

# - Nachrichtlich -

## ERSCHÜTTERUNGSTECHNISCHE UNTERSUCHUNG

### Vorhaben:

Straßenbahnneubau Campus TU Lichtwiese in Darmstadt

### Untersuchungsumfang:

Ermittlung und Beurteilung der Einwirkungen durch  
schienenverkehrsinduzierte Immissionen  
aus Erschütterungen und sekundärem Luftschall  
auf Menschen in Gebäuden und auf schwingungssensible  
Einrichtungen in den Gebäuden L5/01 und L5/06 der Hoch-  
schule

SCHALLIMMISSIONSSCHUTZ  
ERSCHÜTTERUNGSSCHUTZ  
BAUDYNAMIK & BAUPHYSIK  
TECHNISCHE AKUSTIK

Messstelle zur Ermittlung der Emission  
und Immission von Geräuschen und  
Erschütterungen nach § 26 BImSchG

Schallschutzprüfstelle DIN 4109  
Zertifikat: VMPA-SPG-203-00-HE

Fehlheimer Str. 24 □ 64683 Einhausen  
Telefon (06251) 9646-0  
Telefax (06251) 9646-46

E-Mail: [info@fritz-ingenieure.de](mailto:info@fritz-ingenieure.de)  
[www.fritz-ingenieure.de](http://www.fritz-ingenieure.de)

Bericht Nr.: **14237-VVE-1**  
Datum: **30.09.2015**

Auftraggeber:

**Mailänder Consult GmbH**  
**Mathystraße 13**  
**76133 Karlsruhe**

Sachbearbeiter:

**Dipl.-Ing. Rolf Schneider**

Qualitätskontrolle:

**Dipl.-Phys. Peter Fritz**

Umfang des Dokumentes

Textteil: 40 Seiten

Anhang 1:	2 Seiten
Anhang 2:	11 Seiten
Anhang 3:	4 Seiten
Anhang 4:	3 Seiten
Anhang 5:	7 Seiten
Anhang 6:	2 Seiten
Anhang 7:	2 Seiten
Anhang 8:	3 Seiten

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Sachverhalt und Aufgabenstellung</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Bearbeitungsgrundlagen</b>	<b>9</b>
3.1	Rechtsgrundlagen und Regelwerke	9
3.2	Planunterlagen und projektspezifische Informationen	10
<b>4</b>	<b>Beschreibung des Planvorhabens</b>	<b>11</b>
4.1	Baumaßnahme	11
4.2	Immissionsschutzrechtliche Einstufung	11
4.3	Bebauung im Einwirkungsbereich	12
<b>5</b>	<b>Anforderungen an den Immissionsschutz</b>	<b>12</b>
<b>5.1</b>	<b>Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden</b>	<b>12</b>
5.1.1	Erschütterungen	12
5.1.1.1	Beurteilungsverfahren	13
5.1.1.2	Anhaltswerte	13
5.1.1.3	Kriterien einer wesentlichen Änderung	14
5.1.2	Sekundärer Luftschall	16
5.1.2.1	Grundlagen der Beurteilung	16
5.1.2.2	Anforderungswerte	16
5.1.2.3	Kriterien einer wesentlichen Änderung	17
<b>5.2</b>	<b>Einwirkungen auf schwingungssensible Einrichtungen</b>	<b>17</b>
<b>6</b>	<b>Arbeitsgrundsätze und Vorgehensweise</b>	<b>18</b>
<b>6.1</b>	<b>Prognose</b>	<b>19</b>
6.1.1	Emission	20
6.1.2	Transmission	20
<b>6.2</b>	<b>Immission</b>	<b>23</b>
6.2.1	Einwirkungen in exemplarischen Gebäuden	23
6.2.2	Extrapolation auf die Gesamtheit aller Gebäude	25
<b>6.3</b>	<b>Betriebsparameter</b>	<b>26</b>
6.3.1	Fahrzeuge, Zugzahlen, Geschwindigkeiten, Oberbau	26
6.3.2	Ermittlung von Einwirkzeiten	27
6.3.2.1	Erschütterungen	27
6.3.2.2	Sekundäre Luftschallimmissionen	28
<b>7</b>	<b>Untersuchungsergebnisse</b>	<b>28</b>

<b>7.1</b>	<b>Einwirkungen auf exemplarische Einzelobjekte</b>	<b>28</b>
7.1.1	Erschütterungen	29
7.1.2	Sekundärer Luftschall	30
<b>7.2</b>	<b>Abgrenzung des kritischen Einwirkungsbereiches</b>	<b>31</b>
7.2.1	Bereich 1: Gleisdreieck Nieder-Ramstädter Straße	34
7.2.2	Bereich 2: Lichtwiesenweg – Wohnbebauung	34
7.2.3	Bereich 3: Campus Lichtwiese – Institutsgebäude	35
<b>7.3</b>	<b>Einwirkungen auf schwingungssensible Einrichtungen</b>	<b>35</b>
<b>8</b>	<b>Maßnahmen zur Konfliktbewältigung</b>	<b>37</b>
<b>8.1</b>	<b>Gleisdreieck Nieder-Ramstädter Straße</b>	<b>37</b>
<b>8.2</b>	<b>Institutsgebäude L5/01 und L5/06</b>	<b>38</b>
<b>8.3</b>	<b>Immissionen mit Maßnahme</b>	<b>39</b>
8.3.1	Gleisdreieck Nieder-Ramstädter Straße	39
8.3.2	Institutsgebäude L5/01 und L5/06	39
<b>9</b>	<b>Abschließende Bemerkungen</b>	<b>39</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Übertragung von Erschütterungen	20
Abbildung 2	Prinzipskizze Gleisdreieck Nieder-Ramstädter Straße	37
Abbildung 3	Prinzipskizze Bereich Gebäude L5/01 und L5/06	38

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Anhaltswerte A zur Beurteilung von Erschütterungen	14
Tabelle 2	VC-Linien gemäß VDI 2038	18

## Anhänge

Anhang 1	Übersichtslagepläne
Anhang 2	Emissionen
Anhang 3	Transmissionen
Anhang 4	Immissionen mit Standardoberbau
Anhang 5	Einwirkungsmatrizen
Anhang 6	Einwirkungen auf schwingungssensible Einrichtungen
Anhang 7	Einfügedämmung der elastischen Schutzmaßnahme
Anhang 8	Immissionen mit Erschütterungsschutzmaßnahme

## Abkürzungsverzeichnis

A	Anhaltswert
A <sub>o</sub>	oberer Anhaltswert gemäß DIN 4150-2 [-]
A <sub>r</sub>	Beurteilungs-Anhaltswert gemäß DIN 4150-2 [-]
A <sub>u</sub>	unterer Anhaltswert gemäß DIN 4150-2 [-]
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz
D	Korrektursummand zur Berücksichtigung der Raumnutzung [dB]
[dB(A)]	Dezibel, A-bewertet
D <sub>E</sub>	Einfügedämmung [dB]
ΔL	Pegeldifferenz [dB]
f	Frequenz [Hz]
Hz	Hertz, Schwingungen je Sekunde [s <sup>-1</sup> ]
IP	Immissionsort
L <sub>i</sub>	A-bewerteter sekundärer Luftschallpegel [dB(A)]
L <sub>r,i</sub>	Beurteilungs-Innenschallpegel [dB(A)]
L <sub>r,sek</sub>	Beurteilungspegel für den sekundären Luftschall [dB(A)]
L <sub>vA</sub>	A-bewerteter Körperschallschnellepegel in Fußbodenmitte [dB(A)]
KB <sub>FTi</sub>	Taktmaximalwert [-]
KB <sub>FTm</sub>	Taktmaximal-Effektivwert [-]
KB <sub>Fmax</sub>	maximale bewertete Schwingstärke [-]
KB <sub>FTr</sub>	Beurteilungsschwingstärke [-]
MK	Kerngebiet
n	Abnahmekoeffizient gemäß DIN 4150-1 [-]
N	Anzahl von Zügen [-]
r	Abstand [m]
r <sub>krit</sub>	kritischer Abstand [m]
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
REM	Rasterelektronenmikroskop
σ	Abstrahlgrad des betrachteten Bauteils [-]
v	Schwingschnelle [mm/s]
v <sub>0</sub>	Referenzwert für die Schwingschnelle [5 · 10 <sup>-8</sup> m/s]
v <sub>max</sub>	Höchstgeschwindigkeit [km/h]
VwVfG	Verwaltungsverfahrensgesetz
VC	Vibration Criteria
WA	Allgemeines Wohngebiet

## 1 Zusammenfassung

Im Rahmen der Planung zum Straßenbahnneubau Campus TU Lichtwiese in Darmstadt wurde geprüft, ob aus dem geplanten Neubau der Trasse Immissionskonflikte aus vorhabenbedingten Erschütterungen und sekundärem Luftschall zu erwarten sind. Ferner wurde geprüft, ob die schienenverkehrsinduzierten Erschütterungen zu möglichen Konflikten hinsichtlich schwingungssensibler Laboreinrichtungen in nahegelegenen Hochschulgebäuden führen. Die Ergebnisse der Untersuchung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- ❑ Für insgesamt **5 Gebäude** im unmittelbaren direkten Einwirkungsbereich der geplanten Straßenbahnstrecke wurden die zu erwartenden Immissionen aus Erschütterungen und sekundärem Luftschall unter Berücksichtigung der messtechnisch erhobenen Übertragungsfunktionen prognostiziert und gemäß den Anforderungen der **DIN 4150-2** /8/ bzw. der **24. BImSchV** /4/ beurteilt. Für diese Gebäude wird eine Konfliktfreiheit bezüglich erheblich belästigender Immissionen aus Erschütterungen und sekundärem Luftschall prognostiziert.
- ❑ Extrapoliert man die Untersuchungsergebnisse auf die Gesamtheit aller im Einwirkungsbereich des Vorhabens liegenden Gebäude, so können lediglich im Bereich des Abzweigs von der Nieder-Ramstädter-Straße in den Lichtwiesenweg für die Gebäude im Kurvenbereich erheblich belästigende Immissionen nicht ausgeschlossen werden. Hier besteht eine erschütterungstechnische Vorbelastung durch die Bestandsstrecke. Durch den neuen Kurvenbereich kommt es hier zu einer „**wesentlichen Erhöhung**“ der zukünftigen Immissionen gegenüber der erschütterungstechnischen Vorbelastungssituation. Somit besteht hier ein Anspruch auf erschütterungsmindernde Vorsorgemaßnahmen.
- ❑ In dem genannten Streckenabschnitt sind über den Standardoberbau hinausgehende oberbautechnische Maßnahmen, wie z. B. der Einbau von elastischen Matten unterhalb des Gleiskörpers, zur Reduzierung der von den Gleisanlagen ausgehenden Schwingungsemissionen vorzusehen. Die Maßnahmen sind so auszulegen, dass die Anhaltswerte der für die Immissionsbelastung nach o. g. DIN

eingehalten werden. Als Schutzvorkehrung ist es erforderlich, in diesem Bereich die Matten oder sonstige elastische Elemente so zu bemessen, dass die Oberbaueigenfrequenz des gewählten Systems

$$f_0 = 25 \pm 2 \text{ Hz}$$

beträgt. Es wird empfohlen, im Bereich des Gleisdreiecks an der Kreuzung Nieder-Ramstädter Straße Lichtwiesenweg sämtliche Streckenabschnitte mit Weichen, und die Gleisbögen mit einem Überstand von jeweils mindestens 5 m in alle Richtungen elastisch zu lagern.

- Im Bereich der Institutsgebäude der TU Darmstadt an der Lichtwiese befinden sich in den beiden Gebäuden L5/01 und L5/06 schwingungssensible Laboreinrichtungen. Die Trasse verläuft dort in Kurvenlage bzw. hat dort Weichenbereiche. Hier wird es ebenfalls erforderlich eine elastische Lagerung des Oberbaus auszuführen. Die Oberbaueigenfrequenz des gewählten Systems sollte auf

$$f_0 = 8 \pm 1 \text{ Hz}$$

abgestimmt sein.

## 2 Sachverhalt und Aufgabenstellung

Zur Verbesserung der ÖPNV-Anbindung des Campus TU Lichtwiese planen die HEAG mobilo GmbH und die Stadt Darmstadt in Abstimmung mit der TU Darmstadt die Verlängerung der Straßenbahnlinie 2 von der Nieder-Ramstädter Straße auf den Campus der Universität.

Beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge kommt es im Kontaktbereich zwischen Rad und Schiene zu Schwingungsanregungen, die auf Störungen des stationären Abrollvorganges zurückzuführen sind. Verantwortlich hierfür sind einerseits Inhomogenitäten der Schiene, andererseits auch das Rad selbst, das in der Regel einen ungleichmäßigen Verschleiß erfährt. Die impulsförmige Anregung des Radsatzes und des Gleiskörpers wiederum hat die Anregung von Eigenschwingungen des Gesamtsystems zur Folge.

Die aus den dynamischen Lasten resultierenden Schwingungen des Gleisoberbaus werden über den Untergrund auf nahe stehende Gebäude übertragen, die ihrerseits zu Schwingungen angeregt werden. Die auftretenden Schwingungsamplituden sind in der Regel so gering, dass Bauwerksschäden als Folge der dynamischen Beanspruchung ausgeschlossen werden können. Dennoch können Schwingungen bereits bei geringen Schwingstärken zu Beeinträchtigungen des Wohlbefindens von Menschen in Gebäuden führen. Über die Geschossdecken werden Schwingungen des Gebäudekörpers auf den Menschen übertragen, die vom Körper direkt als mechanische Schwingungsmissionen wahrgenommen werden. Weiterhin führen die in ein Bauwerk eingeleiteten Schwingungen zu einer Schallabstrahlung der Raumbegrenzungsflächen in Form von hörbarem (sekundärem) Luftschall. Selbst Immissionen, die als mechanische Schwingungen nicht mehr spürbar sind, können dann akustisch wahrnehmbar sein.

Geräusche und Erschütterungen zählen gemäß **§ 3** des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (**BImSchG**) /1/ je nach Stärke und Wahrnehmbarkeit zu den Immissionen, die geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft herbeizuführen.

Im Rahmen der vorliegenden erschütterungstechnischen Untersuchung ist zu prüfen, welche Immissionen aus Erschütterungen und sekundärem Luftschall beim künftigen Betrieb der Strecke zu erwarten sind und ob diese zu erheblichen Belästigungen von Menschen in Gebäuden führen können. Darüber hinaus ist zu prüfen inwieweit die zu erwartenden schienenverkehrsinduzierten Erschütterungen zu möglichen Konflikten hinsichtlich schwingungssensibler Einrichtungen der TU Darmstadt führen können. Im Kreuzungsbereich der Nieder-Ramstädter Straße mit dem Lichtwiesenweg besteht eine erschütterungstechnische Vorbelastung durch die bereits vorhandene Straßenbahn. Hier ist zu prüfen, ob es durch die geplante Baumaßnahme zu einer „**wesentlichen Änderung**“ kommt.

Soweit relevante Konfliktpotentiale festgestellt werden, sind geeignete Vorsorgemaßnahmen zur Vermeidung bzw. zur Minimierung der Immissionskonflikte zu erarbeiten.



### **3 Bearbeitungsgrundlagen**

#### **3.1 Rechtsgrundlagen und Regelwerke**

Der durchgeführten erschütterungstechnischen Untersuchungen liegen die folgenden Gesetze, Verordnungen, Richtlinien und Regelwerke zu Grunde:

- /1/ Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigung, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG) in der aktuell gültigen Fassung.
- /2/ Verwaltungs-Verfahrensgesetz (VwVfG) in der aktuell gültigen Fassung
- /3/ 16. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung – 16. BImSchV) vom 12. Juni 1990, geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 18. Dezember 2014 (BGBl. I S. 2269)
- /4/ 24. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verkehrswege-Schallschutzmaßnahmenverordnung – 24. BImSchV) vom 4. Februar 1997 in ihrer berichtigten Fassung vom 16. Mai 1997
- /5/ Urteil des Bundesverwaltungsgerichtes vom 21.12.2010, BVerwG 7 A 14.09
- /6/ Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung – BOStrab) vom 11. Dezember 1987 (BGBl. I S. 2648), zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 8. November 2007 (BGBl. I S. 2569)
- /7/ DIN 4150, Teil 1 „Erschütterungen im Bauwesen: Vorermittlung von Schwingungsgrößen“, Juni 2001
- /8/ DIN 4150, Teil 2 „Erschütterungen im Bauwesen: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden“, Juni 1999

- /9/ VDI 2038, Blatt 2 „Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken bei dynamischen Einwirkungen, Untersuchungsmethoden und Beurteilungsverfahren der Baudynamik, Schwingungen und Erschütterungen - Prognose, Messung, Beurteilung und Minderung“, Januar 2013
- /10/ DB-Leitfaden für den Planer, Körperschall- und Erschütterungsschutz, in der aktuell gültigen Fassung
- /11/ Bodendynamik, Grundlagen und Anwendungen; Herausgeber Wolfgang Haupt; 1986
- /12/ 18. Symposium – Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen, Ziegler Consultants, Mai 2015 Empa Dübendorf

### **3.2 Planunterlagen und projektspezifische Informationen**

Zur Bearbeitung wurden die nachfolgenden Planunterlagen und Schriftsätze herangezogen:

- /13/ ÖPNV-Erschließung Uni-Campus Lichtwiese, Streckenvariante Mensa – Erschütterungstechnische Untersuchung, Beurteilung des zukünftigen Erschütterungsimmissionsstatus, I.B.U Ingenieurbüro für Schwingungs-, Schall- und Schienenverkehrstechnik GmbH, Essen 2013
- /14/ Messbericht Straßenbahnneubau TU Lichtwiese Darmstadt, Mess-technische Erfassung der Transferfunktionen von Geschossdecken und vom Freifeld auf die Gebäudfundamente in exemplarischen Gebäuden im Einwirkungsbereich der Straßenbahnstrecke, FRITZ GmbH, Bericht Nr. 14237-VME-1 vom 19.08.2015
- /15/ Straßenbahnanbindung Campus Lichtwiese, Linie 2, Lagepläne, Mailänder Consult GmbH, Karlsruhe, Entwurf Juni 2015
- /16/ Straßenbahnanbindung Campus Lichtwiese, Erläuterungsbericht, Mailänder Consult GmbH, Karlsruhe, Entwurf Juni 2015

/17/ Auskunft zu Verkehrsbelastungen, Oberbauarten, Fahrzeugtypen und Geschwindigkeiten der Straßenbahnen, Mailänder Consult GmbH

## **4 Beschreibung des Planvorhabens**

### **4.1 Baumaßnahme**

Die HEAG mobilo GmbH und die Stadt Darmstadt planen in Abstimmung mit der TU Darmstadt die Verlängerung der Straßenbahnlinie 2 von der Nieder-Ramstädter Straße auf den Campus der TU Darmstadt.

Die geplante Trasse zweigt zweigleisig an der bestehenden Haltestelle „Hochschulstadion“ Richtung Osten in den Bereich der Universität ab. Die Strecke verläuft parallel zum Lichtwiesenweg, vorbei am Fakultätsgebäude Architektur, verschwenkt dort Richtung Bauingenieurgebäude / Mensa Wirtschaftshof und endet nach ca. 1,1 km Streckenlänge mit einer Wendeschleife vor dem Hörsaal- und Medienzentrum der Universität Darmstadt. Im Anschlussbereich Nieder-Ramstädter Straße / Lichtwiesenweg werden südlich und nördlich des Lichtwiesenweges 2 zweigleisige Kurven zur Anbindung der Trasse in der Nieder-Ramstädter Straße an die neuen Gleise im Lichtwiesenweg erforderlich. Hierbei dient die südliche Anbindung lediglich als Bedarfsgleise, der Hauptverkehr verläuft über die nördliche Anbindung. In den Lichtwiesenweg. Des Weiteren werden zusätzliche Weichen in dem vorgenannten Anschlussbereich erforderlich.

### **4.2 Immissionsschutzrechtliche Einstufung**

Im Bereich der Nieder-Ramstädter Straße besteht durch den ÖPNV bereits eine erschütterungstechnische Vorbelastung, die bei der Anspruchsberechtigung auf erschütterungstechnische Vorsorgemaßnahmen berücksichtigt werden muss.

Für den Fall, dass in der umliegenden, schutzbedürftigen Bebauung eine Überschreitung der Anforderungswerte festgestellt wird ist zunächst zu prüfen, ob sich aus dem Planvorhaben eine „wesentliche Erhöhung“ der schienenverkehrsinduzierten Immissionen aus Erschütterungen und sekundärem Luftschall ergibt. Nur für den Fall, dass sowohl die Anforderungswerte überschritten werden und gleichzeitig eine „wesentliche Erhöhung“ vorliegt ist die Vorhabenträgerin, die HEAG mobilo GmbH, dem

Grunde nach dazu verpflichtet, dem Grundsatz der Konfliktvermeidung bzw. der Konfliktlösung folgend, geeignete Maßnahmen zu ergreifen, mit denen die Verträglichkeit des Vorhabens gewährleistet werden kann.

Im Bereich des Lichtwiesenweges und im Bereich des Campus der TU Darmstadt ist die Baumaßnahme als Neubau zu sehen. Hier werden die prognostizierten Immissionen direkt mit den Anhaltswerten der **DIN 4150-2 /8/** (Erschütterungen) bzw. mit den Immissionsrichtwerten der **24. BIm-SchV /4/** (sekundärer Luftschall) verglichen.

### 4.3 Bebauung im Einwirkungsbereich

Die umliegende schutzwürdige Bebauung im Bereich westlich der Nieder-Ramstädter Straße sind 3 bis 4-geschossige Wohnhäuser, die sich im Allgemeinen Wohngebiet (**WA**) befinden. Im Kreuzungsbereich Nieder-Ramstädter Straße / Lichtwiesenweg nördlich des Lichtwiesenweges liegt die Georg-Büchner-Schule. Südlich des Lichtwiesenweges schließt sich ebenfalls ein Allgemeines Wohngebiet an, indem die 2 bis 3-geschossigen Studentenwohnhäuser sich befinden.

Ab der Haltestelle Kletterhalle liegen entlang der geplanten Straßenbahntrasse Institutsgebäude der TU Darmstadt Lichtwiese. Diese werden entsprechend ihrer Schutzwürdigkeit wie Kerngebiete (**MK**) eingestuft. Hierbei handelt es sich um Gebäude mit Hörsälen, Bibliotheken, Büroräume und Forschungseinrichtungen. Die Gebäude haben alle mindestens 3 bis 7 Vollgeschosse

## 5 Anforderungen an den Immissionsschutz

### 5.1 Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden

#### 5.1.1 Erschütterungen

Im Gegensatz zu schalltechnischen Problemstellungen existieren derzeit keine gesetzlichen Bestimmungen, in denen Grenzwerte für Erschütterungsimmissionen festgelegt sind. Daher werden die in Fachkreisen allgemein anerkannten Anhaltswerte gemäß **DIN 4150-2 /8/** zur Beurteilung von Erschütterungseinwirkungen auf Menschen in Gebäuden herangezogen. Bei Einhaltung dieser Anhaltswerte kann davon ausgegangen werden, dass die Erschütterungen keine „erheblich belästigenden“ Einwirkun-

gen darstellen. Erhebliche Belästigungen stellen die niedrigste Qualifikationsstufe schädlicher Umwelteinwirkungen dar.

Die Rechtsgrundlage für Ansprüche auf Schutzmaßnahmen ist in **§ 74 (2) Verwaltungsverfahrensgesetz (VwVfG)** /2/ begründet. Hiernach sind dem Träger eines Vorhabens Vorkehrungen oder die Einrichtung und Unterhaltung von Anlagen aufzuerlegen, die zum Wohl der Allgemeinheit oder zur Vermeidung nachteiliger Wirkungen erforderlich sind. Sind solche Vorkehrungen oder Anlagen untunlich, das heißt mit angemessenem Aufwand zum Schutzzweck nicht realisierbar, oder sind die Maßnahmen mit dem Vorhaben nicht vereinbar, so besteht ein entsprechender Entschädigungsanspruch.

#### 5.1.1.1 Beurteilungsverfahren

Zur Beurteilung der Erschütterungsimmissionen im Einwirkungsbereich von Bahnanlagen sind gemäß **DIN 4150-2** /8/ zwei Beurteilungsgrößen heranzuziehen:

- ☐ die maximale zeit- u. frequenzbewertete Schwingstärke **KB<sub>Fmax</sub>**,
- ☐ die Beurteilungsschwingstärke **KB<sub>FT</sub>**.

Beide Beurteilungsgrößen sind getrennt für die drei Richtungskomponenten X, Y (horizontal) und Z (vertikal) zu ermitteln. Der jeweils größte der drei Werte ist der Beurteilung zu Grunde zu legen. Die Beurteilung erfolgt anhand der Kriterien **A<sub>u</sub>** (für **KB<sub>Fmax</sub>**) und **A<sub>r</sub>** (für **KB<sub>FT</sub>**). Ist **KB<sub>Fmax</sub>** kleiner oder gleich dem unteren Anhaltswert **A<sub>u</sub>**, so werden die Anforderungen der Norm erfüllt. Dann gilt als nachgewiesen, dass die schienenverkehrsinduzierten Erschütterungsimmissionen **nicht** als „**erheblich belästigend**“ einzustufen sind. Übersteigt die maximale bewertete Schwingstärke den unteren Anhaltswert, erfolgt die Beurteilung in einem weiteren Prüfschritt auf Basis der Beurteilungsschwingstärke **KB<sub>FT</sub>** im Vergleich zu dem Beurteilungsanhaltswert **A<sub>r</sub>**. Hierbei kennzeichnet der **KB<sub>Fmax</sub>**-Wert den Maximalwert aller einzelnen Zugvorbeifahrten. Der **KB<sub>FT</sub>**-Wert ist der Mittelwert aller Zugvorbeifahrten über den jeweiligen Beurteilungszeitraum (Tag / Nacht).

#### 5.1.1.2 Anhaltswerte

Die Anhaltswerte **A** zur Beurteilung von Erschütterungsimmissionen in Wohnungen und vergleichbar genutzten Räumen werden in Tabelle 1 der

**DIN 4150-2** /8/ jeweils in Abhängigkeit von der Art der baulichen Nutzung der Umgebung des Einwirkungsortes sowie für den Tag- und den Nachtzeitraum festgelegt.

Für oberirdisch geführten Schienenverkehr des ÖPNV nennt die **DIN 4150-2** /8/ eine Sonderregelung. Gemäß Ziffer 6.5.3.3 dürfen die  $A_u$ - und  $A_r$ -Werte nach **DIN 4150-2** /8/ um den Faktor **1,5** angehoben werden. Dieser Faktor ist bei den in der **Tabelle 1** angegebenen Anhaltswerten bereits berücksichtigt.

**Tabelle 1** Anhaltswerte A zur Beurteilung von Erschütterungen

Zeile	Einwirkungsort	tags		nachts	
		$A_u$	$A_r$	$A_u$	$A_r$
1	Einwirkungsorte, in deren Umgebung nur gewerbliche Anlagen und gegebenenfalls ausnahmsweise Wohnungen für Inhaber und Leiter der Betriebe sowie für Aufsichtspersonal und Bereitschaftspersonen untergebracht sind	0,600	0,300	0,450	0,225
2	Einwirkungsorte, in deren Umgebung vorwiegend gewerbliche Anlagen untergebracht sind	0,450	0,225	0,300	0,15
3	Einwirkungsorte, in deren Umgebung weder vorwiegend gewerbliche Anlagen noch vorwiegend Wohnungen untergebracht sind	0,300	0,150	0,225	0,105
4	Einwirkungsorte, in deren Umgebung vorwiegend oder ausschließlich Wohnungen untergebracht sind	0,225	0,105	0,150	0,075
5	Besonders schutzbedürftige Einwirkungsorte, z. B. in Krankenhäusern, Kurkliniken, soweit sie in dafür ausgewiesenen Sondergebieten liegen	0,150	0,075	0,150	0,075

#### 5.1.1.3 Kriterien einer wesentlichen Änderung

Nach der aktuellen Rechtsprechung /5/ müssen sich Betroffene vorhandene Vorbelastungen aus Erschütterungsimmissionen zurechnen lassen. Das bedeutet, dass die Vorbelastung bei der Prüfung möglicher Vorsor-

geansprüche und bei der Abwägung geeigneter Schutzvorkehrungen zu berücksichtigen ist.

In diesem Zusammenhang wird auf die Rechtsprechung des Gerichtes zum primären Luftschall vor Inkraftsetzung der **16. BImSchV** /3/ verwiesen. Demgemäß können nach der gegenwärtigen Rechtslage reale und geldwerte Ausgleichsansprüche beim Vorhandensein erheblich belästigender Erschütterungsimmissionen an baulich geänderten Schienenverkehrswegen nur dann bestehen, wenn die Vorbelastung durch bestehende Bahnanlagen durch das Hinzutreten weiterer Erschütterungseinwirkungen in beachtlicher Weise erhöht wird und gerade in dieser Erhöhung eine zusätzliche, unzumutbare Beeinträchtigung liegt. Dies wird auch durch das aktuelle Urteil des Bundesverwaltungsgerichtes /5/ bestätigt. Unter Punkt 14 des Urteils wird angeführt, dass ein Erschütterungsschutz nur dann verlangt werden kann, wenn die Erschütterungsbelastung durch den Ausbau in **beachtlicher** Weise erhöht und gerade in dieser Erhöhung eine zusätzliche, dem Betroffenen billigerweise nicht mehr zumutbare Belastung liegt.

Im Zusammenhang mit der Frage, welche Erhöhung der Erschütterungsimmission eine unzumutbare Beeinträchtigung darstellt, bestätigt das Gericht dass eine Verstärkung der Erschütterungen dann wesentlich ist, wenn diese sich gegenüber der Vorbelastung um mindestens **25 %** erhöht. Hierbei wird die Festsetzung der Größe dieser Wahrnehmungsschwelle durch empirische hinreichend abgesicherte Erkenntnisse gestützt. Die Ergebnisse einer Laborstudie im Auftrag der Deutschen Bahn AG können hierzu herangezogen werden.

Die Untersuchungen der Laborstudie kommen zu dem Ergebnis, dass eine Erschütterungsdifferenz von 25 % Erhöhung "praktisch als Labor-Unterschiedsschwelle" anzusehen ist. Bei der Durchführung der Laboruntersuchungen, bei denen mehrere Probanden Erschütterungssignale zur Beurteilung angeboten wurden, wurden strenge Vergleichsbedingungen mit kurzen Pausen (ca. 3 Sekunden) zwischen den beiden angebotenen Signalen (Reiz- und Vergleich) angewendet. Es wird darauf hingewiesen, dass unter realen Bedingungen die Pausenstruktur zwischen den einzelnen Zugvorbeifahrten wesentlich größer ist, so dass die Wahrnehmung von Erschütterungsdifferenzen bei größeren Reizdifferenzen zu erwarten ist.



## 5.1.2 Sekundärer Luftschall

### 5.1.2.1 Grundlagen der Beurteilung

Für die Ermittlung und die Beurteilung von Geräuschemissionen aus sekundärem Luftschall bestehen derzeit weder normative Festsetzungen noch gültige Rechtsverordnungen. Daher ist es erforderlich, sich für eine sachgerechte Beurteilung an anderen Gesetzen, Verordnungen und Regelwerken auf Grundlage von Plausibilitätsbetrachtungen zu orientieren. Im vorliegenden Fall werden zur Beurteilung sekundärer Luftschallimmissionen Anforderungswerte aus der Verkehrswege-Schallschutzmaßnahmenverordnung (**24. BImSchV**) /4/ abgeleitet.

Zur Beurteilung des sekundären Luftschalls werden die aus den Korrektursummanden D in Tabelle 1 der **24. BImSchV** /4/ abgeleiteten Innenpegel (Korrektursummand D zuzüglich 3 dB(A)) als Beurteilungsmaßstab herangezogen. Die Korrektur von **3 dB** berücksichtigt, dass die Dämmwirkung von Außenbauteilen bei gerichtet einfallendem Schall geringer ausfällt als im diffusen Schallfeld.

Die **24. BImSchV** /4/ sieht i. V. m. der **16. BImSchV** /3/ mit dem „Schienenbonus“ einen Lästigkeitsabschlag bei der Ermittlung des Beurteilungspegels von schienenverkehrsinduziertem Lärm vor. Die Anwendung des Schienenbonus in Höhe von 5 dB(A) wurde vom Bundesverwaltungsgericht /5/ bestätigt. So führt der Senat aus, dass der Berücksichtigung eines Lästigkeitsunterschieds zu Gunsten des Schienenverkehrs im Rahmen der Anwendung von Anforderungswerten der **24. BImSchV** /4/ für sekundäre Luftschallimmissionen nicht die normative Verankerung fehle. Der Schienenbonus sei vielmehr ein Teil eines in sich schlüssigen Regelungskonzeptes.

Gemäß **§ 43 (1)** Satz 2 und 3 **BImSchG** /1/ ist dieser Abschlag zwar ab dem 1. Januar 2015 nicht mehr anzuwenden. Jedoch wurde für Schienenbahnen, die ausschließlich der Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (**BOStraB**) /6/ unterliegen, eine gesonderte Übergangsfrist bis zum 1. Januar 2019 festgelegt. Somit ist der Schienenbonus in der vorliegenden Untersuchung weiterhin anzuwenden.

### 5.1.2.2 Anforderungswerte

Die **24. BImSchV** /4/ unterscheidet die Anforderungswerte gemäß ihrer Raumnutzung. Im direkten Einwirkungsbereich der geplanten Straßen-



bahnstrecke befinden sich sowohl Wohngebäude im Bereich Nieder-Ramstädter Straße und Lichtwiesenweg als auch die Universitätsgebäude auf dem Campus Lichtwiese. Für die Wohngebäude erfolgt die Beurteilung der sekundären Luftschallimmissionen für den Tagzeitraum unter Zugrundelegung des Anforderungswertes für Wohnräume, für den Nachtzeitraum wird der Anforderungswert für Räume herangezogen, die überwiegend zum Schlafen genutzt werden. Demzufolge gelten folgende Immissionsrichtwerte für Wohnungen:

$$\begin{aligned} \text{IRW}_{\text{Tag}} &= 40 \text{ dB(A)}, \\ \text{IRW}_{\text{Nacht}} &= 30 \text{ dB(A)}. \end{aligned}$$

Bei Institutsgebäuden genutzten Räumen, z. B. bei Unterrichts-, Forschungs- oder Büroräumen, bei denen lediglich am Tag eine schutzbedürftige Nutzung vorliegt, ist ein Immissionsrichtwert von

$$\text{IRW}_{\text{Tag}} = 40 \text{ dB(A)}$$

anzuwenden. Sofern in diesen Räumen auch nachts eine schutzbedürftige Nutzung erfolgt, gilt dieser Anforderungswert sowohl für den Tag als auch für die Nacht.

#### **5.1.2.3 Kriterien einer wesentlichen Änderung**

Für den sekundären Luftschall wird in Anlehnung an die schalltechnische Problemstellung bei der Bewertung nach **16. BImSchV** /3/ eine Erhöhung der Beurteilungspegel von mindestens **3 dB(A)** als wesentlich erachtet. Ein Anspruch auf Vorsorgemaßnahmen ergibt sich demgemäß infolge einer wesentlichen Erhöhung der Beurteilungspegel bei gleichzeitiger Immissionsrichtwertüberschreitung.

## **5.2 Einwirkungen auf schwingungssensible Einrichtungen**

In den beiden Institutsgebäuden des Bauingenieurwesens L5/01 und L5/06 befinden sich schwingungssensible Einrichtungen. Hierbei handelt es sich um geodätische Messsysteme, Geräte der physikalischen Geodäsie und Satellitengeodäsie und Elektronenrastermikroskope. Hierfür liegen keine Herstellerangaben zu gerätespezifischen Anforderungen hinsichtlich Erschütterungen vor. Teilweise wird auf die Vibration Criteria (VC) der **VDI 2038**, Blatt 2 /9/ verwiesen.

**Tabelle 2** VC-Linien gemäß VDI 2038

VC-Linien	Schwingungs- pegel RMS- Terzspektren in $\mu\text{m/s}$	Typische Nutzung	Struktur- Größe / Genauigkeit
Menschliche Fühlschwelle	100 ((4 ... 80) Hz)	menschliche Fühlschwelle, für empfindliche Schlafbereiche, für Opernhäuser, Theater, für Mikroskope mit 100-facher Vergrößerung	30 $\mu\text{m}$
VC-A	50 ((4 ... 80) Hz)	unter fast allen Umständen geeignet für optische Mikroskope mit bis zu 400-facher Vergrößerung	8 $\mu\text{m}$
VC-B	25 ((1 ... 80) Hz)	ein geeigneter Standard für Inspektionsgeräte, allgemeine anspruchsvolle Labore, Lithografiergeräte (inklusive Stepper) bis zu 3 $\mu\text{m}$ Strukturbreite	3 $\mu\text{m}$
VC-C	12,5 ((1 ... 80) Hz)	ein geeigneter Standard für Mikroskope bis zu 1000-facher Vergrößerung, ein guter Standard für die meisten Lithografie- und Inspektionsgeräte bis hinunter zu 1 $\mu\text{m}$ Strukturbreite	1 $\mu\text{m}$
VC-D	6,25 ((1 ... 80) Hz)	unter fast allen Umständen passend für sehr hochwertige Elektronenmikroskope (REM, TEM), E-Beam-Systeme usw., die bis an ihre Leistungsgrenze eingesetzt werden	0,3 $\mu\text{m}$
VC-E	3,1 ((1 ... 80) Hz)	Die Einhaltung dieses Kriteriums ist sehr schwierig; es kann nur in wenigen Fällen eingehalten werden, vorzugsweise auf nicht unterkellerten Bodenplatten, erforderlich für Geräte höchster Präzision	< 0,1 $\mu\text{m}$
VC-F	1,6 ((1 ... 80) Hz)	Kriterium für extrem ruhige Forschungsräume, sehr schwierig zu erreichen; dieses Kriterium ist nur zur Charakterisierung nicht jedoch als Auslegungskriterium geeignet	-
VC-G	0,8 ((1 ... 80) Hz)	Kriterium für extrem ruhige Forschungsräume, sehr schwierig zu erreichen; dieses Kriterium ist nur zur Charakterisierung nicht jedoch als Auslegungskriterium geeignet	-

## 6 Arbeitsgrundsätze und Vorgehensweise

Die Ermittlungen und die Beurteilung verkehrsinduzierter Immissionen aus Erschütterungen und sekundärem Luftschall erfolgt in einem zweistufigen Verfahren. Zunächst werden Prognosen für exemplarisch ausgewählte

Gebäude erstellt. Um das individuelle Schwingungsverhalten dieser Gebäude berücksichtigen zu können, werden für jeweils drei exemplarische Räume eines Objektes die Übertragungsfunktionen von Geschossdecken durch Messungen ermittelt.

Da es sich hierbei lediglich um Prognosen für exemplarische Gebäude, also im statistischen Sinne um Stichproben handelt, ist es erforderlich, die gewonnenen Ergebnisse für den gesamten Einwirkungsbereich der geplanten Bahnanlage zu extrapolieren. Hierzu werden anschließend Einwirkungsmatrizen berechnet, in denen sämtliche erschütterungstechnisch relevanten Abstände zwischen Gleisen und Gebäuden und sämtliche dem Grunde nach möglichen Deckeneigenfrequenzen unterstellt werden. Als Ergebnis dieser Betrachtung erhält man Korridorbreiten, innerhalb denen erschütterungsbedingte Konflikte nicht ausgeschlossen werden können.

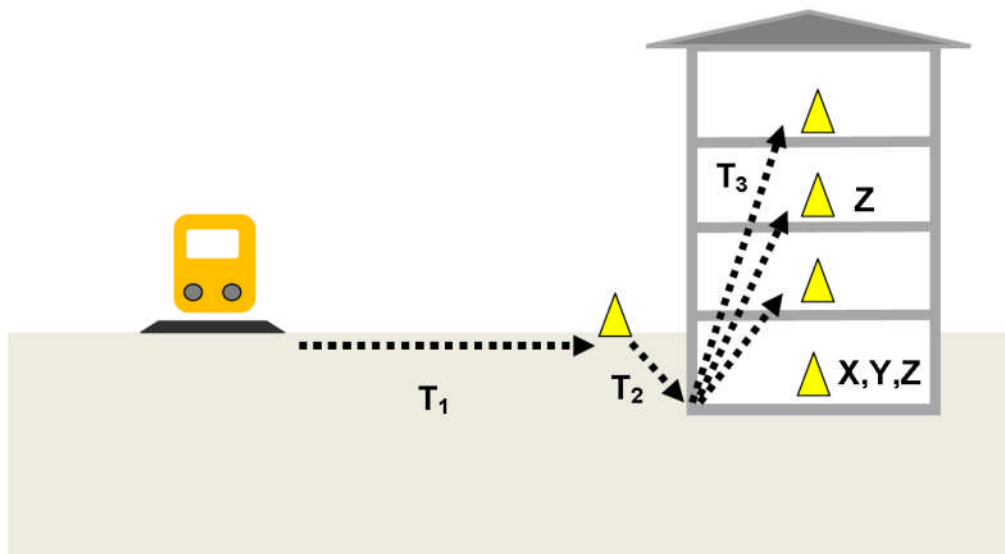
Im Folgenden wird das Vorgehen bei der Prognose von Immissionen aus Erschütterungen und aus sekundärem Luftschall erläutert.

## 6.1 Prognose

Die Ermittlung der erschütterungstechnischen Beurteilungsgrößen im Untersuchungsraum erfolgt anhand von Ausbreitungsberechnungen für nächstgelegene, exemplarisch ausgewählte Gebäude mit schutzbedürftiger Nutzung im Einwirkungsbereich der Straßenbahntrasse. Die untersuchten Gebäude sind in den Lageplanausschnitten in **Anhang 1** blau gekennzeichnet.

Hierbei wird ein Quellen- und Ausbreitungsmodell entwickelt, das die Übertragung der Erschütterungen ausgehend von der Quelle (Emittent) bis zum Immissionsort (Gebäude mit schutzwürdigen Nutzungen) abbildet. Bei der Erstellung des Prognosemodells wird von der in **Abbildung 1** skizzierten Übertragungskette ausgegangen. Die dargestellten Übertragungswege werden separat ermittelt und dann zu einer Gesamtübertragungsfunktion überlagert.

**Abbildung 1** Übertragung von Erschütterungen



### 6.1.1 Emission

Bei oberirdischen Schienenverkehrswegen wird die **Emission** (Quellstärke) durch die in einem festgelegten Abstand zur Gleisachse im Erdboden gemessenen Schwingstärken charakterisiert. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wird ein standardisiertes Emissionsspektrum zu Grunde gelegt. Dieses wurde im Sinne einer oberen Abschätzung als obere Einhüllende aus einer Vielzahl messtechnisch ermittelter Einzelspektren von Stadt- oder Straßenbahnfahrzeugen mit entsprechendem Oberbau gebildet.

Das für die Prognose herangezogene standardisierte Emissionsspektrum ist in **Anhang 2.1** tabellarisch und grafisch dokumentiert. Für Bereiche mit engen Kurvenradien oder Weichen wurden Korrekturfunktionen zur Berücksichtigung der erhöhten Erschütterungsemissionen angewandt (**Anhang 2.2** und **Anhang 2.3**). Für Streckenabschnitte mit unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten wird die Korrekturfunktion in **Anhang 2.4** berücksichtigt.

### 6.1.2 Transmission

Die entfernungsbedingte Amplitudenabnahme der Schwingschnelle zwischen Emissionsort und einem Ort im Erdreich unmittelbar vor einem Ge-

bäude wird als Transferfunktion  $T_1$  bezeichnet. Diese wird gemäß nachfolgender Gleichung berechnet:

$$T_1 = \left( \frac{R}{R_1} \right)^{-n} e^{(-\alpha(R-R_1))}$$

mit

- n** Exponent, der von Wellenart, Quellengeometrie und Art der Schwingungen abhängt;
- $\alpha$**   $\approx 2 \pi D/\lambda$ ,  
Abklingkoeffizient [ $m^{-1}$ ];
- D** Dämpfungsgrad [%],
- $\lambda$**   $= c/f$ ,  
Wellenlänge [m];
- c** Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle [m/s],
- f** Frequenz [Hz],
- $R_1$**  Bezugsabstand [m],
- R** Entfernung des Immissionsortes von der Quelle [m].

Aufgrund allgemeiner Erfahrungen kann von **1 %** Dämpfung und von einer Ausbreitungsgeschwindigkeit für die Oberflächenwellen

$$\mathbf{c = 200 \text{ m/s}}$$

ausgegangen werden. Der Exponent für den als Linienquelle zu betrachtenden oberirdischen Schienenverkehr liegt bei gerade geführten Streckenabschnitten und Kurvenbereiche gemäß **DIN 4150-1** /7/ zwischen **0,2** und **0,4**. Daher wird dieser Exponent mit

$$\mathbf{n = 0,3}$$

berücksichtigt. Im Umfeld von Weichen wird der Exponent auf

$$\mathbf{n = 1,0}$$

angehoben, da die resultierenden Erschütterungsemissionen beim Überfahren der Weichenherzstücke eine Punktquelle darstellen.

Die Erschütterungsabnahme, die sich aus der Übertragung der Schwingungen vom Untergrund auf das zu schützende Bauwerk ergibt ( $T_2$ -Funktion), wird aus Messungen an vergleichbaren Gebäuden herangezogen. Eine grafische Darstellung der berücksichtigten  $T_2$ -Funktionen findet sich in **Anhang 3.1** und **Anhang 3.2**. Hierbei werden nicht die messtechnisch erhobenen  $T_2$ -Funktionen berücksichtigt, da die Anregung mit Hilfe des Plattenrüttlers nicht eine Linienquelle wie dies bei einer Vorbeifahrt einer Straßenbahn der Fall ist, sondern eine Punktquelle darstellt und somit zu höheren Abminderungen führt.

Die Schwingungsübertragung vom Gebäudefundament auf die Geschossdecken ( $T_3$ -Funktionen) innerhalb von Gebäuden wird für die exemplarisch untersuchten Gebäude entsprechend den tatsächlich gegebenen Verhältnissen im Prognosemodells berücksichtigt. Konkret werden die durch eine Impulsanregung gemessenen Übertragungsfunktionen der drei analysierten Räume für die Prognose herangezogen.

Zur Extrapolation der Prognoseergebnisse und zur Darstellung der Ergebnisse in einer Einwirkungsmatrix werden alle möglichen Geschossdeckeneigenfrequenzen im Frequenzbereich zwischen 10 Hz und 80 Hz bei der Abstandsvariation zur Bebauung berücksichtigt. Es werden sowohl Holzbalken- als auch Stahlbetondeckenkonstruktionen unterstellt. Hierbei erfolgt eine statistische Auswertung der messtechnisch erhobenen  $T_3$ -Funktion. In **Anhang 3.3** ist die statistisch ausgewertete auf die Biegeeigenfrequenz normierte  $T_3$ -Funktion grafisch dargestellt. Angegeben ist jeweils der Mittelwert +/- der Standardabweichung.

Für die Extrapolation von Untersuchungsergebnissen der exemplarisch untersuchten Gebäude auf die Gesamtheit aller im Einwirkungsbereich liegender schutzwürdiger Gebäude werden der Mittelwert plus Standardabweichung der  $T_3$ -Funktion berücksichtigt. Eine statistische Auswertung der insgesamt 15 messtechnisch erfassten Geschossdeckeneigenfrequenzen in 5 exemplarisch ausgewählten Gebäuden im direkten Einwirkungsbereich der Straßenbahntrasse findet sich in **Anhang 3.3**.

## 6.2 Immission

### 6.2.1 Einwirkungen in exemplarischen Gebäuden

Die Untersuchungen werden zunächst für die messtechnisch untersuchten exemplarischen Gebäude durchgeführt, die im nahen Einwirkungsbereich der Strecke gelegen sind. Im Rahmen der Schwingungsmessungen werden in der Regel bauphysikalische Bestandsanalysen durchgeführt. Konkret wird das Übertragungsverhalten einzelner Geschossdecken messtechnisch analysiert. Das diesbezügliche Vorgehen bzw. die für das hier behandelte Vorhaben erhobenen Größen sind in einem separaten Messbericht /14/ dokumentiert. Die so erhobenen Schwingungsübertragungsfunktionen für Geschossdecken finden Eingang in die Prognoseberechnungen.

Als **Erschütterungsimmissionen** werden die bauwerksbezogenen, gemäß **DIN 4150-2** in der Mitte von Räumen ermittelten KB-bewerteten Schwingstärken bezeichnet. Die KB-Bewertung ist eine frequenzbezogene Bezugsbewertungskurve für Erschütterungssignale. Sie wird herangezogen für die Bewertung bei nicht vorgegebener Körperhaltung und setzt sich zusammen aus Elementen der Bewertung von Einwirkungen im Stehen und Sitzen.

Als maßgebende Beurteilungsgröße gemäß **DIN 4150-2** wird in der Vorabschätzung die Beurteilungsschwingstärke **KB<sub>FT</sub>** ausgewiesen und beurteilt. Da hier die Schwingstärke der Vertikalkomponente (z-Richtung) die der Horizontalkomponenten (x-, y-Richtung) übersteigt, wird die Untersuchung ausschließlich für die Vertikalkomponenten der Erschütterungsimmissionen durchgeführt.

Die Prognose des sekundären Luftschallpegels im Innenraum  $L_i$  basiert auf dem zuvor berechneten maximalen zeitbewerteten Körperschallschnellepegel  $L_v$ . Dies ist der Maximalpegel der Schwingstärke, der im Gegensatz zum  $KB_{Fmax}$ -Wert jedoch keiner KB-Bewertung, sondern einer A-Bewertung unterzogen wird. Diese dient der Anpassung des messtechnisch ermittelten Schalldruckpegels an das menschliche Hörempfinden. Der theoretische Zusammenhang zwischen ermittelter Körperschallschnelle und sekundärem Luftschall kann wie folgt beschrieben werden:

$$L_{sek} = L_v + 10 \log \sigma + 10 \log 4S/A$$



Darin bedeuten

<b>L<sub>sek</sub></b>	sekundärer Luftschall des betrachteten Bauteils [dB(A)],
<b>L<sub>v</sub></b>	mittlerer A-bewerteter Körperschallschnellepegel des betrachteten Bauteils [dB(A)],
<b>σ</b>	Abstrahlgrad des betrachteten Bauteils [-],
<b>S</b>	Fläche des betrachteten Bauteils [m²],
<b>A</b>	äquivalente Absorptionsfläche des Raumes [m²].

In der Praxis lässt sich die genannte Beziehung jedoch nur schwer anwenden, da die Körperschallschnelle nicht nur in Deckenmitte, sondern von allen betrachteten Bauteilen (also auch Wände und Decke) gemessen werden müssten. Weiterhin ist die Bestimmung des Abstrahlgrades mit erheblichen Unsicherheiten behaftet.

Im vorliegenden Fall wird daher zur Bestimmung des sekundären Luftschalls der Leitfaden „Körperschall und Erschütterungsschutz“ der DB AG /10/ herangezogen. Hierin ist ein linearer Zusammenhang zwischen A-bewerteter Körperschallschnelle und sekundärem Luftschallpegel für verschiedene Zuggattungen und Deckenkonstruktionen beschrieben. Die hierin angegebenen Regressionsbeziehungen gelten jedoch allgemein für Bahnstrecken. Im Sinne einer oberen Abschätzung werden im vorliegenden Fall die Angaben für S-Bahn-Strecken herangezogen. Demnach gelten für den sekundären Luftschall aus dem Betrieb von Straßenbahnfahrzeugen folgende Regressionsbeziehungen:

$$\begin{aligned} L_i &= 17,6 + 0,62 L_{vA} && [\text{dB(A)}] \text{ bei Betondecken,} \\ L_i &= 27,5 + 0,34 L_{vA} && [\text{dB(A)}] \text{ bei Holzbalkendecken.} \end{aligned}$$

Dabei bedeuten

<b>L<sub>i</sub></b>	A-bewerteter sekundärer Luftschallpegel [dB(A)],
<b>L<sub>vA</sub></b>	A-bewerteter Körperschallschnellepegel [dB(A)].

Die Ermittlung des A-bewerteten Körperschallschnellepegels  $L_{vA}$  erfolgt anhand der messtechnisch ermittelten spektralen Körperschallschnellepegel  $L_v$  (maximale bewertete Schwingstärke  $KB_{Fmax}$ ). Anstelle der Bewertungsfunktion  $T_{KB}$ , mit der bisher die KB-Bewertung des Signals vorgenommen wurde, wird die Funktion  $T_A$  für die A-Bewertung angewendet. Im Gegensatz zur Ermittlung der maximalen bewerteten Schwingstärke  $KB_F$ .



$a_{\max}$ , bei der ein Frequenzbereich bis 80 Hz untersucht wird, wird der A-bewertete Körperschallschnellepegel  $L_{VA}$  in einem Frequenzbereich bis 315 Hz ermittelt.

### 6.2.2 Extrapolation auf die Gesamtheit aller Gebäude

Um die Ergebnisse der gebäudebezogenen Prognosen auf die Gesamtheit aller schutzbedürftigen Gebäude im Einwirkungsbereich des Vorhabens zu extrapolieren, werden so genannte „Einwirkungsmatrizen“ berechnet. Hierbei werden die auf die jeweilige Eigenfrequenz normierten Übertragungsfunktionen der Geschossdecken statistisch ausgewertet. Anschließend werden im Abstandsbereich

$$R = 1 \dots 20 \text{ m}$$

Ausbreitungsberechnungen unter Berücksichtigung einer aus den Messergebnissen ermittelten Übertragungsfunktion (Mittelwert plus Standardabweichung) für die Geschossdecken unter Berücksichtigung aller möglichen Eigenfrequenzen von Geschossdecken im Frequenzbereich

$$f_0 = 10 \dots 80 \text{ Hz}$$

durchgeführt. Die so ermittelten Beurteilungsschwingstärken werden anschließend tabellarisch dargestellt. In den Tabellen ist jeweils für einen definierten Abstand R die Beurteilungsschwingstärke für alle betrachteten Deckeneigenfrequenzen nebeneinander angegeben. Die Ergebnisse für verschiedene Abstände sind untereinander aufgetragen. Diese Darstellung wird als „Einwirkungsmatrix“ bezeichnet.

Beurteilungsschwingstärken, die oberhalb des jeweils gültigen Anhaltswertes liegen, sind **rot** hinterlegt dargestellt. Soweit Anhaltswerte zu mindestens zwei Drittel ausgeschöpft werden, sind die jeweiligen Angaben zu den Beurteilungsschwingstärken **gelb** hinterlegt. **Grün** hinterlegte Felder bedeuten, dass die jeweils gültigen Anforderungen an den Immissionsschutz erfüllt werden. Aus der Einwirkungsmatrix können somit Grenzabstände zwischen der Strecke und der Bebauung ermittelt werden, ab denen Konflikte aufgrund von Erschütterungsimmissionen nicht ausgeschlossen werden können.

Bei der Ermittlung der kritischen Grenzabstände werden nur die im direkten Einwirkungsbereich der Strecke üblichen Geschossdeckeneigenfrequenzen berücksichtigt. Unter Berücksichtigung der Häufigkeitsverteilung der gemessenen  $T_3$ -Funktionen und unter Berücksichtigung von Erfahrungswerten zu Geschossdeckenresonanzfrequenzen für Gebäude des Hochbaus kann das Frequenzband

$$12,5 \text{ Hz} \leq f_0 \leq 40 \text{ Hz}$$

als beurteilungsrelevant angesehen werden. **(Anhang 3.4)** Geschossdeckeneigenfrequenzen unterhalb und oberhalb dieses Frequenzbandes wurden in keinem der exemplarisch messtechnisch untersuchten Räume der Gebäude festgestellt. Der Bereich innerhalb dieses Frequenzbandes entspricht also einem Intervall Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung.

Wie aus den Einwirkungsmatrizen in **Anhang 5** hervorgeht, sind die Geschossdecken mit Eigenfrequenzen unterhalb dieses Frequenzbandes grundsätzlich als unkritisch einzustufen. Lediglich bei Geschossdeckeneigenfrequenzen oberhalb des beurteilungsrelevanten Frequenzbereiches können größere kritische Grenzabstände prognostiziert werden. Berücksichtigt man bei der Ermittlung der kritischen Abstände nur die am häufigsten vorkommenden mittleren Frequenzen, so kann bei niedrigen Eigenfrequenzen ebenfalls von einer Konfliktfreiheit ausgegangen werden.

Die Ermittlung des kritischen Grenzabstandes wird demnach so vorgenommen, dass für Eigenfrequenzen, die bei sämtlichen der exemplarisch geprüften Geschossdecken vorliegen, von einer Einhaltung der Anhaltswerte ausgegangen werden kann.

## 6.3 Betriebsparameter

### 6.3.1 Fahrzeuge, Zugzahlen, Geschwindigkeiten, Oberbau

Für die Ermittlung der Beurteilungsschwingstärken ist die Kenntnis der Intensität von Schwingungsimmissionen sowie deren Einwirkdauer erforderlich. Die Intensität am Einwirkungsort wird maßgeblich durch die fahrzeugspezifische Emission sowie die gelände- und gebäudespezifische Übertragung geprägt. Hinsichtlich der Erschütterungen ist bei der Ermittlung der Einwirkdauer das 30-Sekunden-Taktverfahren gemäß **DIN 4150-2 /8/** zu beachten.

Auf dem zu untersuchenden Streckenabschnitt werden Straßenbahnfahrzeuge in Einzeltraktion, ggf. mit Beiwagen, mit einer gesamten Wagenlänge bis zu

$$l = 43 \text{ m}$$

eingesetzt. Im Sinne einer oberen Abschätzung wird bei allen Zugfahrten die o. g. längste Kombination aus Fahrzeug und Beiwagen berücksichtigt.

In dem neu zu bauenden Streckenabschnitt im Bereich des Lichtwiesenwegs besteht künftig laut /17/ ein Verkehrsaufkommen im Tag- bzw. Nachtzeitraum von

$$n_{\text{Tag/Nacht}} = 208 / 8 \text{ Zügen.}$$

Im Bereich der Nieder-Ramstädter Straße verkehren nördlich des Abzweiges Lichtwiesenweg

$$n = 350 / 28 \text{ Züge}$$

südlich des Lichtwiesenweges fahren Richtung Böllenfalltor

$$n = 142 / 20 \text{ Züge.}$$

Die Höchstgeschwindigkeit beträgt im untersuchten Streckenabschnitt

$$v_{\text{max}} = 50 \text{ km/h .... 60 km/h}$$

auf den geraden Streckenabschnitten. In Kurven- und Weichenbereichen ist die Höchstgeschwindigkeit trassierungstechnischen Gründen auf

$$v_{\text{max}} = 10 \text{ km/h .... 20 km/h}$$

begrenzt.

### **6.3.2 Ermittlung von Einwirkzeiten**

#### **6.3.2.1 Erschütterungen**

Für die Ermittlung der Beurteilungsschwingstärke nach Maßgabe der **DIN 4150-2** /8/ ist das Taktmaximalverfahren anzuwenden. Hierbei werden die in Zeitfenstern von jeweils 30 s Dauer auftretenden Spitzenwerte der bauwerksbezogenen Schwingstärke herangezogen. Da die Vorbeifahrt eines

einzelnen Straßenbahnfahrzeuges bei typischen Geschwindigkeiten und bei typischen Fahrzeuglängen stets deutlich weniger als 30 s in Anspruch nimmt, wird dem Grundsatz des Taktmaximalverfahrens folgend für jede Straßenbahn-Vorbeifahrt eine Einwirkungsdauer von 30 s berücksichtigt.

### 6.3.2.2 Sekundäre Luftschallimmissionen

Die Einwirkzeit des sekundären Luftschalls, jeweils bezogen auf die Beurteilungszeiträume Tag (06.00 Uhr bis 22.00 Uhr) bzw. Nacht (22.00 Uhr bis 06.00 Uhr), ergibt sich aus der Gesamtzahl der in dem betreffenden Streckenabschnitt innerhalb des jeweiligen Beurteilungszeitraumes verkehrenden Schienenfahrzeuge und deren geschwindigkeitsabhängiger Vorbeifahrtzeit. Um zu berücksichtigen, dass Fahrzeuge bereits vor und auch nach der Vorbeifahrt wahrgenommen werden können, wird bei der Bestimmung der signifikanten Einwirkungszeit einer Zugvorbeifahrt mit der 2-fachen Zuglänge gerechnet. Die Einwirkungszeit  $T_e$  einer Zugvorbeifahrt beträgt dabei

$$T_e = 2 \cdot \text{Zuglänge} \cdot 3,6 / v_{\max}$$

mit  $v_{\max}$  maximale Strecken- bzw. zugspezifische Höchstgeschwindigkeit [km/h].

## 7 Untersuchungsergebnisse

### 7.1 Einwirkungen auf exemplarische Einzelobjekte

Zur Beurteilung der Fragestellung, ob schienenverkehrsinduzierte Erschütterungsimmissionen bzw. sekundäre Luftschallimmissionen im Einwirkungsbereich der geplanten Straßenbahnstrecke geeignet sind, erhebliche Belästigungen von Menschen in Gebäuden hervorzurufen, werden zunächst drei der Trasse nächstgelegene Gebäude mit schutzwürdiger Nutzung untersucht. Diese Gebäude weisen Abstände zur nächstgelegenen Gleisachse in einer Größenordnung von

$$R_1 = 6 \dots 19 \text{ m}$$

auf. Für die Abzweigbereiche von der Nieder-Ramstädter Straße in den Lichtwiesenweg rücken die Abzweiggleise gegenüber dem Bestand an die Gebäude heran.

Die Immissionen werden in allen untersuchten Räumen getrennt für den Tag- und Nachtzeitraum ermittelt und beurteilt.

Die Untersuchungsergebnisse sind in **Anhang 4** dokumentiert. **Grün** hinterlegte Felder bedeuten, dass die jeweils gültigen Anforderungen an den Immissionsschutz erfüllt werden. Bei **rot** hinterlegten Feldern sind die Anforderungen nicht erfüllt. Sind Felder **gelb** gekennzeichnet, so sind weitere Beurteilungsschritte zum Nachweis einer Konfliktfreiheit erforderlich. Erfolgt keine Nutzung des jeweiligen Gebäudes im Beurteilungszeitraum, so sind zwar die Werte ausgewiesen, jedoch farblich nicht hinterlegt.

### 7.1.1 Erschütterungen

In **Anhang 4.1** werden die maximalen bewerteten Schwingstärken **KB<sub>Fmax</sub>** für alle untersuchten Gebäude ausgewiesen.

Das Gebäude Jahnstraße 133 (**IP 1**) befindet sich im Allgemeinen Wohngebiet (**WA**). Für die restlichen 4 Immissionsorte werden die Anhaltswerte für Misch- / Kerngebiete (**MI/MK**) angewandt. Eine Sondernutzung wie dies bei der schalltechnischen Untersuchung entsprechend der Klassifizierung der **16. BImSchV** erfolgte, gibt es in der **DIN 4150-2** nicht. Gemäß Zeile 5 der Tabelle 1 der **DIN 4150-2** gibt es zwar Anhaltswerte für „besonders schutzbedürftige Einwirkungsorte“, hierzu zählen jedoch nur Krankenhäuser und Kurkliniken und keine Schulen. Da auch Büronutzungen in den Institutsgebäuden vorhanden sind, werden die Anhaltswerte der **DIN 4150-2**, Tabelle 1, Zeile 3 der Beurteilung zu Grunde gelegt.

Für das Gebäude Jahnstraße 133, das sich zukünftig im Weichenbereich befindet, wird eine maximale bewertete Schwingstärke von

$$\mathbf{KB_{Fmax} = 0,114}$$

prognostiziert. Damit werden die für Allgemeine Wohngebiete gültigen unteren Anhaltswerte von

$$\mathbf{A_u = 0,225 / 0,150}$$

für den Tag- als auch für den Nachtzeitraum eingehalten. Die Anforderungen der **DIN 4150-2** sind bereits im 1. Schritt der Beurteilung erfüllt. Der weitere Prüfschritt der Vergleich der Beurteilungsschwingstärke mit dem

Beurteilungsanhaltswert erfolgt in diesem Zusammenhang nur der Vollständigkeit halber. Die Beurteilungsschwingstärke beträgt hier

$$KB_{FTr} = 0,031 / 0,016$$

am Tag / in der Nacht. Mit diesen Werten werden die für Allgemeine Wohngebiete gültigen Beurteilungsanhaltswerte im Tagzeitraum um bis zu **30 %** und im Nachtzeitraum um bis zu **22 %** ausgeschöpft. Auch ohne über den Standardoberbau hinausgehende Maßnahmen können hier erhebliche Belästigungen von Menschen in Gebäuden ausgeschlossen werden.

Für die Institutsgebäude des Campus Lichtwiese gelten untere Anhaltswerte von

$$A_u = 0,300 / 0,225$$

für den Tag / für die Nacht. Hier ergeben sich am **IP 4** (Franziska-Braun-Straße 3) die höchsten Immissionen bedingt durch den geplanten Weichenbereich und insbesondere den geringen Abstand von lediglich 6 m zur Trasse. Für dieses Gebäude wird eine maximale bewertete Schwingstärke von

$$KB_{Fmax} = 0,281$$

prognostiziert. Dieser Wert unterschreitet den in Kerngebieten gültigen unteren Anhaltswert für den Tagzeitraum. Es wird davon ausgegangen, dass im Nachtzeitraum keine schutzwürdige Nutzung stattfindet. Somit werden auch ohne weitere Prüfschritte die Anforderungen der **DIN 4150-2 /8/** erfüllt, schienenverkehrsinduzierte erhebliche Belästigungen von Menschen in Gebäuden können somit ausgeschlossen werden. Für dieses Gebäude ergeben sich Beurteilungsschwingstärken von

$$KB_{FTr} = 0,093 / 0,026$$

am Tag / in der Nacht. Dies bedeutet eine Ausschöpfung des Beurteilungsanhaltswertes **A<sub>r</sub>** von **62%** im Tagzeitraum.

### 7.1.2 Sekundärer Luftschall

Die Prognoseergebnisse zu den künftig zu erwartenden sekundären Luftschallimmissionen sind in **Anhang 4.3** dargestellt und werden mit den An-

forderungswerten in Anlehnung an die **24. BImSchV** /4/ verglichen. Beurteilungs-Innenschallpegel, die diese Anforderungen unterschreiten, sind **grün** dargestellt. Sofern die Anforderungswerte überschritten werden, ist der entsprechende Wert **rot** hinterlegt. Erfolgt keine Nutzung des jeweiligen Gebäudes im Beurteilungszeitraum, so sind zwar die Werte ausgewiesen, jedoch farblich nicht hinterlegt.

Für das Wohngebäude Jahnstraße 133 (**IP 1**) ergibt sich ein maximaler Beurteilungspegel im Tag- bzw. Nachtzeitraum von

$$L_{r,T/N} = 23,5 / 18,0 \text{ dB(A)}$$

Bei der Beurteilung des sekundären Luftschalls in Wohnhäusern sind die Immissionsrichtwerte für Wohnräume am Tag bzw. für Schlafräume in der Nacht von

$$IRW_{\text{Tag/Nacht}} = 40 / 30 \text{ dB(A)}.$$

anzuwenden. Diese werden deutlich unterschritten. Für die Institutsgebäude des Campus ist der Immissionsrichtwert im beurteilungsrelevanten Tagzeitraum von

$$IRW_{\text{Tag}} = 40 \text{ dB(A)}$$

anzuwenden. Hier werden Beurteilungspegel für den **IP 4** von bis zu

$$L_{r,T} = 30,3 \text{ dB(A)}$$

ausgewiesen.

Die Berechnungsergebnisse in **Anhang 4.3** belegen, dass die prognostizierten Pegel des sekundären Luftschalls die in Anlehnung an die **24. BImSchV** /4/ herangezogenen Immissionsrichtwerte in allen exemplarisch untersuchten Gebäuden deutlich unterschreiten. Erhebliche Belästigungen infolge der zukünftigen sekundären Luftschallimmissionen sind somit für die exemplarisch untersuchten Gebäude **nicht** zu erwarten.

## 7.2 Abgrenzung des kritischen Einwirkungsbereiches

Da sich die dargestellten Prognosen zunächst ausschließlich auf exemplarische Gebäude beziehen, sind die Ergebnisse auf die Gesamtheit **aller** im



Einwirkungsbereich des Vorhabens vorhandenen Gebäude zu extrapolieren. Dies erfolgt durch Variation der erschütterungstechnisch relevanten Parameter. Hierbei sind neben der Trassenlage insbesondere der Abstand des Gebäudes zur Trasse und die jeweilige Deckeneigenfrequenz von Bedeutung.

In so genannten „**Einwirkungsmatrizen**“ werden die Beurteilungsschwingstärken  $KB_{FT}$  für den Tag- und Nachtzeitraum in Abhängigkeit vom Abstand  $R$  und der Deckeneigenfrequenz  $f_0$  dargestellt. Diese ermöglichen, die Einhaltung der Anforderungen nach **DIN 4150-2** /8/ allgemein in Abhängigkeit des Abstandes zur nächstgelegenen Gleisachse und der entsprechenden Gebietseinstufung zu überprüfen.

Die Prognoseergebnisse für die exemplarischen Gebäude haben gezeigt, dass die Erschütterungsimmissionen das maßgebende Kriterium für die Ausweisung von Vorsorgemaßnahmen sind und nicht die sekundären Luftschallimmissionen. Die Extrapolation wird daher ausschließlich für die Erschütterungsimmissionen durchgeführt. Soweit eine Konfliktfreiheit bezüglich Erschütterungsimmissionen prognostiziert wird, kann auch von einer Konfliktfreiheit hinsichtlich der sekundären Luftschallimmissionen ausgegangen werden.

Für Berechnung der Einwirkungsmatrizen werden die Emissionsansätze sowie die  $T_1$ - und  $T_2$ - Funktionen entsprechend dem Prognosemodell für die exemplarischen Gebäude zu Grunde gelegt. Für die  $T_3$ -Funktion wird eine auf die jeweilige Eigenfrequenz normierte Übertragungsfunktion berücksichtigt (**Anhang 3.3**). Diese normierten Übertragungsfunktionen beruhen auf der statistischen Auswertung der an den insgesamt 3 exemplarischen Gebäuden durchgeführten bauphysikalischen Bestandsanalysen /14/ und können somit als repräsentativ für die Gesamtheit aller Gebäude angesehen werden.

Die Prognoseberechnungen erfolgen für Deckeneigenfrequenzen mit Terzmittenfrequenzen

$$f_0 = 10 \dots 80 \text{ Hz.}$$

Alle in der Praxis vorkommenden Eigenfrequenzen von Geschossdecken, die hinsichtlich der Beurteilung von Erschütterungen relevant sind, liegen in diesem Frequenzband. Ferner werden die Berechnungen für Abstände



zum nächstgelegenen Gleis zwischen 1 m und 20 m durchgeführt. Der Abstand  $r$  bezieht sich hierbei immer auf das den Gebäuden nächstgelegene Gleis.

Aufgrund der unterschiedlichen Emissionsbedingungen im Untersuchungsraum werden die Einwirkungsmatrizen für folgende charakteristischen Streckenquerschnitte berechnet:

#### **Bereich Nieder-Ramstädter Straße**

**Querschnitt 1:**           Kurve,  $v = 15 \text{ km/h}$  (WA)

**Querschnitt 2:**           Weiche,  $v = 15 \text{ km/h}$  (WA)

#### **Bereich Campus / Lichtwiesenweg**

**Querschnitt 3:**           Gerade,  $v = 60 \text{ km/h}$  (WA)

**Querschnitt 4:**           Gerade,  $v = 50 \text{ km/h}$  (MK)

**Querschnitt 5:**           Kurve,  $v = 20 \text{ km/h}$  (MK)

**Querschnitt 6:**           Weiche,  $v = 20 \text{ km/h}$  (MK)

**Querschnitt 7:**           Kurve,  $v = 10 \text{ km/h}$  (MK)

Die Beurteilung für die Querschnitte 1 bis 3 erfolgt bezogen auf die Anforderungen für Gebäude in Allgemeinen Wohngebieten (**WA**). Die Querschnitte 4 bis 7 werden entsprechend Gebäuden in Misch- / Kerngebieten (**MI / MK**) beurteilt.

Zur Berechnung der kritischen Abstände werden nur die üblicherweise typischen Resonanzfrequenzen von Geschossdecken berücksichtigt. Gemäß der Häufigkeitsverteilung in **Anhang 3.3** liegen die üblichen Geschossdeckeneigenfrequenzen von Gebäuden im Einwirkungsbereich der geplanten Straßenbahntrasse im Frequenzband

$$12,5 \text{ Hz} \leq f_0 \leq 40 \text{ Hz}.$$

Bei **grün** gekennzeichneten Feldern wird der Beurteilungsanhaltswert  $A_r$  zu maximal 2/3 ausgeschöpft. **Gelb** kennzeichnet wird eine Unterschreitung der  $A_r$ -Werte bei einer Ausschöpfung um mehr als 2/3. Bei **rot** hinterlegten Feldern werden die Beurteilungsanhaltswerte überschritten, die Anforderungen der **DIN 4150-2** sind in diesem Fall nicht eingehalten.

Wie den Matrizen in **Anhang 5** zu entnehmen ist, ergeben sich folgende Grenzabstände für die unterschiedlichen Querschnitte, ab denen von einer Konfliktfreiheit auszugehen ist:

<b>Querschnitt 1:</b> Kurve,	$v = 15 \text{ km/h (WA)}$ ,	$r \geq 27 \text{ m}$ ;
<b>Querschnitt 2:</b> Weiche,	$v = 15 \text{ km/h (WA)}$ ,	$r \geq 18 \text{ m}$ ;
<b>Querschnitt 3:</b> Gerade,	$v = 60 \text{ km/h (WA)}$ ,	$r \geq 5 \text{ m}$ ;
<b>Querschnitt 4:</b> Gerade,	$v = 50 \text{ km/h (MI)}$ ,	$r \geq 2 \text{ m}$ ;
<b>Querschnitt 5:</b> Kurve,	$v = 20 \text{ km/h (MI)}$ ,	$r \geq 12 \text{ m}$ ;
<b>Querschnitt 6:</b> Weiche,	$v = 20 \text{ km/h (MI)}$ ,	$r \geq 10 \text{ m}$ ;
<b>Querschnitt 7:</b> Kurve,	$v = 10 \text{ km/h (MI)}$ ,	$r \geq 4 \text{ m}$ ;

### 7.2.1 Bereich 1: Gleisdreieck Nieder-Ramstädter Straße

Im Anfangsbereich nördlich des Lichtwiesenweges erfolgen der Einbau neuer Weichen sowie die Anbindung der neuen Gleise im Lichtwiesenweg (Kurvenbereich) an die bestehenden Gleise in der Nieder-Ramstädter Straße. Der minimale Abstand der Trassenführung zu schutzbedürftigen Gebäuden beträgt

$$r \geq 18 \text{ m}$$

Wie aus der Ausbreitungsmatrix in **Anhang 5.1** hervorgeht, ergibt sich der kritische Abstand für diesen Bereich zu

$$r_{\text{krit}} = 27 \text{ m.}$$

Damit befindet sich das Gebäude Roquetteweg 53 innerhalb des kritischen Bereichs. Hier besteht bereits eine erschütterungstechnische Vorbelastung durch die vorhandene Straßenbahnstrecke. Es kann davon ausgegangen werden, dass infolge des neuen Kurvenbereiches der Sachverhalt der „wesentlichen Änderung“ auf jeden Fall erfüllt ist. Erheblich belästigende Erschütterungsimmissionen können hier folglich nicht ausgeschlossen werden. Der Abstand zu den Weichenbereichen hingegen ist als unkritisch einzustufen.

### 7.2.2 Bereich 2: Lichtwiesenweg – Wohnbebauung

Für den Querschnitt 3 ergibt sich ein Grenzabstand von

$$r_{\text{krit}} = 5 \text{ m.}$$

Die Wohnheime für Studierende weisen einen minimalen Abstand von ca.

$$r \geq 24 \text{ m}$$

auf. Somit liegen diese außerhalb des Grenzabstandes. Erhebliche Belästigungen infolge der schienenverkehrsinduzierten Erschütterungsimmissionen sind bei den gegebenen Abstandsverhältnissen nicht zu erwarten.

### 7.2.3 Bereich 3: Campus Lichtwiese – Institutsgebäude

In diesem Einwirkungsbereich befinden sich die Querschnitte 4 bis 7. Für die nächstgelegenen Gebäude in den kritischen Trassenabschnitten mit Weichen- und Kurvenbereichen wurde bereits nachgewiesen, dass keine erheblichen Belästigungen durch Erschütterungsimmissionen zu erwarten sind. Alle anderen Gebäude des Campus Lichtwiese, die sich im Nahbereich der neuen Straßenbahntrasse befinden, weisen einen deutlich größeren Abstand auf und sind somit ebenfalls als unkritisch, hinsichtlich der Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden nach **DIN 4150-2** einzustufen.

## 7.3 Einwirkungen auf schwingungssensible Einrichtungen

In den beiden Institutsgebäuden des Bauingenieurwesens L5/01 Franziska-Braun Straße 7 und L5/06 Franziska- Braun-Straße 3 befinden sich schwingungssensible Einrichtungen.

Im **Gebäude L5/01** wird unter anderem ein A-REM (Atmosphärisches Elektronenrastermikroskop) betrieben. Dieses REM wird als maßgebendes schwingungssensibles Gerät hinsichtlich der aus dem zukünftig zu erwartenden Straßenbahnverkehr induzierten Erschütterungen untersucht. Gemäß **VDI 2038**, Blatt 2 /9/ ist der Beurteilung hier der Anforderungswert **VC-D** zu Grunde zu legen.

Der zulässige Schwingungspegel wird für den Frequenzbereich von 1 Hz bis 80 Hz mit

$$v_{\text{zul.}} = 6,25 \text{ } \mu\text{m/s}$$

angegeben. Dies entspricht einem zulässigen Schwinggeschwindigkeitspegel von

$$L_v = 41,9 \text{ dB.}$$

Das Gerät ist im Untergeschoss aufgestellt. In **Anhang 6.1** ist als rote Linie der Grenzwert gemäß **VDI 2038**, Blatt 2 als Pegel im Frequenzbereich von 3,15 Hz bis 80 Hz dargestellt. Die schwarze Kurve ist die durch den Straßenbahnverkehr zu erwartende Schwingungsimmission am Gebäudefundament des Gebäudes Franziska-Braun-Straße 7 (L5/01) spektral im maßgebenden Frequenzbereich von 4,0 Hz bis 315 Hz. Es zeigt sich, dass im Frequenzbereich von

$$f = 25 \text{ Hz bis } 80 \text{ Hz}$$

der zulässige Schwingungspegel deutlich überschritten wird. Es wird demzufolge eine oberbautechnische Maßnahme zur Reduzierung der Erschütterungsimmissionen aus dem Straßenbahnverkehr erforderlich.

Im **Gebäude L5/06** wird ein Universal Surface Tester (UST) zur Bestimmung mikromechanischer Material- und Oberflächeneigenschaften in situ betrieben. Gemäß den Angaben des Instituts für Statik und Konstruktion sind für dieses schwingungssensible Gerät der Anforderungswert **VC-E**-nach **VDI 2038**, Blatt 2 einzuhalten. Das Gerät ist ebenfalls im Untergeschoss aufgestellt. Der UTS wird als maßgebendes Gerät mit den höchsten Anforderungen für das Gebäude L5/06 hinsichtlich der Erschütterungseinwirkungen untersucht.

Der zulässige Schwingungspegel wird für den Frequenzbereich von 1 Hz bis 80 Hz gemäß **VDI 2038**, Blatt 2 mit

$$v_{\text{zul}} = 3,1 \text{ } \mu\text{m/s}$$

angegeben. Dies entspricht einem zulässigen Schwinggeschwindigkeitspegel von

$$L_v = 35,8 \text{ dB.}$$

Wie in **Anhang 6.2** zu sehen ist, ergibt sich am Fundament des Gebäudes L5/06 im Frequenzbereich von 16 Hz bis 80 Hz eine Überschreitung des zulässigen VC-E-Wertes. Somit wird auch hier eine Maßnahme zur Reduzierung der Schwingungsimmissionen erforderlich.

Um im dem entsprechenden Frequenzbereich ab 16 Hz eine ausreichende Wirkung zu erzielen, muss das System auf eine Oberbaueigenfrequenz von ca.

$$f = 8 \text{ Hz}$$

abgestimmt sein.

## 8 Maßnahmen zur Konfliktbewältigung

### 8.1 Gleisdreieck Nieder-Ramstädter Straße

Gegenüber dem Standardoberbau sind im Bereich des Gleisdreiecks Nieder-Ramstädter Straße / Lichtwiesenweg eine erschütterungsmindernde elastische Lagerung auszuführen. Im Bereich der Weichen des Gleisdreiecks sind solche Maßnahmen nicht zwingend erforderlich, jedoch in jedem Fall empfehlenswert. Die 1. Systemeigenfrequenz des gewählten Oberbausystems (Oberbaueigenfrequenz) sollte dabei unter Betriebslast im Bereich von

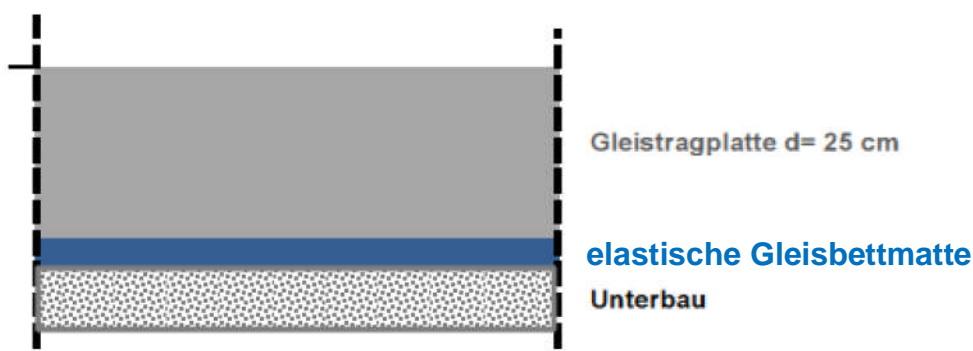
$$f_0 = 25 \pm 2 \text{ Hz}$$

liegen. Der Oberbau ist hier gegenüber dem Standardoberbau mit einer elastisch gelagerten Gleistragplatte mit einer Dicke von

$$d = 25 \text{ cm}$$

oder mit einem erschütterungstechnisch gleichwertigen Oberbau auszuführen. Die elastische Entkopplung erfolgt mit einer elastischen Gleisbettmatte.

**Abbildung 2** Prinzipskizze Gleisdreieck Nieder-Ramstädter Straße



Die typische Einfügedämmung eines solchen Systems ist in **Anhang 7.1** dargestellt. Hierbei bezieht sich die benannte Oberbaueigenfrequenz auf das Gesamtsystem, bestehend aus den Schienen, der Gleistragplatte so-

wie den elastischen Komponenten (Matten). Eine grafische Darstellung des Einbaubereichs der elastischen Lagerung findet sich in **Anhang 1**.

## 8.2 Institutsgebäude L5/01 und L5/06

Für den Bereich der beiden Institutsgebäude L5/01 und L5/06 ist eine oberbautechnische Maßnahme erforderlich dessen Oberbaueigenfrequenz unter Betriebslast im Bereich von ca.

$$f_0 = 8 \pm 1 \text{ Hz}$$

liegt. Der Oberbau ist gegenüber dem Standardoberbau hier mit einer Gleistragplatte mit einer Dicke von

$$d = 25 \text{ cm}$$

oder mit einem gleichwertigen erschütterungsarmen Oberbau auszuführen. Die elastische Entkopplung erfolgt mit Hilfe einer Gleisbettmatte in 2-lagiger Ausführung. (z. B. USM 1000W der Firma Calenberg mit einer Dicke von jeweils 30 mm oder gleichwertiges Produkt). Die 2 Lagen der Gleisbettmatten sind bei dem gezeigten exemplarischen Aufbau mit einer ca. 20 mm dicken GfK-Lastverteilungsplatte zu trennen. Unterhalb der Matten wird es erforderlich, eine ca. 5 cm starke Sauberkeitsschicht in Magerbeton vorzusehen.

**Abbildung 3** Prinzipskizze Bereich Gebäude L5/01 und L5/06



Der Einbaubereich dieses Oberbausystems ist in **Anhang 1.2** dargestellt. Die Einfügedämmung eines solchen Systems findet sich in **Anhang 7.2**.

## 8.3 Immissionen mit Maßnahme

### 8.3.1 Gleisdreieck Nieder-Ramstädter Straße

Wie aus **Anhang 8.1** hervorgeht, reduziert sich der kritische Abstand in Querschnitt 3 bei Berücksichtigung der oberbautechnischen Maßnahme auf

$$r_{\text{krit}} \geq 13 \text{ m.}$$

Somit können bei den gegebenen Abstandsverhältnissen unter Berücksichtigung der empfohlenen oberbautechnischen Maßnahme die Anforderungen der **DIN 4150-2 /8/** eingehalten werden.

Vorhabenbedingte erhebliche Belästigungen infolge schienenverkehrsinduzierter Erschütterungen und sekundärem Luftschall können dann für alle im Einwirkungsbereich der geplanten Straßenbahnstrecke gelegenen Gebäude ausgeschlossen werden.

### 8.3.2 Institutsgebäude L5/01 und L5/06

In **Anhang 8.2** und **Anhang 8.3** sind die Immissionen unter Berücksichtigung der oberbautechnischen Maßnahme jeweils als **grüne** Kurve im Frequenzbereich von 4 Hz bis 315 Hz spektral dargestellt. Die **rote** Linie zeigt jeweils den zugehörigen Anforderungswert gemäß **VDI 2038 Blatt 2**. Die **schwarze** Kurve steht für die Immissionen am Gebäudefundament ohne die oberbautechnische Maßnahme.

Es zeigt sich, dass sowohl die VC-D-Werte für das **A-REM Elektronenmikroskop** im Gebäude **L5/01** (Franziska-Braun Straße 7) als auch die VC-E-Werte für das **UTS** im Gebäude **L5/06** (Franziska-Braun Straße 3) im gesamten Frequenzbereich unterschritten werden. Somit können unter Berücksichtigung der oberbautechnischen Maßnahme die durch Straßenbahn resultierenden Immissionen soweit reduziert werden, dass keine Störungen bzw. Ausfälle der schwingungssensiblen Einrichtungen in den Bauingenieurgebäuden in der Franziska-Braun-Straße zu erwarten sind.

## 9 Abschließende Bemerkungen

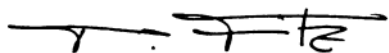
Die erschütterungstechnische Untersuchung belegt, dass infolge der zukünftig durch den Schienenverkehr hervorgerufenen Immissionen aus Er-



schütterungen und sekundärem Luftschall vorhabensbedingte erhebliche Belästigungen von Menschen in Gebäuden im Sinne des **BImSchG** /1/ in Teilbereichen nicht ausgeschlossen werden können. Zur Konfliktvermeidung wird es erforderlich, das Gleisdreieck im Bereich der Nieder-Ramstädter Straße als elastisch gelagerte Gleistragplatte auszuführen.

Die Oberbaueigenfrequenz des Systems ist auf **25 ± 2 Hz** abzustimmen. Hierbei ist in beide Richtungen ein Überstand von mindestens 5 m zu allen Kurven- und Weichenbereichen einzuhalten.

Hinsichtlich der schwingungssensiblen Einrichtungen in den Institutsgebäuden der TU Darmstadt ist in dem Streckenabschnitt im Bereich der Bauingenieursgebäude ebenfalls eine elastisch gelagerte Gleistragplatte auszuführen. Die Oberbaueigenfrequenz dieses Systems ist auf **8 ± 1 Hz** abzustimmen.



**Dipl.-Phys. Peter Fritz**



**Dipl.-Ing. Rolf Schneider**



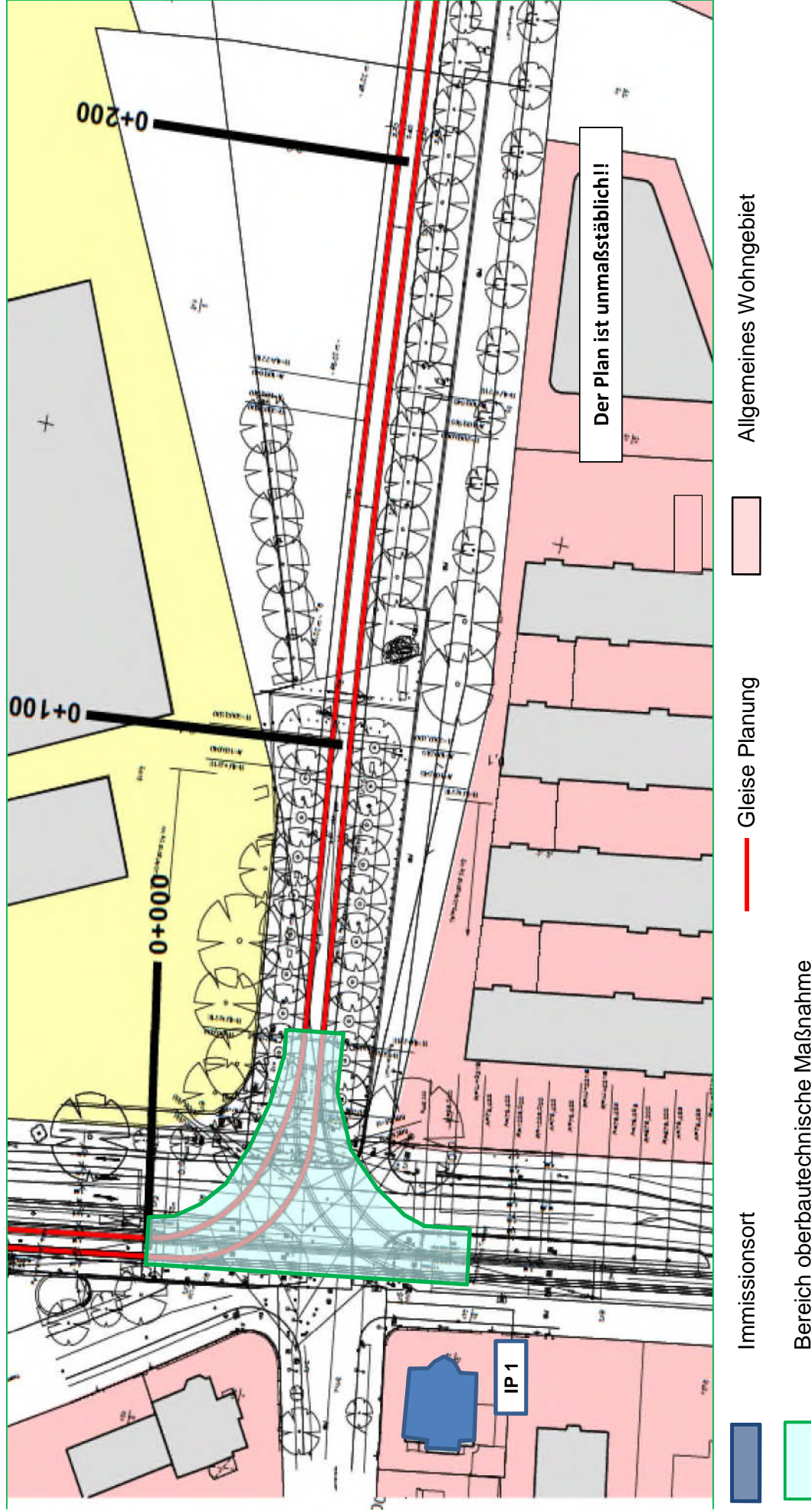


# ANHANG

# Lageplanausschnitt

## Ausgewählte exemplarische Gebäude - Nieder-Ramstädter Straße - IP 1

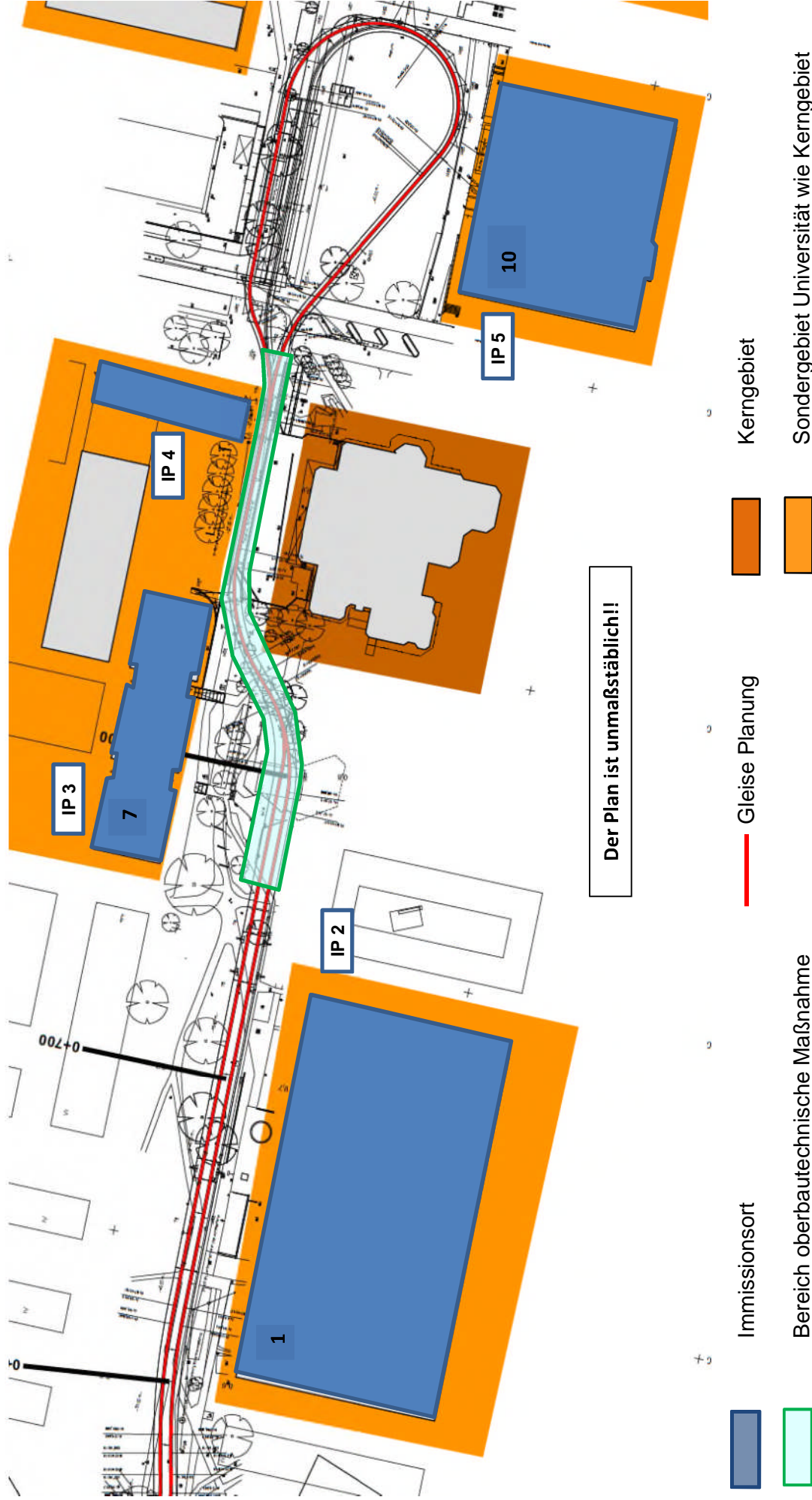
X:\Projekte\2014\14237-VVSE-Mailländer-Strassenbahn Campus Lichtwiese\C-Bearbeitung\B-Erschütterungen\B-Prognose\Lageplan.xls|IP1



# Lageplanausschnitt

## Ausgewählte exemplarische Gebäude - Lichtwiese - IP 2 - IP 5

X:\Projekte\2014\14237-VVSE-Malländer-Straßenbahn Campus Lichtwiese\C-Bearbeitung\B-Erschütterungen\B-Prognose\Lageplan.xls|IP1 (2)



# unkorrigiertes Emissionsspektrum

## Stadtbahnfahrzeug

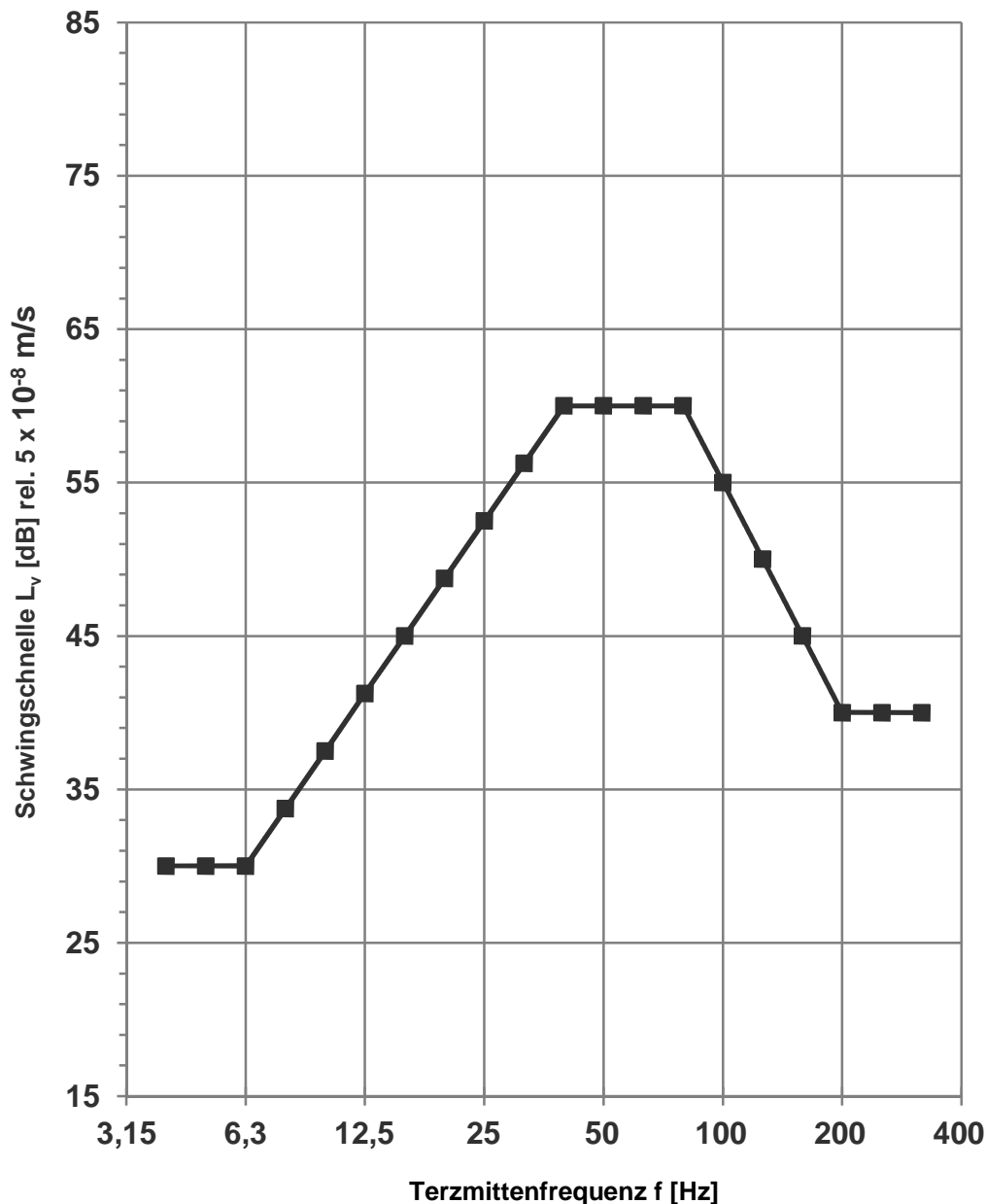
X:\Projekte\2014\14237-VVSE-Mailänder-Straßenbahn Campus Lichtwiese\C-Bearbeitung\B-Erschütterungen\D-Prognose\Anhang 2 Emissionen.xls\ANHANG 2.1

**Quelle:** Standardisiertes Emissionsspektrum auf Grundlage durchgeführter  
Quellstärkenmessungen an Stadtbahnen auf Rasengleis,  
fester Fahrbahn bzw. offener Oberbau

**Geschwindigkeit:** 50 km/h

**Messposition:** 8 m von nächstgelegener Gleisachse

**Schwingrichtung:** z



Lv [dB]	f [Hz]
30,0	4
30,0	5
30,0	6,3
33,8	8
37,5	10
41,3	12,5
45,0	16
48,8	20
52,5	25
56,3	31,5
60,0	40
60,0	50
60,0	63
60,0	80
55,0	100
50,0	125
45,0	160
40,0	200
40,0	250
40,0	315
67,2	Σ

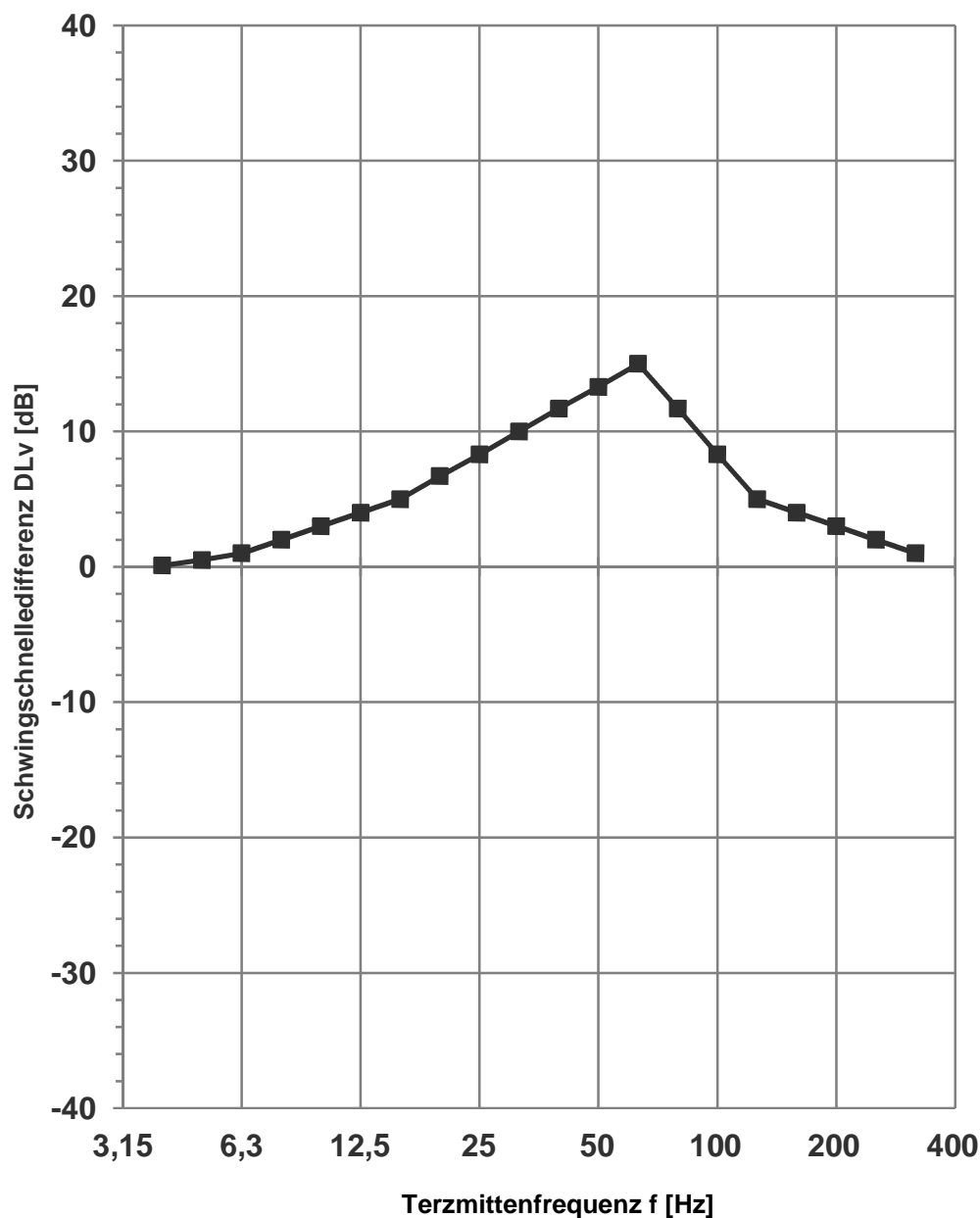
Referenz:

$$v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$$



**Quelle:** Handbuch Schall und Erschütterungen beim Schienennahverkehr  
Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V. (STUVA), Köln  
F. Krüger, 1993  
Tabelle 11.1: Mittlere relative Einflüsse verschiedener Parameter

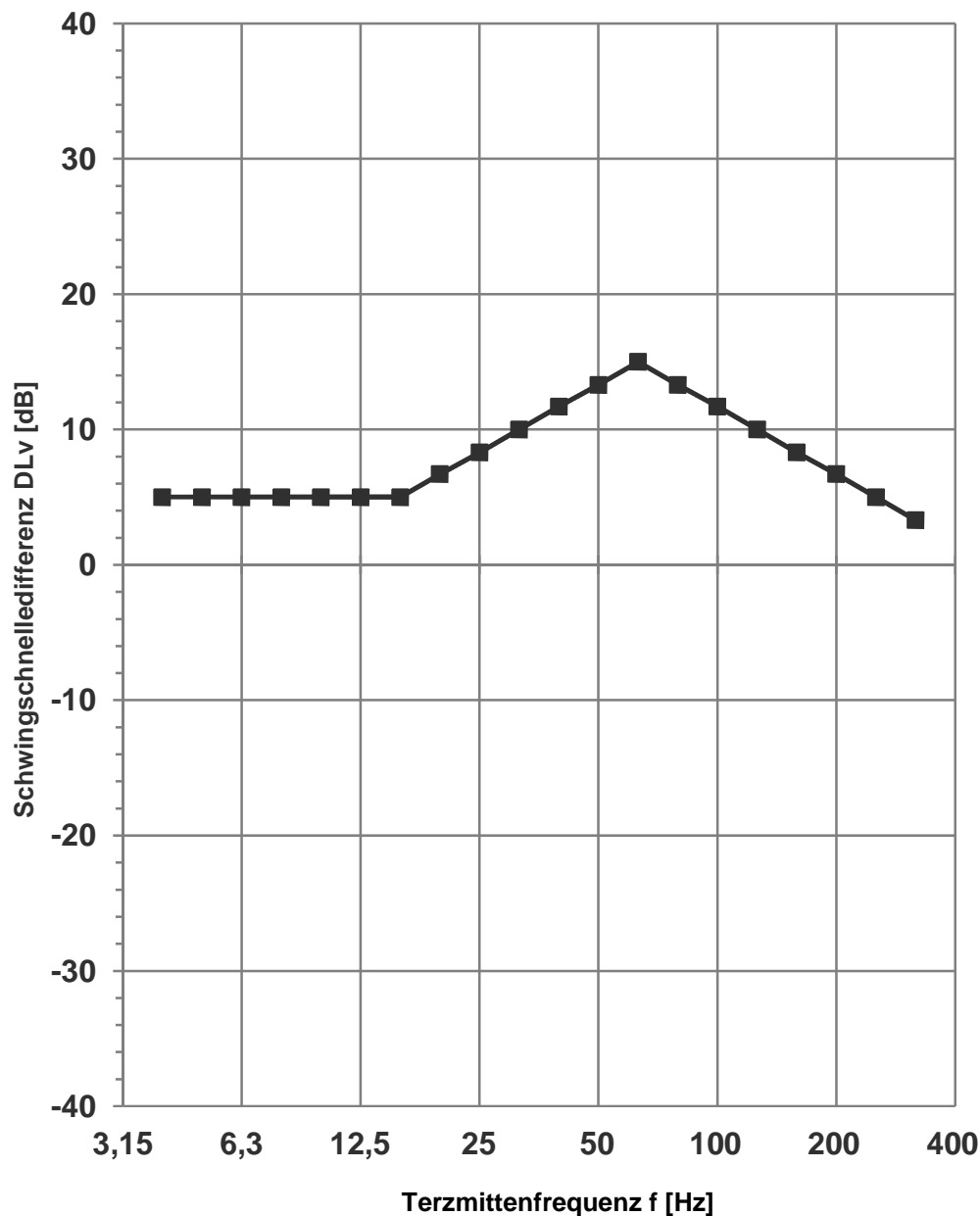
**Schwingrichtung:** vertikal (z)



$\Delta L_v$ [dB]	f [Hz]
0,1	4
0,5	5
1,0	6,3
2,0	8
3,0	10
4,0	12,5
5,0	16
6,7	20
8,3	25
10,0	31,5
11,7	40
13,3	50
15,0	63
11,7	80
8,3	100
5,0	125
4,0	160
3,0	200
2,0	250
1,0	315

**Quelle:** Handbuch Schall und Erschütterungen beim Schienennahverkehr  
Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V. (STUVA), Köln  
F. Krüger, 1993  
Tabelle 11.1: Mittlere relative Einflüsse verschiedener Parameter

**Schwingrichtung:** vertikal (z)



ΔLv [dB]	f [Hz]
5,0	4
5,0	5
5,0	6,3
5,0	8
5,0	10
5,0	12,5
5,0	16
6,7	20
8,3	25
10,0	31,5
11,7	40
13,3	50
15,0	63
13,3	80
11,7	100
10,0	125
8,3	160
6,7	200
5,0	250
3,3	315

# Korrekturfunktion

## Geschwindigkeit

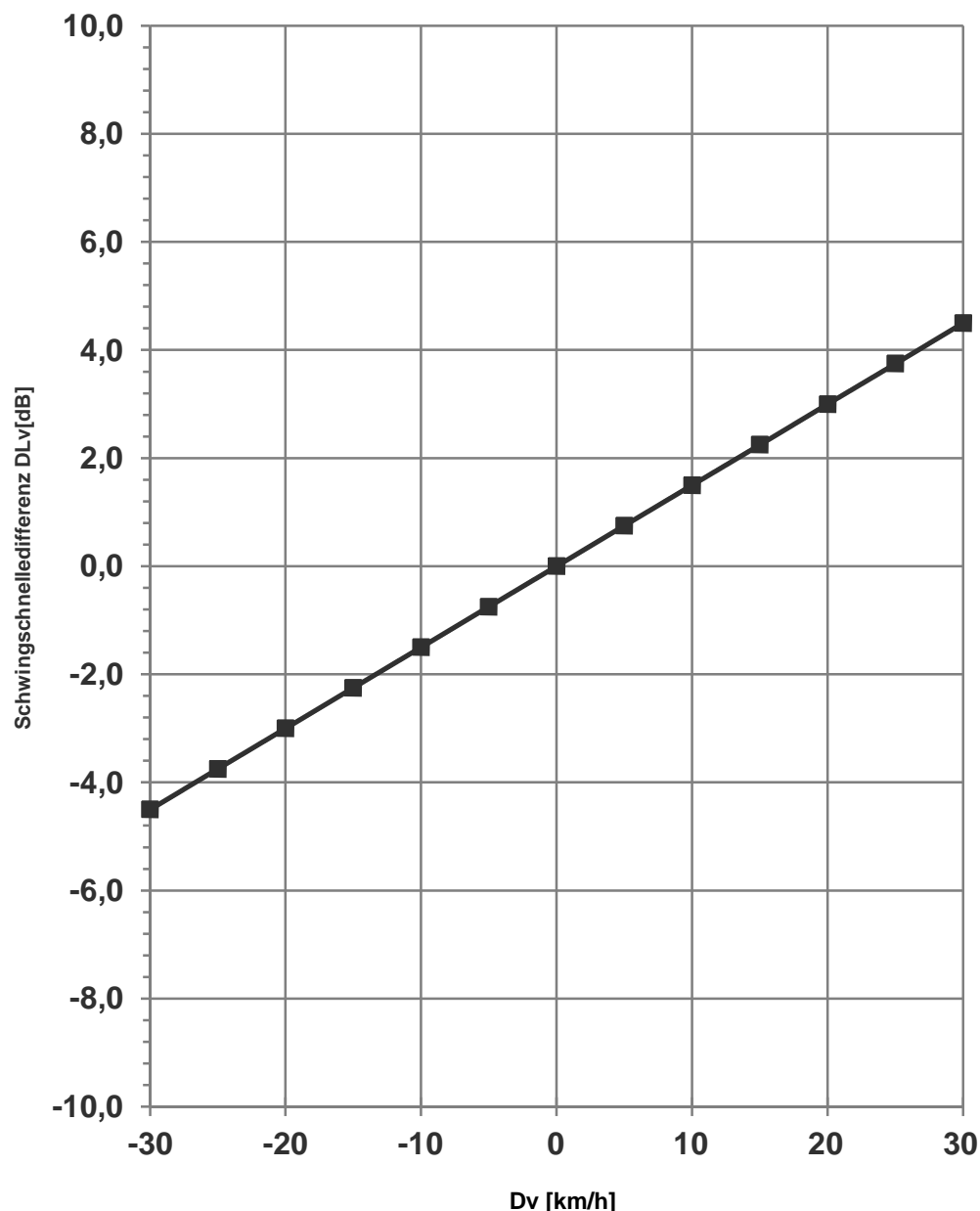
X:\Projekte\2014\14237-VVSE-Mailänder-Straßenbahn Campus Lichtwiese\C-Bearbeitung\B-Erschütterungen\D-Prognose\Anhang 2 Emissionen.xls\Korrektur -v

**Quelle:** empirisch

**Bezugsspektrum A**

**Bezugsspektrum B**

**Schwingrichtung:** vertikal (z)



$\Delta L_v$ [dB]	$\Delta v$ [km/h]
-4,5	-30
-3,8	-25
-3,0	-20
-2,3	-15
-1,5	-10
-0,8	-5
0,0	0
0,8	5
1,5	10
2,3	15
3,0	20
3,8	25
4,5	30



# Prognosespektrum

Gerade -  $v_{\max} = 50 \text{ km/h}$

X:\Projekte\2014\14237-VVSE-Mailänder-Straßenbahn Campus Lichtwiese\B-Bearbeitung\B-Erschütterungen\B-Prognose\Anhang 2 Emissionen.xls\Gerade-v-50 M

		Parameter	Ausgangs-Spektrum A	Prognose-Spektrum P
K1	Betrieb	Zuggattung	Stadtbahn	ST 13, ST 14, ST15
K2		Geschwindigkeit	50 km/h	50 km/h
K3	Fahrweg	Kurvenbereich	nein	nein
K4		Weichenbereich	nein	nein
K5		Oberbau	Rillensch. a. Betonplatte	Rillensch. a. Betonplatte
K6	Tunnel Bauwerk	Tunnelform		
K7		Wandstärke		
K8		Tunnelgründung		
K9		Bodenverhältnisse		
K10		Emissionspunkt	8 m Punkt	8 m Punkt
K11	Sonstiges	Meßverfahren	Max-Hold	Max-Hold
K12				
K13				
K14				
K15				

## Ausgangsspektrum in dB

Referenz:  $v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$

f[Hz]	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	$\Sigma$
A	30,0	30,0	30,0	33,8	37,5	41,3	45,0	48,8	52,5	56,3	60,0	60,0	60,0	60,0	55,0	50,0	45,0	40,0	40,0	40,0	67,2

## Berücksichtigte Korrekturen in dB

f[Hz]	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	
$L_{K1}$																					
$L_{K2}$																					
$L_{K3}$																					
$L_{K4}$																					
$L_{K5}$																					
$L_{K6}$																					
$L_{K7}$																					
$L_{K8}$																					
$L_{K9}$																					
$L_{K10}$																					
$L_{K11}$																					
$L_{K12}$																					
$L_{K13}$																					
$L_{K14}$																					
$L_{K15}$																					

## Prognosespektrum in dB

Referenz:  $v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$

f[Hz]	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	$\Sigma$
P	30,0	30,0	30,0	33,8	37,5	41,3	45,0	48,8	52,5	56,3	60,0	60,0	60,0	60,0	55,0	50,0	45,0	40,0	40,0	40,0	67,2

17.08.2015

# Prognosespektrum

Gerade -  $v_{\max} = 60 \text{ km/h}$

X:\Projekte\2014\14237-VVSE-Mailänder-Straßenbahn Campus Lichtwiese\B-Bearbeitung\B-Erschütterungen\B-Prognose\Anhang 2 Emissionen.xls\Gerade-v-60

		Parameter	Ausgangs-Spektrum A	Prognose-Spektrum P
K1	Betrieb	Zuggattung	Stadtbahn	ST 13, ST 14, ST15
K2		Geschwindigkeit	50 km/h	60 km/h
K3	Fahrweg	Kurvenbereich	nein	nein
K4		Weichenbereich	nein	nein
K5		Oberbau	Rillensch. a. Betonplatte	Rillensch. a. Betonplatte
K6	Tunnel	Tunnelform		
K7	Bauwerk	Wandstärke		
K8		Tunnelgründung		
K9		Bodenverhältnisse		
K10		Emissionspunkt	8 m Punkt	8 m Punkt
K11	Sonstiges	Meßverfahren	Max-Hold	Max-Hold
K12				
K13				
K14				
K15				

## Ausgangsspektrum in dB

Referenz:  $v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$

f[Hz]	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	$\Sigma$
A	30,0	30,0	30,0	33,8	37,5	41,3	45,0	48,8	52,5	56,3	60,0	60,0	60,0	60,0	55,0	50,0	45,0	40,0	40,0	40,0	67,2

## Berücksichtigte Korrekturen in dB

f[Hz]	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315
$L_{K1}$																				
$L_{K2}$	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
$L_{K3}$																				
$L_{K4}$																				
$L_{K5}$																				
$L_{K6}$																				
$L_{K7}$																				
$L_{K8}$																				
$L_{K9}$																				
$L_{K10}$																				
$L_{K11}$																				
$L_{K12}$																				
$L_{K13}$																				
$L_{K14}$																				
$L_{K15}$																				

## Prognosespektrum in dB

Referenz:  $v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$

f[Hz]	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	$\Sigma$
P	31,5	31,5	31,5	35,3	39,0	42,8	46,5	50,3	54,0	57,8	61,5	61,5	61,5	61,5	56,5	51,5	46,5	41,5	41,5	41,5	68,7

17.08.2015

# Prognosespektrum

Kurve -  $v_{\max} = 15 \text{ km/h}$  (Abzweig Niederramstädter Str.)

X:\Projekte\2014\14237-VVSE-Mailänder-Straßenbahn Campus Lichtwiese\B-Bearbeitung\B-Erschütterungen\B-Prognose\Anhang 2 Emissionen.xls\Kurve-v-15

		Parameter	Ausgangs-Spektrum A	Prognose-Spektrum P
K1	Betrieb	Zuggattung	Stadtbahn	ST 13, ST 14, ST15
K2		Geschwindigkeit	50 km/h	15 km/h
K3	Fahrweg	Kurvenbereich	nein	ja
K4		Weichenbereich	nein	nein
K5		Oberbau	Rillensch. a. Betonplatte	Rillensch. a. Betonplatte
K6	Tunnel	Tunnelform		
K7	Bauwerk	Wandstärke		
K8		Tunnelgründung		
K9		Bodenverhältnisse		
K10		Emissionspunkt	8 m Punkt	8 m Punkt
K11	Sonstiges	Meßverfahren	Max-Hold	Max-Hold
K12				
K13				
K14				
K15				

## Ausgangsspektrum in dB

Referenz:  $v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$

f[Hz]	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	$\Sigma$
A	30,0	30,0	30,0	33,8	37,5	41,3	45,0	48,8	52,5	56,3	60,0	60,0	60,0	60,0	55,0	50,0	45,0	40,0	40,0	40,0	67,2

## Berücksichtigte Korrekturen in dB

f[Hz]	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	
$L_{K1}$																					
$L_{K2}$	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	
$L_{K3}$	0,1	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,7	8,3	10,0	11,7	13,3	15	11,7	8,3	5,0	4,0	3,0	2,0	1,0	
$L_{K4}$																					
$L_{K5}$																					
$L_{K6}$																					
$L_{K7}$																					
$L_{K8}$																					
$L_{K9}$																					
$L_{K10}$																					
$L_{K11}$																					
$L_{K12}$																					
$L_{K13}$																					
$L_{K14}$																					
$L_{K15}$																					

## Prognosespektrum in dB

Referenz:  $v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$

f[Hz]	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	$\Sigma$
P	24,9	25,3	25,8	30,5	35,3	40,0	44,8	50,2	55,6	61,0	66,5	68,1	69,8	66,5	58,1	49,8	43,8	37,8	36,8	35,8	74,3

17.08.2015

# Prognosespektrum

Kurve -  $v_{\max} = 25 \text{ km/h}$  (Bereich Gebäude L5/06)

X:\Projekte\2014\14237-VVSE-Mailänder-Straßenbahn Campus Lichtwiese\B-Bearbeitung\B-Erschütterungen\B-Prognose\Anhang 2 Emissionen.xls\Kurve-v-20

		Parameter	Ausgangs-Spektrum A	Prognose-Spektrum P
K1	Betrieb	Zuggattung	Stadtbahn	ST 13, ST 14, ST15
K2		Geschwindigkeit	50 km/h	20 km/h
K3	Fahrweg	Kurvenbereich	nein	ja
K4		Weichenbereich	nein	nein
K5		Oberbau	Rillensch. a. Betonplatte	Rillensch. a. Betonplatte
K6	Tunnel	Tunnelform		
K7	Bauwerk	Wandstärke		
K8		Tunnelgründung		
K9		Bodenverhältnisse		
K10		Emissionspunkt	8 m Punkt	8 m Punkt
K11	Sonstiges	Meßverfahren	Max-Hold	Max-Hold
K12				
K13				
K14				
K15				

## Ausgangsspektrum in dB

Referenz:  $v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$

f[Hz]	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	$\Sigma$
A	30,0	30,0	30,0	33,8	37,5	41,3	45,0	48,8	52,5	56,3	60,0	60,0	60,0	60,0	55,0	50,0	45,0	40,0	40,0	40,0	67,2

## Berücksichtigte Korrekturen in dB

f[Hz]	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	
$L_{K1}$																					
$L_{K2}$	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	
$L_{K3}$	0,1	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,7	8,3	10,0	11,7	13,3	15	11,7	8,3	5,0	4,0	3,0	2,0	1,0	
$L_{K4}$																					
$L_{K5}$																					
$L_{K6}$																					
$L_{K7}$																					
$L_{K8}$																					
$L_{K9}$																					
$L_{K10}$																					
$L_{K11}$																					
$L_{K12}$																					
$L_{K13}$																					
$L_{K14}$																					
$L_{K15}$																					

## Prognosespektrum in dB

Referenz:  $v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$

f[Hz]	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	$\Sigma$
P	25,6	26,0	26,5	31,3	36,0	40,8	45,5	51,0	56,3	61,8	67,2	68,8	70,5	67,2	58,8	50,5	44,5	38,5	37,5	36,5	75,1

17.08.2015

# Prognosespektrum

Kurve -  $v_{\max} = 10 \text{ km/h}$  (Wendeschleife)

X:\Projekte\2014\14237-VVSE-Mailänder-Straßenbahn Campus Lichtwiese\B-Erschütterungen\B-Prognose\Anhang 2 Emissionen.xls\Kurve-v-10

		Parameter	Ausgangs-Spektrum A	Prognose-Spektrum P
K1	Betrieb	Zuggattung	Stadtbahn	ST 13, ST 14, ST15
K2		Geschwindigkeit	50 km/h	15 km/h
K3	Fahrweg	Kurvenbereich	nein	ja
K4		Weichenbereich	nein	nein
K5		Oberbau	Rillensch. a. Betonplatte	Rillensch. a. Betonplatte
K6	Tunnel	Tunnelform		
K7	Bauwerk	Wandstärke		
K8		Tunnelgründung		
K9		Bodenverhältnisse		
K10		Emissionspunkt	8 m Punkt	8 m Punkt
K11	Sonstiges	Meßverfahren	Max-Hold	Max-Hold
K12				
K13				
K14				
K15				

## Ausgangsspektrum in dB

Referenz:  $v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$

f[Hz]	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	$\Sigma$
A	30,0	30,0	30,0	33,8	37,5	41,3	45,0	48,8	52,5	56,3	60,0	60,0	60,0	60,0	55,0	50,0	45,0	40,0	40,0	40,0	67,2

## Berücksichtigte Korrekturen in dB

f[Hz]	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	
$L_{K1}$																					
$L_{K2}$	-6,0	-6,0	-6,0	-6,0	-6,0	-6,0	-6,0	-6,0	-6,0	-6,0	-6,0	-6,0	-6,0	-6,0	-6,0	-6,0	-6,0	-6,0	-6,0	-6,0	
$L_{K3}$	0,1	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,7	8,3	10,0	11,7	13,3	15	11,7	8,3	5,0	4,0	3,0	2,0	1,0	
$L_{K4}$																					
$L_{K5}$																					
$L_{K6}$																					
$L_{K7}$																					
$L_{K8}$																					
$L_{K9}$																					
$L_{K10}$																					
$L_{K11}$																					
$L_{K12}$																					
$L_{K13}$																					
$L_{K14}$																					
$L_{K15}$																					

## Prognosespektrum in dB

Referenz:  $v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$

f[Hz]	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	$\Sigma$
P	24,1	24,5	25,0	29,8	34,5	39,3	44,0	49,5	54,8	60,3	65,7	67,3	69,0	65,7	57,3	49,0	43,0	37,0	36,0	35,0	73,6

17.08.2015

# Prognosespektrum

Weiche -  $v_{\max} = 20 \text{ km/h}$

X:\Projekte\2014\14237-VVSE-Mailänder-Straßenbahn Campus Lichtwiese\B-Bearbeitung\B-Erschütterungen\B-Prognose\Anhang 2 Emissionen.xls\Weiche v 20

		Parameter	Ausgangs-Spektrum A	Prognose-Spektrum P
K1	Betrieb	Zuggattung	Stadtbahn	ST 13, ST 14, ST15
K2		Geschwindigkeit	50 km/h	20 km/h
K3	Fahrweg	Kurvenbereich	nein	nein
K4		Weichenbereich	nein	ja
K5		Oberbau	Rillensch. a. Betonplatte	Rillensch. a. Betonplatte
K6	Tunnel	Tunnelform		
K7	Bauwerk	Wandstärke		
K8		Tunnelgründung		
K9		Bodenverhältnisse		
K10		Emissionspunkt	8 m Punkt	8 m Punkt
K11	Sonstiges	Meßverfahren	Max-Hold	Max-Hold
K12				
K13				
K14				
K15				

## Ausgangsspektrum in dB

Referenz:  $v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$

f[Hz]	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	$\Sigma$
A	30,0	30,0	30,0	33,8	37,5	41,3	45,0	48,8	52,5	56,3	60,0	60,0	60,0	60,0	55,0	50,0	45,0	40,0	40,0	40,0	67,2

## Berücksichtigte Korrekturen in dB

f[Hz]	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	
$L_{K1}$																					
$L_{K2}$	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	-4,5	
$L_{K3}$																					
$L_{K4}$	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	6,7	8,3	10	11,7	13,3	15	13,3	11,7	10	8,3	6,7	5,0	3,3	
$L_{K5}$																					
$L_{K6}$																					
$L_{K7}$																					
$L_{K8}$																					
$L_{K9}$																					
$L_{K10}$																					
$L_{K11}$																					
$L_{K12}$																					
$L_{K13}$																					
$L_{K14}$																					
$L_{K15}$																					

## Prognosespektrum in dB

Referenz:  $v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$

f[Hz]	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	$\Sigma$
P	30,5	30,5	34,3	38,0	41,8	45,5	51,0	56,3	61,8	67,2	68,8	70,5	68,8	62,2	55,5	48,8	42,2	40,5	38,8	####	

17.08.2015

# Prognosespektrum

Weiche -  $v_{\max} = 15 \text{ km/h}$

X:\Projekte\2014\14237-VVSE-Mailänder-Straßenbahn Campus Lichtwiese\B-Bearbeitung\B-Erschütterungen\B-Prognose\Anhang 2 Emissionen.xls\Weiche v 15

		Parameter	Ausgangs-Spektrum A	Prognose-Spektrum P
K1	Betrieb	Zuggattung	Stadtbahn	ST 13, ST 14, ST15
K2		Geschwindigkeit	50 km/h	15 km/h
K3	Fahrweg	Kurvenbereich	nein	nein
K4		Weichenbereich	nein	ja
K5		Oberbau	Rillensch. a. Betonplatte	Rillensch. a. Betonplatte
K6	Tunnel	Tunnelform		
K7	Bauwerk	Wandstärke		
K8		Tunnelgründung		
K9		Bodenverhältnisse		
K10		Emissionspunkt	8 m Punkt	8 m Punkt
K11	Sonstiges	Meßverfahren	Max-Hold	Max-Hold
K12				
K13				
K14				
K15				

## Ausgangsspektrum in dB

Referenz:  $v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$

f[Hz]	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	$\Sigma$
A	30,0	30,0	30,0	33,8	37,5	41,3	45,0	48,8	52,5	56,3	60,0	60,0	60,0	60,0	55,0	50,0	45,0	40,0	40,0	40,0	67,2

## Berücksichtigte Korrekturen in dB

f[Hz]	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	
$L_{K1}$																					
$L_{K2}$	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	
$L_{K3}$																					
$L_{K4}$	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	6,7	8,3	10	11,7	13,3	15	13,3	11,7	10	8,3	6,7	5,0	3,3	
$L_{K5}$																					
$L_{K6}$																					
$L_{K7}$																					
$L_{K8}$																					
$L_{K9}$																					
$L_{K10}$																					
$L_{K11}$																					
$L_{K12}$																					
$L_{K13}$																					
$L_{K14}$																					
$L_{K15}$																					

## Prognosespektrum in dB

Referenz:  $v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$

f[Hz]	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	$\Sigma$
P	29,8	29,8	29,8	33,5	37,3	41,0	44,8	50,2	55,6	61,0	66,5	68,1	69,8	68,1	61,5	54,8	48,1	41,5	39,8	38,1	74,8

17.08.2015



# Übertragungsfunktion

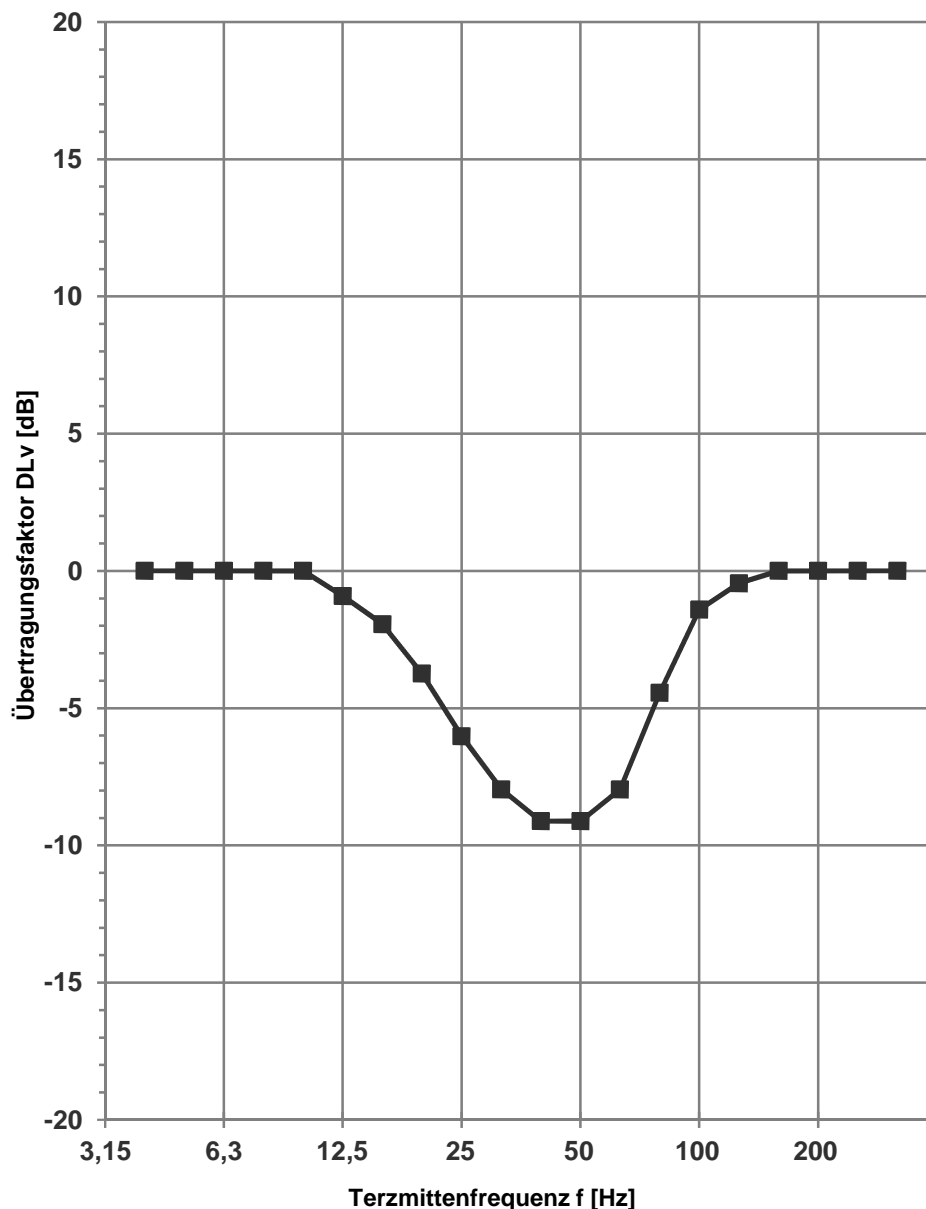
## Erdreich - Fundament (T2)

X:\Projekte\2014\14237-VVSE-Mailänder-Straßenbahn Campus Lichtwiese\C-Bearbeitung\B-Erschütterungen\D-Prognose\T2-Funktion Ziegler Consultants.xlsx\T2-Funktion

**Quelle** 18. Symposium - Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen  
ZIEGLER CONSULTANTS  
an der Empa Dübendorf, 29. Mai 2015  
Bild 4.1 Ankopplungsspektren für verschiedene Gebäudetypen  
Übertragung vom Erdreich auf das Gebäudefundament

**Gebäudetyp** Einfamilienhäuser

**Schwingrichtung** vertikal (z)



DL <sub>v</sub> [dB]	f [Hz]
0,0	4
0,0	5
0,0	6,3
0,0	8
0,0	10
-0,9	12,5
-1,9	16
-3,7	20
-6,0	25
-8,0	31,5
-9,1	40
-9,1	50
-8,0	63
-4,4	80
-1,4	100
-0,4	125
0,0	160
0,0	200
0,0	250
0,0	315

# Übertragungsfunktion

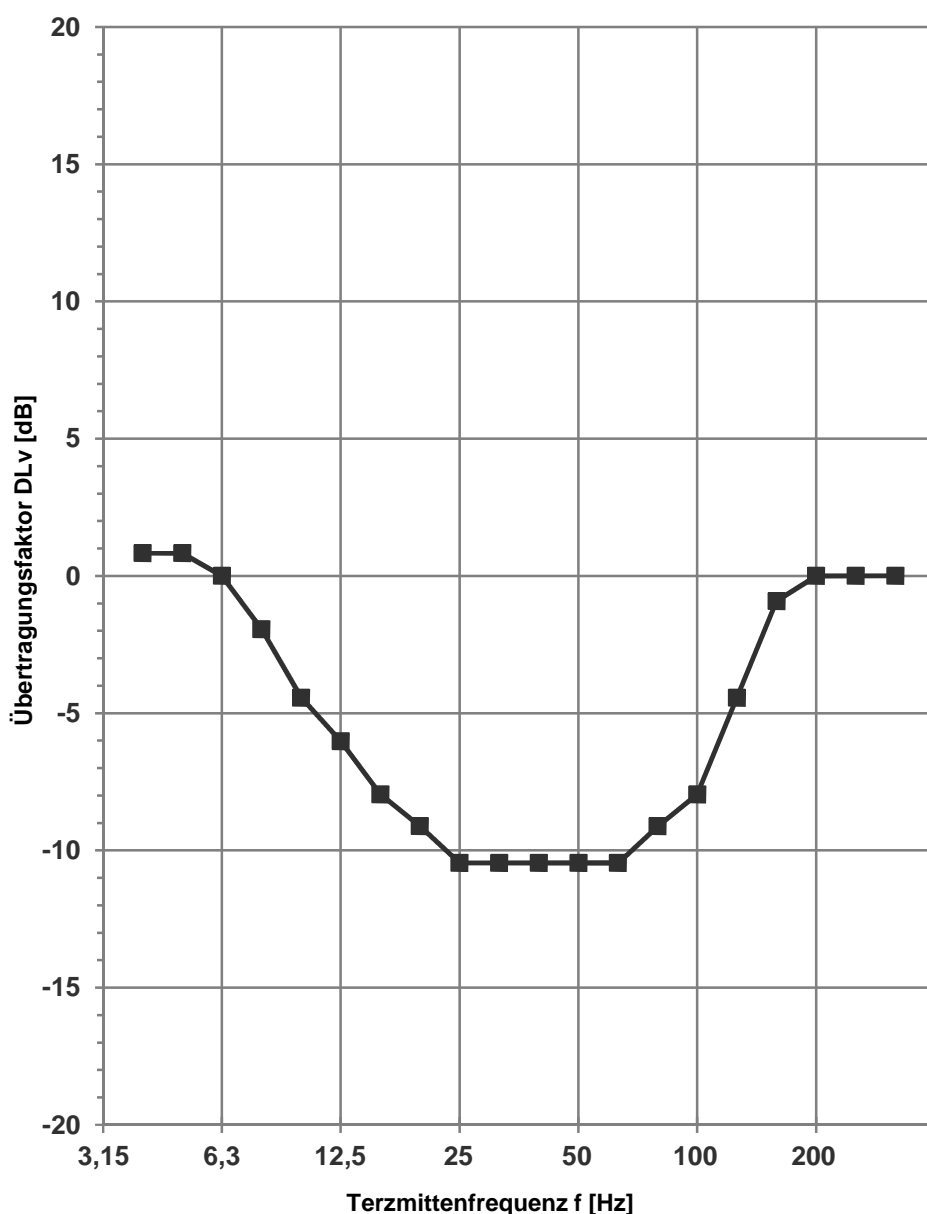
## Erdreich - Fundament (T2)

X:\Projekte\2014\14237-VVSE-Mailänder-Straßenbahn Campus Lichtwiese\C-Bearbeitung\B-Erschütterungen\D-Prognose\T2-Funktion Ziegler Consultants.xlsx\T2-Funktion (3)

**Quelle** 18. Symposium - Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen  
ZIEGLER CONSULTANTS  
an der Empa Dübendorf, 29. Mai 2015  
Bild 4.1 Ankopplungsspektren für verschiedene Gebäudetypen  
Übertragung vom Erdreich auf das Gebäudefundament

**Gebäudetyp** Hochhäuser

**Schwingrichtung** vertikal (z)



DL <sub>v</sub> [dB]	f [Hz]
0,8	4
0,8	5
0,0	6,3
-1,9	8
-4,4	10
-6,0	12,5
-8,0	16
-9,1	20
-10,5	25
-10,5	31,5
-10,5	40
-10,5	50
-10,5	63
-9,1	80
-8,0	100
-4,4	125
-0,9	160
0,0	200
0,0	250
0,0	315

# Übertragungsfunktion T3

## normiert aus exemplarischen Gebäuden

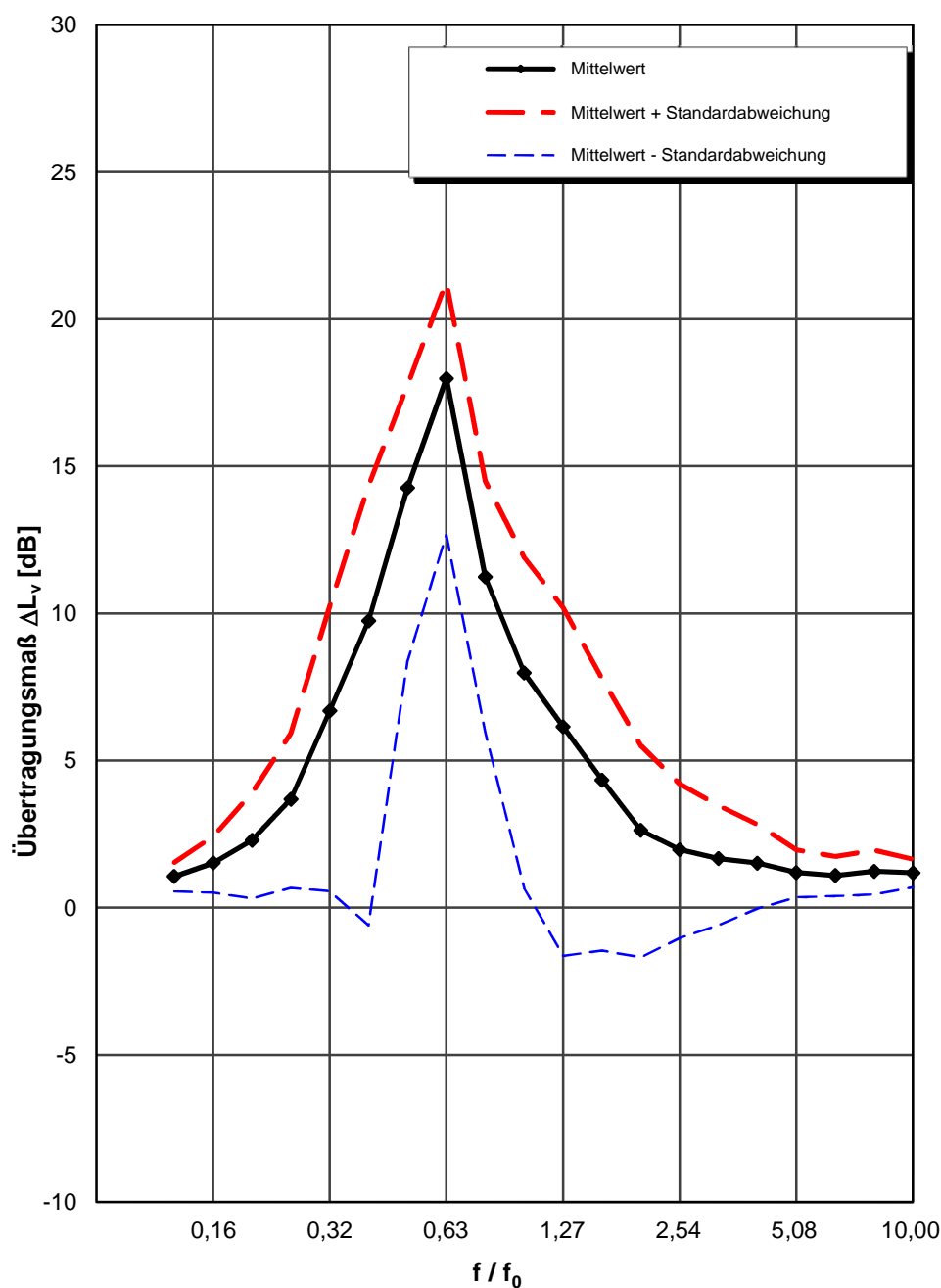
X:\Projekte2\2014\14237-VVSE-Mailänder-Straßenbahn Campus Lichtwiese\C-Bearbeitung\B-Erschütterungen\D-Prognose\Anhang 3 T3-Funktionen-normiert.xlsJT3-Graphisch\_MW+Stabw

**Quelle:** Erschütterungsmessungen in 5 Gebäuden entlang der Straßenbahnstrecke  
TUD Lichtwiese, FRITZ GmbH, Juli 2015

**Deckenart:** Holzbalkendecken / Stahlbetondecken

**Schwingrichtung:** vertikal (z)

Mittelwert +/- Standardabweichung



$f_0$  = Resonanzfrequenz

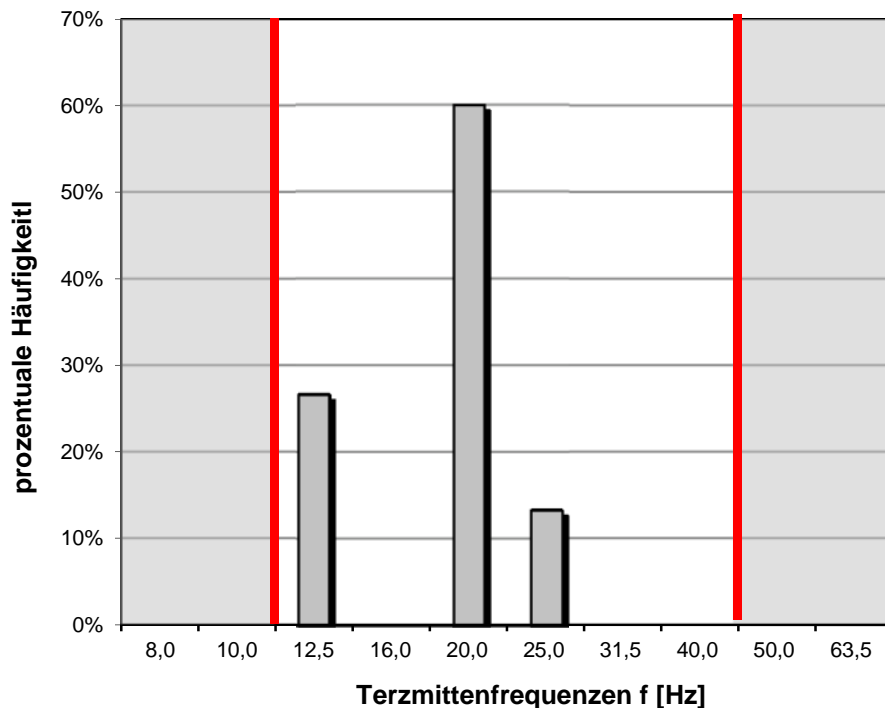
17.08.2015

# Eigenschaften von Geschossdecken

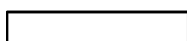
## Häufigkeitsverteilung der Eigenfrequenzen

X:\Projekte\2014\14237-VVSE-Mailänder-Straßenbahn Campus Lichtwiese\C-Bearbeitung\B-Erschütterungen\D-Prognose\Anhang 3 T3-Funktionen-normiert.xls\Graphik-Häufigkei

Es wurden insgesamt 15 Geschossdecken ausgewertet (entspricht 100%).



Resonanz- frequenz	Häufig- keit
$f_0 < 12,5 \text{ Hz}$	0%
$12,5 \text{ Hz} \leq f_0 < 63 \text{ Hz}$	100%
$f_0 \geq 63 \text{ Hz}$	0%



Relevanter Frequenzbereich



bei der Extrapolation nicht berücksichtigter Frequenzbereich

### 1. Schritt der Beurteilung gemäß DIN 4150-2

IP Nr.	Gebäude	Nutzung	r [m]	maximale bewertete Schwingstärke $KB_{Fmax}$					
				Raum 1		Raum 2		Raum 3	
				Tag	Nacht	Tag	Nacht	Tag	Nacht
1	Jahnstraße 133	WA	18	0,058	0,058	0,067	0,067	0,114	0,114
2	El-Lissitzky-Straße 1	MK	19	0,026	0,026	0,035	0,035	0,033	0,033
3	Franziska-Braun-Straße 7	MK	8	0,099	0,099	0,124	0,124	0,121	0,121
4	Franziska-Braun-Straße 3	MK	6	0,222	0,222	0,154	0,154	0,281	0,281
5	Franziska-Braun-Straße 10	MK	12	0,182	0,182	0,071	0,071	0,086	0,086

### 2. Schritt der Beurteilung gemäß DIN 4150-2

IP Nr.	Gebäude	Nutzung	r [m]	Beurteilungsschwingstärke $KB_{FTF}$					
				Raum 1		Raum 2		Raum 3	
				Tag	Nacht	Tag	Nacht	Tag	Nacht
1	Jahnstraße 133	WA	18	0,000	0,000	0,000	0,000	0,031	0,016
2	El-Lissitzky-Straße 1	MK	19	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	Franziska-Braun-Straße 7	MK	8	0,000	0,000	0,041	0,011	0,040	0,011
4	Franziska-Braun-Straße 3	MK	6	0,073	0,020	0,051	0,014	0,093	0,026
5	Franziska-Braun-Straße 10	MK	12	0,042	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000

**IP** Immissionsort

**r** Abstand zur nächstgelegenen Gleisachse [m]

**$KB_{Fmax}$**  maximale bewertete Schwingstärke [-]

**$KB_{FTF}$**  Beurteilungsschwingstärke [-]



Die Anforderungen der **DIN 4150-2** werden erfüllt.



Es ist ein weiterer Prüfschritt gemäß **DIN 4150-2** erforderlich.



Die Anforderungen der **DIN 4150-2** werden **nicht** erfüllt.



Keine Nutzung während des Beurteilungszeitraumes

**Nutzung** Art der baulichen Nutzung in Anlehnung an die BauNVO  
WA Allgemeines Wohngebiet  
MK Kerngebiet

### prozentuale Ausschöpfung der Beurteilungsanhaltswerte $A_r$

IP Nr.	Gebäude	Nutzung	r [m]	prozentuale Ausschöpfung [%] $A_r$					
				Raum 1		Raum 2		Raum 3	
				Tag	Nacht	Tag	Nacht	Tag	Nacht
1	Jahnstraße 133	WA	18	0%	0%	0%	0%	30%	22%
2	El-Lissitzky-Straße 1	MK	19	0%	0%	0%	0%	0%	0%
3	Franziska-Braun-Straße 7	MK	8	0%	0%	27%	11%	27%	11%
4	Franziska-Braun-Straße 3	MK	6	49%	19%	34%	13%	62%	24%
5	Franziska-Braun-Straße 10	MK	12	28%	11%	0%	0%	0%	0%

**IP** Immissionsort

**r** Abstand zur nächstgelegenen Gleisachse [m]

**$A_r$**  Beurteilungsanhaltswert



Die Ausschöpfung der Beurteilungsanhaltswerte ist kleiner oder gleich 100 %



Die Ausschöpfung der Beurteilungsanhaltswerte ist größer als 100 %



Keine Nutzung während des Beurteilungszeitraumes

**Nutzung** Art der baulichen Nutzung in Anlehnung an die BauNVO

WA Allgemeines Wohngebiet

MK Kerngebiet

# Sekundäre Luftschallimmissionen

## Prognose-Planfall mit Standardoberbau

X:\Projekte2\2014\14237-VVSE-Mailänder-Straßenbahn Campus Lichtwiese\C-Bearbeitung\B-Erschütterungen\B-Prognose\Anhang 4 Immissionen.xls\4.3

IP Nr.	Gebäude	Nutzung	r [m]	Beurteilungs-Innenschallpegel L <sub>ri</sub> [dB(A)]					
				Raum 1		Raum 2		Raum 3	
				Tag	Nacht	Tag	Nacht	Tag	Nacht
1	Jahnstraße 133	WA	18	22,5	17,0	22,4	16,9	23,5	18,0
2	El-Lissitzky-Straße 1	MK	19	16,4	5,3	16,4	5,2	16,5	5,4
3	Franziska-Braun-Straße 7	MK	8	25,9	14,8	26,5	15,3	26,7	15,6
4	Franziska-Braun-Straße 3	MK	6	30,2	19,0	29,3	18,2	30,3	19,1
5	Franziska-Braun-Straße 10	MK	12	26,5	15,3	23,5	12,3	24,1	12,9

**r** Abstand zur nächstgelegenen Gleisachse [m]

**L<sub>ri</sub>** Beurteilungs-Innenschallpegel [dB(A)]



Die Anforderungen der **24. BImSchV** sind erfüllt.



Die Anforderungen der **24. BImSchV** sind **nicht** erfüllt.



Keine Nutzung während des Beurteilungszeitraumes

**Nutzung** Art der baulichen Nutzung in Anlehnung an die BauNVO

WA Allgemeines Wohngebiet

MK Kerngebiet



# Erschütterungsimmissionen

Einwirkungsmatrix - Tagzeitraum - Nieder-Rams. Str.

X:\Projekte2\2014\14237-VVSE-Mailänder-Straßenbahn Campus Lichtwiese\C-Bearbeitung\B-Erschütterungen\B-Prognose\Anhang 5 Matrizen\5-1 Kurve 15 Niederram WA.xls\JM

## Einwirkungsmatrix - Kurvenbereich - v = 15 km/h

Beurteilungsschwingstärken  $KB_{FTr}$  in Abhängigkeit des Gleisabstandes und maßgeblichen Deckeneigenfrequenzen von Gebäuden.

Berechnungsergebnisse für Gebäude im Allgemeinen Wohngebiet (WA)

Abstand r [m]	Deckeneigenfrequenzen [Hz]									
	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80
1	0,114	0,131	0,155	0,191	0,242	0,313	0,414	0,499	0,618	0,653
2	0,091	0,105	0,124	0,153	0,194	0,250	0,331	0,398	0,492	0,518
3	0,079	0,091	0,108	0,134	0,169	0,219	0,289	0,347	0,427	0,448
4	0,072	0,082	0,098	0,121	0,153	0,197	0,261	0,313	0,384	0,402
5	0,066	0,076	0,090	0,111	0,141	0,182	0,240	0,287	0,352	0,367
6	0,061	0,071	0,084	0,104	0,131	0,170	0,224	0,267	0,327	0,340
7	0,058	0,066	0,079	0,098	0,124	0,160	0,211	0,251	0,306	0,317
8	0,054	0,063	0,075	0,093	0,117	0,151	0,199	0,237	0,289	0,298
9	0,052	0,060	0,071	0,088	0,112	0,144	0,189	0,225	0,273	0,281
10	0,049	0,057	0,068	0,084	0,107	0,137	0,181	0,214	0,260	0,266
11	0,047	0,054	0,065	0,081	0,102	0,132	0,173	0,205	0,247	0,253
12	0,045	0,052	0,063	0,078	0,098	0,126	0,166	0,196	0,236	0,241
13	0,043	0,050	0,060	0,075	0,095	0,122	0,160	0,188	0,226	0,230
14	0,042	0,048	0,058	0,072	0,091	0,117	0,154	0,181	0,217	0,220
15	0,040	0,047	0,056	0,070	0,088	0,113	0,148	0,175	0,209	0,210
16	0,039	0,045	0,054	0,068	0,085	0,110	0,143	0,168	0,201	0,202
17	0,038	0,044	0,053	0,066	0,083	0,106	0,139	0,163	0,193	0,194
20	0,034	0,040	0,048	0,060	0,076	0,097	0,126	0,147	0,174	0,172
24	0,000	0,036	0,043	0,054	0,068	0,087	0,113	0,130	0,152	0,149
27	0,000	0,033	0,040	0,050	0,063	0,080	0,104	0,120	0,139	0,135

**r** Abstand zur nächstgelegenen Gleisachse [m]



Der Beurteilungsanhaltswert  $A_r$  für Allgemeine Wohngebiete wird maximal zu 2/3 ausgeschöpft, die Anforderungen der DIN 4150-2 sind erfüllt.



Der Beurteilungsanhaltswert  $A_r$  für Allgemeine Wohngebiete wird eingehalten oder unterschritten, die Anforderungen der DIN 4150-2 sind erfüllt.



Der Beurteilungsanhaltswert  $A_r$  für Allgemeine Wohngebiete wird überschritten, die Anforderungen der DIN 4150-2 sind nicht eingehalten.

22.08.2015

### Einwirkungsmatrix - Weichenbereich nördlich Lichtwiesenweg- v = 15 km/h

Beurteilungsschwingstärken  $KB_{FTr}$  in Abhängigkeit des Gleisabstandes und maßgeblichen Deckeneigenfrequenzen von Gebäuden.

Berechnungsergebnisse für Gebäude im Allgemeinen Wohngebiet (WA)

Abstand r [m]	Deckeneigenfrequenzen [Hz]									
	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80
1	0,678	0,772	0,901	1,100	1,383	1,790	2,370	2,854	3,552	4,132
2	0,333	0,380	0,443	0,542	0,681	0,881	1,166	1,402	1,741	2,018
3	0,218	0,249	0,291	0,356	0,447	0,579	0,765	0,919	1,138	1,314
4	0,161	0,184	0,215	0,263	0,330	0,427	0,565	0,677	0,836	0,963
5	0,126	0,144	0,169	0,207	0,261	0,337	0,445	0,532	0,656	0,752
6	0,104	0,118	0,139	0,170	0,214	0,276	0,365	0,436	0,536	0,613
7	0,087	0,100	0,117	0,144	0,181	0,233	0,308	0,367	0,450	0,513
8	0,075	0,086	0,101	0,124	0,156	0,201	0,265	0,316	0,386	0,438
9	0,066	0,075	0,088	0,109	0,137	0,176	0,232	0,276	0,337	0,381
10	0,058	0,067	0,078	0,096	0,121	0,156	0,205	0,244	0,297	0,335
11	0,052	0,060	0,070	0,086	0,109	0,140	0,184	0,218	0,265	0,297
12	0,047	0,054	0,063	0,078	0,098	0,126	0,166	0,196	0,238	0,266
13	0,000	0,049	0,058	0,071	0,089	0,115	0,151	0,178	0,215	0,240
14	0,000	0,045	0,053	0,065	0,082	0,105	0,138	0,163	0,196	0,218
15	0,000	0,000	0,049	0,060	0,075	0,097	0,127	0,149	0,179	0,199
16	0,000	0,000	0,045	0,055	0,070	0,089	0,117	0,137	0,165	0,182
17	0,000	0,000	0,000	0,051	0,065	0,083	0,108	0,127	0,152	0,167
18	0,000	0,000	0,000	0,048	0,060	0,077	0,101	0,118	0,141	0,154
19	0,000	0,000	0,000	0,045	0,056	0,072	0,094	0,110	0,131	0,143
20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,053	0,067	0,088	0,103	0,122	0,133

**r** Abstand zur nächstgelegenen Gleisachse [m]



Der Beurteilungsanhaltswert  $A_r$  für Allgemeine Wohngebiete wird maximal zu 2/3 ausgeschöpft, die Anforderungen der DIN 4150-2 sind erfüllt.



Der Beurteilungsanhaltswert  $A_r$  für Allgemeine Wohngebiete wird eingehalten oder unterschritten, die Anforderungen der DIN 4150-2 sind erfüllt.



Der Beurteilungsanhaltswert  $A_r$  für Allgemeine Wohngebiete wird überschritten, die Anforderungen der DIN 4150-2 sind nicht eingehalten.

# Erschütterungsimmissionen

## Einwirkungsmatrix - Tagzeitraum - Lichtwiese

X:\Projekte2\2014\14237-VVSE-Mailänder-Straßenbahn Campus Lichtwiese\C-Bearbeitung\B-Erschütterungen\D-Prognose\Anhang 5 Matrizen\5-3 Gerade 60 Lichtwiesen WA.xl

### Einwirkungsmatrix - Gerade Streckenführung - v = 60 km/h

Beurteilungsschwingstärken  $KB_{FTr}$  in Abhängigkeit des Gleisabstandes und maßgeblichen Deckeneigenfrequenzen von Gebäuden.

Berechnungsergebnisse für Gebäude im Allgemeinen Wohngebiet (WA)

Abstand r [m]	Deckeneigenfrequenzen [Hz]									
	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80
1	0,049	0,058	0,069	0,085	0,105	0,136	0,178	0,195	0,202	0,214
2	0,040	0,046	0,055	0,068	0,084	0,109	0,143	0,156	0,161	0,170
3	0,035	0,040	0,048	0,060	0,074	0,095	0,125	0,136	0,140	0,147
4	0,000	0,037	0,044	0,054	0,067	0,086	0,113	0,122	0,126	0,132
5	0,000	0,034	0,041	0,050	0,062	0,080	0,104	0,113	0,116	0,121
6	0,000	0,000	0,038	0,047	0,058	0,075	0,097	0,105	0,107	0,112
7	0,000	0,000	0,036	0,044	0,055	0,070	0,092	0,099	0,101	0,104
8	0,000	0,000	0,034	0,042	0,052	0,067	0,087	0,093	0,095	0,098
9	0,000	0,000	0,000	0,040	0,049	0,064	0,083	0,089	0,090	0,093
10	0,000	0,000	0,000	0,038	0,047	0,061	0,079	0,084	0,085	0,088
11	0,000	0,000	0,000	0,037	0,045	0,058	0,076	0,081	0,082	0,083
12	0,000	0,000	0,000	0,035	0,044	0,056	0,073	0,077	0,078	0,079
13	0,000	0,000	0,000	0,034	0,042	0,054	0,070	0,074	0,075	0,076
14	0,000	0,000	0,000	0,033	0,041	0,052	0,068	0,072	0,072	0,072
15	0,000	0,000	0,000	0,000	0,039	0,051	0,065	0,069	0,069	0,069
16	0,000	0,000	0,000	0,000	0,038	0,049	0,063	0,067	0,066	0,067
17	0,000	0,000	0,000	0,000	0,037	0,048	0,061	0,065	0,064	0,064
18	0,000	0,000	0,000	0,000	0,036	0,046	0,059	0,062	0,062	0,061
19	0,000	0,000	0,000	0,000	0,035	0,045	0,058	0,060	0,060	0,059
20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,034	0,044	0,056	0,059	0,058	0,057

**r** Abstand zur nächstgelegenen Gleisachse [m]



Der Beurteilungsanhaltswert  $A_r$  für Allgemeine Wohngebiete wird maximal zu 2/3 ausgeschöpft, die Anforderungen der DIN 4150-2 sind erfüllt.



Der Beurteilungsanhaltswert  $A_r$  für Allgemeine Wohngebiete wird eingehalten oder unterschritten, die Anforderungen der DIN 4150-2 sind erfüllt.



Der Beurteilungsanhaltswert  $A_r$  für Allgemeine Wohngebiete wird überschritten, die Anforderungen der DIN 4150-2 sind nicht eingehalten.

18.08.2015

# Erschütterungsimmissionen

## Einwirkungsmatrix - Tagzeitraum - Lichtwiese

X:\Projekte2\2014\14237-VVSE-Mailänder-Straßenbahn Campus Lichtwiese\C-Bearbeitung\B-Erschütterungen\D-Prognose\Anhang 5 Matrizen\5-4-Gerade 50 Lichtwiese MI.xls\A

### Einwirkungsmatrix - Gerade Streckenführung - v = 50 km/h

Beurteilungsschwingstärken  $KB_{FTr}$  in Abhängigkeit des Gleisabstandes und maßgeblichen Deckeneigenfrequenzen von Gebäuden.

Berechnungsergebnisse für Gebäude im Mischgebiet (MI)

Abstand r [m]	Deckeneigenfrequenzen [Hz]									
	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80
1	0,042	0,049	0,058	0,071	0,088	0,115	0,150	0,164	0,170	0,180
2	0,033	0,039	0,047	0,057	0,071	0,092	0,120	0,131	0,135	0,143
3	0,000	0,034	0,041	0,050	0,062	0,080	0,105	0,114	0,118	0,124
4	0,000	0,000	0,037	0,045	0,056	0,073	0,095	0,103	0,106	0,111
5	0,000	0,000	0,034	0,042	0,052	0,067	0,088	0,095	0,097	0,102
6	0,000	0,000	0,000	0,039	0,049	0,063	0,082	0,088	0,090	0,094
7	0,000	0,000	0,000	0,037	0,046	0,059	0,077	0,083	0,085	0,088
8	0,000	0,000	0,000	0,035	0,044	0,056	0,073	0,078	0,080	0,082
9	0,000	0,000	0,000	0,034	0,042	0,054	0,069	0,075	0,076	0,078
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,040	0,051	0,066	0,071	0,072	0,074
11	0,000	0,000	0,000	0,000	0,038	0,049	0,064	0,068	0,069	0,070
12	0,000	0,000	0,000	0,000	0,037	0,047	0,061	0,065	0,066	0,067
13	0,000	0,000	0,000	0,000	0,035	0,046	0,059	0,063	0,063	0,064
14	0,000	0,000	0,000	0,000	0,034	0,044	0,057	0,060	0,060	0,061
15	0,000	0,000	0,000	0,000	0,033	0,043	0,055	0,058	0,058	0,058
16	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,041	0,053	0,056	0,056	0,056
17	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,040	0,051	0,054	0,054	0,054
18	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,039	0,050	0,053	0,052	0,052
19	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,038	0,048	0,051	0,050	0,050
20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,037	0,047	0,049	0,049	0,048

**r** Abstand zur nächstgelegenen Gleisachse [m]



Der Beurteilungsanhaltswert  $A_r$  für Mischgebiete wird maximal zu 2/3 ausgeschöpft, die Anforderungen der DIN 4150-2 sind erfüllt.



Der Beurteilungsanhaltswert  $A_r$  für Mischgebiete wird eingehalten oder unterschritten, die Anforderungen der DIN 4150-2 sind erfüllt.



Der Beurteilungsanhaltswert  $A_r$  für Mischgebiete wird überschritten, die Anforderungen der DIN 4150-2 sind nicht eingehalten.

18.08.2015

# Erschütterungsimmissionen

## Einwirkungsmatrix - Tagzeitraum - Lichtwiese

X:\Projekte\2014\14237-VVSE-Mailänder-Straßenbahn Campus Lichtwiese\C-Bearbeitung\B-Erschütterungen\D-Prognose\Anhang 5 Matrizen\5-5 Kurve 20 Lichtwiese MI.xls]Me

### Einwirkungsmatrix - Kurvenbereich - $v = 20$ km/h

Beurteilungsschwingstärken  $KB_{FTr}$  in Abhängigkeit des Gleisabstandes und maßgeblichen Deckeneigenfrequenzen von Gebäuden.

Berechnungsergebnisse für Gebäude im Mischgebiet (MI)

Abstand r [m]	Deckeneigenfrequenzen [Hz]									
	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80
1	0,094	0,106	0,124	0,153	0,196	0,263	0,366	0,442	0,514	0,517
2	0,075	0,085	0,099	0,123	0,157	0,210	0,293	0,353	0,410	0,411
3	0,065	0,074	0,086	0,107	0,137	0,183	0,255	0,307	0,356	0,355
4	0,059	0,067	0,078	0,097	0,124	0,166	0,231	0,277	0,320	0,319
5	0,054	0,061	0,072	0,089	0,114	0,153	0,212	0,255	0,294	0,291
6	0,050	0,057	0,067	0,083	0,106	0,143	0,198	0,238	0,273	0,270
7	0,047	0,054	0,063	0,078	0,100	0,134	0,186	0,223	0,255	0,252
8	0,045	0,051	0,060	0,074	0,095	0,127	0,176	0,211	0,241	0,237
9	0,043	0,048	0,057	0,070	0,090	0,121	0,168	0,200	0,228	0,223
10	0,041	0,046	0,054	0,067	0,086	0,115	0,160	0,191	0,217	0,212
11	0,039	0,044	0,052	0,064	0,082	0,111	0,153	0,182	0,207	0,201
12	0,037	0,042	0,050	0,062	0,079	0,106	0,147	0,175	0,197	0,192
13	0,036	0,041	0,048	0,059	0,076	0,102	0,142	0,168	0,189	0,183
14	0,034	0,039	0,046	0,057	0,073	0,098	0,136	0,161	0,181	0,175
15	0,033	0,038	0,044	0,055	0,071	0,095	0,132	0,156	0,174	0,168
16	0,000	0,036	0,043	0,054	0,069	0,092	0,127	0,150	0,168	0,161
17	0,000	0,035	0,042	0,052	0,066	0,089	0,123	0,145	0,162	0,154
18	0,000	0,034	0,040	0,050	0,064	0,086	0,119	0,140	0,156	0,148
19	0,000	0,033	0,039	0,049	0,062	0,084	0,116	0,136	0,151	0,143
20	0,000	0,000	0,038	0,047	0,061	0,081	0,112	0,131	0,145	0,138

**r** Abstand zur nächstgelegenen Gleisachse [m]



Der Beurteilungsanhaltswert  $A_r$  für Mischgebiete wird maximal zu 2/3 ausgeschöpft, die Anforderungen der DIN 4150-2 sind erfüllt.



Der Beurteilungsanhaltswert  $A_r$  für Mischgebiete wird eingehalten oder unterschritten, die Anforderungen der DIN 4150-2 sind erfüllt.



Der Beurteilungsanhaltswert  $A_r$  für Mischgebiete wird überschritten, die Anforderungen der DIN 4150-2 sind nicht eingehalten.

18.08.2015

# Erschütterungsimmissionen

## Einwirkungsmatrix - Tagzeitraum - Lichtwiese

X:\Projekte2\2014\14237-VVSE-Mailänder-Straßenbahn Campus Lichtwiese\C-Bearbeitung\B-Erschütterungen\D-Prognose\Anhang 5 Matrizen\5-6 Weiche 20 Lichtwiese MI.xls\A

### Einwirkungsmatrix - Weichenbereich - $v = 20 \text{ km/h}$

Beurteilungsschwingstärken  $KB_{FTr}$  in Abhängigkeit des Gleisabstandes und maßgeblichen Deckeneigenfrequenzen von Gebäuden.

Berechnungsergebnisse für Gebäude im Mischgebiet (MI)

Abstand r [m]	Deckeneigenfrequenzen [Hz]									
	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80
1	0,403	0,455	0,532	0,657	0,840	1,126	1,568	1,895	2,204	2,216
2	0,198	0,224	0,262	0,324	0,414	0,555	0,772	0,932	1,081	1,083
3	0,130	0,147	0,172	0,213	0,272	0,364	0,507	0,611	0,707	0,706
4	0,096	0,108	0,127	0,157	0,201	0,269	0,375	0,451	0,520	0,518
5	0,075	0,085	0,100	0,124	0,158	0,212	0,295	0,354	0,408	0,405
6	0,062	0,070	0,082	0,102	0,130	0,174	0,242	0,291	0,334	0,330
7	0,052	0,059	0,069	0,086	0,110	0,147	0,205	0,245	0,280	0,277
8	0,045	0,051	0,060	0,074	0,095	0,127	0,176	0,211	0,241	0,237
9	0,039	0,044	0,052	0,065	0,083	0,111	0,154	0,184	0,210	0,206
10	0,035	0,039	0,046	0,057	0,074	0,099	0,137	0,163	0,185	0,181
11	0,000	0,035	0,041	0,052	0,066	0,088	0,123	0,146	0,165	0,161
12	0,000	0,000	0,037	0,047	0,060	0,080	0,111	0,132	0,149	0,144
13	0,000	0,000	0,034	0,042	0,054	0,073	0,101	0,119	0,135	0,130
14	0,000	0,000	0,000	0,039	0,050	0,067	0,092	0,109	0,123	0,118
15	0,000	0,000	0,000	0,036	0,046	0,061	0,085	0,100	0,112	0,108
16	0,000	0,000	0,000	0,033	0,042	0,057	0,078	0,092	0,103	0,099
17	0,000	0,000	0,000	0,000	0,039	0,053	0,073	0,086	0,095	0,091
18	0,000	0,000	0,000	0,000	0,036	0,049	0,068	0,079	0,088	0,084
19	0,000	0,000	0,000	0,000	0,034	0,046	0,063	0,074	0,082	0,078
20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,043	0,059	0,069	0,077	0,072

**r** Abstand zur nächstgelegenen Gleisachse [m]



Der Beurteilungsanhaltswert  $A_r$  für Mischgebiete wird maximal zu 2/3 ausgeschöpft, die Anforderungen der DIN 4150-2 sind erfüllt.



Der Beurteilungsanhaltswert  $A_r$  für Mischgebiete wird eingehalten oder unterschritten, die Anforderungen der DIN 4150-2 sind erfüllt.



Der Beurteilungsanhaltswert  $A_r$  für Mischgebiete wird überschritten, die Anforderungen der DIN 4150-2 sind nicht eingehalten.

18.08.2015

# Erschütterungsimmissionen

## Einwirkungsmatrix - Tagzeitraum - Lichtwiese

X:\Projekte2\2014\14237-VVSE-Mailänder-Straßenbahn Campus Lichtwiese\C-Bearbeitung\B-Erschütterungen\D-Prognose\Anhang 5 Matrizen\5-7 Kurve 10 Lichtwiese MI.xls]Me

### Einwirkungsmatrix - Wendeschleife - $v = 10 \text{ km/h}$

Beurteilungsschwingstärken  $KB_{FTr}$  in Abhängigkeit des Gleisabstandes und maßgeblichen Deckeneigenfrequenzen von Gebäuden.

Berechnungsergebnisse für Gebäude im Mischgebiet (MI)

Abstand r [m]	Deckeneigenfrequenzen [Hz]									
	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80
1	0,053	0,061	0,072	0,089	0,114	0,154	0,214	0,259	0,300	0,277
2	0,043	0,048	0,057	0,071	0,092	0,123	0,171	0,207	0,239	0,220
3	0,037	0,042	0,050	0,062	0,080	0,107	0,150	0,180	0,207	0,190
4	0,034	0,038	0,045	0,056	0,072	0,097	0,135	0,163	0,187	0,171
5	0,031	0,035	0,042	0,052	0,067	0,089	0,125	0,150	0,171	0,156
6	0,029	0,033	0,039	0,048	0,062	0,084	0,116	0,139	0,159	0,145
7	0,027	0,031	0,036	0,046	0,059	0,079	0,109	0,131	0,149	0,135
8	0,026	0,029	0,034	0,043	0,055	0,074	0,104	0,124	0,141	0,127
9	0,024	0,028	0,033	0,041	0,053	0,071	0,099	0,117	0,133	0,120
10	0,000	0,026	0,031	0,039	0,050	0,068	0,094	0,112	0,127	0,114
11	0,000	0,025	0,030	0,038	0,048	0,065	0,090	0,107	0,121	0,108
12	0,000	0,024	0,029	0,036	0,046	0,062	0,087	0,103	0,115	0,103
13	0,000	0,000	0,028	0,035	0,045	0,060	0,083	0,099	0,111	0,099
14	0,000	0,000	0,027	0,034	0,043	0,058	0,080	0,095	0,106	0,094
15	0,000	0,000	0,026	0,032	0,042	0,056	0,077	0,091	0,102	0,090
16	0,000	0,000	0,025	0,031	0,040	0,054	0,075	0,088	0,098	0,087
17	0,000	0,000	0,024	0,030	0,039	0,052	0,073	0,085	0,095	0,083
18	0,000	0,000	0,023	0,029	0,038	0,051	0,070	0,082	0,091	0,080
19	0,000	0,000	0,000	0,029	0,037	0,049	0,068	0,080	0,088	0,077
20	0,000	0,000	0,000	0,028	0,036	0,048	0,066	0,077	0,085	0,075

**r** Abstand zur nächstgelegenen Gleisachse [m]



Der Beurteilungsanhaltswert  $A_r$  für Mischgebiete wird maximal zu 2/3 ausgeschöpft, die Anforderungen der DIN 4150-2 sind erfüllt.



Der Beurteilungsanhaltswert  $A_r$  für Mischgebiete wird eingehalten oder unterschritten, die Anforderungen der DIN 4150-2 sind erfüllt.



Der Beurteilungsanhaltswert  $A_r$  für Mischgebiete wird überschritten, die Anforderungen der DIN 4150-2 sind nicht eingehalten.

18.08.2015



# Einwirkungen schwingungssensible Geräte ohne Maßnahme

X:\Projekte2\2014\14237-VVSE-Mailänder-Straßenbahn Campus Lichtwiese\C-Bearbeitung\B-Erschütterungen\B-Prognose\Einwirkungen sensible Geräte.xlsx\Belastung-L5-01

**Gebäude L5/01:** Franziska-Braun-Straße 7, Bauingenieurwesen Institutsgebäude 1

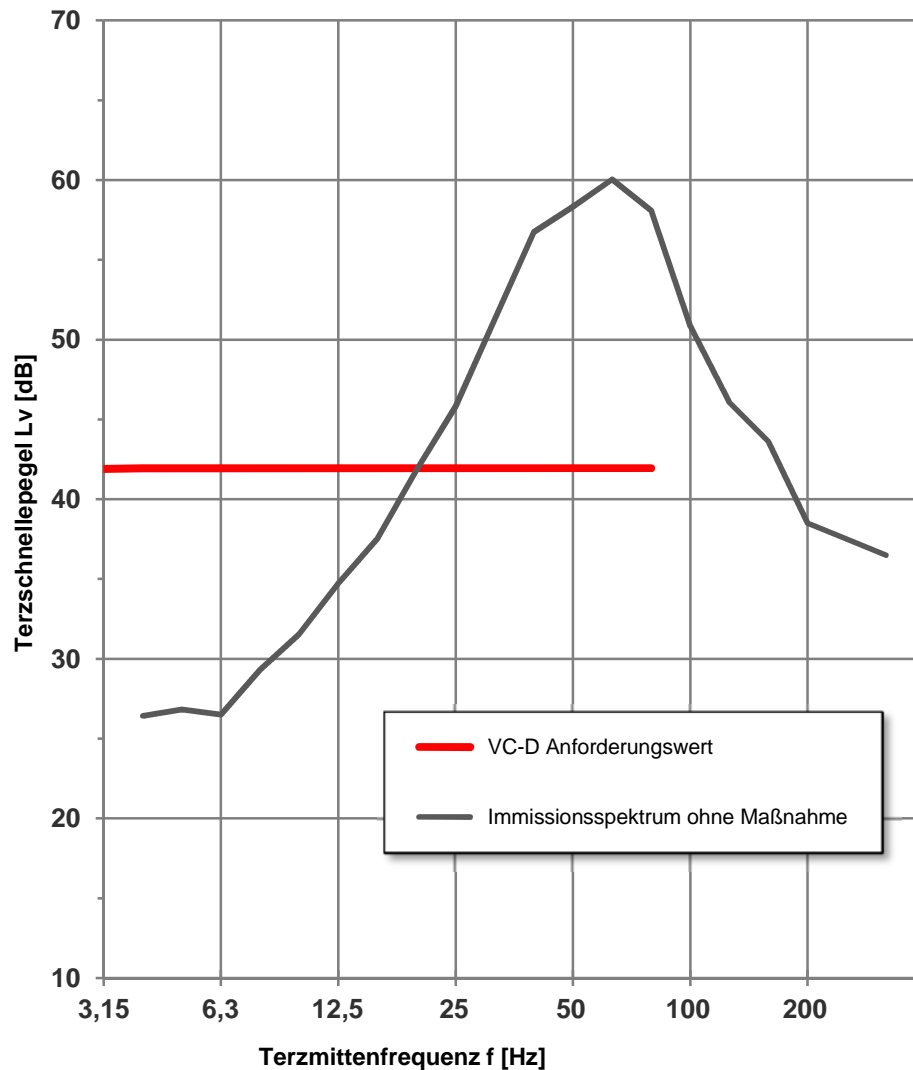
**Gerät:** A-REM - Elektronenrastermikroskop

**Anforderung:** VC-D nach VDI 2038, Blatt 2

Schwingungspegel RMS-Terzspektren  
von (1 ... 80) Hz

$v = 6,25 \mu\text{m/s} = 0,00625 \text{ mm/s}$

$L_v = 41,9 \text{ dB}$



$L_v$ [dB]	$f$ [Hz]
26,4	4
26,8	5
26,5	6,3
29,3	8
31,6	10
34,7	12,5
37,5	16
41,8	20
45,8	25
51,3	31,5
56,7	40
58,3	50
60,0	63
58,1	80
50,8	100
46,1	125
43,6	160
38,5	200
37,5	250
36,5	315
65,1	$\Sigma$

# Einwirkungen schwingungssensible Geräte ohne Maßnahme

X:\Projekte2\2014\14237-VVSE-Mailänder-Straßenbahn Campus Lichtwiese\C-Bearbeitung\B-Erschütterungen\B-Prognose\Einwirkungen sensible Geräte.xlsx\Belastung-L5-06

**Gebäude L5/06:** Franziska-Braun-Straße 3, Bauingenieurwesen Institutsgebäude 2

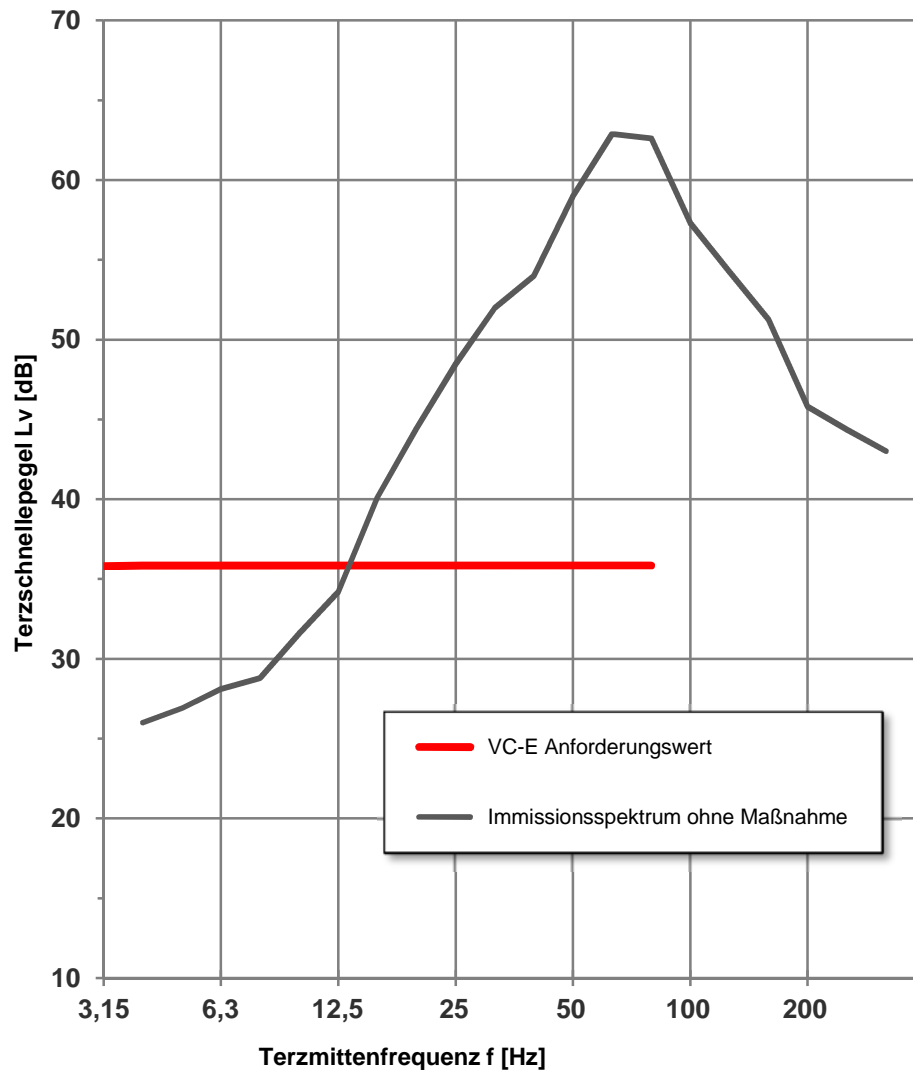
**Gerät:** Universal Surface Tester (UST)

**Anforderung:** VC-E nach VDI 2038, Blatt 2

Schwingungspegel RMS-Terzspektren  
von (1 ... 80) Hz

$v = 3,1 \mu\text{m/s} = 0,0031 \text{ mm/s}$

$L_v = 35,8 \text{ dB}$



$L_v$ [dB]	$f$ [Hz]
26,0	4
26,9	5
28,1	6,3
28,8	8
31,6	10
34,2	12,5
40,1	16
44,4	20
48,5	25
52,0	31,5
54,0	40
59,0	50
62,9	63
62,6	80
57,3	100
54,2	125
51,3	160
45,8	200
44,4	250
43,0	315
67,9	$\Sigma$

# Einfügedämmung

Elastische Schutzmaßnahme -  $f_0 = 25 \text{ Hz}$

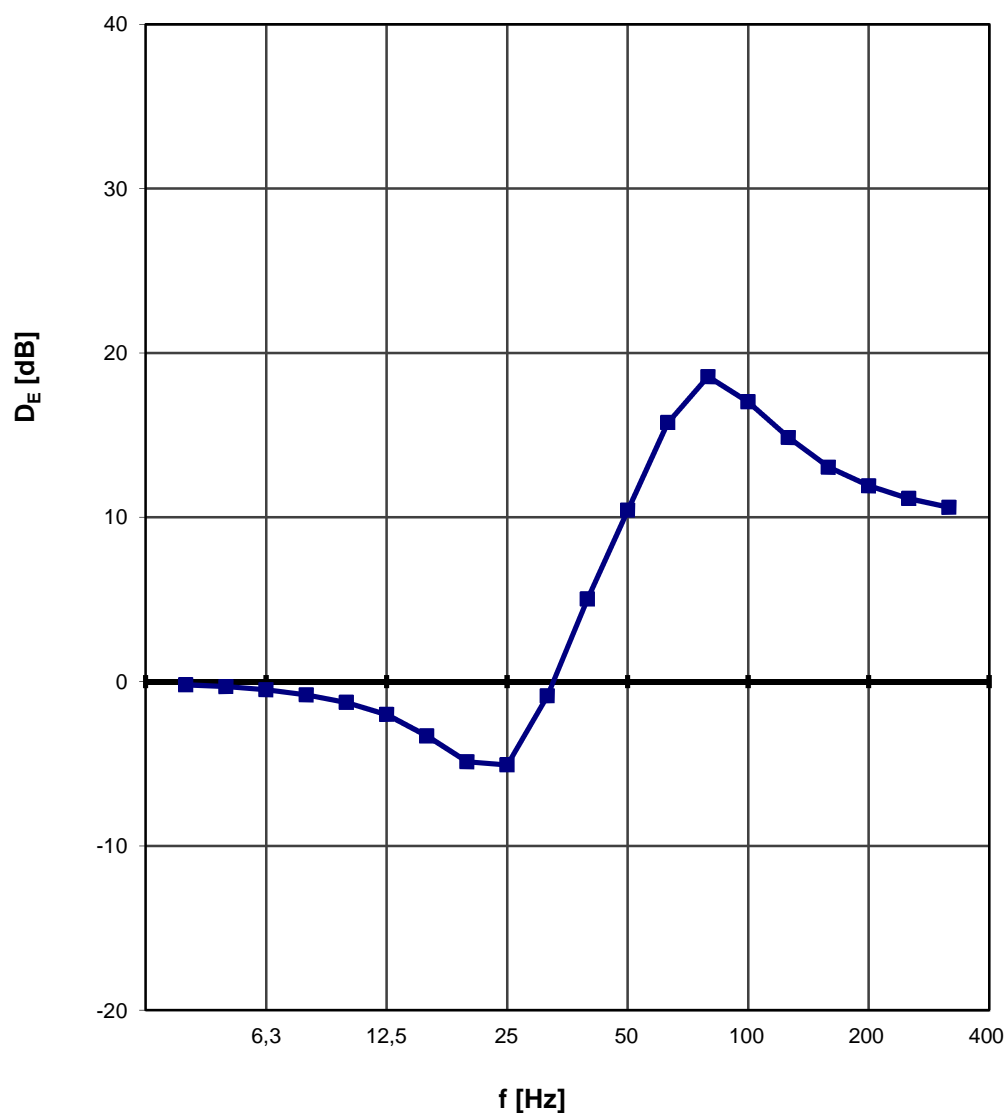
X:\Projekte2\2014\14237-VVSE-Mailänder-Straßenbahn Campus Lichtwiese\C-Bearbeitung\B-Erschütterungen\B-Prognose\Anhang 6 Elas Schutzmaßnahme-LMFS-25 Hz.xls

**Projekt:** Neubau Straßenbahn Campus Lichtwiese

**Bereich:** Gleisdreieck Nieder-Ramstädter-Straße

**Eigenfrequenz  $f_0$  :** 25 Hz

**Dämpfung D:** 0,3



$D_E$ [dB]	$f$ [Hz]
-0,2	4
-0,3	5
-0,5	6,3
-0,8	8
-1,3	10
-2,0	12,5
-3,3	16
-4,9	20
-5,1	25
-0,9	31,5
5,0	40
10,4	50
15,8	63
18,6	80
17,0	100
14,8	125
13,0	160
11,9	200
11,1	250
10,6	315

# Einfügedämmung

## Elastische Schutzmaßnahme - $f_0 = 8$ Hz

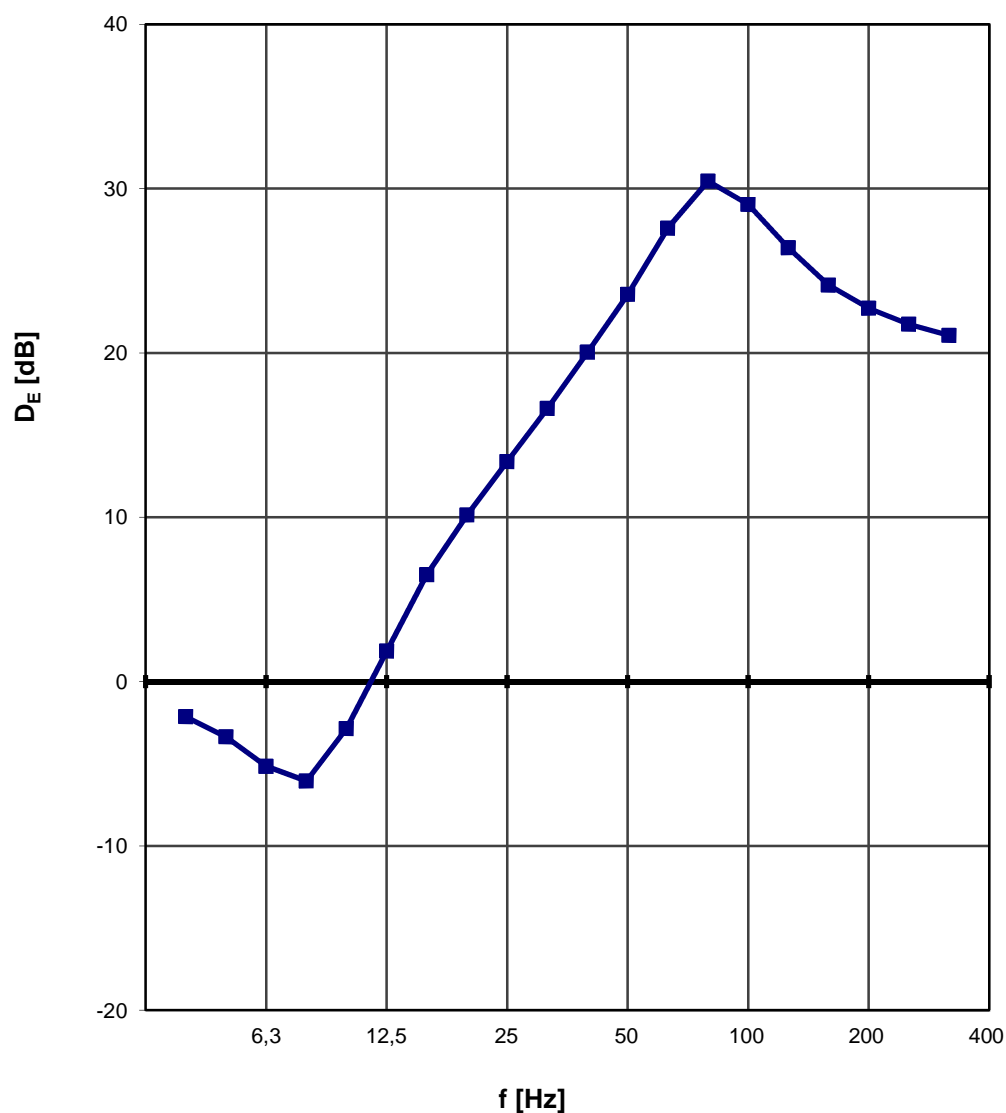
X:\Projekte\2014\14237-VVSE-Mailänder-Straßenbahn Campus Lichtwiese\C-Bearbeitung\B-Erschütterungen\B-Prognose\Anhang 6 Elas Schutzmaßnahme-LMFS-25 Hz.xls

**Projekt:** Neubau Straßenbahn Campus Lichtwiese

**Bereich:** Campus Lichtwiese Bereich Gebäude L5-01 und L5-06

**Eigenfrequenz  $f_0$  :** 8 Hz

**Dämpfung D:** 0,3



$D_E$ [dB]	$f$ [Hz]
-2,1	4
-3,4	5
-5,2	6,3
-6,1	8
-2,9	10
1,9	12,5
6,5	16
10,1	20
13,4	25
16,6	31,5
20,0	40
23,5	50
27,6	63
30,5	80
29,0	100
26,4	125
24,1	160
22,7	200
21,7	250
21,1	315

### Einwirkungsmatrix - Kurvenbereich - $v = 15 \text{ km/h}$ - mit Maßnahme

Beurteilungsschwingstärken  $KB_{FTr}$  in Abhängigkeit des Gleisabstandes und maßgeblichen Deckeneigenfrequenzen von Gebäuden.

Berechnungsergebnisse für Gebäude im Allgemeinen Wohngebiet (WA)

Abstand r [m]	Deckeneigenfrequenzen [Hz]									
	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80
1	0,078	0,101	0,134	0,186	0,241	0,249	0,229	0,184	0,146	0,115
2	0,063	0,082	0,108	0,150	0,194	0,201	0,184	0,148	0,117	0,091
3	0,056	0,072	0,095	0,131	0,171	0,176	0,161	0,129	0,102	0,080
4	0,051	0,065	0,086	0,120	0,155	0,160	0,146	0,117	0,092	0,072
5	0,047	0,061	0,080	0,111	0,144	0,148	0,135	0,108	0,085	0,066
6	0,044	0,057	0,075	0,104	0,135	0,139	0,126	0,101	0,079	0,061
7	0,042	0,054	0,071	0,099	0,128	0,131	0,119	0,095	0,074	0,057
8	0,040	0,051	0,068	0,094	0,122	0,125	0,113	0,090	0,070	0,054
9	0,038	0,049	0,065	0,090	0,117	0,119	0,108	0,086	0,067	0,051
10	0,037	0,047	0,063	0,087	0,112	0,115	0,104	0,082	0,064	0,049
11	0,035	0,046	0,061	0,084	0,108	0,110	0,100	0,079	0,061	0,047
12	0,034	0,044	0,059	0,081	0,105	0,107	0,096	0,076	0,059	0,045
13	0,033	0,043	0,057	0,079	0,101	0,103	0,093	0,073	0,056	0,043
14	0,000	0,042	0,055	0,076	0,098	0,100	0,090	0,071	0,054	0,041
15	0,000	0,040	0,054	0,074	0,095	0,097	0,087	0,068	0,052	0,040
16	0,000	0,039	0,052	0,072	0,093	0,094	0,084	0,066	0,051	0,038
17	0,000	0,038	0,051	0,070	0,090	0,092	0,082	0,064	0,049	0,037
20	0,000	0,036	0,047	0,066	0,084	0,085	0,075	0,059	0,045	0,034
24	0,000	0,000	0,044	0,060	0,077	0,077	0,068	0,053	0,040	0,000
27	0,000	0,000	0,041	0,057	0,073	0,073	0,064	0,049	0,037	0,000

**r** Abstand zur nächstgelegenen Gleisachse [m]



Der Beurteilungsanhaltswert  $A_r$  für Allgemeine Wohngebiete wird maximal zu 2/3 ausgeschöpft, die Anforderungen der DIN 4150-2 sind erfüllt.



Der Beurteilungsanhaltswert  $A_r$  für Allgemeine Wohngebiete wird eingehalten oder unterschritten, die Anforderungen der DIN 4150-2 sind erfüllt.



Der Beurteilungsanhaltswert  $A_r$  für Allgemeine Wohngebiete wird überschritten, die Anforderungen der DIN 4150-2 sind nicht eingehalten.

**Maßnahme:** Leichtes-Masse-Feder-System  $f_0 = 25 \text{ Hz}$

# Einwirkungen schwingungssensible Geräte mit Masse-Feder-System $f_0 = 8 \text{ Hz}$

X:\Projekte2\2014\14237-VVSE-Mailänder-Straßenbahn Campus Lichtwiese\C-Bearbeitung\B-Erschütterungen\B-Prognose\Einwirkungen sensible Geräte.xlsx\Belastungmit-L5-01

**Gebäude L5/01:** Franziska-Braun-Straße 7, Bauingenieurwesen Institutsgebäude 1

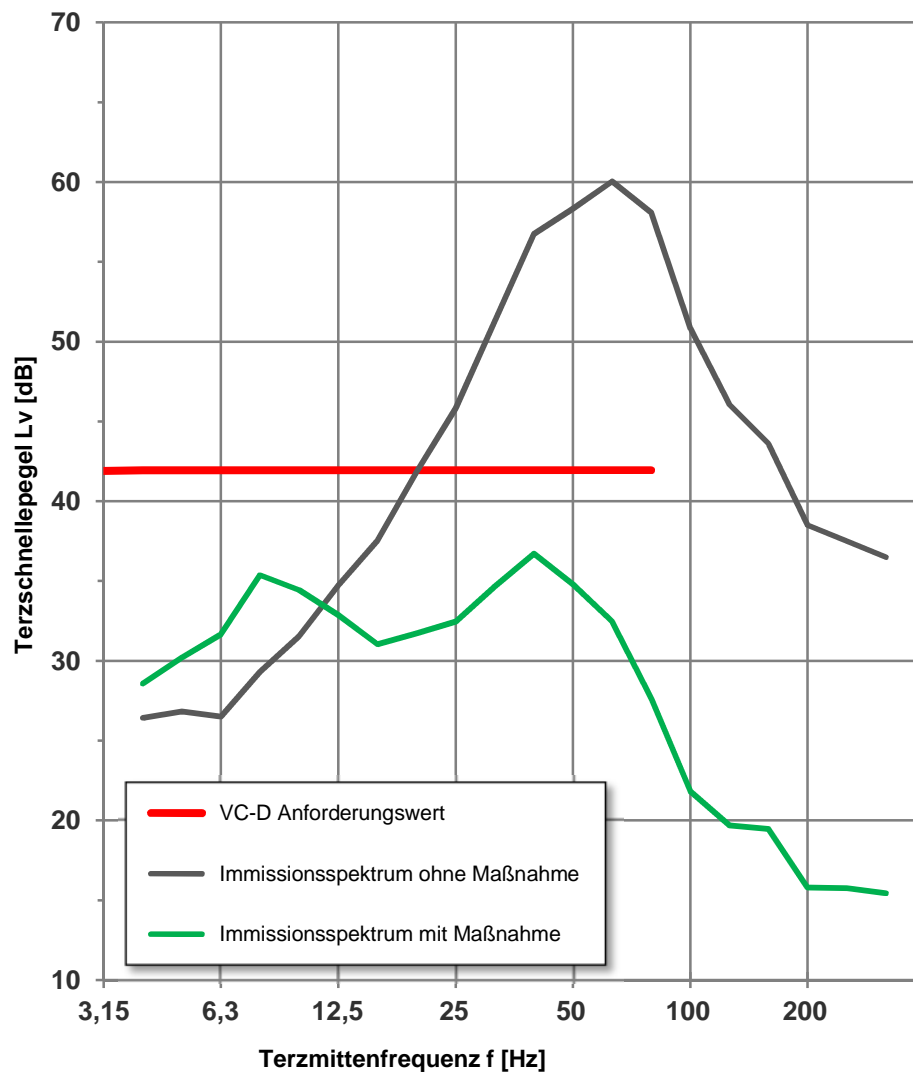
**Gerät:** A-REM - Elektronenrastermikroskop

**Anforderung:** VC-D nach VDI 2038, Blatt 2

Schwingungspegel RMS-Terzspektren  
von (1 ... 80) Hz

$v = 6,25 \text{ } \mu\text{m/s} = 0,00625 \text{ mm/s}$

$L_v = 41,9 \text{ dB}$



$L_v$ [dB]	$f$ [Hz]
28,6	4
30,2	5
31,7	6,3
35,4	8
34,4	10
32,9	12,5
31,0	16
31,7	20
32,5	25
34,7	31,5
36,7	40
34,8	50
32,5	63
27,6	80
21,8	100
19,7	125
19,5	160
15,8	200
15,8	250
15,4	315
44,7	$\Sigma$

# Einwirkungen schwingungssensible Geräte mit Masse-Feder-System $f_0 = 8 \text{ Hz}$

X:\Projekte2\2014\14237-VVSE-Mailänder-Straßenbahn Campus Lichtwiese\C-Bearbeitung\B-Erschütterungen\B-Prognose\Einwirkungen sensible Geräte.xlsx\Belastung mit L5-06

**Gebäude L5/01:** Franziska-Braun-Straße 7, Bauingenieurwesen Institutsgebäude 1

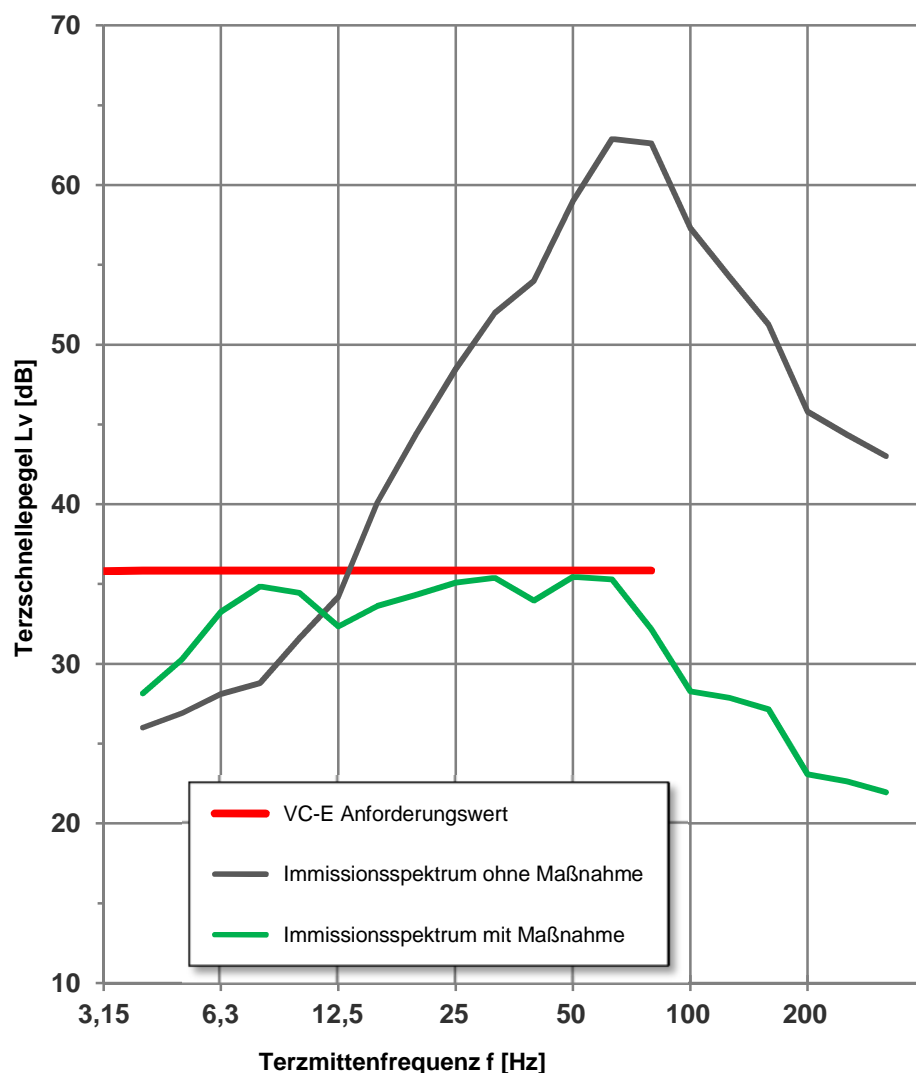
**Gerät:** Universal Surface Tester (UST)

**Anforderung:** VC-E nach VDI 2038, Blatt 2

Schwingungspegel RMS-Terzspektren  
von (1 ... 80) Hz

$v = 3,1 \text{ mm/s} = 0,0031 \text{ mm/s}$

$L_v = 35,8 \text{ dB}$



$L_v$ [dB]	$f$ [Hz]
28,1	4
30,3	5
33,3	6,3
34,9	8
34,5	10
32,3	12,5
33,6	16
34,3	20
35,1	25
35,4	31,5
34,0	40
35,5	50
35,3	63
32,2	80
28,3	100
27,9	125
27,1	160
23,1	200
22,6	250
22,0	315
45,6	$\Sigma$