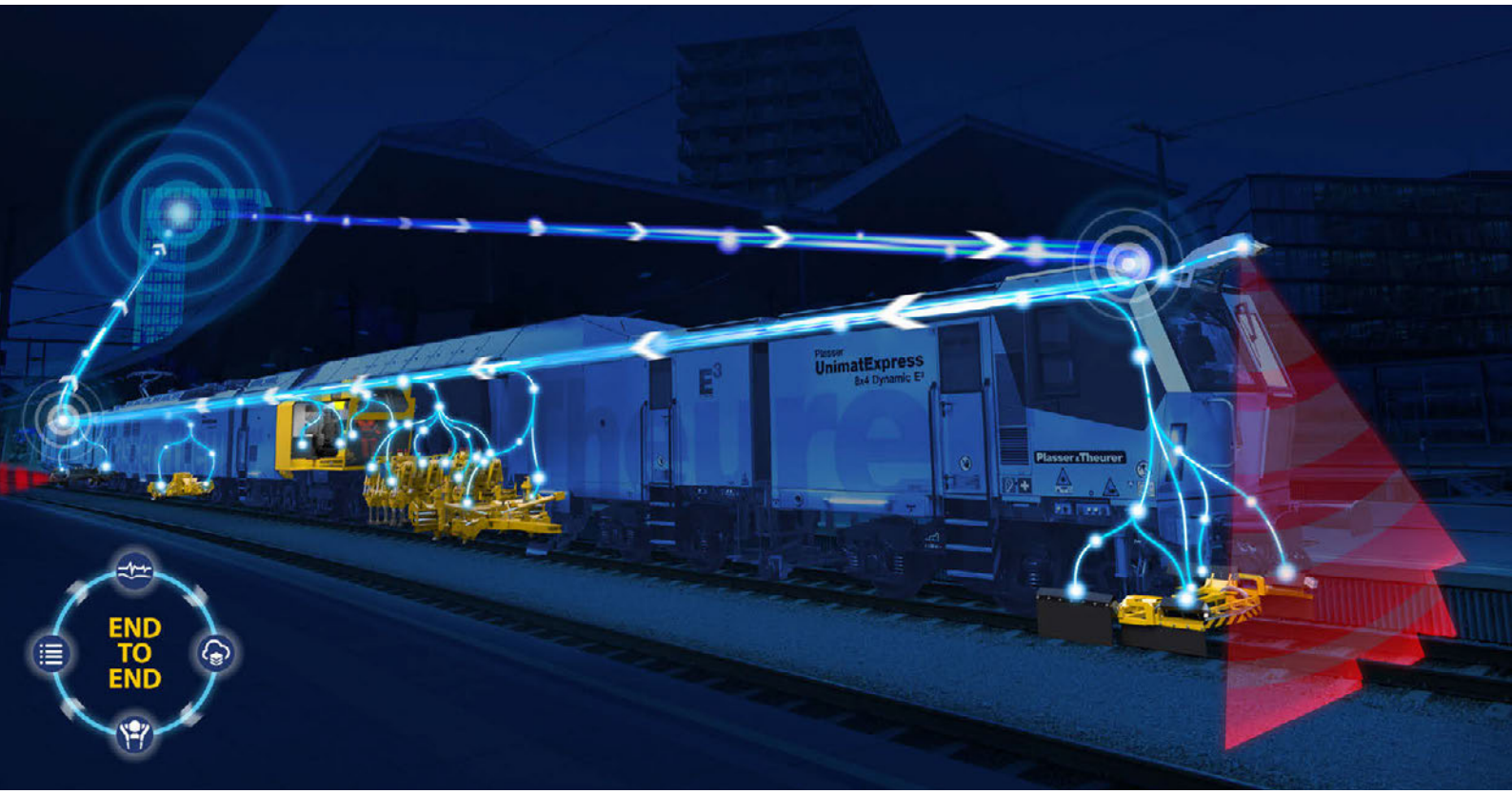

Abb. 1: Digitale End-to-End-Betrachtung einer Gleisbaumaschine

Quelle aller Abb.: Plasser & Theurer

Von der Forschung zur marktfähigen Technologie

Mit strukturierten Entwicklungsprozessen innovative Systeme für den modernen Gleisbau realisieren

CHRISTIAN KOCZWARA | MARIO PISSLINGER | PHILIP SMRZKA

Auf Basis umfassender Grundlagenforschung und eines strukturierten Entwicklungsprozesses entstand Plasser TampingControl – ein System, das den Stopfprozess durch sensorbasierte Echtzeitmessung, automatische Anpassung der Stopfparameter und kontinuierliche Qualitätskontrolle des Schotterzustands optimiert. Die Technologie steigert die Gleislagequalität, entlastet das Bedienpersonal und ermöglicht gezielte Instandhaltungsmaßnahmen. Nach erfolgreicher nationaler und internationaler Erprobung ist das System heute weltweit bereits auf über 30 Stopfmaschinen im Einsatz.

Einleitung

Die Eisenbahninfrastruktur steht vor großen Herausforderungen, verursacht durch die aktuell hohe Auslastung und auch die erwarteten Zuwächse in den kommenden Jahren. So beabsichtigen die Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB), ihre Transportkapazitäten bis 2040 zu verdoppeln [1]. Diese Erhöhung lässt sich nicht ausschließlich durch Neubauprojekte realisieren, sondern erfordert in erster Linie die optimierte Nutzung der vorhandenen Infrastruktur. Neben effizientem Betrieb ist auch eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Instandhaltungsprozesse entscheidend. Plasser&Theurer leistet seit vielen Jahrzehnten einen wesentlichen Beitrag dazu und arbeitet kontinuierlich an innovativen End-to-End-Lösungen (Abb. 1), um die Leistung moderner Gleisbaumaschinen weiter zu erhöhen. Ein Teil der Forschungs- und Entwicklungsarbeit zielt darauf ab, den Stopfprozess weiter zu optimieren sowie die Stopfqualität fortlaufend zu verbessern, zu überwachen und lückenlos zu dokumentieren.

Die Wahl der Stopfparameter trifft in der Regel der Stopfbediener. Zwar gibt es nationale Richtlinien und Empfehlungen, allerdings kann eine optimale Stopfung nicht immer durch allgemeingültige Vorgaben gewährleistet werden. Das manuelle Einstellen der Stopfparameter erfordert vom Maschinenpersonal ein hohes Maß an Erfahrung. Selbst die besten Fachkräfte können anhand des optischen oder akustischen Verhaltens des Schotters nicht immer zuverlässig auf die optimalen Parameter schließen. Auch ist das Anpassen der Stopfparameter nur eine von vielen parallelen Aufgaben – etwa die präzise Positionierung der Stopfpickel –, die gleichzeitig höchste Aufmerksamkeit erfordern. Das System Plasser TampingControl zur automatisierten Optimierung des Stopfprozesses nutzt Sensoren, die bei jedem Stopfzyklus Messgrößen wie Kraft, Position und Tiefe erfassen und auswerten. Auf Basis unterschiedlicher Kennwerte werden automatisch die Parameter des Stopfprozesses (z. B. die Beistellkraft) angepasst. Das erleichtert dem Bedienperso-

© DVV Media Group GmbH

nal die Bedienung der Stopfmaschine und reduziert die notwendigen manuellen Eingriffe während des Stopfprozesses maßgeblich. Das System liefert dem Bedienpersonal zusätzlich in Echtzeit Informationen zum Verfüllprozess und erstellt Qualitätsnachweise zum Schotterzustand. So werden gezielte Instandhaltungsmaßnahmen ermöglicht, die langfristig die Gleislage stabilisieren und die Leistungsfähigkeit des Eisenbahnnetzes erhöhen [2]. Nachfolgend wird anhand dieses Systems der Ablauf der Produktentwicklung von der Grundlagenforschung bis zur internationalen Erprobung erörtert.

Produktentwicklungszyklus – von der Idee zur Anwendung

Die Entwicklung neuer Technologien folgt einem strukturierten Produktentwicklungszyklus, der sich im Wesentlichen in drei zentrale Phasen gliedert: Konzeptphase und Forschung, Produktentwicklung sowie Wartung und Weiterentwicklung (Abb. 2). Jede dieser Phasen trägt entscheidend dazu bei, aus einer ersten Idee ein praxistaugliches und nachhaltiges Produkt zu formen.

Entwicklungsprojekte werden von einem strukturierten Projektmanagement begleitet. Regelmäßige Meilensteingespräche, protokollierte Abstimmungen der Fachbereiche und zentrale Pflege aller Anforderungen in einer Requirements-Management-Software bilden die Grundlage für eine konsistente und nachvollziehbare Entwicklung. Anforderungen werden systematisch erfasst, versioniert, mit Status versehen und den zuständigen Bereichen zugewiesen – eine etablierte Vorgehensweise in komplexen, interdisziplinären Entwicklungsprojekten. Klare Aufgabenverteilung und Transparenz im Projektverlauf tragen wesentlich dazu bei, dass die Produkte fristgerecht und den Anforderungen entsprechend produktionsreif werden [9].

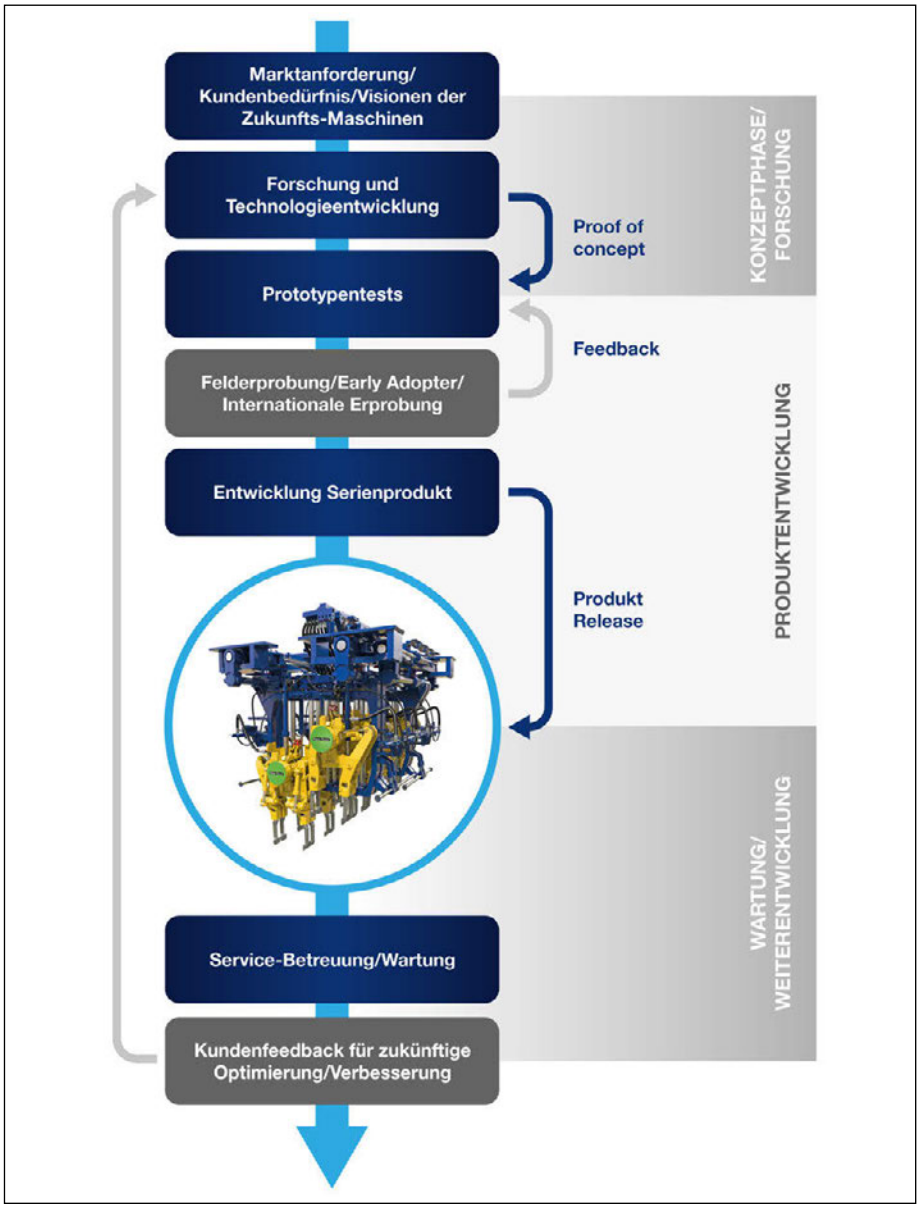

Abb. 2: Schematische Darstellung des Produktentwicklungsprozesses

Konzeptphase und Forschung

Am Beginn des Produktentwicklungsprozesses steht die Analyse von Marktanforderungen und Kundenbedürfnissen. Die Vision zukünftiger Gleisbaumaschinen – etwa mit höherem Automatisierungsgrad, intelligenter Sensorik und datenbasierter Prozesssteuerung – ist grundlegend für die Ableitung konkreter Forschungsziele. In dieser Phase werden technologische Konzepte auf der Basis von wissenschaftlichen Erkenntnissen entwickelt. Erste Prototypen werden gebaut und unter kontrollierten Bedingungen getestet, um technische Machbarkeit und innovatives Potenzial zu bewerten. Diese Versuche liefern wichtige Erkenntnisse für die spätere Produktgestaltung und bilden die Basis für die Validierung im Feld.

Grundlagenforschung als Basis für Produktentwicklung

Eine zentrale Voraussetzung der Produktentwicklung ist die Grundlagenforschung in enger Zusammenarbeit mit Universitäten und Forschungseinrichtungen. In den letzten Jahren wurde unter anderem das Verhalten des Gleisschotters näher erforscht. Die Qualität des Schotterbetts ist ein entscheidender Faktor für die Stabilität des Eisenbahnoberbaus. Besonders die Korngrößenverteilung beeinflusst maßgeblich die Tragfähigkeit, Entwässerung und Wirksamkeit von Instandhaltungsmaßnahmen [3, 4]. Im Rahmen eines interdisziplinären Forschungsprojekts (TU Graz, ÖBB, SBB und Plasser & Theurer) wurde ein neuer Ansatz entwickelt, den bestehenden Schotterzustand zu bewerten und neue Einblicke zu erlangen. Dieser ermöglicht eine kontinuierliche, objektive und automatisierte Bewertung des Schotterzustands direkt während des Stopfprozesses. Im ersten Schritt wurde durch den Einsatz umfangreicher Sensorik an einer Universalstopfmaschine (Unimat 09-4x4/4S E^3) die Interaktion zwischen Stopfpickel und Schotterbett detailliert analysiert [5, 6]. Dabei wurden seit dem Jahr 2021 über 100 000 Stopfzyklen in den Netzen der ÖBB und SBB messtechnisch erfasst. Aus den gewonnenen Daten wurde ein neuer Kennwert abgeleitet – der sogenannte Schotterkoeffizient $\beta_{Ballast}$. Dieser beschreibt den Widerstand des Schotters beim Eindringen der Stopfpickel und korreliert stark mit dem Verschmutzungsgrad des Schotterbetts [9]. Zur Validierung der Methodik wurden an ausgewählten Stellen entlang der gestopften Abschnitte Schotterproben entnommen und im Labor analysiert. Die Ergebnisse zeigten eine signifikante Korrelation zwischen dem ermittelten Schotterkoeffizienten und der tatsächlichen Korngrößenverteilung der Proben. Damit konnte der Koeffizient $\beta_{Ballast}$ als verlässlicher Indikator für den Schotterzustand bestätigt werden [5, 6]. In einem nächsten Schritt wurde das forschungsorientierte Sensorpaket auf ein praxistaugliches System reduziert. In

© DVV Media Group GmbH

umfangreichen Langzeittests konnten Funktionsfähigkeit und Belastbarkeit des reduzierten Systems erfolgreich nachgewiesen werden. Parallel dazu wurden Algorithmen zur Echtzeitauswertung des Schotterzustands entwickelt, um den Koeffizienten $\beta_{Ballast}$ bereits während des Eindringvorgangs der Stopfpickel zu berechnen. Dies eröffnet neue Möglichkeiten für eine zustandsbasierte Anpassung der Arbeitsparameter. Ein weiterer bedeutender Beitrag zur Grundlagenforschung stammt aus den USA, wo in Kooperation mit der Pennsylvania State University und Plasser American umfangreiche Feldversuche durchgeführt wurden. Im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsprojekts wurde der Einfluss verschiedener Stopfparameter – insbesondere der Beistellzeit – auf die Verdichtung und Stabilität des Schotterbetts untersucht. Dabei wurden „Smart Rocks" (künstliche Schotterkörner mit integrierten Sensoren) direkt im Schotterbett eingebracht, um Bewegungen, Spannungen sowie Rotationen einzelner Schotterpartikel während und nach dem Stopfvorgang aufzuzeichnen. Ergänzend dazu wurde eine Stopfmaschine mit einem Sensorsystem ausgestattet, um die Interaktion zwischen Stopfaggregat und Schotter aus Maschinensicht zu erfassen. Die Kombination beider Messsysteme ermöglichte eine umfassende Analyse der Verdichtungsprozesse und lieferte wertvolle Erkenntnisse zur weiteren Optimierung der Stopfparameter [7, 8].

Produktentwicklung

Auf die Konzeptphase folgt die eigentliche Produktentwicklung. In der Vorserienphase werden erste Maschinen mit den neuen Technologien ausgestattet und unter realen Bedingungen getestet. Diese Feldtests finden sowohl mit ausgewählten Early-Adopter-Kunden als auch im Rahmen internationaler Erprobung statt.

Early-Adopter-Phase

Durch die vorgelagerten Tests der Prototypen und Feldtests konnte dem Kunden mit Plasser TampingControl bereits ein sehr ausgereiftes Produkt bereitgestellt werden, das in der Early-Adopter-Phase nicht mehr im experimentellen, sondern im praxistauglichen Zustand evaluiert wurde. Bereits nach kurzer Einsatzzeit zeigte sich, dass die Rückmeldungen des Kunden in hohem Maße mit den Ergebnissen interner Tests übereinstimmten. Zusätzlich konnten in Gesprächen mit den Maschinenbedienern einige Möglichkeiten zur Optimierung der Funktion erarbeitet werden. Auf Basis dieser Gespräche und Erfahrungsberichte wurden im nächsten Schritt gezielte Verbesserungen am System vorgenommen. Besonders das Verhalten bei Neubaustrecken, wo das Schotterbett oft wenig vorverdichtet ist, war eine Herausforderung in der ersten Version. Durch algorithmische Anpassungen und verbesserte Auswertung konnte die Adaption des Beistelldrucks unter wechselnden Bedingungen weiter optimiert werden. Besonders positiv hervorgehoben wurden die Einfachheit der Bedienung und die individuelle Anpassung des Beistelldrucks jedes Stopfaggregatsegments, wodurch sich die Stopfqualität spürbar verbesserte. Der Kunde bestätigte darüber hinaus eine signifikante Verbesserung der Gleislage nach den Stopfarbeiten bei Verwendung von Plasser TampingControl. Die automatische Anpassung der Stopfparameter an den lokalen Schotterzustand trug dazu bei, die Gefahr von Schäden an der Infrastruktur zu reduzieren, etwa durch Kontakt der Schwellen mit den Stopfpickeln beim Stopfen. Richard Verweij, ein erfahrener Maschinenbediener, formulierte seine Eindrücke wie folgt: *„Früher musste ich den Beistelldruck manuell an die vorherrschenden Bedingungen anpassen, besonders wenn die Schotterqualität stark schwankt oder stark unterschiedlich viel Schotter im Zwischenfach ist. Jetzt macht das die Maschine automatisch – das funktioniert erstaunlich gut. Ich habe das Gefühl, dass wir dadurch weniger Schäden an den Schwellen riskieren und die Gleislage stabiler bleibt."*

Insgesamt zeigte sich der Kunde, das Bahnbauunternehmen Vanormelingen-Stas, mit der Stopfmaschine (Abb. 3) und ihrer neuen Funktionalität sehr zufrieden. Die Bedienung wurde als deutlich verbessert wahrgenommen, die Arbeitsqualität als konsistenter und die Sicherheit im Betrieb als erhöht. Besonders hervorgehoben wurde auch die enge und konstruktive Zusammenarbeit mit Plasser&Theurer während der gesamten Early-Adopter-Phase. Die Möglichkeit, direktes Feedback zu geben und aktiv an der Weiterentwicklung des Systems mitzuwirken, wurde als äußerst positiv bewertet. Die Erfahrungen aus der Early-Adopter-Phase bestätigen, dass die Kombination aus praxisnaher Grundlagenforschung, gezielter Produktentwicklung und enger Zusammenarbeit mit dem Anwender ein wirkungsvoller Weg ist, um innovative Technologien erfolgreich in den operativen Betrieb zu überführen. Die Rückmeldungen aus dem Feld flossen direkt in die Weiterentwicklung des Systems ein und bilden die Grundlage für die nächste Generation von Stopfmaschinen mit integrierter Schotterzustandserfassung und automatisierter Parametersteuerung.

Internationale Erprobung

Neben den umfangreichen Tests in Österreich wurde das System zur automatisierten Optimierung des Stopfprozesses auch international in enger Zusammenarbeit mit Kunden und Infrastrukturbetreibern erprobt. Ziel war es, die Praxistauglichkeit unter unterschiedlichsten Rahmenbedingungen zu validieren und sicherzustellen, dass das System auch außerhalb des heimischen Markts zuverlässig funktioniert. Die internationale Erprobung umfasste unter anderem Einsätze in mehreren europäischen Ländern sowie in Asien und den USA. Dabei wurden so-

Abb. 3: Universalstopfmaschine 09-8x4/4S Dynamic der Firma Vanormelingen-Stas ausgestattet mit Plasser TampingControl

© DVV Media Group GmbH

wohl unterschiedliche klimatische Bedingungen als auch variierende Oberbauformen und betriebliche Anforderungen berücksichtigt. Diese Vielfalt war essenziell, um die Robustheit und Anpassungsfähigkeit des Systems unter realen Bedingungen zu testen. Ein besonderer Beitrag zur Weiterentwicklung des Produkts kam auch aus dem Forschungsprojekt in den USA. Die dort gewonnenen Erkenntnisse flossen direkt in die Optimierung der Algorithmen und der Parametrierung des Systems ein.

Gerade im Eisenbahnwesen ist die internationale Erprobung von großer Bedeutung, da es weltweit eine Vielzahl lokaler Unterschiede gibt – sei es in Bezug auf Schotterqualitäten, klimatische Einflüsse oder betriebliche Standards. Nur durch eine breit angelegte, internationale Testphase kann sichergestellt werden, dass ein System wie dieses den hohen Anforderungen verschiedenster Märkte gerecht wird. Das Ergebnis dieser Zusammenarbeit ist ein Produkt, das heute bereits in vielen Ländern der Welt erfolgreich im Einsatz ist. Die Rückmeldungen aus den verschiedenen Regionen bestätigen die hohe Flexibilität und Anpassungsfähigkeit des Systems – sowohl im Neubau als auch in der Instandhaltung bestehender Strecken. Plasser&Theurer hat mit seinem weltweiten Partnernetzwerk die idealen Voraussetzungen, um neue Produkte weltweit zu testen und an die Bedürfnisse der Kunden anzupassen.

Von der Vorserie zum fertigen Produkt

In der Entwicklungsphase nach der internationalen Erprobung stand die interne strukturierte Umsetzung innerhalb der bestehenden Systemlandschaft im Vordergrund – mit besonderem Fokus auf die Gestaltung eines wartungsfreundlichen Gesamtsystems. Ein zentrales Element war die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen mechanischer Konstruktion, Elektrotechnik, Steuerungstechnik, Fluidtechnik und Software-Entwicklung. Durch die eng verzahnte Arbeit wurden z. B. Einbauorte, Befestigungskonzepte, Schnittstellen und Signalführung eindeutig definiert. Auch die Integration der Sensorik in bereits bestehende Bauraumkonzepte oder die Definition elektrischer Anschlusspunkte unter Berücksichtigung von Anforderungen an elektromagnetische Verträglichkeit (EMV-Anforderungen) und Wartungszugänglichkeit wurde in gemeinsamer Abstimmung durchgeführt.

Gleichzeitig wurde ein umfassender Dokumentationsstand aufgebaut, der sowohl die interne Konstruktion als auch den späteren Einsatz beim Kunden berücksichtigt. Dazu gehörten vollständige Stücklisten, Installations- und Anschlusspläne, Montage- und Kalibrieranleitungen, Risikobeurteilungen sowie sämtliche sicherheitsrelevanten Unterlagen. Für die externe Kommunikation wurden zusätzlich technische Datenblätter, Schulungsunterlagen und Bedienungsanleitungen erstellt. Auch vertriebs- und zulassungsrelevante Dokumente wurden im Zuge des Projekts abgestimmt und freigegeben.

Wartung und Weiterentwicklung

Auch nach der Markteinführung setzt sich der Produktlebenszyklus fort. Die Phase der Wartung und Instandhaltung stellt sicher, dass die Maschinen zuverlässig funktionieren und bei Bedarf angepasst oder aktualisiert werden können. Gleichzeitig wird das System kontinuierlich weiterentwickelt.

Kundenfeedback spielt dabei eine zentrale Rolle. Rückmeldungen aus dem Betrieb – etwa zur Bedienbarkeit, zur Performance unter speziellen Bedingungen oder zu neuen Anforderungen – werden gesammelt und analysiert. Diese Informationen fließen in zukünftige Optimierungen und Erweiterungen ein und bilden die Grundlage für neue Produktgenerationen oder Software-Updates. ■

QUELLEN

[1] ÖBB-Infrastruktur AG: Zahlen Daten Fakten 2023/24, 2024. Zugriff am: 11. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://infrastruktur.oebb.at/dam/jcr:03a3177a-b9a6-41aa-91cb-43d8e289b11f/zahlen-daten-fakten-folder-2024-oebb.pdf

[2] Brennsteiner, A.; Pisslinger, M.: Plasser SmartTamping – digitale Lösungen zur Bewältigung des Fachkräftemangels, ETR 12/2023, S. 42–45

[3] Landgraf, M.: Zustandsbeschreibung des Fahrwegs der Eisenbahn – von der Messdatenanalyse zum Anlagenmanagement, 2016, doi: 10.3217/pf2bz-pkj41

[4] Barbir, O.: Development of Condition-Based Tamping Process in Railway Eengineering – Operating Phases and Motion Behavior, Ballast Condition Determination, Ballast fluidization, TU Wien, 2022

[5] Offenbacher, S.: Effective Railway Track Tamping: Evaluating Short-Term and Long-Term Impacts on Track Geometry and Monitoring Ballast Condition, Dissertation, Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, TU Graz, Graz, 2025

[6] Reschke, R.; Offenbacher, S.; Hellwagner, K.; Marschnig, S.; Koczwara, C.: Stopfmaschinenbasierte Schotterzustandserfassung, ZEVrail, Jg. 148, 01/02, S. 4–11, 2024

[7] Antony, B.; Barbir, O.; Hansmann, F.; Koczwara, C.: Smart Rock trifft Smart Tamper: Teil 1: Stopfen aus Sicht des Schotters, EI 11/2023

[8] Antony, B.; Barbir, O.; Hansmann, F.; Koczwara, C.: Smart Rock trifft Smart Tamper: Teil 2: Stopfen aus Sicht des Aggregats, EI 12/2023

[9] Pisslinger, M.: Standardisiertes Requirements Engineering im Bahnbaumaschinen-Sektor: Entwicklung eines praxisorientierten Leitfadens, FH Wels, Wels, 2025

Dipl.-Ing. Dr. mont. Christian Koczwara
R&D Scientist
Abteilung Research and Simulation
Plasser & Theurer, AT-Linz
christian.koczwara@plassertheurer.com

Dipl.-Ing. Mario Pisslinger
Portfoliomanager
Digitale Produkte und Messsysteme
Plasser & Theurer, AT-Linz
mario.pisslinger@plassertheurer.com

Dipl.-Ing. Philip Smrzka
Systemingenieur Digitale Produkte
Plasser & Theurer, AT-Linz
philip.smrzka@plassertheurer.com

© DVV Media Group GmbH