

Die automatisierte Überprüfung der Gleisbefestigung

Christian Koczvara, Daniel Pfeil, Daniel Schöllhammer und Harald Daxberger

1 Einleitung

Die Eisenbahninfrastruktur steht vor erheblichen Herausforderungen. Dies liegt nicht nur an den bereits derzeit außergewöhnlich hohen Auslastungen, sondern auch an den prognostizierten Steigerungen. So planen etwa die Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB), die Transportkapazitäten bis 2040 zu verdoppeln [1]. Diese Kapazitätssteigerung kann nicht allein durch Neubauprojekte erreicht werden, sondern erfordert vor allem eine optimierte Nutzung der bestehenden Infrastruktur. Dabei gilt es neben dem effizienten Betrieb auch den Instandhaltungsprozess immer weiter zu optimieren. Einen essenziellen Beitrag leistet die fortschreitende Digitalisierung im Eisenbahnsektor. Bestehende Technologien können dadurch effizienter arbeiten und noch effektiver eingesetzt werden. Der Dynamische Gleisstabilisator (DGS) wird seit Jahren von Bahnen weltweit dafür genutzt, Langsamfahrstellen (Lfst) nach Stopfeinsätzen in ihrer Dauer zu reduzieren oder gänzlich zu vermeiden. Damit trägt dieser bereits heute wesentlich zur Verfügbarkeit der Infrastruktur und zum sicheren Betrieb bei. Mit den neuen Möglichkeiten von innovativer Sensortechnik erlaubt die bewährte Stabilisationstechnologie nun gänzlich neue Einblicke in den Zustand des Eisenbahnfahrwegs. Der vorliegende Beitrag beschreibt den erweiterten Funktionsumfang des DGS und die dadurch mögliche automatisierte Überprüfung der Gleisbefestigung.

Der DGS bringt horizontale Schwingungen unter einer vertikalen Belastung in das Gleisbett ein. Dies führt zu einer Stabilisierung der geringer verdichteten Bereiche und dementsprechend zur kontrollierten Vorwegnahme der Anfangssetzungen und zur Erhöhung des Querverschiebewiderstands (QVW). Dabei fungiert der Gleisrost als Übertragungselement für die Auflast und die Vibrationen. Der DGS muss dazu mit dem Gleisrost verbunden sein, der idealerweise entlang des betrachteten Streckenabschnittes konstante Übertragungseigenschaften (Steifigkeiten) hat. Werden diese lokal verändert, beispielsweise durch die Beschädigung einer Komponente, wird das messbare Schwingungsverhalten des Gleisrostes beeinflusst. Ziel ist es, diese Veränderung zu detektieren und so Schäden an den Oberbaukomponenten frühzeitig zu erkennen. Dargestellt wird dies im folgenden Beitrag am Beispiel einer Schienenbefestigung.

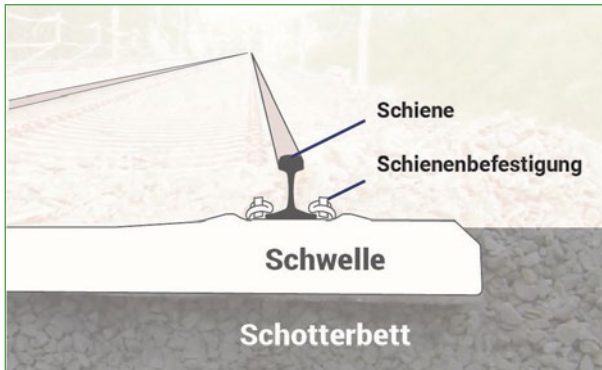


Abb. 1: Übersicht der wichtigsten Oberbaukomponenten

Die Schienenbefestigung ist ein kritischer Bestandteil im Gleisoberbau (Abb. 1). Sie verbindet die Schiene mit den Schwellen und ist dabei hohen Belastungen ausgesetzt. Die Befestigungselemente müssen dabei so ausgeführt sein, dass die auf die Schienen wirkenden Lasten auf die Schwellen

übertragen werden. Dabei muss sichergestellt werden, dass die Schienen weder horizontal verschoben werden noch die Spurweite verändert wird. Außerdem muss die Schiene gegen ein Verkippen geschützt sein. Für eine optimierte Lastverteilung sowie eine Reduktion der auftretenden Schwingungen können zusätzlich zwischen Schiene und Schwelle elastische Zwischenelemente eingebracht sein [2, 3].

Die Bestimmung des Zustandes der Schienenbefestigung kann mitunter noch aufwendig sein. Manuelle Prüfungen durch Gleisbegehungen finden nach wie vor statt. Allerdings gewinnen moderne, durch Machine Learning unterstützte Messmethoden zur Erkennung von fehlenden oder beschädigten Befestigungselementen zunehmend an Bedeutung. Diese Methoden basieren vorwiegend auf der Analyse von Videos / Video- oder Fotoaufnahmen, um Schäden zu identifizieren und zu klassifizieren [4]. Die Erkennung einer lockeren Befestigung ist dabei ungleich anspruchsvoller und zeitaufwendiger. Die Überprüfung wird hauptsächlich mithilfe von Drehmomentschlüsseln durchgeführt, obwohl erste experimentelle Ansätze existieren, um lockere Befestigungen visuell zu detektieren. Diese Methoden basieren auf der Erkennung der Verformung der Befestigungselemente in Abhängigkeit vom Anzugmoment [5]. Ein solches System muss für jeden Befestigungstyp individuell angepasst werden und ist außerdem auf bestimmte Typen beschränkt.

Um eine automatisierte und wirtschaftliche Prüfung der Qualität der Schienenbefestigung im Zuge der mechanischen Durcharbeitung durchführen zu können, entwickelt Plasser & Theurer derzeit ein neues Messsystem, das direkt in den DGS integriert werden kann. Dadurch erhält der Infrastrukturbetreiber zusätzlich zur umfangreichen Dokumentation der Gleisgeometrie auch eine Aussage über den Zustand einer weiteren Oberbaukomponente, der Schienenbefestigung. Die Entwicklung erfolgt in Kooperation mit einem unabhängigen wissenschaftlichen Partner.

2 Einfluss von unzureichender Schienenbefestigung auf das DGS-Aggregat

Das DGS-Aggregat bildet gemeinsam mit dem Gleisrost ein schwingfähiges System. Bei beschädigten oder lockeren Schienenbefestigungen wird dieses „verstimmt“. Eine Schwelle mit lockeren Befestigungselementen weist mechanisch betrachtet einen Bereich geringerer Steifigkeit auf, wodurch das System weicher wird und größere Verformungen zeigt. Diese Steifigkeitsänderungen führen in weiterer Folge zu einer Veränderung der Kopplung zwischen DGS-Aggregat und Gleisrost, die direkt am DGS detektiert werden kann. Abb. 2 stellt die Auswirkung von mangelhaften Befestigungselementen auf das DGS-Aggregat schematisch dar.

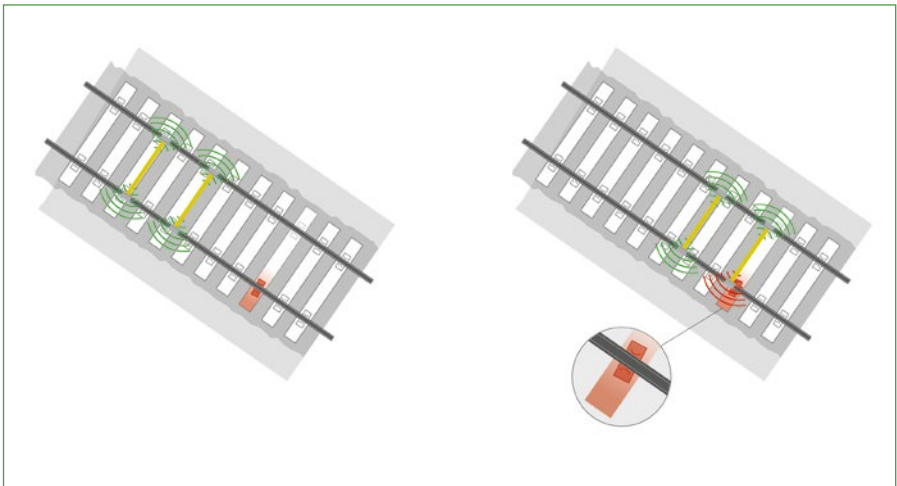


Abb. 2: Schematische Darstellung der Auswirkung lockerer Befestigungselemente auf die Kopplung zwischen DGS und Gleisrost. Bei Überfahrt über lockere Befestigungselemente (rot) verändert sich die Kopplung zwischen DGS und Gleisrost.

Eine Frage bleibt dabei offen: Wie kann man diese Steifigkeitsänderung detektieren? Die Antwort liegt in der Funktionsweise des DGS. Bei diesem handelt es sich um ein Aggregat zur gleichmäßigen Verdichtung des Gleisschotters, erzielt durch dynamische Anregung des Gleisrostes. Das Aggregat wird über Unwuchtmassen in eine Horizontalschwingung versetzt, die auf den Gleisrost und in weiterer Folge auf den Gleisschotter übertragen wird. Dies geschieht über Spurrollen, die mithilfe von hydraulischen Anpresszylindern eine kraftschlüssige Verbindung von Gleisrost und DGS herstellen (Abb. 3). Zusätzlich wird über Hydraulikzylinder (Auflastzylinder) eine definierte vertikale Auflast aufgebracht, die für eine kraft-

schlüssige Verbindung der Schwelle und des Schotters sorgt. Für ein optimales Verdichtergebnis wird der DGS mit einer konstanten Vortriebsgeschwindigkeit betrieben. Die so in den Gleisschotter eingebrachten Schwingungen bewirken eine Umlagerung der Schotterkörner und somit eine möglichst dichte Lagerung. Dadurch wird der QVW erhöht, und Lfst können vermieden werden [6–8]. Durch die kraftschlüssige Anbindung an den Gleisrost reagiert der DGS auf Änderungen im Untergrund. Kommt es nun zu einer Veränderung der Systemsteifigkeit, ist auch eine Abweichung in der Kopplung zu erwarten (Abb. 2). Für eine genaue Analyse können die Kräfte in den Anpresszylindern ermittelt werden. Dabei ist es von entscheidender Bedeutung, dass alle verbauten Zylinder unabhängig voneinander erfasst werden.

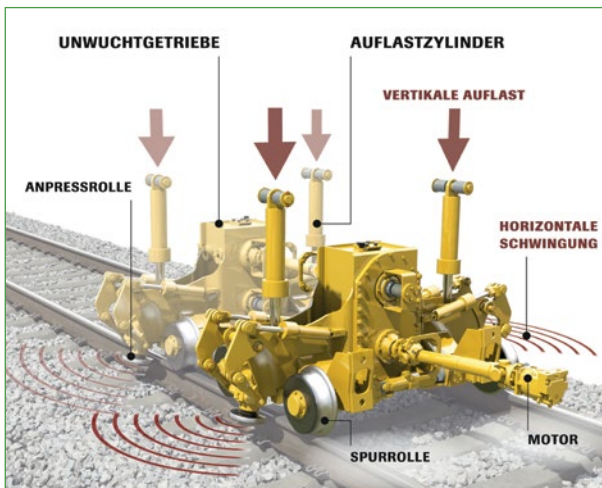


Abb. 3: Schematische Darstellung eines DGS-Aggregates

Zusammengefasst wird also die Reaktion des Gleisrostes auf die dynamische Belastung (Horizontalschwingung) des DGS ermittelt (Abb. 3).

Wird der DGS im Arbeitsbetrieb über eine Stelle mit mangelhafter Schienenbefestigung bewegt, verändern sich Kräfte, die auf die Spurrollen wirken. Entsprechend der Bewegung ist diese

Änderung kontinuierlich und für jeden Anpresszylinder zeit- bzw. wegversetzt. Daher ist bei der Überfahrt eine Phasenverschiebung zwischen den Kräften an der vorderen und hinteren Spurrolle zu erwarten. Abb. 4 zeigt schematisch die zu erwartende Änderung im Kraftverlauf. In Abb. 4a) sind die Kräfte phasengleich, was bei einer gleichbleibenden Steifigkeit des Gleisrostes der Fall ist. Abb. 4b) zeigt den Kraftverlauf im Übergangsbereich mit sich ändernder Steifigkeit. Dabei bewegt sich eine der Rollen über eine Sektion mit geringerer Steifigkeit, was zu einer relativen Änderung der Signale zueinander führt. Um diese zu detektieren, wird die Kreuzkorrelation angewendet. Dies ist ein mathematisches Verfahren, um Ähnlichkeiten zwischen zwei zeitabhängigen Signalen zu quantifizieren.

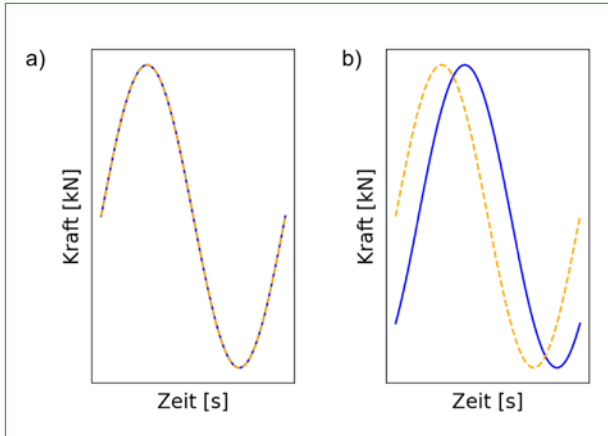


Abb. 4: Schematische Darstellung der Kraftverläufe auf die Spurrollen bei konstanten Untergrundbedingungen (a) und bei Überfahrt über Bereiche gelockerter Befestigungselemente (b)

Vektoren \mathbf{u} und \mathbf{v} , $\mathbf{u} = [u_1, \dots, u_n]$, $\mathbf{v} = [v_1, \dots, v_n]$, $u_i, v_i \in \mathbb{R}$ aufgefasst werden.

Die normierte Kreuzkorrelationsfunktion

$$|r_{uv}(k)| = \frac{|\sum_{i=1}^n u_i \cdot v_{i+k}|}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (u_i)^2) \cdot (\sum_{i=1}^n (v_{i+k})^2)}}$$

nimmt für $k = 0$ den Wert 1 an, falls die Vektoren \mathbf{u} und \mathbf{v} gleich oder linear abhängig sind. Sind die Vektoren weder gleich noch linear abhängig, ist der Wert der normierten Kreuzkorrelationsfunktion für $k = 0$ kleiner 1. Diese Eigenschaft kann zur Beurteilung der Übereinstimmung der Vektoren \mathbf{u} und \mathbf{v} beziehungsweise zur Beurteilung der Übereinstimmung von Messwertfolgen genutzt werden.

2.2 Anwendung der Kreuzkorrelation

Angewendet auf die oben beschriebenen Kräfte an den Spurrollen bedeutet das, dass im Bereich mit durchgehend intakten Befestigungselementen die normierte Korrelationsfunktion annähernd den Wert 1 erreicht. Ändert sich nun die Beziehung der Kraftsignale zueinander, beispielsweise bei der Überfahrt über defekte Befestigungselemente, nimmt die Korrelation, also die Übereinstimmung der Signale, ab. Dies ist in Abb. 5 anhand eines Beispiels dargestellt.

2.1 Mathematische Grundlagen der Auswertung

Zur Auswertung der digital erfassten Messwertfolgen zweier Sensoren wird zunächst eine Auswahl der relevanten Messwerte getroffen. Dazu wird auf beide Messfolgen die gleiche Fensterfunktion (z. B. Rechteckfenster) angewendet. Die dadurch erhaltenen Tupel können in guter Näherung als zwei

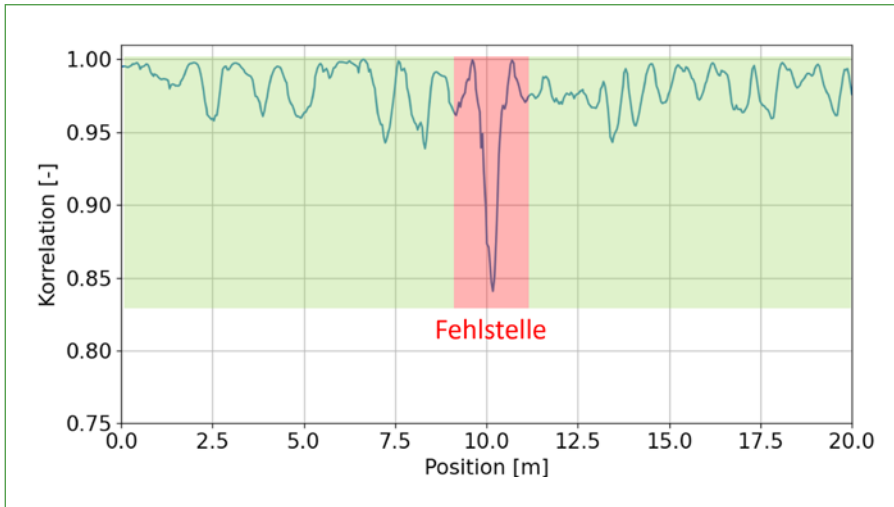


Abb. 5: Normierte Kreuzkorrelation zwischen der vorderen und hinteren Kraftwirkung auf die Spurrollen bei Überfahrt über defekte Befestigungselemente. Im Bereich der Fehlstelle ist eine deutliche Abnahme der Korrelation erkennbar.

3 Von der Theorie ins Feld

Wie bereits beschrieben, ist es notwendig, die Interaktion zwischen DGS-Aggregat und Gleisrost kontinuierlich zu ermitteln. Aufgrund der Funktionsweise des DGS kann die Reaktionskraft direkt mithilfe einer Druckmessung an den Spreizylindern der Spurrollen ermittelt werden. Abb. 6 zeigt schematisch die Positionierung der Drucksensoren am DGS-Aggregat.

Die auf die Zylinder und somit auch auf die Spurrollen wirkende Kraft F lässt sich einfach über die Beziehung $F = p \cdot A$ aus dem gemessenen Druck p und der Kolbenfläche A berechnen. Da die Zylinderfläche konstant bleibt und in weiterer Folge lediglich relative Änderungen der Signale betrachtet werden, kann für alle weiteren Auswertungen der gemessene Druck direkt verwendet werden.

Basierend auf dem oben erklärten Konzept ist zu erwarten, dass sich in Bereichen einer optimal ausgeführten Schienenbefestigung die gemessenen Drücke der Anpresszylinder sehr ähnlich verhalten. Bei Annäherung an Sektionen mit defekten oder gelösten Befestigungselementen ist eine messbare Änderung zu erwarten, ähnlich wie in Abb. 4 dargestellt. Bei ersten Testmessungen konnte diese Annahme bestätigt werden. Abb. 7 zeigt den Vergleich der gemessenen Druckverläufe bei idealem Zustand (Abb. 7a) und gelockerter Schienenbefestigung (Abb. 7b). Betrachtet man die Signale des vorderen und hinteren Spreizdruckes bei festgezogenen und gelockerten

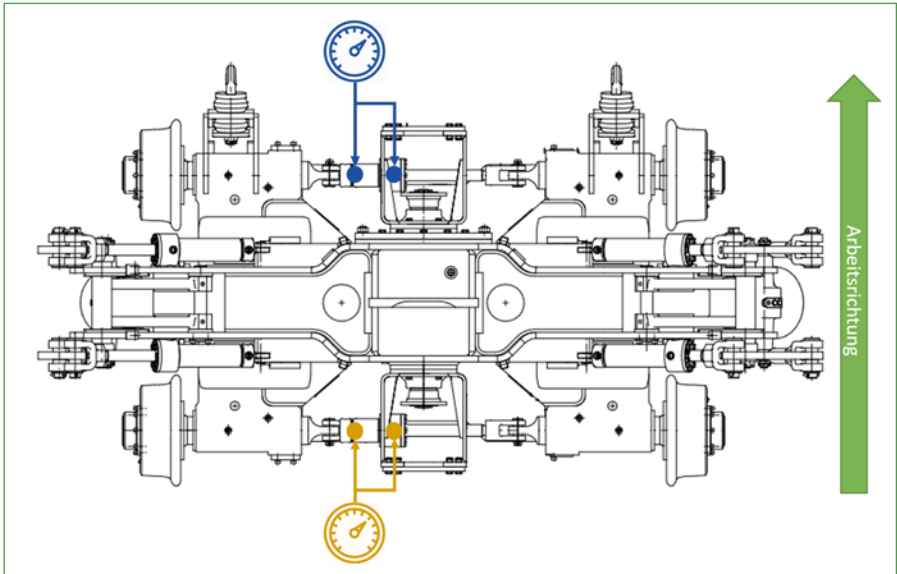


Abb. 6: Grundriss eines DGS-Aggregates inklusive Positionierung der für den Versuch verwendeten Drucksensoren an den Spreizylindern in Arbeitsrichtung vorne (blau) und hinten (orange)

Schienenbefestigungen, erkennt man mit freiem Auge bereits Unterschiede in den Verläufen. So ist bei intakter Schienenbefestigung keine Phasenverschiebung zwischen den beiden Signalen sichtbar, jedoch bei gelockerten Befestigungselementen eine deutliche Phasenverschiebung der Drucksignale. Diese Effekte können mittels geeigneter mathematischer Methoden wie beispielsweise der Kreuzkorrelation aus den Drucksignalen ermittelt und interpretiert werden. Außerdem sind die Verhältnisse der Amplitudenwerte vertauscht, wobei die Veränderung der Amplitudenwerte allerdings keinen Einfluss auf das Ergebnis der normierten Kreuzkorrelation hat. Es sei hier noch erwähnt, dass die gemessenen Drucksignale bandpassgefiltert dargestellt sind, um den dynamischen Anteil (Druckschwankungen) deutlich erkennen zu können.

4 Was wird gemessen?

Um diesen Ansatz zu erproben und die Durchführbarkeit zu demonstrieren, wurden verschiedene DGS-Aggregate mit Messsystemen ausgestattet. Zusätzlich zu den in Abb. 6 dargestellten Sensoren zur Kraftmessung an den Spurrollen wurden auch die Drücke in den Auflastzylindern gemessen. Dadurch lassen sich sowohl die quasistatischen Auflasten und Anpressdrücke als auch die überlagerten dynamischen

Schwingungen präzise erfassen. Darüber hinaus wurden sämtliche Einstellungen und Stellgrößen in der Maschinensteuerung aufgezeichnet.

Die in diesem Artikel vorgestellten Messungen wurden auf einem eigenen Versuchsgleis durchgeführt (Abb. 8a). Um dabei möglichst realitätsnahe Bedingungen zu schaffen, wurden gezielt Befestigungselemente gelockert. Dabei wurden auf einer Länge von einer bis vier Schwellen die Schienenbefestigungen sowohl einseitig als

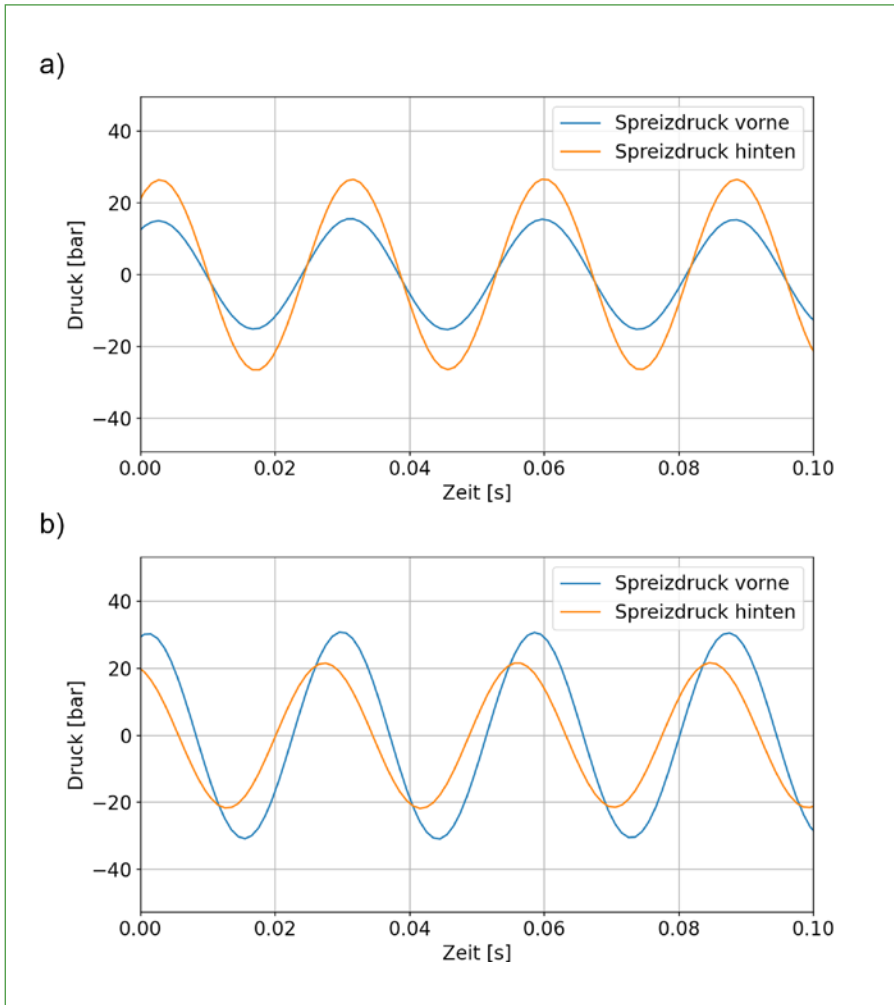


Abb. 7: Bandpassgefiltertes Signal des vorderen und hinteren Spreizdruckes bei fixierter Schienenbefestigung (a) und gelockerten Befestigungselementen (b)

auch beidseitig gelockert (Abb. 8b). Diese Versuchsabschnitte wurden jeweils mit konstanter Geschwindigkeit und vordefinierten Arbeitsparametern befahren. Zusätzlich wurden in diesem Bereich auch Referenzmessungen bei intakter Befestigung durchgeführt.

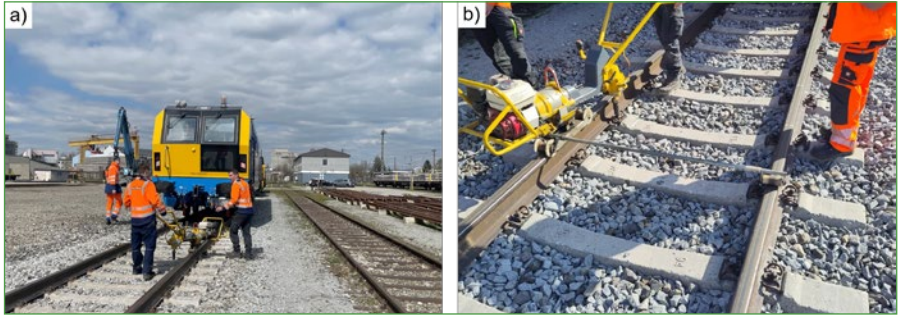


Abb. 8: a) DGS NG auf dem für die Versuche vorbereiteten Gleisabschnitt, b) Lösen der Befestigungselemente an vordefinierten Abschnitten

Sämtliche Messungen wurden mit einem kalibrierten Messsystem durchgeführt. Alle Analo­gsignale wurden mit einer Abtastrate von 1 kHz aufgezeichnet. Dies ist notwendig, um sowohl die Signale der Erregerfrequenzen im Bereich von 25 bis 38 Hz als auch die auftretenden Oberschwingungen präzise erfassen zu können.

Die gemessenen Daten wurden in einem ersten Schritt offline ausgewertet. Dabei wurden verschiedene Auswertekonzepte getestet und auf ihre Eignung überprüft, um Fehlstellen zuverlässig detektieren zu können. Diese Analysen bilden die Basis für eine spätere Implementierung zur Online-Auswertung.

5 Datenauswertung

Um aus den aufgezeichneten Messdaten die zur Analyse benötigten Informationen zu extrahieren, sind einige Datenverarbeitungsschritte erforderlich. Dieser Ablauf ist in Abb. 9 als Blockschaltbild dargestellt und wird nachfolgend näher erläutert.

5.1 Datenvorverarbeitung (Preprocessing)

Um weitere Berechnungen durchführen zu können, müssen die analogen Sensorsignale abgetastet und in digitale Werte konvertiert werden. Sowohl die Filterung als auch die Signalaufbereitung konnten mit entsprechenden Algorithmen am Computer offline durchgeführt werden. Diverse Filterdesigns wurden getestet und evaluiert, um die Signale für weitere Berechnungen und Analysen zu optimieren.

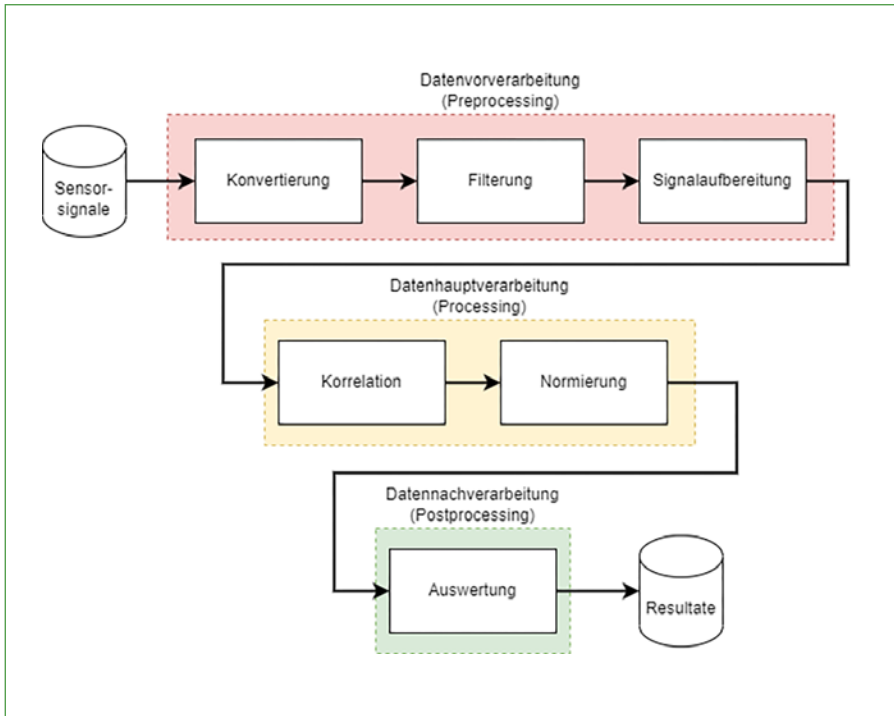


Abb. 9: Datenverarbeitungskette (processing pipeline), dargestellt als Blockschaltbild

5.2 Datenhauptverarbeitung (Processing)

In diesem Datenverarbeitungsschritt wurden die gefilterten Signale mittels Kreuzkorrelation miteinander verglichen. Der Fokus lag hier auf der Analyse der gemessenen Drücke in den Spreizzylindern. Für diesen Berechnungsschritt wurden nicht alle Werte der Eingangsfolge herangezogen, sondern immer nur Teilausschnitte miteinander korreliert. Dieser Teilausschnitt wird als Fenster bezeichnet, das sukzessive über den gesamten Datensatz geschoben wird. Dieses Verfahren wird auch als gleitende Fensterkorrelation (moving window correlation) bezeichnet und wird für die Auswertung großer Datensätze über einzelne Zeit- beziehungsweise Signalabschnitte verwendet [9].

Da die Eingangsvektoren gleich lang sind, konnte für die Berechnung der Korrelation die normierte Kreuzkorrelationsfunktion (siehe Mathematische Grundlagen zur Auswertung) herangezogen werden. Das Ergebnis der Korrelation wurde somit im Intervall $[0,0, 1,0]$ normiert und ist für weitere Verarbeitungen bzw. Interpretationen anschaulicher.

5.3 Datennachverarbeitung (Postprocessing)

Die Interpretation der Daten erfolgte anfangs manuell über die Auswertung und Gegenüberstellung einzelner Kurvenverläufe. Mit dieser Methode konnten bereits geeignete Parameter und Grenzwerte identifiziert werden, die für eine Online-Berechnung notwendig sind. Dies stellt die Grundlage für die Weiterentwicklung zum Produkt dar.

6 Ergebnisse

6.1 Wirknachweis

Um einen expliziten Wirkungsnachweis zu erbringen, wurden auf einem Gleisabschnitt von 25 m auf vier aufeinanderfolgenden Schwellen die Schienenbefestigungen beidseitig gelockert. Dieser Abschnitt wurde mit einem konventionellen DGS-Aggregat inklusive der in Abb. 6 beschriebenen Sensorik befahren. Der Abschnitt wurde mit konstanter Frequenz, konstanter Auflast, konstantem Spreizdruck und konstanter Arbeitsgeschwindigkeit bearbeitet. Zusätzlich zu dieser Testmessung wurden auch vor dem Lösen der Schienenbefestigungen (Referenzmessung) und nach der Wiederherstellung (Validierungsmessung) Messungen mit identischen Parametern durchgeführt. Die Referenzmessung vor dem Umbau soll Auskunft über die Ausgangsbeschaffenheit des Gleisrostes geben. Die Validierungsmessung bei wieder festgezogenen Schienenbefestigungen dient zur Überprüfung der Wirksamkeit der Methode. Für alle Messungen wurde die Kreuzkorrelation zwischen den vorderen und hinteren Spreizdrücken berechnet. Die Ergebnisse sind in Abb. 10 dargestellt. Es ist klar ersichtlich, dass bei der Referenzmessung (grün: intakte Befestigung) der Korrelationskoeffizient über die gesamte Strecke nicht signifikant vom Wert 1 abweicht. Vergleicht man dies mit der Testmessung bei gelockerten Befestigungselementen (blau), ist ein deutlicher Einbruch des Korrelationskoeffizienten beginnend bei ca. 17 m ersichtlich. Dies verdeutlicht die prinzipielle Eignung dieses Konzepts zur Detektion von lockeren Befestigungselementen. Zusätzlich konnte mit einer Validierungsmessung (orange) bei wiederhergestellter Schwellenbefestigung gezeigt werden, dass die Fehlstelle beseitigt wurde, da der Korrelationskoeffizient keinen signifikanten Einbruch mehr aufweist.

6.2 Analyse weiterer Messdaten

Im Zuge der Messkampagne wurden zusätzlich zu den Spreizzylindern noch weitere Messgrößen evaluiert, wie beispielsweise die kolben- und ringseitigen Hydraulikdrücke beider Auflastzylinder. Die Messungen am zuvor beschriebenen Abschnitt

von 25 m Länge mit intakten und gelösten Befestigungselementen dienten auch hier als Basis für weitere Analysen. Abb. 11 zeigt, dass bei diesen Messungen, auch bei losen Schienenbefestigungen, kein signifikanter Einbruch der Kreuzkorrelation feststellbar ist. Daraus lässt sich ableiten, dass die Auflastdrücke nicht zur Detektion von Fehlstellen geeignet sind.

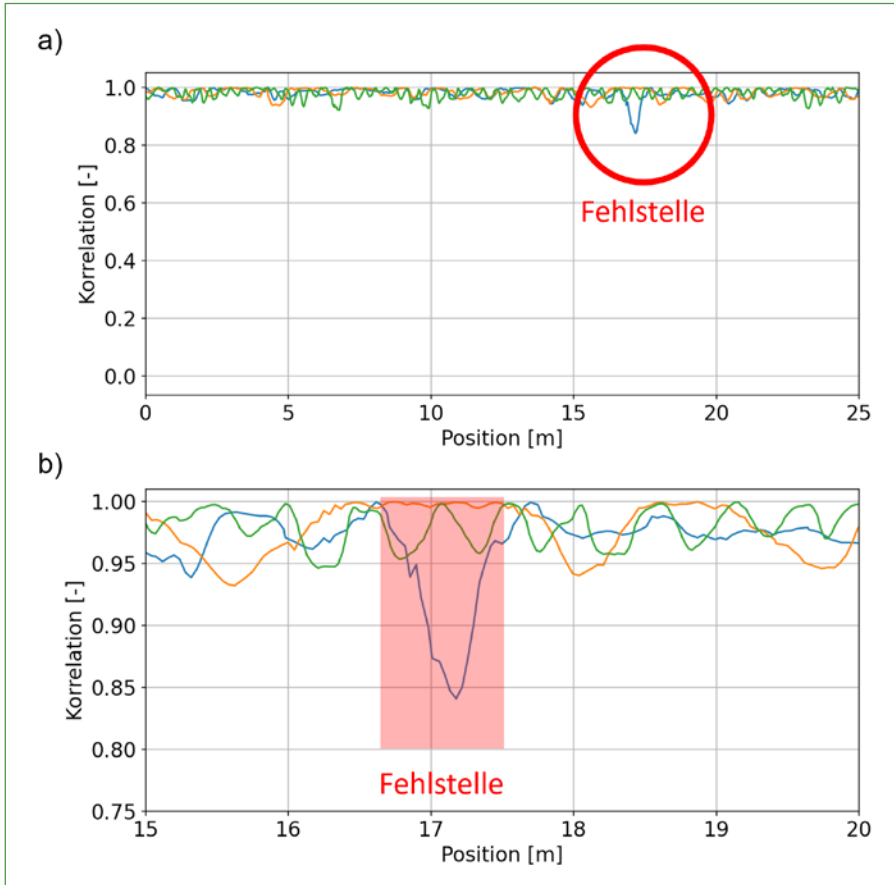


Abb. 10: Ergebnis der normierten Kreuzkorrelation der Drucksignale (vorderer und hinterer Spreizdruck). Referenzmessung bei intakter Schwellenbefestigung: grün, Testmessung bei gelockerten Befestigungselementen: blau, Validierungsmessung bei wiederhergestellter Befestigung: orange. Der Bereich der gelockerten Elemente ist rot markiert. (a) Gesamte Messstrecke, (b) Ausschnitt im Bereich der Fehlstelle. Der Einbruch der Kreuzkorrelation bei lockeren Befestigungselementen ist deutlich erkennbar.

6.3 Erweiterte Datenanalyse

Nachdem der erste Proof-of-Concept-Versuch erfolgreich abgeschlossen wurde und die zuvor getroffenen Annahmen bestätigt werden konnten, wurde eine weiterführende Messkampagne über einen Streckenabschnitt von 100 m durchgeführt. Dieser wurde in fünf Bereiche unterteilt, um die Auswirkung verschiedener Zustände zu evaluieren:

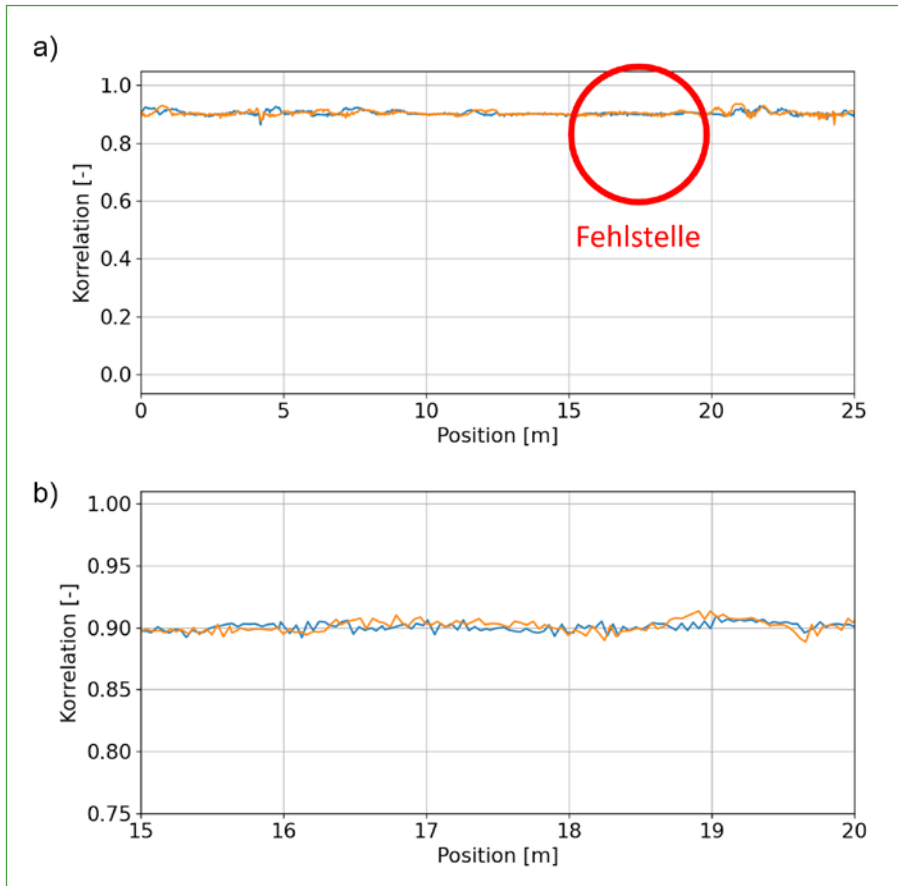


Abb. 11: Ergebnis der normierten Kreuzkorrelation der Drucksignale (Auflastdrücke rechts und links). Testmessung bei gelockerten Befestigungselementen: blau, Validierungsmessung bei wiederhergestellter Befestigung: orange. Der Bereich der gelockerten Elemente ist rot markiert. (a) Gesamte Messstrecke, (b) Ausschnitt im Bereich der Fehlstelle

- Schienenbefestigung beidseitig bei vier aufeinanderfolgenden Schwellen gelockert
- Schienenbefestigung beidseitig bei einer Schwelle gelockert
- Schienenbefestigung einseitig (links) bei vier aufeinanderfolgenden Schwellen gelockert
- Schienenbefestigung einseitig (links) bei einer Schwelle gelockert
- Schienenbefestigung einseitig (rechts) bei vier aufeinanderfolgenden Schwellen gelockert

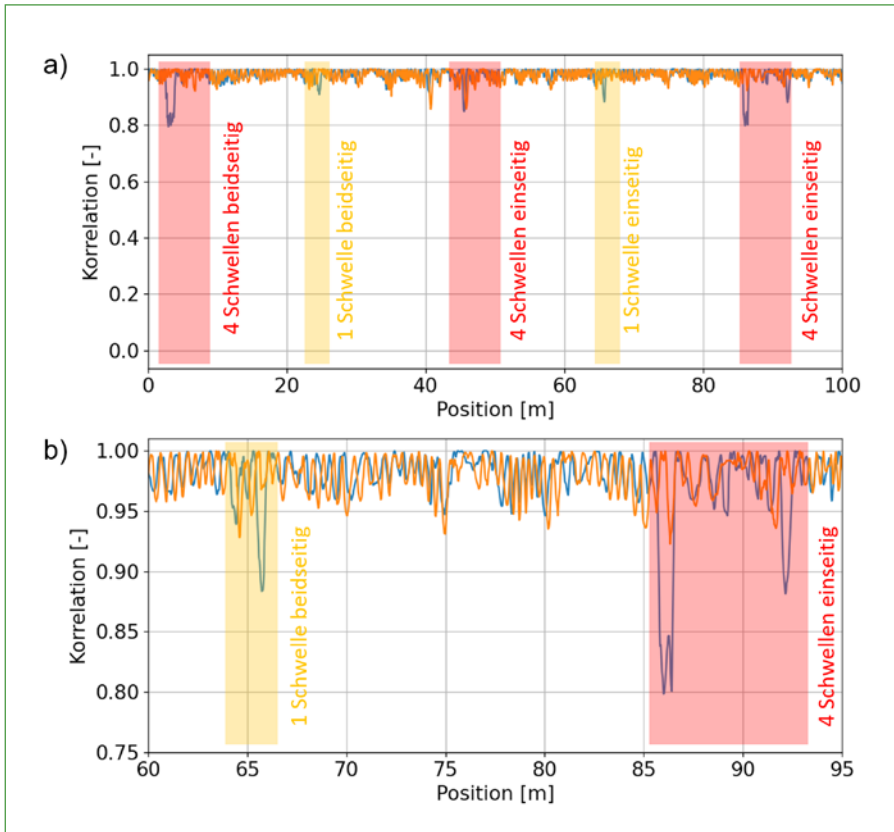


Abb. 12: Ergebnis der normierten Kreuzkorrelation der Drucksignale (vorderer und hinterer Spreizdruck). Referenzmessung bei intakter Schwellenbefestigung: orange, Testmessung bei gelockerten Befestigungselementen: blau. Der Bereich der gelockerten Elemente ist rot markiert. (a) Gesamte Messstrecke, (b) Detailausschnitt zwischen 60 und 95 m. Der Einbruch der Kreuzkorrelation bei lockeren Befestigungselementen ist deutlich erkennbar, sowohl bei einer gelockerten Schwelle als auch bei vier aufeinanderfolgenden Schwellen.

Auch hier gab es wieder eine Referenzmessung bei unveränderter Schienenbefestigung, und die Arbeiten wurden mit konstanten Arbeitsparametern durchgeführt.

Die Auswertung erfolgte analog zu den bereits beschriebenen Messungen. Die Ergebnisse sind in Abb. 12 dargestellt. Es ist deutlich ersichtlich, dass im Bereich der gelockerten Schwellen, im Vergleich zur Referenzmessung, die Kreuzkorrelation signifikant einbricht. Dies ist sowohl bei einzelnen Schwellen als auch bei vier aufeinanderfolgenden Schwellen mit gelockerten Befestigungselementen erkennbar. Hier sind Einbrüche des Korrelationskoeffizienten auf bis zu 0,8 ersichtlich. Der Einbruch der Referenzmessung bei ~ 45 m wurde durch eine defekte Verschraubung hervorgerufen.

Mit diesem Versuch konnte nachgewiesen werden, dass fehlerhafte Schienenbefestigungen direkt bei der Stabilisierung erkannt werden können. Dies erfolgt passiv, denn es wird keine zusätzliche Anregung benötigt. Das Ergebnis war bei vier aufeinanderfolgenden Schwellen signifikanter als bei einzelnen gelockerten Schwellen, jedoch sind an allen relevanten Positionen Einbrüche in der normierten Kreuzkorrelation erkennbar. Um einzelne fehlerhafte Schienenbefestigungen noch zuverlässiger detektieren zu können, wird das System optimiert. Weitere Versuche sind bereits in Planung.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Schienenbefestigungen haben einen wesentlichen Einfluss auf die Langlebigkeit der Gleislage und somit auf die Sicherheit und Wirtschaftlichkeit des Bahnbetriebes. Sie spielen eine entscheidende Rolle für den sicheren Verkehr. Lose Schienenbefestigungen erhöhen die Belastung auf die restlichen Komponenten des Fahrwegs und verschlechtern die Gleisgeometrie deutlich schneller. Außerdem kann eine fehlende oder mangelhafte Schienenbefestigung zu einer Spurverbreiterung führen, was im Extremfall Entgleisungen zur Folge haben kann [10]. Eine Evaluierung des Zustandes der Schienenbefestigung fördert somit nicht nur die Wirtschaftlichkeit, sondern auch die Sicherheit des Systems Bahn. Ein weiterer Vorteil der in diesem Artikel vorgestellten Methode ist die einfache Nachrüstbarkeit. Eine Nachrüstung auf bestehenden Maschinen ist technisch einfach durchzuführen und daher wirtschaftlich attraktiv.

Angesichts der zunehmenden Belastung und des Wunsches nach längeren Wartungsintervallen und immer kürzeren Sperrpausen entwickelt Plasser & Theurer ein System, das die Qualität der Schienenbefestigung während der durchgeführten Stopfarbeiten oder Stabilisierungsmaßnahmen erfassen kann.

Die Beurteilung der Schienenbefestigung mithilfe des DGS-Aggregates ist ein weiterer Schritt in Richtung automatisierte Gleisstandhaltung. Somit können Schwachstellen noch beim Einsatz des DGS detektiert und gegebenenfalls unverzüglich behoben werden. Neben erhöhter Sicherheit können somit auch die Kosten

reduziert werden. Die durch mangelhafte Schienenbefestigung hervorgerufene Überbelastung einzelner Komponenten kann vermieden werden. Eine nahtlose Integration in die Nachmessdokumentation erlaubt eine spätere Analyse der auftretenden Fehlstellen sowie eine Verknüpfung mit weiteren Datenquellen. Dieses innovative Verfahren ist ein weiterer Baustein einer fortschreitenden ganzheitlichen digitalen Erfassung des Gleiszustandes.

Quellen

- [1] ÖBB-Infrastruktur AG, Zahlen Daten Fakten, 2022. Zugriff am: 21. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://infrastruktur.oebb.at/de/unternehmen/zahlen-daten-fakten/oebb-infra-zahlen-daten-fakten-folder-2022.pdf>
- [2] Hansman, F.; Nemetz, W.: Der Gleislage auf der Spur: Ein vergleichender Überblick über die DACH-Staaten (Grundlagen - Fehlerermittlung - Korrektur - Qualität). Hamburg: PMC Media House GmbH, 2019
- [3] Freystein, H.; Muncke, M.; Schollmeier, P.: Handbuch Entwerfen von Bahnanlagen: Regelwerke, Planfeststellung, Bau, Betrieb, Instandhaltung. Hamburg: DVV Media Group GmbH Eurailpress, 2015
- [4] Cao, Y.; Chen, Z.; Wen, T.; Roberts, C.; Sun, Y.; Su, S.: Rail fastener detection of heavy railway based on deep learning, High-speed Railway, Jg. 1, Nr. 1, S. 63–69, 2023, doi: 10.1016/j.hspr.2022.11.001
- [5] Han, Q. et al.: A Rail Fastener Tightness Detection Approach Using Multi-source Visual Sensor, Sensors (Basel, Switzerland), Early Access. doi: 10.3390/s20051367
- [6] Feurig, S.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Optimierung des dynamischen Gleisstabilisators (DGS) im Hinblick auf eine Verbesserung der Gleislagestabilität, Technische Universität München, 2020
- [7] Antony, B.; Daxberger, H.: Der Dynamische Gleisstabilisator – gestern, heute, morgen, EI 3/2023
- [8] Auer, F.; Antony, B.: Der Dynamische Gleisstabilisator auf Schiene, ETR 5/2019
- [9] Noda, I.; Ozaki, Y.: Two-dimensional correlation spectroscopy: Applications in vibrational and optical spectroscopy. Chichester, Weinheim: Wiley, 2005
- [10] Rail Accident Investigation Branch Derby. Report 07/2021: Freight train derailment at Sheffield station derailment at Sheffield station. <https://www.gov.uk/government/news/report-072021-freight-train-derailment-at-sheffield-station>Transportation Safety Board of Canada, Railway Investigation Report R12E0008, 2022. Zugriff am: 4. August 2023. [Online]: Verfügbar unter: <https://www.bst-tsb.gc.ca/eng/rapports-reports/rail/2012/r12e0008/r12e0008.pdf>



Dipl.-Ing. Dr. mont. Christian Koczwar
R&D Scientist Abt. Research und Simulation
christian.koczwar@plassertheurer.com



Dipl.-Ing. Daniel Pfeil, M.Sc. B.Sc.
Embedded Systems Engineer
daniel.pfeil@plassertheurer.com



Dipl.-Ing. Dr. techn. Daniel Schöllhammer
R&D Scientist Abt. Research und Simulation
daniel.schoellhammer@plassertheurer.com



Dipl.-Ing. Dr. techn. Harald Daxberger
Abteilungsleiter Abt. Research & Simulation
harald.daxberger@plassertheurer.com

Alle Autoren: Plasser & Theurer, AT-Linz