

Von der Idee zum Produkt: Digitale Produktentwicklung im Bahnbau

Olja Barbir, Samir Omerovic, Christian Koczvara und Bernhard Antony

1 Einleitung

Das mechanisierte Stopfverfahren, eingeführt in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts, ist nach wie vor die mit Abstand wichtigste Instandhaltungsmaßnahme im Schotteroberbau. Derzeit vollzieht sich ein Paradigmenwechsel im Bereich der Gleisinstandhaltung, wenn nicht sogar in der kompletten Bahnindustrie. Wurde zunächst für sehr lange Zeit hauptsächlich auf Erfahrungen der Maschinenbediener und in der Praxis gewonnene Erkenntnisse gesetzt, greift man vor allem in den letzten Jahrzehnten verstärkt auf fundierte wissenschaftliche Erkenntnisse zurück. So gab es speziell im Bereich des Gleisstopfens in den 1980er-Jahren an der Technischen Universität Graz einen sehr prominenten Versuch einer systematischen und wissenschaftlichen Aufarbeitung des Themas. Dabei wurden zahlreiche, größtenteils in mühevoller Kleinarbeit ausgewertete Laborversuche durchgeführt [1], um optimale Betriebsparameter für das Stopfaggregat zu finden. Auf Basis dieser Forschungsergebnisse wurden Empfehlungen für wichtige Stopfparameter (35 Hz Vibrationsfrequenz, 5 mm Amplitude) abgeleitet, die bis heute bestehen. Trotz dieser umfangreichen Experimente gibt es immer noch eine Vielzahl unberücksichtigter Parameter (Sieblinie, Form und Kantigkeit der Schottersteine, Reibungskoeffizienten, Fremdanteil, Porenzahl etc.), die das Verhalten von Gleisschotter beeinflussen. Eine offene Forschungsfrage betrifft die relevanten Parameter bei Kurz- und Langzeitverformungsverhalten des Gleisschotters sowie deren funktionalen Zusammenhang. Darüber hinaus fehlt ein umfassendes numerisches Modell, welches das komplexe mikromechanische Verhalten des Schotters zufriedenstellend abbildet. Darunter versteht man die Kraftübertragung zwischen einzelnen Partikeln sowie die Einzelkornbewegungen im Schottergerüst. Weitere wichtige Faktoren wie die Wassersättigung sowie Alterungseffekte im Schotter (Schotterverschmutzung und Abrasion) wurden bei den Experimenten nicht berücksichtigt, obwohl sie das dynamische Verformungsverhalten maßgeblich beeinflussen.

Steigende Verkehrsbelastung und verkürzte Sperrpausen für die Instandhaltung erhöhen die Anforderungen an den Oberbau. Dadurch rückt die Optimierung aller

in die Instandhaltungsmaßnahmen involvierten Prozesse immer mehr in den Fokus, womit die bisher unberücksichtigten Schotterparameter an Relevanz gewinnen. Zusätzlich ergeben sich durch Fortschritte in der Messtechnik sowie der digitalen Signalverarbeitung neue Möglichkeiten, die bisher unbekanntem Zusammenhänge detailliert zu untersuchen. Beispiele dafür sind in [2] bis [7] beschrieben. Dabei wurden innovative Entwicklungen in der Materialmodellierung, der Messtechnik und der Simulationstechnik auf den Stopfprozess angewendet, die zu einer neuen Sichtweise über das dynamische Verhalten des Schotters geführt haben.

Diese neuen Erkenntnisse bilden die Grundlage für die Automatisierung des Instandhaltungsprozesses. Voraussetzung dafür ist die automatische Erfassung des Schotterzustands direkt und unmittelbar bei der Durcharbeitung. Auf Basis dieser Daten werden die relevanten Stopfparameter (Beistellzeit, Beistellkraft und Anzahl der Beistellvorgänge) objektiv an die Bedingungen im Einsatz angepasst. Sukzessiv werden Gleislagevermessungen, verbunden mit den aufgezeichneten Stopfparametern, ein vollständiges Bild der Streckenqualität liefern und die Planbarkeit, Qualität und Nachhaltigkeit der Instandhaltungsmaßnahmen signifikant verbessern.

2 Grundlagen des Gleisstopfens

Das Gleisstopfen dient dazu, eine definierte Gleislage in vertikaler und horizontaler Richtung herzustellen (bei Neubau) bzw. wiederherzustellen (bei Gleisinstandhaltung). Die Bedeutung einer qualitativ hochwertigen Durcharbeitung kann nicht hoch genug eingeschätzt werden. Mängel in der Gleislage, speziell Einzelfehler, können dabei für die Sicherheit des Eisenbahnbetriebes relevant sein. Die nachträgliche Beseitigung solcher Fehler ist meist mit hohen Aufwänden und entsprechenden Kosten verbunden.

Der grundsätzliche Ablauf eines Stopfprozesses ist bei sämtlichen bestehenden Stopftechnologien gleich. Vibrierende Stopfpickel werden in den Schotter abgesenkt, um anschließend in einer Schaufelbewegung (Beistellbewegung) permanente Auflager für die Schwellen zu schaffen. Entscheidend für den Stopfprozess sind dabei die Vibrationen. Diese Bewegung hat im Wesentlichen zwei wichtige Funktionen: Zum einen ist sie notwendig, um eine Schotterverdichtung zu erreichen, zum anderen ist es nur mit Vibrationsunterstützung möglich, die Eindringkräfte gering zu halten. So reduzieren sie nicht nur die Belastung auf die Arbeitsaggregate, sondern minimieren gleichzeitig den Schotterverschleiß. Obwohl das grundlegende Arbeitsprinzip bei allen Herstellern durchaus vergleichbar ist, gibt es doch signifikante Unterschiede in der Umsetzung. Für das Gleisstopfen selbst wird bei Plasser & Theurer das sogenannte „asynchrone Gleichdruck-Stopfprinzip“ angewendet. Die restliche Erklärung bezieht sich ausdrücklich auf dieses Verfahren. Dabei sind die Kräfte auf einem betrachteten

Stopfpickel sowie dem auf der gegenüberliegenden Schwellenseite arbeitenden Stopfpickel gleich groß. Dieses kraftgesteuerte System führt dazu, dass sich Verschiebungswege automatisch einstellen und an die Bedingungen anpassen. Daraus ergeben sich zwei unabhängige, überlagerte Bewegungen, die mit den Stopfpickeln ausgeführt werden. Eine quasistatische Beistellbewegung „schiebt“ den Schotter (kraftgesteuert) und eine hochdynamische Vibrationsbewegung ist für die Fluidisierung bzw. die Verdichtung zuständig.

Die mechanische Theorie hinter dem Verhalten vibrationsangeregter Granulate ist sehr komplex und bei Weitem nicht vollständig. Das Verhalten von Granulaten wie Schotter ist dabei charakterisiert durch Entmischungsvorgänge, kontraintuitive Kräfteverteilungen, aber auch unklare physikalische Aggregatzustände. Es sei hier nochmals daran erinnert, dass Vibration beim Stopfen einerseits genutzt wird, um den Eindringwiderstand des Schotters zu verringern, also den Schotter zu „verflüssigen“, andererseits auch, um anschließend die Porenzahl zu verringern und so den Schotter zu verdichten. Dies ist kein Widerspruch, ähnliche physikalische Phänomene werden z. B. beim Vollformgießen angewendet, indem man zur Verflüssigung und zur Verdichtung von Sand situationsangepasste Vibrationskennzahlen für unterschiedliche Zwecke nutzt.

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, wurden die mechanischen Eigenschaften des Gleisschotters in einer Reihe von Publikationen untersucht und neu charakterisiert (siehe [2] bis [7]). Eine der wesentlichen Erkenntnisse ist die Klassifizierung des gesamten Stopfvorganges in mehrere Stopfphasen.

Die Stopfphasen unterscheiden sich in ihrer Wirkung auf den Schotter, und der Stopfprozess kann in drei charakteristische Phasen (Abb. 1) unterteilt werden, wobei das Heben und Richten des Gleisrostes nicht unmittelbar zur Stopfphase gezählt wird:

- **Eindringphase (Abb. 1, Phase 1):** Die Stopfpickel tauchen aus der gehobenen Position vertikal in den Schotter ein. Mit möglichst geringem Krafteinsatz soll dabei die endgültige Tiefe erreicht werden (15 bis 20 mm unter der Schwellenunterkante). Um den Eindringwiderstand niedrig zu halten, schwingen die Stopfpickel horizontal mit 35 bis 45 Hz in einer sinusförmigen Bewegung, bis die endgültige Tiefe erreicht ist.
- **Verfüllphase (Abb. 1, Phase 2):** Durch die Hebung der Schwelle entsteht ein Hohlraum zwischen der Schwellenunterkante und der Auflagerfläche. Unmittelbar im Anschluss an die Eindringphase wird eine Beistellbewegung initiiert. Es kommt zu einer von außen nach innen, also in Richtung der Schwelle, gerichteten Arbeitsbewegung mit einer überlagerten Vibration, diesmal mit einer verringerten Frequenz von 35 Hz. Der Schotter wird mit dem Stopfpickel in den durch die Hebung erzeugten Hohlraum geschoben. Es ist darauf zu achten, die Beistellzeit nicht zu kurz zu wählen, da dies zu einer unzureichenden Verfüllung des erzeugten Hohlraums führen kann.

- **Verdichtphase (Abb. 1, Phase 3):** Schotterkörner werden sukzessive aus ihrer Ursprungsconfiguration gelöst. Bei einer gleichbleibenden Beistellkraft tritt durch die Impulseinleitung über die periodisch pulsierende Last ein Kontaktverlust zwischen den Körnern ein, wodurch eine entsprechende Umlagerung ermöglicht wird. Charakteristisch ist ein höherer Widerstand. Bei der Bewegung der Schotterkörner handelt es sich in dieser Phase primär um Starrkörperrotationen, Translationsverschiebungen spielen nur eine untergeordnete Rolle. Dies bewirkt einen Verdichtungsprozess, bei dem die Schotterkörner nach und nach in die dichtestmögliche Lagerung unter den vorhandenen Bedingungen „rutschen“. Die Umlagerung (Verdichtung) benötigt Zeit, weshalb sich eine zu kurze Beistellzeit negativ auf die Verdichtung und somit auch auf die Gleislagestabilität auswirkt. Die Dämpfung des Gleisschotters, vor allem bei stark verschmutztem Schotter, ist vergleichsweise hoch, es braucht also eine kritische Zeit, bis eine Grenzenergie in den Schotter übertragen wurde.

Um die Arbeitsqualität weiter zu erhöhen, ist es notwendig, sowohl die Schotterbeschaffenheit als auch die zustandsabhängigen Betriebsparameter zu kennen. Diese operativen Parameter umfassen die Beistellzeit, die Beistellkraft sowie die Anzahl der Beistellvorgänge. Für diese Zustandsüberwachung sind eine entsprechende Sensorik und anschließende Datenverarbeitung notwendig.

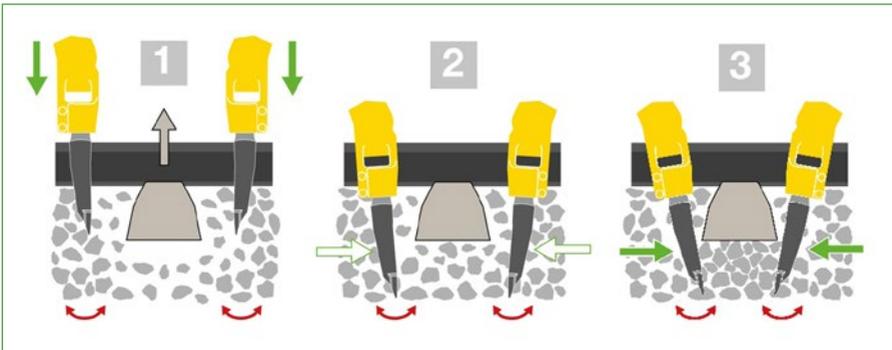


Abb. 1: Schwelle wird gehoben, in der Folge entsteht unter der Schwelle ein Hohlraum (Phase 1), die Beistellbewegung sorgt für die Verfüllung des Hohlraums (Phase 2), anschließend erfolgt die Verdichtung durch die Vibrationsbewegung (Phase 3).

3 Messtechnik

Der Grundstein für eine vollständige Automatisierung des Stopfprozesses ist eine sorgfältige und präzise Ermittlung des Schotterzustands, an den anschließend die Stopfparameter angepasst werden müssen. Die Maschine muss dabei in der Lage

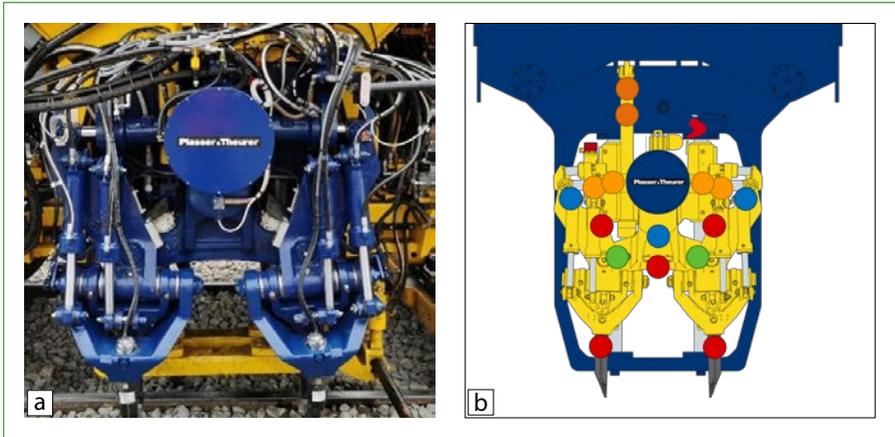


Abb. 2: Stopfaggregat der Universalstopfmaschine Unimat 09-4x4/4s E3 (a); Position der installierten Sensoren – Dehnungsmessstreifen (rot), Drehwinkelgeber (grün), Beschleunigungsaufnehmer (blau) und Drucksensoren (orange) (b)

sein, Abstufungen im Verschmutzungsgrad des Schotterbettes zu unterscheiden, und nicht lediglich eine binäre Aussage liefern, ob es sich um verschmutzten Schotter handelt oder nicht. [3]

Die Grundlagenforschung [2 und 5] zu diesem Thema wurde in der Praxis bei einem Stopfaggregat einer Unimat 09-4x4/4S E3 Universalstopfmaschine (Abb. 2a) mit einem umfangreichen Sensorkpaket angewendet (Abb. 2b): Zur Messung der Kräfte wurden Dehnungsmessstreifen an unterschiedlichen Positionen verbaut. Damit lassen sich Eindringwiderstand sowie die Reaktionskräfte am Stopfpickel und an den Pickelarmen genau bestimmen. Beschleunigungsaufnehmer an mehreren Positionen am Stopfaggregat sowie am Maschinenrahmen dienen zur Berechnung der individuellen Bewegungen der Aggregate. Zusätzlich verbaute Drehwinkelgeber an den Pickelarmen ermöglichen eine genaue Bestimmung der Beistellbewegung und der Vibrationsbewegung (Abb. 3). In Verbindung mit Drucksensoren an den Hydraulikzylindern sowie einer Vielzahl an Signalen (z.B. Hebe- und Richtwerte) aus der Maschinensteuerung kann der Stopfvorgang vollständig dokumentiert werden. Aufgrund der positiven Erfahrungen mit diesem Messsystem wurde auch eine zweite Maschine damit ausgestattet, und zwar eine 09-16/CST Gleisstopfmaschine (Abb. 4), die seit Anfang 2021 in Japan im Einsatz ist.

Das hier beschriebene Messsystem ist vorzugsweise für die Grundlagenforschung ausgelegt. Es ist sehr flexibel ausgeführt und erlaubt die einfache Anpassung an spezielle Aufgabenstellungen. Alle gemessenen Daten (mehrere Hundert Gigabyte im Jahr) werden aufgezeichnet und offline analysiert. Um aus den daraus gewonnenen

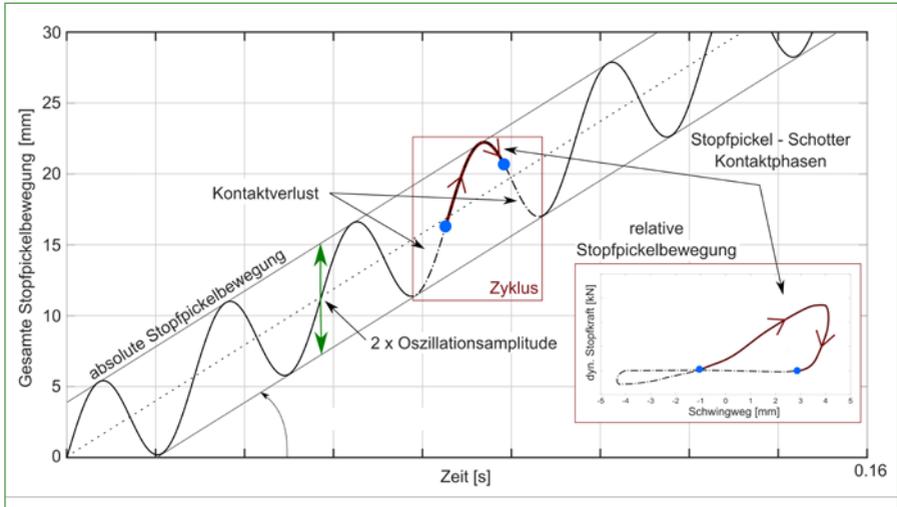


Abb. 3: Gesamte Stopfpickelbewegung als Überlagerung der quasistatischen Beistellbewegung und der Vibrationsbewegung

Erkenntnissen ein neues Angebot zu entwickeln, sind mehrere Schritte notwendig. Ein wichtiger Punkt ist die Entwicklung eines stimmigen Gesamtsystems, bestehend aus dem Sensoraufbau und einer speziellen Analyse-Hardware und -Software für die geforderte Aufgabenstellung (bzw. Überwachung der Beistellbewegung).

4 Numerische Parameterstudie zum Beistellvorgang

Ergänzend zu den Feldversuchen, speziell zum Thema Schotterverdichtung, ist es in mehrfacher Hinsicht vorteilhaft, auch Computersimulationen durchzuführen. Ei-



Abb. 4: Gleisstopfmaschine 09-16/CST, ausgerüstet mit dem Messsystem

nerseits lassen sich präzise Prognosen zur Auswirkung bestimmter Variationen von Betriebsparametern erstellen, andererseits ergeben sich zusätzliche Einblicke zum Schotterverhalten. In der Realität beeinflusst natürlich eine Vielzahl an Betriebsparametern die Verdichtungsqualität. Beispiele hierfür sind die Stopffrequenz, die zugehörige Amplitude, der Beistellweg oder die Beistellzeit. Es bestehen hochkomplexe Zusammenhänge zwischen den einzelnen Parametern, und eine Untersuchung über Feldstudien oder Laborexperimente ist weder zeitlich noch finanziell realisierbar. Ebenfalls sind universelle Aussagen, bedingt durch die inhärente Inhomogenität des Schotters, einer analytischen Form nicht zugänglich. So müssten sämtliche Experimente für alle Arten und alle Zustände von Schotter durchgeführt werden.

Numerische Simulationen sind hervorragend dafür geeignet, weite Parameterbereiche vergleichsweise einfach virtuell erproben zu können. Ein weiterer Vorteil ist auch die exakte Reproduzierbarkeit der Ausgangssituation. Alle Simulationen können von der gleichen Schotterlagerung starten. Auch die Form und die Oberflächenbeschaffenheit sowohl des Schotters als auch der verwendeten Werkzeuge lassen sich vom Benutzer definieren, wodurch deren Einfluss gezielt analysiert werden kann. In diesem Abschnitt wird der isolierte Einfluss der Beistellzeit auf das Verdichtungsverhalten betrachtet. Für diese Untersuchung wird die Interaktion des Gleisschotters mit dem Stopfpickel mittels der Diskrete-Elemente-Methode (DEM) simuliert. Dabei wird jedes Schotterteilchen als Polyeder diskretisiert und die Interaktion der Partikel über passende Kontaktmodelle definiert (für eine detailliertere Beschreibung siehe [6]). Das diskretisierte Modell für die Untersuchung der Beistellzeiten ist in Abb. 5 dargestellt. Es handelt sich um ein numerisches Modell eines zu stopfenden Gleisabschnitts. Für die Simulationen wird ein Gebiet diskretisiert, das sich über drei Schwellen erstreckt, wobei es unter Ausnutzung der Symmetrie ausreicht, nur eine Hälfte des Gleiskörpers zu untersuchen. Die Schottereigenschaften sowie die Sieblinie entsprechen einem Neuschotter, die Form der digitalen Schotterpartikel orientiert sich an eingescannten Geometrien echter Schotterkörner. [8 und 9]

Nun werden innerhalb der Simulation drei Einfachstopfvorgänge durchgeführt. Die Aus-

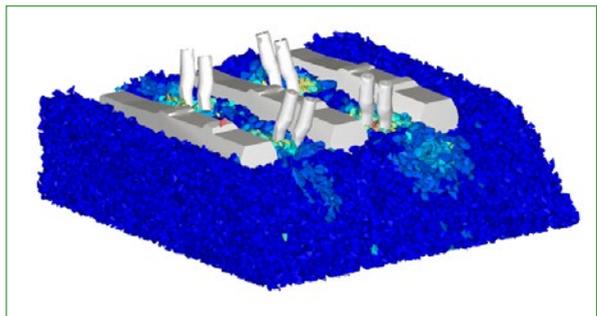


Abb. 5: DEM-Simulation eines Stopfvorgangs, mit der farblichen Darstellung der Absolutgeschwindigkeiten bei den Schotterpartikeln

gangssituation bleibt bei jedem Versuch gleich, nur die Beistellzeit wird verändert und variiert zwischen 0,6, 1,2 und 2,5 Sekunden. Abb. 6 zeigt die Ergebnisse der einzelnen Stopfvorgänge, entsprechend den jeweiligen Beistellzeiten. Die Schottersteine bilden über die Kontaktstellen ein lastabtragendes Netzwerk, auch als Kraftketten oder force chains bezeichnet. Diese Darstellung wurde für die Veranschaulichung der Lastabtragung des Schotters in Abb. 6 gewählt. Die Linienstärke der jeweiligen Kraftkette sowie die gewählten Farben verdeutlichen den Betrag der übertragenen Kraft. In einem Korngerüst unter hohen Kräften können sich in Abhängigkeit der Verdichtung zwei Grenzfälle ausbilden. Der eine Fall ist eine sehr ungleichmäßige Verdichtung, die sich z.B. durch eine Wahl unpassender Verdichtungsparameter oder unvorteilhafte Werkzeuge einstellen kann. Die Kraftverteilung im Korngerüst ist dementsprechend ungleichmäßig, es bilden sich einige wenige, aber sehr ausgeprägte Kraftketten, sie übertragen die Kräfte von der Schwelle bis in den Unterbau. Dies sieht man in den Simulationen bei vergleichsweise kurzen Beistellzeiten (um 0,6 Sekunden). Es ist unbestritten, dass es in diesem Fall zu vermehrtem Kornbruch und somit zu vergrößertem Verschleiß innerhalb des Schotters kommt. Der andere Fall ist eine sehr gleichmäßige Verdichtung, mit einem Verlauf der Kräfte im Korngerüst ohne ausgeprägte einzelne Kraftspitzen. Dies sieht man bei Beistellzeiten um annähernd 1,2 Sekunden. Bei längeren Beistellzeiten zeigen sich bei detaillierten Auswertungen noch geringere Streuungen an Kraftspitzen, es ist aber kein signifikanter Unterschied mehr erkennbar.

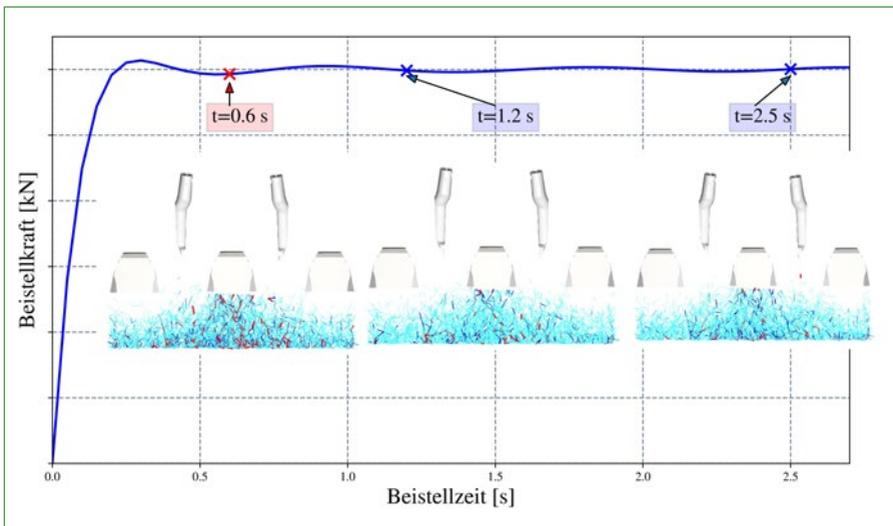


Abb. 6: Lastabtragungspfade (Kraftketten) im Schotter für unterschiedliche Beistellzeiten

Neben den Kraftketten belegt auch die Spannungsverteilung unter der Schwelle eine deutliche Abhängigkeit von der gewählten Beistellzeit. Abb. 7 zeigt die Verteilung der Normalspannung an der Unterseite der Schwelle für unterschiedliche Beistellzeiten. Die farbliche Kodierung steht dabei für die Intensität der Normalspannung auf der Schwelle, wobei Rot das Maximum darstellt. Hier sind einige wenige, aber signifikante Spannungsspitzen bei 0,6 s deutlich zu sehen. Im Vergleich dazu gibt es viele, aber weniger ausgeprägte Spannungsmaxima bei 1,2 und 2,5 Sekunden. Die Farbkodierung gibt keinen Absolutwert wieder, sondern lediglich relative Werte. Die maximal auftretenden Spannungen bei kurzer Beistellzeit sind um einen Faktor drei höher. Die Grundaussage wiederholt sich: Es ist eine kritische Einwirkzeit (Beistellzeit) notwendig, um die Umlagerung zu ermöglichen. Ansonsten wird es zu vermehrtem Kornbruch entlang der Spannungsspitzen kommen. Das bewirkt wiederum eine beschleunigte Schotteralterung und eine schnellere Gleislageverschlechterung.

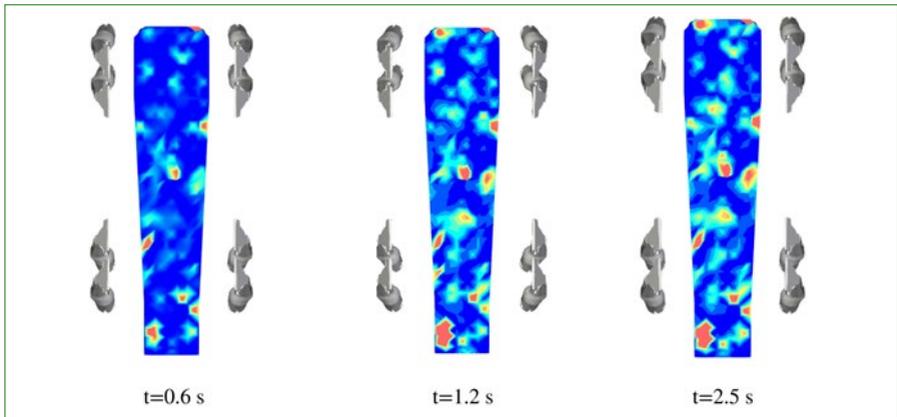


Abb. 7: Darstellung der Normalspannungen auf der Unterseite der gestopften Schwelle, für eine Beistellzeit von 0,6 s (links), 1,2 s (Mitte), 2,5 s (rechts)

5 Grundlagenforschung als Basis für moderne Produktentwicklung

Die richtige Wahl der Betriebsparameter beim Stopfen ist ein wichtiger Teilaspekt für die Herstellung einer dauerhaften und stabilen Gleisbettung. Entscheidend ist ein umfassendes Verständnis der verschiedenen bodenmechanischen bzw. bodendynamischen Aspekte des Gleisschotterverhaltens während des Stopfens. Gleisschotter wird zwar schon lange verwendet, ist aber bis heute nicht so umfassend erforscht, wie man annehmen könnte. Aus diesem Grund hat Plasser & Theurer mehrere internationale Forschungsprojekte mit Infrastrukturbetreibern und Universitäten ins Leben gerufen. Gemeinsames Ziel ist, das Verhalten des Gleisschotters wissenschaftlich zu untersuchen

und die gewonnenen Erkenntnisse dafür zu nutzen, den gesamten Prozess der Gleisinstandhaltung weiterzuentwickeln. Ein Forschungsprojekt in Kooperation mit dem Institut für Geotechnik der TU Wien ergab, dass eine Bestimmung des Schotterzustands während des Stopfprozesses möglich ist. Dazu werden die aufgezeichneten Messdaten in Form eines Arbeitsdiagramms dargestellt, das den Verlauf der dynamischen Pickelkraft und den Schwingweg des Stopfpickels während eines Stopfzyklus zeigt (Abb. 8). Dies ermöglicht eine direkte Ableitung von Stopfkenngrößen (Schwingungsamplitude, maximale Reaktionskraft, Belastungs- und Entlastungsreaktion, in den Gleisschotter eingebrachte Energie, Kontaktpunkte zwischen Pickel und Schotter), die in weiterer Folge für eine systematische und statistische Auswertung herangezogen werden können. Auf Basis der Auswertung ausgewählter Messdaten konnten eindeutige Unterschiede in den Stopfkenngrößen bei unterschiedlichen Schotterzuständen gemessen werden. Diese sind insbesondere beim Vergleich der maximalen Reaktionskraft, der Energie pro Zyklus sowie der Reaktion der Schottermatrix während der Belastung ausgeprägt. Aufgrund dieser Erkenntnisse konnte der unmittelbare Einfluss der Schotterverschmutzung (ballast fouling) auf das Verhalten des Schotters während der Verdichtung experimentell verifiziert werden. [2 und 10] Dies bildet die Basis für die Definition gewünschter Parameterkombinationen, die für ein optimales Stopfergebnis für jeden Schotterzustand notwendig ist. Die Ergebnisse dieser Studie und der nachfolgenden Forschungsprojekte ebnen den Weg zu einer autonom arbeitenden Stopfmaschine, die weltweit eingesetzt werden kann.

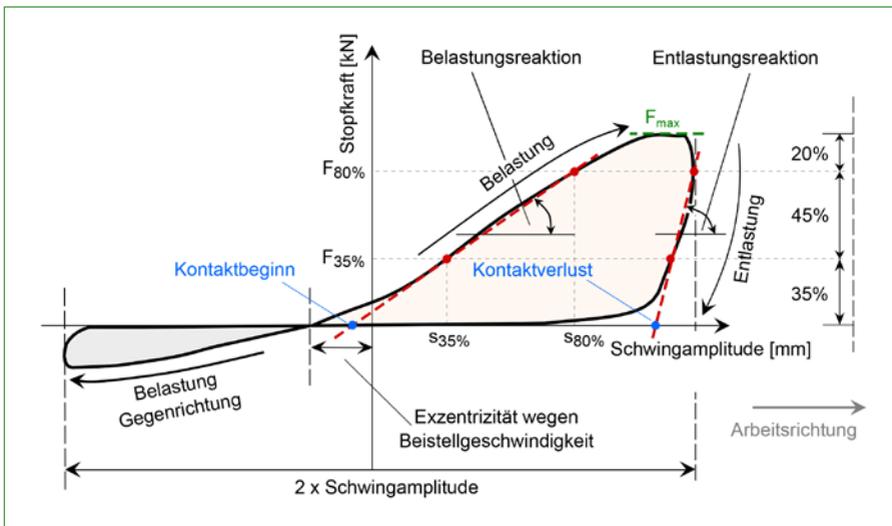


Abb. 8: Vereinfachte Darstellung eines Arbeitsdiagramms mit Stopfkenngrößen

6 Digitale Produktentwicklung am Beispiel der Stopfassistenten

Das Streben nach Automatisierung der Gleisstandhaltung entlastet die Maschinenbediener und stellt auch eine gleichbleibend hohe Arbeitsqualität sicher. Plasser & Theurer leistet seit Jahren einen entscheidenden Beitrag zum Erfolg des Automatisierungsprozesses. Viele der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zielen darauf ab, diesen Weg weiter zu verfolgen. Die neuesten Ergebnisse werden in diesem Beitrag vorgestellt.

6.1 Plasser TampingAssistant

Um die definierte Gleisgeometrie wiederherstellen zu können, wird vor der Durchführung des Stopfvorgangs das Hebe- und Richtaggregat eingesetzt. Besonders in Weichen sind die richtige Positionierung sowie die Auswahl der richtigen Hebewerkzeuge maßgeblich. Erschwerend kommt hinzu, dass die optimale Positionierung der Stopfaggregate eine gewisse Erfahrung voraussetzt. In Weichen ist dies noch deutlich komplizierter, schon durch die Anzahl an Hindernissen (Einbauelemente wie z.B. der Weichenantrieb oder das Weichenherz). Außerdem müssen noch unterschiedliche Stopfrichtlinien (Weichenstopfschema) berücksichtigt werden. Moderne Weichen- und Universalstopfmaschinen erlauben das Ausschwenken einzelner Stopfpickel, was zu einer deutlich besser gestopften Weiche führt, gleichzeitig allerdings auch die Komplexität der Bedienung erhöht. Aufgrund der anspruchsvollen Aufgabenstellung arbeiten in Weichen daher meist zwei Maschinenbediener. Um diese bei ihren anspruchsvollen Aufgaben zu unterstützen, wurde Plasser TampingAssistant (Abb. 9) entwickelt. Mit Hilfe von Laserscannern werden das Gleis und seine Umgebung erfasst und in ein 3D-Modell digitalisiert. Ein KI-System analysiert diese virtuelle Abbildung und klas-



Abb. 9: Stopfmaschine ausgestattet mit Plasser TampingAssistant

sifiziert jeden aufgenommenen Punkt. Dadurch ist es möglich, Objekte im Gleis zu erkennen und der richtigen Kategorie zuzuordnen. So kann die Maschine selbstständig zwischen Schienen, Schwellen und sogar Hindernissen wie Kabeln im Schwellenfach unterscheiden. Auf der Grundlage dieser Informationen liefert das System nahezu simultan Handlungsempfehlungen für die Hebe-, Richt- und Stopfeinheiten und zeigt sie dem Maschinenbediener an. Dieser kann im Vorfeld die empfohlenen Maßnahmen genehmigen oder ablehnen. Bestätigte Empfehlungen übernimmt die Maschine für die selbstständige Positionierung der Hebe-, Richt- und Stopfaggregate. Plasser TampingAssistant setzt damit einen wichtigen Schritt in Richtung Automatisierung des gesamten Stopfprozesses.

6.2 Plasser TampingControl

Sind die Stopfaggregate und das Hebe- und Richtaggregat positioniert, beginnt der eigentliche Stopfprozess. Beim Heben des Gleises wird die Kontaktfläche zwischen Schotter und Schwelle aufgelöst, wodurch ein Hohlraum unter der Schwelle entsteht (Abb. 1, Phase 1). Dieser Bereich muss während der Beistellphase (Abb. 1, Phase 2) mit Schotter aufgefüllt und anschließend verdichtet werden (Abb. 1, Phase 3). Dabei ist die Beistellbewegung für den Schottertransport unter die Schwelle und die Vibrationsbewegung für die eigentliche Verdichtung maßgebend [3]. Die Vibration sorgt hier für eine periodisch pulsierende Lastübertragung vom Stopfpickel auf das Korngerüst, wodurch nach einer entsprechenden Einwirkzeit eine Umlagerung der Schotterkörner in eine dichtere Konfiguration ermöglicht wird [2]. Dieser dynamische Vorgang benötigt zwangsläufig eine gewisse Zeit. Bei zu kurzer Einwirkdauer (Beistellzeit) kann dieser Prozess nicht abgeschlossen werden, und in der Folge ist eine erhöhte Nachverdichtung im Regelbetrieb und somit eine reduzierte Gleislagestabilität unvermeidlich. Auch eine unzureichende Verfüllung des Hohlraums unter der Schwelle wirkt sich negativ auf die Gleislage aus. Bleibt ein solcher Bereich unerkant, treten mit Sicherheit Einzelfehler auf. Nur wenn der im Betrieb belastete Bereich verdichtet sowie der Hohlraum unter der Schwelle ordnungsgemäß verfüllt wird, kann eine langlebige Gleislage erreicht werden. Um dies zu gewährleisten, gibt es häufig nationale Empfehlungen oder Richtlinien, die meist auf Erfahrungswerten beruhen. Sie sind Grundlagen für gute Arbeitsergebnisse, jedoch keine Garantie für eine optimale Verfüllung. Stetig steigende Anforderungen an die Streckenverfügbarkeit sowie die gewünschten längeren Wartungsintervalle bei gleichzeitig steigender Verkehrsbelastung erfordern es, auch den Füllprozess überwa-

chen zu können. Um die Qualität der Stopfarbeiten weiter zu verbessern, wurde von Plasser & Theurer ein Überwachungssystem zur Kontrolle des Füllvorgangs entwickelt [4]. Dieses basiert auf der Änderung des Schotterwiderstands, wenn der Hohlraum unter der

Schwelle mit Schotter gefüllt wird. Beim asynchronen Gleichdruck-Stopfprinzip handelt es sich um ein kraftgeregeltes Konzept. Dabei stellt die quasistatische Beistellkraft die Regelgröße dar, wodurch bei reduziertem Schotterwiderstand die Beistellgeschwindigkeit steigt und bei größerem Widerstand abnimmt. Während des Verfüllvorgangs ist die hydrostatische Spannung des Schotters sehr gering, da dieser sich in Richtung des Hohlraums weitgehend ungehindert bewegen kann. In der Zeit, in der der Hohlraum gefüllt wird, weisen die Schotterkörner bei ihrer Bewegung einen geringeren Widerstand auf, was zu einer vergleichsweise hohen Beistellgeschwindigkeit führt. Sobald der Hohlraum gefüllt ist, verringert sich der Bewegungsspielraum der Schotterkörner, der Widerstand nimmt zu (Verdichtphase) und die Beistellgeschwindigkeit nimmt ab (Abb. 10).

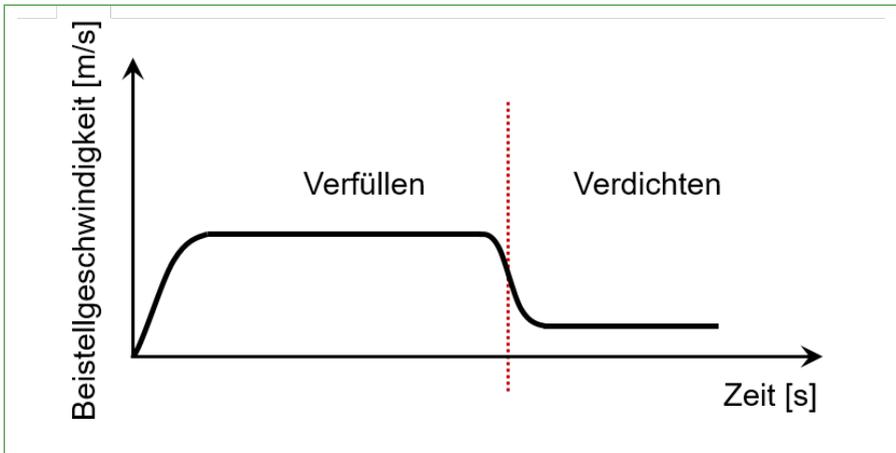


Abb. 10: Schematische Darstellung der Beistellgeschwindigkeit beim Verfüll- und Verdichtprozess

Abb. 11 zeigt die gemessene Beistellbewegung sowohl einer unvollständigen als auch einer vollständigen Verfüllung des Hohlraums. Anhand der Kurvensteigung lassen sich die beiden Fälle deutlich unterscheiden. Sobald die Verfüllung annähernd abgeschlossen ist, nimmt die Steigung ab, hingegen verläuft die Kurve bei unvollständiger Verfüllung während der gesamten Beistellbewegung nahezu linear. [3] Da der Absolutwert der Beistellgeschwindigkeit auch von der vordefinierten Beistellkraft abhängt, wird für die Bewertung des Füllprozesses der Schotterwiderstandsbeiwert herangezogen (Definition siehe Referenz [4]). Bei unvollständiger Verfüllung wird der Bediener visuell darauf aufmerksam gemacht und kann entsprechend reagieren. Abb. 12a zeigt das Bedienfenster der Plasser TampingControl. Der Maschinenbediener sieht

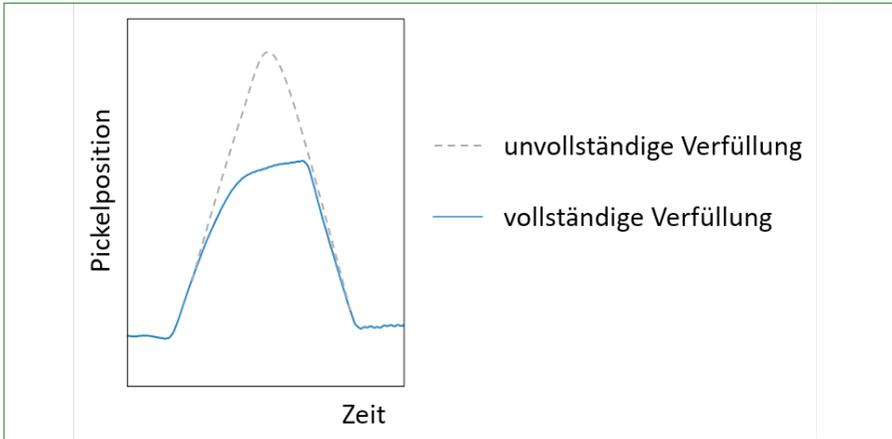


Abb. 11: Gemessene Beistellbewegung bei unvollständiger und vollständiger Verfüllung. Beide Kurven wurden mit gleichen Arbeitsparametern (Stopfdruck, Beistellzeit, Eindringtiefe, Hebung und Schwellentyp) aufgezeichnet.

auf einen Blick, ob der durch den Hebevorgang entstandene Hohlraum ausreichend verfüllt wurde. Zusätzlich zur aktuellen Schwelle werden auch die vorangegangenen zwölf Stopfprozesse angezeigt, so lassen sich etwaige Trends frühzeitig erkennen. Ob eine Schwelle unzureichend verfüllt ist, wird automatisch beurteilt. Grundlage hierfür ist die statistische Auswertung hunderttausender Stopfprozesse in Kombination mit Messdaten, die während des gesamten Stopfprozesses aufgezeichnet und analysiert werden. Das Bedienpersonal hat außerdem die Möglichkeit, das System über die Sensitivitätseinstellung anzupassen. Durch gezielte Überwachung des Verfüllprozesses können Einzelfehler reduziert werden, wodurch die Gleislagequalität erhöht wird. Aus diesem Grund ist die Plasser TampingControl direkt in den Plasser TampingReport (Abb. 12b) integriert. So können die wichtigen Parameter (Hohlage vom System erkannt, Sensitivitätseinstellung, Beistellkraft etc.) auch nachträglich am PC überprüft werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die ständig steigenden Anforderungen hinsichtlich Sicherheit, Leistungsfähigkeit, Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit führen derzeit zu weitläufigen Veränderungen im System Bahn. Der hohe Komplexitätsgrad und die weitverzweigte Interdisziplinarität des Systems erfordern eine Digitalisierung, will man in Zukunft wettbewerbsfähig bleiben. Dies gilt in gleichem Maße für Infrastrukturbetreiber wie auch für Hersteller und Betreiber von Bahnbaumaschinen. Längere Intervalle und kürzere Sperrpausen verlangen so noch effizientere Instandhaltungsmaßnahmen.



Abb. 12: Bedienfenster der Plasser TampingControl einer 1-Schwellen-Stopfmaschine (a), Darstellung ausgewählter Kenngrößen im Plasser TampingReport (b)

Will man diesem Trend gerecht werden, ist es notwendig, den Instandhaltungsprozess umfassend zu automatisieren und damit Transparenz und Prozesssicherheit zu schaffen. Dieser Automatisierungsprozess ist an umfassende Grundlagenforschung gebunden. Ein Beispiel sind numerische Simulationen, mit denen „Stein für Stein“ Nachbildungen von Labor- oder Feldversuchen möglich sind. Diese Kombination aus Feldversuchen und Computersimulationen erlaubt eine noch umfangreichere Analyse des Stopfprozesses. Zusätzlich hat Plasser & Theurer in Zusammenarbeit mit Infrastrukturbetreibern und Universitäten jahrelange und intensive Projekte im Themenbereich Gleisbau durchgeführt, um das System Gleis und seine Einzelkomponenten zu verstehen. Eine Gesamtanalyse aller Maschinenkomponenten und Arbeitsschnitte ist Voraussetzung dafür, noch vorhandene Potenziale möglichst effizient zu nutzen. Neben der Optimierung des Stopfprozesses werden auch die vorhergehenden Arbeitsschritte automatisiert. Ein vielversprechender Ansatz ist die Erstellung eines digitalen Abbildes der Umgebung in Kombination mit einer KI zur Klassifizierung. Plasser TampingAssistent zeigt hier eindrucksvoll, was heute bereits möglich ist.

Quellen

- [1] Fischer, J.: Einfluss von Frequenz und Amplitude auf die Stabilisierung von Oberbauschotter“. Dissertation, Technische Universität Graz, Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, (1983)
- [2] Barbir, O.: Development of condition-based tamping process in railway engineering“. Dissertation, Technische Universität Wien, Institut für Geotechnik, (2022) (unveröffentlicht)
- [3] Antony, B.; Barbir, O.; Koczwar, C.: „From research to automation“. PWI Journal on Intelligent Tamping (unveröffentlicht)
- [4] Koczwar, C.; Daxberger, H.; Omerovic, S.: Vollständige Verfüllung als Basis für das perfekte Auflager, ZEVrail 2022
- [5] Barbir, O.; Koczwar, C.; Omerovic, S.; Antony, B.; Auer, F.: Schotterzustandssensor – Grundlagenforschung bis zur Implementierung, EIK 2022, DVV Media Group GmbH / Eurailpress, S. 82–93
- [6] Omerovic, S.; Philipp, T.; Auer, F.: Die Anwendung der Diskrete-Elemente-Methode im Eisenbahnbau: Inverse Parameterbestimmung, ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, 6/2019, S. 44–48
- [7] Zauner et al.: Automatisierte Analyse von Gleisunterbau-Bodenradarmessungen, EI – DER EISENBAHN-INGENIEUR 3/2020, S. 26–29
- [8] ÖNORM EN 13450, Gesteinskörnungen für Gleisschotter, Ausgabe: 2021.07.01.
- [9] ÖBB, Technische Lieferbedingungen für Oberbauschotter, BH 700, Ausgabe: 2012.04.01
- [10] Barbir et al.: Gleisstopfen: Modellierung der Stopfpickel – Schotterbett – Interaktion, Geotechnik, 42: 219–228. (2019)



Dipl.-Ing. Olja Barbir
System engineer
olja.barbir@plassertheurer.com



Dipl.-Ing. Dr. techn. Samir Omerovic
Simulationsingenieur
samir.omerovic@plassertheurer.com



Dipl.-Ing. Dr. mont. Christian Koczwar
Forschungsingenieur
christian.koczwar@plassertheurer.com



Dipl.-Ing. Bernhard Antony, BSc
Head of Technology Centre Purkersdorf
bernhard.antony@plassertheurer.com

alle Autoren:
Plasser & Theurer, Export von Bahnbaumaschinen, Gesellschaft m.b.H., Wien