



Quelle: <https://www.zevrail.de/artikel/moderne-stopftechnologien-als-schluessel-zur-laermreduktion>

2026 (Jahrgang 150) / Ausgabe 01/02 / Sprache: Deutsch

Moderne Stopftechnologien als Schlüssel zur Lärmreduktion

Autoren: Dipl.-Ing. Dr. mont. Christian Koczwarra, Samir Omerović, Anton Pfeiffer, Hermann Niederer, Fabian Aulinger

Zusammenfassung

Die Entwicklung eines neuartigen Vibrationsantriebs mit regulierbarer Vibrationswelle erfolgt nach einem klar strukturierten, phasenorientierten Entwicklungsmodell. Ausgehend von der systematischen Erfassung und Analyse von Kunden- und Marktanforderungen werden in aufeinanderfolgenden Schritten die konstruktive Auslegung, numerische Simulationen und Prüfstandversuche durchgeführt. Es folgen Feldtests unter realen Einsatzbedingungen. Zentrales Ziel ist die Nutzung der regulierbaren Vibrationswelle als maßgebliches Werkzeug zur Reduktion von Geräuschemissionen, ohne die funktionale Leistungsfähigkeit des Stopfaggregats zu beeinträchtigen. Ergänzend wird auf hohe Energieeffizienz, Wartungsfreundlichkeit und reibungslose Integration in bestehende Systeme geachtet. Derzeit befindet sich das System in der Early-Adopter-Phase, in der unter praxisnahen Bedingungen erhobene Daten gezielt zur iterativen Optimierung eingesetzt werden, um die Serienreife zu erreichen.

1 Einleitung

Die Anforderungen an den modernen Bahnbau sind in den letzten Jahren deutlich gestiegen. Neben Effizienz und Wirtschaftlichkeit rücken zunehmend ökologische und sozial/gesundheitliche Aspekte in den Fokus – insbesondere die Reduktion von Emissionen und Lärm. Der Druck auf die Branche wächst: Nationale und internationale Klimaziele fordern eine drastische Senkung der CO₂-Emissionen, während gleichzeitig der Schutz der Bevölkerung vor Umgebungslärm eines der wichtigen Umweltziele der Europäischen Union ist. Der Europäische Rat bezeichnet Umgebungslärm sogar als eines der größten Umweltprobleme Europas. Diese Entwicklung betrifft neben dem regulären Bahnbetrieb in besonderem Maße auch Bau- und Instandhaltungsmaßnahmen, vor allem in unmittelbarer Nähe zu Wohngebieten [1–3].

Ein zentrales Problem ist der Lärm, der durch konventionell betriebene Gleisbaumaschinen verursacht wird. Insbesondere der Dieselmotor gilt sowohl im Arbeitsbetrieb als auch im Stand beziehungsweise bei einer Versetzfahrt als Hauptlärmquelle. Der Einsatz von Dieselmotoren galt über Jahrzehnte als alternativlos, da Gleisbaumaschinen auch auf nicht elektrifizierten oder temporär gesperrten Streckenabschnitten arbeiten müssen. Mangels stationärer Energieversorgung war daher eine autonome Energiequelle für zuverlässigen Fahrtrieb sowie die energieintensiven Arbeitsaggregate notwendig. Mit technologischem Fortschritt und zunehmender Elektrifizierung des Bahnnetzes hat sich dies schrittweise relativiert. Neue Energieversorgungskonzepte und leistungsfähige Akkusysteme ermöglichen inzwischen auch alternative Antriebslösungen. Entsprechend wurden seit 2015 verstärkt Stopfmaschinen mit elektrischen Antriebskonzepten entwickelt und in Betrieb genommen [4]. Neben signifikanter Reduktion der CO₂-Emissionen [5] – insbesondere bei Nutzung von grünem Bahnstrom – bieten sie auch enormes Potenzial zur Lärminderung. Im vollelektrischen Betrieb entfällt der Dieselmotor als dominante Schallquelle vollständig. Messungen belegen eine erhebliche Reduktion des maximalen Schallpegels [6]. Darüber hinaus zeigen Untersuchungen, dass auch eine niedrigere Vibrationsfrequenz des Stopfaggregats sowie die Umrüstung auf elektrische Vibrationsantriebe zur Lärmreduktion beitragen können [7]. Allerdings ist der Effekt dieser Maßnahmen im Vergleich zur Umstellung des Antriebskonzepts deutlich geringer. Eine Studie ergab, dass bei konventionell angetriebenen Stopfmaschinen ein Abschalten der Stopfaggregatvibration keine nennenswerte Reduktion der Schallemission bewirkt [8]. Modernste Stopfmaschinen sind sowohl mit einem elektrischen Fahrtrieb als auch mit elektrisch angetriebenen Arbeitsaggregaten ausgestattet (Bild 1). Diese Ausführung verursacht keine lokalen CO₂-Emissionen [4] und zeichnet sich durch den derzeit leisesten Arbeitsbetrieb aller Technologien aus. Bei elektrisch angetriebenen Gleisbaumaschinen gewinnt die Lärmreduktion der Arbeitsaggregate zunehmend an Bedeutung, da der Dieselmotor als primäre Lärmquelle konventioneller Maschinen im vollelektrischen Betrieb entfällt. Dadurch rücken sekundäre Schallquellen wie das Stopfaggregat in den akustischen Vordergrund. Während bei dieselhydraulischen Maschinen der Motorlärm die Geräusche der Arbeitsaggregate überdeckt, sind sie bei elektrischen Maschinen für das Umfeld wesentlich wahrnehmbarer. Eine gezielte Optimierung der Vibrationsantriebe ist daher entscheidend, um das volle Potenzial der Lärminderung im elektrischen Betrieb auszuschöpfen.



Bild 1: Elektrisch angetriebenes Stopfaggregat einer modernen Universalstopfmaschine

1.1 Akustikoptimierte Stopftechnologie: Aktuelle Innovationen und betriebliche Anforderungen

Ein bewährter Ansatz zur Lärminderung ist die Reduktion der Vibrationsfrequenz des Stopfaggregats. Diese Maßnahme ist bei dieselhydraulisch angetriebenen Stopfmaschinen wirkungsvoll [5], stößt jedoch hinsichtlich Effektivität bei elektrisch angetriebenen Maschinen an ihre Grenzen. Dies liegt nicht an der generellen Wirksamkeit, sondern viel mehr am deutlich reduzierten Grundgeräusch, wodurch der isolierte Effekt einer Frequenzabsenkung an Effektivität verliert. Neue Entwicklungen fokussieren sich daher auf eine adaptiv geregelte Vibrationsamplitude, bei der die Amplitude dynamisch an den jeweiligen Arbeitszustand angepasst wird. Dies ermöglicht nicht nur eine signifikante Reduktion der Lärmemission vollelektrifizierter Stopfmaschinen bei gleichbleibend hoher Arbeitsqualität, sondern hat auch zusätzliche Vorteile: Insbesondere der Wechsel zwischen einer definierten Arbeitsamplitude und dem vollständig vibrationsfreien Zustand kann wesentlich schneller und energieeffizienter realisiert werden als herkömmliche Verfahren zur Frequenzanpassung über das Heben und Senken der Motordrehzahl. Das zuverlässige, energieeffiziente Exzenterwellen-Antriebskonzept des Stopfaggregats wird bewusst beibehalten, da es sich über Jahrzehnte als technisch überlegen erwiesen hat: Es gewährleistet eine stabile Vibrationsamplitude – unabhängig vom Verschmutzungsgrad des Schotters –, arbeitet energieeffizient und liefert reproduzierbar hohe Verdichtungsqualität. Zusätzlich rückt der Bedienkomfort immer stärker in den Fokus der Entwicklung. Aktuelle Maschinenkonzepte berücksichtigen umfassende ergonomische Aspekte, wie reduzierte Vibrationseinwirkungen auf das Bedienpersonal, intuitivere Steuerungssysteme und optimierte akustische Gestaltung von Fahrbedienstand und Arbeitsumfeld. Durch die Kombination aus

geräuscharmem Maschinenbetrieb und erhöhtem Automatisierungsgrad wird sowohl die Arbeitsumgebung verbessert als auch nachhaltig die Belastung des Bedienpersonals verringert.

2 Die aktuelle Stopftechnologie

Das Stopfen gehört zu den zentralen Maßnahmen der Bau- und Instandhaltungstätigkeiten im Gleisbau. Im Netz der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) werden regelmäßig umfangreiche Strecken bearbeitet: Zwischen 2019 und 2023 wurden jährlich zwischen rund 1 115 und 1 205 Kilometer Gleis gestopft. Trotz geringfügiger Schwankungen liegt das Stopfvolumen damit konstant über 1 100 Kilometer pro Jahr und unterstreicht die Bedeutung dieser Maßnahme für einen sicheren und leistungsfähigen Bahnbetrieb [6]. Ziel des Stopfvorgangs ist es die Soll-Gleislage wiederherzustellen und durch gezielte Verdichtung des Schotters unter den Schwellen die vertikale Tragfähigkeit des Oberbaus dauerhaft zu erhöhen und damit die Gleislage nachhaltig zu sichern [7]. Dies erfolgt durch das Stopfaggregat (Bild 2). Zwei gegenüberliegende Stopfpickel fördern Schotter gezielt unter die Schwelle und verdichten ihn. Während des Arbeitsprozesses werden die Stopfpickel mit einer Vibrationsfrequenz von üblicherweise 35 Hz und einer Vibrationsamplitude von 4 bis 5 mm beaufschlagt. Diese Stopfparameter haben sich in mehreren Versuchen und Simulationsstudien als äußerst effizient herausgestellt [7–9]. Der Großteil der weltweit eingesetzten Stopfaggregate arbeitet nach dem asynchronen Gleichdruck-Stopfprinzip: Die Stopfpickel dringen in das Schotterbett ein und werden mit derselben quasistatischen Beistellkraft beaufschlagt. Sinkt der Schotterwiderstand, steigt die Beistellgeschwindigkeit; nimmt der Widerstand zu, verringert sie sich entsprechend. So entsteht eine gleichmäßige Kornumlagerung bei geringen Rückstellkräften auf den Oberbau.

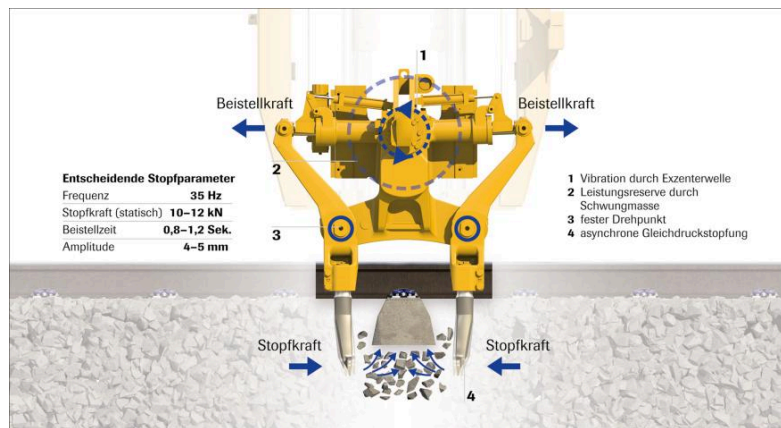


Bild 2: Schematische Darstellung eines Stopfaggregats

3 Weiterentwicklung des Vibrationsantriebs

Die Stopfaggregate von Plasser & Theurer nutzen seit Jahrzehnten einen Exzenterantrieb. Bei diesem Konzept wird eine rotatorische Bewegung in eine gleichmäßige Vibrationsamplitude umgesetzt, was mehrere technische Vorteile bietet. Der Antrieb liefert eine konstante Vibrationsamplitude, reproduzierbar hohe Verdichtungsqualität und ist aufgrund seiner rein mechanischen Arbeitsweise äußerst energieeffizient, robust und wartungsarm.

Die Einführung des elektrischen Vibrationsantriebs ist ein Meilenstein in der Entwicklung der Stopftechnologie. Während hydraulische Systeme über Jahrzehnte zuverlässige Dienste leisteten, eröffnet die Elektrifizierung neue Möglichkeiten hinsichtlich Energieeffizienz, Lärminderung und noch präziserer Steuerbarkeit – ohne die bewährten funktionalen Exzenterprinzipien grundsätzlich zu verändern. Die Elektrifizierung des Stopfaggregats bedeutet nicht nur einen Fortschritt im Hinblick auf die Umweltbilanz der Maschine, sondern verbessert auch den Bedienkomfort maßgeblich. Durch Reduktion der hydraulischen Komponenten minimieren sich Druckverluste, Leckagepotenziale und Wartungsaufwände. Elektrische Antriebe ermöglichen eine deutlich dynamischere Regelung der Vibrationsparameter, was insbesondere bei diskontinuierlichen Betriebszuständen (z. B. vielen Start-Stopp-Sequenzen) von Vorteil ist. Aufgrund der Reduktion des hydraulischen Systems und der höheren Effizienz kann auch die Lärmemission merkbar gesenkt werden. Durch die höhere Dynamik des elektrischen Antriebs kann auf zusätzliche Schwungmassen verzichtet und gleichzeitig die Leerlaufdrehzahl verringert werden. Dies trägt zu weiterer Reduktion des Arbeitslärms und auch des Wartungsaufwands der Stopfaggregate bei. Gleichzeitig bleibt die hohe Verdichtungsleistung erhalten, was die elektrische Lösung zu einer

zukunftsweisenden Technologie im modernen Gleisbau macht.

Untersuchungen haben gezeigt, dass bei dieselhydraulisch angetriebenen Stopfmaschinen bereits eine Reduktion der Vibrationsfrequenz im Leerlauf ausreicht, um die Lärmbelastung in der Umgebung signifikant zu senken [5]. Durch die weitere Elektrifizierung der Antriebseinheiten ändern sich allerdings die akustischen Rahmenbedingungen: Die Bereitstellung der elektrischen Leistung ist deutlich leiser, wodurch der Vibrationsantrieb selbst zur dominanten Lärmquelle wird. In diesem Fall ist eine weitere Senkung der Vibrationsfrequenz anzustreben.

Aus diesem Grund entwickelt Plasser & Theurer im nächsten technologischen Schritt den bewährten Exzenterantrieb systematisch weiter. Ziel ist es, die mechanisch robuste Exzenterkinematik mit den steuerungstechnischen Vorteilen elektrischer Antriebstechnologie zu kombinieren. Das Ergebnis ist ein System mit stabiler, bedarfsgerecht regelbarer Vibrationsamplitude, das Lärmmissionen und Verschleiß weiter reduziert, die Energieeffizienz erhöht und die Arbeitsqualität verbessert, gleichzeitig sinkt durch die Verringerung der Vibrationsanteile die dynamische Belastung auf umliegende Anbauteile, was zu erhöhter Lebensdauer mechanischer Komponenten beiträgt.

Gezielte Optimierung von Energieeffizienz und Lärmemission bei gleichbleibend hoher Arbeitsqualität setzt ein fundiertes Verständnis der einzelnen Phasen des Stopfprozesses voraus. Bild 3 bietet einen strukturierten Überblick. Eine ausführliche Beschreibung der jeweiligen Prozessschritte findet sich in [10]. Besonders relevant ist, dass die Stopfpickel während der Phasen Eintauchen, Beistellen (Verfüllen und Verdichten) sowie Anheben in direktem Kontakt mit dem Gleisschotter stehen. Dabei wirken sich sowohl die Vibrationsfrequenz als auch die Vibrationsamplitude unmittelbar auf das Ergebnis der Verdichtung aus – und damit entscheidend auf die Wiederherstellung der Gleislagequalität.

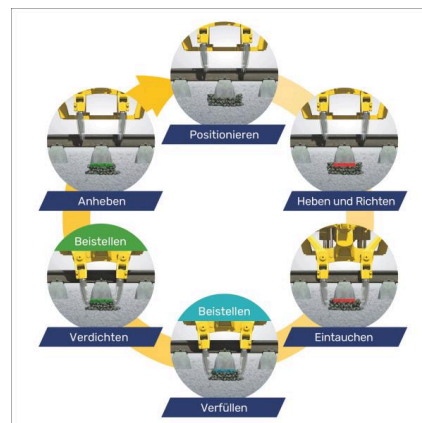


Bild 3: Übersicht der einzelnen Phasen des Stopfprozesses

4 Entwicklung eines Vibrationsantriebs mit adaptiver Amplituden- anpassung

Basierend auf den oben beschriebenen Anforderungen wurde ein neuer Exzenterantrieb konzipiert, der eine bedarfsgerechte Anpassung der Vibrationsamplitude an den Schotterzustand sowie an die spezifische Stopfphase ermöglicht. Die Umsetzung stellt hohe technische Anforderungen: Zum einen muss das System über eine ausreichend hohe Dynamik verfügen, um eine Vibrationsamplitudenanpassung für die einzelnen Phasen im Stopfprozess innerhalb von Zehntelsekunden durchführen zu können. Zum anderen ist eine mechanisch stabile Umsetzung erforderlich, um auch bei stark verschmutztem Schotter eine konstante Vibrationsamplitude sicherzustellen und damit ein qualitativ hochwertiges Arbeitsergebnis gewährleisten zu können. Darüber hinaus müssen die Effizienzvorteile konventioneller Exzenterantriebe weiter bestehen bleiben.

Um all dies zu erfüllen wurde eine regulierbare Vibrationswelle konzipiert, die eine stufenlose Einstellung der Vibrationsamplitude ermöglicht. Diese Lösung garantiert eine konstante Amplitude auch bei hohen mechanischen Belastungen. Außerdem ist das Konzept modular gestaltet, sodass eine Integration in ausgewählte Stopfaggregattypen in Zukunft möglich sein wird. Im Fokus steht die Anwendung in elektrisch angetriebenen Aggregaten. Bild 4 zeigt beispielhaft die Integration in ein modernes 1-Schwellen-Weichenstopfaggregat.

Angesichts der vielfältigen und komplexen konstruktiven und prüftechnischen Herausforderungen, die mit der Entwicklung eines solchen Systems verbunden sind, wird der gesamte Entwicklungsprozess im Folgenden systematisch dargestellt. Dies orientiert sich am V-Modell – einem etablierten Vorgehensmodell in der Produktentwicklung – und umfasst sämtliche Schritte von der Erhebung der Anforderungen bis zur serienreifen Umsetzung.

Die Entwicklung des neuen Vibrationsantriebs folgt einem interdisziplinären Ansatz, der mechanische Konstruktion, numerische Simulation und praktische Erprobung eng verzahnt. Der Prozess verläuft iterativ und in kontinuierlicher Abstimmung zwischen Konstruktion, Simulation, Versuch und Feedback der Anwender. Bild 5 zeigt die zentralen Schritte des Entwicklungsablaufs, die in den nächsten Abschnitten im Detail erläutert werden.



Bild 4: Übersicht Vibrationsantrieb mit regulierbarer Vibrationswelle



Bild 5: Schematische Darstellung des Entwicklungsablaufs von der Marktanforderung bis zum Serienprodukt

4.1 Kunden- und Marktanforderung

Am Beginn des Entwicklungsprozesses steht die systematische Erhebung der Anforderungen aus dem Marktumfeld. Dazu zählen Rückmeldungen von Maschinenbedienern und -betreibern sowie Infrastrukturmanagern. Ergänzt werden diese durch regulatorische Rahmenbedingungen (z. B. TSI Noise, DIN EN 14033) sowie sicherheitsrelevante Bestimmungen, etwa im Hinblick auf akustische Emissionen. Darüber hinaus werden technologische und gesellschaftliche Trends wie Elektrifizierung, Digitalisierung und Nachhaltigkeit berücksichtigt.

4.2 Anforderung und Konzeptentwicklung

Basierend auf den erfassten Anforderungen wird in dieser Phase ein technisches Gesamtkonzept entwickelt. Dieses definiert die grundlegende Funktionsweise, die angestrebten Leistungsparameter, Schnittstellen zur Maschine und Wartungszugänglichkeit. Besonderer Fokus liegt auf wartungsfreundlichem Design, mit standardisierten Schnittstellen zur Reduktion der Ersatzteilvielfalt. Die Schmierung soll analog zu bestehenden Systemen erfolgen. Der Antrieb muss die Energieeffizienz konventioneller Lösungen mindestens erreichen – im Arbeitsbetrieb wie auch im Leerlauf.

Darüber hinaus werden mechanische Basisanforderungen festgelegt, zum Beispiel definierte Lastkollektive und Lebensdauerziele. Diese Anforderungen bilden die Grundlage für die anschließende Auslegung, Simulation und Erprobung des Systems an einem Prüfstand.

4.3 Konstruktion und mechanische Auslegung

In dieser Phase erfolgt die detaillierte Konstruktion. Einzelne Komponenten werden mechanisch ausgelegt, geeignete Werkstoffe und Fertigungsverfahren ausgewählt sowie Montagekonzepte erarbeitet. Ein wesentlicher Punkt ist die Berücksichtigung bestehender Maschinenplattformen durch die Konstruktionsbüros, um spätere Anpassungsaufwände zu minimieren.

4.4 Simulation und virtuelle Validierung

Numerische Simulationsmodelle bilden eine wichtige Grundlage zur Analyse des Verhaltens des Stopfaggregats unter realitätsnahen Einsatzbedingungen. Dabei kommen zwei methodisch unterschiedliche Verfahren zum Einsatz, die unterschiedliche Aspekte des Systemverhaltens abbilden:

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) wird primär zur strukturellen Analyse verwendet. Sie ermöglicht Untersuchung der mechanischen Belastbarkeit einzelner Komponenten, Identifikation kritischer Spannungsbereiche sowie Bewertung des Strukturverhaltens des Stopfaggregats unter Betriebsbelastung. Diese simulationsbasierte Festigkeitsauslegung ist die Basis für eine belastungsgerechte Konstruktion bereits in einer frühen Entwicklungsphase.

Die Diskrete-Elemente-Methode (DEM) dient zur Analyse der Interaktion zwischen den Stopfpickeln und dem Schotterbett. Aufgrund der granularen und stark nichtlinearen Eigenschaften des Schotters ist die DEM prädestiniert, um den Einfluss von Vibrationsfrequenz und -amplitude auf die Schotterverdichtung zu untersuchen. In diesem Zusammenhang konnte unter anderem nachgewiesen werden, dass eine aktive Vibration auch während der Hebephase des Stopfaggregats zu verbesserter Kornumlagerung und damit zu höherer Verdichtung und Arbeitsqualität führt.

Die gewonnenen Erkenntnisse aus den Simulationsstudien ermöglichen gezielte Auslegung und frühzeitige Optimierung des Systems – noch vor dem Bau physischer Prototypen – und tragen wesentlich zur Reduktion von Entwicklungszeit und -kosten bei.

4.4.1 Wissenschaftlicher Hintergrund

Mithilfe der DEM konnte in aktuellen Studien gezeigt werden, dass insbesondere die Vibrationsamplitude entscheidenden Einfluss auf die erzielbare Verdichtungsqualität hat. Bei zu geringer Amplitude erfolgt keine Relativbewegung der Körner und somit keine nennenswerte Kornumlagerung. Zwar ist auch bei Amplituden unterhalb von 4 mm eine Kornumlagerung zu beobachten, jedoch erweist sich der Bereich von 4 bis 5 mm in Kombination mit einer Frequenz von 35 Hz als besonders wirksam für homogene Verdichtung [8, 9, 11].

Daraus lässt sich ableiten, dass eine stabile und reproduzierbare Vibrationsamplitude maßgeblich zur Qualität des Stopfprozesses beiträgt. In einem weiteren Computerexperiment wurde untersucht, welche

Auswirkung der Zeitpunkt der Vibrationsabschaltung auf die Schotterverdichtung hat (Bild 6). Dabei konnte gezeigt werden, dass bei deaktivierter Vibration – während der Hebephase des Stopfaggregats aus dem Schotter – die Verdichtung im Vergleich zu aktivierter Vibration abnimmt. Diese Beobachtung lässt sich durch die Analyse der Partikelbewegungen beziehungsweise des Hohlraumanteils entlang der Stopfpickeltrajektorie erklären. Wird die Vibration zu früh abgeschaltet, entsteht im „Schattenbereich“ des anhebenden Stopfpickels eine Zone, in der keine weitere Verdichtung erfolgt. Stattdessen bleibt dieser Bereich mechanisch gelockert zurück. Das resultierende Hohlraumvolumen ist sichtlich größer und somit die Tragfähigkeit der kompletten Zone lokal herabgesetzt.

Diese Erkenntnisse bestätigen die Notwendigkeit einer durchgehenden Vibration während sämtlicher Phasen, in denen der Stopfpickel direkten Schotterkontakt hat. Im Gegensatz dazu führt frühzeitige Abschaltung zu struktureller Instabilität und somit reduzierter Haltbarkeit der Gleislage. Diese Erkenntnisse fließen direkt in die Entwicklung adaptiver Stopfaggregate ein.

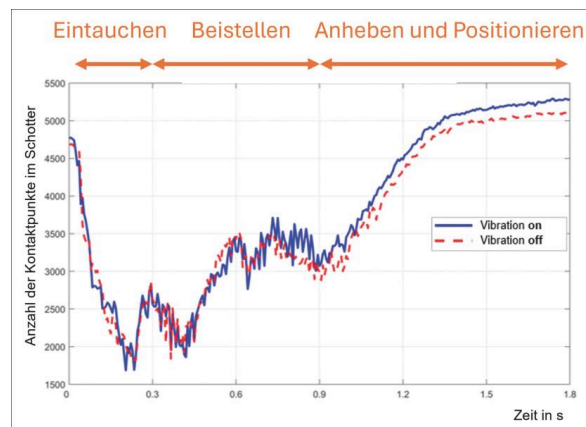


Bild 6: Anzahl der Kontaktpunkte im Schotter bei (rot) deaktivierter Vibration und (blau) aktivierter Vibration beim Heben des Stopfaggregats. Die Anzahl der Kontaktpunkte ist ein Maß für die Verdichtung im Schotter

4.5 Prüfstand-Tests

Nach Fertigung eines ersten Prototyps erfolgt die Inbetriebnahme auf einem speziell dafür entwickelten Prüfstand. Diese Laborumgebung bietet gegenüber dem Feldbetrieb entscheidende Vorteile: Sie ermöglicht eine reproduzierbare, kontrollierte und gezielt variierbare Erprobung einzelner Komponenten sowie des Gesamtsystems. Insbesondere die hohe Zugänglichkeit zu allen Komponenten und Messpunkten erlaubt eine gezielte und systematische Analyse des mechanischen Verhaltens. Darüber hinaus können Betriebsparameter variiert und potenzielle Schwachstellen frühzeitig identifiziert werden. Ein weiterer

Vorteil solcher Prüfstand-Tests ist die Möglichkeit, vollständige Lebensdauer-Tests in kurzer Zeit durchzuführen. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen der Validierung numerischer Simulationen und Feinabstimmung der Konstruktion im Hinblick auf Funktionalität, Belastbarkeit und Zuverlässigkeit. Bei der Entwicklung neuer Stopfaggregate und Aggregatkomponenten ist diese Phase von großer Bedeutung. Diese Bauteile sind im regulären Einsatz besonders hohen Belastungen ausgesetzt und erfüllen sicherheits- und funktionskritische Aufgaben. Vorzeitiges Versagen kann unmittelbar zum Abbruch der Instandhaltungsmaßnahmen und somit zu betrieblichen Einschränkungen führen. Aus diesem Grund sind umfangreiche Prüfstand-Tests als vorbereitende Maßnahme für nachfolgende Feldtests unerlässlich. Plasser & Theurer betreibt mehrere Prüfstände (Beispiel siehe Bild 7), spezialisiert auf die Erprobung unterschiedlicher Komponenten beziehungsweise gesamter Arbeitsaggregate. Um realistische Prüfbedingungen gewährleisten zu können, wird jedes Aggregat oder jeder Bauteil unter anwendungstypischen Belastungen erprobt. Diese Lastkollektive werden auf Basis vorangegangener Feldmessungen und Forschungsprojekte definiert und bilden typische Beanspruchungen über den gesamten Lebenszyklus ab [12]. Zur Analyse des Aggregat- und Bauteilverhaltens wird ein umfangreiches Sensoriksystem eingesetzt. Dazu zählen Temperaturfühler, Beschleunigungssensoren, Dehnmessstreifen zur Erfassung lokaler Dehnungen als Grundlage zur Spannungsanalyse, Drucksensoren für hydraulische Systeme sowie die Erfassung aller relevanten Betriebsparameter. Diese Daten ermöglichen eine detaillierte Bewertung des mechanischen, thermischen und schwingungstechnischen Verhaltens sowie der Belastung einzelner Komponenten. Die Prüfstand-Tests bilden den nächsten logischen Schritt nach der Simulation, um die virtuellen Ergebnisse mit realen Messwerten abzugleichen. Zusätzlich können weitere Ziele der Tests abgeleitet werden:

- Testen und Vergleichen unterschiedlicher Bauteile wie Lager, Dichtungen, Antriebe oder Gehäusevarianten unter identischen Bedingungen
- Früherkennung und Behebung konstruktiver Schwächen sowie ungünstiger Materialpaarungen
- Bewertung von Montage- und Fertigungstoleranzen im Hinblick auf Funktion, Schwingungsverhalten und Langzeitstabilität
- Evaluierung der Haltbarkeit einzelner Komponenten durch Langzeitbelastung und zyklische Beanspruchung
- Analyse von Resonanzeffekten und Systemkopplungen, insbesondere im Hinblick auf Vibrationsausbreitung und Rückwirkung auf angrenzende Baugruppen
- Optimierung von Betriebsparametern wie Schmierung, Steuerung und Regelung zur Steigerung von Effizienz und Lebensdauer
- Lebensdauertest des Gesamtsystems als Basis für wichtige Erkenntnisse über Zuverlässigkeit und Wartungsintervalle
- Praxisnahe Überprüfung der Wartbarkeit des Aggregats, zum Beispiel durch simulierte Austauschvorgänge und Zugänglichkeitstests

- Erprobung der Kompatibilität und Systemkopplung mit maschinen- und standortübergreifenden Untersystemen
- Validierung der funktionalen Sicherheit (z. B. unter Extrembedingungen oder bei Teilausfällen)
- Die Ergebnisse dienen als Vorbereitung für die Feldtests, bei denen das Stopfaggregat unter realen Einsatzbedingungen validiert wird.

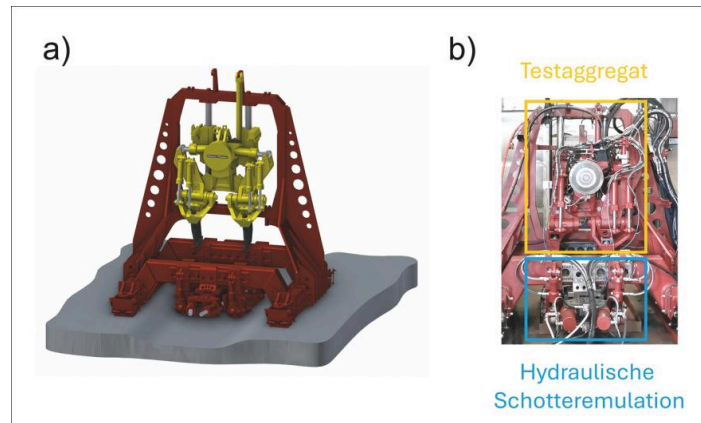


Bild 7: a) Schematische Darstellung eines Stopfaggregat-Prüfstands, b) Stopfaggregat-Prüfstand während des Testlaufs

4.6 Feldtests

Im Anschluss an die Erprobung am Prüfstand wird das Aggregat in eine Stopfmaschine integriert und unter Praxisbedingungen getestet. Im Fokus stehen Stopfqualität, betriebliche Robustheit sowie Rückmeldungen des Bedienpersonals. Bei Plasser & Theurer stehen eigene Gleisbaumaschinen für Prototypen-Tests zur Verfügung. Dadurch können die Feldversuche flexibel geplant, begleitet und detailliert ausgewertet werden. Sie ermöglichen beispielsweise eine gezielte Analyse der akustischen Emissionen unter realitätsnahen Umgebungsbedingungen. Auf Basis der Messergebnisse lassen sich konstruktive Modifikationen zur weiteren Reduktion des Arbeitslärms ableiten. Ergänzend können verschiedene Umweltbedingungen (z. B. Temperatur, Feuchtigkeit, Staubbelastung) berücksichtigt werden, um Langzeitstabilität und Ausfallsicherheit des Aggregats zu evaluieren.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil ist der Einsatz von geschultem Bedienpersonal, wodurch gezielte Rückmeldung über Bedienbarkeit, Ergonomie und Steuerung ermöglicht wird. Diese Informationen sind essenziell für die Weiterentwicklung neuer Produkte, insbesondere im Hinblick auf Benutzerfreundlichkeit und Wartungskonzept. Die Phase der Feldtests dient somit nicht nur der technischen Validierung, sondern

auch der praxisnahen Optimierung. Sie stellt einen essenziellen Zwischenschritt auf dem Weg zur Serienreife und zur nachfolgenden Vorbereitung für die Early-Adopter-Phase dar.

4.7 Early-Adopter-Phase

Ausgewählte Kunden – sogenannte Early Adopters – erhalten im Zuge einer Entwicklungskooperation ein Vorserien-Produkt. Diese Phase dient der breiteren Erprobung im Regelbetrieb und liefert wertvolle Rückmeldungen zu Wartungsfreundlichkeit, Bedienkomfort und Performance unter verschiedenen Einsatzbedingungen. Da es sich um Vorserien-Modelle handelt, sind noch Funktionsabweichungen oder vereinzelte Ausfälle möglich. Gerade diese potenziellen Schwachstellen liefern wertvolle Hinweise für die finale Optimierung des Produkts und ermöglichen die Absicherung der Serienreife.

4.8 Serienreife und Markteinführung

Nach Abschluss aller Testphasen und Finalisierung des Designs wird der optimierte Vibrationsantrieb zur Serienreife gebracht. Die Fertigungsprozesse werden industrialisiert, Dokumentation und Schulungsunterlagen erstellt. In dieser Phase ist auch die Schulung des internationalen Service-Netzwerks von entscheidender Bedeutung.

5 Zusammenfassung

Der neue Vibrationsantrieb befindet sich derzeit in der Early-Adopter-Phase. In dieser wichtigen Etappe wird das System unter realen Einsatzbedingungen von ausgewählten Partnern getestet. Die Rückmeldungen aus dem Betrieb – insbesondere zu Bedienbarkeit, Wartungsfreundlichkeit und Performance – liefern wertvolle Erkenntnisse für die finale Produktgestaltung. Dabei werden sowohl technische Parameter als auch ergonomische Aspekte systematisch erfasst und ausgewertet. Die bisherigen Ergebnisse aus Simulation, Prüfstand und Feldtest bestätigen die grundsätzliche Leistungsfähigkeit des Stopfaggregats. Gleichzeitig zeigen sie Optimierungspotenziale auf, die nun gezielt adressiert werden. Auf Basis der gesammelten Erkenntnisse erfolgt im nächsten Schritt die Überführung des Prototyps in ein serienreifes Produkt. Hierzu zählen insbesondere:

- finale Auslegung und Abstimmung aller mechanischen und elektronischen Komponenten,
- Standardisierung von Schnittstellen zur Maschinenplattform,
- Ausarbeitung technischer Zulassungsdokumente,
- Erstellung produktbegleitender Unterlagen wie Bedienungsanleitungen, Wartungshandbüchern und Schulungsmaterialien
- sowie Schulung des Vertriebsnetzes.

Mit Überführung in die Serienfertigung steht ein neu entwickelter Vibrationsantrieb zur Verfügung, dessen regelbare Vibrationsamplitude perfekt an betriebliche Anforderungen angepasst werden kann. Das System erfüllt zentrale Anforderungen moderner Fahrweginstandhaltung, insbesondere im Hinblick auf Lärmemissionsminderung, Energieeffizienz, Betriebssicherheit und Wartungsoptimierung. Damit leistet der Vibrationsantrieb mit regulierbarer Vibrationswelle einen wesentlichen Beitrag zur fortschreitenden Elektrifizierung, Technologisierung und nachhaltigen Weiterentwicklung des Gleisbaus.

Literatur

- [1] Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union, Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ%3AL%3A2002%3A189%3A0012%3A0025%3ADE%3APDF>, abgerufen am 10.08.2025.
- [2] EU Kommission, Verordnung (EU) Nr. 1304/2014 der Kommission: TSI Noise, 2014. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02014R1304-20190616>, abgerufen am 10.08.2025.
- [3] Misar, S.; Hansmann, F.: Bahnbau im ökologischen Wandel – grüner Übergang in der Gleisinstandhaltung. ZEVrail, Jg. 148, Heft 01-02, 2024, S. 42-50.
- [4] Radler, T.; Hofman, L.; Koczwar, C.; Buchner, M.: Energieeffizient und emissionsarm stopfen. EI, Nr. 1, 2ß24, S. 15-18.
- [5] Achs, G.; Floss, S.: Schalltechnische Untersuchung bei unterschiedlichen Antriebsarten von Stopfmaschinen. ETR, Jg. 72, Nr. 10, 2023, S. 50-54.
- [6] ÖBB-Infrastruktur AG. „Netzzustandsbericht 2022.“ https://infrastruktur.oebb.at/dam/jcr:8c9f6fc2-9afb-46d4-a11b-b81326982717/%C3%96BB%20Netzzustandsbericht%202022_V1.0.pdf, abgerufen am 10.08.2025.
- [7] Hansmann, F.; Nemetz, W.: Der Gleislage auf der Spur: Ein vergleichender Überblick über die DACH-Staaten (Grundlagen – Fehlerermittlung – Korrektur – Qualität). Hamburg: PMC Media House GmbH, 2019.
- [8] Omerović, S.; Koczwar, C.; Daxberger, H.; Antony, B.; Auer, F.: Anwendung der Diskrete-Elemente-Methode im Eisenbahnbau: Numerische Parameterstudien zum dynamischen Verhalten von Gleisschotter. Der Eisenbahningenieur – EI, Nr. 7, 2021, S. 39-41.
- [9] Fischer, J.: Einfluss von Frequenz und Amplitude auf die Stabilisierung von Oberbauschotter. Institut für Eisenbahnwesen, TU Graz, Graz, 1983.
- [10] Koczwar, C.; Omerović, S.: „Die Phasen des Stopfprozesses und ihr Einfluss auf die Gleislage“. Der Eisenbahningenieur – EI, Nr. 9, 2024, S. 55-59.
- [11] Omerović, S.; Schöllhammer, D.: „Moderne Simulationen des Schotterbetts: State-of-the-Art-Simulationsmethoden und fortschrittliche Messtechnik ermöglichen eine zielgerichtete und kosteneffiziente Produktentwicklung.“ Der Eisenbahningenieur – EI, Nr. 7, 2023, S. 52-56.
- [12] Schöllhammer, D.; Pichler, F.; Omerović, S.; Koczwar, C.; Daxberger, H.: Optimierte Produktentwicklung: Mit modernen Simulationsmethoden effizienter zur Serie. ZEVrail, Heft 05, 2023, S. 192-199.