

SmartTamping: Digitale Transformation in der Gleisinstandhaltung

Harald Daxberger, Benjamin Stuntner und Manuel Urstöger

1 Einleitung

Der europäische Bahnsektor befindet sich aktuell im Wandel und ist daher mit großen Herausforderungen konfrontiert. Neben dem Umstieg auf CO₂-neutralen Betrieb sind in den nächsten Jahren milliardenschwere Investitionen in die Infrastruktur geplant [1, 2, 3]. Gleichzeitig ist eine weiter zunehmende Nachfrage sowohl im Güterverkehr als auch im Personenverkehr zu erwarten [4].

Sind Erneuerung und Ausbau einerseits und die für die Deckung der Nachfrage nötige hohe Verfügbarkeit andererseits schon schwierig zu vereinbaren, wird der Ausbau durch den Mangel an qualifizierten Arbeitskräften [5] zusätzlich verschärft. Diesen Herausforderungen kann mit automatisierten Bahnbaumaschinen begegnet werden, die den Bediener unterstützen und eine hohe Arbeitsleistung ermöglichen. Durch die Automatisierung werden Trainingszeit und Einarbeitung verkürzt, die Effizienz beim Arbeitseinsatz gesteigert, die Sperrpausen und benötigten Streckensperrungen auf das notwendige Minimum reduziert. Die durchgängige Digitalisierung, von der Vormessung über die Dokumentation der Instandhaltung bis zur Nachmessung, liefert dem Maschinenbetreiber einen umfassenden Nachweis über die erbrachten Leistungen und Arbeiten. Zusätzlich kann der Infrastrukturbetreiber den erfassten aktuellen Zustand der Infrastruktur für die Planung zukünftiger Instandhaltungsarbeiten nutzen.

Die Qualität der Gleislage ist für den sicheren Betrieb und Fahrkomfort ausschlaggebend. Auch für Verfügbarkeit und Kapazität der Infrastruktur ist sie ein entscheidender Faktor, da bei beeinträchtigter Gleisgeometrie die Geschwindigkeit auf den betroffenen Gleisabschnitten reduziert werden muss.

Sind Instandhaltungsmaßnahmen notwendig, um die mit der Betriebsbelastung abnehmende Gleislagequalität wiederherzustellen, wird zuerst die aktuelle Gleisgeometrie im Rahmen einer Vormessung erfasst. Anschließend wird bei Schotteroberbau das Gleis mit der Stopfmaschine gestopft. Vor dem Stopfen kommt, bei Bedarf, ein Schotterpflug zum Einsatz. Dieser stellt sicher, dass am Einsatzort eine ausreichende

Menge Schotter zur Verfügung steht. Da im Anschluss an die Stopfarbeiten der Querverschiebewiderstand (QVW) reduziert ist, kann nach dem Stopfen der Dynamische Gleisstabilisator (DGS) eingesetzt werden. Dadurch wird der QVW erhöht und die durch die Verkehrsbelastung bedingte Anfangssetzung vorweggenommen. Schließlich wird die neu erstellte Gleislage durch eine Nachmessung erfasst und dokumentiert. Nach dem Stabilisieren stellt ein Schotterpflug das Querprofil wieder durch Pflügen und Kehren in gewünschter Form her und bildet damit den letzten Arbeitsschritt im Zuge einer Gleisdurcharbeitung.

Dieser Beitrag soll einen Überblick über diese Arbeitsschritte und die digitalen Funktionen dahinter geben. Für die Kernprozesse der Gleisinstandhaltungsarbeiten bietet Plasser SmartTamping (Abb. 1) neuartige Lösungen zu den Themen automatisierte Aggregatspositionierung (Plasser TampingAssistant), automatisierte Stopfparameter (Plasser TampingControl) und digitale Nachweisführung (Plasser TampingReport).



Abb. 1: Lösungen des Plasser SmartTamping

2 Vormessung

Die Vormessung dient zur Erfassung von Parametern, welche die Ist-Geometrie des Gleises beschreiben. Abhängig vom Verfahren, das anschließend zur Korrektur der Gleislage verwendet wird – Einzelfehlerbehebungsverfahren (Spot Tamping), Aus-

gleichsverfahren oder Präzisionsverfahren – werden unterschiedliche Parameter erfasst. Die einzelnen Verfahren werden im Folgenden kurz beschrieben.

2.1 Ausgleichsverfahren

Das klassische Ausgleichsverfahren wird angewandt, wenn es keine bekannte Soll-Geometrie oder äußeren Bezugspunkte für die Strecke gibt. Dabei werden in einer initialen Vormessung die Richtung, die Überhöhung und die Längshöhen gemessen. Auf dieser Basis werden Verschiebung und Hebung berechnet und somit Fehler in der Gleisgeometrie korrigiert. Für diese Berechnung werden konfigurierbare Parameter verwendet, wie beispielsweise Streckenklasse, Ausgleichsbereich, Zwangspunkte, Konstant-Bereiche oder maximale Hebung und Verschiebung (Abb. 2).

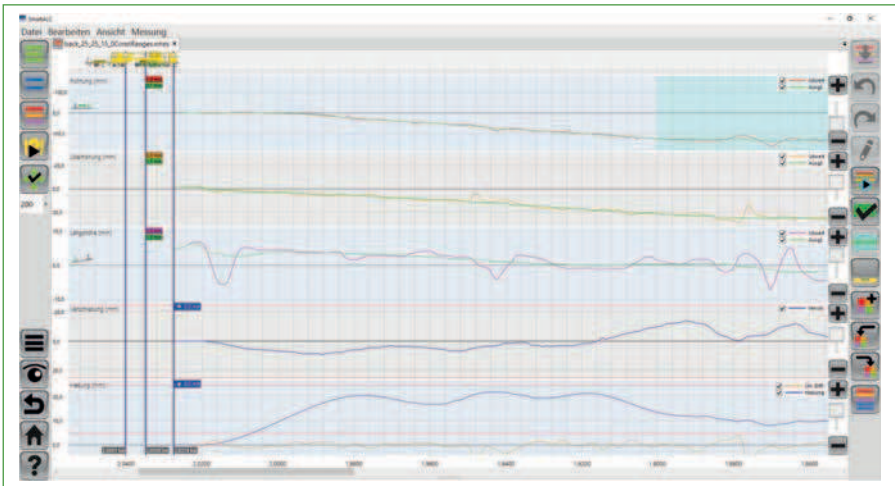


Abb. 2: SmartALC im Ausgleichsverfahren

Die Vormessung für das Ausgleichsverfahren wird bei modernen Maschinen mit dem SmartALC durchgeführt, dafür kommt entweder die mechanische Arbeitssehne oder das PostTG Gleisgeometrie-Messsystem zum Einsatz. Es ermöglicht eine Vormessung mit einer Geschwindigkeit von bis zu 100 km/h, wobei die Messung unabhängig von Messrichtung und Maschinenorientierung durchgeführt werden kann. Dafür werden im PostTG Kanäle definiert, um die Inertial-Messdaten auf die Parameter der Arbeitssehne umzurechnen. Um auch eine Messung mit dem gestürzten Fahrzeug zu ermöglichen, wird parallel zur regulären auch die invertierte Sehnenkonfiguration berechnet. Dadurch ergibt sich eine maximale Flexibilität in der Baustellenplanung und eine Optimierung der Anzahl an nötigen Pendelfahrten mit dem Fahrzeug.

Eine erweiterte Form des Ausgleichsverfahrens kann angewandt werden, wenn nur die Soll-Geometrie der Strecke, nicht aber die äußeren Bezugspunkte bekannt sind. Bei dieser Art der Vormessung werden die Daten der Soll-Geometrie anstatt der Werte der Pfeilhöhen und Längshöhen als Referenz herangezogen und für die Berechnung des Ausgleichs verwendet. Der Vorteil besteht darin, dass die Geometriepunkte, wie Beginn und Ende von Übergangs- oder Vollbögen, genauer in der Ausgleichsberechnung berücksichtigt werden.

Nach der Durchführung der Vormessung werden im SmartALC die Korrekturdaten unter Berücksichtigung einschlägiger Normen, wie beispielsweise der EN 13803, berechnet. Zusätzlich kann der Bediener manuell in die Berechnung eingreifen, indem er interaktiv die Ausgleichsparameter mit Korrekturpolygonen anpasst.

2.2 Spot Tamping

Das Spot Tamping ermöglicht das Erkennen und Ausbessern von Einzelfehlern über eine kurze Strecke. Bei der Vormessung werden im Unterschied zur klassischen Ausgleichsvormessung die Höhe des linken und rechten Schienenstranges individuell aufgezeichnet und auf Basis dieser Information die Einzelfehler erkannt. Die Hebung für die beiden Schienenstränge wird ebenfalls individuell berechnet. Die benötigten Daten können im Zuge der Vormessung für das Ausgleichsverfahren gewonnen werden. Die Einzelfehler werden dabei einzeln erkannt und im Messschrieb ausgegeben.

2.3 Präzisionsverfahren

Für die Anwendung des Präzisionsverfahrens sind Kenntnisse über die Geometrie und die Position der äußeren Bezugspunkte entlang der Strecke sowie die gemessene Differenz dazu notwendig. Das erfordert eine erweiterte Vormessung, und die Arbeitsdaten zur Durchführung der Instandhaltung werden bereits im Vorfeld aufbereitet. Diese beinhalten:

- Elemente und Stationierungen der horizontalen Richtung sowie deren Größen (Bogenhauptpunkte, Elementlängen, Radien, Links-/Rechtsbogen)
- Elemente und Stationierungen der Längshöhe sowie deren Übergangsbereiche (Neigungen, Neigungswechsel, Radien der Übergangsbögen, Längen der Tangenten, Kuppe/Wanne)
- Elemente und Stationierungen der Überhöhung sowie deren Größen (Soll-Überhöhung, Rampenlängen, Rampenformen etc.)
- Korrekturwerte für Richtung und Längshöhe (auf Basis der Vermessungsdaten).

Die Vormessung der Strecke kann auch hier, wie beim Ausgleichsverfahren, über mehrere Varianten durchgeführt werden, z. B.:

- Statische Vermessung mit Totalstation

- kontinuierliche Vermessung mit einem Handmesswagen
- schnelle, belastete Vermessung mit einem Messwagen oder einer Stopfmaschine.

Bei der Vormessung für das Präzisionsverfahren wird die Ist-Geometrie der Strecke gemessen. Zusätzlich werden die horizontalen und vertikalen Ist-Offsets zu den Bezugspunkten vom Referenzstrang gemessen. Die ermittelten Werte werden mit einer Soll-Geometrie und den Soll-Offsets kombiniert und daraus die Hebe- und Verschiebewerte berechnet. Das Präzisionsverfahren liefert als Arbeitsergebnis ein in die ursprüngliche, innere Soll-Geometrie gerichtetes Gleis. Mithilfe der äußeren Bezugspunkte wird zusätzlich eine Referenz zur Ursprungslage generiert.

Vermessungen mit Totalstation oder Handmesswagen sind gängige Möglichkeiten zur Vermessung von Gleisvermarkungsbolzen, haben jedoch den Nachteil, dass sie nur von Personen in der Gefahrenzone am Gleiskörper und weit unterhalb der normalen Regelgeschwindigkeit vorgenommen werden können, wodurch es auch oft zu Gleissperren kommt.

Für schnelle, belastete Vermessung wird das neue System Plasser ReferencedTrackGeometry angeboten. Es revolutioniert die Gleisvermessung, da es eine präzise Messung der Gleisgeometrie und der Bezugspunkte ermöglicht. Dazu werden ein Stereokamera-Messsystem und ein Gleisgeometrie-Messsystem kombiniert auf einem Messrahmen eines Fahrzeuges verbaut. Die Messung ist dabei mit einer Geschwindigkeit von bis zu 80 km/h und ohne Personen in der Gefahrenzone am Gleiskörper möglich. Dadurch sind keine Gleissperren notwendig, und eine Vermessung kann im Regelbetrieb durchgeführt werden [6]. Die Berechnung der Korrekturdaten für das Präzisionsverfahren ist schließlich mit einem Software-Tool bereits auf der Maschine oder im Backoffice möglich und erlaubt, aus längeren Messfahrten gezielt Abschnitte zu filtern und für diese normkonforme Korrekturdaten zu berechnen (Abb. 3).

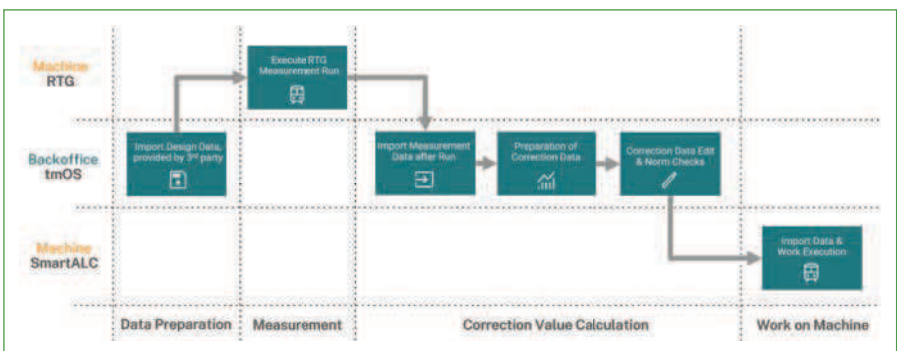


Abb. 3: Kompletter Ablauf zur Erstellung von Arbeitsdaten für das Präzisions-Instandhaltungsverfahren auf Basis einer Plasser ReferencedTrackGeometry-Vormessung

3 Schottermanagement

Bereitstellen, Verteilen und Verlagern von Schotter ist bei der Instandhaltung des Schottergleises von großer Bedeutung. Für die Stopfarbeiten muss genügend Schotter zur Verfügung stehen, um die gewünschte Gleislage herstellen zu können. Eine lang anhaltende Gleislagestabilität setzt zudem ausreichend Schotter im Schwellenzwischenfach und im Vorkopfbereich voraus. Mittels Flankenpflug wird die Bettungsflanke geformt und überflüssiger Schotter in den Bereich des Mittelpflugs gelenkt. Dieser ermöglicht die Lenkung des Schotterstroms in den Bereich des Schwellenzwischenfaches oder des Schwellenvorkopfes. Die nachfolgende Kehranlage nimmt überschüssigen Schotter auf. Dieser kann an der Flanke abgelagert, oder, falls vorhanden, in einem Schottersilo zwischengespeichert werden. Das Spektrum der Arbeitsmaschinen reicht von den kompakten Schotterpflügen über die Schotterverteiler- und Planiermaschinen bis hin zum Plasser BallastExpress (vormals BDS). Der BallastExpress ermöglicht durch gezielte Steuerung der Schottermenge und ausreichend große Bevorratung des Schotters auf der Maschine einen Ausgleich vorhandener Wannen und Kuppen. Er schafft damit die Voraussetzung für eine optimale Gleislage [7].

Der Plasser InfraScan ermittelt Übermengen oder Fehlmengen und vereinfacht dadurch das Schottermanagement. Diese Ermittlung basiert auf Punktwolkendaten eines LiDAR-Scanners, der auf einem Schotterpflug oder einer Stopfmaschine montiert wird. Die Punktwolke ergibt dabei eine gemessene Ist-Schottergeometrie, die mit einer individuell konfigurierbaren Soll-Schottergeometrie verglichen wird. Zusätzlich können Hebe- und Richtwerte herangezogen werden, um die tatsächliche für das Stopfen benötigte Schottermenge zu ermitteln. Die Berechnung erfolgt dabei in äquidistanten Abständen von 25 cm für die linke und rechte Hälfte des Schotterbetts. Für die Berechnung der gesamten Schottermenge einer Baustelle können von der gesamten Messstrecke auch Teilbereiche ausgewählt (Abb. 4) und für die weiteren Arbeitsschritte exportiert werden.



Abb. 4: Plasser InfraScan System Protocol

4 Assistenzsysteme für die Arbeitsdurchführung

Der Plasser TampingAssistant ist eine Entwicklung, um Effizienz und Qualität der Gleisstopfarbeiten zu verbessern. Mit seiner Fähigkeit, die Positionierung der Arbeitsaggregate zu automatisieren, entlastet er die Bediener von Gleisstopfmaschinen bei ihrer Arbeit und trägt zu einer konsistenten Arbeitsqualität bei. Dadurch wird die Sicherheit und Qualität der Schienennetze verbessert. Diese Assistenzlösung besteht aus mehreren Laser-Sensorsystemen sowie einer auf Künstlicher Intelligenz (KI) basierten Auswertungs-Software und ist vollständig in die Plasser Maschinensteuerung P-IC integriert. Je nach Ausbaustufe gibt es zwei Varianten des Plasser TampingAssistant – Basic und Pro.

Die Basic-Version bietet einen kostengünstigen Einstieg in die Welt der automatisierten Stopfarbeiten. Sie automatisiert die Auswahl der Hebewerkzeuge und die Positionierung und Ausrichtung des Hebe-Richt-Aggregates, wodurch die Bediener der Stopfmaschinen entlastet werden und sich auf andere Tätigkeiten im Stopfablauf konzentrieren können. Die Möglichkeit, jederzeit auf die Pro-Version aufzurüsten, bietet eine zukunftssichere Investition für Infrastrukturunternehmen, die ihre Instandhaltungsprozesse in Zukunft weiter optimieren möchten.

Die Pro-Version geht noch einen Schritt weiter. Sie bietet zusätzlich zur Basic-Funktionalität die automatische Positionierung der Drei-Strang-Hebung beim Hebe-Richt-Aggregat und unterstützt die Steuerung weiterer Arbeitswerkzeuge, wie DGS, Vorkopfverdichter, Kehrbürsten, Schallschutzwände oder Frontpflug. Dieses erhebliche Upgrade ermöglicht eine noch präzisere und effizientere Arbeitsweise, die insbesondere in anspruchsvollen Umgebungen, wie Weichen und Kreuzungen, von Vorteil ist (Abb. 5).

Der Einsatz von KI im Plasser TampingAssistant ist ein großer Fortschritt in der Automatisierung von Arbeits-

abläufen auf Gleisbaumaschinen. Durch die Integration von KI und einer Vielzahl von Sensoren kann das System Handlungsempfehlungen erstellen, um die Komplexität im Arbeitsablauf für das Maschinenpersonal zu verringern. Für das Training der KI-Modelle



Abb. 5: Installierte LiDAR-Hardware des Plasser TampingAssistant



Abb. 6: Auszug aus den Klassen und dem Trainingsprozess

wird das Verfahren Machine Learning Operations (MLOps) angewendet. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt darin, dass die KI konsistente und nachvollziehbare Ergebnisse liefert. Dies wird erreicht durch ein von Experten überwachtetes Training und die selektive Zuführung kontrollierter, qualitativ hochwertiger Daten, kombiniert mit intensiven Tests der erstellten KI-Modelle. Selbstlernende Modelle (unsupervised learning) sind für solche Anwendungsfälle nicht geeignet. Im Speziellen nutzt die KI des Plasser TampingAssistent das sog. Deep-Learning-Verfahren von neuronalen Netzen, die genaue, technische Beschreibung dazu wurde, im Speziellen für den Plasser TampingAssistent, bereits in diversen anderen Artikeln beschrieben [8].

Die Annotation der Daten ist ein kritischer Schritt im Training der KI, bei dem Rohdaten klassifiziert und in verschiedene Klassen eingeteilt werden, um eine Grundwahrheit zu schaffen. Der Plasser TampingAssistent unterstützt aktuell 60 verschiedene Klassen zur Beschreibung von diversen Arten an Objekten, die im für den TampingAssistent relevanten Bereich vorkommen können (Abb. 6). Diese Annotation wird intern von speziell geschulten Ingenieuren durchgeführt, zur Gewährleistung einer hohen Datenqualität und Prozesssicherheit. Um

das Problem unausgewogener Daten zu lösen, werden kleinere Bildausschnitte erzeugt und seltenere Klassen stärker gewichtet. Der Trainingsprozess umfasst die Trennung des annotierten Datensatzes in Trainings- und Evaluationsdaten. Das neuronale Netzwerk wird mit den Trainingsdaten gefüttert und bei Eintreffen neuer Daten automatisch aktualisiert. Bevor dieses Modell auf Maschinen installiert wird, durchläuft das MLOps-System noch einen Qualitätscheck. Mit den gesonderten Evaluationsdaten wird überprüft, ob neue Objekte korrekt erkannt wurden und bereits erlernte Information nicht verloren gegangen ist. Fertige Modelle werden schließlich versioniert, um sicherzustellen, dass die auf den Maschinen installierten Modelle eindeutig identifiziert werden können.

Eine weitere Herausforderung besteht darin, regen Datenaustausch zwischen den Maschinen, die relevante Daten vor Ort erheben, und den Systemen, in denen die KI-Modelle trainiert werden, zu gewährleisten. Dabei können große Datenmengen entstehen, die sowohl die Rohdaten aus den diversen Hochleistungssensoren als auch die trainierten KI-Modelle selbst umfassen. Eine durchdachte und gut angebundene IT-Infrastruktur ist daher unerlässlich, um die Datenmengen effizient zwischen den Umgebungen zu synchronisieren. Mit Plasser Datamatic gibt es eine Lösung, diese Daten sicher von der Maschine in das Backoffice für das Training und wieder zurück zur Maschine zu übertragen [9]. Das Ziel ist eine stetige Verbesserung der Leistungsfähigkeit der KI, die lokal und ohne Notwendigkeit einer aufrechten Internetverbindung auf den Maschinen ausgeführt werden kann. Dies bedeutet geringstmöglichen Aufwand für den Maschinenbetreiber und große Prozesssicherheit durch hohen Automatisierungsgrad.

5 Automatisierte Auswahl und Positionierung der Arbeitswerkzeuge

Mittels der vom TampingAssistant berechneten Vorschläge werden die Arbeitswerkzeuge der Maschine automatisiert konfiguriert und positioniert. Dabei werden die Vorteile der unterschiedlichen Werkzeugtypen berücksichtigt. Dies ist dank eines komplexen, mehrstufigen Beurteilungsverfahrens möglich. Der TampingAssistant orientiert sich entlang eines Stopfplans (Abb. 7), der vorgibt, nach welchem Schema

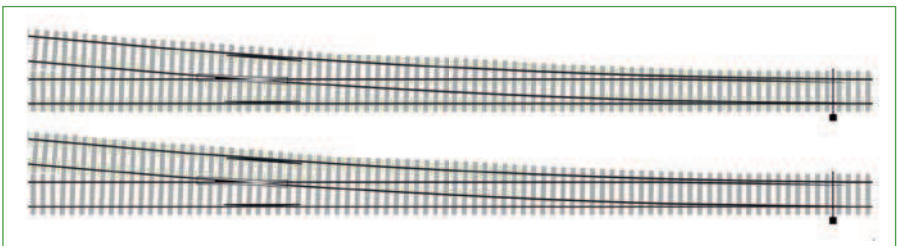


Abb. 7: Exemplarischer Stopfplan für Hauptstrang und abzweigenden Strang

die Weiche zu stopfen ist. Dieses beschreibt die Stopfpositionen entlang des Hauptstranges ebenso wie jene für den abzweigenden Strang. Der TampingAssistant hat als Standard einen Stopfplan hinterlegt, der grundsätzlich auf alle Weichen anwendbar ist. Das Optimum für den Infrastrukturbetreiber wird jedoch erreicht, indem ein kundenspezifischer Stopfplan im TampingAssistant angelegt wird. So wird sichergestellt, dass der TampingAssistant die Weiche möglichst so stopft, wie es der Infrastrukturbetreiber geplant hat. Dies ist ein einmaliger, initialer Aufwand und muss nur bei der Inbetriebnahme der Maschine durch Plasser & Theurer (P&T) durchgeführt werden.

Obwohl der TampingAssistant die Aggregate möglichst entlang der Vorgaben des Stopfplans positioniert, werden diese laufend durch weitere Informationsquellen angepasst. Zuerst werden die physikalischen Limitierungen durch die Maschinen- und Aggregattypen berücksichtigt. Abhängig von Letzteren können einzelne Komponenten mit unterschiedlicher Genauigkeit positioniert werden, oder es gibt Einschränkungen in den Bewegungsfreiheiten, die das Erreichen der idealen Stopfposition verhindern. Damit der TampingAssistant die durch die Maschine gegebenen Möglichkeiten und Freiheitsgrade in die Berechnungen miteinbeziehen kann, werden als Teil der Inbetriebnahme die sog. Maschinenparameter konfiguriert. Somit kann der TampingAssistant diese Limitierungen berücksichtigen, auch wenn diese bei jeder Maschine anders sein können.

Schließlich werden weitere Informationsquellen berücksichtigt, die Limitierungen durch die Gleisinfrastruktur beschreiben. Die wichtigste Quelle sind hier die Klassifizierungsergebnisse der TampingAssistant KI. Im System sind die spezifischen Einschränkungen der einzelnen Klassen hinterlegt, z.B. durch welche etwaige Stopfpositionen nicht ideal erreicht werden können oder wo Aggregate nicht eingesetzt werden dürfen. Eine weitere Quelle sind sog. Hindernis-Datenbanken, die es ermöglichen, zusätzliche Hindernisse und daraus resultierende Einschränkungen zu definieren. Sie können während des Betriebs vom Bediener mit der aktuellen Maschinenposition nachsynchronisiert werden. Hier bietet der TampingAssistant außerdem noch die Funktion, auf Basis der Klassifizierungsergebnisse der KI einen eigenen, neuen Hindernis-Datensatz zu erstellen, um dem Infrastrukturbetreiber aktuelle Informationen zu den im Gleis verbauten Objekten zu liefern. Eine weitere Quelle ist das unterstützte Sensorsystem namens „Tie Finder“. Dieses erkennt aufgrund der ferromagnetischen Eigenschaften von Schienenbefestigungen selbstständig die Position der Schwellen. Ist es auf einer Maschine vorhanden, kann es vom TampingAssistant optional genutzt werden. Dieser kann Fehldetektionen korrigieren, die insbesondere in der Weiche mit den diversen verbauten Teilen vorkommen können. Als letzte Informationsquelle lassen sich vom TampingAssistant durchgeführte Voraufzeichnungen einlesen. Der große Vorteil dieser zusätzlichen

Quelle ist die Erkennung von Schwellen oder Hindernissen bei einer Austragung von größeren Schottermengen. Da der TampingAssistant seine KI-Analyse auf Basis der optischen Lasersensoren durchführt, kann eine starke Beschotterung teilweise dazu führen, dass gewisse Objekte nicht mehr vollständig oder gar nicht detektiert werden können. Wenn es der Instandhaltungsprozess zulässt, kann mit dem TampingAssistant eine Voraufzeichnung durchgeführt werden, indem der Bediener einmal mit der Maschine über das Gleis fährt. Diese Aufzeichnung kann die oben genannten Quellen ergänzen.

Eine weitere Informationsquelle, an der aktuell gearbeitet wird, sind manuelle Markierungen am Gleis. Sehr oft werden bereits im Vorfeld der Instandhaltungsarbeiten Markierungen angebracht, z. B. für nicht zu stopfende Stellen. Hier soll in Zukunft auf Basis der Farbkamera oder von LiDAR-Daten ein zusätzlicher Algorithmus eingesetzt werden, der mithilfe von Mustererkennung vordefinierte Markierungen erkennt und diese Informationen in die Positionierungsberechnung des TampingAssistant einfließen lässt.

Dieser mehrstufige Berechnungsprozess umfasst jede Stopfposition und jeden Aggregatstyp, der auf der jeweiligen Maschine unterstützt wird. Sobald der TampingAssistant die Einstellungen berechnet hat, werden diese an die Steuerung der Maschine übergeben. Da das System aktuell als Assistenzsystem klassifiziert ist, wird über Lampen und auf dem Bildschirm signalisiert, dass sich die Maschine automatisiert vorpositioniert hat. Nun kann der Bediener alles kontrollieren und muss im Idealfall nur das Pedal drücken, damit der Stopfvorgang durchgeführt wird. In Anlehnung an die Norm SAE J3016 zur Beschreibung von Autonomiestufen von straßengebundenen Fahrzeugen ordnet sich der Plasser TampingAssistant somit in die Autonomiestufe 3 – bedingte Au-

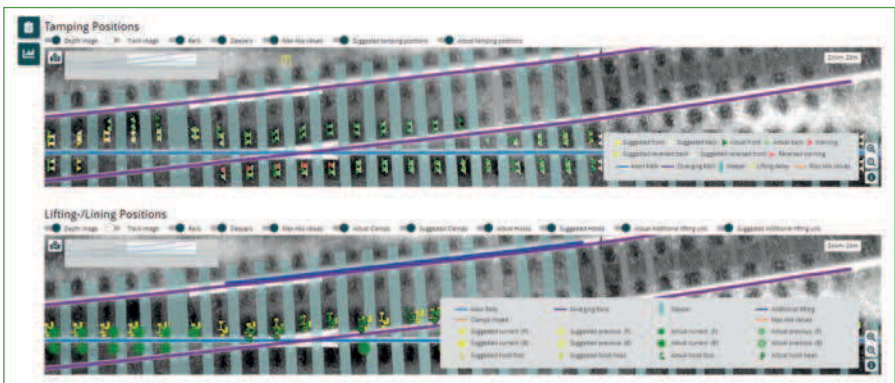


Abb. 8: Überlagerte Darstellung der Stopfpositionen für einen Soll-Ist-Vergleich des TampingAssistant

tomatisierung – ein. Das System arbeitet dann bis zu einem gewissen Punkt autonom, und vom Bediener wird erwartet, bei Aufforderung einzugreifen. Das System ist grundsätzlich dafür ausgelegt, die Autonomiestufe zu erhöhen, wozu bereits Versuche laufen. Da Haftungsfragen noch nicht final geklärt sind, wird aktuell nur der Assistenzmodus und keine Vollautomatisierung angeboten.

Nachdem der Stopfvorgang an einer Position abgeschlossen ist, meldet die Maschinensteuerung die durchgeführten Konfigurationen und Positionen an den TampingAssistant für die Dokumentation der Arbeit im Plasser TampingReport zurück. Somit können die vorgeschlagenen Positionen mit der Finalisierung verglichen werden. Dies unterstützt die Analyse der Leistung des Systems und hilft z. B. bei der Optimierung des Stopfplans (Abb. 8).

5.1 Positionierung der Aggregate und des Satelliten

Zu Beginn des Stopfzyklus wird das Stopfaggregat präzise über den zu stopfenden Schwellen positioniert. Bei der neuesten Generation der elektrischen Satellitenantriebe wird entsprechend eines vorab berechneten Weg-Zeit-Verlaufs, der Trajektorie, zuerst präzise beschleunigt und schließlich gezielt abgebremst, sodass der Satellit exakt an der vom TampingAssistant vorherbestimmten Position zum Stehen kommt. Um diese Funktion unter den vielfältigen Einsatzbedingungen zu gewährleisten, greifen drei wesentliche Komponenten der Antriebssteuerung und Antriebsregelung ineinander:

- Die Trajektorienplanung ermittelt ausgehend von der aktuellen Startposition den gewünschten Weg-Zeit-Verlauf so, dass der Satellit an der gewünschten Endposition anhält. Bei der Berechnung werden maximales Antriebsmoment und weitere Randbedingungen berücksichtigt, sodass der Satellit dem Trajektorienverlauf unter Einhaltung der festgelegten Grenzwerte folgen kann. Der Bediener kann das für die Planung verwendete maximale Antriebsmoment bei Bedarf reduzieren, um beispielsweise bei einem durch Regen rutschigen Gleis das Durchdrehen der Räder zu verhindern. Da sich das Maximalmoment präzise einstellen lässt, kann die Arbeitsleistung auch unter schwierigen Bedingungen optimiert werden.
- Die Vorsteuerung ermittelt unter Verwendung eines mathematischen Modells für den Satelliten und der geplanten Trajektorie ein Steuersignal. Die Berechnung stellt sicher, dass bei genauer Übereinstimmung zwischen Modell und Satellit dieser exakt dem geplanten Verlauf folgt. Diese Kombination von Trajektorienplanung und Vorsteuerung ermöglicht eine hochdynamische Trajektorie. Die Planung berücksichtigt, dass das maximale Antriebsmoment bzw. die ermittelte Kraftschlussgrenze ausgenutzt, aber nicht überschritten wird, und der Satellit folgt diesem Verlauf durch Einsatz der Vorsteuerung. So lässt sich eine möglichst kurze Trajektoriendauer erzielen und die Zykluszeit reduzieren.

- Die Trajektorienfolgeregelung gewährleistet, dass auf eventuell auftretende Abweichungen zwischen geplanter Soll-Trajektorie und tatsächlichem Verlauf sofort reagiert und die geplante Endposition exakt erreicht wird.

Das Hebe- und Richtaggregat wird entsprechend der ermittelten Gleis- bzw. Weichengeometrie und der erfassten Hindernisse durch den TampingAssistant konfiguriert. Je nach Situation kommen Rollenzangen oder Hebehaken zum Einsatz (Abb. 9).



Abb. 9: Bedieneransicht des TampingAssistant in der Stopfkabine

Neben der Positionierung des Satelliten und Konfiguration des Hebe- und Richtaggregates unterstützt der TampingAssistant auch die Konfiguration des Stopfaggregates selbst. Wenn nötig (z. B. beim Stopfen des abzweigenden Stranges), kann es um die Hochachse gedreht werden. Zusätzlich ist es möglich, das Aggregat oder einzelne Aggregatsegmente quer zur Gleisachse zu verschieben. Abhängig von den geplanten Eingriffszonen erfolgt darüber hinaus ein Abspreizen oder Wegklappen einzelner Pickel und das Sperren nicht benötigter Aggregatsegmente, sodass sie bei der folgenden Bewegung nicht abgesenkt werden.

5.2 Heben und Richten

In dieser Phase wird das von den Rollenzangen oder Hebehaken umfasste Gleis angehoben und quer zur Gleisachse in die berechnete Position bewegt. Nach dem Stopfvorgang bewegt sich das Gleis entgegengesetzt zur Hebe- und Richtbewegung etwas in Richtung der ursprünglichen Position zurück. Durch Überheben und Überrichten kann dem begegnet werden. Dabei wird das Gleis etwas über die geplante Soll-Position gehoben und gerichtet.

Eintauchen

Während das Hebeaggregat den Gleisrost anhebt und richtet, werden die nicht gesperrten Aggregatsegmente abgesenkt, und die Stopfpickel tauchen in den

Schotter ein. Die benötigten Kräfte werden über Hydraulikzylinder zur Verfügung gestellt. Um diesen hochdynamischen Eindringprozess – das Absenken dauert, abhängig von der gewählten Geschwindigkeit, nur ca. 0,2 Sekunden – präzise und prozesssicher zu realisieren, kommen mehrere Komponenten der Steuerung und Regelung zum Einsatz.

- Die Trajektorienplanung ermittelt aufgrund der aktuellen Hebe-Position den gewünschten Senktiefe-Zeit-Verlauf so, dass die Pickelspitzen an der gewünschten Position anhalten. Passend für jeden Einsatzzweck kann der Bediener aus drei unterschiedlichen Geschwindigkeiten wählen.
- Die Vorsteuerung ermittelt aus der Soll-Trajektorie ein Steuersignal.
- Abweichungen zwischen geplanter und tatsächlicher Trajektorie aus der vorherigen Eintauchphase werden ausgewertet und die Vorsteuerung entsprechend angepasst. Dadurch gleicht sich das System an den Zustand des Schotterbettes an. Ohne Eingriff des Bedieners ist optimiertes Eindringen von lockerer Neulage bis zu hartem Schotterbett möglich.
- Die Trajektorienfolgeregelung sorgt dafür, dass auf eventuell auftretende Abweichungen zwischen der geplanten Trajektorie und dem tatsächlichen Bahnverlauf sofort reagiert und die geplante Senktiefe genau erreicht wird.
- Um die Eindringkräfte zu reduzieren, kann der Bediener wahlweise die Vibrationsfrequenz der Stopfpickel von 35 Hz auf 45 Hz anheben. Dadurch wird der Schotter stärker fluidisiert, und die Eindringkräfte werden reduziert.

Neben Steuerung und Regelung des Eintauchvorganges analysiert die P&T Tamping-Control die erfassten Messgrößen wie auftretende Kräfte und Senkgeschwindigkeit der Aggregatsegmente und ermittelt daraus eine Einstufung des Schotterzustandes (Plasser TampingControl – BallastMonitoring). Der Schotterzustand wird aufgezeichnet und steht dem Infrastrukturbetreiber zur Verfügung.

Darüber hinaus bietet die P&T TampingControl die Möglichkeit, aufgrund des ermittelten Schotterzustandes den benötigten Beistelldruck automatisch einzustellen (Plasser TampingControl – ForceAutomation). Bei Verwendung dieser Funktion wird der Beistelldruck von der Steuerung an die jeweiligen Gegebenheiten angepasst, Eingriffe des Bedieners sind nicht mehr nötig.

5.3 Beistellvorgang

Der Beistellvorgang bezeichnet jene Phase des Stopfprozesses, in der sich die gegenüberliegenden Pickel auf beiden Seiten der Schwelle aufeinander zubewegen, überlagert von einer Vibrationsbewegung mit einer Amplitude von meist 4 bis 5 mm und einer Frequenz von 35 Hz. Die EN 13 231-1 empfiehlt dabei eine Mindestbeistellzeit von 0.8 Sekunden [10].

P&T macht sich dabei die Technik des asynchronen Gleichdruckstopfens zunutze. Dabei wird die Beistellbewegung mittels hydraulischer Beistellzylinder realisiert, die mit dem gleichen konstanten quasistatischen Hydraulikdruck beaufschlagt werden (beim quasistatischen Druck wird die Druckänderung infolge der Vibrationsbewegung nicht betrachtet). Da die Kräfte aufgrund der geometrischen Anordnung in entgegengesetzte

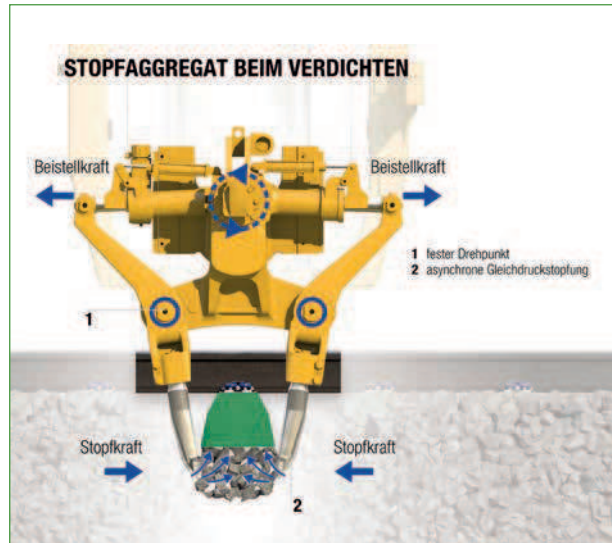


Abb. 10: Schematische Darstellung eines Stopfaggregates zum asynchronen Gleichdruck-Stopfen

Richtungen wirken, heben sie sich größtenteils auf, wodurch sich ein aggregatschonender Beistellvorgang ergibt. Durch den konstanten quasistatischen Beistelldruck sind auch die quasistatischen Beistellkräfte konstant. Unabhängig von den jeweiligen Gegebenheiten bleibt die Beistellkraft auf die Stopfpickel durch das Gleichdruck-Stopfprinzip konstant und beschränkt, wodurch der Schotter geschont wird. Abhängig vom Widerstand im Schotterbett passt sich die Beistellgeschwindigkeit automatisch an. Die unterschiedlichen Schotterverhältnisse in Bewegungsrichtung der jeweiligen Stopfpickel führen dazu, dass sich diese unterschiedlich bewegen. Dies resultiert in einer asynchronen Beistellbewegung zweier gegenüberliegender Pickel. Abb. 10 zeigt eine schematische Darstellung eines entsprechenden Stopfaggregates.

Der Beistellvorgang kann in zwei Phasen unterteilt werden: Verfüllen und Verdichten.

5.4 Verfüllen

Durch das Heben des Gleises entsteht ein Hohlraum unter der Schwelle. Während des Verfüllens wird durch die Beistellbewegung der Stopfpickel Schotter unter die Schwelle befördert und dieser Raum aufgefüllt. In dieser Phase lassen sich die Schottersteine einfach bewegen, da noch Platz zum Ausweichen ist und sich keine nennenswerten hydrostatischen Spannungen aufbauen können. Aufgrund des geringen Widerstandes und der konstanten Beistellkraft erhöht sich die Beistellgeschwindigkeit, ein Kennzei-

chen für die Phase des Verfüllens. Ist der Hohlraum gefüllt, baut sich durch die fortgesetzte Beistellbewegung ein hydrostatischer Spannungszustand auf. Dadurch wird wesentlich mehr Kraft benötigt, um die Schottersteine zu verschieben. Der Widerstand steigt, und da die Beistellkraft konstant ist, sinkt die Beistellgeschwindigkeit. Deren Verringerung zeigt das Ende des Verfüllvorgangs an. In Abb. 11 ist der typische Verlauf der Beistellgeschwindigkeit dargestellt.

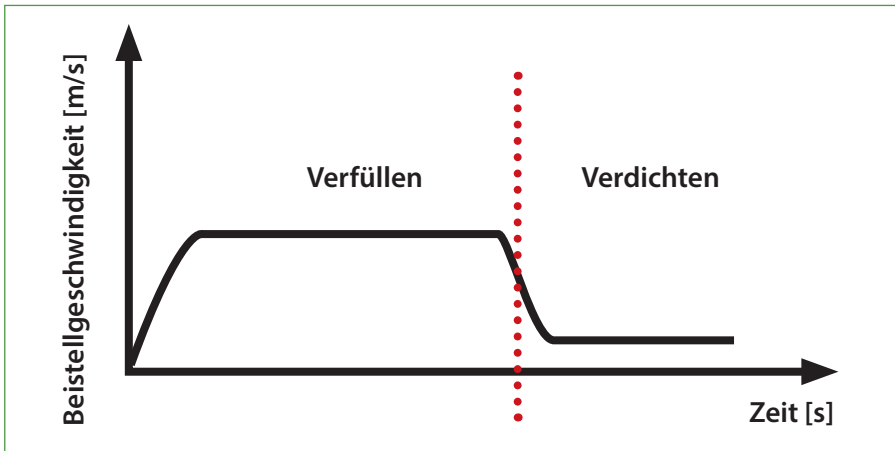


Abb. 11: Schematische Darstellung der Beistellgeschwindigkeit während der Verfüllphase und der Verdichtungsphase

Durch detaillierte Auswertung der Beistellgeschwindigkeit kann der Verfüllvorgang überwacht werden [11]. Ein Absinken der Beistellgeschwindigkeit lässt eine vollständige Verfüllung erkennen, bleibt die Beistellgeschwindigkeit bis zum Ende des Vorganges hoch, lässt dies auf unzureichende Verfüllung schließen. Abb. 12 zeigt zwei typische Verläufe der Stopfpickelpositionen bei unvollständiger und vollständiger Verfüllung.

Auf Basis dieser Erkenntnisse bietet die P&T TampingControl die Möglichkeit, die Verfüllung zu überwachen (Plasser TampingControl – VoidDetection). Wird unzureichende Verfüllung an einer Schwelle detektiert, erfolgt eine Warnung an den Bediener. Dieser kann eine zusätzliche Stopfung veranlassen, um die Verfüllung sicherzustellen. Die Aufzeichnungen über die Qualität dieser Verfüllung dienen als Nachweis des Maschinenbetreibers gegenüber dem Infrastrukturbetreiber. Die verbesserte Prozesssicherheit kommt durch die daraus folgende höhere Verfügbarkeit direkt dem Infrastrukturbetreiber zugute, die erweiterte Dokumentation der Durcharbeitungsqualität ermöglicht darüber hinaus eine effizientere Planung der nötigen kurzfristigen und mittelfristigen Instandhaltungsmaßnahmen.

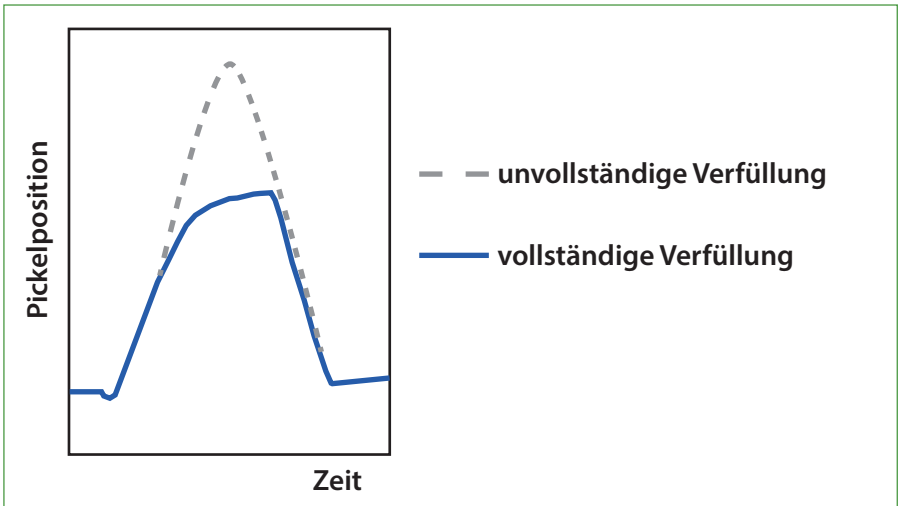


Abb. 12: Verlauf der gemessenen Pickelposition bei unvollständiger und vollständiger Verfüllung

5.5 Verdichten

Mit der vollständigen Verfüllung des Hohlraumes und der damit einhergehenden Abnahme der Beistellgeschwindigkeit beginnt die Verdichtphase. Die Vibrationsbewegung regt die Schottersteine zu einer Umordnung an. Gemeinsam mit der überlagerten Beistellbewegung, die den hydrostatischen Druck aufbaut und Schotter nachfördert, führt dies zu einer Verdichtung der Schottermatrix unter der Schwelle. Diese Prozesse dauern eine gewisse Zeit. So belegen auch Simulationsergebnisse, dass eine längere Einwirkzeit von Vibrationen mit einer erhöhten Steifigkeit der Schottermatrix verbunden ist [12]. Nach Ende der geeignet gewählten bzw. vorgeschriebenen Beistellzeit ist in der Regel eine ausreichende Verdichtung sichergestellt, und die Beistellphase endet.

5.6 Anheben

Im Anschluss an den Beistellvorgang bewegen sich die gegenüberliegenden Pickel wieder auseinander, weiterhin von der Vibrationsbewegung überlagert. Gleichzeitig beginnt die Hebebewegung des Aggregates. Steuerung und Regelung stellen dabei wiederum eine hohe Dynamik und ein unter allen Bedingungen reproduzierbares Verhalten sicher. Durch die Vibration der Stopfpickel lagert sich der Schotter in der unmittelbaren Umgebung um und füllt damit jenen Bereich, den die Pickel in abgesenkter Position eingenommen haben. Durch diesen Effekt wird die Homogenität des Schotterbettes verbessert.

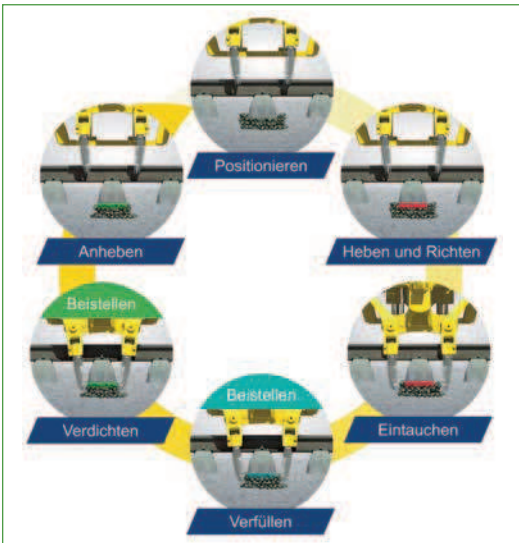


Abb. 13: Die sechs Phasen des Stopfprozesses im Überblick

ausreichender QVW ist notwendig, um ein Ausknicken des Gleises bei temperaturbedingten Druckkräften in den Schienen zu verhindern und die in Bögen auftretenden dynamischen Führungskräfte aufzunehmen. Dem reduzierten QVW nach dem Stopfen wird durch temporäre Reduktion der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf dem

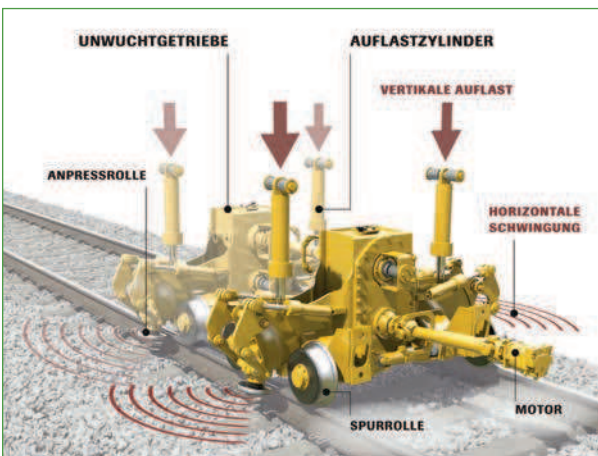


Abb. 14: Schematische Darstellung eines DGS-Aggregates

Ist das Aggregat wieder in die ursprüngliche Position gehoben, startet der Stopfzyklus von Neuem, und das Aggregat wird über der nächsten zu bearbeitenden Schwelle positioniert. In Abb. 13 sind die Phasen des Stopfprozesses veranschaulicht.

Stabilisieren

Nach dem Stopfen ist der Schotter im Gleisbett noch nicht homogen verdichtet und der QVW um ca. 40 % reduziert [13]. Dieser beschreibt jene Kraft, mit welcher der Schotter einer Verschiebung der Schwelle quer zur Gleisachse entgegenwirkt. Ein

ausreichender QVW ist notwendig, um ein Ausknicken des Gleises bei temperaturbedingten Druckkräften in den Schienen zu verhindern und die in Bögen auftretenden dynamischen Führungskräfte aufzunehmen. Dem reduzierten QVW nach dem Stopfen wird durch temporäre Reduktion der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf dem bearbeiteten Gleisabschnitt begegnet. Durch die Verkehrsbelastung kommt es zu einer Setzung des Gleises, das Schotterbett wird homogen verdichtet, und der QVW nimmt zu. Alternativ dazu kann der DGS eingesetzt werden.

Der DGS belastet das Gleis mit einer vertikalen Auflast und versetzt es horizontal in Schwingung. Dadurch wird das

Schotterbett homogen verdichtet und der QVW erhöht. Zusätzlich wird die Setzung durch die anfängliche Verkehrsbelastung gerichtet vorweggenommen, was sich positiv auf die Gleislagequalität auswirkt. Durch den erhöhten QVW kann die Zeitspanne für die Reduktion der Höchstgeschwindigkeit verkürzt werden oder die Reduktion entfallen. In Abb. 14 ist ein DGS-Aggregat dargestellt. Seit Einführung dieser Technologie in den 1970er Jahren haben zahlreiche Untersuchungen die Wirkung des DGS bestätigt [14, 15]. Aktuelle Untersuchungen belegen die Effektivität auch bei besohnten Schwellen [16].

Neben der Verbesserung der Gleisstabilität und des QVW kann der DGS auch dazu genutzt werden, ohne Mehraufwand Zusatzinformationen über den Zustand der Infrastruktur zu erlangen. In einer ersten Untersuchung konnte gezeigt werden, dass sich aus den Sensordaten des DGS Rückschlüsse über den Zustand der Schienenbefestigung ziehen lassen [17].

6 Nachmessung und Dokumentation

Der Plasser TampingReport ist ein integraler Bestandteil der SmartTamping-Lösung und eine revolutionäre Entwicklung in der digitalen Dokumentation und Analyse von Gleisstopfarbeiten. Daten aus verschiedenen Systemen einer Stopfmaschine werden gesammelt und zu einem transparenten Bericht zusammengefasst, der es ermöglicht, die tatsächlich geleistete Arbeit einer Instandhaltungsmaßnahme bis ins kleinste Detail zu untersuchen. Der Bericht bietet einen detaillierten Einblick in den Zustand der Strecke bis hin zu jeder einzelnen Schwelle, wodurch eine bisher unerreichte Transparenz in der Qualitätssicherung ermöglicht wird.

Der Plasser TampingReport bietet eine kombinierte Ansicht aller auf der Maschine verfügbaren Daten. Abhängig von den installierten Systemen und der Konfiguration der Signale können die angezeigten Daten variieren, mit großer Flexibilität und Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Anforderungen und Bedingungen. Die Plasser SmartTamping-Komponenten können entweder einzeln oder als vollständig integriertes System auf den Maschinen implementiert werden, was eine hohe Skalierbarkeit gewährleistet.

Ein Beispiel für die Synergie ist die Kombination von Positionierungsdaten aus der KI-basierten Evaluierung des Plasser TampingAssistant und den bekannten Gleisgeometrie-Parametern aus dem Data Recording Processor (DRP). Diese Integration ermöglicht eine umfassende Analyse der Stopfarbeiten und die Darstellung der Ergebnisse in einem einzigen, kohärenten Bericht, der weit über den Informationsgehalt eines Instandhaltungsberichts gemäß gängigen Normen wie EN 13848 oder länderspezifischen Normen hinausgeht. Weitere Systeme, die Daten zum Plasser TampingReport beisteuern können, sind beispielsweise die Plasser Tam-

pingControl oder Farbkamerabilder, die zusätzliche visuelle Informationen über die durchgeführten Arbeiten liefern. Das TampingControl-Protokoll im Speziellen ermöglicht eine schwellenbezogene Visualisierung der TampingControl-Daten. Auf Basis der für jeden Beistellvorgang dokumentierten Werte können Infrastrukturbetreiber die Veränderungen zwischen den einzelnen Stopfzyklen und Stopfdurchgängen analysieren. Darüber hinaus sind diese Daten auch eine Grundlage für Vergleiche zwischen einzelnen Stopfeinsätzen und Verfolgung der Veränderung im Gleisbett über die Zeit.

Auch für den Plasser TampingReport kommt Plasser Datamatic zum Einsatz. Nach Abschluss der Arbeit können automatisiert alle aufgenommenen Parameter aus den diversen aktiven Systemen exportiert und in das Backoffice übertragen werden. Es wird zwischen verarbeiteten Daten und Rohdaten unterschieden, wobei die Priorität bei der Übertragung auf den verarbeiteten Daten liegt. Nach Abschluss der Synchronisierung stehen die Daten der einzelnen Systeme in einem gemeinsamen Plasser TampingReport zur Verfügung (Abb. 15).

Der Plasser TampingReport ist sowohl ein Werkzeug für Maschinenbediener als auch für Infrastrukturmanager, die eine digitale Dokumentation aller Gleiswartungsarbeiten benötigen und Transparenz in der Nachweisführung der Arbeitsergebnisse schätzen. Die erfassten Informationen können zur Anpassung und Optimierung der Planung zukünftiger Arbeiten verwendet werden und strategische Entscheidungen unterstützen, beispielsweise Ausschreibungen für Instandhaltungsarbeiten. Durch Bereitstellung detaillierter Berichte und Gewährleistung eines hohen Maßes an Transparenz trägt der

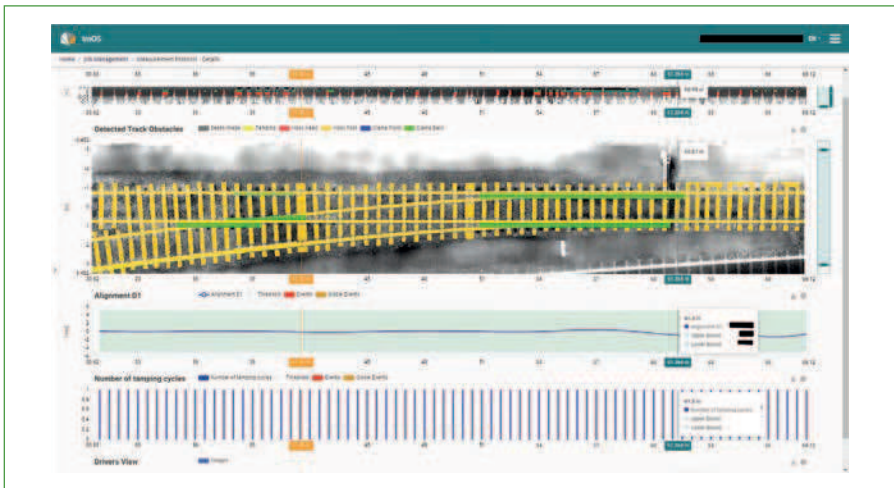


Abb. 15: Kombinierte Darstellung im Plasser TampingReport

TampingReport zur Steigerung der Prozesssicherheit und zur Reduzierung des Verschleißes an Infrastruktur und Maschine bei und führt zu einer nachhaltigen Senkung der Betriebskosten. Dies macht ihn zu einem Werkzeug für alle, die in der Gleisinstandhaltung tätig sind und die Effizienz und Qualität ihrer Arbeit kontinuierlich verbessern möchten.

7 Zusammenfassung

Assistenzsysteme und fortschreitende Automatisierung von Bahnbaumaschinen unterstützen das Bedienpersonal und steigern die Arbeitsleistung, wodurch Trainingszeiten verkürzt werden und Effizienz erhöht wird. Streckensperren werden auf das notwendige Maß reduziert, und die Kapazität der Schiene wird gesteigert. Der Plasser TampingAssistant ist das erste Assistenzsystem für Stopfmaschinen, das durchgehende Digitalisierung von der Vormessung über die Arbeitsprozesse bis zur Dokumentation bietet. Dies ermöglicht einen umfassenden Leistungsnachweis und hilft bei der Planung zukünftiger Instandhaltungsarbeiten. Je nach Anforderung an Genauigkeit und Verfügbarkeit der Soll-Geometrie kommen unterschiedliche Methoden der Vormessung und verschiedene Verfahren zur Korrektur der Gleislage zur Anwendung. Durch Integration von KI und eine Vielzahl von Sensoren kann das System Handlungsempfehlungen erstellen, um die Komplexität im Arbeitsablauf für das Maschinenpersonal zu verringern. Neben Satellitenpositionierung und Konfiguration des Hebe- und Richtaggregates unterstützt der TampingAssistant auch die Konfiguration des Stopfaggregates selbst und je nach der konkreten Ausstattung der Maschine auch weiterer Werkzeuge. Im Anschluss an die Nachmessung steht ein vollständiger Bericht zur Verfügung, der Plasser TampingReport. Dieser ist ein integraler Bestandteil der SmartTamping-Lösung und eine revolutionäre Entwicklung in der digitalen Dokumentation und Analyse von Gleisstopfarbeiten. Die Funktionalität der TampingControl steigert die Prozesssicherheit der Gleisinstandhaltungsarbeiten und stellt zusätzliche Informationen zur Durchführung der Arbeiten und zur Gleisinfrastruktur bereit. Diese Informationen sind ein integraler Bestandteil des TampingReport. Das Assistenzsystem SmartTamping ist bereits auf acht Stopfmaschinen in unterschiedlichen Ausbaustufen und sechs Ländern von Deutschland, Österreich und Belgien bis Japan im Einsatz. Die KI wird in einem MLOps-Prozess mit Daten aus der ganzen Welt weiter trainiert und optimiert, um lokal die besten Stopfentscheidungen zu treffen.

SmartTamping bietet Maschinenbetreibern und Bahninfrastrukturbetreibern eine Fülle von Funktionen, die Maschinenbediener unterstützen, Prozesssicherheit und Leistungsfähigkeit erhöhen und einen detaillierten digitalen Nachweis über die durchgeführten Arbeiten und den Zustand der Infrastruktur zur Verfügung stellen.

Quellen

- [1] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung: Zusätzliche Milliarden Euro für Ausbau der Schiene. Online auf <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/tipps-fuer-verbraucher/bundesschiene-wegeausbaugesetz-2194548>, abgerufen am 28.05.2024
- [2] Rahmenplan 2024–2029 ÖBB Infrastruktur. <https://infrastruktur.oebb.at/de/projekte-fuer-oesterreich/rahmenplan>, abgerufen am 28.05.2024
- [3] Schweizerische Bundeskanzlei: Botschaft zum Ausbauschritt 2035 des strategischen Entwicklungsprogramms Eisenbahninfrastruktur. <https://www.bav.admin.ch/dam/bav/de/dokumente/themen/fabi-step/botschaft-as-2035.pdf.download.pdf/Botschaft%20AS%202035.pdf>, abgerufen am 28.05.2024
- [4] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Verkehrsverflechtungsprognose 2030 – Netzumlegungen Belastungskarten Straße, Schiene, Wasserstraße (Lose 4-6). 2015
- [5] Peichl, A.; Sauer, S.; Wohlrabe, K.: Fachkräftemangel in Deutschland und Europa – Historie, Status quo und was getan werden muss. ifo Schnelldienst, 10/2022
- [6] Brennstainer, A.; Stuntner, B.: Precise digital referenced track measurement with RTG IRJ. 09/2023
- [7] Demml, M.; Steinwenker, H.: Schotterprofilierung im Kontext der mechanisierten Gleisdurcharbeitung, EI 2/2023
- [8] Auer, F.; Zauner, G.; Bürger M.; Müller, T.: Deep-Learning-Bildverarbeitung von 3D-Laserscanner-Aufnahmen für ein Weichenstopf-Assistenzsystem, ZEVrail 06/07/2019
- [9] Brennstainer, A.; Stuntner B.: Nahtloser Datenfluss: intelligente Vernetzung von Gleisbaumaschinen und Backoffice, ETR 04/2024
- [10] EN 13231-1:2023, Bahnanwendungen – Oberbau – Abnahme von Arbeiten – Teil 1: Arbeiten im Schotteroberbau – Gleise, Weichen und Kreuzungen
- [11] Koczwar, C.; Daxberger, H; Omerović, S.: Immer reichlich Schotter unter der Schwelle – vollständige Verfüllung als Basis für das perfekte Auflager, ZEVrail 01/02/2023
- [12] Omerovic, S.; Schöllhammer, D.: Moderne Simulationen des Schotterbetts, EI 7/2023
- [13] Lichtberger, B.: Handbuch Gleis, DVV Media Group GmbH, 3. Auflage, 2010
- [14] Rießberger, K.; Wenty, R.: 40 Jahre "dynamische Gleisstabilisation", EIK 2015
- [15] Antony, B.; Daxberger, H.: Der Dynamische Gleisstabilisator – gestern, heute, morgen, EI 3/2023
- [16] Feurig, S.: Experimentelle und theoretische Untersuchung zur Optimierung des Dynamischen Gleisstabilisators (DGS) im Hinblick auf eine Verbesserung der Gleislagestabilität. Dissertation Lehrstuhl und Prüfamf für Verkehrswegebau, TU München, 2020
- [17] Koczwar, C.; Pfeil, D.; Schöllhammer D.; Daxberger, D.: Die automatisierte Überprüfung der Gleisbefestigung, EIK 2024



Dipl.-Ing. Dr. techn. Harald Daxberger

Head of Research & Simulation

Plasser & Theurer, Export von Bahnbaumaschinen Ges.m.b.H, AT-Linz

harald.daxberger@plassertheurer.com



Benjamin Stuntner, M.Sc.

Head of Product Management & NPI

Track Machines Connected (tmc), AT-Linz

benjamin.stuntner@tmconnected.com



Ing. Manuel Urstöger, B.Sc.

Product Management

Track Machines Connected (tmc), AT-Linz

manuel.urstoeger@tmconnected.com