

Die Richtlinie beurteilt geometrische Zustände der Längshöhe dabei lediglich an-

hand der Amplitude (vgl. Tab. 1). Überschreitet diese einen der SR-Werte, wird von einem „Fehler“ gesprochen. Die Identifikation von potentiell fehlerhaften Stellen im Gleis beginnt daher mit der Betrachtung der letzten, also neuesten Messung. Dort werden die betragsmäßig größten, in der Messreihe vorkommenden Werte – also die Amplituden – betrachtet. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass ein Einzelfehler mit der Zeit stets größer wird und somit in der letzten Messreihe am stärksten ausgeprägt sein muss. Die so bestimmte potentielle Fehlerposition wird nun in den vorangegangenen Messreihen betrachtet und die entsprechenden Streckenstücke isoliert. Abb. 2 zeigt die Versatzdaten von 13 Messreihen am Streckenkilometer 26,6. Auf der X-Achse ist der Streckenkilometer, auf der Y-Achse der Versatz in Längsrichtung abgetragen. Die einzelnen Kurven repräsentieren jeweils eine Messfahrt. Es fällt auf, dass die Formen der einzelnen Signale optisch zu korrelieren scheinen, die Ausprägung der Amplituden jedoch variiert. Deutlich wird dies, wenn man die Maximalwerte – rote Markierungen in Abb. 2 – der einzelnen Messkurven entlang der Zeitachse abträgt. Abb. 3 stellt diese Zeitreihe dar. Die Messwerte dieses Streckenabschnitts zeigen deutlich, dass die Amplituden und damit die Längshöhen im zeitlichen Verlauf zunehmen. Abb. 4 visualisiert das gleiche Streckensegment, während hierbei die fehlenden Messwerte linear interpoliert wurden. Auf der X-Achse ist der Streckenkilometer, auf der Y-Achse die Zeit in Tagen abgetragen. Die Farbe kodiert die Längshöhe in $[m] \cdot 10^{-3} = [mm]$. Die Ent-

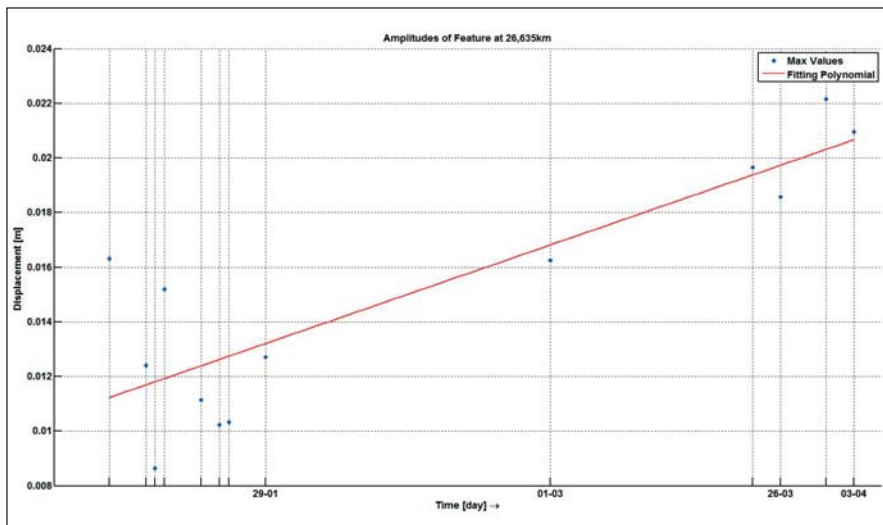


Abb. 3: Zeitreihenanalyse mit linearem Regressionsmodell des Einzelfehlers um Streckenkilometer 26,635

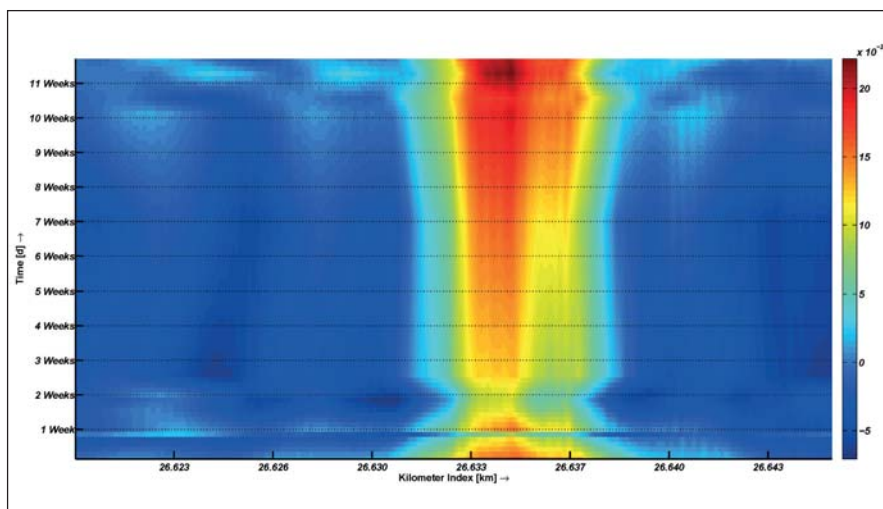


Abb. 4: Grafische Darstellung der linearen Interpolation des Einzelfehlers an Streckenkilometer 26,635. Die Farbe kodiert die Längshöhenauslenkung entlang der Orts- und Zeitskala.

wicklung des Fehlers wird hierdurch in seiner räumlichen als auch zeitlichen Ausdehnung sehr anschaulich.

Fehlerprognose und mögliche Klassifikation

War der Fokus in der vorhergehenden Betrachtung auf die Fehlerdetektion und -entwicklung gerichtet, rückt nachstehend die Fehlerprognose in den Mittelpunkt. Wie bereits in Abb. 3 gezeigt, lässt sich aus den prozessierten Messdaten ein lineares Regressionsmodell bezüglich der Fehlerentwicklung erstellen. Es ergäbe sich nun die Möglichkeit die Steigung dieser Gradenzur Klassifikation des Phänomens zu nutzen. Eine naheliegende Klassifikationsmöglichkeit besteht darin, diejenigen Streckenabschnitte als fehlerhaft zu bezeichnen, bei denen die Steigung dieser Regressionsgraden größer Null ist. Ist die Steigung nahe Null, verhält sich die Gleisgeometrie in diesem Streckenabschnitt eher statisch. Es gibt beispielsweise Effekte im Gleis,

wie die Herzstücke von Weichen, bei denen hohe Amplituden gemessen werden können, die sich jedoch auch über längere Zeiträume hinweg nicht vergrößern. Solchen Effekten möchte man aus wirtschaftlichen Gründen keine erhöhte Aufmerksamkeit schenken. Ferner kann die Steigung der Gradenzur Fehlerentwicklungsgeschwindigkeit interpretiert werden. So kann durch Beimessung der SR-Grenzwerte aus der KoRil821 oder der EN 13848² ein Zeitpunkt berechnet werden, an dem der Fehler beispielsweise SR_{LIM} überschreitet. Gleisabschnitte mit schnell wachsenden Fehlern bzw. Gleisfehler, mit einer kurzen prognostizierten Restzeit bis zum Erreichen von SR_{LIM} , könnten dann in der Instandhaltung priorisiert, aber geplant behandelt werden.

² Vor dem Vergleich der Versatzdaten mit den Grenzwerten der EN13848 müssen diese noch in die Wellenlängenbereiche D1-D3 aufgeteilt werden. Siehe hierzu [1] Teil 5.

Es sei darüber hinaus angemerkt, dass dieses Verfahren den Einsatz dedizierter Messzüge nicht ersetzt und für eine sicherheitsrelevante Beurteilung des Oberbaus herangezogen werden kann. Der wichtigste Grund dafür ist, dass die Daten durch die Bearbeitung mittels Filtern in Abhängigkeit der Parametrisierung Informationsverluste erleiden. Um sicherzugehen, dass die resultierenden absoluten Werte der wirklichen Gleislage entsprechen, müssen die Filterparameter so justiert werden, dass sich die Daten anhand dedizierter Messzugdaten validieren lassen. Kann dieser Schritt nicht erfolgen, dürfen lediglich die relativen Informationen wie die Fehlerentwicklungsrate genutzt werden. Dennoch: Das Wissen über die Kritikalität eines Fehlers – ausgedrückt in relativer Fehlerfortpflanzungsgeschwindigkeit – oder der zur Verfügung stehende Restzeit, d. h. die Zeitspanne bis zum Überschreiten einer Fehlergrenze wie SR_{LIM} , versetzt das Instandhaltungsmanagement in die Lage prognosebasierte Entscheidungen zu treffen und somit kostenoptimiert zu planen.

Zusammenfassung und Ausblick

Das DLR leistet Beiträge zur Verbesserung der zustandsorientierten Instandhaltung, so dass von der derzeitigen Praxis der intervallbasierten Behandlung von Fehlern zukünftig eine prognosebasierte Instandhaltungsplanung erfolgen könnte. Im Rahmen des von der EU geförderten Projektes AutoMain ist ein Verfahren entwickelt worden, das Messdaten von im Regelbetrieb befindlichen Fahrzeugen verarbeitet, darin potentielle fehlerhafte Segmente identifiziert und eine Prognose ableitet. Die durch diese Analyse gewonnenen Erkenntnisse können nicht ohne Validierung zur sicherheitstechnischen Untersuchung der Gleisanlage herangezogen werden. Sehr wohl jedoch können die Ergebnisse einen Beitrag dazu leisten, dass die Instandhaltungskosten durch frühzeitiges Antizipieren von Fehlern reduziert werden können.

Es gibt mögliche Ansätze zur Verbesserung des Verfahrens. So liegt der Definition eines Fehlers lediglich die Annahme zugrunde, dass ein Fehler ein Phänomen sei, bei dem die Amplitude einen Grenzwert überschreitet (siehe [2] Teil 2001, Tabelle 2 Seite 5). Die weiterreichende Betrachtung z. B. der Fehlerform durch Klassifikatoren oder Clusteralgorithmen oder wie in [3] und [4] mittels Wavelets geschehen, hat bislang keinen Einzug in die Regelwerke gefunden, obwohl nicht sicher ausgeschlossen werden kann, dass die Form des Fehlers die Fahrzeugreaktion nicht beeinflussen kann. Nicht ohne Grund unterscheidet die EN 13848 drei verschiedene Fehlerarten,

nämlich Fehler in den Wellenlängenbereichen D1 (3 – 25 m), D2 (25 – 70 m) und D3 (70 – 200 m). So konnte beim Entwurf des Verfahrens für die Erstellung des Regressionsmodells (wie in Abb. 3) auch zunächst nur ein linearer Ansatz verfolgt werden. Gäbe es eine Möglichkeit anhand der Fehlerform den Fehlertyp – Hohllagen im Schotter, Übergangszonen, Brüche, etc. – zu bestimmen, könnten pro Fehlertyp geeignetere Regressionsmodelle sowie deren relevanten Einflussfaktoren gefunden und die Prognose präzisiert werden. Eine Datenbank mit typischen Fehlerformen, insbesondere der Einzelfehler und deren Entwicklung, könnte in diesem Zusammenhang ebenfalls sehr zum besseren Verständnis des Anlagenverhaltens und somit zu einer wirtschaftlicheren Instandhaltung beitragen.

Die Forschungsarbeiten, die zu diesen Ergebnissen geführt haben, wurden gemäß der Finanzhilfvereinbarung Nr. [265722] im Zuge des Siebten Rahmenprogramms der [Europäischen Union] [Europäischen Atomgemeinschaft] ([RP7/2007-2013] [RP7/2007-2011]) gefördert.

LITERATUR

- [1] EN13848 Europäische Norm: Railway Applications/Track – Track geometry quality
 [2] Deutsche Bahn: Richtlinienfamilie 821: Oberbau inspizieren
 [3] Wolter, K. U.: „Rekonstruktion der originalen Gleislageabweichungen aus 3-Punkt-Signalen (Wandserhnenmessverfahren) und Beurteilung hinsichtlich Amplitude, Fehlerwellenlänge sowie Fehlerform“, DVV Media Group | Eurailpress, Januar 2013
 [4] Wolter, K. U.; Erhard, F.: „Beurteilung von Gleislageabweichungen mit Hilfe von Fehlerreferenzfunktionen“, ETR – Eisenbahntechnische Rundschau 09/2013



Dipl.-Geolnf. Christian Linder

christian.linder@dlr.de



Dipl.-Wirtsch.-Ing.
Christoph Lackhove

christoph.lackhove@dlr.de



Dipl.-Ing. René Schenkendorf

rene.schenkendorf@dlr.de

alle Autoren
 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Verkehrssystemtechnik, Braunschweig

Summary

Forecasting method for track displacement for single failures

Within the scope of the EU-sponsored Auto-Main project and in cooperation with DB, the German Aerospace Centre (DLR) has developed methods to support decision making in network maintenance planning. With these tools, spontaneously appearing single failures will no longer require highly expensive emergency measures. The extended database achieved by continuous track monitoring – CTM and its adequate processing by digital signal treatment methods allows for the application of statistical analysis tools leading to a forecast estimate which will contribute to an improved maintenance efficiency.