

Energieeffizient und emissionsarm stopfen

Anhand realer, langfristig aufgezeichneter Betriebsdaten kann das Einsparungspotenzial der E³-Technologie bezogen auf Energiebedarf und Emissionen aufgezeigt werden.



Abb. 1: Elektrisch angetriebene Stopfmaschine mit integrierten Zusatzfunktionen wie Schotterplanierung und dynamischer Gleisstabilisation

THOMAS RADLER | LUKAS HOFMANN |
CHRISTIAN KOCZWARA | MARKUS BUCHNER

Die Anforderungen an die Bahnbaubranche sind eindeutig: Nachhaltigkeit und Energieeffizienz, und das nachweisbar. Viele Länder und Betreiber von Bahninfrastruktur haben sich das Ziel gesetzt, bis 2040 klimaneutral zu werden [1–3]. Damit verbunden ist oft eine deutlich früher in Kraft tretende Verpflichtung zur automatisierten maschinenspezifischen Nachweisführung von CO₂-Emissionen (z. B. in Schweden ab 2024 [4]). Neue Antriebskonzepte haben auch im Bahnbau Einzug gefunden, doch eine Frage bleibt: Welchen Beitrag leisten elektrifizierte Bahnbaumaschinen wirklich? Diese Frage wird im folgenden Beitrag anhand statistischer Analysen beantwortet.

Elektrifizierung von Bahnbaumaschinen

Seit einem Jahrzehnt ist Plasser & Theurer (P&T) im Themenkreis neuer Antriebskonzepte Vorreiter. Die Lösung: Elektrifizierung. Schon 2015 präsentierte das Unternehmen die erste elektrisch betriebene Stopfmaschine. Mit der Einführung der E³-Stopfmaschine

war es erstmals möglich, die für Arbeitsbetrieb und Überstellfahrten notwendige Energie klimaschonend aus der Oberleitung zu beziehen. Diese Technologie wurde seitdem sukzessive weiter optimiert, bis hin zu einem System, in dem jegliche Drehbewegung (Fahrtrieb, Antrieb Arbeitsaggregate) elektrisch durchgeführt wird. Abb. 1 zeigt eine moderne elektrisch angetriebene Universalstopfmaschine, die ihre Energie aus der Oberleitung bezieht. Diese Technologie wird bereits in mehreren Ländern eingesetzt. Als nächste logische Weiterentwicklung wurden unterschiedliche Gleisbaumaschinen mit Batterie entwickelt. Die Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) setzen bereits auf diese Technologie und haben 56 emissionsfreie Hochleistungs-Instandhaltungsfahrzeuge mit Hybrid-Antrieb aus Oberleitung und Batterie bestellt. Zusätzlich verfügen diese Fahrzeuge über ein dieselelektrisches Powerpack, das bei fehlender Oberleitung ausreichend Energie bereitstellen kann [5, 6].

Antriebskonzepte

In diesem Beitrag wird der Energieverbrauch (und Treibstoffverbrauch) von zwei kontinuierlich arbeitenden Universalstopfmaschinen (Unimat 09-8x4/4S Dynamic und Uni-

mat 09-8x4/4S Dynamic E³) verglichen (Abb. 2). Beide sind mit baugleichen Stopfaggregaten (Zwei-Schwellen-Stopfaggregat) ausgestattet und verfügen über zwei Dynamische Gleisstabilisatoren (DGS). Der Unterschied liegt im Wesentlichen im Antriebskonzept. Bei der Stopfmaschine Unimat 09-8x4/4S Dynamic (Abb. 2a) handelt es sich um ein Pumpenverteilergetriebe mit konventionellem Dieselmotor. Der Fahrtrieb in Arbeitsfahrt ist hydrostatisch ausgeführt. Alle Vibrationsbewegungen werden über hydraulische Exzenterantriebe realisiert.

Im Gegensatz dazu ist der Unimat 09-8x4/4S Dynamic E³ (Abb. 2b) mit einem modernen Hybrid-Antrieb (elektrisch und dieselelektrisch) ausgestattet. Dieses System ist schematisch in Abb. 3 dargestellt. In dieser Konfiguration kann die Stopfmaschine sowohl dieselelektrisch als auch vollelektrisch betrieben werden. Die notwendige Energie kann entweder über einen Dieselmotor bereitgestellt oder aus der Oberleitung bezogen werden. Neben dem Fahrtrieb werden dabei auch alle rotierenden Arbeitsaggregate elektrisch angetrieben, wodurch sich generell eine höhere Effizienz erzielen lässt. Ein weiterer Vorteil dieses Konzepts ist, dass die Menge an benötigtem Hydrauliköl wesentlich (im Regelfall um ca. zwei Drittel) reduziert wer-

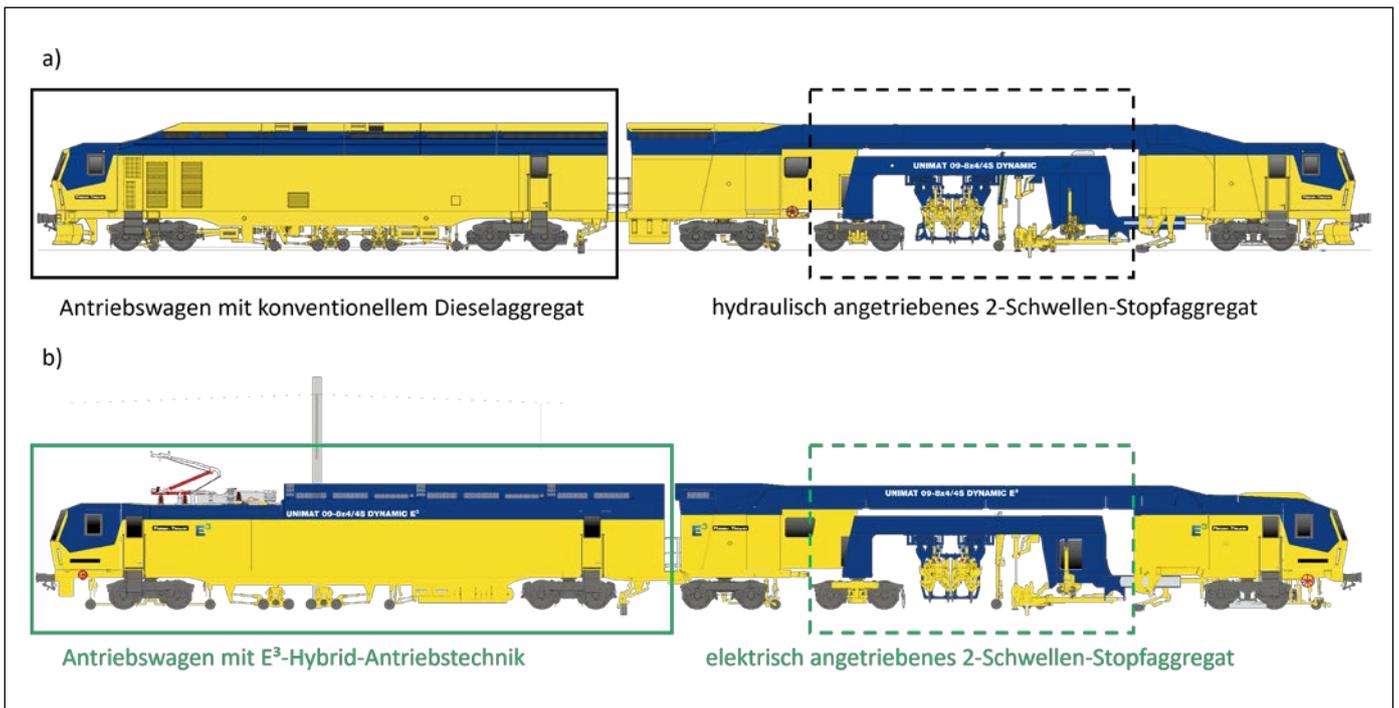


Abb. 2: Schematische Darstellung der hier analysierten Stopfmaschinentypen (a): dieselbetriebene kontinuierlich arbeitende Universalstopfmaschine, Unimat 09-8x4/4S Dynamic, (b): elektrisch angetriebene kontinuierlich arbeitende Universalstopfmaschine, Unimat 09-8x4/4S Dynamic E³

den kann. Bei gleichbleibendem Wechselintervall lässt sich dadurch eine deutliche Kostenersparnis erreichen.

Durch Verwendung des hybriden Antriebskonzepts kann die Betriebsstrategie für jeden Einsatzzweck optimal angepasst werden. Ist keine Oberleitung vorhanden oder ist diese abgeschaltet (z. B. wegen zeitgleicher Arbeiten an der Oberleitung), wird die für den Betrieb der Maschine benötigte Energie durch den Dieselmotor bereitgestellt. Unabhängigkeit und Flexibilität bleiben erhalten, und durch die effizienten elektrischen Antriebe profitiert der Maschinenbetreiber im Vergleich zu einer konventionell angetriebenen Maschine von reduziertem Treibstoffverbrauch (im Kapitel Analyseergebnisse ist dies detailliert dargestellt). Damit einher gehen niedrigere CO₂-Emissionen. Steht die Oberleitung zur Ener-

gieversorgung zur Verfügung, ermöglichen die elektrischen Antriebe einen besonders effizienten Betrieb. Zusammen mit dem vergleichsweise günstigen Energiepreis für Bahnstrom trägt der hohe Wirkungsgrad zu noch niedrigeren Betriebskosten bei, während die Maschine, abhängig von der Stromerzeugung, nahezu CO₂-neutral betrieben werden kann.

Reduzierte Lärmemissionen

Lärmemissionen belasten die Umwelt und können auch die Gesundheit beeinträchtigen. Aus diesem Grund bezeichnet der Europäische Rat den Umgebungslärm als eines der größten Umweltprobleme Europas [7]. Auch die Bahnindustrie muss hier ihren Beitrag zur Lärmreduktion leisten. Dies beschränkt sich nicht nur auf den Verkehrsbetrieb, sondern betrifft auch Maßnahmen bei Bau und Instandhaltung.

Hier können elektrisch angetriebene Bahnbaumaschinen einen weiteren wesentlichen Vorteil ausspielen: die deutlich reduzierte Lärmemission. Es konnte bereits in mehreren Untersuchungen gezeigt werden, dass elektrisch betriebene Stopfmaschinen im Betrieb signifikant leiser sind als ihr dieselbetriebenes Pendant [8, 9]. Im elektrischen Arbeitsmodus konnte durch den Entfall der Hauptlärmquelle Dieselmotor der Lärmpegel um 19 dB(A) gesenkt werden. Diese Lärmreduktion wurde im Abstand von 7,5 m gemessen [9]. Im direkten Umfeld (1 m) konnte sogar eine Reduktion um mehr als 20 dB(A) gezeigt werden [8, 10].

Datenerfassung

Den vorliegenden Auswertungen liegen Daten zugrunde, die über die Plasser Data-matic, die Digitalisierungslösung von P&T,

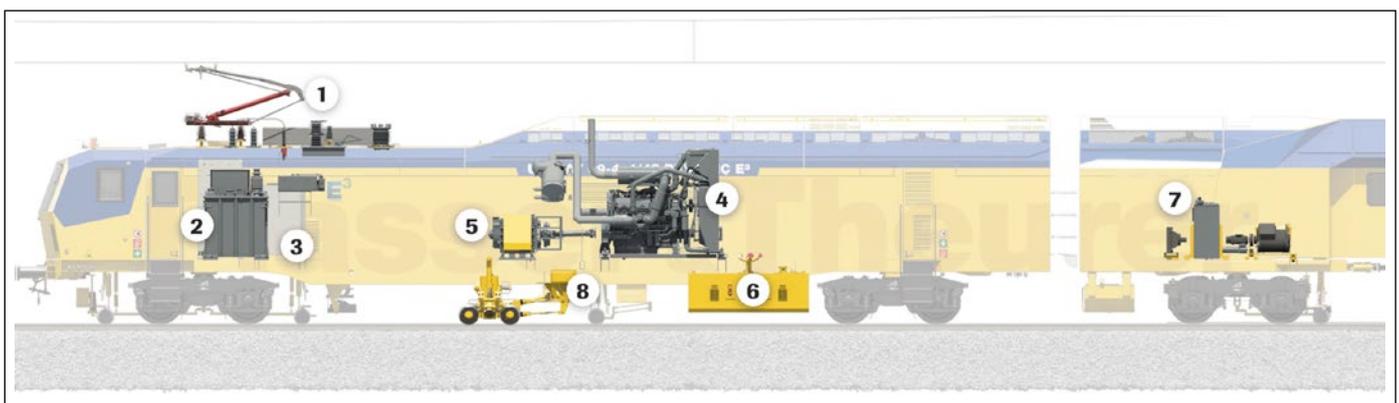


Abb. 3: Schematische Darstellung der E³-Antriebstechnik. (1) Pantograph, (2) Transformator, (3) Wechselrichter, (4) Dieselmotor, (5) Generator, (6) Treibstofftank, (7) Hydraulik-Powerpack, (8) Dynamischer Gleisstabilisator

	Dieselhydraulisch	Dieselelektrisch	Einsparungen
Bewertete Stopfkilometer (km)	175	36	
Dieserverbrauch pro km (l)	113	81	
CO ₂ -Ausstoß pro km (kg)	298	214	28 %
Energiekosten pro km (EUR)	169	122	

Tab. 1: Vergleich konventionell dieselhydraulisch/ dieselelektrisch (Stopfbetrieb gemäß den beschriebenen Bedingungen)

aufgezeichnet wurden. Auf der Maschine ist dabei als IIoT Edge Device¹ der bahnzertifizierte MachineDataConnector (MDC) verbaut, der über das Maschinennetzwerk vollständig in das Maschinensteuerungssystem integriert ist, wobei völlige Rückwirkungsfreiheit sichergestellt ist.

Mittels mobiler Breitbandverbindung werden die Daten in Echtzeit durch Verschlüsselung gesichert übertragen und über die webbasierte Plattform MachineConditionObserver (MCO) zur Verfügung gestellt.

Neben Flottenmanagement und diversen weiteren optionalen Services können auch maßgeschneiderte Reports gewählt werden, die automatisiert erstellt werden,

¹ IIoT: Industrial Internet of Things; Edge Device: Schnittstelle zwischen lokalem Netzwerk und Cloud

z.B. pro Woche oder Schicht. Aufgrund des anpassbaren Formats sind neben tabellarischen Auflistungen auch interaktive Plots und individuelle Kartenansichten möglich.



Unter folgendem Link (QR-Code) ist exemplarisch ein Report zu Verbrauchs- und Emissionsdaten zur Verfügung gestellt:

www.plassertheurer.com/performance-and-emissions-report

Analysemethodik

Um einen Vergleich beider Technologien – E³ und dieselbetrieben – zu ermöglichen, wurden zwei Maschinen ausgewählt, die sich hinsichtlich ihrer Konfiguration dafür eignen. Darüber hinaus wurde darauf geachtet,

dass sie geografisch in demselben Bereich operieren, um Einflüsse durch unterschiedliche Infrastruktur und Arbeitsvorgaben im Vorhinein möglichst zu minimieren.

In einem nächsten Schritt wurden Abschnitte mit vergleichbarem Betrieb der Maschinen aus den Gesamtdaten extrahiert. Konkret wurde die Untersuchung auf Streckenstopfen mit einem Stopfvorgang je Schwelle eingeschränkt, wobei der DGS anteilig etwa gleich verwendet wurde. Die Arbeitsgeschwindigkeiten bewegten sich ebenfalls in einem ähnlichen Bereich, wie noch anhand eines Beispiels gezeigt wird.

Im Folgenden wird bei der E³-Antriebstechnik in dieselelektrischen und vollelektrischen Betrieb unterschieden, um zu illustrieren, dass schon beim dieselelektrischen Betrieb erhebliche Vorteile zu erzielen sind.

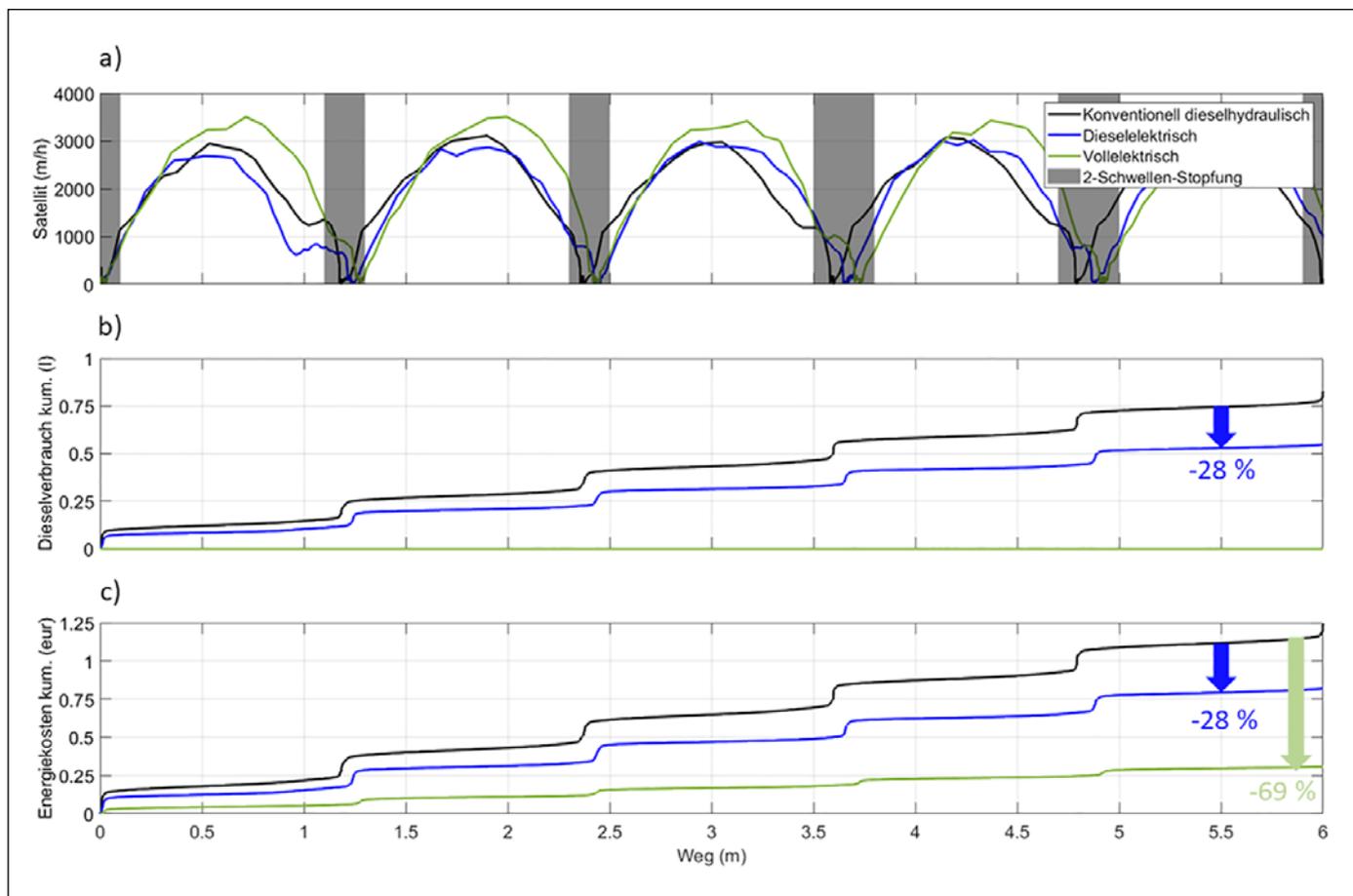


Abb. 4: Repräsentativer Ausschnitt von Satellitengeschwindigkeit (a), kumulativem Dieserverbrauch (b) und kumulativen Energiekosten (c) über eine Strecke von 6 m verschiedener Antriebskonzepte (konventionell dieselhydraulischer Antrieb: schwarz; dieselelektrisch: blau; vollelektrisch: grün)

Analyseergebnisse

Dieselelektrisch

Zunächst soll ein Vergleich zwischen konventionellem (dieselhydraulischem) Antriebskonzept und der E³-Technologie im dieselelektrischen Betrieb angestellt werden. Um statistisch aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen, wurde die Bewertung über eine hinreichend große Anzahl an Stopfkilometern durchgeführt und in Tab. 1 zusammengefasst.

Der angegebene Dieselverbrauch wird basierend auf dem Momentanverbrauch aus dem Motorsteuergerät berechnet, der über Plasser Datamatic aufgezeichnet wird. Der CO₂-Ausstoß wird daraus als Tank-to-Wheel-Wert mit einem Faktor von 2,64 kg/l (vgl. ISO 14083) berechnet [11]. Als Dieselpreis wurden 1,50 EUR angenommen.

Es zeigen sich Einsparungen in Höhe von 28 % im Dieselverbrauch, die sich direkt auf die Energiekosten umlegen lassen. Diese Einsparung ist auf die gesteigerte Effizienz der elektrischen Antriebskonzepte gegenüber den konventionellen hydraulischen Antrieben zurückzuführen. Bei anderen Maschinenkonfigurationen können die Werte entsprechend abweichen. Besonders ältere Motorgenerationen können durch eine Reduktion der Arbeitsdrehzahl noch stärker von der Elektrifizierung profitieren.

Vollelektrisch

Im vollelektrischen Betrieb wird die aus der Oberleitung bezogene Energie über die Maschinensteuerung gemessen und mittels Plasser Datamatic aufgezeichnet. Der im Stopfbetrieb (gemäß der beschriebenen Bedingungen) ermittelte Stromverbrauch beläuft sich auf 261 kWh/km. Legt man zu Vergleichszwecken einen Strompreis von 0,20 EUR/kWh zugrunde, betragen die Energiekosten im vollelektrischen Betrieb rund 52 EUR/km. Dies entspricht einer Kosteneinsparung von 69 % im Vergleich zum konventionellen dieselhydraulischen Antrieb.

Der CO₂-Ausstoß im vollelektrischen Betrieb kann als lokal emissionsfrei angegeben werden. Der CO₂-Ausstoß im Rahmen der Stromerzeugung variiert je nach Mix des Bahnstroms. In Österreich stammt dieser beispielsweise zu 100 % aus erneuerbaren Energien [12]. Zu beachten ist, dass bei dem in Tab. 1 aufgeführten CO₂-Ausstoß im Dieselbetrieb die Herstellung ebenfalls nicht einbezogen wurde (Tank-to-Wheel statt Well-to-Wheel).

Unter den getroffenen Annahmen entstehen die o. g. Einsparungen von 69 % bei den Energiekosten und zudem eine vollständige Einsparung beim CO₂-Ausstoß. Auf Basis der angegebenen Werte kann auch leicht auf andere lokale Gegebenheiten hinsichtlich Strom- und Dieselpreis umgerechnet werden.

Gegenüberstellung der Energieeinsparungen im Detail

Neben der statistischen Auswertung sollen die beschriebenen Energieeinsparungen im Detail anhand eines kurzen Streckenabschnittes gezeigt werden. In Abb. 4 sind fünf aufeinanderfolgende Einfachstopfungen (mit Zwecke-Schwellen-Stopfaggregat) für jede untersuchte Konfiguration bzw. Betriebsart über den zurückgelegten Weg von 6 m zu sehen. Die Geschwindigkeit und der Weg des Satelliten wurden mittels Drehimpulsgeber bestimmt. Deren Verläufe illustrieren, dass hinsichtlich Arbeitsgeschwindigkeit ähnlich gearbeitet wurde. Der Verlauf des Dieselverbrauchs zeigt deutlich den Effizienzvorteil des dieselelektrischen Antriebskonzepts gegenüber dem konventionellen dieselhydraulischen Antrieb. Auch hier sind Verbrauchsreduktionen von ca. 28 % erzielt worden, woraus sich auch eine Kosteneinsparung in dieser Größenordnung ergibt. Die Auswertung des vollelektrischen Antriebs hat eine noch größere Einsparung von 69 % ergeben. Klar ersichtlich ist, dass selbst in diesem kurzen Abschnitt die Ergebnisse der statistischen Analyse bestätigt werden konnten.

Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde das Einsparungspotenzial der E³-Technologie gegenüber dem konventionellen Antriebskonzept hinsichtlich Energieverbrauch bzw. Treibstoffverbrauch sowie Lärmemissionen und CO₂-Emissionen aufgezeigt. Im Vergleich zum konventionellen Konzept konnten für die untersuchte Maschinenkonfiguration Kosteneinsparungen von 28 % (dieselelektrisch) bzw. 69 % (vollelektrisch) im Stopfbetrieb nachgewiesen werden. Dazu wurden Betriebsdaten aus der Steuerung herangezogen, die mittels der Plasser Datamatic aufgezeichnet wurden.

In den Auswertungen wurde nur der Stopfbetrieb hinsichtlich Energieeffizienz beleuchtet. Einsparungspotenzial ergibt sich jedoch auch in den anderen Betriebszuständen. Beispielsweise werden bei konventionellen Stopfmaschinen bis zu 30 % der Motorbetriebszeit im Leerlauf verbracht, welche bei vollelektrischem Betrieb effizienter abgedeckt werden können. Bei anderen Maschinentypen wie Oberbaufahrzeugen liegt dieser Anteil nochmal deutlich höher. Neben der Ersparnis von Energiekosten entstehen auch Vorteile durch geringere Wartungs- und Instandhaltungskosten. ■

QUELLEN

- [1] Deutsche Bahn AG: Investor Relations und Sustainable Finance 2023 Integrierter Bericht 2022 (Berlin: Deutsche Bahn AG, Investor Relations und Sustainable Finance)
- [2] South Western Railway Journey to a net zero future: Our roadmap to 2040 (South Western Railway)
- [3] DB AG: Die Deutsche Bahn wird 2040 klimaneutral https://www.deutschebahn.com/de/presse/suche_Medienpakete/medienpaket_klimaschutzziel-6854260? (accessed 9 Nov 2023)
- [4] Löffberg, A. (2023): Krav på digital miljörapportering (Lilleström), unveröffentlicht
- [5] ORF 2023 ÖBB-Großauftrag für Plasser & Theurer <https://ooe.orf.at/stories/3209970/> (accessed 8 Nov 2023)
- [6] Eisenbahn-International.com 2022 Übergabe Robel Hybrid-Fräsmaschine an Plasser American <https://eisenbahn-international.com/news/56245-%C3%BCbergabe-robelt-hybrid-fr%C3%A4smaschine-an-plasser-american> (accessed 8 Nov 2023)
- [7] Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union: Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates
- [8] Auer, F.; Pumberger, A.; Jodlbauer, G.: Lärmreduktion Stopfen – schalltechnische Vergleichsmessung, ETR (72) 10/2019, S. 16–19
- [9] Achs, G.; Floss, S.: Schalltechnische Untersuchung bei unterschiedlichen Antriebsarten von Stopfmaschinen, ETR (72) 10/2023, S. 50–54
- [10] Antony, B.; Auer, F.; Jodlbauer, G.; Pumberger, A.: Maschinenlärm lässt sich verringern, ZEVrail (143) 11/2019, S. 446–451
- [11] ISO 14083:2023-03: Treibhausgase - Quantifizierung und Berichterstattung über Treibhausgasemissionen von Transportvorgängen
- [12] ÖBB-Infrastruktur AG: 100 Prozent grüner Bahnstrom <https://infrastruktur.oebb.at/de/informationen-und-mehr/bahn-erleben/zuweg-erklart/gruener-bahnstrom> (accessed 7 Nov 2023)



Dipl.-Ing. Thomas Radler

Data Science and Analytics
Abt. Digital Services
Plasser & Theurer, AT-Linz
thomas.radler@plassertheurer.com



Dipl.-Ing. Lukas Hofmann

Team Lead
Data Science and Analytics
Abt. Digital Services
Plasser & Theurer, AT-Linz
lukas.hofmann@plassertheurer.com



Dipl.-Ing. Dr. mont. Christian Koczvara

R&D Scientist
Abt. Research und Simulation
Plasser & Theurer, AT-Linz
christian.koczvara@plassertheurer.com



Dipl.-Ing. Markus Jürgen Buchner

Senior Produktmanager
Abt. Produktmanagement
Plasser & Theurer, AT-Linz
markus.buchner@plassertheurer.com