

Mess-Stelle nach §§ 29b BImSchG

Dipl.-Ing. Thomas Hoppe
ö.b.v. Sachverständiger für
Schallimmissionsschutz Ingenieurkammer
Niedersachsen

Dipl.-Phys. Michael Krause
ö.b.v. Sachverständiger
für Wirkungen von Erschütterungen auf Gebäude
Ingenieurkammer Niedersachsen

Dipl.-Geogr. Waldemar Meyer

Dipl.-Ing. Clemens Zollmann

ö.b.v. Sachverständiger für Lärmschutz
Ingenieurkammer Niedersachsen

Dipl.-Ing. Manfred Bonk ^{bis 1995}

Dr.-Ing. Wolf Maire ^{bis 2006}

Dr. rer. nat. Gerke Hoppmann ^{bis 2013}

Rostocker Straße 22
30823 Garbsen
05137/8895-0, -95

Bearbeiter: Dipl.-Phys. M. Krause
Durchwahl: 05137/8895-23
m.krause@bonk-maire-hoppmann.de

15.10.2018

- 18165 -

Erschütterungstechnische Stellungnahme

zum Neubau eines Gymnasiums in Langenhagen

Inhaltsverzeichnis	Seite
Anlagenverzeichnis	3
Liste der verwendeten Abkürzungen und Ausdrücke	4
1. Auftraggeber	5
2. Aufgabenstellung	5
3. Grundlagen	6
4. Beurteilung Erschütterungen und sekundärer Luftschall	8
4.1 Mess- und Beurteilungsverfahren nach DIN 4150 Teil 2 (Einwirkung auf Menschen in Gebäuden)	8
4.2 Anforderungen sekundärer Luftschall	11
5. Anforderungen Erschütterungen und sekundärer Luftschall	12
5.1 Anforderungen Erschütterungen	12
5.2 Anforderungen sekundärer Luftschall	12
6. Prognose Erschütterung und sekundärer Luftschall	12
7. Ergebnisse der Prognoseberechnung und Beurteilung	16
8. Zusammenfassung und Hinweise für die weitere Planung	19
Quellen, Richtlinien, Verordnungen	21

Dieses Gutachten umfasst:

21 Seiten Text

Datei:18165_ga_gymnasium_langenhagen.doc, Autor: Dipl.-Phys. M. Krause

Anlagenverzeichnis

Anlage D	Exemplarische Darstellung Prognoseberechnung Stadtbahn TW2000 50 km/h, Holzbalkendecke, Gebäude nicht unterkellert Eigenfrequenz 20 Hz, Abstand 9 m
Anlage P	Berechnung der Beurteilungsschwingstärke für einen Abstand von 9 m, für Holzbalkendecke
Anlage P.1	Berechnung der Beurteilungsschwingstärke für einen Abstand von 9 m, für Betondecke
Anlage P.2	Berechnung der Beurteilungsschwingstärke für einen Abstand von 11 m, für Holzbalkendecke

Liste der verwendeten Abkürzungen und Ausdrücke

Zeichen	Einheit	Bedeutung
A_o, A_u, A_r	-	Anhaltswerte DIN 4150, Teil 2
KB_{Fmax}		Die maximale bewertete Schwingstärke KB_{Fmax} ist nach DIN 4150, Teil 2 der Maximalwert von $KB_F(t)$ der während der jeweiligen Beurteilungszeit auftritt und der zu untersuchenden Ursache zuzuordnen ist
KB_{FTi}		Die Messzeit wird nach DIN 4150, Teil 2 in Takte von je $T = 30 \text{ sec}$ eingeteilt. Jedem dieser Takte wird der darin erreichte Maximalwert der bewerteten Schwingstärke $KB_F(t)$ zugeordnet, im folgenden bezeichnet als KB_{FTi} . Der Index i nummeriert die Takte
KB_{FTr}		Der Wert für die Beurteilungs-Schwingstärke ist nach DIN 4150, Teil 2 ist der Taktmaximal-Effektivwert über die Beurteilungszeit
KB_{FTm}		Quadratischer Mittelwert über die Taktmaximalwert KB_{FTi}
$KB_{F(t)}$		Die bewertete Schwingstärke $KB_F(t)$ nach DIN 4150, Teil 2 ist der gleitende Effektivwert mit der Zeitbewertung „Fast“ des frequenzbewerteten Erschütterungssignals
L_v	dB	Körperschallschnellepegel
$L_v(f)$	dB	Spektraler Körperschallschnellepegel
MP	-	Messpunkt
N_t	-	Anzahl Zugvorbeifahrten tags
N_n	-	Anzahl Zugvorbeifahrten nachts
v	km/h	Zuggeschwindigkeit
$v(f)$	mm/s	Effektivwert der Schwingschnelle, spektral
v_e	mm/s	Effektivwert der Schwingschnelle
v_o	mm/s	Bezugsschnelle
$L_{sek-Zug;A}$	dB(A)	Sekundärer Luftschallpegel in dB(A) der Zugklasse
$L_m \text{-Tag}$	dB(A)	Beurteilungspegel sekundärer Luftschall Tag
$L_m \text{-Nacht}$	dB(A)	Beurteilungspegel sekundärer Luftschall Nacht
L_{Amax}	dB(A)	mittlerer Maximalpegel

Vorgesehen ist ein nichtunterkellertes dreigeschossiges Gebäude in Holzhybridbauweise. Der Minimalabstand der vorgesehenen Baugrenze zu dem nächstgelegenen Gleis der geplanten Stadtbahnlinie beträgt ca. 9 m.

Im Rahmen der vorliegenden erschütterungstechnischen Stellungnahme ist damit zu prüfen, ob die Anforderungen der DIN 4150, Teil 2 (Einwirkung von Erschütterungen auf Menschen in Gebäuden) im Bereich des geplanten Gymnasiums unter Berücksichtigung der Erschütterungen aus dem Stadtbahnbetrieb für die vorgesehene Planung eingehalten werden. Dabei wird auch die Einwirkung des sekundären Luftschalls ermittelt und beurteilt.

Auf Grundlage der Ergebnisse von Emissionsmessungen im Bereich der Stadtbahn Hannover, die im Auftrag der INFRA durchgeführt wurden, werden die zu erwartenden Erschütterungsimmissionen sowie der sekundäre Luftschall für die geplanten Bauvorhaben prognostiziert. Die Beurteilung wird für die Einwirkung von Erschütterungen auf den Menschen auf Grundlage der DIN 4150, Teil 2 „Erschütterungen im Bauwesen; Einwirkung auf den Menschen im Gebäude“ für Erschütterung vorgenommen. Der sekundären Luftschall wird in Anlehnung an die VDI-2719¹ beurteilt.

In der nachfolgenden Stellungnahme wird nur auf das dreigeschossige Schulgebäude Bezug genommen. Eine Betrachtung der Sporthalle erfolgt nicht, da hier bedingt durch die Nutzung kein störender Einfluss aus dem Betrieb der Stadtbahn erwarten ist.

Eine mögliche Einwirkung von Erschütterungen auf die bauliche Substanz des geplanten Gebäudes kann bei Erschütterungen aus dem Stadtbahnbetrieb ausgeschlossen werden.

3. Grundlagen

Bei der Bewegung von Schienenfahrzeugen auf den Gleisanlagen werden zeitlich veränderliche Kräfte auf die Fahrweggründung übertragen und in den Boden eingeleitet. Dabei werden im Bereich der Fahrweggründung Schwingungen emittiert, die sich dann im Boden ausbreiten. Die Ausbreitung ist abhängig von der Bodenbeschaffenheit, Quellengeometrie und der Frequenz der Schwingungen,

¹ VDI-Richtlinie 2719 *Schalldämmung von Fenstern und deren Zusatzeinrichtungen* (8/87)

diese klingen mit zunehmendem Abstand von der Quelle ab.

Die Bodenschwingungen werden auf Gebäude in Fahrwegnähe übertragen (Schwingungsimmissionen) und als Erschütterungen bezeichnet. Zunächst werden die Erschütterungen vom Baugrund auf das Fundament übertragen. Dabei werden sie abgeschwächt. Maßgebend für die Einwirkung von Erschütterungen ist dann der weitere Übergang auf die Geschossdecken, bei dem die Erschütterungen gegenüber dem Fundament und dem Baugrund i.d.R. in einem hohen Maße verstärkt werden. Das Maß, mit dem die Schwingungen in ein Gebäude übertragen werden, ist stark abhängig von dessen Bauweise. Hier sind insbesondere die schwingungstechnischen Eigenschaften der Gebäudedecken in Bezug auf deren Eigenfrequenz und Dämpfung entscheidend. Diese sind in einem hohen Maße von der Bauweise (z.B. Beton oder Holzbalkendecke), der Deckenstärke, den geometrischen Ausmaßen und den Auflagerbedingungen abhängig.

Unter Körperschall versteht man generell mechanische Schwingungen, die sich in einem festen Medium oder an dessen Oberfläche ausbreiten. Erschütterungen fallen in die Kategorie des tieffrequenten Körperschalls, den der Mensch mit seinem ganzen Körper wahrnehmen kann. Der Frequenzbereich der wahrnehmbaren Erschütterungen erstreckt sich von 4 Hz bis etwa 80 Hz.

Mit den Erschütterungen bzw. dem Körperschall ist auch immer die Entstehung von sekundären Luftschall verbunden. Als sekundären Luftschall bezeichnet man den Schall der von den schwingenden Wänden, Decke und Fußboden des Raumes abgestrahlt wird. Im Gegensatz zum primären Luftschall der durch die Fenster in die Räume abgestrahlt wird kann der sekundäre Luftschall nicht geortet werden und wird daher in seiner Wirkung oft als unangenehmer empfunden. Während beim primären Luftschall nachträglich eine Minderung z.B. durch Einbau anderer Fenster möglich ist, gibt es beim sekundären Luftschall keine vergleichbaren Möglichkeiten zur Minderung. Hier kommen bei Neubauten nur schwingungsisolierende Maßnahmen im Bereich der Gründung in Frage.

Als Maß für die Stärke der Schwingungen dient nachfolgend die Schwinggeschwindigkeit (auch als Körperschallschnelle bezeichnet) mit der Einheit [mm/s].

Zur Bewertung von Erschütterungen, insbesondere hinsichtlich ihrer Wirkungen auf den Menschen, werden diese in sogenannte KB-Schwingstärken ausgedrückt. Dazu wird das Zeitsignal der Schwinggeschwindigkeit bandbegrenzt und eine Frequenzbewertung (KB-Filterung) zur Berücksichtigung der frequenzabhängigen menschlichen Wahrnehmungsstärke durchgeführt. Aus der weiteren Berechnung des gleitenden Effektivwertes mit der Zeitbewertung „FAST“ errechnet sich die bewertete Schwingstärke $KB_{F(t)}$; der während einer Messung bestimmte höchste KB-Wert wird als maximale bewertete Schwingstärke KB_{Fmax} bezeichnet. Dieser Wert ist neben der Beurteilungs-Schwingstärke die maßgebliche Beurteilungsgrundlage.

Bei der Beurteilungs-Schwingstärke KB_{FTr} handelt es sich um einen zeitlichen Mittelwert analog dem Beurteilungspegel zur Bewertung von Schallimmissionen. Während für die Berechnung der Schallemission und -ausbreitung ein verallgemeinertes Rechenmodell vorhanden ist, sind die Gesetzmäßigkeiten bei der Entstehung, Ausbreitung und Wirkung der Erschütterungen so vielgestaltig, dass ein verbindliches Berechnungsmodell nicht existiert. Daher sind Erschütterungsmessungen erforderlich, um bestimmte Zusammenhänge der Ausbreitung im Boden und in den Gebäuden genauer beschreiben zu können. Unter Berücksichtigung der vorgenannten messtechnisch bestimmten Parameter kann dann eine Erschütterungsprognose erstellt werden.

4. Beurteilung Erschütterungen und sekundärer Luftschall

4.1 Mess- und Beurteilungsverfahren nach DIN 4150 Teil 2 (Einwirkung auf Menschen in Gebäuden)

Nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz können grundsätzlich Immissionen durch Erschütterungen schädliche Umwelteinwirkungen hervorrufen. Gesetzliche Regelungen für die Beurteilung von Erschütterungsimmissionen gibt es dagegen noch nicht. Das Regelungsdefizit begründet sich in der Verordnungsermächtigung des § 43 Abs. 1 BImSchG in dem Erschütterungen nicht angesprochen sind.

Aufgrund fehlender gesetzlicher Grenzwerte gilt die DIN 4150, Teil 2, "Erschütterungen im Bauwesen, Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden" als Äußerung einschlägigen Sachwissens und als geeignete, wenn auch unverbindliche Grundlage für die Beurteilung von Erschütterungsimmissionen.

Dieses Normblatt nennt für Erschütterungsimmissionen Anhaltswerte, bei deren Einhaltung nicht mit erheblichen Belästigungen zu rechnen ist. Die DIN 4150-2 vom Juni 1999 stellt hierzu den aktuellen Kenntnisstand dar.

Nachfolgende **Tabelle 1** enthält Anhaltswerte A der bewerteten Schwingstärke KB_F , zur Beurteilung von Erschütterungsimmissionen in Wohnungen und vergleichbar genutzten Räumen. Sie beziehen sich wie folgt auf die beiden Beurteilungsgrößen:

- KB_{Fmax} - die maximale bewertete Schwingstärke,
- KB_{FTr} - die Beurteilungs-Schwingstärke, siehe unten.

Tabelle 1:

Anhaltswerte A für die Beurteilung von Erschütterungsimmissionen in Wohnungen und vergleichbar genutzten Räumen aus der DIN 4150 T 2

Zeile	Einwirkungsort	tags			nachts		
		A_u	A_o	A_r	A_u	A_o	A_r
1	Einwirkungsorte, in deren Umgebung nur gewerbliche Anlagen und ggf. ausnahmsweise Wohnungen für Inhaber und Leiter der Betriebe sowie für Aufsichts- und Bereitschaftspersonen untergebracht sind (vgl. Industriegebiete § 9 BauNVO).	0.4	6	0.2	0.3	0.6	0.15
2	Einwirkungsorte, in deren Umgebung vorwiegend gewerbliche Anlagen untergebracht sind (vgl. Gewerbegebiete § 8 BauNVO).	0.3	6	0.15	0.2	0.4	0.1
3	Einwirkungsorte, in deren Umgebung weder vorwiegend gewerbliche Anlagen noch vorwiegend Wohnungen untergebracht sind (vgl. Kerngebiete § 7 BauNVO, Mischgebiete § 6 BauNVO, Dorfgebiete § 5 BauNVO).	0.2	5	0.1	0.15	0.3	0.07
4	Einwirkungsorte, in deren Umgebung vorwiegend oder ausschließlich Wohnungen untergebracht sind (vgl. reines Wohngebiet § 3 BauNVO, allgemeines Wohngebiete § 4 BauNVO, Kleinsiedlungsgebiete § 2 BauNVO).	0.15	3	0.07	0.1	0.2	0.05
5	Besonders schutzbedürftige Einwirkungsorte, z.B. in Krankenhäusern, Kurkliniken, soweit sie in dafür ausgewiesenen Sondergebieten liegen.	0.1	3	0.05	0.1	0.15	0.05

In Klammern sind jeweils die Gebiete der Baunutzungsverordnung - BauNVO angegeben, die in der Regel den Kennzeichnungen unter Zeile 1 bis 4 entsprechen. Eine schematische Gleichsetzung ist jedoch nicht möglich, da die Kennzeichnung ausschließlich nach dem Gesichtspunkt der Schutzbedürftigkeit gegen Erschütterungseinwirkung vorgenommen ist, die Gebietseinteilung in der BauNVO aber auch anderen planerischen Erfordernissen Rechnung trägt.

Die in der Tabelle 1 der DIN 4150, Teil 2, enthaltenen Zahlenwerte werden wie bereits erwähnt als „Anhaltswerte“ bezeichnet. Damit wird klargestellt, dass es sich bei diesen Werten um empfohlene Werte und nicht um gesicherte Grenzwerte handelt. Bei Einhaltung der Anhaltswerte können erhebliche Belästigungen der in den Gebäuden lebenden Menschen im Allgemeinen ausgeschlossen werden.

Die beiden Beurteilungsgrößen sind in der Regel getrennt für die drei Richtungskomponenten x, y (horizontal) und z (vertikal) zu ermitteln, wobei die jeweils größte der drei der Beurteilung zugrunde zulegen ist. In Räumen von Wohnungen wird jedoch im Allgemeinen nur die vertikale Komponente gemessen und ausgewertet, da diese bei Deckenschwingungen i.d.R. die größte ist.

Da hier die Erschütterungen aus der Stadtbahn in der Beurteilung berücksichtigt werden, sind die Sonderregelungen zur Beurteilung des Schienenverkehrs bei deren Beurteilung zu beachten. Danach erfolgt die Beurteilung ausschließlich anhand der Kriterien A_u (für KB_{Fmax}) und A_r (für KB_{FTr}). Dies gilt insbesondere für neu zu bauende Strecken und bei städtebaulichen Planungen. Die (oberen) Anhaltswerte A_o erhalten beim Schienenverkehr eine andere Bedeutung als in der übrigen Norm. Für den Schienenverkehr hat der obere Anhaltswert A_o für den Nachtzeitraum dabei nicht die Bedeutung, dass bei dessen seltener Überschreitung die Anforderungen der Norm als nicht eingehalten anzusehen sind. Für oberirdisch geführte Schienenverkehrswege gilt nachts:

$$A_o = 0.6 \text{ (gebietsunabhängig).}$$

Liegen jedoch nachts einzelne KB_{Fmax} - Werte über $A_o = 0.6$, so sind die Ursachen zu erforschen. Diese hohen KB_{Fmax} - Werte sind bei der Berechnung der Beurteilungs-Schwingstärke KB_{FTr} mit zu berücksichtigen.

Bei der Berechnung der Beurteilungs-Schwingstärke KB_{FTr} für den Schienenverkehr werden die Zuschläge für Ruhezeiten nicht angewandt.

Zur Beurteilung der KB-Werte ist die maximale bewertete Schwingstärke KB_{Fmax} mit den Anhaltswerten A_u (unterer Anhaltswert) und A_r für neu zu bauende Bahnanlagen und städtebauliche Planungen nach der folgenden Methodik zu vergleichen:

- ist $KB_{Fmax} \leq A_u$, so ist die Anforderung der Norm eingehalten,
- Für häufigere Einwirkungen (und hierzu zählt in der Regel Schienenverkehr), bei denen KB_{Fmax} größer als A_u ist, ist ein weiterer Prüfschritt für die Entscheidung erforderlich, nämlich die Bestimmung der Beurteilungs-Schwingstärke KB_{FTr} . Ist KB_{FTr} nicht größer als der Anhaltswert A_r nach Tabelle 1 der DIN-Norm 4150, Teil 2, sind die

Anforderungen der Norm ebenfalls eingehalten.

Das A_r -Kriterium dient einer angemessenen Beurteilung von häufig, aber unregelmäßig wiederkehrenden Erschütterungen; es entspricht dem Grundgedanken des Mittelungspegels beim Schall.

4.2 Anforderungen sekundärer Luftschall

Das in der 16. BImSchV (Anlage 2 zu § 3) festgelegte Verfahren zur Ermittlung und Berechnung des Beurteilungspegels stellt allein auf den primären Luftschall ab. Entsprechende gesetzliche und normative Festlegungen zum sekundären Luftschall liegen derzeit nicht vor.

Einen Anhaltspunkt zur Beurteilung der Immissionen des sekundären Luftschalls bietet hier die VDI-2719². Danach sind für die möglicherweise vorgesehenen Nutzungen folgende Anhaltswerte für den Beurteilungspegel $L_{A,m}$ und den mittleren Maximalpegel L_{Amax} vorgesehen:

Tabelle 2:

Zulässige Innenpegel sekundärer Luftschall in Anlehnung an die VDI 2719 in dB (A)

Raumnutzung	Beurteilungspegel $L_{A,m}$	mittlerer Maximalpegel L_{Amax}
Räume, die überwiegend zum Schlafen genutzt werden	30	40
Wohnräume	40	50
Behandlungs- und Untersuchungsräume im Arztpraxen, Operationsräume, wissenschaftliche Arbeitsräume, Leseräume in Bibliotheken, Unterrichtsräume	40	50
Konferenz- und Vortragsräume, Büroräume, allgemeine Laborräume	45	55

² VDI-Richtlinie 2719 *Schalldämmung von Fenstern und deren Zusatzeinrichtungen* (8/87)

5. Anforderungen Erschütterungen und sekundärer Luftschall

5.1 Anforderungen Erschütterungen

Bei der Einwirkung von Erschütterungen werden hinsichtlich der Einwirkung von Erschütterungen die Anhaltswerte nach Zeile 4 der Tabelle 1 der DIN 4150, Teil 2 für die Gebietsausweisung WA, die der vorgesehenen Nutzung als Unterrichtsraum am besten entspricht zu Grunde gelegt. Die Sonderregelungen für den ÖPNV mit den um einen Faktor von 1.5 angehobenen Anhaltswerten werden gemäß Abs. 6.5.3.3 der DIN 4150 Teil 2 nicht berücksichtigt.

Tabelle 3: Anforderungsprofil Erschütterungen.

Anforderungen	DIN 4150, Teil 2
WA	Beurteilung nach Zeile 4 Tabelle 1 (WA): tags: $A_u = 0.15, A_r = 0.07$

5.2 Anforderungen sekundärer Luftschall

Bei der Beurteilung werden entsprechend den möglichen Nutzungen die Pegel Tags nach Tabelle 2 für Unterrichtsräume zu Grunde gelegt.

6. Prognose Erschütterung und sekundärer Luftschall

Ziel der Erschütterungsprognose ist die Ermittlung der in der geplanten Wohnbebauung zu erwartenden Erschütterungsimmissionen und des damit verbundenen sekundären Luftschalls aus dem Stadtbahnbetrieb.

Die Werte für die zu erwartenden Erschütterungsimmissionen werden rechnerisch auf Basis der prognostizierten Immissionsspektren der Schwinggeschwindigkeit ermittelt. Ausgewertet wird der Frequenzbereich von 4 – 250 Hz.

Bei der hier durchgeführten Erschütterungsprognose werden Messergebnisse rechnerisch verarbeitet. Das schwingungstechnische Gesamtsystem von der Erschütterungsquelle bis zum Immissionsort wird dabei in mehrere entkoppelte Teilsysteme unterteilt:

- a. Emissionsquelle (Oberbau/Fahrzeug) mit der Ankopplung an den Erdboden;
- b. Ausbreitung der Erschütterungen im Erdboden bis vor das Gebäude;
- c. Übergang der Erschütterungen vom Erdboden auf das Gebäudefundament;
- d. Übergang der Erschütterungen vom Gebäudefundament auf die Geschossdecke(n).

Für die Ermittlung der zukünftigen Schwingungsimmissionen sind demnach folgende Kenngrößen erforderlich:

- Das Spektrum der Erschütterungsemissionen der Stadtbahn für die vorgesehene Baureihe TW2000 $v = 50$ km/h (Teilsystem a) wurde für den möglicherweise vorgesehenen Oberbau „Betonlängsbalken mit ZW900“ bei Messungen in Hannover Misburg für die Baureihe TW6000 für eine Geschwindigkeit von 50 km/h für einen Abstand von 8 m zur Gleismitte ermittelt. Das bei der Prognose berücksichtigte Emissionsspektrum ist in der Anlage D dargestellt.
- Angaben zur frequenzabhängigen Pegelabnahme im Boden, die auf zahlreichen Untersuchungen beruhen (Teilsystem b). Diese sind der Richtlinie 820.2050 „Erschütterungen und sekundärer Luftschall“ der DB Netz AG vom September 2017 entnommen. Aus diesen Angaben wurde für die untersuchten Abstände die frequenzabhängige Abnahmefunktion von 8 m auf die untersuchten Abstände ermittelt. In den Diagrammen zur exemplarischen Darstellung der Prognoseberechnung in den Anlagen ist die jeweilige Abnahmefunktionen dargestellt.
- Schwingungsausbreitung im Gebäude:
Statistische Angaben über gebäudespezifische Verstärkungsfaktoren vom freien Gelände auf die zu betrachtende Geschossdecke für Beton- bzw. Holzbalkendecken. Diese sind der 800.2502 „Erschütterungen und sekundärer Luftschall“ der DB Netz AG vom November 2016 entnommen. In gebäudespezifische Verstärkungsfaktoren sind die Teilsysteme c und d enthalten. In den Diagrammen der Anlage D zur exemplarische Darstellung der Prognoseberechnung ist die Übertragungsfunktion für eine Betondecke mit einer Eigenfrequenz von 20 Hz dargestellt. Da die

Übertragungsfunktionen die für unterkellerte Gebäude ermittelt wurden, für nicht unterkellerte Gebäude höher ausfallen, wurden diese entsprechend korrigiert. Grundlage der Korrektur sind eigene Messungen.

Aus der frequenzabhängigen Pegelabnahme im Gelände und den Emissionsspektren wird das für den jeweiligen Abstand zu erwartende Emissionsspektrum im Gelände berechnet. Für jede der in Gebäuden üblichen Terzmittenfrequenzen von 10 Hz bis 40 Hz werden dann die auf der Geschossdecke zu erwartenden spektralen Immissionspegel durch Addition der Übertragungsfaktoren Gelände – Geschossdecke und dem im jeweiligen Abstand zu erwartenden Emissionsspektrum im Gelände berechnet. Aus dem prognostizierten Immissionsspektrum wird durch KB-Bewertung und energetische Addition über die Terzbänder der zu erwartende KB_{Fmax} -Wert für die Vorbeifahrten der Stadtbahn TW2000 berechnet. Die Berechnungen wurden zunächst für den Abstand des Gymnasiums von 9 m durchgeführt. In einem weiteren Schritt wurden für Abstände ab 9 m in jeweils 1 m Schritten weitere Berechnungen durchgeführt. In den Diagrammen der Anlagen D ist die Berechnung für eine Holzbalkendecke mit 20 Hz Eigenfrequenz für den TW2000 mit $v = 50$ km/h für den Abstand von 9 m in graphischer Form beispielhaft dargestellt.

Die Beurteilungsschwingstärke KB_{FTTr} wird für den Stadtbahnverkehr nach folgender Beziehung ermittelt:

$$KB_{FTTr} = \sqrt{\frac{1}{N_r} \cdot \sum_{j=1}^L (M_j \cdot KB_{FTmj}^2)}$$

N_r : Anzahl der 30 – Sekunden – Takte im Beurteilungszeitraum;
tags $N_t = 1920$ Takte
nachts $N_n = 960$ Takte

KB_{FTmj} : Taktmaximal-Effektivwert der Zugklasse j, entspricht dem für die Zugklasse berechneten quadratischen Mittelwert $\langle KB_{Fmax} \rangle$.

M_j : Anzahl der durch die Zugklasse j während der Beurteilungszeit belegten Takte.

L: Anzahl der unterschiedlichen Zugklassen.

Die Angaben zum Betriebsprogramm der Stadtbahn wurden dem Fahrplan 2018 entnommen.

Die Berechnung der Beurteilungsschwingstärke KB_{FTr} aus den prognostizierten Erschütterungswerten wird in der Tabellen der Anlagen P/P.1 für einen Abstand von 9 m für Beton- und Holzbalkendecke, bzw. der Anlage P.2 für 11 m und Holzbalkendecke dargestellt.

Der Tabelle zur Berechnung der Beurteilungsschwingstärke KB_{FTr} sind zu entnehmen:

- Abstand vom nächstgelegenen Gleis für den die Prognose ermittelt wird;
- Die bei der Berechnung der Beurteilungsschwingstärke zugrunde gelegten Zugzahlen für die jeweilige Zugklasse mit Angabe der Geschwindigkeit;
- Für jede Zugklasse (Zugart / Gleis) der aus der Prognoseberechnung ermittelte quadratische Mittelwert (Effektivwert) $\langle KB_{Fmax} \rangle$ für Deckeneigenfrequenzen von 10 Hz – 40 Hz;
- Die Beurteilungsschwingstärke KB_{FTr} ;
- Beurteilung nach DIN 4150, Teil 2 für WA und MI.

Der Pegel des sekundären Luftschalls wird nach dem in der Richtlinie „Erschütterung und Sekundärer Luftschall“ angegebenen Verfahren berechnet.

Als Ausgangsgröße dient der berechnete Körperschall-Schnellepegel L_{v-Zug} für die Zugklasse. Durch A-Bewertung und energetische Addition aller Terzpegel im Frequenzbereich von 4 Hz bis 100 Hz wird der A- bewertete Summenpegel $L_{v-Zug,A}$ gebildet. Der Pegel des sekundären Luftschalls ergibt sich über spezielle Zusammenhänge in Abhängigkeit der Art des Deckenaufbaus. Unter Einbeziehung der Fahrthäufigkeit wird - analog zur schalltechnischen Untersuchung - ein Beurteilungspegel ermittelt.

In Abhängigkeit von der jeweiligen Deckenkonstruktion ergeben sich für Fernbahnen folgende, auf statistischen Auswertungen beruhende, Beziehungen:

- Holzdeckenaufbau $L_{sek-Zug,A} = 19.9 + 0.47 L_{v-Zug,A}$
- Betondeckenaufbau $L_{sek-Zug,A} = 15.8 + 0.60 L_{v-Zug,A}$

Darin bedeuten:

$L_{sek-Zug,A}$: sekundärer Luftschallpegel in dB(A) der Zugklasse (auf geometrische Vorbeifahrtzeit bezogen)

$L_{v-Zug-A}$: A - bewerteter Körperschall-Schnelle-Gesamtpegel des betrachteten Raumfuß-bodens

Der Beurteilungspegel $L_{m\text{-Zug/Tag(Nacht)}}$ -Tag/Nacht für die Stadtbahn wird gemäß folgender Gleichung berechnet:

$$\text{Tag:} \quad L_{m\text{-Tag}} = L_{\text{sek}} + 10 \lg \frac{t_{\text{zug}} * N_t}{57600} \text{ [dB(A)]}$$

$$\text{Nacht:} \quad L_{m\text{-Nacht}} = L_{\text{sek}} + 10 \lg \frac{t_{\text{zug}} * N_n}{28800} \text{ [dB(A)]}$$

N_t : Anzahl Zugereignisse Tag (Zeitraum 6:00 bis 22:00 Uhr)

N_n : Anzahl Zugereignisse Nacht (Zeitraum 22:00 bis 6:00 Uhr)

t_{zug} : Einwirkungsdauer der Zugvorbeifahrt

Die Einwirkungsdauer t_{zug} wird aus Zuglänge- und Geschwindigkeit ermittelt.

Aus den Beurteilungspegel $L_{m\text{-Zug/Tag(Nacht)}}$ -Tag/Nacht für die einzelnen Zugklassen ergibt sich durch deren energetischen Addition der bei der Beurteilung maßgebende Gesamtbeurteilungspegel $L_{m\text{-Tag(Nacht),ges}}$.

$$\text{Tag (6:00 – 22:00 Uhr):} \quad L_{m\text{-Tag,ges}} = 10 \lg \sum_{\text{Zug}=1}^{N_{\text{ZT}}} 10^{(L_{m\text{-Zug/Tag}}/10)}$$

$$\text{Nacht (22:00 - 6:00 Uhr):} \quad L_{m\text{-Nacht,ges}} = 10 \lg \sum_{\text{Zug}=1}^{N_{\text{ZN}}} 10^{(L_{m\text{-Zug/Nacht}}/10)}$$

N_{ZT} : Anzahl Zugklassen Tag (Zeitraum 6:00 bis 22:00 Uhr)

N_{ZN} : Anzahl Zugklassen Nacht (Zeitraum 22:00 bis 6:00 Uhr)

In den Tabellen der Anlagen P/P.1/P.2 zur Darstellung der Ergebnisse für einen Abstand von 9 m bzw. 11 m, sind auch die Ergebnisse für den sekundären Luftschall $L_{\text{sek-Zug,A}}$ für eine Deckeneigenfrequenz von 40 Hz aufgeführt. Angegeben werden die Ergebnisse für eine Deckeneigenfrequenz von 40 Hz. Für den sekundären Luftschall wird die Ermittlung für die Deckeneigenfrequenz von 40 Hz durchgeführt, da hier die höchsten Werte für den sekundären Luftschall vorliegen.

7. Ergebnisse der Prognoseberechnung und Beurteilung

Bei der Prognoseberechnung wurden entsprechend der vorliegenden Planung folgende Randbedingungen zugrunde gelegt:

- Nicht unterkellertes Gebäude mit drei Geschossen;
- Decke in Holz/Beton Hybrid Ausführung (d=18 cm) für Deckeneigenfrequenzen von 10 – 40 Hz. Für diese Deckenbauart liegen keine Angaben für die frequenzabhängige Verstärkungsfunktion vor. Es ist

aber davon auszugehen, dass die Verstärkung durch diese Deckenbauform im Bereich zwischen Beton- bzw. Holzbalkendecken liegen wird. Die Berechnungen erfolgen daher für Beton-bzw. Holzbalkendecke.

- Berechnung der Beurteilungsschwingstärke auf Grundlage des aktuellen Fahrplans der ÜSTRA (Fahrplan 2018);
- Baureihe Stadtbahn TW2000 auf Oberbau Betonlängsbalken mit ZW900, Geschwindigkeit 50 km/h:
- Minimalabstand Gebäude zum nächstgelegenen Gleis ca. 9 m.

Beurteilung der Einwirkung von Erschütterungen

In den Tabellen der Anlagen P/P.1/P.3 sind die Ergebnisse der auf Grundlage der durchgeführten Emissionsmessungen und unter Berücksichtigung der oben dargestellten Randbedingungen durchgeführten Prognoseberechnung für die Beurteilungsschwingstärke KB_{FT} in Abhängigkeit von der Entfernung zum nächstgelegenen Gleis und der Deckeneigenfrequenz für den Tages- und Nachtzeitraum aufgeführt. In diesen Tabellen erfolgt auch die Beurteilung nach der DIN 4150, Teil 2.

In der Zusammenfassung lassen sich unter Bezug auf die durchgeführten Prognoseberechnungen folgende Aussagen in Hinsicht auf die Einwirkung von Erschütterungen für das geplante Bauvorhaben machen:

- Die Anforderungen der DIN 4150, Teil 2 werden für das geplante Schulgebäude unter Berücksichtigung der Anhaltswerte für die Gebietseinstufung WA für den vorgesehenen Minimalabstand von 9 m für eine Ausführung als Holzbalkendecke für die Deckeneigenfrequenz von 20 Hz nicht eingehalten (Die Überschreitungen für Betondecken bei 20 Hz und Holzbalkendecke bei 16 Hz liegen im Bereich der Messgenauigkeit und sind damit bei der Beurteilung als eingehalten zu bewerten). Für alle weiteren möglichen Deckeneigenfrequenzen werden die Anforderungen dagegen eingehalten. Da für die weit gespannten Decken der Klassenräume Deckeneigenfrequenzen von unter 10 Hz zu erwarten sind dürften die Anforderungen Erschütterung damit eingehalten werden. Dies gilt jedoch nicht für die Klassenräume 1.OG über den Verwaltungsräumen

im EG. Hier sind durch die stützenden Zwischenwände höhere Deckeneigenfrequenzen zu erwarten, so dass auch die Überschreitung Holzbalkendecke bei 20 Hz zu berücksichtigen ist.

- Ab einen Abstand von 11 m werden die Anforderungen der DIN 4150 Teil 2 für Holzbalkendecken und damit auch für Betondecken eingehalten, dabei liegen die Einzelwerte jedoch in einem Bereich der spürbar ist. D.h. die durch einzelne Vorbeifahrten der Stadtbahn ausgelösten Erschütterungen liegen in einem Bereich der spürbar ist.
- Da die Prognose von Erschütterungen mit Unsicherheiten verbunden ist wird empfohlen zu der Stadtbahn einen Abstand von 15 m einzuhalten
- Die Erschütterungen liegen für die maximale bewertete Schwingstärke für Deckeneigenfrequenzen von 16 – 31.5 Hz in einem Bereich der spürbar ist. Werden die Anforderungen der DIN 4150, Teil 2 eingehalten kann ein störender Einfluss von Erschütterungen in der Regel jedoch ausgeschlossen werden.
- Ab einem Abstand von 15m liegen die Erschütterungen in einem Bereich der gerade wahrnehmbar ist, d.h. in den meisten Fällen werden die Erschütterungen aus dem Betrieb der Stadtbahn nicht wahrgenommen.

Beurteilung sekundärer Luftschall

Die Berechnung des Beurteilungspegels für den sekundären Luftschall wurde für den ungünstigsten Fall vorgenommen. D.h. es wurde der höchste Wert für den Vorbeifahrpegel bei der einer Deckeneigenfrequenz von 40 Hz für zu Grunde gelegt. Dieser Wert wurde für eine Ausführung der Decken als Betondecke ermittelt. In der nachfolgenden Tabelle ist die für den sekundären Luftschall ermittelte Wert für den Beurteilungspegel in Abhängigkeit vom Abstand zum nächstgelegenen Gleis der Stadtbahntrasse dargestellt.

Tabelle 4: Prognose und Beurteilung sekundärer Luftschall Beurteilungspegel $L_{A,m}$

Beurteilung sekundärer Luftschall Beurteilungspegel (Betondecke, Deckeneigenfrequenz 40 Hz)		
Abstand zum nächstgelegenen Gleis der Stadtbahn	Beurteilungspegel sekundärer Luftschall Tag $L_{m-Tag,ges}$ [dB(A)] Anhaltswert 40 db(A)	Anforderungen sekundärer Luftschall Tag/ Nacht erfüllt ja / nein
9 m	23	ja / ---

Die Anforderungen für den Beurteilungspegel sekundärer Luftschall werden für eine Wohnnutzung eingehalten.

Der nachfolgenden Tabelle ist die Beurteilung für den mittleren Maximalpegel L_{Amax} für Wohn- und Schlafräume zu entnehmen.

Tabelle 5: Prognose und Beurteilung sekundärer mittlerer Maximalpegel L_{Amax}

Beurteilung sekundärer Luftschall mittlerer Maximalpegel (Betondecke, Deckeneigenfrequenz 40 Hz)		
Abstand zum nächstgelegenen Gleis der Stadtbahn	Mittlerer Maximalpegel sekundärer Luftschall L_{Amax} [dB(A)] Anhaltswert Tag = 50 dB(A) / Nacht 40 dB	Anforderungen sekundärer Luftschall Tag/ Nacht erfüllt ja / nein
9 m	40	ja / ---

Die auf den mittleren Maximalpegel bezogenen Anforderungen für den sekundären Luftschall werden bei einem Abstand von 9 m eingehalten.

8. Zusammenfassung und Hinweise für die weitere Planung

Die Anforderungen Erschütterung DIN 4150 Teil 2 werden erst ab einem Abstand von 11 m für den ungünstigsten Fall der Holbalkendecke eingehalten. Um mögliche Unsicherheiten in der Prognose zu berücksichtigen wird hier jedoch ein Abstand von 15 m empfohlen, den der Bau von der geplanten Stadtbahn einhalten sollte. Die Anforderungen Sekundärer Luftschall werden bei dem vorgesehenen Abstand von 9 m eingehalten.

Bei der weiteren Planung sind hinsichtlich der Bauausführung folgende Punkte zu beachten um die gestellten Anforderungen einhalten zu können:

- Die Überschreitungen des Anhaltswertes der Din 4150, Teil 2 bei einer Deckeneigenfrequenz von 20 Hz für Holbalkendecken stellt den ungünstigsten Fall dar. Wahrscheinlich ist für die vorgesehene Deckenbauweise als Holz- Betonhybriddecke mit geringeren Werten zu

rechnen, die die Anforderungen einhalten. Hierzu wären jedoch eine Ermittlung der Übertragungsfunktion für Holz- Betonhybriddecke an einem vergleichbaren Gebäude erforderlich um die Prognose im Vorfeld weiter abzusichern.

- Mit dem Planer der Stadtbahnverlängerung der INFRA, sollten im weiteren Planungsverlauf Abstimmungen bezüglich des Oberbaus vorgenommen werden.
- Nach Fertigstellung des Gymnasiums sollten Erschütterungsmessungen zur Ermittlung der Übertragungsfunktionen erfolgen, um die Prognose weiter abzusichern. Aus den Ergebnissen können dann Empfehlungen zur Ausführung des Oberbaus erfolgen. Diese wären jedoch auf Grunde der Tatsache das die Stadtbahnplanung schon bekannt war für den Vorhabenträger Stadtbahn nicht verbindlich.
- Da die Prognose von Erschütterungen mit Unsicherheiten verbunden ist wird empfohlen zu der Stadtbahn einen Abstand von 15 m einzuhalten. Bei diesem Abstand werden die Anforderungen mit Sicherheit eingehalten, und die Erschütterungen liegen in einem Bereich der gerade spürbar ist.

Bonk-Maire-Hoppmann GbR

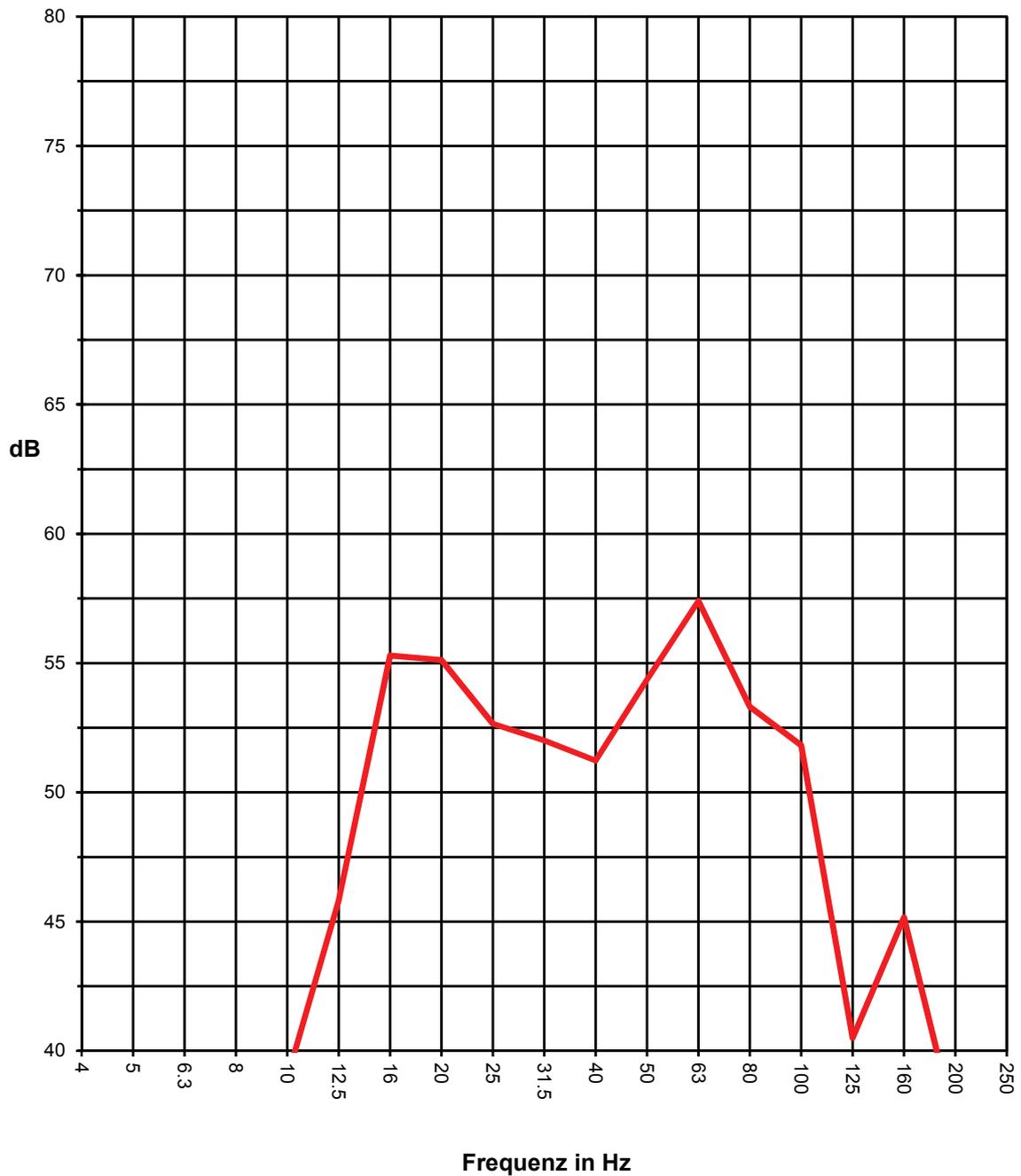
(Dipl.-Phys. M. Krause)

Quellen, Richtlinien, Verordnungen

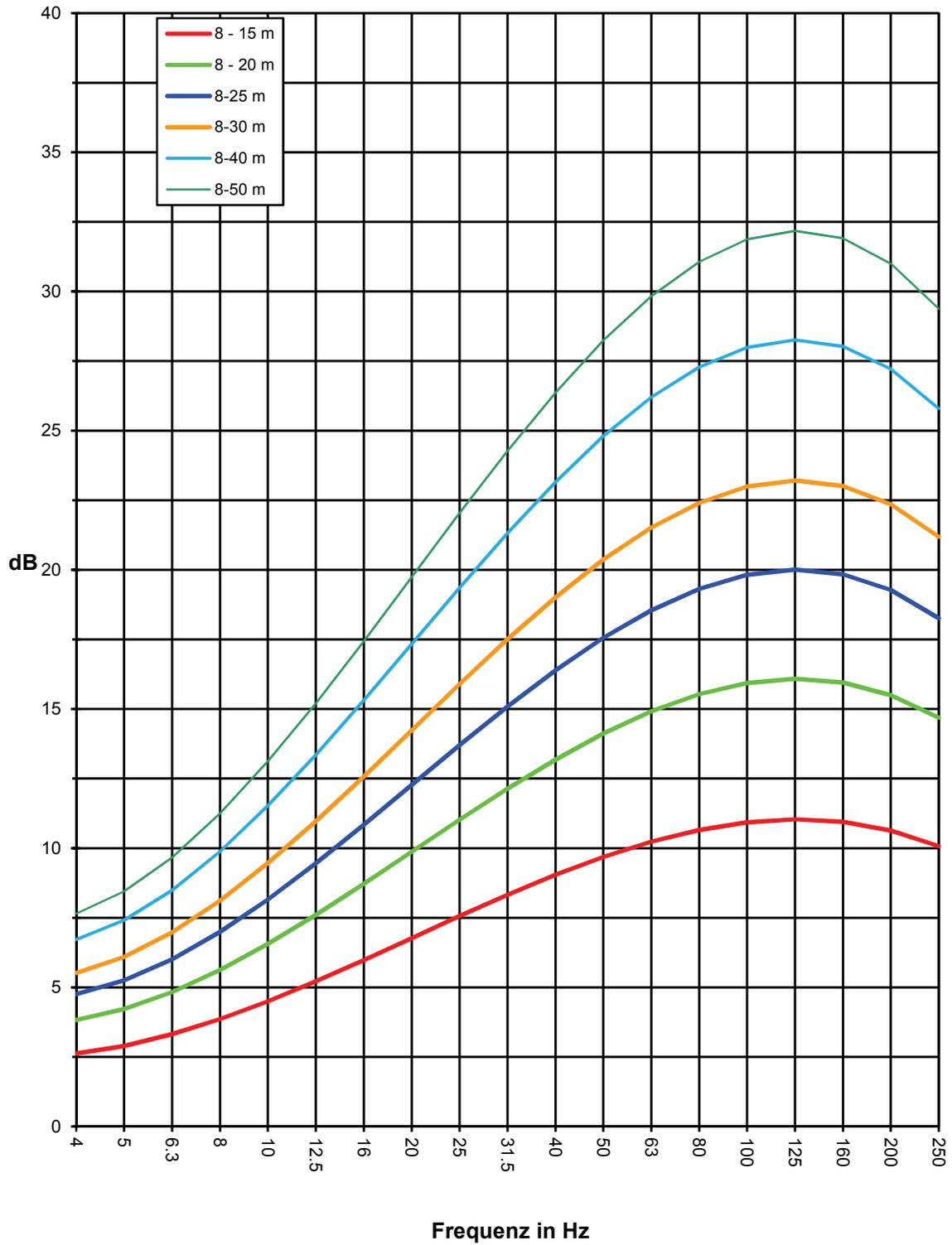
- ◇ Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 26.09.2002, zuletzt geändert durch Artikel 3 des Gesetzes vom 18.12.2006 (BGBl. I S. 3180), zuletzt geändert am 13.10.2007
- ◇ DIN 4150 Erschütterungen im Bauwesen,
 - Teil 1: Grundsätze, Vorermittlung und Messung; Juni 2001;
 - Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden; Juni 1999;
- ◇ DIN 45669 Messung von Schwingungsimmissionen
 - Teil 1: Schwingungsmesser, Anforderungen, Prüfung; Juni 1995
 - Teil 2: Messverfahren; Juni 1995
- ◇ „Durchführung von Immissionsprognosen für Schwingungs- und Körperschalleinwirkungen“, Bericht Nr. 107, Landesanstalt für Immissionsschutz Nordrhein – Westfalen, 1992
- ◇ DIN 45672 Schwingungsmessungen in der Umgebung von Schienenverkehrswegen
 - Teil 1: Messverfahren; September 1991
 - Teil 2: Auswerteverfahren; September 1997
- ◇ Richtlinie 800.2501 – 800.2503 „Erschütterungen und sekundärer Luftschall“ der DB Netz AG vom September 2017)
- ◇ Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung - 16. BImSchV) vom 12.06.1990, veröffentlicht im Bundesgesetzblatt, Jahrgang 1990, Teil 1, zuletzt geändert durch Artikel 3 des Gesetzes (BImSchG) vom 18.12.2006 (BGBl. I S. 3180)
- ◇ VDI-Richtlinie 2719 Schalldämmung von Fenstern und deren Zusatzeinrichtungen (8/87)
- ◇ Messungen Büro Bonk-Maire-Hopmann an Straßenbahnoberbauten in Hannover

Erschütterungstechnische Untersuchung Neubau Gymnasium Langenhagen:
 Emissionsspektren Gelände 8 m

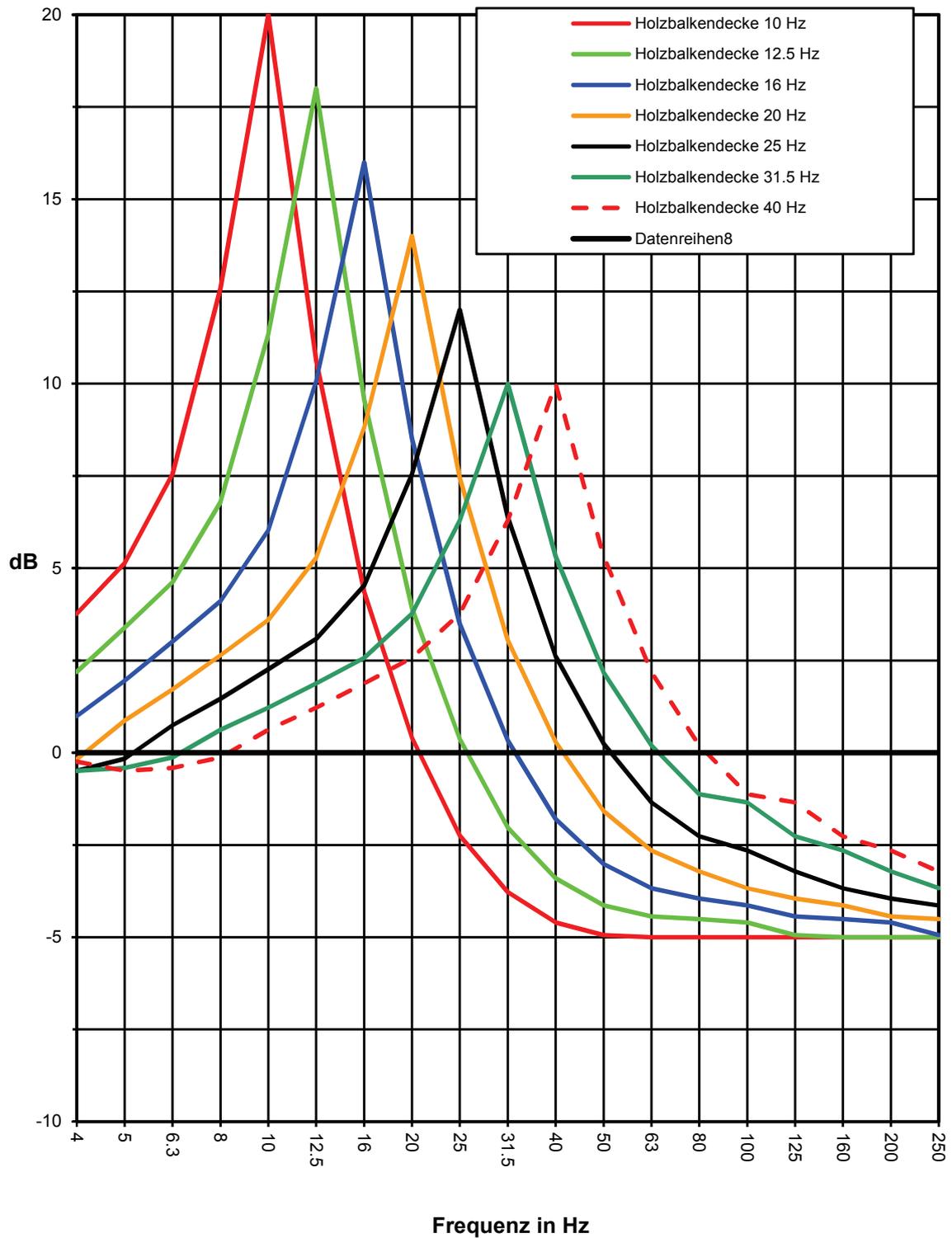
TW2000 v=50 km/h, Betonlängsbalken mit ZW 900



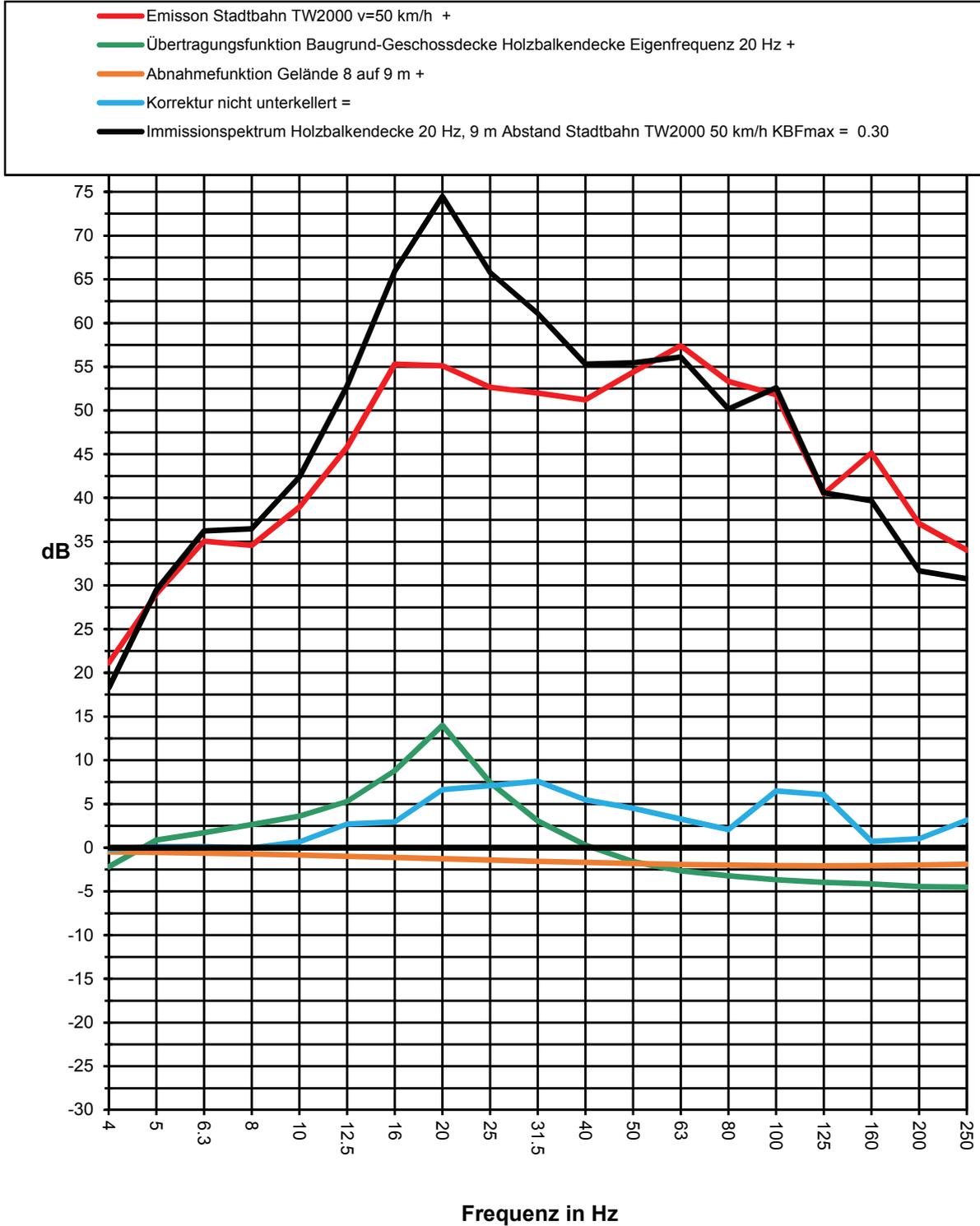
Erschütterungstechnische Untersuchung Neubau Gymnasium Langenhagen:
Abnahmefunktion im Gelände auf Grundlage Richtlinie DB Netz AG



Erschütterungstechnische Untersuchung Neubau Gymnasium Langenhagen:
 Übertragungsfunktionen Baugrund - Geschossdecken Holzbalkendecke
 Richtlinie DB Netz AG



Erschütterungstechnische Untersuchung Neubau Gymnasium Langenhagen:
 Berechnung Immissionspektrum TW2000 v=50 km/h, Holzbalkendecke
 Eigenfrequenz 20 Hz Abstand 9 m



18165 Erschütterungstechnische Untersuchung Neubau Gymnasium Langenhagen

Ergebnisse KB_{Fmax} und KB_{Ftr} Holzbalkendecke nicht unterkellert		Abstand zur Trasse in [m] =							9	Sek. Luftsch. $L_{sek-Zug}$ A (40 Hz)
Anz. Tag	Anz. Nacht	Decke/Frequenz	10	12.5	16	20	25	31.5	40	40
Zugart		Gleis (Strecke) / Bemerkung								
TW2000	16	Gl.1	0.11	0.17	0.27	0.30	0.24	0.20	0.18	39
TW2000	16	Gl.2	0.11	0.15	0.24	0.27	0.21	0.18	0.16	38
Summe	32	KB_{Ftr} (Tag)	0.034	0.050	0.079	0.088	0.069	0.058	0.054	
DIN 4150, Teil 2 Tag WA		eingehalten ja /nein ? (Ar = 0.07)	ja	ja	nein	nein	ja	ja	ja	
		KB_{Ftr} (Nacht)	0.020	0.030	0.047	0.052	0.041	0.034	0.032	
DIN 4150, Teil 2 Nacht WA		eingehalten ja /nein ? (Ar = 0.05)								
Summe	32	KB_{Ftr} (Tag)	0.034	0.050	0.079	0.088	0.069	0.058	0.054	
DIN 4150, Teil 2 Tag MI		eingehalten ja /nein ? (Ar = 0.10)	ja							
		KB_{Ftr} (Nacht)	0.020	0.030	0.047	0.052	0.041	0.034	0.032	
DIN 4150, Teil 2 Nacht MI		eingehalten ja /nein ? (Ar = 0.07)								

18165 Erschütterungstechnische Untersuchung Neubau Gymnasium Langenhagen

Ergebnisse KB_{Fmax} und KB_{Ftr} der Prognoseberechnung Betondecke nicht unterkellert											Sek. Luftsch. L_{sek} - Zug, A (40 Hz)	
Abstand zur Trasse in [m] = 9												
	Anz. Tag	Anz. Nacht	Decke/Frequenz Gleis (Strecke)	10	12.5	16	20	25	31.5	40		
Zugart												
TW2000	92	16	Gl.1 v=50 km/h	0.09	0.13	0.23	0.26	0.20	0.17	0.15	40	
TW2000	92	16	Gl.2 v=50 km/h	0.08	0.11	0.20	0.23	0.18	0.15	0.13	39	
Summe	184	32	KB_{FTr} (Tag)	0.027	0.037	0.067	0.077	0.060	0.050	0.044		
	DIN 4150, Teil 2 Tag WA eingehalten ja /nein ? ($A_r = 0.07$)			ja	ja	ja	nein	ja	ja	ja		
	DIN 4150, Teil 2 Nacht WA eingehalten ja /nein ? ($A_r = 0.05$)			0.016	0.022	0.040	0.045	0.035	0.029	0.026		
Summe	184	32	KB_{FTr} (Tag)	0.027	0.037	0.067	0.077	0.060	0.050	0.044		
	DIN 4150, Teil 2 Tag MI eingehalten ja /nein ? ($A_r = 0.10$)			ja								
	DIN 4150, Teil 2 Nacht MI eingehalten ja /nein ? ($A_r = 0.07$)			0.016	0.022	0.040	0.045	0.035	0.029	0.026		

18165 Erschütterungstechnische Untersuchung Neubau Gymnasium Langenhagen

Ergebnisse KB_{Fmax} und KB_{Ftr}		Holzbalkendecke nicht unterkellert										Abstand zur Trasse in [m] = 11		Sek. Luftsch. $L_{sek-Zug}$ A (40 Hz)
Anz. Tag	Anz. Nacht	Decke/Frequenz	10	12.5	16	20	25	31.5	40	40				
Zugart		Gleis (Strecke) / Bemerkung												
TW2000	16	Gl.1	0.09	0.14	0.21	0.23	0.18	0.15	0.13	0.13		37		
TW2000	16	Gl.2	0.09	0.12	0.19	0.21	0.16	0.13	0.12	0.12		37		
Summe	32	KB_{Ftr} (Tag)	0.027	0.040	0.063	0.068	0.052	0.043	0.039	0.039				
		DIN 4150, Teil 2 Tag WA eingehalten ja /nein ? (Ar = 0.07)	ja											
		KB_{Ftr} (Nacht)	0.016	0.023	0.037	0.040	0.031	0.025	0.023	0.023				
		DIN 4150, Teil 2 Nacht WA eingehalten ja /nein ? (Ar = 0.05)												
Summe	32	KB_{Ftr} (Tag)	0.027	0.040	0.063	0.068	0.052	0.043	0.039	0.039				
		DIN 4150, Teil 2 Tag MI eingehalten ja /nein ? (Ar = 0.10)	ja											
		KB_{Ftr} (Nacht)	0.016	0.023	0.037	0.040	0.031	0.025	0.023	0.023				
		DIN 4150, Teil 2 Nacht MI eingehalten ja /nein ? (Ar = 0.07)												