

Anlage 13.03

Vorhaben: Erschütterungstechnische Prognosen  
Mobilitätsdrehscheibe Augsburg  
Linie 5 vom Hauptbahnhof zum Universitätsklinikum

Auftraggeber: Stadtwerke Augsburg Projektgesellschaft mbH  
Hoher Weg 1  
86152 Augsburg

Bearbeitungsstand: 12/2020

Projekt-Nr.: 2020 1094-E

Auftrag vom: 28.07.2016

Anzahl Seiten: 29

Anzahl Anlagen: 2, s. Anlagenverzeichnis

Ansprechpartner: Dipl.-Ing. (FH) Manfred Ertl

Mitarbeiter: Andreas Schartner

Durchwahl: 0821 / 455 179 10

E-Mail: mertl@em-plan.com

Dokument: L5\_4\_SU\_GA\_10.03\_18\_12\_2020.docx

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

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, auch auszugsweise, ist nur mit unserer ausdrücklichen und schriftlichen Gestattung zulässig.

## Inhaltsverzeichnis

1.	Gegenstand der Untersuchung.....	4
2.	Örtlichkeiten und Bauvorhaben .....	5
3.	Prognoseverfahren – VDI 3837 .....	6
4.	Beurteilungsgrundlage – DIN 4150-2.....	8
5.	Sekundärer Luftschall.....	10
6.	Messdurchführung und Messgeräte .....	12
6.1	Messorte und Messdatum .....	12
6.2	Messgeräte .....	12
7.	Auswertung und Messergebnisse.....	13
7.1	Eingangsspektren .....	13
7.1.1	Hörbrotstraße 6 .....	14
7.1.2	Georg-Brach-Straße 8 .....	14
7.2	Übertragungsfunktionen nach VDI 3837.....	16
7.2.1	Hörbrotstraße 6 .....	16
7.2.2	Georg-Brach-Straße 8 .....	17
7.3	Schwingschnelle .....	18
7.3.1	Hörbrotstraße 6 .....	18
7.3.2	Georg-Brach-Straße 8 .....	19
7.4	$KB_{Fmax}$ - Werte nach DIN 4150-2 .....	20
8.	Zugzahlen .....	21
9.	Prognose.....	24
9.1	Nutzungen und Anhaltswerte .....	24
9.2	Prognosewerte - $KB_{Fmax}$ .....	24
9.3	Prognosewerte - $KB_{FTr}$ .....	25
9.4	Sekundärschall - $L_{Sek}$ .....	25
10.	Messung TU München, Pferseer Straße 14.....	26
	Zusammenfassung.....	28
A)	häufig verwendete Abkürzungen .....	29
B)	Grundlagenverzeichnis / Literatur.....	29
C)	Anlagenverzeichnis .....	29

## 1. Gegenstand der Untersuchung

Die Stadtwerke Augsburg GmbH (SWA) planen den Bau der Straßenbahnlinie 5. Im Zug der Planung ist darüber hinaus eine Änderung des Verlaufs der Linie 3 zwischen dem Tunnelportal in der Rosenaustraße und dem Knoten Pferseer Straße / Perzheimstraße vorgesehen.

Im Vorfeld der Baumaßnahme wurden die Schwingungseigenschaften zweier Gebäude durch Ersetzanregung ermittelt. Gegenstand der Untersuchung sind die Gebäude Hörbrotstraße 6 und Georg-Brach-Straße 8 im Rosenau-Thelottviertel bzw. in Pfersee-Nord in Augsburg.

Für die o. g. Gebäude ist anhand der ermittelten Übertragungsfunktionen und geeigneten Emissionsspektren aus vergleichbaren gemessenen Situationen eine Erschütterungsprognose für den künftigen Straßenbahnbetrieb 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.

Ergänzend ist aufbauend auf den im Zug der Messungen ermittelten maximalen Schwingschnellen eine Ermittlung und Beurteilung des absehbaren sekundären Luftschalls durchzuführen.

Weiterhin war eine ergänzende Prognose anhand von Messwerten der Technischen Universität München durchzuführen. Diese hatte in der Pferseer Straße 14 in 2012 in einem Referenzabstand von 9,5 m Messungen an der bestehenden Straßenbahnlinie mit bereits eingebautem leichten Masse-Feder-System durchgeführt. Die seinerzeitigen Messwerte sind auf den neuen Bezugsabstand von 5,5 umzurechnen und anhand der resultierenden Schwingschnellen eine Vergleichsprognose durchzuführen. Die Umrechnung erfolgt für die oberste Deckenebene der Pferseer Straße 14.

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

## **2. Örtlichkeiten und Bauvorhaben**

Die örtlichen Gegebenheiten sind dem Lageplan in der Anlage 13.4 zu entnehmen.

Das Untersuchungsgebiet liegt im Rosenau-Thelottviertel und in Pfersee-Nord der Stadt Augsburg.

Gemäß aktueller Planung sollen künftig die Straßenbahnlinien 3 und 5 stadtauswärts nach dem Tunnelportal über die Rosenaustraße in die Pferseer Straße und die Linie 5 anschließend nach Norden in die Holzbachstraße fahren. Über die Holzbachstraße führt die Straßenbahnlinie 5 in die Bürgermeister-Ackermann-Straße in Richtung Westen. Stadteinwärts fahren beide Straßenbahnlinien ab dem Knoten Pferseer Straße / Perzheimstraße über die Perzheimstraße und die Hörbrotstraße in das Tunnelportal in der Rosenaustraße. Die teilweise geänderte Linie 3 geht auf der Luitpoldbrücke wieder in die Bestandslage über.

Im Umfeld der Baumaßnahme befinden sich allgemeine Wohngebiete. Für die Untersuchung wurden die Schwingungseigenschaften zweier Gebäude, der Hörbrotstraße 6 und der Georg-Brach-Straße 8, durch Ersatzanregung ermittelt.

Die Gebäude wurden aufgrund ihres Alters und ihrer Nähe zur geplanten Linienführung ausgewählt.

Ergänzend wurde eine Vergleichsrechnung anhand von Messungen der Technischen Universität München für die Pferseer Straße 14 durchgeführt, die unter ähnlichen Umständen die Schwinggeschwindigkeit mit eingebautem leichten Masse-Feder-System auch unter Berücksichtigung der zu erwartenden Verkehre und Fahrzeuge wiedergibt.

### 3. Prognoseverfahren – VDI 3837

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.

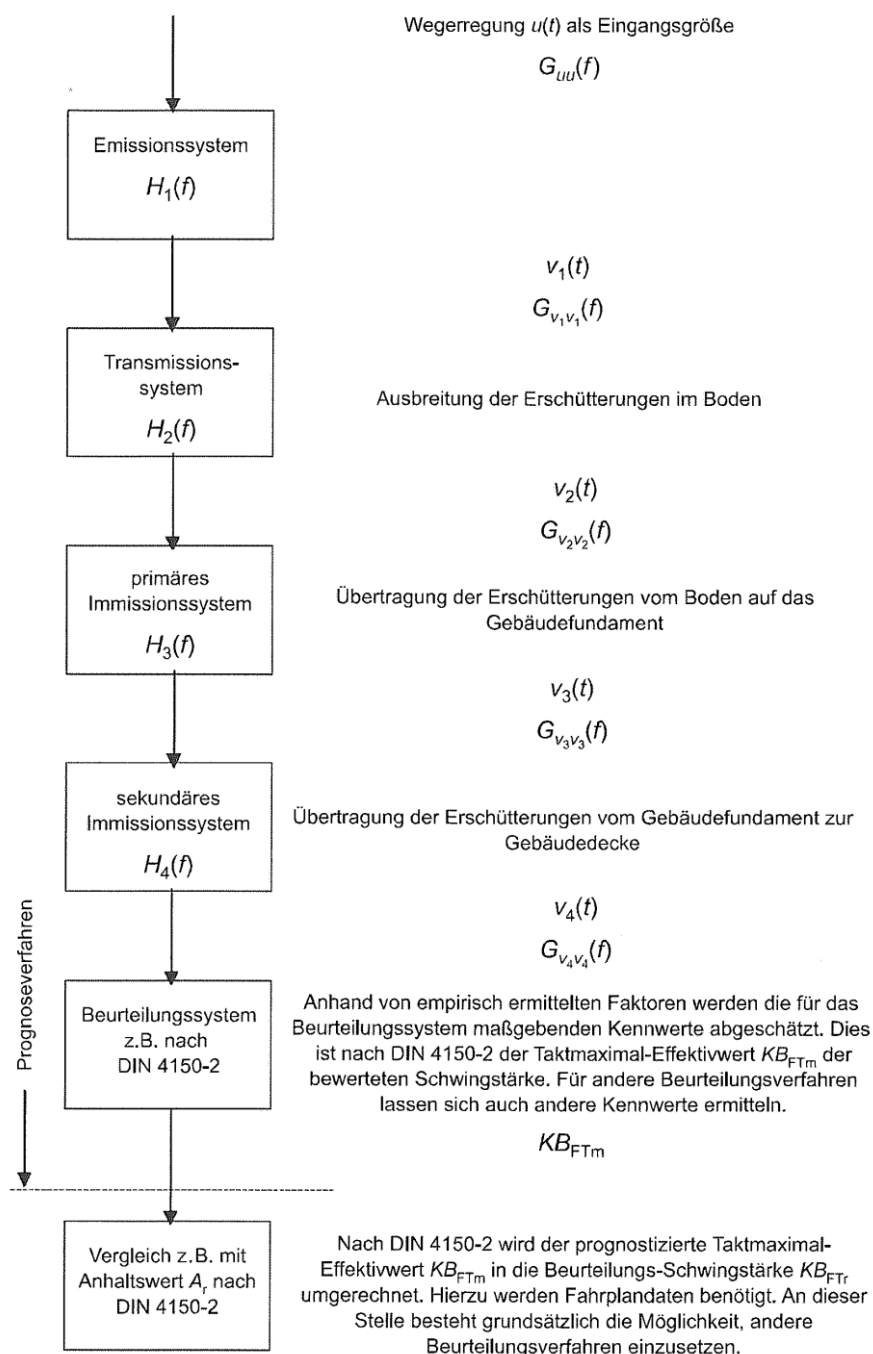


Abbildung 1: Blockschaltbild für das spektrale Prognoseverfahren der VDI 3837

In der vorliegenden Prognose wurde das Emissions- und Transmissionssystem

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

durch bereits durchgeführte Messungen in einer vergleichbaren Situation abgebildet.

Die Ermittlung der Übertragungsfunktionen vom Boden in das Gebäudefundament

$$H_2(f) \rightarrow H_3(f)$$

und vom Gebäudefundament in die Gebäudedecke

$$H_3(f) \rightarrow H_4(f)$$

erfolgte durch eine Ersatzanregung mittels Plattenrüttler bei gleichzeitiger Messung der Schwingantwort des o. a. Übertragungssystems.

Die Ermittlung der Übertragungsfunktion wurde mit dem Signalanalyseprogramm FAMOS Professional durchgeführt und ergibt jeweils den Betrag der komplexen Übertragungsfunktion als schmalbandiges Spektrum welches für die weitere Berechnung in ein Terzspektrum umgewandelt wurde.

## 4. Beurteilungsgrundlage – 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 Erschütterungsimmissionen.

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.

Die genannten Beurteilungsgrößen sind am Fundament getrennt für die drei Richtungskomponenten x (horizontal, parallel), y (horizontal, senkrecht) und z (vertikal) und an den übrigen Meßpunkten nur für die Richtungskomponente z zu ermitteln. Bei der triaxialen Messung ist der jeweils größte der drei Messwerte der Beurteilung zugrunde zu legen.

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.



Tabelle 1: Anhaltswerte für Erschütterungssimulationen gemäß DIN 4150-2

Zeile	Einwirkungsort	tags			nachts		
		A <sub>u</sub>	A <sub>o</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>u</sub>	A <sub>o</sub>	A <sub>r</sub>
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	6	0,2	0,3	0,6	0,15
2	Einwirkungsorte, in deren Umgebung vorwiegend gewerbliche Anlagen untergebracht sind (vergleiche Gewerbegebiete BauNVO, § 8).	0,3	6	0,15	0,2	0,4 (0,6)	0,1
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	5	0,1	0,15	0,3 (0,6)	0,07
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	3	0,07	0,1	0,2 (0,6)	0,05
5	Besonders schutzbedürftige Einwirkungsorte, z. B. in Krankenhäusern, Kurkliniken, soweit sie in dafür ausgewiesenen Sondergebieten liegen.	0,1	3	0,05	0,1	0,15 (0,6)	0,05

Für oberirdischen Schienenverkehr gilt gemäß DIN 4150-2 eine Sonderregelung. Der obere Anhaltswert A<sub>o</sub> 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<sub>u</sub> und A<sub>r</sub>. 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:

Tabelle 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

## 5. Sekundärer Luftschall

Sekundärer Luftschall entsteht durch die Erschütterungsanregung von Gebäuden und die Abstrahlung von Luftschall durch die Raumbegrenzungsflächen.

Zur Ermittlung und Bewertung sekundären Luftschalls existieren unterschiedliche Publikationen.

Die neueste in diesem Themenkreis ist nach unserem Kenntnisstand die Richtlinie Bautechnik, Leit- Signal- u. Telekommunikationstechnik, Messung und Prognose von Erschütterungseinwirkungen, Nr. 820.2050A02, gültig seit 1.1.2017, der Deutschen Bahn AG.

Danach wird der sekundäre Luftschall je Beurteilungszeitraum im Bereich der Frequenzbänder von 0 bis 100 Hz anhand des ermittelten Terzspektrums ermittelt, wobei Frequenzanteile unter 25 Hz im Regelfall keinen relevanten Beitrag leisten. Ausgangsgröße ist bei allen Berechnungen der im Vorfeld ermittelten maximalen Schwingschnelle nach DIN 4150-2. Diese wird in Terzbändern auf einen unbewerteten Schalldruckpegel umgerechnet und in der Folge einer A-Bewertung unterzogen, analog zur Frequenzbewertung in der Akustik.

Über die logarithmische Summation über alle Frequenzbänder ergibt sich der A-bewertete Schwingschnellepegel für eine einzelne Zugvorbeifahrt. Wird zwischen unterschiedlichen Baureihen unterschieden ist der Schwingschnellepegel je Baureihe anhand des  $KB_{FTm}$  je Baureihe zu ermitteln und in der Folge je nach Häufigkeit der Ereignisse gesondert zu berechnen und im Ergebnis über alle stattfindenden Ereignisse aufzusummieren. Wird ein Immissionspektrum aus einem Fahrzeugmix, der sich über die Jahre auch ändern kann, herangezogen wird ein mittleres Immissionspektrum verwendet.

Hieraus ergibt bzw. ergeben sich die A-bewerteten maximalen Schalldruckpegel aus einer einzelnen Zugvorbeifahrt.

Diese Schalldruckpegel im Gebäude sind energetisch über die Vorbeifahrthäufigkeiten aufzusummieren. Die gefahrenen Geschwindigkeiten, Abstandskorrekturen, Oberbauparameter und ggfs. Zuschläge sind hierbei bereits im Ausgangswert nach erfolgter Prognose gemäß DIN 4150-2 eingerechnet.

Bei den zu erwartenden Sekundärschallpegeln ist die Deckenbauweise von Gebäuden zu berücksichtigen.

Im vorliegenden Fall ist zumindest überwiegend von Holzbalkendecke auszugehen.

Demnach beträgt der Sekundärschallpegel je Zug

$$L_{\text{sek, Zug, A}} = 19,88 \text{ dB(A)} + 0,47 * L_{\text{v, Zug, A}}$$

Die Umrechnung anhand der Verkehrsprognose erfolgt nach den beiden nachstehenden Gleichungen:

$$L_{\text{m, Zug, Tag}} = L_{\text{sek, Zug, A}} + 10 * \log (t_{\text{Zug}} * N_{\text{Tag}} / 57.600 \text{ s}) \text{ in dB(A)}$$

$$L_{\text{m, Zug, Nacht}} = L_{\text{sek, Zug, A}} + 10 * \log (t_{\text{Zug}} * N_{\text{Nacht}} / 28.800 \text{ s}) \text{ in dB(A)}$$

Hierbei ist:

- $t_{\text{Zug}}$  die Vorbeifahrtdauer, hier 30 s
- $N_{\text{Tag/Nacht}}$  die Verkehrsprognose für die Beurteilungszeiträume
- Und die Werte 57600 bzw. 28800 s die Normierungsgröße für die faktischen Vorbeifahrzeiten und Häufigkeiten

Streng genommen könnte man die Fahrtenzahlen auf zwei Richtungsgleise aufteilen, separat bewerten und am Ende wieder addieren. Nachdem der Berechnung des  $KB_{\text{Fmax}}$  der kürzeste Abstand zum Baukörper zugrunde liegt und fiktiv so gerechnet wird, als würden alle Fahrten in diesem Abstand verkehren bedarf es dieser Aufteilung nicht, da mit dem gewählten Ansatz die Ergebnisse auf der sicheren Seite liegen. Da die Richtungsgleise nicht sehr weit auseinander zu liegen kommen werden sind allerdings auch keine großen Abweichungen bei differenzierter Betrachtung zu erwarten.

Das Regelwerk nennt zu den Beurteilungsgrößen keine Werte. Im Weiteren wird davon entsprechen der üblichen Handhabungspraxis in eisenbahnrechtlichen Planfeststellungsverfahren davon ausgegangen, dass die einzuhaltenden Sekundärluftschallpegel

- am Tag 35 dB(A) und
- in der Nacht 25 dB(A)

betragen.

## 6. Messdurchführung und Messgeräte

### 6.1 Messorte und Messdatum

Die Örtlichkeiten sind dem Lageplan in der Anlage 13.04 zu entnehmen. Es wurden an folgenden zwei Gebäuden die Übertragungsfunktionen ermittelt.

- Hörbrotstraße 6 – 17.05.2017
- Georg-Brach-Straße 8 – 19.05.2017

Die jeweilige Messsituation stellte sich vor Ort wie folgt dar:

Tabelle 3: Übersicht der Messpunkte an der Hörbrotstraße 6

Messort:	Hörbrotstraße 6, allgemeines Wohngebiet			
Messpunkt:	1 (z)	2 (x-y-z)	3 (z)	4 (z)
Messpunkt:	vor der Gebäudefassade	Fundament im Eingangsbereich	EG, Wohnraum	DG, Wohnraum
Ankopplung über:	Erdspeiß	geklebt	Dreifuß-Bodenplatte	Dreifuß-Bodenplatte

Tabelle 4: Übersicht der Messpunkte an der Georg-Brach-Straße 8

Messort:	Georg-Brach-Straße 8, allgemeines Wohngebiet			
Messpunkt:	1 (z)	2 (x-y-z)	3 (x-y-z)	4 (z)
Messpunkt:	vor der Gebäudefassade	Fundament, Fensterlaibung im Keller	1.OG, Wohnzimmer	Dachboden
Ankopplung über:	Erdspeiß	geklebt	geklebt	Dreifuß-Bodenplatte

### 6.2 Messgeräte

Für die Messung wurden folgende Geräte bzw. Programme verwendet.

Tabelle 5: eingesetzte Messtechnik

Gerät / Programm	Typ	Hersteller	Seriennummer
5x Beschleunigungsaufnehmer	KS 48C	Metra Mess- u. Frequenztechnik	10107, 10109, 10111, 10171, 10174
1x Triaxial-Beschleunigungsaufnehmer	KS 823B	Metra Mess- u. Frequenztechnik	10045
Messgerät	CS-7008	IMC Messsysteme GmbH	125664
IMC Studio	v. 3	IMC Messsysteme GmbH	
IMC Famos Professional	v. 6.1	IMC Messsysteme GmbH	
mobiler Messrechner	-	Dell	

## 7. Auswertung und Messergebnisse

### 7.1 Eingangsspektren

Für die Prognose wurden das Emissions- und Transmissionssystem

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

durch bereits durchgeführte Messungen in einer vergleichbaren Situation, d. h. mit ähnlicher Distanz zum Immissionsort und mit einer straßenbündigen festen Fahrbahn abgebildet.

Konkret wurden in Augsburg an der Halderstraße Erschütterungsmessungen aus Straßenbahnverkehr jeweils in einem Abschnitt ohne und mit erschütterungsmindernden Maßnahmen (leichtes Masse-Feder-System) durchgeführt. Die Distanz zum Gleis lag bei jeweils ca. 8 m. Die gemessenen Geschwindigkeiten lagen bei rund 20 km/h. Für die Hörbrotstraße 6 werden die Messergebnisse linear auf eine Geschwindigkeit von 15 km/h und die Georg-Brach-Straße 8 auf eine Geschwindigkeit von 30 km/h umgerechnet.

Die Distanz der Hörbrotstraße 6 zum geplanten Gleis beträgt wie bei den verwendeten Messergebnissen zum Messpunkt ebenfalls ca. 8 m. Eine Korrektur ist somit nicht erforderlich. Die Georg-Brach-Straße 8 ist etwa 14 m vom geplanten Gleis entfernt. Die Korrektur der Messergebnisse wird wie folgt durchgeführt:

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

Darüber hinaus wurde für die Kurve vor dem Gebäude Hörbrotstraße 6 ein Kurvenzuschlag von 6 dB vergeben, um die Störstellenwirkung durch enge Radien und die langfristig zu erwartende erhöhte Abnutzung der Lauffläche vorsorglich zu berücksichtigen.

Der Prognose liegt ein Mix aus den verkehrenden Baureihen zu Grunde, d. h. Combino und Cityflex. Die älteren Baureihen (GT6 und vergleichbare Fahrzeuge) werden nicht mehr berücksichtigt.

### 7.1.1 Hörbrotstraße 6

Die nachstehende Abbildung zeigt das gemittelte Schwingschnellen-Referenzspektrum in 8 m Abstand zum Gleis. Hierbei wird unterschieden zwischen einer festen Fahrbahn ohne Maßnahmen, und einer elastischen Gleislagerung auf Betontragplatte. Die Eingangsspektren basieren auf Referenzmessungen im Bereich Augsburg-Königsplatz und Halderstraße.

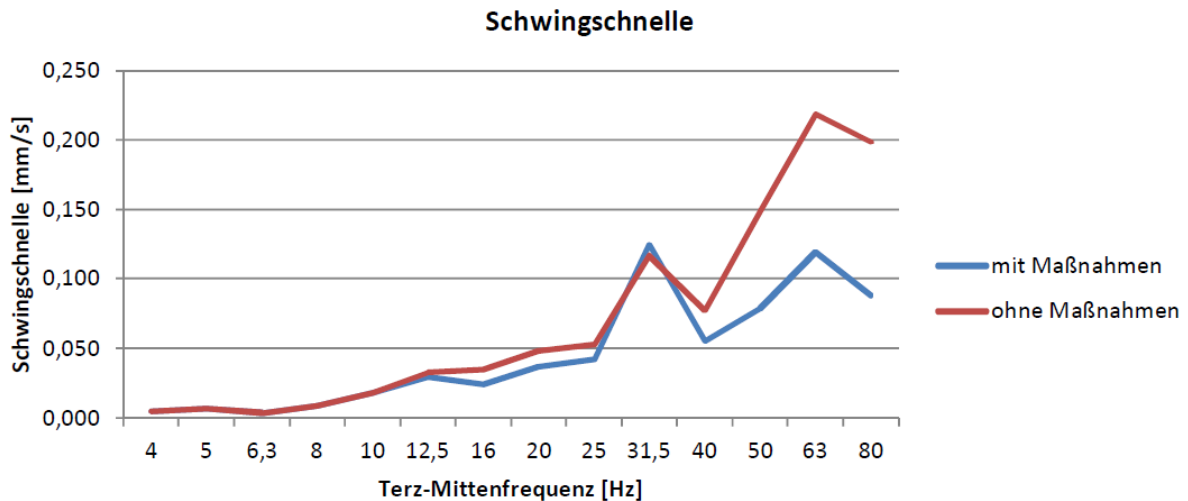


Abbildung 2: Eingangsspektrum – Hörbrotstraße 6, Gelände vor dem Gebäude

### 7.1.2 Georg-Brach-Straße 8

Für die Georg-Brach-Straße 8 ergibt sich über die Zugzahlen- und Abstandskorrektur sowie die dort fahrbare Geschwindigkeit folgendes Eingangsspektrum.

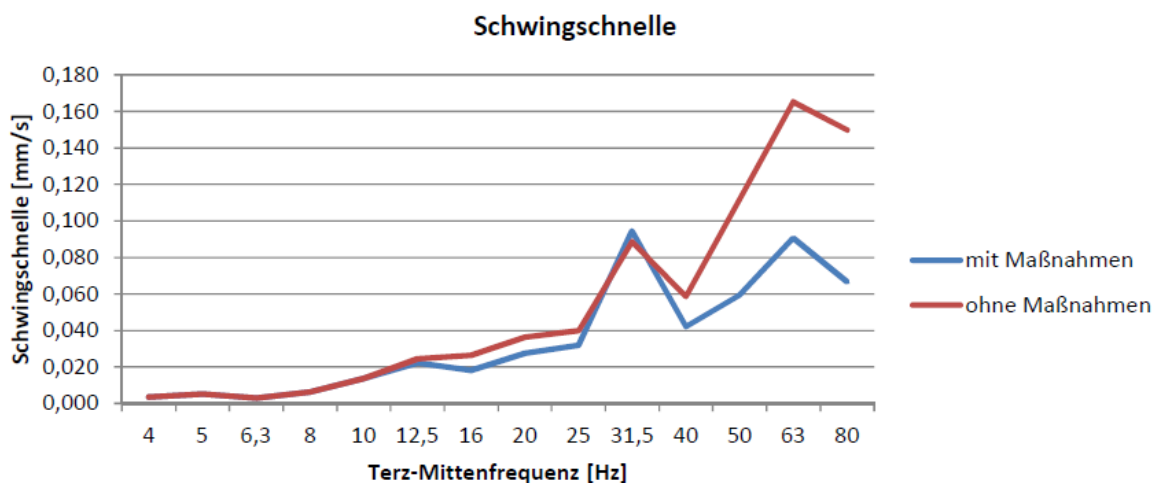


Abbildung 3: Eingangsspektrum – Georg-Brach-Straße 8, Gelände vor dem Gebäude

In obigen Darstellungen ist gegeben, dass sich das Spektrum der Einleitung nicht ändert, der Bezugsabstand zur Quelle hingegen schon. In der Hörbrotstraße ist in Folge der Kurvensituation ein Zuschlag von 6 dB(A) vergeben, an der Georg-Brach-Straße nicht, da dort der Streckenverlauf

gerade ist. In der Folge nehmen die maximal zu erwartenden Schwingschnellen bei ähnlicher Verkehrsbelastung in der Hörbrotstraße unter Berücksichtigung des Kurvenzuschlags Werte um etwa 0,22 an, auf der geraden Strecke an der Georg-Brach-Straße ohne Kurvenzuschlag einen Wert von rund 0,17. Hierbei sind die gefahrenen Geschwindigkeiten von 15 km/h an der Hörbrotstraße und von 30 km/h an der Georg-Brach-Straße hinterlegt.

Die Kurvenverläufe sind daher ähnlich, es findet lediglich die Abstandskorrektur und der Kurvenzuschlag bei annähernd gleichen Verkehren im Nahbereich der Gebäude Eingang, was im Grunde nur das Niveau der Einleitung in die Gebäudefundamente unterscheidet. D. h. ohne Kurvenzuschlag und bei größerem Abstand der Bebauung ist die Einleitung bei ansonsten gleichen Rahmenbedingungen zwangsläufig niedriger.

Dies ist wiederum zu relativieren, da in der Georg-Brach-Straße schneller gefahren wird als in der Kurve an der Hörbrotstraße. Vereinfacht gesagt wird in der Hörbrotstraße langsamer gefahren, dafür wird dort ein Kurvenzuschlag in Ansatz gebracht. An der Georg-Brach-Straße wird schneller gefahren, dafür gibt es dort keinen Kurvenzuschlag, da die Strecke gerade ist.

Die vorstehenden Abbildungen beinhalten den zu erwartenden Wert einerseits im Betrieb ohne jegliche Maßnahmen, und im Betrieb unter Einbau eines leichten Masse-Feder-Systems (LMF) anhand dessen Wirkung die im Rahmen von Referenzmessungen festgestellt werden konnte.

In der Folge ist eine Kurve dargestellt, was zu erwarten wäre, wenn keine Maßnahmen ergriffen werden (Rot) und welche Minderung sich durch bereits umgesetzte Maßnahmen andernorts nachweisen lässt (Blau), wobei wir hierbei davon ausgehen, dass sich die bereits andernorts im Verkehrsnetz erzielte Minderung zumindest in erster Näherung übertragen lässt.

Dies muss nicht exakt so sein, da Erschütterungseinwirkungen durch viele Randbedingungen beeinflusst sind. Die dargestellten zu erwartenden Minderungen entsprechen daher lediglich dem heute gegebenem Erfahrungshintergrund aus allen verfügbaren Messungen und Daten. Anhand derer ist allerdings zumindest eine qualitative Einschätzung der Sachlage möglich, ob dem Grunde nach erschütterungsmindernde Maßnahmen notwendig sind, und von welcher Wirksamkeit qualitativ auszugehen ist.

## 7.2 Übertragungsfunktionen nach VDI 3837

Die Ermittlung der Übertragungsfunktion wurde mit dem Signalanalyseprogramm FAMOS Professional durchgeführt und ergibt jeweils den Betrag der komplexen Übertragungsfunktion als schmalbandige Spektren, welche für die weitere Berechnung in Terzspektren umgewandelt wurden.

Die Übertragungsfunktionen wurden vom Boden in das Gebäudefundament

$$H_2(f) \rightarrow H_3(f)$$

und vom Gebäudefundament in die oberste Geschoßebene

$$H_3(f) \rightarrow H_4(f)$$

ermittelt.

### 7.2.1 Hörbrotstraße 6

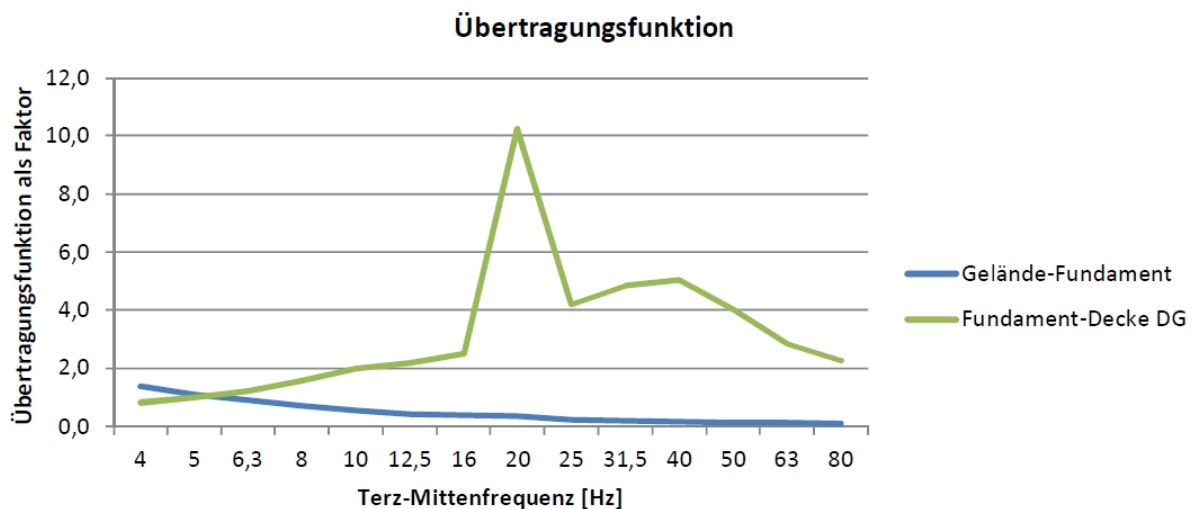


Abbildung 4: Übertragungsfunktionen – Hörbrotstraße 6

Wie ersichtlich findet am Fundament zunächst eine Reduktion der eingeleiteten Erschütterungen statt. Im interessierenden Frequenzbereich oberhalb von rund 8 Hz liegt die Schwingantwort des Fundaments bereits unter der vor dem Gebäude gemessenen Schwingschnelle, bei etwa 35 Hz reagiert das Fundament nicht mehr auf die eingeleitete Energie.

Im DG beträgt die Vertikalkomponente der Deckenschwingungen etwa Faktor 10 bei einer ausgeprägten Resonanz um etwa 20 Hz, was der bestehenden Holzbalkenkonstruktion (Fehlböden) zuzuordnen ist.



## 7.2.2 Georg-Brach-Straße 8

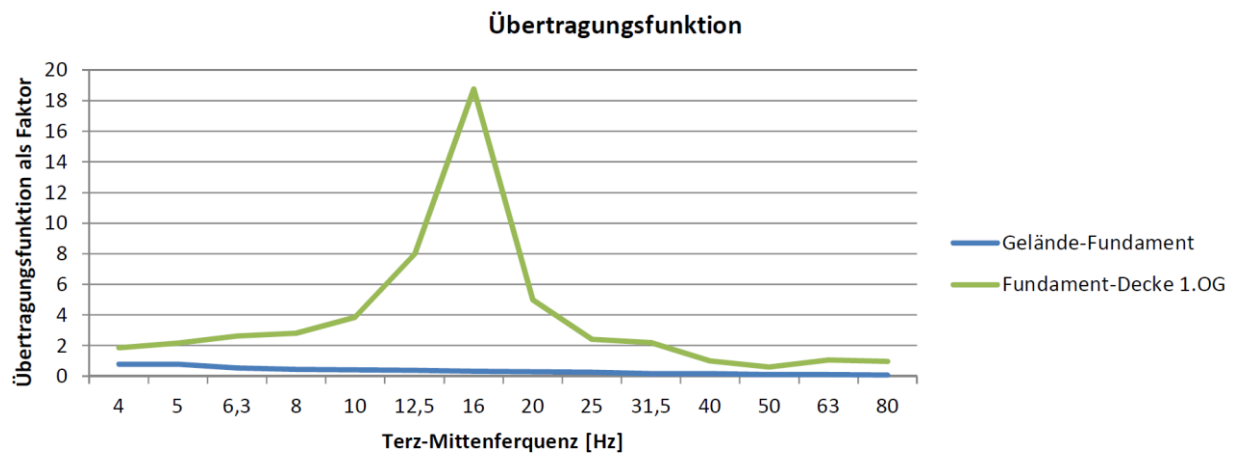


Abbildung 5: Übertragungsfunktionen – Georg-Brach-Straße 8

Die Situation an der Georg-Brach-Straße stellt sich weitgehend analog dar. Allerdings beträgt die Resonanzüberhöhung der Holzbalkendecken gegenüber der Fundamentalschwingung ca. den Faktor 18. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass das Fundament nur in sehr geringem Umfang auf die Anregung reagiert. Effektiv bedeutet das Resonanzmaximum eine Überhöhung der Schwingschnelle gegenüber dem vor dem Gebäude gemessenen Referenzpunkt um den Faktor 6, was in einem üblichen Rahmen für Altbauten liegt. Die Decke schwingt bei etwa 16 Hz.

### 7.3 Schwingschnelle

Aus den o. a. Eingangsspektren und den Übertragungsfunktionen ergeben sich die folgenden Schwingschnellen und Schwingschnellepegel.

#### 7.3.1 Hörbrotstraße 6

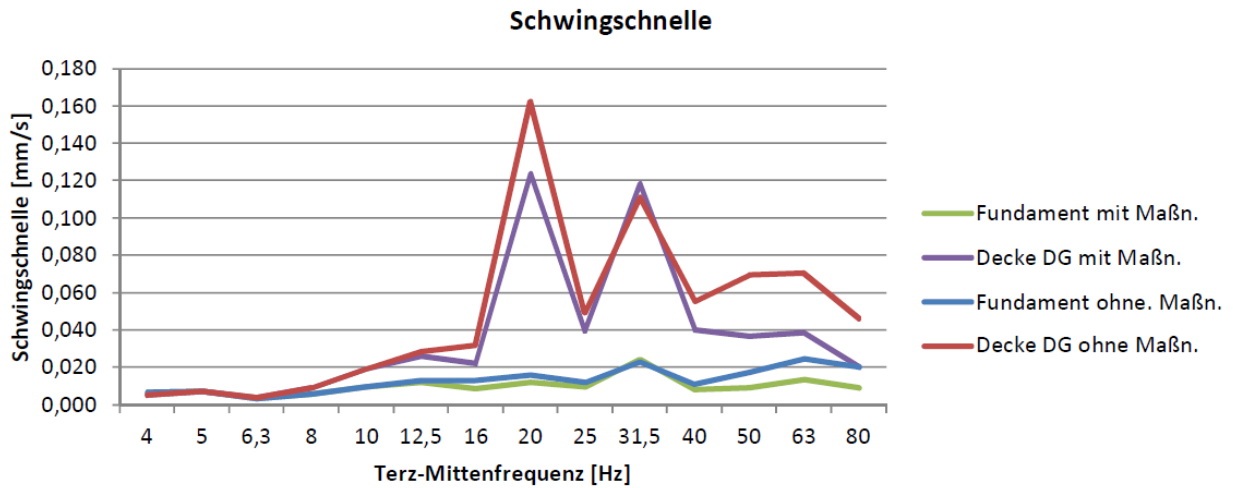


Abbildung 6: Schwingschnelle in mm/s – Hörbrotstraße 6

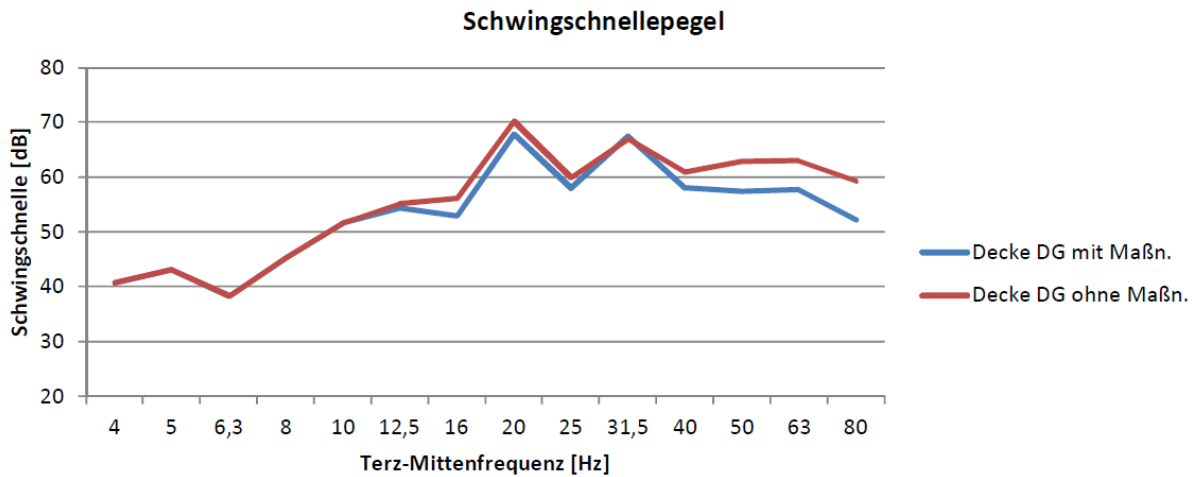


Abbildung 7: Schwingschnellepegel – Hörbrotstraße 6

7.3.2 Georg-Brach-Straße 8

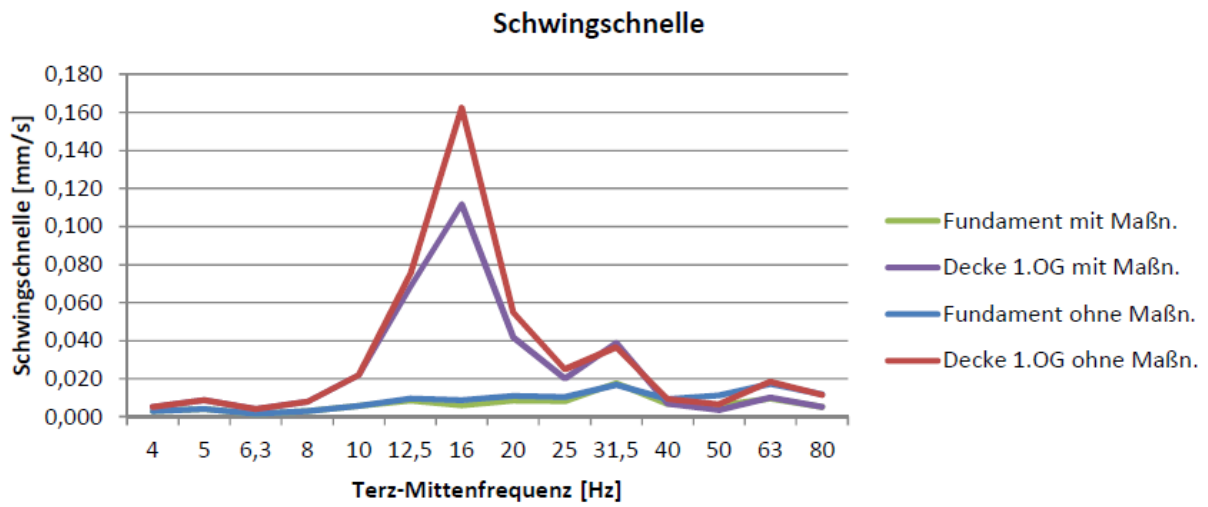


Abbildung 8: Schwingschnelle in mm/s - Georg-Brach-Straße 8

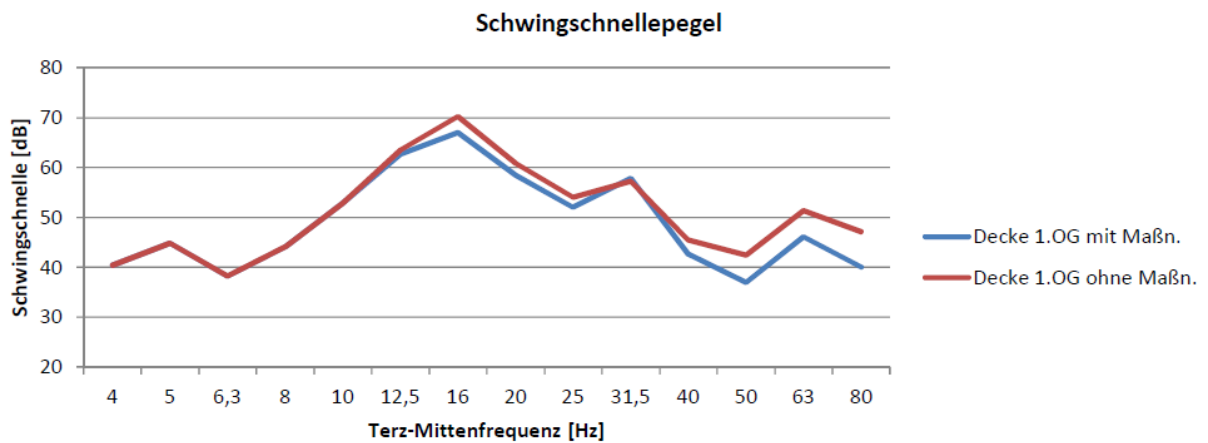


Abbildung 9: Schwingschnellepegel – Georg-Brach-Straße 8

#### 7.4 **KB<sub>Fmax</sub> - Werte nach DIN 4150-2**

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

Aus der gemessenen Schwingbeschleunigung wird durch Integration das unbewertete Erschütterungssignal (Schnellesignal) nach DIN 45669 im Frequenzbereich von 1 bis 315 Hz ermittelt (siehe auch DIN 4150-2). 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<sub>Fmax</sub> einer Zugvorbeifahrt.

Vorliegend sind die Messergebnisse aus einer ähnlichen Situation bereits vorhanden und wurden in Form von gemittelten Max-Hold-Spektren in Ansatz gebracht.

## 8. Zugzahlen

Für die Berechnung der Beurteilungsschwingstärke  $KB_{FT}$  im Ausbauzustand werden gemäß der bereits vorab durchgeführten schalltechnischen Untersuchungen folgende Verkehrsmengengerüste in Ansatz gebracht.

Tabelle 6: Verkehrsmengengerüste

Fahrtrichtung	Anzahl		Länge	Geschwindigkeit
	tags	nachts	[m]	[km/h]
Hörbrotstr. 6				
Stadteinwärts (Linie 5)	150	14	42	15
Stadteinwärts (Linie 3)	150	14	42	15
Georg-Brach-Str. 8				
Stadtauswärts (Linie 5)	148	15	42	30
Stadteinwärts (Linie 5)	150	14	42	30

Die o. a. angegebenen Zahlen geben die Anzahl der Fahrten je Streckenabschnitt getrennt nach Tag- und Nachtzeitraum an. Die angegebenen Geschwindigkeiten ergeben sich aus dem Geschwindigkeitsband für den Streckenabschnitt.

Lediglich in einem kurzen geraden Abschnitt zwischen den Haltepunkten Luitpoldbrücke und Holzbachstraße wären aufgrund der gegebenen Radien Geschwindigkeiten von 50 km/h theoretisch möglich, sind jedoch faktisch nicht fahrbar, da an den Haltepunkten Luitpoldbrücke und Holzbachstraße gehalten werden muss und die Weglänge nicht ausreichend ist, um einen Zug auf 50 km/h zu beschleunigen ohne ihn im nahezu selben Moment wieder abzubremesen. In engen Radien wie an der Hörbrotstraße liegt die zulässige Streckengeschwindigkeit ohnehin bei maximal 15 km/h.

Die maximal zulässigen Geschwindigkeiten ergeben sich aus der nachstehenden Abbildungen:

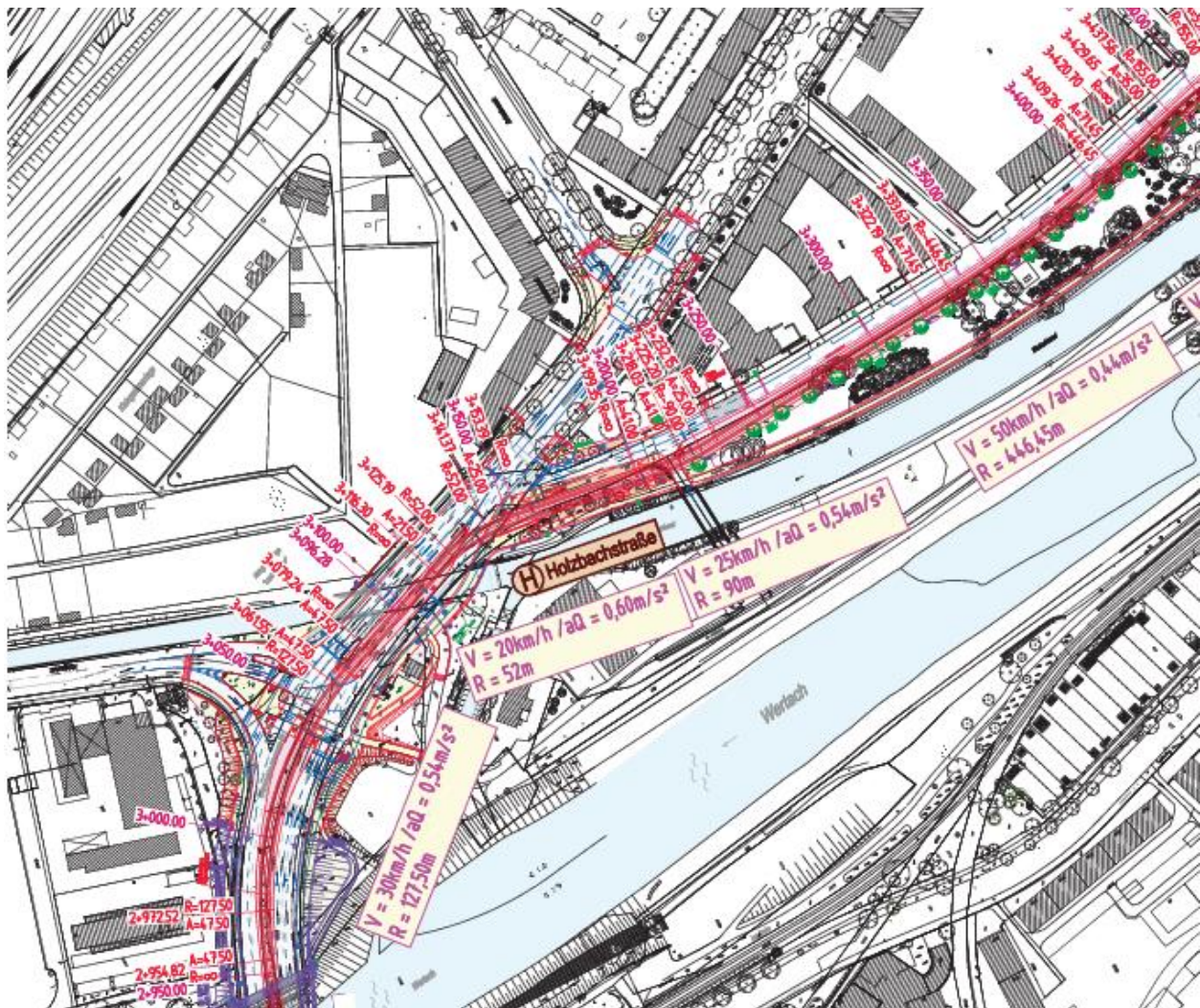


Abbildung 10.1: Geschwindigkeitsband, nördlicher Teil, HP Holzbachstraße bis zur Wertachbrücke

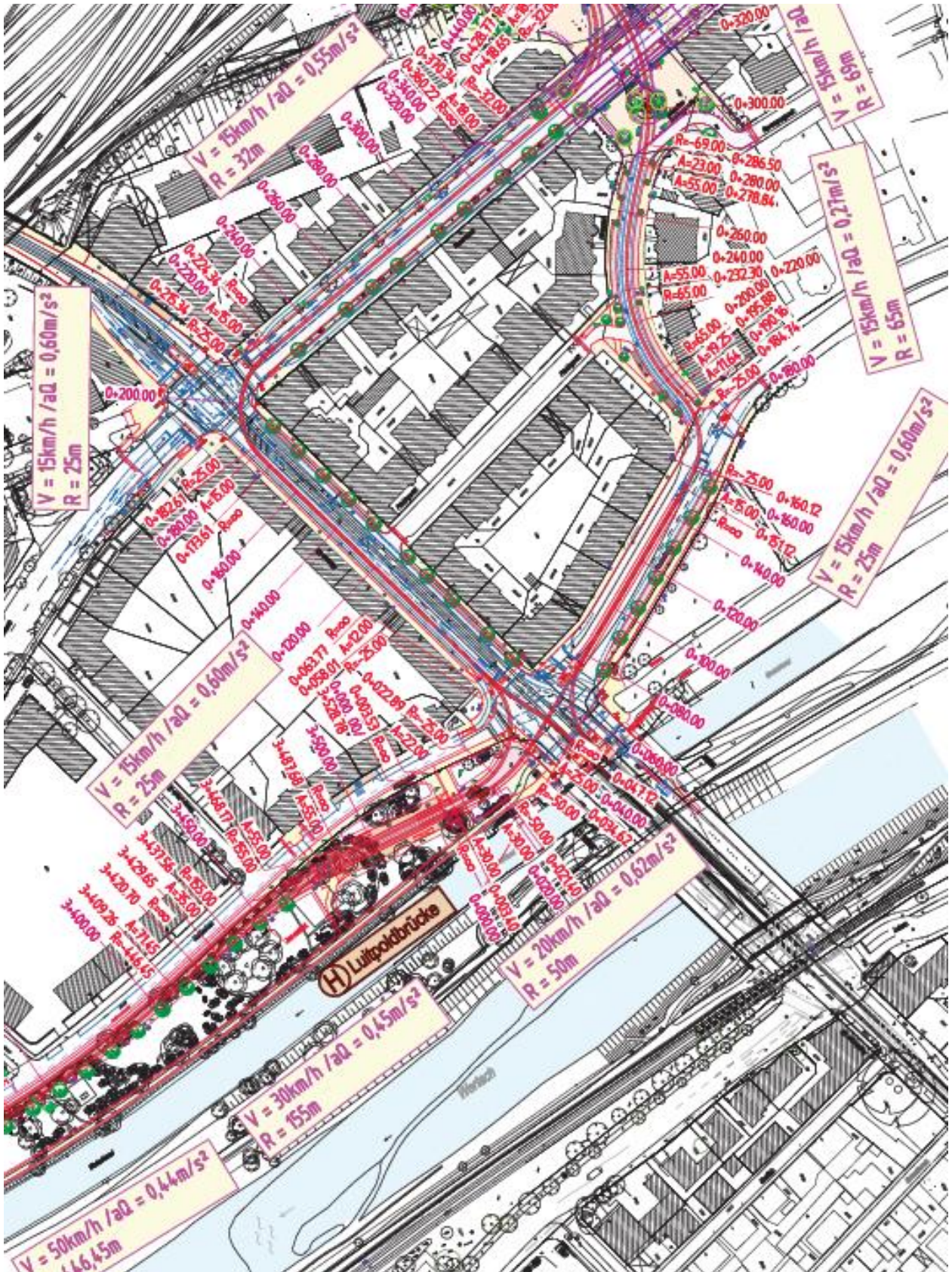


Abbildung 10.2: Geschwindigkeitsband, südlicher Teil, Thelottviertel bis HP Luitpoldbrücke

## 9. Prognose

### 9.1 Nutzungen und Anhaltswerte

In der nachstehenden Tabelle werden die der Prognose zu Grunde gelegte Gebietsnutzung, so wie die anzuwendenden Anhaltswerte nach DIN 4150-2 aufgeführt.

Tabelle 7: Nutzungen und Anhaltswerte

Nr.	Adresse	Geschoß	Gebiets- nutzung	Anhaltswerte (angehoben um Faktor 1,5)					
				Tag			Nacht		
				A <sub>u</sub>	A <sub>o</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>u</sub>	A <sub>o</sub>	A <sub>r</sub>
1	Hörbrotstr. 6	4.OG	W	0,23	3	0,11	0,15	0,6	0,08
2	Georg-Brach-Str. 8	1.OG	W	0,23	3	0,11	0,15	0,6	0,08

### 9.2 Prognosewerte - $KB_{Fmax}$

Die folgende Tabelle zeigt die  $KB_{Fmax}$  - Werte in den Räumen der untersuchten Gebäude:

Tabelle 8:  $KB_{Fmax}$  – Werte

Nr.	Adresse	Prognose-Planfall	
		$KB_{Fmax}$	
		ohne Maßnahmen	mit Maßnahmen
1	Hörbrotstr. 6	0,24	0,19
2	Georg-Brach-Str. 8	0,18	0,14

Aus der o. a. Tabelle geht hervor, dass die unteren Anhaltswerte durch die  $KB_{Fmax}$  – Werte ohne erschütterungsmindernde Maßnahmen tags in der Hörbrotstraße 6 und nachts in beiden Gebäuden absehbar überschritten werden.

Mit erschütterungsmindernden Maßnahmen (leichtes Masse-Feder-System) wird der untere Anhaltswerte  $A_u$  von 0,23 tags an beiden Gebäuden eingehalten, der untere Anhaltswert von 0,15 in der Hörbrotstraße nachts überschritten. Eine Berechnung der Beurteilungsschwingschnelle  $KB_{FT}$  zur Berücksichtigung der Dauer und Häufigkeit der Erschütterungseinwirkungen ist somit zumindest für die Hörbrotstraße erforderlich.



### 9.3 Prognosewerte - $KB_{FT_r}$

Aufgrund der ermittelten Überschreitung des  $A_u$  nachts an der Hörbrotstraße auch mit Einbau eines leichten Masse-Feder-Systems ist eine Berechnung der Beurteilungsschwingschnelle  $KB_{FT_r}$  zur Berücksichtigung der Dauer und Häufigkeit der Erschütterungseinwirkungen erforderlich. Aus den Verkehrsmengengerüsten und den ermittelten  $KB_{F_{max}}$ -Werten ergeben sich folgende Beurteilungsschwingschnellen  $KB_{FT_r}$  in den untersuchten Wohngebäuden:

Tabelle 9:  $KB_{FT_r}$ -Werte

Nr.	Adresse	Prognose-Planfall			
		$KB_{FT_r}$			
		ohne Maßnahmen		mit Maßnahmen	
		tags	nachts	tags	nachts
1	Hörbrotstr. 6	0,093	0,040	0,074	0,033
2	Georg-Brach-Str. 8	0,073	0,032	0,054	0,024

Die o. a. Tabelle zeigt, dass ohne Anwendung von erschütterungsmindernden Maßnahmen der Anhaltswert für die Beurteilungsschwingschnelle  $A_r$  von 0,11 tags sowie der Anhaltswert von 0,08 nachts für allgemeine Wohngebiete in beiden untersuchten Wohngebäuden eingehalten wird, an der Hörbrotstraße tags allerdings relativ knapp.

Die Unterschreitung beträgt dort etwa 15 % des Anhaltswerts. Dies erscheint aus gutachterlicher Sicht zu unsicher, es wird daher der Einbau eines leichten Masse-Feder-Systems empfohlen.

Mit einem leichten Masse-Feder-System ist die Einhaltung der Anhaltswerte der DIN 4150-2 für die Tag- und Nachtzeit als deutlich gesichert zu erwarten.

### 9.4 Sekundärschall - $L_{sek}$

Anhand der o. a. maximalen Schwingschnellen ergeben sich die nachfolgend aufgeführten sekundären Luftschallpegel:

Tabelle 10: Sekundärschall  $L_{sek}$

Nr.	Adresse	Prognose-Planfall			
		$L_{sek}$ in dB(A)			
		ohne Maßnahmen		mit Maßnahmen	
		tags	nachts	tags	nachts
1	Hörbrotstr. 6	31,1	23,8	28,6	21,7
2	Georg-Brach-Str. 8	25,3	18,2	23,1	16,0

Es zeigt sich mithin, dass die Richtwerte von 35 dB(A) tags sowie der Richtwert von 25 dB(A) eingehalten sind.

## 10. Messung TU München, Pferseer Straße 14

Seitens der Technischen Universität München, Lehrstuhl und Prüfamts für Verkehrswegebau wurde eine Messung an der Pferseer Straße 14 im Regelbetrieb nach Realisierung eines leichten Masse-Feder-Systems (LMFS bzw. MFS), das seit 1999 eingebaut ist, durchgeführt. Dies ist im Bericht Nr. 2882 der TUM vom 25.05.2012 dokumentiert.

Das Gebäude ist mehrgeschossig, älteren Datums, in Ziegelbauweise ausgeführt, unterkellert, und in den Obergeschossen mit Holzbalkendecken ausgeführt. Im Detail wird auf die Untersuchung verwiesen.

Herangezogen werden die  $KB_{F_{max}}$ -Werte in der oberen Deckenebene, vertikal.

In erster Näherung sind die Messungen Nrn. 7, 12, 13, 14, 15, 16, 19, 21, 22, 27, 31 übertragbar, dies betrifft die Baureihen Cityflex und Combino.

Die nachstehende Tabelle gibt einen Überblick über die seinerzeitigen Messungen. Die Nummern der Messungen sind in der Reihenfolge ihrer Nennung auf Seite 6 des Gutachtens der TUM beibehalten, um den Abgleich zu erleichtern.

Tabelle 11: Messergebnisse  $KB_{F_{max}}$  in der oberen Deckenebene, vertikal, Auszug

Messung Nr.	$KB_{F_{max}}$ vertikal, Decke
7	0,09
14	0,10
22	0,09
31	0,11
15	0,10
16	0,11
19	0,10
21	0,11
27	0,20
12	0,09
13	0,07

Die bewertete Schwingschnelle  $KB_{FTm}$  arithmetisch gemittelt über die dargestellten gemessenen  $KB_{F_{max}}$ -Werte beträgt 0,11.

Die Messungen fanden seinerzeit in einem Bezugsabstand von 9,5 m statt. Mit Umbau der Strecke hat sich dieser auf 5,5 m reduziert. Dadurch erhöhen sich die maximalen Schwingschnellen um den Faktor 1,3, was im Ergebnis bedeutet, dass an der Pferseer Straße 14 von maximalen Schwingschnellen um 0,14 auszugehen ist.

Da der untere Anhaltswert eingehalten ist sind die Anforderungen der DIN 4150-2 eingehalten.

Umgerechnet auf den  $KB_{FTr}$  ergeben sich bei einem Verkehr von 296 Fahrten tags bzw. 30 Fahrten nachts entsprechend der aktuellen Verkehrsprognose Beurteilungsschwingschnellen von

$$KB_{FTr, Tag} = 0,054 \text{ und}$$

$$KB_{FTr, Nacht} = 0,024.$$

Damit sind die Anforderungen von  $A_r = 0,11$  tags und von  $A_r = 0,08$  nachts deutlich eingehalten.

Der Sekundärschall beträgt auf Basis der Messung

$$L_{Sek, Tag} = 31,8 \text{ dB(A)}$$

$$L_{Sek, Nacht} = 24,9 \text{ dB(A)}$$

Damit sind die Richtwerte von 35 dB(A) tags sowie der Richtwert von 25 dB(A) nachts eingehalten.

Im Ergebnis zeigt sich, dass anhand der Ergebnisse der TUM bei einem Abstand der Gleise von 5,5 m zum Gleis bei Vollbetrieb zweier Linien und Einbau eines leichten Masse-Feder-Systems zu erwarten ist, dass die Anforderungen an den Erschütterungsschutz eingehalten sind.

Insofern bestätigt dies die Prognose im gegenständlichen Fall.

## Zusammenfassung

Die Stadtwerke Augsburg GmbH (SWA) plant den Bau der Straßenbahnlinie 5.

Im Vorfeld der Baumaßnahme wurden die Schwingungseigenschaften zweier repräsentativer Gebäude durch Ersatzanregung ermittelt. Gegenstand der Untersuchung waren die Gebäude Hörbrotstraße 6 und Georg-Brach-Straße 8 im Rosenau-Thelottviertel bzw. in Pfersee-Nord.

Für die o. g. Gebäude war anhand der ermittelten Übertragungsfunktionen und geeigneten Emissionsspektren aus vergleichbaren gemessenen Situationen eine Erschütterungsprognose für den künftigen Straßenbahnbetrieb 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.

Die Ergebnisse wurden anhand der für die Beurteilung von Erschütterungseinwirkungen auf Menschen einschlägigen DIN 4150-2 beurteilt. Zudem wurde aus den Prognosewerten der zu erwartende sekundäre Luftschall bestimmt.

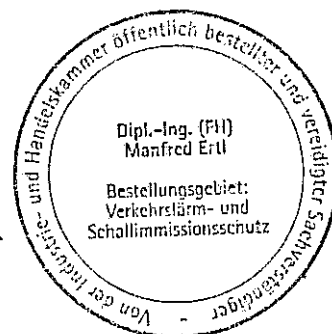
Die Prognose hat ergeben, dass die unteren Anhaltswerte  $A_u$  der DIN 4150-2 überwiegend, aber nicht durchgehend eingehalten sind.

Insofern erscheint es angezeigt, ein leichtes Masse-Feder-System zu realisieren. Mit Einbau eines leichten MFS ist davon auszugehen, dass die Anforderungen an den Erschütterungsschutz dauerhaft eingehalten sind.

Dies wurde auch durch Auswertung früherer Untersuchungen unter vergleichbaren Umständen bestätigt.

Neusäß, 18.12.2020

Dipl.-Ing. (FH) M. Ertl



## A) häufig verwendete Abkürzungen

$KB_{Fmax}$	Maximale KB-bewertete Schwingschnelle (30 s Taktmaximalverfahren), dimensionslos
$KB_{Ftr}$	Beurteilungsschwingstärke, dimensionslos
$KB_{FTm}$	Gemittelte maximale Schwingschnelle über die bestimmten $KB_{Fmax}$ -Werte
$L_{Sek}$	Sekundärluftschallpegel in dB(A)
WA	Gebietsnutzung: allgemeines Wohngebiet
x / y / z	Messrichtung, x / y = horizontal, z = vertikal

## B) Grundlagenverzeichnis / Literatur

Für die Untersuchung wurden folgende Grundlagen herangezogen:

- [1] DIN 45669, Messung von Schwingungsimmissionen
- [2] DIN 4150-2, Erschütterungen im Bauwesen, Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden, Juni 1999
- [3] DB AG, Leitfaden für den Planer, Körperschall und Erschütterungsschutz, August 1996
- [4] Zeitschrift für Lärmbekämpfung, Ermittlung des sekundären Luftschalls aus dem Schienenverkehr, Januar 2006
- [5] VDI 3837, Erschütterungen in der Umgebung von oberirdischen Schienenverkehrswegen – Spektrales Prognoseverfahren, März 2006
- [6] Stadt Augsburg, Auszug aus dem Flächennutzungsplan
- [7] Bayerische Vermessungsverwaltung, digitale Flurkarte
- [8] SWA, Technische Planung, Straßenbahnlinie 5, Stand 30.06.2017
- [9] Richtlinie Bautechnik, Leit- Signal- u. Telekommunikationstechnik, Messung und Prognose von Erschütterungseinwirkungen, Nr. 820.2050A02, gültig vom 1.1.2017, der Deutschen Bahn AG.
- [10] Technische Universität München, Lehrstuhl und Prüfamf für Verkehrswegebau, Ermittlung der Erschütterungssituation im Bereich der Pferseer Straße 14 in Augsburg, Bericht Nr. 2882 vom 25.05.2012

## C) Anlagenverzeichnis

Anlage Nr.	Art	Inhalt
13.04	Lageplan	Übersichtslageplan, gemessene Gebäude
13.05	Tabelle	Fotodokumentation