

Schalltechnische Untersuchung bei unterschiedlichen Antriebsarten von Stopfmaschinen

Lärmemissionen werden als störend empfunden und sind auch eine erhebliche Belastung für die Umwelt und die Gesundheit der Menschen. Lärm aus Bautätigkeiten im Eisenbahnsektor stellt keine Ausnahme dar. Um hier entgegenzuwirken, wird zunehmend auf elektrifizierte Bahnbaumaschinen gesetzt, wodurch die Lärmbelastung für Anrainer und Bediener stark reduziert werden kann.



Einleitung

Lärmemissionen belasten die Umwelt und können die Gesundheit beeinträchtigen.

Diesem Sachverhalt trägt auch die Politik der Europäischen Union Rechnung. So erklären das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union den Lärmschutz zu einem der Ziele, um ein hohes Schutzniveau für Umwelt und Gesundheit zu gewährleisten, und nennen Schienenfahrzeuge als eine der wichtigsten Lärmquellen. Der Europäische Rat bezeichnet in diesem Zusammenhang den Umgebungslärm sogar als eines der größten Umweltprobleme in Europa. [1]

Dementsprechend ist die Bahnindustrie gefordert, die mit den nötigen Errichtungs- und Instandhaltungsarbeiten verbundenen Lärmemissionen möglichst gering zu halten.

Rechtliche und normative Grundlagen

Die Anforderungen in Bezug auf Lärmemissionen sind durch die Technische Spezifikation für Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeug – Lärm“ (TSI Noise) für alle unter die Verordnung (EU) Nr. 1302/2014 (TSI LOC&PAS) und die Verordnung (EU) Nr. 321/2013 (TSI WAG) fallenden Fahrzeuge geregelt. Konkret gibt die TSI Noise Grenzwerte für Standgeräusch, Anfahrgeräusch, Vorbeifahrgeräusch und Innengeräusch am Führerstand vor. [2]

Gleisbaumaschinen im Allgemeinen, und damit auch Stopfmaschinen, fallen in den Anwendungsbereich der TSI LOC&PAS,

wobei zwischen der Transportkonfiguration (während der Überführungsfahrt) und der Arbeitskonfiguration unterschieden wird. Die TSI LOC&PAS schließt Gleisbaumaschinen in Arbeitskonfiguration dezidiert von der Anwendung dieser TSI aus. [3] Somit unterliegen sie in Transportkonfiguration der TSI Noise, während diese auf die Arbeitskonfiguration nicht anzuwenden ist.

Für Gleisbaumaschinen im Arbeitsmodus macht die DIN EN 14033-3, welche die allgemeinen Sicherheitsanforderungen an schienengebundene Bau- und Instandhaltungsmaschinen umfasst, im Anhang C normative Vorgaben zu Schallemissionsmessungen. Die nach dieser Norm ermittelten Kenngrößen dienen dem Hersteller dazu, die Geräuschemissionen deklarieren zu können. Zusätzlich ermöglichen sie den Vergleich von Maschinen untereinander und unterstützen während der Entwurfsphase Lärmbekämpfungsmaßnahmen an der Quelle. [4]

Für Gleisbaumaschinen in Transportkonfiguration sind die Grenzwerte der TSI Noise Mindestanforderungen, die für eine Zulassung jedenfalls zu erfüllen sind. Die vom Hersteller deklarierten Kennwerte im Arbeitsmodus gehen in der Praxis in die Planung und Bewertung von Bau- und Instandhaltungsarbeiten ein und sind somit sowohl für den Infrastrukturbetreiber als auch für den Maschinenbetreiber relevant.

Technologische Entwicklung bei Stopfmaschinen

Der technologische Fortschritt im Bahnbau ermöglicht neue Ansätze zur Lärmredukti-



**Dipl.-Ing. Dr. techn.
Günther Achs**

Geschäftsführender Gesellschafter, FCP Fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH
achs@fcp.at



**Dipl.-Ing. Dr. techn.
Sebastian Floss**

Experte Abteilung Akustik, Baudynamik, Bauphysik und Messtechnik, FCP Fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH
floss@fcp.at

on. So wurde im Jahr 2015 die erste Stopfmaschine mit Hybrid-Antriebskonzept präsentiert. Diese verfügt über einen hydraulischen Fahrtrieb, der entweder über Elektromotor (Strom aus Fahrdraht) oder Dieselmotor mit Energie versorgt wird (elektrohydraulischer und dieselelektrohydraulischer Antrieb). 2017 kam dann die erste voll elektrifizierte Stopfmaschine auf den Markt, die entweder über Fahrleitung (vollelektrisch) oder Dieselmotor (diesel-elektro) betrieben werden kann. Dabei wurden auch der Fahrtrieb und die Vibrationsantriebe der Stopfaggregate elektrifiziert. Diese Entwicklung ermöglicht eine bedeutende Verringerung der Treibhausgasemission. So kann bei Verwendung von CO₂-neutral erzeugtem Bahnstrom mit der Maschine vollständig klimaneutral gearbeitet werden. Außerdem bietet die elektrische Antriebstechnologie ein beträchtliches Potenzial zur Reduktion der Lärmemissionen, die letztendlich den Anrainern, dem Maschinenpersonal und der Umwelt zugutekommt. [5, 6]

Stopfen ist die am häufigsten durchgeführte Instandhaltungsmaßnahme mit über 1000 km jährlich allein in Österreich. [7] Aus diesem Grund werden im Folgenden die Einflüsse unterschiedlicher Antriebskonzepte auf die Schallemission im Bahnbau anhand zweier Stopfmaschinen evaluiert. Zusätzlich wird der Einfluss der Vibrationsfrequenz des Stopfaggregats auf die Schallemission betrachtet.

Versuchsdurchführung

Zwei Stopfmaschinen (Unimat 09-4x4/4S Dynamic und Unimat 09-4x4/4S Dynamic E³) wurden akustisch vermessen. Bei beiden handelt es sich um Universalstopfmaschinen (Bild 1), die sich im Wesentlichen durch das Antriebskonzept unterscheiden. Erstere wird von einem konventionellen Dieselmotor angetrieben, letztere ist mit einem modernen Hybrid-Antrieb (elektrischer und dieselelektrischer Antrieb) ausgestattet und kann sowohl vollelektrisch als auch dieselelektrisch betrieben werden. Im vollelektrischen Antriebsmodus werden sowohl der Fahrtrieb als auch alle Arbeitsaggregate elektrisch angetrieben. Zusätzlich wurde anhand eines Unimat 08-4x4/4S RT der Einfluss der Dieselmotordrehzahl schalltechnisch evaluiert.

Alle hier beschriebenen Schallpegelmessungen erfolgten gemäß ÖNORM EN ISO 3095 (2014), erweitert um zusätzliche Messungen in 1 m und 25 m Entfernung.



1: Die beiden gemessenen Maschinen: a) Unimat 09-4x4/4S Dynamic (dieselhydraulisch); b) Unimat 09-4x4/4S Dynamic E³ (Hybridantrieb: vollelektrischer und dieselelektrischer Antrieb)



2: Übersichtsaufnahme des Messaufbaus Unimat 09-4x4/4S Dynamic

Tabelle 1: Antriebskonzepte

Maschine	Unimat 09-4x4/4S Dynamic	Unimat 09-4x4/4S Dynamic E ³	Unimat 09-4x4/4S Dynamic E ³
Antriebsart	dieselhydraulisch	dieselektrisch	vollelektrisch
Stopfagggregatantrieb	hydraulisch	elektrisch	
Fremdgeräuschpegel bei Messung	41 dB(A)	50 dB(A)	
Stopffrequenz	35 Hz		

Tabelle 2: Arbeitsdrehzahl bei hydraulischem und elektrischem Vibrationsantrieb

Maschine	Unimat 08-4x4/4S RT	
Antriebsart	dieselhydraulisch	
Stopfagggregatantrieb	hydraulisch	elektrisch
Arbeitsdrehzahl	1900 rpm	1350 rpm
Abstand des Mikrofons zum Dieselmotor	8,4 m	
Schallpegel im Arbeitsmodus	80,8 dB(A)	76,9 dB(A)
Schallpegel bei laufendem Stopfaggregat (35 Hz)	82,4 dB(A)	79,2 dB(A)

Es wurden Schallpegeleinzahlwerte LAeq (A-bewerteter energieäquivalenter Dauerschallpegel) im Stand und während der Fahrt in unterschiedlichen Abständen gemessen. [8]

Die Platzierung der bei den Messungen verwendeten Mikrofone zeigt Bild 2. Die Mikrofone wurden auf einer Höhe von 1,2 m über Schienenoberkante (SOK) und im Abstand von 1 m zur Referenzbox (Maschinenaußenkante) sowie 7,5 m und 25 m von der Gleismitte aufgestellt. Zusätzlich erfolgten Vergleichsmessungen mit einer akustischen Kamera, um dominante Schallquellen besser zu lokalisieren und visualisieren zu können.

Betriebszustände

Alle Messungen wurden bei arbeitsbereiten Maschinen mit aktiviertem Stopfaggre-

gat durchgeführt. Gemessen wurden drei unterschiedliche Antriebsarten:

- dieselhydraulisch (Unimat 09-4x4/4S Dynamic)
- dieselektrisch (Unimat 09-4x4/4S Dynamic E³)
- vollelektrisch (Unimat 09-4x4/4S Dynamic E³)

Die Hauptlärmquelle wurde während einer langsamen Vorbeifahrt (Fahrmessung) identifiziert. Im vollelektrischen Betrieb (Unimat 09-4x4/4S Dynamic E³) konnte außerdem der Einfluss der Vibrationsfrequenz (35 Hz, 20 Hz, 0 Hz) ermittelt werden. Dazu wurde die Maschine im Arbeitsbetrieb bei unterschiedlichen Vibrationsfrequenzen in Eigenfahrt mit einer konstanten Geschwindigkeit von 2000 m/h an den Mikrofonen vorbeibewegt.

Zusätzlich zu den Fahrmessungen erlauben punktuelle Messungen (bei Stillstand) an den dominanten Lärmquellen in unterschiedlichen Entfernungen eine detaillierte Analyse. Diese Messungen dienen dazu, den Einfluss des Antriebskonzepts auf die Lärmbelastung zu untersuchen. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Antriebskonzepte und Rahmenbedingungen.

In einem weiteren Versuch wurde die Auswirkung der Dieselmotordrehzahl auf die Lärmemission getestet (im Abstand von 8,4 m). Dazu wurden die hydraulischen Vibrationsmotoren der Stopfaggregate eines Unimat 08-4x4/4S RT durch Elektromotoren ersetzt. Durch die verringerte Leistungsaufnahme der Elektromotoren konnte die Arbeitsdrehzahl des Dieselmotors reduziert werden (Tabelle 2). Die Messungen wurden am Dieselmotor und am Stopfaggregat durchgeführt.

Analyse

Identifikation der dominanten Lärmquellen

Die Messungen während der Vorbeifahrt geben Aufschluss über jene Bereiche der Maschine, welche die höchsten Schallpegel emittieren. Sowohl im dieselhydraulischen als auch im dieselektrischen Betrieb werden bei einem Abstand von 7,5 m die höchsten Schallpegel im Bereich des Dieselmotors gemessen. Dies gilt selbst dann, wenn das Stopfaggregat mit der regulären Vibrationsfrequenz von 35 Hz läuft. Damit ist in beiden Fällen der Dieselmotor die Hauptlärmquelle. Bild 3 zeigt einen Unimat 09-4x4/4S Dynamic (dieselhydraulischer Antrieb), aufgenommen mit einer Schallkamera. Es handelt sich um einen repräsentativen Ausschnitt der während einer Vorbeifahrt mit aktiviertem Stopfaggregat durchgeführten Messung. Bereiche mit ho-



3: Ausschnitt der Messung mit der Schallkamera (dieselhydraulischer Antrieb). Der Dieselmotor (roter Bereich) kann deutlich als die dominante Lärmquelle identifiziert werden. Die Emission des Stopfaggregats ist deutlich niedriger (blauer Bereich)

Tabelle 3: Die Schallpegel im Stand wurden gemessen bei laufendem Hauptmotor im Arbeitsbetrieb und 35 Hz Vibrationsfrequenz (Stopfaggregat) an den Messpunkten am Motor in 7,5 m und 25 m Entfernung [9, 10]

LAeq /dB(A)	Motor 7,5 m	Motor 25 m
dieselhydraulisch	83	73
dieselelektrisch	82	71
vollelektrisch	64	58

Tabelle 4: Die Schallpegel im Stand wurden gemessen bei laufendem Hauptmotor im Arbeitsbetrieb und 35 Hz Vibrationsfrequenz (Stopfaggregat) an den Messpunkten am Stopfaggregat in 7,5 m und 25 m Entfernung [9, 10]

LAeq /dB(A)	Aggregat 7,5 m	Aggregat 25 m
dieselhydraulisch	77	72
dieselelektrisch	76	68
vollelektrisch	73	62

Tabelle 5: Auswirkung der Vibrationsdrehzahl auf den maximalen Schallpegel bei der Vorbeifahrt (vollelektrischer Antrieb) [9, 10]

LAeq /dB(A)	Abstand 1 m	Abstand 7,5 m	Abstand 25 m
35 Hz	84	75	64
20 Hz	78	70	61
0 Hz	77	69	59

her Schallintensität sind rot dargestellt. Somit ist deutlich erkennbar, dass der Bereich um den Dieselmotor die Hauptlärmquelle darstellt. Im vollelektrischen Betrieb ent-

fällt der Verbrennungsmotor als dominante Schallquelle. In diesem Fall werden in der Vorbeifahrt, bei einer Vibrationsfrequenz von 35 Hz, die höchsten Schallpegel im

Bereich des Stopfaggregats gemessen. Die Messungen der Schallkamera dienen zur Lokalisierung der dominanten Quellen und werden nicht zur quantitativen Auswertung herangezogen. Aufgrund technischer Einschränkungen wurden die Aufnahmen lediglich für einen qualitativen Vergleich der einzelnen Maschinenkomponenten herangezogen, für quantitative Aussagen jedoch die Messdaten der kalibrierten Mikrofone (Bild 2).

Einfluss von Antriebskonzept und Vibrationsfrequenz auf die Schallemission

Die Ergebnisse der punktuellen Messungen (bei Stillstand) an den identifizierten Hauptlärmquellen (Dieselmotoren und Stopfaggregat) zeigen deutlich die quantitativen Unterschiede der einzelnen Antriebskonzepte. In Tabelle 3 sind die am Dieselmotor und in Tabelle 4 die am Stopfaggregat gemessenen Schalldruckpegel bei einer Vibrationsfrequenz von 35 Hz angegeben.

Bei dieselhydraulischem und dieselelektrischem Antrieb wurden am Motor in 7,5 m Entfernung 83 dB beziehungsweise 82 dB, bei vollelektrischem Antrieb lediglich 64 dB gemessen. Somit ergibt sich ein um 19 dB geringerer maximaler Schallpegel auf Höhe des Hauptmotors im Vergleich zu konventionellen Antriebskonzepten.

Auch auf Höhe des Stopfaggregats kann bei Verwendung eines dieselelektrischen Antriebskonzepts (inklusive elektrischer Vibrationsmotoren am Stopfaggregat) eine Reduktion von 4 dB im Vergleich zum dieselhydraulischen Antrieb erreicht werden. In einem für Anrainer relevanten Abstand von 25 m lässt sich durch Verwendung eines vollelektrischen Antriebskonzepts ein um 11 dB geringerer maximaler Schallpegel im Vergleich zum dieselhydraulischen Antrieb erzielen. Im Vergleich vollelektrischer Antrieb zu dieselelektrischem Antrieb wird eine Verringerung um 9 dB erreicht. Aus den Fahrmessungen im vollelektrischen Betrieb geht hervor, dass eine Reduktion der Vibrationsfrequenz von 35 Hz auf 20 Hz eine Verringerung des maximalen Schallpegels um 6 dB bewirkt (Abstand 1 m vom Stopfaggregat). Eine weitere Reduktion der Vibrationsfrequenz bis zum Stillstand bringt keine signifikante Verringerung der Lärmemission mehr. Wie aus Tabelle 5 entnommen werden kann, verhält es sich im Abstand von 7,5 m und 25 m analog dazu.

Einfluss der Motordrehzahl auf die Schallemission

Um eine effektive Reduktion der Lärmbelastung zu erreichen, muss grundsätzlich die Emission der dominanten Quelle reduziert werden. Am Beispiel eines Unimat 08-4x4/4S RT konnte gezeigt werden, dass durch eine Drehzahlreduktion des Dieselmotors (Tabelle 2) die Lärmemission signifikant reduziert werden kann. Die verringerte Arbeitsdrehzahl konnte hier durch eine Effizienzsteigerung des Stopfaggregats (Umrüstung von hydraulischen auf elektrische Vibrationsantriebe) erreicht werden. [11] In einem Abstand von 8,4 m zum Dieselmotor konnte durch diese Maßnahme im Arbeitsbetrieb ein bis zu 3,9 dB und mit aktivem Stopfaggregat ein um 3,2 dB reduzierter Schallpegel gemessen werden. [12]

Zusammenfassung

Es wurden an einer Universalstopfmaschine des Typs 09-4x4/4S Dynamic E³ und des Typs 09-4x4/4S Dynamic Schallmessungen im Arbeitsbetrieb durchgeführt. Dabei wurde der Dieselmotor bei der Hybridvariante in 25 m Entfernung trotz mit 35 Hz laufendem Stopfaggregat als dominante Schallquelle identifiziert. Dies ist ebenso beim Typ 09-4x4/4S der Fall. Der Einfluss des Vibrationsantriebs auf den gemessenen

Schallpegel ist nur in direkter Umgebung des Stopfaggregats messbar.

Aus den gemessenen Daten geht deutlich hervor, dass die Änderung des Antriebskonzepts die größte Auswirkung auf die Lärmbelastung sowohl im direkten Umfeld der Maschine als auch in größeren Entfernungen (Anrainer) hat. Bei der Verwendung einer Stopfmaschine mit Hybridantrieb entfällt bei vollelektrischem Betriebsmodus die Hauptlärmquelle, der Dieselmotor. Dadurch kann in direkter Umgebung des Motors eine Reduktion von über 19 dB erzielt werden. In 25 m Entfernung kann immer noch eine Reduktion der maximal auftretenden Schallpegel um 11 dB gemessen werden (Tabelle 3 und Tabelle 4). Durch die Verwendung effizienter elektrischer Stopfaggregatantriebe kann auch bei bestehenden Systemen die Lärmbelastung reduziert werden. Zusätzlich wurde festgestellt, dass eine Reduktion der Vibrationsfrequenz unter 20 Hz keine nennenswerte Verringerung des Schallpegels bewirkt.

Es kann hier festgehalten werden, dass die Verwendung einer vollelektrisch angetriebenen Stopfmaschine eine deutliche Reduktion der Lärmbelastung sowohl für Baustellenanrainer als auch für das Bedienpersonal bewirkt.

weiterer Schritt ist gesetzt, um auch die Fahrweginstandhaltung verstärkt in das Konzept „sauberes Verkehrssystem Bahn“ einzubinden.), *EI - Der Eisenbahn-Ingenieur*, Nr. 12, 2017.

[6] M. Demml, C. Koczwara und S. Omerović, „Von der Spitzhacke zur emissionsfreien Gleisstopfmaschine“, *EI - Der Eisenbahn-Ingenieur*, Nr. 05, 2023.

[7] M. Zeiner, M. Landgraf, D. Knabl, B. Antony, V. Barrena Cárdenas und C. Koczwara, „Assessment and Recommendations for a Fossil Free Future for Track Work Machinery“, *Sustainability*, Jg. 13, Nr. 20, S. 11444, 2021, doi: 10.3390/su132011444.

[8] Österreichischer Arbeitsring für Lärmbekämpfung, *ÖAL-Richtlinie Nr. 3 Blatt 2: Schalltechnische Grundlagen für die Beurteilung von Lärm – Lärm am Arbeitsplatz*, 2018.

[9] M. Pichler, „Schalltechnische Untersuchung - Frequenzvariation beim Vibrationsantrieb vom Stopfaggregat: Unimat 09-4x4/4S Dynamic (Ma. Nr.:7061)“, *LinZ*, 2021.

[10] M. Pichler, „Schalltechnische Untersuchung – Frequenzvariation beim Vibrationsantrieb vom Stopfaggregat: Unimat 09-4x4/4S Dynamic E³ (Ma. Nr. 7241)“, *LinZ*, 2023.

[11] R. Hauke, „Elektrisches Stopfen – Öko-Retrofit für die Zukunft des Stopfens“, *ZEV Rail*, Nr. 01, 2023.

[12] Atkins Limited, „Plasser Tamper Noise Surveys“, 2022.

Summary

Acoustical study on different driving types of tamping machines

Acoustical studies in operation modus were made with the universal tamping machines type 09-4x4/4S Dynamic E³ and type 09-4x4/4S Dynamic. Here, the diesel engine of the hybrid type was identified as dominant noise source despite a running tamping unit of 35 Hz at a 25 m distance. This also happened with type 09-4x4/4S. The influence of the vibration drive on the measured sound level is only measurable in direct environment of the tamping unit. The data clearly show that changing the driving concept would have the biggest effect on the noise level both in the near environment of the machine and at a greater distance (neighborhood). When using a hybrid tamping machine, the main noise source, the diesel engine, is eliminated in full-electrical operation modus. For this, a reduction of more than 19 dB can be achieved in the direct neighborhood of the engine. In 25 m, a reduction of the max. occurring sound level can be measured by still 11 dB (table 3 and 4). By using efficient electrical tamping unit drives, the sound level can be reduced even with existing systems. Additionally, they found out that a reduction of the vibration frequency below 20 Hz, causes no remarkable lowering of the sound level. We can say, that using a fully electrical driven tamping machine causes considerable reduction of sound level both for the site neighbors and the stuff.

Literatur

[1] Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union, Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates. Zugriff am: 6. Juli 2023.

[Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ%3AL%3A2002%3A189%3A0012%3A0025%3ADE%3APDF>.

[2] EU Kommission, Verordnung (EU) Nr. 1304/2014 der Kommission: TSI Noise, 2014. Zugriff am: 6. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02014R1304-20190616>.

[3] EU Kommission, Verordnung (EU) Nr. 1302/2014 der Kommission: TSI LOC&PAS, 2014. Zugriff am: 15. Mai 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02014R1302-20200311>.

[4] Schienengebundene Bau- und Instandhaltungsmaschinen – Teil 3: Allgemeine Sicherheitsanforderungen, 14033-3, Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Okt. 2017.

[5] R. Hauke, H. Steinwenker und J. Rebek, „E³ – elektrifizierende Technologie für Gleisbaumaschinen“ (Ein