

Unterlage 10.05.2

Erschütterungstechnische Untersuchung

Vorhaben: Neubau Betriebshof Tram Ständlerstraße
 „Endzustand 2035“

Auftraggeber: Stadtwerke München GmbH
 Emmy-Noether-Straße 2
 80992 München *A. München*

Bearbeitungsstand: 20.07.2023

Projekt-Nr.: 2023 888

Auftrag vom: 18.02.2016

Anzahl Seiten: 32

Anzahl Anlagen: 5, s. Anlagenverzeichnis

fachlich verantwortlich: Dipl.-Ing. (FH) Manfred Ertl

Durchwahl: 0821 / 207 129 10

E-Mail: mertl@em-plan.com

Mitarbeiter: Luis Mahlkecht

Dokument: 888_Bhs_GU_Ersch_DIN4150_LF_2035_20072023.docx

Das vorliegende Gutachten ist geistiges Eigentum von em plan. Das Gutachten ist ausschließlich zur Durchführung des behandelten Vorhabens zu verwenden. Die Weitergabe des Gutachtens oder dessen Vervielfältigung außerhalb des gegenständlichen Vorhabens, auch auszugsweise, ist nur mit unserer ausdrücklichen und schriftlichen Gestattung zulässig.

Inhaltsverzeichnis

1.	Gegenstand der Untersuchung.....	4
2.	Örtlichkeiten, Bauleitplanung und Vorhaben.....	5
2.1	Örtlichkeiten und Bauleitplanung.....	5
2.2	Anlagenplanung.....	8
3.	Prognoseverfahren – VDI 3837.....	10
4.	Beurteilungsgrundlagen.....	13
4.1	Erschütterungen - DIN 4150-2.....	13
4.2	Sekundärer Luftschall.....	15
5.	Anpassungswerte.....	16
6.	Messungen / Auswertegrößen.....	17
6.1	Messorte und Messdatum.....	17
6.2	Messgeräte.....	17
6.3	Messdurchführung.....	17
6.4	Verfahren / KB_{Fmax} - Werte nach DIN 4150-2.....	17
6.5	Übertragungsfunktionen nach VDI 3837.....	18
6.6	Sekundärer Luftschall.....	18
7.	Messergebnisse.....	20
7.1	Messergebnisse Abnahmegleis.....	20
7.2	Messergebnisse Betriebsgleis.....	21
7.3	Übertragungsverhältnisse.....	22
7.4	Übertragungsfunktionen nach VDI 3837.....	22
8.	Zugzahlen.....	24
9.	Oberbau / Regelquerschnitte.....	25
10.	Prognose und Ergebnisbewertung.....	26
11.	Zusammenfassung.....	29
A)	häufig verwendete Abkürzungen.....	30
B)	Anlagenverzeichnis.....	30
C)	Tabellen.....	31
D)	Abbildungen.....	31
E)	Grundlagenverzeichnis.....	32
F)	Regelwerke.....	32

1. Gegenstand der Untersuchung

Die Stadtwerke München GmbH (SWM) planen den Neubau eines Trambetriebshofs an der Ständlerstraße 20.

Im Zuge der Baumaßnahme wird das Anlagengrundstück baulich und verkehrstechnisch überplant und in Richtung Süden bis zur Lauensteinstraße erweitert.

Es wird eine neue Abstellanlage für Trambahnen erstellt. Die Realisierung umfasst eine vorgezogene Abstellung mit einer Teilinbetriebnahme der Anlage in 2027, und einen Endzustand in 2035. Die vorliegende Untersuchung behandelt den Endzustand.

Benachbart zu den Gleisanlagen liegen im erschütterungstechnisch relevanten Nahbereich schutzbedürftige Nutzungen östlich der Anlage an der Traunreuter Straße und südlich der Anlage an der Lauensteinstraße.

Vorliegend ist für die geplante Gleisanlage im Betriebshof eine Erschütterungsprognose für den Prognosehorizont 2035 nach der VDI 3837, Erschütterungen in der Umgebung von oberirdischen Schienenverkehrswegen – Spektrales Prognoseverfahren, zu erstellen und anhand der dafür einschlägigen Norm, der DIN 4150-2, Erschütterungen im Bauwesen – Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden, zu beurteilen.

Zudem ist der durch Erschütterungen verursachte Schall – der sekundäre Luftschall – in den Gebäuden zu prognostizieren und zu beurteilen. Die Beurteilung erfolgt nach Maßgabe der TA Lärm.

Die Randbedingungen, Methoden und Ergebnisse der Untersuchung werden im vorliegenden Bericht dokumentiert.

2. Örtlichkeiten, Bauleitplanung und Vorhaben

2.1 Örtlichkeiten und Bauleitplanung

Der Betriebshof befindet sich an der Ständlerstraße 20 in München.

Das Untersuchungsgebiet ist weitestgehend eben auf einer Höhe von etwa 540 m ü. NN.



Abbildung 1: Luftbild Untersuchungsgebiet, Quelle: Google Earth

Das bestehende Betriebsgelände ist zusammen mit den geplanten Erweiterungsflächen rot umrandet markiert.

Auf der Westseite des Geländes liegen gewerbliche Flächen (im Wesentlichen Recyclingbetriebe), im Südwesten schließt sich ein Friedhof an. Dazwischen verlaufen die S-Bahnstrecken 5551, München Ost – Deisenhofen und 5552, München-Giesing – Kreuzstraße.

Im Süden sind Sportanlagen vorhanden, welche überplant werden, weiter südlich liegt ein reines Wohngebiet an der Lauensteinstraße. Südöstlich befindet sich eine Kleingartenanlage. Im weiteren Verlauf nach Norden bis annähernd zur Ständlerstraße liegt ein reines Wohngebiet an der Traunreuter Straße. Im Nordosten grenzen beiderseits der Ständlerstraße gewerbliche Nutzungen an. Im Nordwesten liegen zwei Punkthochhäuser in einem Mischgebiet.

In der nachstehenden Abbildung ist ein Auszug des amtlichen Flächennutzungsplans der LHM für den Untersuchungsraum dargestellt.

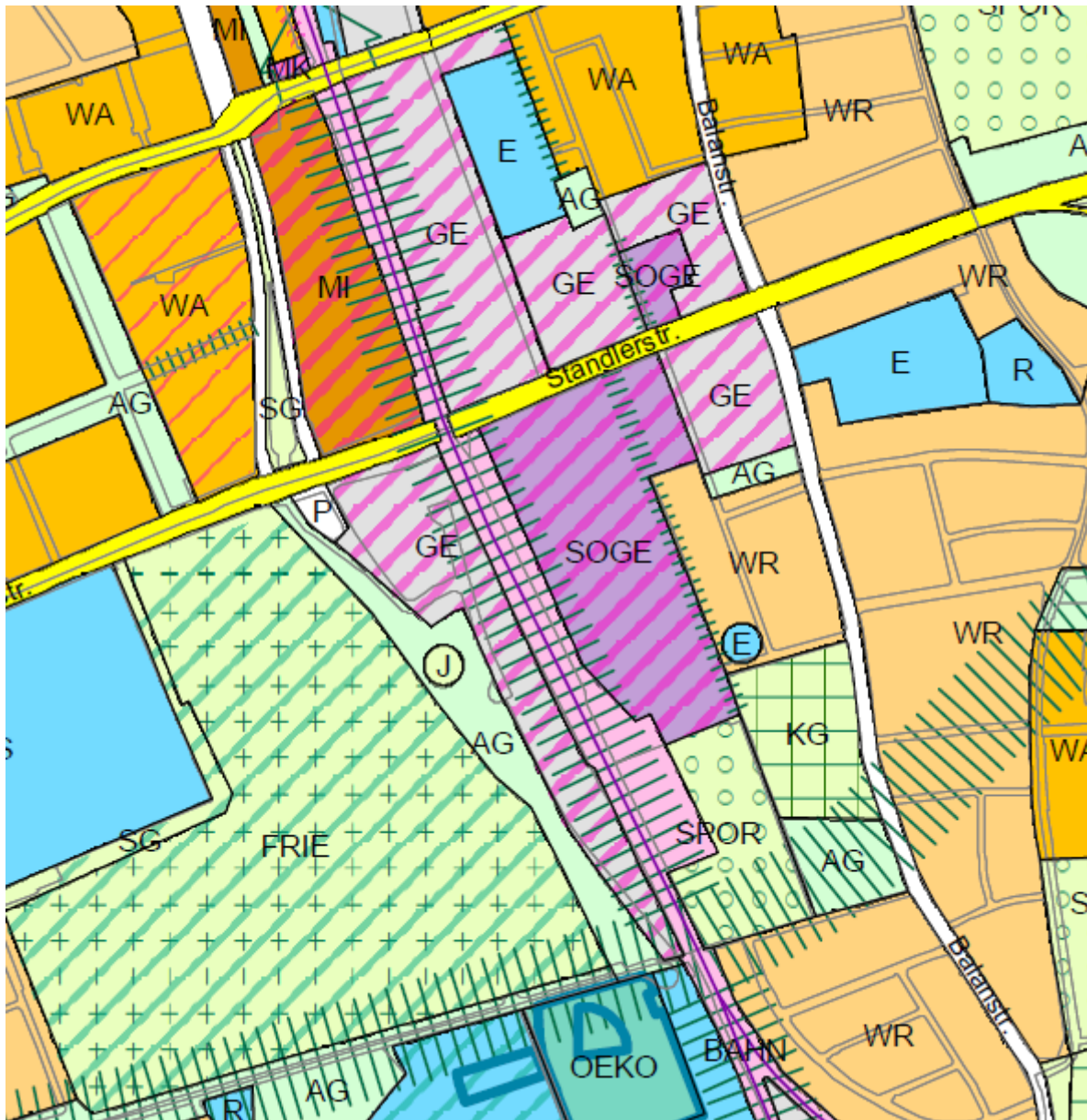


Abbildung 2: Auszug Flächennutzungsplan der LHM, Quelle: Internetauftritt der LHM

Im Untersuchungsraum gelten mehrere Bebauungspläne. Es sind dies im Wesentlichen die Bebauungspläne

- Nr. 1192, Aschauer Straße, Ständlerstraße, Bahnlinie Deisenhofen und Chiemgaustraße aus dem Jahr 1982, Nutzung gemäß BauNVO Gewerbegebiet
- Nr. 1476 Herbert Quandt-Str, Georg-Meisenbach-Straße, Schwannseestraße, Gewerbegebiet, aus dem Jahr 1992
- Nr. 1748, Aschauer Straße, Chiemgaustraße, Paldorffer Straße und Ständlerstraße, Gewerbegebiet, aus dem Jahr 1993



Abbildung 3: derzeit geltende Bebauungspläne im Umgriff des Vorhabens

Der Bebauungsplan A 1936 befindet sich nicht mehr in Aufstellung. Stattdessen wurden dort (lt. FNP Gewerbegebiet) eine Schule sowie Geschosswohnungsbau errichtet.

2.2 Anlagenplanung

Der geplante Zustand definiert sich im Wesentlichen wie folgt:

- Die Anlage dient der Instandsetzung und Abstellung von Fahrzeugen.
- Die Planung geht davon aus, dass im Wesentlichen 8-achsige/4-teilige Niederflur-Fahrzeuge die Anlage befahren werden.
- An der Ostseite der Anlage wird eine Abstellanlage mit 10 Gleisen und einem Durchfahr Gleis errichtet.
- Die Gleisanlagen werden wie bisher über die Ständlerstraße angefahren.
- Die Zufahrt zur Abstellung verläuft über die Westseite des Geländes und die Werkstatt Durchlaufwartung im Süden über die südliche Gleisharfe der Abstellanlage.
- Die Fahrzeuge rücken über die nördliche Gleisharfe der Abstellanlage in das Streckennetz aus.
- Das bestehende Abnahmegleis wird nach durchgeführten Wartungen / Instandsetzungen zur Funktionsprüfung der Fahrzeuge genutzt.

In den nachstehenden Abbildung ist die Anlagenplanung dargestellt. Zur besseren Lesbarkeit ist die Anlage in zwei Planausschnitte aufgeteilt. Grundlage der Darstellung ist der Gleislageplan, Endzustand.

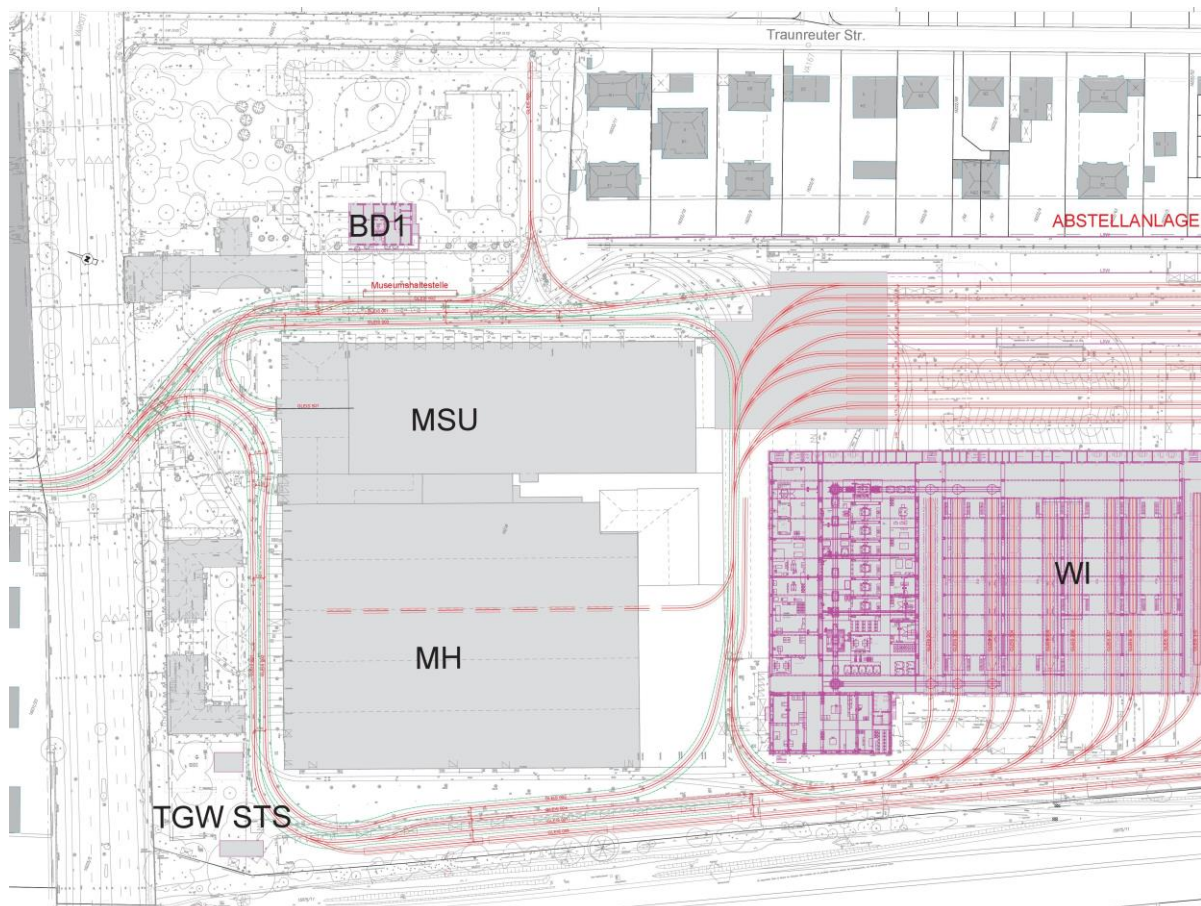


Abbildung 4: Gleislageplan, Endzustand, Teil Nord, 90° gedreht

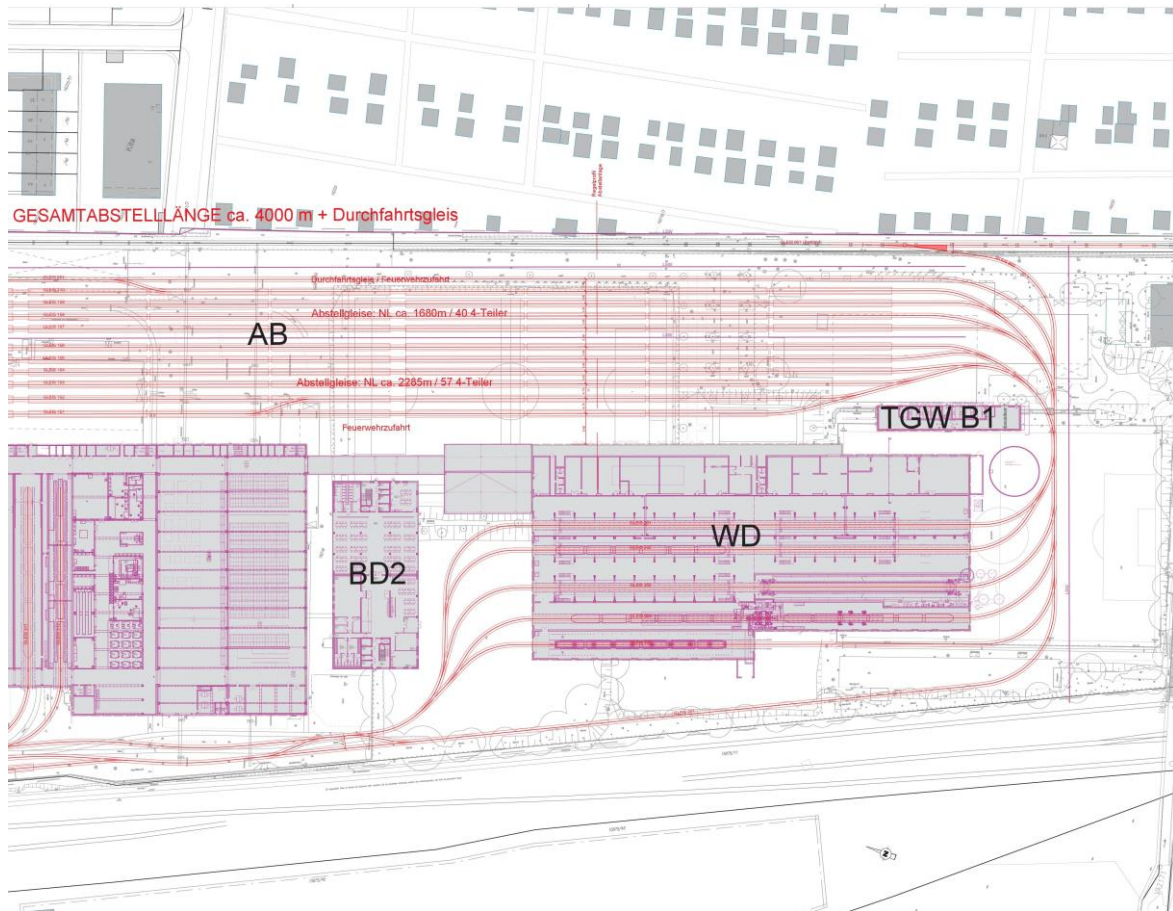


Abbildung 5: Gleislageplan, Endzustand, Teil Süd, 90° gedreht

Die Kartengrundlage der Gleisplanung bildet die Bestandsflurkarte. Die künftige Freianlagenplanung ist nicht dargestellt und für die vorzunehmenden Untersuchungen ohne Belang.

3. Prognoseverfahren – VDI 3837

Die vorgenommene Erschütterungsprognose basiert auf Messungen der vor Art gegebenen Ausbreitungsbedingungen einerseits und andererseits auf der messtechnischen Bestimmung der Emissionsspektren der im Planfall absehbar eingesetzten Trambahnen.

In der VDI 3837 werden grundlegende Abhängigkeiten für die Emission, Transmission und Immission von Erschütterungen aufgezeigt und darauf aufbauend ein spektrales Prognoseverfahren für die Erschütterungen im Frequenzbereich von 4 Hz bis 80 Hz beschrieben, die von oberirdisch geführten Schienenbahnen ausgehen. Das Verfahren kann bei bestehenden oder neu zu errichtenden Strecken angewendet werden.

Die nachstehende Abbildung zeigt schematisch die Vorgehensweise einer Prognose nach VDI 3837.

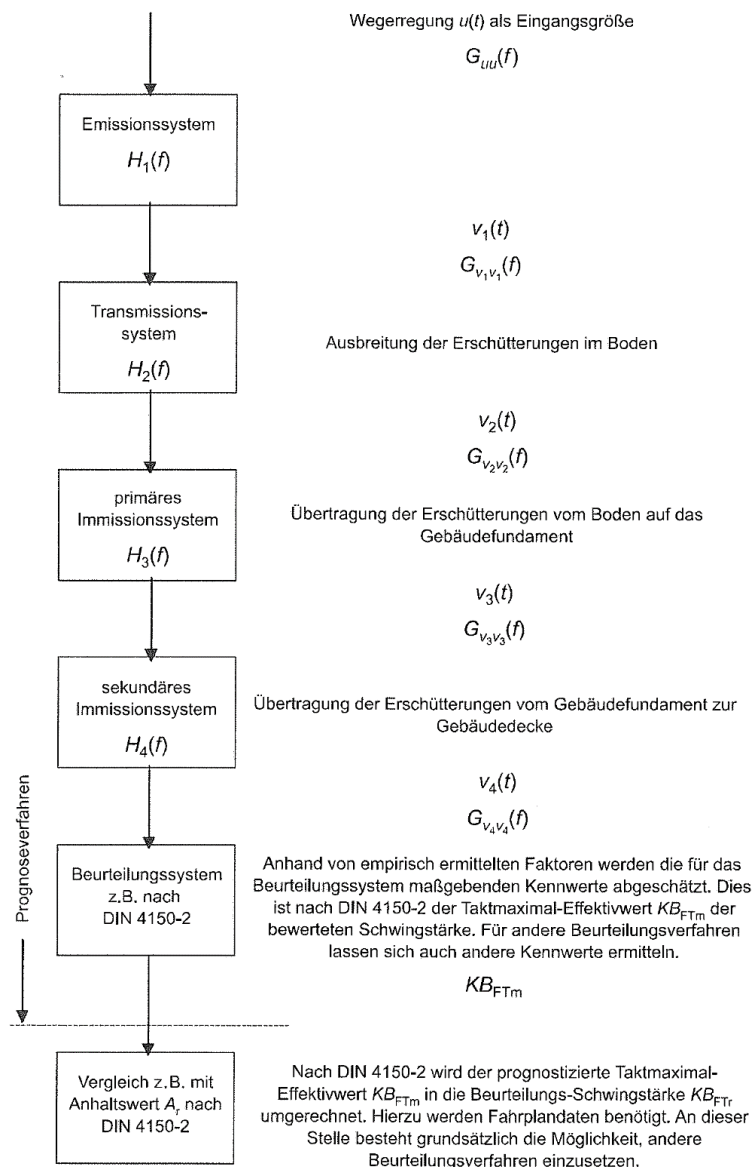


Abbildung 5: Blockschaltbild für das spektrale Prognoseverfahren der VDI 3837

Für die Beurteilung relevant ist die regelmäßige Nutzung der Gleisanlage im Osten und Süden des Grundstücks.

Sie besteht aus dem Abnahmegleis an der östlichen Grundstücksgrenze, es wird zur Funktionsprüfung nach einer Wartung/Instandsetzung befahren, und der 10-gleisigen Abstellanlage westlich parallel zum Abnahmegleis, diese wird durch die ein- und ausrückenden Straßenbahnen befahren.

Darüber hinaus findet im Süden der Anlage eine Umfahrung der Hallenbauten durch einrückende Fahrzeuge aus dem Linienbetrieb und Fahrzeuge des innerbetrieblichen Verkehrs statt.

Die am ehesten von Erschütterungen betroffenen Gebäude befinden sich östlich der Abstellanlage in der Traunreuter Straße und südlich der Anlage an der Lauensteinstraße.

Im Rahmen der Untersuchung wurde das Emissions- und Transmissionssystem

$$H_1(f) \rightarrow H_2(f)$$

messtechnisch durch Erschütterungsmessungen im bestehenden Betriebshof erfasst. Diese erfolgten an einem Betriebsgleis mit ungerader Linienführung nordöstlich der Werkstatt, und am Abnahmegleis.

Es wurden folgend Situationen erfasst:

A) Emissionsseitige Messungen und Messungen im Ausbreitungsquerschnitt:

- Am Betriebsgleis wurden Vorbeifahrten einer 4-teiligen Avenio-Tram bei einer Geschwindigkeit von 5 km/h in einem Abstand von 8 m, 12 m und 16 m erschütterungstechnisch erfasst. Laut Auftraggeber dürfen auf dem Gelände in den Gleisbögen keine höheren Geschwindigkeiten als 5 km/h gefahren werden.
- Das Abnahmegleis wird im Bestand sowie auch zukünftig zur Funktionsprüfung genutzt. Die Messungen erfolgten auf dem Parkplatz nördlich der überplanten Sportanlage. Es wurden senkrecht zum Gleis die Erschütterungseinwirkungen der vorbeifahrenden Tram in den Abständen 8 m, 16 m und 32 m zur Gleisachse gemessen. Die Vorbeifahrten erfolgten mit 10 km/h, 30 km/h, 50 km/h und 60 km/h.

B) Gebäudeübertragungsfunktionen:

Die Übertragungsfunktion vom Boden in die Geschoßdecken

$$H_2(f) \rightarrow H_4(f)$$

wurde bereits im Rahmen von Beweissicherungsmessungen am 20.04. und 02.05.2018 aus dem bestehenden Betrieb in den umliegenden Gebäuden Traunreuter Straße 28a, 42 und Lauensteinstraße 10 anhand von Fahrten und Bremsvorgängen auf dem Abnahmegleis ermittelt.

Für Gebäude ohne Kenntnis der Übertragungsfunktionen, sind in der Richtlinie 820.2050 der Deutsche Bahn AG, statistisch ermittelte Übertragungsfunktionen für Deckenresonanzen zwischen 8 Hz und 80 Hz vom Außenmesspunkt in das OG abgebildet, diese werden hilfsweise für die Untersuchung herangezogen. In Abhängigkeit vom Immissionspektrum am Geländemesspunkt, ist die Übertragungsfunktion zu verwenden, welche zu den höchsten Erschütterungseinwirkungen führt.

Über die spektrale Einleitung der Erschütterungen und die spektralen Übertragungsfunktionen sind in der Folge die zu erwartenden maximalen Schwingschnellen $KB_{F_{max}}$ ermittelt worden. Aus diesen errechnen sich über die Zugfrequenz die Beurteilungsschwingschnellen $KB_{F_{Tr}}$ und der zu erwartende sekundäre Luftschall.

In der Regel kann die Prognose anhand der Übertragungsfunktionen und der verwendeten Emissionsspektren direkt abgebildet werden. Dies ist die Grundlage zur Bestimmung der Bereiche, in denen Überschreitungen der Anhaltswerte wahrscheinlich und erschütterungsmindernde Maßnahmen als erforderlich anzusehen sind.

4. Beurteilungsgrundlagen

4.1 Erschütterungen - DIN 4150-2

Für die Beurteilung von Erschütterungsimmissionen auf Menschen ist die DIN 4150-2, Erschütterungen im Bauwesen, Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden, einschlägig. Darin werden Verfahren (im Zusammenhang mit anderen Normen) für die Ermittlung und die Beurteilung von Erschütterungsimmissionen vorgestellt.

Die DIN 4150-2 nennt Anhaltswerte zur Beurteilung der gemessenen Erschütterungs-Immissionen.

Die Wirkung von Erschütterungen auf Menschen wird anhand der bewerteten Schwingstärke $KB_F(t)$ beurteilt.

Nach DIN 45669 ist die bewertete Schwingstärke $KB_F(t)$ der gleitende Effektivwert des frequenzbewerteten Erschütterungssignals mit der Zeitbewertung FAST (0,125 s).

Die Beurteilung erfolgt gemäß DIN 4150-2 anhand von zwei Beurteilungsgrößen. Der maximalen bewerteten Schwingstärke KB_{Fmax} und der Beurteilungsschwingstärke KB_{FTr} .

KB_{Fmax} ist der maximale, während der Messung auftretende, oder in anderer Weise ermittelte Wert der bewerteten Schwingstärke $KB_F(t)$.

In der Beurteilungsgröße KB_{FTr} wird die Häufigkeit und Dauer der auftretenden Erschütterungsergebnisse berücksichtigt. Sie wird durch das Taktmaximalwertverfahren mit einer Taktzeit von 30 s ermittelt und über Fahrplandaten über den Beurteilungszeitraum (Tag/Nacht) gemittelt.

Die Beurteilungsgrößen sind zu ermitteln und mit den Anhaltswerten der DIN 4150-2 in der nachfolgenden Tabelle 1 zu vergleichen.

- Ist KB_{Fmax} kleiner oder gleich dem (unteren) Anhaltswert A_u , dann ist die Anforderung dieser Norm eingehalten.
- Ist KB_{Fmax} größer als der (obere) Anhaltswert A_o , dann ist die Anforderung dieser Norm nicht eingehalten.
- Für häufige Einwirkungen, bei denen KB_{Fmax} größer als A_u , aber kleiner als A_o ist, ist die Beurteilungsschwingstärke KB_{FTr} mit dem Anhaltswert A_r zu vergleichen. Wird dieser unterschritten, sind die Anforderungen der Norm ebenfalls eingehalten.

Tab. 4-1 Anhaltswerte für Erschütterungs-Immissionen gemäß DIN 4150-2

Zeile	Einwirkungsort	tags			nachts		
		A _u	A _o	A _r	A _u	A _o	A _r
1	Einwirkungsorte in deren Umgebung nur gewerbliche Anlagen und gegebenenfalls ausnahmsweise Wohnungen für Inhaber und Leiter der Betriebe sowie für Aufsichts- und Bereitschaftspersonen untergebracht sind (vergleiche Industriegebiete BauNVO, § 9).	0,4 (0,6)	6	0,2 (0,3)	0,3 (0,45)	0,6	0,15 (0,225)
2	Einwirkungsorte, in deren Umgebung vorwiegend gewerbliche Anlagen untergebracht sind (vergleiche Gewerbegebiete BauNVO, § 8).	0,3 (0,45)	6	0,15 (0,225)	0,2 (0,3)	0,4 (0,6)	0,1 (0,15)
3	Einwirkungsorte, in deren Umgebung weder vorwiegend gewerbliche Anlagen noch vorwiegend Wohnungen untergebracht sind (vergleiche Kerngebiete BauNVO, § 7, Mischgebiete BauNVO, § 6, Dorfgebiete BauNVO, § 5).	0,2 (0,3)	5	0,1 (0,15)	0,15 (0,225)	0,3 (0,6)	0,07 (0,105)
4	Einwirkungsorte, in deren Umgebung vorwiegend oder ausschließlich Wohnungen untergebracht sind (vergleiche reine Wohngebiete BauNVO, § 3, allgemeine Wohngebiete BauNVO, § 4, Kleinsiedlungsgebiete BauNVO, § 2).	0,15 (0,225)	3	0,07 (0,105)	0,1 (0,15)	0,2 (0,6)	0,05 (0,075)
5	Besonders schutzbedürftige Einwirkungsorte, z. B in Krankenhäusern, Kurkliniken, soweit sie in dafür ausgewiesenen Sondergebieten liegen.	0,1 (0,15)	3	0,05 (0,075)	0,1 (0,15)	0,15 (0,6)	0,05 (0,075)

Für oberirdischen Schienenverkehr gilt gemäß DIN 4150-2 eine Sonderregelung. Der obere Anhaltswert A_o ist unabhängig von der Gebietsausweisung nachts mit 0,6 anzusetzen. Des Weiteren gilt nach DIN 4150-2 für den ÖPNV in der Verkehrswegeplanung ein um den Faktor 1,5 angehobener Wert für A_u und A_r (vgl. Werte in Klammern in Tab. 4-1). Die DIN 4150-2 unterscheidet hierbei nicht nach Widmungen der Gleisanlagen.

Generell ist zu berücksichtigen, dass die Anhaltswerte indikatorischen Charakter haben und eine Beurteilung jeweils im Einzelfall - auch unter Berücksichtigung der Messunsicherheit - zu erfolgen hat.

In den Erläuterungen zur Norm werden Zusammenhänge zwischen bewerteten Schwingstärken und subjektiver Wahrnehmung angegeben. Die folgende Tabelle beschreibt diesen Zusammenhang:

Tab. 4-2 Wahrnehmung von Erschütterungen

KB-Werte	Beschreibung der Wahrnehmung
< 0,1	nicht spürbar
0,1	Fühlschwelle
0,1 - 0,4	gerade spürbar
0,4 - 1,6	gut spürbar
1,6 - 6,3	stark spürbar

4.2 Sekundärer Luftschall

Der sekundäre Luftschall wird durch Schwingungen der Umfassungsbauteile von Gebäuden bzw. Räumen verursacht. Dieser wird, sofern nicht durch Tunnel oder Lärmschutzanlagen abgeschirmt, durch den Primärluftschall überlagert und ist im Regelfall nicht direkt messbar. Die Gebäude werden durch vorbeifahrende Züge zum Schwingen angeregt, die Intensität nimmt vom Gleis aus mit zunehmendem Abstand zum Gebäude ab.

Für die Anforderungen an den sekundären Luftschall sind im Kontext mit Anlagen die Anforderungen der TA Lärm zu beachten. Darin ist geregelt:

„Bei Geräuschübertragungen innerhalb von Gebäuden oder bei Körperschallübertragung betragen die Immissionsrichtwerte für den Beurteilungspegel für betriebsfremde schutzbedürftige Räume nach DIN 4109, Ausgabe November 1989, unabhängig von der Lage des Gebäudes in einem der in Nummer 6.1 unter Buchstaben a bis g genannten Gebiete

tags 35 dB(A)

nachts 25 dB(A).

Einzelne kurzzeitige Geräuschspitzen dürfen die Immissionsrichtwerte um nicht mehr als 10 dB(A) überschreiten.“

5. Anpassungswerte

Für die Untersuchung wurden, wie bereits beschrieben, die Erschütterungseinwirkungen durch Vorbeifahrten auf einem Betriebsgleis und am Abnahmegleis für die Bandbreite der gefahrenen Geschwindigkeiten messtechnisch erfasst.

Es liegen somit in sämtlichen relevanten Geschwindigkeitsbereiche Messergebnisse vor, eine Geschwindigkeitskorrektur ist nicht erforderlich.

Für die Abstände der Immissionsorte zu den jeweiligen Gleisen erfolgt aus der Empirie eine Korrektur nach dem folgenden Verfahren:

$$KB_{Gleis} = KB_{Messpunkt} \cdot \eta_{Abstand}$$

Die Abnahme der Schwingschnelle mit dem Abstand geht reziprok unter der Wurzel ein.

$$\eta_{Abstand} = \sqrt{\frac{\text{Abstand}_{\text{ist}}}{\text{Abstand}_{\text{soll}}}}$$

Die Ausbreitungsmessungen in unterschiedlichen Abständen dienen der Kontrolle obigen Ansatzes. Wie im Weiteren dokumentiert wird der Ansatz durch die Messungen im Ausbreitungsquerschnitt grundsätzlich bestätigt und kann damit in der örtlichen Situation Anwendung finden.

6. Messungen / Auswertegrößen

6.1 Messorte und Messdatum

Die Örtlichkeiten sind den Lageplänen in der Anlage 1 und der Fotodokumentation in der Anlage 2 zu entnehmen. Die Messungen wurden am 14.12.2022 in der Zeit von etwa 9:15 bis 12:15 Uhr an einem Betriebsgleis, am Abnahmegleis und in der Lauensteinstraße durchgeführt. Die genaue Lage kann den o. g. Anlagen entnommen werden

6.2 Messgeräte

Für die Messung wurden folgende Geräte bzw. Programme verwendet.

Tab. 6-1 eingesetzte Messtechnik

Gerät / Programm	Typ	Hersteller	Seriennummer
4x Beschleunigungsaufnehmer	KS 48C	Metra Mess- u. Frequenztechnik	10171, 10111, 10109, 10107
Messgerät	SoundBook Quadro	Sinus Messtechnik GmbH	6308
SAMURAI	3.0	Sinus Messtechnik GmbH	---

Die Ankopplung der Sensoren an den Untergrund erfolgte fallweise über Dreifußbodenplatten, Magnetankopplung und im gewachsenen Boden über Erdnägel.

6.3 Messdurchführung

Zur Durchführung der Messungen wurde seitens der SWM eine 8-achsige Avenio-Tram mit Fahrer zur Verfügung gestellt.

Nach Abstimmung wurden jeweils mehrere Fahrten auf dem Bremsgleis mit konstanter Geschwindigkeit durchgeführt. Der Messquerschnitt lag in etwa in der Mitte des Abnahmegleises, womit eine konstante Fahrgeschwindigkeit ohne Beschleunigungs- oder Verzögerungsvorgang sichergestellt war.

Analog wurde am Betriebsgleis verfahren, wobei aus betrieblichen Gründen maximal 5 km/h gefahren werden konnte.

6.4 Verfahren / KB_{Fmax} - Werte nach DIN 4150-2

Messtechnisch erfolgt die Bestimmung der Erschütterungsimmissionen nach DIN 4150-2 durch die Messung der Schwingbeschleunigung mit Hilfe von Beschleunigungssensoren während Trambahnvorbeifahrten an den jeweils erforderlichen Messpunkten.

Der Referenzmesspunkt für das Emissionsspektrum eines Zuges liegt hierbei in 8 m Abstand zur Gleisachse.

Aus der gemessenen Schwingbeschleunigung wird durch Integration das unbewertete Erschütterungssignal (Schnellesignal) nach DIN 45669 im Frequenzbereich von 1 bis 315 Hz ermittelt. Aus

dem weiter von 4 bis 80 Hz bandpassgefilterten und KB-bewerteten Schnellesignal ist nach der Bildung des gleitenden Effektivwerts mit der Zeitkonstante 0,125 s der Maximalwert in der Taktzeit von 30 s zu ermitteln. Das Ergebnis entspricht dem $KB_{F_{max}}$ einer Zugvorbeifahrt.

Analog wird die Abnahme der Schwingbeschleunigungen im Ausbreitungsquerschnitt bestimmt. In dem Zug wird anhand der örtlichen Möglichkeiten in unterschiedlichen Abständen zum Gleis simultan zur Emissionsmessung am 8-m-Punkt die Schwinggeschwindigkeit gemessen. Anhand der Messergebnisse wird der Prognoseansatz für die entfernungsbedingte Abnahme der Erschütterungen im Ausbreitungsweg validiert.

6.5 Übertragungsfunktionen nach VDI 3837

Der Begriff Übertragungsfunktion meint im vorliegenden Fall die Einleitung von Erschütterungen, welche vor einem Gebäude auftreten, in das Fundament und die Übertragung vom Fundament in die Obergeschosse in spektraler Darstellung. Hierüber werden Energieverluste bei der Transmission einerseits, und Verstärkungseffekte, etwa durch Deckenresonanzen andererseits, beschrieben.

Die Übertragungsfunktionen liegen für die Gebäude Traunreuter Str. 28a und 42 sowie Lauensteinstraße 10 aus Beweissicherungsmessungen aus 2018 vor.

Für alle anderen Fälle wird, wie bereits ausgeführt, der Leitfaden der DB AG, Richtlinie 820.2050, Erschütterungen und sekundärer Luftschall, herangezogen. Dieser stellt für unbekannte Übertragungsverhältnisse Transmissionsspektren zur Verfügung, anhand derer in Abhängigkeit vom Anregespektrum der jeweils ungünstigste Fall für ein Gebäude bestimmt werden kann. Dieser tritt dann ein, wenn durch die baulichen Umstände eines Gebäudes dieses exakt in seinem Schwingverhalten zum Anregespektrum korrespondiert und in der Konsequenz die Schwingantwort die Maximale ist, die sich bei einer gegebenen Anregung herleiten lässt. Dies ist in der Folge die Beurteilungsgrundlage, ob vorsorglich Erschütterungsschutzmaßnahmen notwendig werden.

6.6 Sekundärer Luftschall

Die im Rahmen der Prognose ermittelten Terzschnellespektren an den Prognosepunkten (Gebäuden) bilden die Grundlage für das spektrale Prognoseverfahren des sekundären Luftschalls.

Die entstehenden Schallpegel werden nach Norm im Frequenzband von 25 bis 315 Hz berechnet.

Die Terz-Schnelle-Spektren werden in Dezibel umgerechnet und A-bewertet (L_{VA}). Aus dem energetisch aufsummierten Terzspektrum ist nach folgenden Beziehungen der resultierende sekundäre Luftschallpegel (L_{sek}) zu berechnen:

Betondecke:

$$L_{sek} = 15,8 \text{ dB(A)} + 0,60 L_{VA}$$

Holzbalkendecke:

$$L_{sek} = 19,9 \text{ dB(A)} + 0,47 L_{VA}$$

Aus der Vorbeifahrtzeit und der Häufigkeit der Vorbeifahrten der Trambahnen werden getrennt für den Tag- und Nachtzeitraum die Beurteilungspegel in den Gebäuden gebildet. Im konservativen Sinn werden als Eingangsspektren die ermittelten Max-hold-Spektren verwendet.

Die nach den o. a. Gleichungen ermittelten Sekundärschallpegel sind in den Anlagen zusammengestellt.

7. Messergebnisse

7.1 Messergebnisse Abnahmegleis

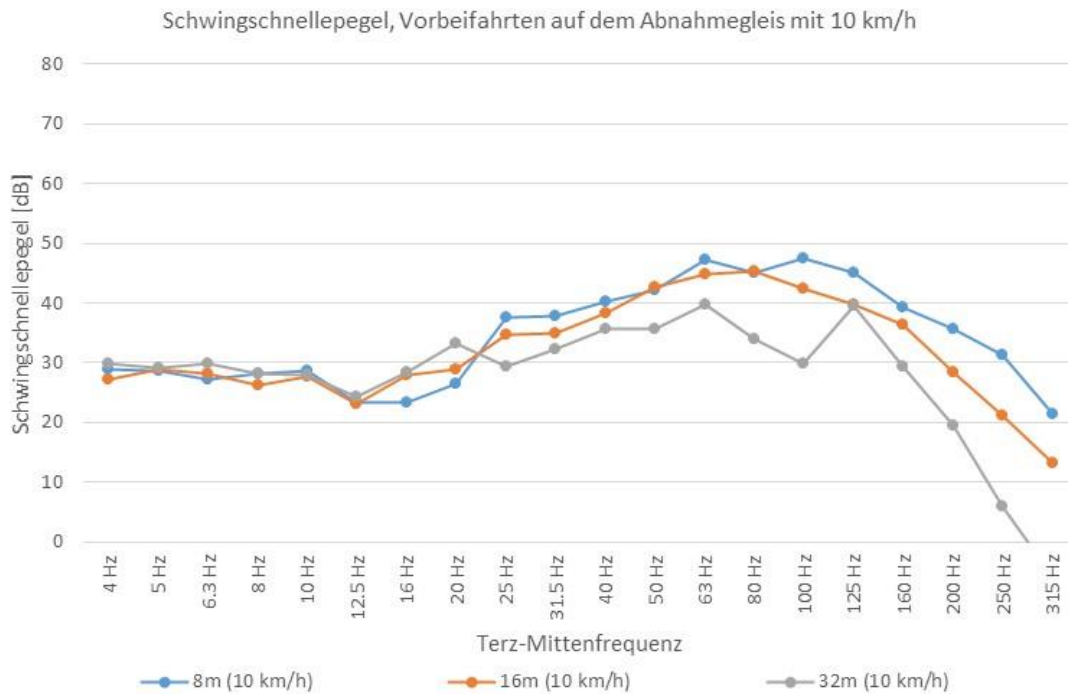


Abbildung 6: Schwingschnellepegel am Abnahmegleis bei 10 km/h

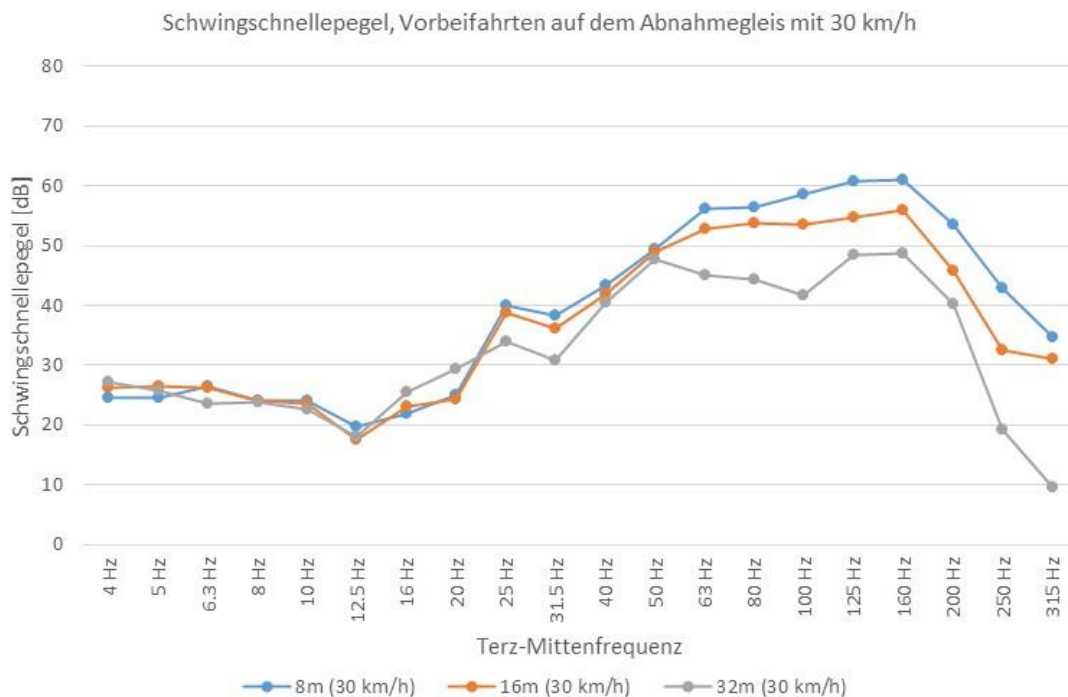


Abbildung 7: Schwingschnellepegel am Abnahmegleis bei 30 km/h

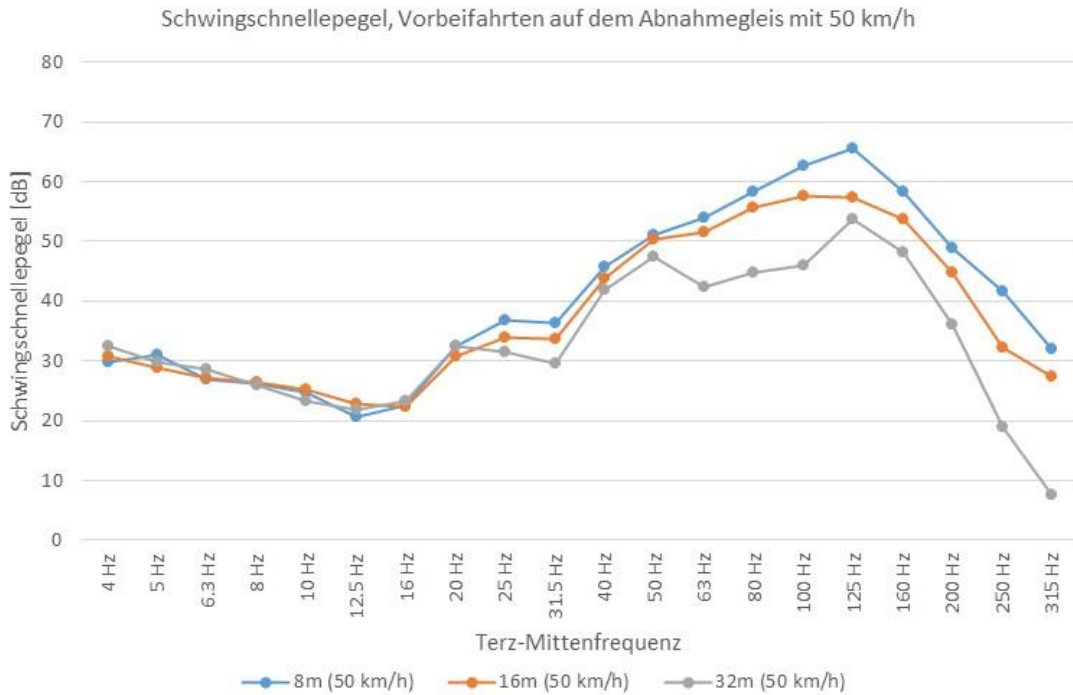


Abbildung 8: Schwingschnellepegel am Abnahmegleis bei 50 km/h

7.2 Messergebnisse Betriebsgleis

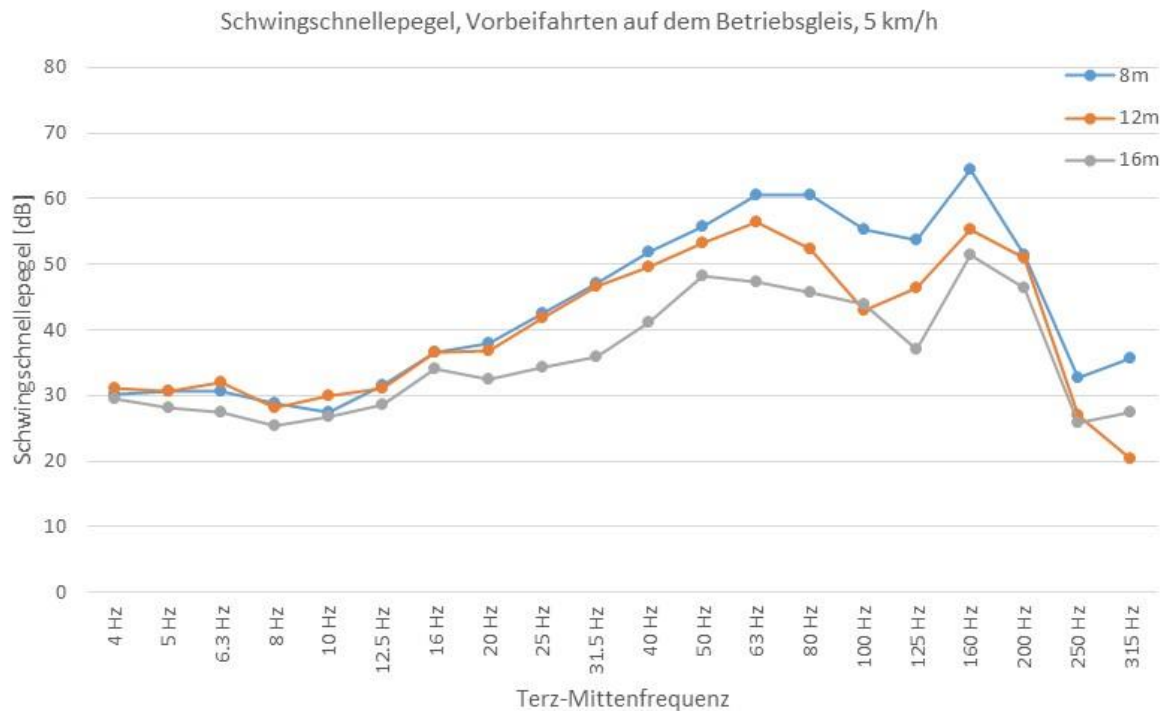


Abbildung 9: Schwingschnellespektren am Betriebsgleis

7.3 Übertragungsverhältnisse

Die abstandsbedingte Abnahme der Erschütterungen konnte im Rahmen der gegebenen Platzverhältnisse spektral am Abnahmegleis bestimmt werden.

Die entfernungsbedingte Abnahme wird nachstehend als Verhältnis der gemessenen Schwinggeschwindigkeiten in Bezug auf den Emissionsmesspunkt in 8 m angegeben. Die angegebenen Werte sind Mittelwerte über alle gemessenen Geschwindigkeiten.

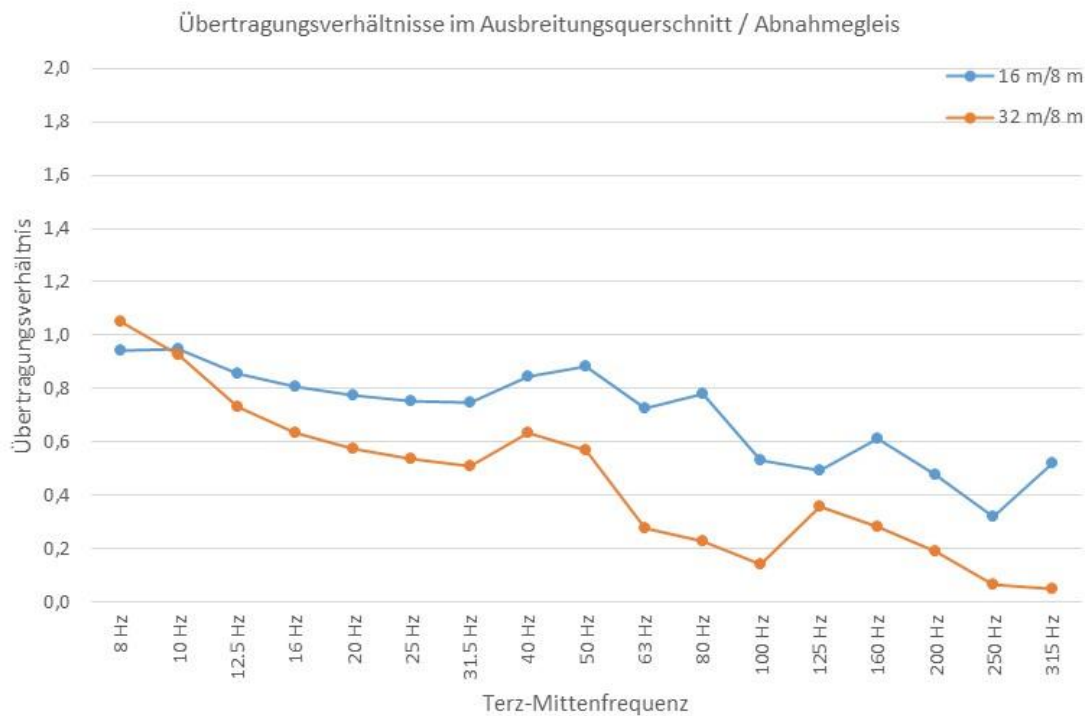


Abbildung 10: Übertragungsverhältnisse im Ausbreitungsquerschnitt

Die Abnahme liegt mithin im Mittel bei etwa Faktor 0,7 bei Abstandsverdopplung und 0,5 bei einer Vervierfachung des Abstands, womit sich der empirische Ansatz zur Bestimmung der abstandsbedingten Abnahme für die vorliegende Situation gut bestätigt.

7.4 Übertragungsfunktionen nach VDI 3837

Die im Jahr 2018 bestimmten Übertragungsverhältnisse in den Wohngebäuden Traunreuter Straße 28a, 42 und Lauensteinstraße 10 sowie die Übertragungsfunktion der Richtlinie 820.2050 bei einer Deckenresonanz von 25 Hz sind in der nachstehenden Grafik abgebildet. Letztere ist gewählt, da sich mit dieser bei dem gegebenen Spektrum der Trambahnfahrten die höchsten zu erwartenden Schwingantworten von Geschossdecken ergeben.

An der Traunreuter Straße 28a wurde eine außergewöhnlich hohe Schwingantwort im OG im Vergleich zur Einleitung vor dem Gebäude gemessen. Vorsorglich wird die in der nachstehenden Grafik dargestellte Prognosekurve des DB-Leitfadens um den Faktor 1,5 in der Berechnung angehoben, um entsprechenden Eventualitäten an nicht gemessenen Gebäuden an der Traunreuter Straße vorzubeugen. Die Betrachtung ist insofern konservativ, als eine mögliche Resonanzüberhöhung dem Grunde nach durch einen zweifachen Sicherheitszuschlag berücksichtigt wird.

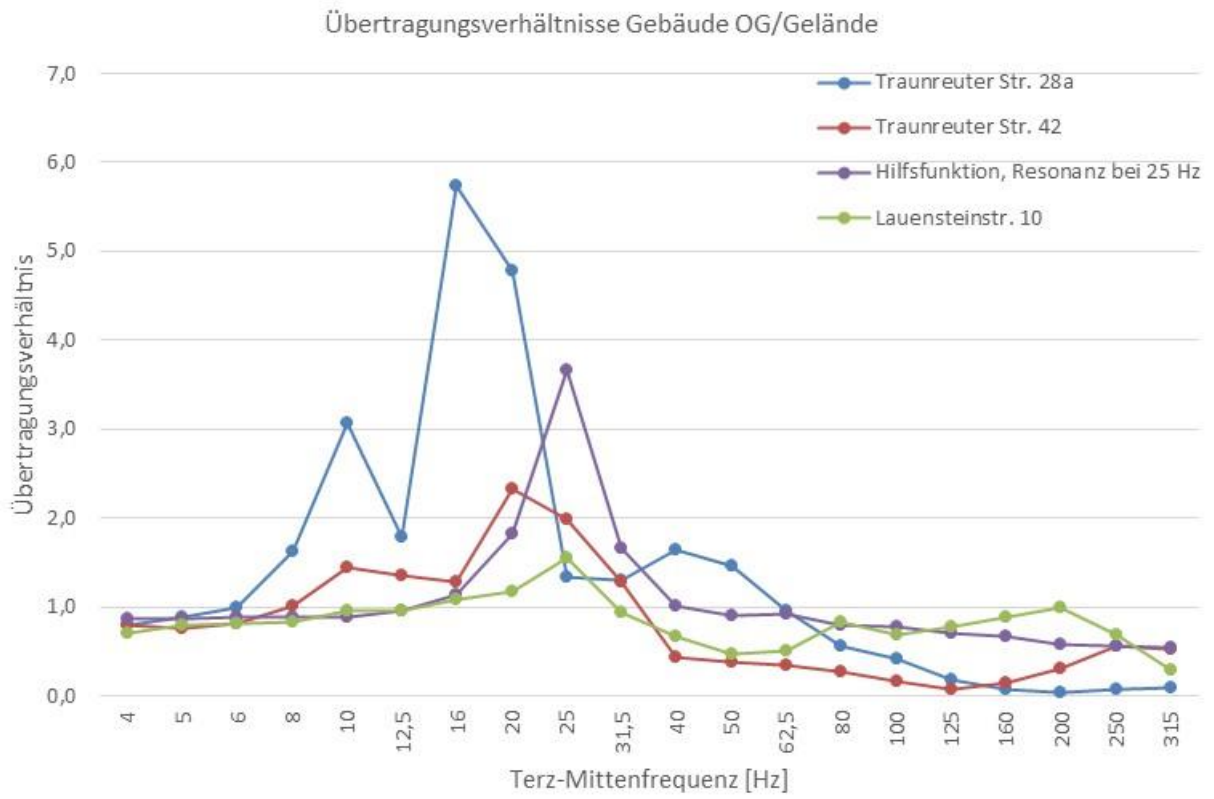


Abbildung 11: Übertragungsfunktionen Gebäude OG/Gelände

8. Zugzahlen

Für die Berechnung der Beurteilungsschwingstärke KB_{FTT} und des sekundären Luftschallpegels L_{sek} im Ausbauzustand wurde vom Auftraggeber im Rahmen der Betriebsbeschreibung folgendes Verkehrsmengengerüst zur Verfügung gestellt.

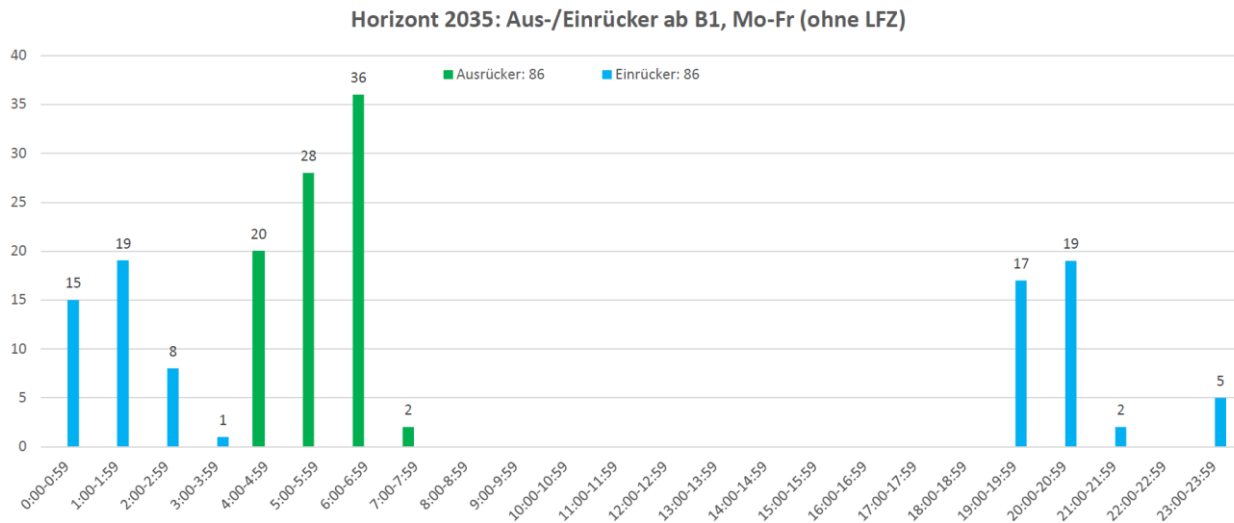


Abbildung 12: Tram-Verkehre im Betriebshof, Prognose-Planfall 2035 (Quelle: SWM)

Hinzuzurechnen sind diverse innerbetriebliche Fahrten zu den Werkstätten und dem Abnahmegleis.

Zur Berechnung der Beurteilungsschwingstärken und des sekundären Luftschalls werden folgende Zahlen in Ansatz gebracht:

Prognose-Planfall 2035

- Abnahmegleis (602)
 - tags 3 x 34 Fahrten, Prüfbetrieb (3 Zyklen mit 17 Fahrten in beide Richtungen)
 - tags 16 Fahrten, Abstellung (8 Fahrten in beide Richtungen)
- Durchfahrgleis (1)
 - keine regelmäßigen Fahrten
- Gleisfeld (101 – 110)
 - tags 76 Fahrten, Ein-/Ausrucker (verteilt auf alle Gleise)
 - tags 20 Fahrten, WD (verteilt auf alle Gleise)
 - tags 3 Fahrten, WD -> Abnahmegleis
 - nachts 96 Fahrten, Ein-/Ausrucker (verteilt auf alle Gleise)
 - nachts 64 Fahrten, WD (verteilt auf alle Gleise)

Gemäß Betriebskonzept handelte es sich hierbei um 4-teilige Züge mit 8 Achsen und einer Länge von rund 37 m.

9. Oberbau / Regelquerschnitte

Als künftiger Oberbau ist für die neuen Gleisanlagen partiell das System RHEDA CITY vorgesehen, in der Abstellanlage Betonschwelengleise im Schotterbett auf Planum.

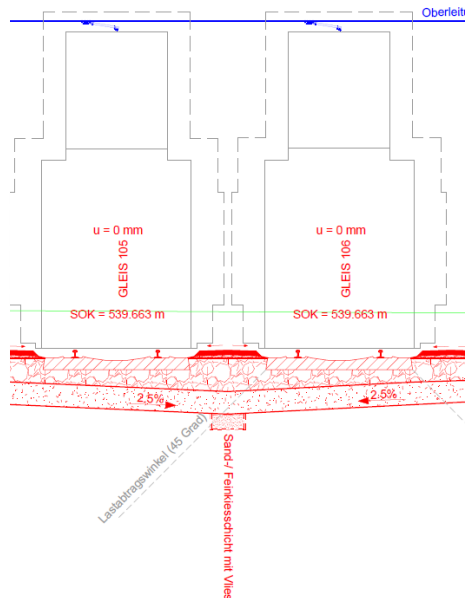


Abbildung 13: Regelquerschnitt im Bereich der Abstellanlage

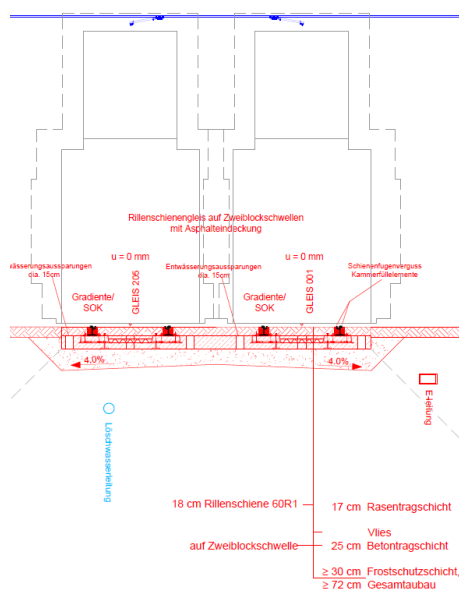


Abbildung 14: Regelquerschnitt im Bereich der Südumfahrung

Der Aufbau in der Abstellung entspricht dem des heutigen Abnahmegleises. Beim System RHEDA CITY handelt es sich im Prinzip um ein Betonschwelengleis in einer Betontragplatte auf Planum. Im Vergleich zu einem konventionellen Schwelengleis findet mithin einerseits ein gleichmäßigerer Lastabtrag in den Untergrund statt, andererseits fehlt der Schotterkegel als Dämpfungselement bzw. Feder im Schwingungssystem. Ansonsten ist das System einem Schwelengleis im Schotterbett in erster Näherung vergleichbar. Empirisch wirkt der Schotterkegel nur in nachrangigem Maß als Dämpfungsglied im Oberbau. Die unterschiedliche Ausführung der Oberbauten ist daher ohne Relevanz für die Genauigkeit der Prognose.

10. Prognose und Ergebnisbewertung

Es wurde für insgesamt neun Gebäude eine Erschütterungsprognose vorgenommen. Deren Lage ist den Anlagen 3.1 und 3.2 zu entnehmen.

Das Abnahmegleis wird nach Auskunft des Betriebshofs mit maximal 50 km/h befahren. An Prognosepunkten an der Gleisenden wird mit 30 km/h gerechnet. Für die Gleise der Abstellanlage gilt eine maximal zulässige Geschwindigkeit von 25 km/h. Gerechnet wird mit dem Emissionsspektrum für 30 km/h. Für Immissionsorte im Bereich der Gleisharfen wird ein Sicherheitszuschlag von Faktor 1,5 vergeben. Ebenso für die Gebäudeübertragungsfunktionen von Gebäuden an der Traunreuter Straße, deren Übertragungsfunktion nicht gemessen wurde.

An der Lauensteinstraße fahren die Züge in einer Rasengleiseindeckung mit maximal 25 km/h. Es wird dort das geschwindigkeitskorrigierte Emissionsspektrum des Abnahmegleises bei 30 km/h herangezogen. Zur Berücksichtigung der Radien in den Gleisbögen wird ein Sicherheitsfaktor von 1,5 zusätzlich eingerechnet.

In den nachstehenden Tabellen sind die Ergebnisse der Erschütterungsprognose und der Prognose des sekundären Luftschalls für alle untersuchten Gebäude zusammengefasst.

Tab. 10-1 Prognose Erschütterungen

Nr.	Gebäude	Nutzung	SW	Anhaltswerte						Prognosewerte				Differenz zu A_u , A_r			
				A_u		A_o		A_r		KB_{Fmax}		KB_{FTr}		KB_{Fmax}		KB_{FTr}	
				T	N	T	N	T	N	T/N	T	N	T	N	T	N	
1	Traunreuter Str. 20a	W	OG	0,23	0,15	3	0,6	0,105	0,075	0,05	0,01	0,01	-0,17	-0,10	-0,09	-0,06	
2	Traunreuter Str. 28a	W	OG	0,23	0,15	3	0,6	0,105	0,075	0,04	0,01	0,01	-0,19	-0,11	-0,10	-0,07	
3	Traunreuter Str. 32	W	OG	0,23	0,15	3	0,6	0,105	0,075	0,05	0,01	0,01	-0,17	-0,10	-0,09	-0,06	
4	Traunreuter Str. 44	W	OG	0,23	0,15	3	0,6	0,105	0,075	0,01	0,00	0,00	-0,21	-0,14	-0,10	-0,07	
5	Kleingarten	W	EG	0,23	0,15	3	0,6	0,105	0,075	0,07	0,02	0,01	-0,16	-0,08	-0,09	-0,07	
6	Frankenwaldstr. 2	W	OG	0,23	0,15	3	0,6	0,105	0,075	0,02	0,00	0,01	-0,20	-0,13	-0,10	-0,07	
7	Lauensteinstr. 2	W	OG	0,23	0,15	3	0,6	0,105	0,075	0,02	0,00	0,01	-0,20	-0,13	-0,10	-0,07	
8	Lauensteinstr. 4	W	OG	0,23	0,15	3	0,6	0,105	0,075	0,02	0,00	0,01	-0,21	-0,13	-0,10	-0,07	
9	Lauensteinstr. 10	W	OG	0,23	0,15	3	0,6	0,105	0,075	0,01	0,00	0,01	-0,21	-0,14	-0,10	-0,07	

Die Prognosewerte zeigen, dass bei den gegebenen Abständen, den lokalen Übertragungsverhältnissen und den Emissionen der Trambahnen mit großer Sicherheit die unteren Anhaltswerte der DIN 4150-2 eingehalten sind. Für die Prognosepunkte wäre mithin eine Berechnung der Beurteilungsschwingstärke KB_{FTr} nicht erforderlich. Auch unter diesem Kriterium, das die Häufigkeit der auftretenden Erschütterungsereignisse berücksichtigt, sind die Anforderungen an allen Prognosepunkten eingehalten.

Die Sachlage zu den Sekundärschalleinwirkungen stellt sich wie folgt dar:

Tab. 10-2 Prognose sekundärer Luftschall, Tag und lauteste Nachtstunde

Nr.	Gebäude	Nutzung	SW	IRW L _{sek}		L _{sek}		Differenz	
				in dB(A)					
				Tag	Nacht	Tag	lauteste Nachtstunde	Tag	lauteste Nachtstunde
1	Traunreuter Str. 20a	W	OG	35	25	17,6	18,9	-17,4	-6,1
2	Traunreuter Str. 28a	W	OG	35	25	13,5	16,3	-21,5	-8,7
3	Traunreuter Str. 32	W	OG	35	25	16,6	19,2	-18,4	-5,8
4	Traunreuter Str. 44	W	OG	35	25	9,1	11,7	-25,9	-13,3
5	Kleingarten	W	EG	35	25	-	-	-	-
6	Frankenwaldstr. 2	W	OG	35	25	10,4	17,3	-24,6	-7,7
7	Lauensteinstr. 2	W	OG	35	25	9,6	16,6	-25,4	-8,4
8	Lauensteinstr. 4	W	OG	35	25	9,6	16,6	-25,4	-8,4
9	Lauensteinstr. 10	W	OG	35	25	9,5	16,4	-25,5	-8,6

* kann nicht belastbar angegeben werden

Die auftretenden Sekundärschallpegel betragen tags 17,6 dB(A) und in der lautesten Nachtstunde 19,2 dB(A). Die Anforderungen an den sekundären Luftschall sind tags und nachts bezüglich des Beurteilungspegels eingehalten.

Tab. 10-3 Prognose sekundärer Luftschall, Spitzenpegel

Nr.	Gebäude	Nutzung	SW	IRW L _{sek, max}		L _{sek, max}		Differenz	
				in dB(A)					
				Tag	Nacht	Tag	Nacht	Tag	Nacht
1	Traunreuter Str. 20a	W	OG	45	35	36,5	34,5	-8,5	-0,5
2	Traunreuter Str. 28a	W	OG	45	35	33,9	31,9	-11,1	-3,1
3	Traunreuter Str. 32	W	OG	45	35	37,1	34,8	-7,9	-0,2
4	Traunreuter Str. 44	W	OG	45	35	29,6	27,3	-15,4	-7,7
5	Kleingarten	W	EG	45	35	-	-	-	-
6	Frankenwaldstr. 2	W	OG	45	35	32,9	32,9	-12,1	-2,1
7	Lauensteinstr. 2	W	OG	45	35	32,1	32,1	-12,9	-2,9
8	Lauensteinstr. 4	W	OG	45	35	32,1	32,1	-12,9	-2,9
9	Lauensteinstr. 10	W	OG	45	35	32,0	32,0	-13,0	-3,0

* kann nicht belastbar angegeben werden

Die maximalen Spitzenpegel bei Einzelvorbeifahrten ergeben sich zu 37,1 dB(A) tags und zu 34,8 dB(A) nachts. Die Anforderungen an das Spitzenpegelkriterium der TA Lärm sind eingehalten.

11. Zusammenfassung

Die Stadtwerke München GmbH (SWM) planen den Neubau eines Trambetriebshofs an der Ständlerstraße 20.

Im Zuge der Baumaßnahme wird das Anlagengrundstück baulich und verkehrstechnisch überplant und in Richtung Süden bis zur Lauensteinstraße erweitert.

Es wird eine neue Abstellanlage für Trambahnen erstellt. Die Realisierung umfasst eine vorgezogene Abstellung mit einer Teilinbetriebnahme der Anlage in 2027, und einen Endzustand in 2035. Die vorliegende Untersuchung behandelt den Endzustand.

Benachbart zu den Gleisanlagen liegen im erschütterungstechnisch relevanten Nahbereich schutzbedürftige Nutzungen östlich der Anlage an der Traunreuter Straße und südlich der Anlage an der Lauensteinstraße.

Es war für die geplante Gleisanlage im Betriebshof eine Erschütterungsprognose für den Prognosehorizont 2035 nach der VDI 3837, Erschütterungen in der Umgebung von oberirdischen Schienenverkehrswegen – Spektrales Prognoseverfahren, zu erstellen und nach DIN 4150-2, Erschütterungen im Bauwesen – Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden, zu beurteilen.

Zudem war der durch Erschütterungen verursachte sekundäre Luftschall in den Gebäuden zu prognostizieren und zu beurteilen. Die Beurteilung erfolgte nach Maßgabe der TA Lärm.

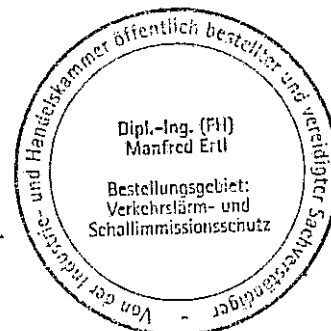
Die Untersuchung kommt zu folgenden Ergebnissen:

1. Die Erschütterungsprognose kommt zu dem Resultat, dass die Anhaltswerte der heranzuziehenden DIN 4150-2 bezüglich der Erschütterungseinwirkungen auf Menschen eingehalten werden.
2. Die Immissionsrichtwerte für sekundären Luftschall der TA Lärm werden nach der vorliegenden Prognose sowohl tags, als auch in der lautesten Nachtstunde eingehalten. Dies gilt ebenso für die auftretenden Spitzenpegel bei einzelnen Vorbeifahrereignissen.

Minderungsmaßnahmen zum Erschütterungsschutz werden nicht erforderlich.

Augsburg, 20.07.2023

Dipl.-Ing. (FH) M. Ertl



A) häufig verwendete Abkürzungen

A_o	oberer Anhaltswert nach DIN 4150-2
A_r	Anhaltswert für die Beurteilungsschwingstärke nach DIN 4150-2
A_u	unterer Anhaltswert nach DIN 4150-2
G	Gebietsnutzung: Gewerbegebiet
H	Übertragungsfunktion
IRW	Immissionsrichtwert nach TA Lärm
L_{sek}	sekundärer Luftschallpegel in dB(A)
M	Gebietsnutzung: Mischgebiet
N	Nachtzeitraum
KB_{Fmax}	Maximale KB-bewertete Schwingschnelle (30 s Taktmaximalverfahren)
KB_{Ftr}	Beurteilungsschwingstärke
OG	Obergeschoss
T	Tagzeitraum
WA	Gebietsnutzung: allgemeines Wohngebiet
WR	Gebietsnutzung: reines Wohngebiet
x / y / z	Messrichtung, x / y = horizontal, z = vertikal

B) Anlagenverzeichnis

Anlage Nr.	Art	Inhalt
1.1-1.3	Lagepläne	Übersichtslagepläne Messungen
2	Abbildungen	Fotodokumentation der Messungen
3.1-3.2	Lagepläne	Immissionsorte
4	Tabellen/Grafiken	Berechnungsergebnisse der Prognose
5	Tabellen	Prognoseberechnungen

C) Tabellen

Tab. 4-1 Anhaltswerte für Erschütterungs-Immissionen gemäß DIN 4150-2	14
Tab. 4-2 Wahrnehmung von Erschütterungen	15
Tab. 6-1 eingesetzte Messtechnik	17
Tab. 10-1 Prognose Erschütterungen	26
Tab. 10-2 Prognose sekundärer Luftschall, Tag und lauteste Nachtstunde	27
Tab. 10-3 Prognose sekundärer Luftschall, Spitzenpegel	28

D) Abbildungen

Abbildung 1: Luftbild Untersuchungsgebiet, Quelle: Google Earth	5
Abbildung 2: Auszug Flächennutzungsplan der LHM, Quelle: Internetauftritt der LHM	6
Abbildung 3: derzeit geltende Bebauungspläne im Umgriff des Vorhabens	7
Abbildung 4: Gleislageplan, Endzustand, Teil Nord, 90° gedreht	8
Abbildung 5: Blockschaltbild für das spektrale Prognoseverfahren der VDI 3837	10
Abbildung 6: Schwingschnellepegel am Abnahmegleis bei 10 km/h	20
Abbildung 7: Schwingschnellepegel am Abnahmegleis bei 30 km/h	20
Abbildung 8: Schwingschnellepegel am Abnahmegleis bei 50 km/h	21
Abbildung 9: Schwingschnellespektren am Betriebsgleis	21
Abbildung 10: Übertragungsverhältnisse im Ausbreitungsquerschnitt	22
Abbildung 11: Übertragungsfunktionen Gebäude OG/Gelände	23
Abbildung 12: Tram-Verkehre im Betriebshof, Prognose-Planfall 2035 (Quelle: SWM)	24
Abbildung 13: Regelquerschnitt im Bereich der Abstellanlage	25
Abbildung 14: Regelquerschnitt im Bereich der Südumfahrung	25

E) Grundlagenverzeichnis

- (1) Google Earth, Luftbildauszug des Untersuchungsraums
- (2) Stadt München, Auszug aus dem Flächennutzungsplan, Onlineauftritt 2023
- (3) SWM, Betriebskonzept „Neubau Betriebshof Ständlerstraße“, Stand 09/2021
- (4) SWM, Verkehrsanlagen- und Hallenplanung, Stand 02/2023
- (5) Stadt München, Internetauftritt, rechtsverbindliche Bebauungspläne im Untersuchungsraum
- (6) em plan, Bericht 2018 888-E, Erschütterungstechnische Beweissicherungsmessungen Lauensteinstr. 10, Traunreuter Str. 28a, Traunreuter Str. 42 in 81549 München, Juni 2018

F) Regelwerke

Für die Untersuchung wurden folgende Grundlagen herangezogen:

- [1] Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge, BImSchG - Bundes-Immissionsschutzgesetz
- [2] DIN 45669, Messung von Schwingungsimmissionen
- [3] DIN 4150-2, Erschütterungen im Bauwesen, Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden, Juni 1999
- [4] DB AG, Richtlinie 820.2050, Erschütterungen und sekundärer Luftschall, 01.01.2017
- [5] Zeitschrift für Lärmbekämpfung, Ermittlung des sekundären Luftschalls aus dem Schienenverkehr, Januar 2006
- [6] VDI 3837, Erschütterungen in der Umgebung von oberirdischen Schienenverkehrswegen – Spektrales Prognoseverfahren, März 2006
- [7] Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm - TA Lärm), 1998 / 2017