



HOCHBAHN

**U5, Ost
City Nord - Bramfeld**

**Schalltechnische Beratung zu Sekundär-
schall- und Erschütterungs-Immissionen
aus dem Betrieb**

**Allgemeine Grundlagen zur Prognose
und Abschätzung erforderlicher schwin-
gungsmindernder Maßnahmen**

Studiengesellschaft
für Tunnel und
Verkehrsanlagen e.V.
STUVA

STUVA-tec -
Studiengesellschaft
für Tunnel und
Verkehrsanlagen mbH

Mathias-Brüggen-Straße 41
D-50827 Köln
Telefon 0221/59795-0
Telefax 0221/59795-50

Bericht: 2017022

Februar 2019

Studiengesellschaft für
Tunnel und Verkehrsanlagen e.V.
- STUVA -
Mathias-Brüggen-Straße 41
50827 Köln

Tel: +49 (0)221 59795-0
Fax: +49 (0)221 59795-50
www.stuva.de

Dr.-Ing. F. Krüger

Tel: +49 (0)221 59795-21
e-mail: f.krueger@stuva.de

HOCHBAHN, U5, Ost City Nord – Bramfeld

Schalltechnische Beratung zu Sekundärschall- und Erschütterungs-Immissionen aus dem Betrieb

Allgemeine Grundlagen zur Prognose und Abschätzung erforderlicher schwingungsmin- dernder Maßnahmen

Bericht 2017022

Bearbeiter:

Dr.-Ing. Friedrich Krüger



Februar 2019

Inhalt

1	<u>BEGRIFFE</u>	3
2	<u>ZUSAMMENFASSUNG</u>	5
2.1	GRUNDLAGEN	5
2.2	BEWERTUNG	7
2.2.1	ABSCHÄTZUNG DER ZU ERWARTENDEN IMMISSIONEN AUS DEM U-BAHN-VERKEHR	7
2.2.2	ERGEBNIS	8
3	<u>BESCHREIBUNG DER MAßNAHME</u>	10
4	<u>AUFGABENSTELLUNG UND ZU BERÜCKSICHTIGENDE PARAMETER</u>	11
4.1	ERSCHÜTTERUNGEN UND SEKUNDÄRSCHALL	11
4.2	OBERBAU	11
4.3	GESCHWINDIGKEITEN, TRASSIERUNGSPARAMETER UND STRECKENBEZEICHNUNGEN	11
4.4	FAHRZEUGE	12
4.5	VERKEHRZAHLEN	13
5	<u>ERSCHÜTTERUNGS- UND SEKUNDÄRSCHALLSCHUTZ - ÜBERBLICK</u>	13
5.1	ALLGEMEINE EINFÜHRUNG FÜR UNTERIRDISCHE VERKEHRSANLAGEN	13
5.2	ERSCHÜTTERUNGSMISSIONEN	15
5.2.1	BEWERTUNG	15
5.2.2	BEISPIEL FÜR EINE BEWERTUNG NACH DIN 4150-2	16
5.3	SEKUNDÄRSCHALLIMMISSIONEN	17
5.3.1	BEWERTUNG	17
5.3.2	BEISPIEL FÜR EINE SEKUNDÄRSCHALLBEWERTUNG NACH TA LÄRM	17
5.4	EINFLUSS DER A-BEWERTUNG	19
5.5	ZUSAMMENHANG ZWISCHEN SEKUNDÄRSCHALL UND ERSCHÜTTERUNGEN	21
5.6	FAHRBAHNART	22
6	<u>PROGNOSE VON ERSCHÜTTERUNGEN UND SEKUNDÄRSCHALL</u>	23
6.1	GENERELLE VORGEHENSWEISE FÜR EINE IMMISSIONSPROGNOSE	23
6.2	PROJEKTIERUNGSMODELL	26
6.3	PLANUNGS- UND UMWELTBEWERTUNGSMODELL	27
6.4	DETAILMODELL	28
6.5	ZUSAMMENFASSENDE BEWERTUNG DER ERGEBNISSE DER THEORETISCHEN UND MESSTECHNISCHEN UNTERSUCHUNGEN IM HINBLICK AUF EVTL. ERFORDERLICHE MINDERUNGSMABNAHMEN	28
7	<u>UMSETZUNG DER BASIS-MODELLE FÜR DIE U5 OST</u>	28
7.1	OBERBAUEIGENSCHAFTEN	28
7.2	MODELLE ZUR ABSCHÄTZUNG DER IMMISSIONEN – PROJEKTIERUNGSMODELL	30

7.2.1	MODELL 1	30
7.2.2	MODELL 2	33
7.2.3	MODELL 3 – RICHTLINIE 820.2050 DER DB AG	35
8	<u>MINDERUNGSMAßNAHMEN</u>	37
9	<u>ABSCHÄTZUNG DER IMMISSIONSSITUATION UND DER ERFORDERLICHEN MAßNAHMEN</u>	39
9.1	BEWERTUNGSKRITERIEN	39
9.2	VORGEHENSWEISE	40
9.3	BODENSPEKTREN	40
9.4	ZUSAMMENFASSENDE DARSTELLUNG DER PROGNOSE-ERGEBNISSE	46
9.4.1	GEBÄUDEZUSAMMENSTELLUNG 1 (U5 OST)	46
9.4.2	GEBÄUDEZUSAMMENSTELLUNG 2 (U5 OST)	46
9.4.3	GEBÄUDEZUSAMMENSTELLUNG 3 (U5 OST)	47
9.4.4	GEBÄUDEZUSAMMENSTELLUNG 4 (U5 OST)	48
9.4.5	GEBÄUDEZUSAMMENSTELLUNG 5 (U5 OST)	49
10	<u>ABSCHÄTZUNG DER EINFÜGEDÄMMUNG VON MAßNAHMEN</u>	51
11	<u>LITERATUR - ZU BERÜCKSICHTIGENDE REGELWERKE UND VERÖFFENTLICHUNGEN, REFERENZEN</u>	53
11.1	NORMEN UND RICHTLINIEN	53
11.2	LITERATUR	54

1 Begriffe

Folgende wesentliche Begriffe werden in diesem Bericht verwendet:

Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit	Gleichung / Beschreibung
Luftschall		Pa	Ausbreitung im Medium Luft, Abstrahlung von festen Strukturen
Schalldruckpegel	L_p	dB	$L_p = 20 \cdot \lg \frac{p}{p_0}$; $p_0=2 \times 10^{-5}$ Pa
Körperschall	v , a	m/s m/s ²	Ausbreitung in festen Körpern (Tunnel, Boden, Gebäude)
Schwinggeschwindigkeitspegel	L_v	dB	$L_v = 20 \cdot \lg \frac{v}{v_0}$; $v_0=5 \times 10^{-8}$ m/s
Schwingbeschleunigungspegel	L_a	dB	$L_a = 20 \cdot \lg \frac{a}{a_0}$; $a_0=10^{-6}$ m/s ²
A-Bewertung	L_{pA}	dB(A)	Anwendung der A-Bewertung (mathematische Umsetzung des Hörverhalten des menschlichen Ohres)
Maximaler AF-bewerteter Schalldruckpegel	L_{pAFmax}	dB(A)	Anwendung der A- und F- (fast) Bewertung, maximaler Sekundär-Schalldruckpegel während einer Vorbeifahrt in einem Gebäude
Mittlerer AF-bewerteter maximaler Schalldruckpegel	$L_{pAFmax,m}$	dB(A)	$L_{pAFmax,m} = 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{n} \left(\sum_1^n 10^{0,1L_n} \right) \right]$
Mittelungspegel	$L_{pAeq,T}$	dB(A)	Über eine Vorbeifahrt gemittelter Schallpegel
A-bewerteter äquivalenter Dauerschalldruckpegel	$L_{pAeq,T}$ $L_{pAeq,Tp}$	dB(A)	Mittelungspegel während einer Vorbeifahrt mit den Zeiten T und T _p
Mittelungspegel Tag/Nacht	$L_{pAeq,Tag}$ $L_{pAeq,Nacht}$	dB(A)	Über den Tag/die Nacht gemittelter Schallpegel (TA Lärm)
Messdauer	T	s	Zeit für die Aufzeichnung oder Auswertung eines Signals (Luft- oder Körperschall)
Vorbeifahrtzeit	T _p	s	Reine Vorbeifahrtzeit eines Zuges $T_p = \frac{s}{v}$ s Zuglänge im m, v Zuggeschwindigkeit im m/s
Beurteilungspegel	L_r		Der für eine Beurteilung heranzuziehende Schalldruckpegel, er ist mit den Anhaltswerten für die Tag- und Nachtzeit zu vergleichen.
Erschütterungen	$v(if) / v(f)$ $a(if) / a(f)$	m/s (m/s ²)	Mechanische Schwingungen mit potentiell schädigender oder belästigender Wirkung (komplex oder als Betrag) im Frequenzbereich von 3 Hz bis 80 (100) Hz, s. DIN 4150-1
Maximale bewertete Schwingstärke	KB_{Fmax}	-	Maximaler $KB_F(t)$ -Wert während einer Beurteilungszeit

Taktmaximalwert	KB_{FTi}	-	Beim Schienenverkehr der während einer Vorbeifahrt maximale KB_F -Wert
Taktmaximal-Effektivwert	KB_{FTm}	-	$KB_{FTm} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N KB_{FTi}^2}$
Anzahl der Fahrten	N oder n	-	
Beurteilungs-Schwingstärke	KB_{FTr}	-	$KB_{FTr} = KB_{FTm} \sqrt{\frac{T_e}{T_r}}$
Einwirkungszeit der Erschütterungen	T_e	s	
Beurteilungszeit	T_r	h	tags 16 h, nachts 8 h, gilt für Erschütterungen und Sekundärschall
Anhaltswert für die Erschütterungsbeurteilung	A		Es wird unterschieden nach dem unteren A_u , dem oberen A_o - und dem A_r -Wert zum Vergleich mit der Schwingstärke KB_{FTr} .
Immissionsrichtwert	-	dB(A)	In der TA Lärm sind solche Werte festgelegt
(mechanische) Admittanz	$Y(if)$	(m/s)/N oder m/(N/s)	$Y_{mn}(if) = \frac{v_m(if)}{F_n(if)}$ Beschreibt die Schwingungsempfindlichkeit einer Struktur (komplex), z.B. eines Tunnels oder eines Gebäudes, sowie das Ausbreitungsverhalten von Strukturen (z. B. Ausbreitung der Schwingungen von der Tunnelsohle/-wand ins Gebäude).
Admittanzpegel	L_Y	dB	$L_{Y_{mn}}(f) = \frac{Y_{mn}(f)}{Y_0(f)}$; $Y_0 = 1 \text{ (m/s)/N}$ oder $Y_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ (m/s)/N}$
Kraftbezogener Schall-druckpegel	$L_{P'}$	dB(A)/N	$L_{P'_{mn}}(f) = L_{p,m}(f) - L_{F,n}(f)$; $L_{p,m}(f)$ Schalldruckspektrum im Gebäude $L_{F,n}(f)$ Kraftspektrum im Tunnel (Anregung) Mit dieser Größe werden sowohl die Ausbreitung ins Gebäude als auch die Schallabstrahlung im Gebäude erfasst.
Impedanz	$Z(if)$	N/(m/s)	$Z_{mn}(if) = \frac{F_m(if)}{v_n(if)}$ Schwingwiderstand einer Struktur (komplex), Kehrwert der Admittanz
Kraft, dynamische	$F(if)$	N	Anregende Kraft (komplex)
Betrag			In der Regel werden die Betragsgrößen der komplexen Größen verwendet: $B(f) = \sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2}$

2 Zusammenfassung

2.1 Grundlagen

In Hamburg wird von der HOCHBAHN eine neue U-Bahn-Linie (U5 Ost) geplant. Das hier betrachtete Teilstück führt von City Nord nach Bramfeld. Bis auf einen kurzen Abschnitt, Verbindung zu der oberirdischen Haltestelle Sengelmannstraße, wird der Streckenabschnitt in einem Tunnel liegen. Außer der Haltestelle City Nord werden die weiteren Haltestellen im Tunnel mit Seitenbahnsteigen erstellt. Die Gleise werden somit dicht beieinander in einer Tunnelröhre liegen. Auf der gesamten Strecke ist ein Schotteroberbau vorgesehen.

Mit dem Schienenverkehr sind immer auch Schall- und Schwingungsemissionen verbunden. In dem vorliegenden Gutachten werden nur diese Schwingungsemissionen aus den beiden Tunnelabschnitten betrachtet.

Wesentlich für das zu bearbeitende Thema sind folgende Begriffe:

- Emission: Vom Fahrzeug über den Oberbau in den Tunnel eingeleitete Schwingungen (= Anregung),
- Transmission: Übertragung der Schwingungen vom Tunnel zu den Gebäuden (Schwingungsausbreitung im Tunnel, Boden und Gebäude),
- Immission Erschütterungen: Auf Personen (und Geräte) in den Gebäuden einwirkende Schwingungen,
- Immission Sekundärschall: Auf Personen in den Gebäuden einwirkender Schall (Schallabstrahlung der Raumbegrenzungsflächen).

Die Stärke der Schwingungsemissionen hängt von zahlreichen Parametern ab. In der Regel sind die im Folgenden genannten Parameter dominant:

- Anregung durch das Fahrzeug (Geschwindigkeit, Achslast, Zustand der Rad- und Schienenfahrflächen),
- Übertragungseigenschaften des Oberbaus für Schwingungen. Diese werden durch das Einfügungsdämmmaß oder die Einfügedämmung beschrieben,
- Tunnelparameter (Tunnelbauform, Tunnelwandstärke),
- Boden, in dem der Tunnel eingebettet ist,
- Dämpfung durch den Boden zwischen Tunnel und Gebäude,
- Abstand zwischen Quelle und Gebäude (der horizontale Abstand der Gebäude von der Tunnelwand ist besonders hervorzuheben). U.a. liegt dies daran, dass innerhalb des Bodens andere Wellenarten auftreten als an der Bodenoberfläche, die jeweils ein unterschiedliches Ausbreitungsverhalten aufweisen (Boden: Druck- und Scherwellen, Bodenoberfläche: Rayleighwellen).
- Übertragungseigenschaften zwischen Boden und Gebäudefundament,
- Übertragungseigenschaften zwischen dem Fundament und den Raumbegrenzungsflächen (Fußboden, Seitenwände, Decke),
- Deckeneigenfrequenzen sowie
- der Wohnungseinrichtung (z.B. Möblierung sowie absorbierende Bodenbeläge und Fenstervorhänge die den Sekundärschall beeinflussen).

Für Erschütterungsimmissionen sind insbesondere Gebäude mit Holzbalkendecken empfindlich. Diese haben in der Regel deutlich niedrigere Eigenfrequenzen und eine geringere Dämpfung (Dämpfung = Umwandlung der Schwingungsenergie in Wärme).

Die Erschütterungsemissionen lassen sich deutlich reduzieren durch besondere Oberbauformen, hervorzuheben sind hierbei Unterschottermatten. Hiermit wird das Gleis elastisch von der Tunnelsohle und der Tunnelwand (durch Seitenmatten im Gleisbereich) entkoppelt.

Insbesondere die Oberbauform beeinflusst maßgeblich die Schwingungsemissionen (Schwingungen des Tunnels). Bei einem Schotteroberbau können grundsätzlich diese Schwingungen durch folgende Maßnahmen wie folgt beeinflusst werden:

- Hochelastische Schienenlagerungen, diese Lösung dient vorrangig zur nachträglichen erschütterungstechnischen Sanierung von Strecken,
- Unterschottermatten in unterschiedlicher „Qualität“ sowie
- sogenannte Masse-Feder-Systeme. Hierbei wird das Schotterbett in einem elastisch gelagerten Betontrog verlegt.

Die Wirkung dieser Maßnahmen hängt maßgeblich von der Steifigkeit (Verhältnis von anregender Kraft zur Verformung) und Dämpfung (Minderung der Schwingungsamplituden) der verwendeten elastischen Materialien ab.

Neben den oben genannten Parametern werden die angeregten Schwingungsamplituden auch von der Tunneladmittanz (= Schwingempfindlichkeit) wesentlich beeinflusst. So kann ein in einem felsigen Untergrund verlegter Tunnel deutlich schwerer angeregt werden als bei einer Lage desselben in einem Lockerboden. Die Art des den Tunnel umgebenden Bodens, inklusive der Tunnelbauform, beeinflusst auch die Schwingungsausbreitung. So werden in einem felsigen (steifen) Boden die Erschütterungen besser übertragen als in einem Lockerboden. Letzter verfügt jedoch über eine höhere Dämpfung, die Schwingungsamplituden klingen mit der Entfernung schneller ab.

Die durch den Boden auf die Fundamente der benachbarten Gebäude übertragenden Schwingungen werden im Gebäude durch die Wände auf die oberen Etagen weitergeleitet. Die Decken und Wände werden so zu Schwingungen (Körperschall) angeregt. Die Deckenschwingungen werden von den Menschen als Erschütterungen wahrgenommen (gefühl). Sie wirken auch auf im Raum befindliche Gegenstände ein. Die zu Schwingungen (Körperschall) angeregten Raumbegrenzungsflächen strahlen Luftschall ab. Dieser wird dann von den Personen als tieffrequenter Sekundärschall (in der Regel < 250 Hz, meistens dominant < 100 Hz) wahrgenommen.

Zur Bewertung der Erschütterungen wird der sogenannte KB_F -Wert nach DIN 4150-2 herangezogen. Nach dieser Norm werden aus gemessenen Erschütterungen anhand eines festgelegten Verfahrens verschiedene KB_F -Werte (KB_{Fmax} , KB_{FTr}) ermittelt und mit festgelegten Anhaltswerten verglichen. Die Anhaltswerte sind unterschiedlich für den Tag und die Nacht sowie abhängig von der Art des Einwirkungsortes gemäß Baunutzungsverordnung.

Eine entsprechende Festlegung in Normen oder anderen Regelwerken existiert momentan für den Sekundärschall aus dem Schienenverkehr nicht. Für die U5 Ost werden in Anlehnung an die TA Lärm Mittelungspegel – getrennt für den Tag und die Nacht – herangezogen. Die AF-bewerteten Maximalpegel L_{pAFmax} dürfen diese Mittelungspegel maximal um 10 dB überschreiten.

Beide oben genannten Beurteilungsverfahren beruhen im Prinzip auf Messungen der Erschütterungen und des Sekundärschalls in den Gebäuden infolge einer Anregung durch den Schienenverkehr. Bei der Planung einer neuen Strecke sind solche Messungen nicht möglich. Um abschätzen zu können, welche Immissionen nach Inbetrieb-

nahme auftreten können, wird auf vergleichende Messungen an vorhandenen (ähnlichen) Strecken zurückgegriffen. Die so vorliegenden Messergebnisse wurden statistisch ausgewertet und hieraus bestimmte Methoden für eine Prognose abgeleitet. Durch theoretische Überlegungen und ergänzende Messungen vor Ort können die mit diesen Modellen erstellten Prognosen abgesichert werden.

Einige Prognosemodelle werden im Gutachten beschrieben sowie die anzuwendenden Anhaltswerte vorgestellt.

Wesentliches Ziel der Anwendung dieser Prognosemodelle ist es eine Aussage zu eventuell erforderlichen Minderungsmaßnahmen zu erhalten. Grundsätzlich gilt, dass durch solche Minderungsmaßnahmen sowohl die Anhaltswerte für Erschütterungen als auch für den Sekundärschall eingehalten werden können. Bei einem Tunnel-Neubau betreffen diese Maßnahmen immer die Oberbauform (siehe oben).

Durch ergänzende Messungen nach Fertigstellung des Tunnelrohbaus können die Prognosewerte überprüft werden. Solche Messungen betreffen sowohl das Schwingungsverhalten des Tunnels selber (Tunneladmittanzen) als auch die Übertragung in die Gebäude (z.B. Transfer-Admittanzen – vom Tunnel zum umgebenden Boden und Gebäude). Es wird daher empfohlen solche Messungen einzuplanen und durchzuführen.

2.2 Bewertung

2.2.1 Abschätzung der zu erwartenden Immissionen aus dem U-Bahn-Verkehr

In der Praxis haben sich sehr unterschiedliche Methoden zur Prognose von Erschütterungs- und Sekundärschallimmissionen aus dem Betrieb in U-Bahn-Tunneln etabliert. Hierbei wird in vielen Fällen auf eine statistische Aufbereitung von vorliegenden Messdaten zurückgegriffen. Je nach Lösungsansatz betrifft dies Ergebnisse von Messungen im Tunnel (Tunnelsohle, Tunnelwand), im Boden und in den Gebäuden (Fundament, Fußböden für Erschütterungen und in Raummitte für den Sekundärschall). Zur Messung von Erschütterungen aus dem Schienenverkehr sind Festlegungen bzw. Hinweise in VDI-Richtlinien sowie in DIN- und ISO-Normen enthalten.

Die grundsätzliche Vorgehensweise zur Prognose lässt sich wie folgt beschreiben:

- Beschreibung der Emission: Schwingungsanregung im Tunnel und Übertragung auf den umgebenden Boden,
- Beschreibung der Transmission: Ausbreitung im Boden zu den Gebäuden, Übertragung vom Boden auf die Gebäude(-fundamente),
- Beschreibung der Immission: Ausbreitung im Gebäude, Ermittlung von Beurteilungsgrößen für die Erschütterungen und den Sekundärschall, Vergleich dieser Werte mit vorgegebenen Anhaltswerten.

Anmerkung: Während für den Primärschall (Schallemissionen aus dem oberirdischen Schienenverkehr) sowohl das Prognoseverfahren als auch die einzuhaltenden Grenzwerte in der 16. BImSchV, Anlage 2, von 2014 [9] eindeutig geregelt werden, ist eine vergleichbare Regelung für Erschütterungen und den Sekundärschall nicht vorhanden. Weder für Erschütterungs- noch für Sekundärschallimmissionen gibt es in Deutschland gesetzlich festgelegte Prognoseverfahren und Grenzwerte.

Für eine Prognose können die Angaben in folgenden Richtlinien und Normen herangezogen werden: VDI 3837 [4], DIN 4150 Teile 1 und 2 [1], ISO 14837 Teil 1 [5] sowie die DB Richtlinie 820.2050 [8]. Messung und Auswertung von Erschütterungen aus dem Schienenverkehr sind in der Normenreihe 45672 [2] festgelegt.

Im Rahmen dieses Gutachtens erfolgte eine Abschätzung (Prognose) der möglichen Immissionen aus dem Verkehr auf der geplanten U5 Ost anhand von drei unterschiedlichen Prognoseansätzen. Da sie weitgehend zu denselben Ergebnissen führten, wurden schwerpunktmäßig die Ergebnisse unter Anwendung der DB-Richtlinie 820.2050 [8] für eine Bewertung herangezogen. Diese Richtlinie geht von einem Erschütterungsspektrum vor einem Gebäude und von „Übertragungsfunktionen“ zwischen dem Bodenpunkt und den Gebäudefußböden aus. Unterschieden wird hierbei zwischen Holz- und Betondecken.

Anhand dieser beiden Datensätze (Bodenerschütterungen und Gebäudeübertragung) können dann die Immissionen (Erschütterungen) abgeschätzt werden. Für die Bodenspektren wurde auf aktuelle Erschütterungsmessungen in Hamburg an der U4 zurückgegriffen. Für die Erschütterungsausbreitung im Boden wurden weitgehend die Festlegungen in DIN 4150-1 [1] herangezogen. Die entsprechenden Gleichungen wurden leicht modifiziert mit den Ergebnissen von Ausbreitungsmessungen in Hamburg an einer oberirdischen U-Bahn-Strecke. Mit diesen beiden Datensätzen bzw. Berechnungsansätzen wurden dann für verschiedene (horizontale) Abstände zwischen Tunnel und Gebäude die Erschütterungsspektren vor den Gebäuden abgeschätzt. Die Abschätzung der Bodenspektren erfolgte jeweils in Abständen von 5 m bis zu einer Entfernung von 30 m (0 m bis 5 m, 5 m bis 10 m usw.). Der Abstand „0 m“ beinhaltet auch eine Unterfahrung der Gebäude.

In der DB-Richtlinie sind, je nach Deckeneigenfrequenz, unterschiedliche Übertragungswerte festgelegt. Da die Deckeneigenfrequenzen von vielen Parametern abhängen (u.a. Deckenabmessungen, Einbindung der Decken in die Wände, Deckenwerkstoff und Möblierung) und diese im Einzelfall nicht bekannt sind, wurde jeweils der sich ergebende maximale Immissionswert für die weitere Bewertung herangezogen. Diese Vorgehensweise führt in vielen Fällen zu einer Überschätzung der zu erwartenden Immissionen, somit liegen die Ergebnisse auf der sicheren Seite im Hinblick auf die mögliche Betroffenheit der Anwohner.

2.2.2 Ergebnis

Die Abschätzung der zu erwartenden Immissionen in den Gebäuden oberhalb und neben der neuen U-Bahn-Linie U5 Ost ergab zusammenfassend folgende Ergebnisse:

1. In vielen Teilabschnitten ist der Einsatz einer Minderungsmaßnahme (z.B. Unterschottermatte) erforderlich. Um häufige Steifigkeitsschwankungen infolge der Maßnahme zu vermeiden, wird empfohlen, auf beiden Tunnelabschnitten eine solche vorzusehen.
2. In der Regel reicht eine Unterschottermatte mit einer mindernden Wirkung (Einfügedämmung) von im Mittel 15 dB im Frequenzbereich oberhalb von ca. 25 Hz aus (diese wird hier mit USM1 bezeichnet).
3. In einigen Abschnitten, insbesondere bei der Unterfahrung von Gebäuden oder im horizontalen Abstand von weniger als 5 m bis 10 m ist eine Matte mit einer

höheren Einfügedämmung erforderlich. In dem oben genannten Frequenzbereich eine Minderung von im Mittel etwa 20 dB (sie wird hier mit USM2 bezeichnet).

4. Nach Rohbaufertigstellung der Tunnelabschnitte ist die Prognose anhand von lokalen Messungen zu überprüfen. Folgende Messungen werden empfohlen:
 - a. Messung von Eingangs- und Übertragungsadmittanzen* im Tunnel sowie, falls möglich, zwischen der Tunnelsohle und ausgewählten benachbarten Gebäuden. Diese Messungen können mit Hilfe eines Prüfhammers (Vorschlaghammer mit eingebautem Kraftaufnehmer) erfolgen.

* Die Admittanz Y_{mn} beschreibt das Verhältnis zwischen der angeregten Schwinggeschwindigkeit v_m , z.B. Tunnelsohle oder Fußboden in einem benachbarten Gebäude, und der anregenden Kraft F_n , z.B. auf der Tunnelsohle oder an der Tunnelwand.

- b. Ausbreitungsmessungen von der Tunnelsohle in die Umgebung (Boden, Gebäude). Hierzu ist ein geeigneter Erreger einzusetzen (siehe z.B. Anhang C der DIN SPEC 45673-3 [3] von 2014-04)
- c. Vergleich der Ergebnisse mit vorliegenden Ergebnissen aus anderen Tunneln [24].

In Abschnitt 9 ist eine Angabe zur empfohlenen Schutzmaßnahme für jedes Gebäude im Umfeld der U5 Ost enthalten.

3 Beschreibung der Maßnahme

Gegenstand der Planung ist eine neue, ca. 6 km lange U-Bahn-Linie mit fünf Haltestellen zur Erschließung der Stadtteile Bramfeld, Steilshoop, Barmbek Nord und City Nord (U5 Ost), **Bild 1**. Die U5 Ost wird abweichend zum Bestandsnetz als vollautomatisches System GoA 4 (Grade of Automation 4) mit Bahnsteigtüren betrieben.

Die U5 Ost führt von der City Nord in Tunnellage mit einer Mittelbahnsteighaltestelle City Nord (vorläufige Endhaltestelle) und nördlich anschließender Kehrgleis- und Abstellanlage in Richtung U-Bahn Sengelmannstraße (Bestandshaltestelle), an der zur vorhandenen Linie U1 umgestiegen werden kann. Die Emissionen im oberirdischen Teil der Strecke im Bereich der Haltestelle Sengelmannstraße sind nicht Gegenstand dieser Stellungnahme. Die Weiterführung der U5 Ost in Richtung Osten erfolgt über ein Brückenbauwerk Sengelmannstraße und ein anschließendes Überwerfungsbauwerk U1/U5. Dieser Bauabschnitt wird in offener Bauweise hergestellt. Ab dem so genannten „Gleisdreieck“ südlich der Feuerbergstraße liegen der weitere Streckenverlauf und die drei weiteren Haltestellen unterirdisch. Vor dem Kreuzungspunkt der U5 Ost mit der S-Bahnstrecke beginnt der Schildvortrieb mit einer Tunnelröhre (2-Gleis Schild). Der Schildvortrieb wird für die Herstellung des Streckentunnels bis zum Streckenende in Bramfeld durchgeführt.

Die in Richtung Osten weiterverlaufende Strecke verbindet die neuen, in offener Bauweise herzustellenden, unterirdischen Haltestellen Nordheimstraße, Steilshoop in der Gründgensstraße liegend und die Endhaltestelle Bramfeld im Bereich des Bramfelder Dorfplatzes. Hinter der Haltestelle Bramfeld liegt in Richtung Heukoppel eine unterirdische Kehrgleis- und Abstellanlage, die bis zum Zielschacht im Bereich Heukoppel/Jahnkeweg im Schildvortrieb hergestellt wird. Um die Schildvortriebsmaschine zu bergen und des Weiteren den erforderlichen Notausgang am Ende der Keh- und Abstellanlage zu errichten, wird der Zielschacht in offener Bauweise erstellt. Auf den Streckenabschnitten zwischen den Haltestellen werden ebenfalls Notausgangsbauwerke in offener Bauweise errichtet.



Bild 1: Übersicht Trassenverlauf U5 Ost

4 Aufgabenstellung und zu berücksichtigende Parameter

4.1 Erschütterungen und Sekundärschall

Für den Einwirkungsbereich der planfestzustellenden unterirdischen Streckenabschnitte ist eine erschütterungstechnische Untersuchung unter Einbezug des sekundären Luftschalls zu erstellen. Es sind die möglichen Auswirkungen aus dem Betrieb der U-Bahn auf die im Einflussbereich der Strecke vorhandenen oder geplanten Gebäude zu ermitteln und darzustellen.

Die erforderlichen Untersuchungen sind in einer Gesamtbetrachtung zusammenzuführen, die u.a. als Fachbeitrag zur Umweltverträglichkeitsstudie (UVS) aufgenommen wird.

Alle möglichen Betroffenheiten sind darzustellen. Zur Einhaltung der Anforderungen gemäß Planfeststellung ist der Bedarf von Maßnahmen zum Erschütterungsschutz aufzuführen. Die infrage kommenden Maßnahmen zum Erschütterungsschutz einschließlich der Wirkungsweise und deren Dauerhaftigkeit sind aufzuzeigen und zu prognostizieren.

Dabei sind besonders die folgenden Aspekte zu berücksichtigen:

- Einhaltung der Anhaltswerte für Erschütterungen und Sekundärschall in den der Linie angrenzenden Gebäuden,
- Schutz von Gebäuden und Anlagen vor schädigenden Erschütterungseinwirkungen,
- Gewährleistung der Funktion von etwaigen schwingungssensiblen Geräten.

Der Umfang und die Bearbeitungstiefe haben sich an den Erfordernissen im jeweiligen Einzelfall auszurichten. Zu berücksichtigen ist dabei der Einsatz des geplanten U-Bahn-Fahrzeugtyps (DT6-A). Als Grundlage dient zum jetzigen Zeitpunkt der Fahrzeugtyp DT5 (Achslasten und unabgefederte Radsatzmassen).

Hinweis: Die akustischen Einwirkungen auf die Fahrgäste in den Fahrzeugen und auf den unterirdischen Haltestellen sind nicht Gegenstand dieser Untersuchungen.

4.2 Oberbau

Vorgesehen sind ein Schotteroberbau gemäß RUO [16], Teil 3 mit Holzschwellen und in der Regel zusätzlich der Einbau von Unterschottermatten zur Minderung der Erschütterungsemissionen. Für die Befestigung der Fahrschienen mit dem Schienenprofil 49E1 (S49) sind Spannklemmen auf Rippenplatten (KS-Oberbau) vorgesehen. Als Stromschienenkonstruktion wird das System STR40 eingebaut.

4.3 Geschwindigkeiten, Trassierungsparameter und Streckenbezeichnungen

Im Bereich der Strecke und im Bereich der Haltestellen mit Seitenbahnsteig wird ein Gleisabstand von 3,40 m angesetzt.

Die Entwurfsgeschwindigkeit beträgt:

in durchgehenden Hauptgleisen: 80 km/h

in Gleisverbindungen : 40 km/h im freien Streckenbereich,

sowie vor und hinter Haltestellen

in Abstellanlagen: 20 km/h

Weitere wesentliche Trassierungsparameter sind:

Maximale Längsneigung: 40 ‰, in Ausnahmefällen 50 ‰ (Bestandsbereiche)

Minimaler Bogenradius: 300 m in durchgehenden Hauptgleisen

Übergangsbogen: Klothoide

Die Streckenbezeichnungen der Gleise sind für die Vorplanung wie folgt festgelegt:

Gleis 1: Bramfeld – City Nord

Gleis 2: City Nord – Bramfeld

4.4 Fahrzeuge

Nach aktueller Planung sollen auf der U5 Ost automatisch fahrende DT6-Fahrzeuge (DT6-A) eingesetzt werden, **Bild 2**. Die wesentlichen Daten für dieses neue U-Bahnfahrzeug werden im Folgenden dargestellt.

Das DT6-A-Grundkonzept ist ein ca. 40 m langes, durchgängig begehbares, regelspuriges Zweirichtungsfahrzeug mit 4 Wagenkästen und 5 Drehgestellen sowie bahnsteigseitig jeweils 6 Fahrgastraum-Doppeltüren.



Bild 2: Fahrzeug DT6-A – Grundkonzept

Im Fahrgastverkehr sollen Züge eingesetzt werden, die aus maximal 3 DT6-A-Fahrzeugen bestehen und somit eine maximale Zuglänge von knapp 120 m Länge erreichen werden. Darüber hinaus sollen für die DT6-A-Fahrzeuge folgende Werte gelten:

- Fahrzeuglänge über Kupplung: ca. 40 m,
- Zulässige Höchstgeschwindigkeit: 80 km/h,
- Dienstmasse (Fahrzeug ohne Fahrgäste): ca. 62 t,
- Maximale Nutzlast: ca. 38 t,
- Zulässige Radsatzlast: 10 t.

4.5 Verkehrszahlen

Geplant sind folgende Verkehrszahlen:

Tags	(06:00 Uhr bis 22:00 Uhr):	1280 Fahrten (je 640 pro Richtung)
Nachts	(22:00 Uhr bis 06:00 Uhr):	512 Fahrten (je 256 pro Richtung)

Die Anzahl der Verkehrszahlen beeinflussen die Beurteilungswerte für die Erschütterungen und den Sekundärschall.

5 Erschütterungs- und Sekundärschallschutz - Überblick

5.1 Allgemeine Einführung für unterirdische Verkehrsanlagen

Schall- und Erschütterungsemissionen und -immissionen entstehen

- beim Bau von unterirdischen Verkehrsanlagen (Tunnel),
- beim späteren Regelbetrieb auf diesen Verkehrsanlagen und
- ggfs. bei Instandhaltungsmaßnahmen (z.B. Oberbauerneuerung).

Diese Emissionen (Schwingungen) werden über den Tunnel und den umgebenden Boden in die Gebäudefundamente übertragen, **Bild 3** und **Bild 4**. Sie können dann in Gebäuden als störende Immissionen von Anwohnern wahrgenommen werden und/oder sich schädlich auf Gebäude und „sensible“ Geräte in den Gebäuden auswirken. Anwohner können diese Immissionen sowohl als Erschütterungen (1Hz (4Hz) bis 80Hz nach DIN 4150-2) als auch als Sekundärschall (Terzen etwa: 16Hz bis 250Hz, vorrangig aber von 20Hz bis 80Hz) wahrnehmen. Der dominante Frequenzbereich wird, sowohl für die Deckenschwingungen als auch für den Sekundärschall, vorwiegend von den Eigenfrequenzbereichen der angeregten Gebäudestrukturen und den in den Tunnel über den Oberbau eingeleiteten Schwingungen (Eigenfrequenzen des Oberbaus) bestimmt.

Sekundärschall entsteht durch die Luftschallabstrahlung der angeregten Raumbegrenzungsflächen. Weitere Effekte, z.B. Klirren von Glasscheiben oder Gläsern infolge des Erschütterungseintrags, können nicht dem Sekundärschall zugeordnet werden, da sie nicht zu prognostizieren sind. Diese Immissionen sind abhängig von der individuellen Wohnungseinrichtung, ihr Frequenzinhalt liegt in der Regel oberhalb der oben genannten Frequenzbereiche. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass diese Phänomene bei Einhaltung der Anhaltswerte gemäß DIN 4150-2 nicht oder nur in geringem Maße auftreten. Auf das Gebäude und die sensiblen Geräte wirken nur die Schwingungen (Erschütterungen) ein.

Nach derzeitigen Erkenntnissen ist durch den Schienenverkehr auf Tunnelstrecken eine Beschädigung der Gebäude nicht zu erwarten, die angeregten Schwingungsamplituden sind hierfür zu klein (s.a. DIN 4150-3). U.U. können jedoch empfindliche Geräte oder Prozesse in ihrer Funktion durch die erzeugten Schwingungen gestört werden. Entsprechende Gebäude sind somit gegebenenfalls zu lokalisieren.

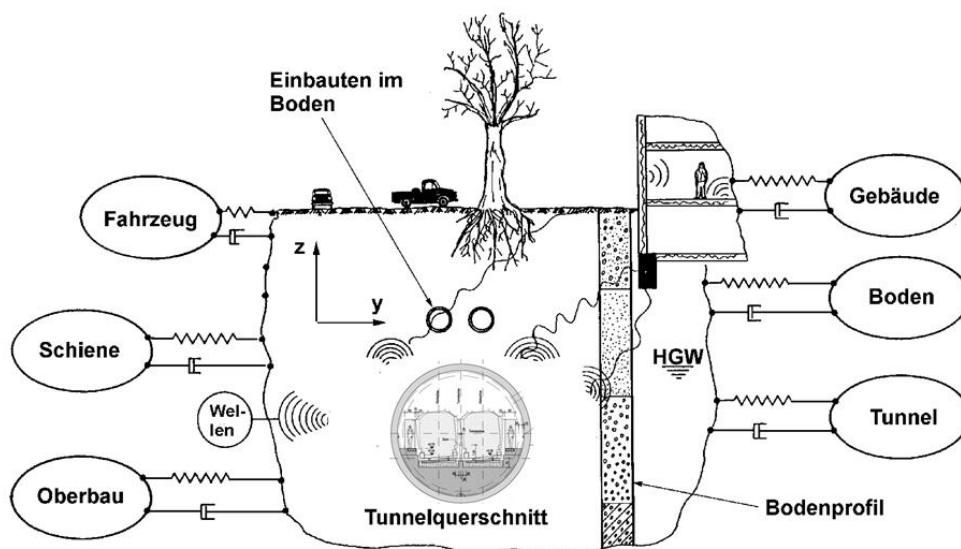


Bild 3: Schwingungsausbreitung und deren Einflussparameter

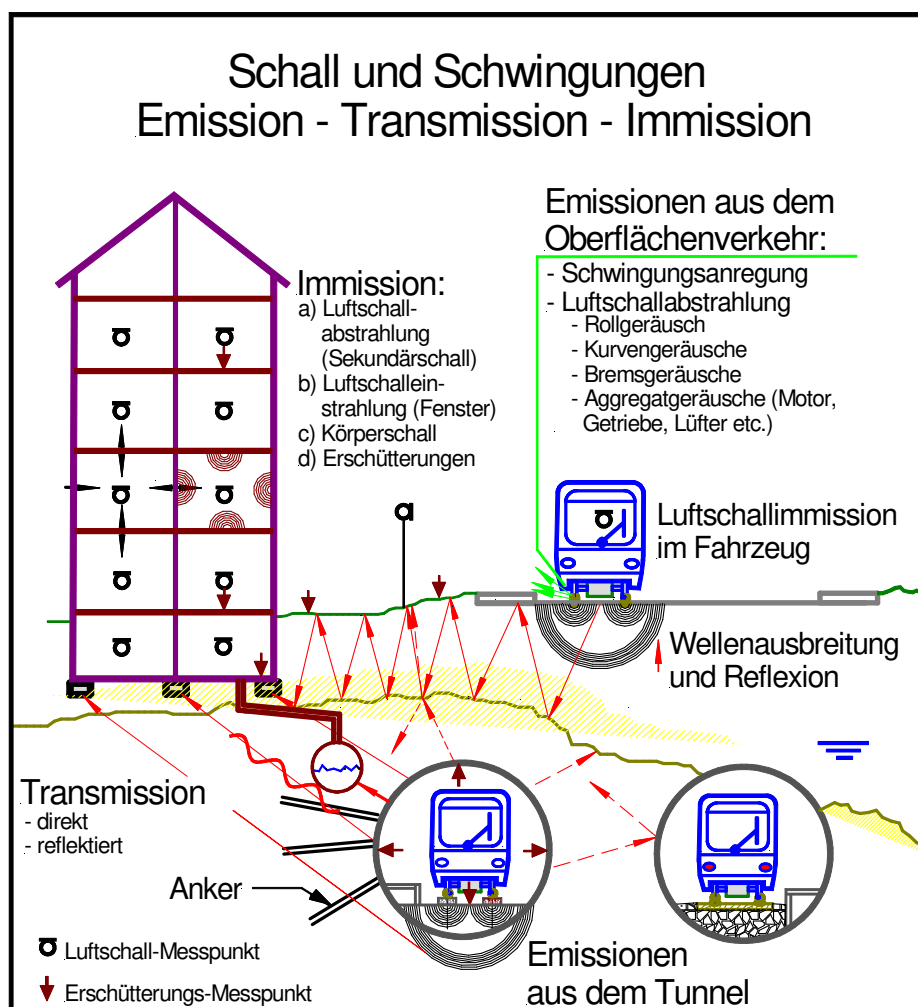


Bild 4: Ausbreitung der Schwingungen aus dem Tunnel in benachbarte Gebäude.

5.2 Erschütterungsimmissionen

5.2.1 Bewertung

Zur Beurteilung der Erschütterungseinwirkungen wird das Verfahren nach DIN 4150, Teil 2 (Einwirkung auf Menschen in Gebäuden) herangezogen. In **Tabelle 1** sind die empfohlenen Anhaltswerte gemäß DIN 4150, Teil 2 zusammengefasst.

Tabelle 1: KB_F -Anhaltswerte nach DIN 4150-2 [1]

Zeile	Einwirkungsort	Tags			Nachts		
		A_u	A_o	A_r	A_u	A_o	A_r
1	Einwirkungsorte, in deren Umgebung nur gewerbliche Anlagen und gegebenenfalls ausnahmsweise Wohnungen für Inhaber und Leiter der Betriebe sowie für Aufsichts- und Bereitschaftspersonen untergebracht sind (vergleiche Industriegebiete BauNVO, § 9).	0,4	6	0,2	0,3	0,6	0,15
2	Einwirkungsorte, in deren Umgebung vorwiegend gewerbliche Anlagen untergebracht sind (vergleiche Gewerbegebiete BauNVO, § 8).	0,3	6	0,15	0,2	0,4	0,1
3	Einwirkungsorte, in deren Umgebung weder vorwiegend gewerbliche Anlagen noch vorwiegend Wohnungen untergebracht sind (vergleiche Kerngebiete BauNVO, § 7, Mischgebiete, § 6, Dorfgebiete BauNVO, § 5).	0,2	5	0,1	0,15	0,3	0,07
4	Einwirkungsorte, in deren Umgebung vorwiegend oder ausschließlich Wohnungen untergebracht sind (vergleiche reines Wohngebiet, BauNVO § 3, allgemeine Wohngebiete BauNVO, § 4, Kleinsiedlungsgebiete BauNVO, § 2).	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 unter Zeile 1 bis 4 ausschließlich nach dem Gesichtspunkt der Schutzbedürftigkeit gegen Erschütterungseinwirkungen vorgenommen ist, die Gebietseinteilung in der BauNVO aber auch anderen planerischen Erfordernissen Rechnung trägt.

Ergänzende Erläuterungen hierzu:

A_u – unterer Anhaltswert, liegen die vor Ort ermittelten KB_{Fmax} -Werte unter diesem Wert, dann werden die Anforderungen der Norm eingehalten. Erschütterungswerte $< 0,1$ werden kaum wahrgenommen (= Föhlschwelle).

A_o – oberer Anhaltswert,

A_r – Anhaltswert zur Beurteilung mit der Schwingstärke KB_{FT} , in die die Anzahl der Ereignisse (Zugfahrten) eingeht (mit der Zunahme der Zugfahrten nimmt der KB_{FT} -Wert zu).

Grundsätzlich bezieht sich diese Art der Erschütterungsbewertung auf Messungen in den Gebäuden unter Einwirkung von Zugvorbeifahrten. Anhand einer statistischen Auswertung von solchen Messungen in anderen vergleichbaren Situationen ist auch eine Prognose für eine Neubaustrecke möglich, die jedoch immer nur eine mehr oder

weniger grobe Abschätzung sein kann. Diese Aussage gilt sinngemäß auch für den Sekundärschall. Bessere Prognoseergebnisse sind durch Messungen vor Ort, z.B. Ermittlung der Übertragung vom Boden in die Gebäude, möglich.

In diesem Gutachten wurden für die Prognose einer Schutzmaßnahme die Werte der Zeilen 2, 3 und 4 der oben dargestellten Tabelle herangezogen.

*Hinweis: Nach DIN 4150-2, Abschnitt 6.5.3.2 gilt „Für unterirdischen Schienenverkehr jeder Art gelten die Anhaltswerte A_u und A_r nach Tabelle 1“ (hier dargestellt in **Tabelle 1**). Nach Abschnitt 6.5.3.3 gelten für den oberirdischen Schienenverkehr des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) „um den Faktor 1,5 angehobene A_u und A_r nach Tabelle 1“.*

5.2.2 Beispiel für eine Bewertung nach DIN 4150-2

Aus gemessenen KB_{FTi} -Werten (= Taktmaximalwert je einer Vorbeifahrt) wird der Taktmaximal-Effektivwert KB_{FTm} ermittelt:

$$KB_{FTm} = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N KB_{FTi}^2} \quad (1)$$

Mit N = Anzahl der Fahrten während der Messzeit.

Zur Beurteilung ist, wenn $KB_{Fmax} > A_u$, die Beurteilungs-Schwingstärke KB_{FTr} zu ermitteln und mit den Anhaltswerten A_r gemäß **Tabelle 1** zu vergleichen (siehe Gleichung (A.4) der Norm).

$$KB_{FTr} = KB_{FTm} \sqrt{\frac{M}{N_r}} \quad (2)$$

Mit

M = Anzahl der Ereignisse (Gesamtzahl aller Fahrten tags und nachts)

N_r = Anzahl der 30 Sekunden Takte Tag ($120 \cdot 16 = 1920$) und Nacht ($120 \cdot 8 = 960$)

In der folgenden Tabelle sind aus gemessenen KB_{FTi} -Werten (U-Bahnstrecke) der KB_{FTm} - und die beiden KB_{FTr} -Werte für den Tag und die Nacht beispielhaft dargestellt. Der absolute Maximalwert KB_{Fmax} beträgt in diesem Beispiel 0,203, er überschreitet somit in einigen Fällen die unteren Anhaltswerte A_u gemäß Tabelle 1. Die KB_{FTr} -Werte wurden mit den unter Abschnitt 4.5 genannten Verkehrszahlen (M) berechnet.

Messwerte, Beispiel	$KB_{FTi} =$	0,118	0,101	0,15	0,18	0,13	0,203	0,163	0,1	0,14	0,18
Auswertung mit den Gleichungen (1) und (2):											
	$KB_{FTm} =$	0,150									
Fahrten M											
1280	$KB_{FTr,Tag} =$	0,122									
512	$KB_{FTr,Nacht} =$	0,110									

5.3 Sekundärschallimmissionen

5.3.1 Bewertung

Derzeit existiert keine verbindliche Festlegung (Gesetz, Norm, Richtlinie) für Grenz- oder Anhaltswerte zur Beurteilung des Sekundärschalls beim Schienenverkehr. Für die Beurteilung in den betroffenen Gebäuden an der U5 Ost wird eine Beurteilung in Anlehnung an die Festlegungen in der TA Lärm herangezogen:

Für eine Körperschallübertragung in Gebäuden – wie beim Schienenverkehr – ist in der Verwaltungsvorschrift TA Lärm [7] folgende Festlegung enthalten:

"6.2 Immissionsrichtwerte für Immissionsorte innerhalb von Gebäuden

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

- tags 35 dB(A)
- nachts 25 dB(A).

Einzelne kurzzeitige Geräuschspitzen dürfen die Immissionsrichtwerte um nicht mehr als 10 dB(A) überschreiten. Weitergehende baurechtliche Anforderungen bleiben unberührt."

Anmerkung 1: Als Immissionsrichtwert nach TA Lärm [7] wird der L_{pAeq} -Pegel herangezogen.

Anmerkung 2: Kurzzeitige Geräuschspitzen im Sinne dieser Technischen Anleitung sind durch Einzelereignisse hervorgerufene Maximalwerte des Schalldruckpegels, die im bestimmungsgemäßen Betriebsablauf auftreten. Kurzzeitige Geräuschspitzen werden durch den Maximalpegel L_{pAFmax} des Schalldruckpegels $L_{pAF}(t)$ beschrieben.

Anmerkung 3 (Zitat aus TA Lärm): „Der Beurteilungspegel L_r ist der aus dem Mittelungspegel L_{pAeq} des zu beurteilenden Geräusches und gegebenenfalls aus Zu- und Abschlägen gemäß dem Anhang für Ton- und Informationshaltigkeit, Impulshaltigkeit und für Tageszeiten mit erhöhter Empfindlichkeit gebildete Wert zur Kennzeichnung der mittleren Geräuschbelastung während jeder Beurteilungszeit. Der Beurteilungspegel L_r ist diejenige Größe, auf die sich die Immissionsrichtwerte nach Nummer 6 (der TA Lärm) beziehen“.

Anmerkung 4: Für die Beurteilung des Sekundärschalls der U5 Ost wird $L_r = L_{pAeq}$ gesetzt (= keine Zuschläge).

5.3.2 Beispiel für eine Sekundärschallbewertung nach TA Lärm

Bild 5 zeigt ein Beispiel für gemessene Sekundärschallpegelverläufe $L_{pAF}(t)$ an drei Messpunkten (Erdgeschoss) neben einer 2-gleisigen U-Bahnstrecke mit einem Rechtecktunnel. Die hier aufgetretenen starken Schallpegelschwankungen können weitgehend auf die Raumeigenschaften und deren Einrichtung sowie auf die Anregung (= unterschiedliche Radfahrflächenzustände) zurückgeführt werden.

Aus den in **Bild 5** dargestellten Schalldruck-Pegelverläufen wurden die jeweiligen Maximalpegel $L_{pAFmax,i}$ und für zwei unterschiedliche Zeiten ($T_M = 6$ s und $T_p = 4$ s) die jeweiligen Mittelungspegel $L_{pAeq,i}$ ermittelt. Wird davon ausgegangen, dass die in Bild 5 dargestellten Pegelwerte für den Sekundärschall repräsentativ für ein Gebäude sind, dann ergibt sich für eine Bewertung der in Tabelle 2 dargestellte Zusammenhang.

Da auf der Strecke U5 Ost immer derselbe Fahrzeugtyp (DT6-A) verkehren wird, ist eine Unterscheidung nach Zugarten nicht erforderlich, daher wurde in dem Beispiel der Tabelle 2 die Bewertung nur für einen Fahrzeugtyp durchgeführt.

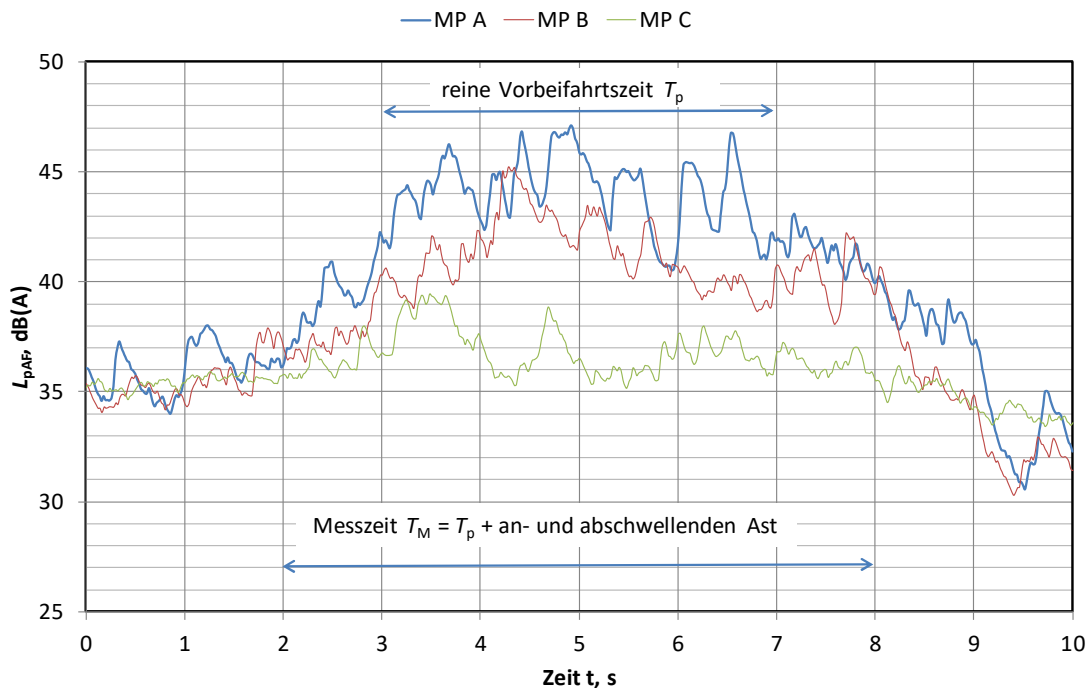


Bild 5: Beispiel für die Ergebnisse einer Sekundärschallmessung, dargestellt als $L_{pAF}(t)$, in einem Gebäude an einer U-Bahn-Strecke, Messung in drei Räumen im Erdgeschoss. MP = Messpunkt

Tabelle 2: Beispiel für eine Bewertung des Sekundärschalls nach TA Lärm anhand von drei Messwerten, Maximalpegel $L_{pAFmax,i}$ und über die Tag- (T) und Nachtzeit (N) gemittelte Pegel $L_{pAeq,T}$ und $L_{pAeq,N}$. Alle Pegel sind A-bewertet (in dB(A)).

Messpunkt (MP)	Fahrten	Messwert			Immissionsrichtwert T/N	Messwert	Messwert	
		$L_{pAFmax,i}$	T	N	L_{pAFmax}	$L_{pAeq,i,TM}$ $T_M = 6 \text{ s}$	$L_{pAeq,i,Tp}$ $T_p = 4 \text{ s}$	
A	1	47,1	>	>	45/35	43,4	44,4	
B	1	45,2	>	>	45/35	40,9	41,6	
C	1	39,5	<	>	45/35	36,9	37,1	
MW energietisch=		44,9	<	>	45/35	41,2	42,0	
Beispiel, Takte					Immissionsrichtwert T/N	Beurteilungspegel L_r		
Tag	Fahrten				$L_{pAeq,T}$	$L_{r,T} = L_{pAeq,T}$		
2,5 min	768				35	30,2	29,2	<
5 min	384				35	27,2	26,2	<
10 min	192				35	24,2	23,2	<
Nacht					$L_{pAeq,N}$	$L_{r,N} = L_{pAeq,N}$		
5 min	192				25	27,2	26,2	>
10 min	96				25	24,2	23,2	<
20 min	48				25	21,1	20,2	<

Erläuterungen zu Tabelle 2:

Begriff	Erläuterung	Formel, Anmerkung
Fahrten Tag/Nacht	Gesamte Anzahl von Fahrten in beiden Richtungen pro Tag/Nacht	$Fahrten_{T/N} = \left(\frac{60}{Takt}\right) * 2 * t_{T/N}$
MW: energetisch gemittelt	Energetischer Mittelwert $L_{m,e}$ L_i Einzelpegel ($L_{pAeq,i}$ oder $L_{pAFmax,i}$) einer Vorbeifahrt n Anzahl aller (gemessenen) Einzelpegel	$L_{m,e} = 10 * \lg\left(\frac{1}{n} \sum_1^n 10^{0,1 * L_i}\right)$ Für die Prognose wird davon ausgegangen, dass alle Vorbeifahrten je Gebäude denselben Mittelungs- und Maximalpegel erzeugen.
$L_{pAeq,Tn}$	Äquivalenter Dauerschalldruckpegel, A-bewertet. Dieser Wert kann sowohl über die reine Vorbeifahrtszeit T_p als auch über eine erweiterte Messzeit T_M , die um den an- und absteigenden Ast (Bild 5) erweitert wird, ermittelt werden.	$L_{pAeq,Tn} = 10 * \lg\left(\frac{1}{Tn} \int_0^{Tn} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt\right)$ $p_0 = 20 \mu Pa$
L_{pAFmax}	Maximalpegel, A- und F- (fast)-bewertet	
Immissionsrichtwert L_{pAeq}	Anhaltswert für den Tages- und Nachtmitlungspegel, der gemäß TA Lärm nicht überschritten werden soll	Siehe unter 5.3.1
Immissionsrichtwert L_{pAFmax}	Anhaltswert für den Maximalpegel, der gemäß TA Lärm nicht überschritten werden soll	Siehe unter 5.3.1
Mittelungspegel Tag/Nacht = Beurteilungspegel L_r	Aus den (gemittelten) Einzelpegeln ermittelter Mittelungspegel für den Tag und für die Nacht. x T_p oder T_M y_T Sekunden pro Tag = 57600 s y_N Sekunden pro Nacht = 28800 s Zugfahrten = Anzahl für Tag N_T und die Nacht N_N	$L_{pAeq,T} = L_{m,e} + 10 * \lg\left(\frac{x}{y_T} * N_T\right)$ $L_{pAeq,N} = L_{m,e} + 10 * \lg\left(\frac{x}{y_N} * N_N\right)$

5.4 Einfluss der A-Bewertung

Durch die A-Bewertung des sekundären Luftschalls werden die Pegel der niedrigen Frequenzen (<200 Hz) besonders stark beeinflusst. **Bild 6** zeigt die Dämpfung durch die A-Bewertung und die dominanten Frequenzbereiche für:

- Sekundärschall nach Entwurf DIN 45672-1 [2] (nur die obere Terzmittenfrequenz von 250 Hz ist dort festgelegt) und
- Primärschall (nach 16. BImSchV)

sowie die Frequenzbereiche für die Erschütterungen (diese werden nicht A-bewertet) nach DIN 4150-2 (Betroffenheiten für Menschen in Gebäuden) und nach DIN 4150-3 (für die Einwirkung auf die Gebäude).

In Bild 6 sind der gesamte hörbare Frequenzbereich, ca. 16 Hz bis 16 kHz (20 kHz), und der Infraschallbereich, < 16 Hz, dargestellt.

Die A-Bewertung gibt annähernd die Hörempfindlichkeit des (mittleren) menschlichen Ohrs wider. Sie ist international festgelegt und sie wird auch auf den Sekundärschall

angewendet. In Bild 6 ist die A-Bewertung durch die blauen Säulen und die rote Linie dargestellt. Unterhalb von ca. 200 Hz werden somit mit dieser Bewertung die vorhandenen Schalldruckpegel stark gedämpft, je geringer die Frequenz, desto höher die Dämpfung (Minderung). Da in der Regel die dominanten Sekundärschallpegel genau in diesem Frequenzbereich auftreten, folgt eine hohe Dämpfung der gemessenen Sekundär-Schalldruckpegel. Berücksichtigt wird dies durch relativ geringe Anhaltswerte für den Sekundärschall im Vergleich zu dem Direktschall. Der Direktschall, dieser tritt beim oberirdischen Schienenverkehr besonders hervor, wird anhand der 16. BImSchV sowohl berechnet (Schall 03) als auch bewertet. Je nach Baugebiet und Tageszeit liegen die Immissionsgrenzwerte (Mittelungspegel) vor den Gebäuden und in Außenwohnbereichen zwischen 47 dB(A) und 59 dB(A) (nachts) und zwischen 57 dB(A) und 69 dB(A) (tags).

Neben der A-Bewertung sind in Bild 6 folgende Bereiche gekennzeichnet:

- Erschütt-1: Frequenzbereich zur Beurteilung der auf Menschen in Gebäuden einwirkenden Erschütterungsimmissionen (DIN 4150-2 bis 80 Hz),
- Erschütt-2: Frequenzbereich zur Beurteilung der auf Gebäude einwirkenden Erschütterungen (DIN 4150-3 bis 100 Hz),
- Sek-Schall: Typischer Frequenzbereich für den Sekundärschall, Verschiebungen der oberen und unteren Frequenzgrenzen in beide Richtungen sind möglich,
- 16. BImSchV: Frequenzbereich, der bei der Berechnung und Bewertung nach dieser Verordnung zu berücksichtigen ist,
- Hörbereich: Frequenzbereich, in dem ein (junger) Mensch Schallwellen wahrnehmen kann. Mit zunehmendem Alter sinkt die obere Frequenzgrenze.

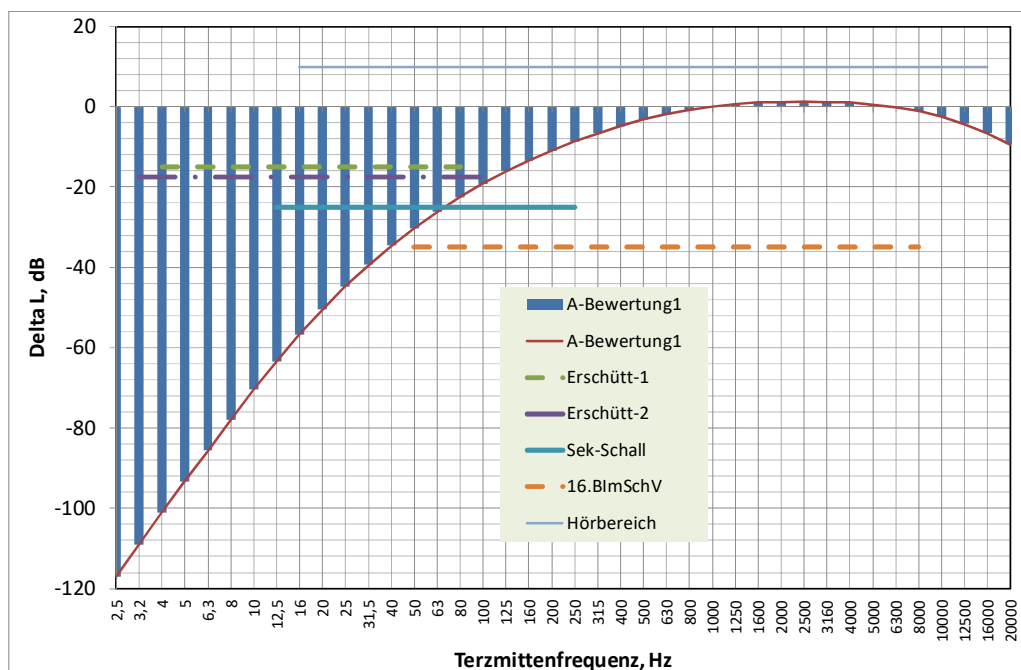


Bild 6: A-Bewertung und Frequenzbereiche für unterschiedliche Bewertungen

In Bild 7 ist die Auswirkung der A-Bewertung auf den Sekundärschall beispielhaft dargestellt. Während die unbewerteten Summenschallpegel (Addition aller Terz-Schall-druckpegel im betrachteten Frequenzbereich) zwischen etwa 60 dB und 68 dB liegen, ergeben sich für die A-bewerteten Pegel Werte zwischen etwa 32 dB(A) und 40 dB(A). In dem A-bewerteten Terz-Spektrum haben die beiden Terzen 63 Hz und 80 Hz die höchsten Pegel.

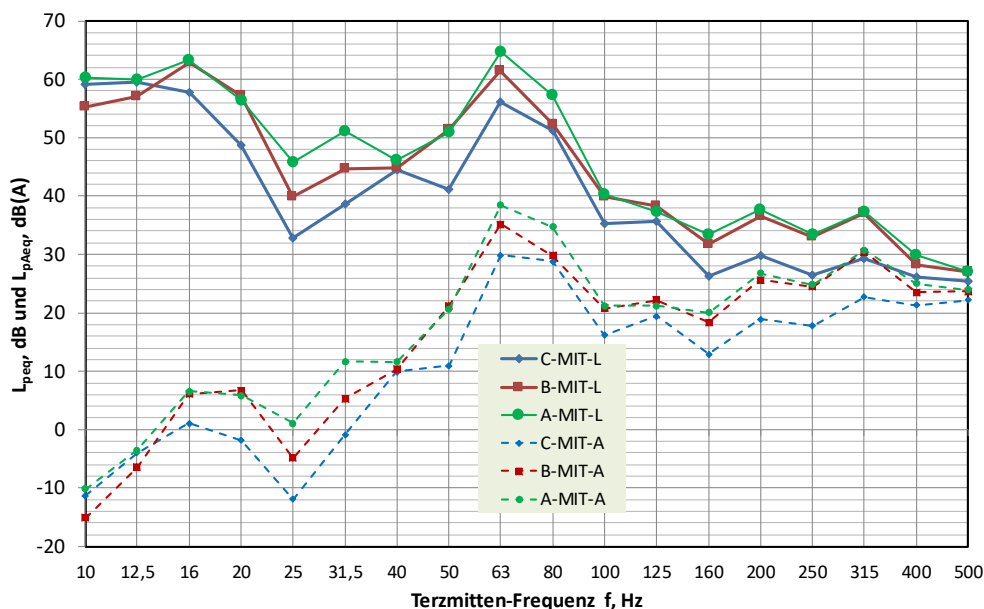


Bild 7: Wirkung der A-Bewertung (MIT-A) auf den in einem Gebäude aufgrund von einer U-Bahnvorbeifahrt in einem Tunnel gemessenen Sekundärschall (MIT-L) (3 Messpunkte A, B, C)

5.5 Zusammenhang zwischen Sekundärschall und Erschütterungen

Durch den Schienenverkehr (Betrieb) auf unterirdischen Strecken werden folgende Emissionsarten erzeugt, **Bild 4** [12]:

- Direktschall (ist nicht Gegenstand der Betrachtung in diesem Gutachten)
- Erschütterungen (in benachbarten Gebäuden),
- Sekundärschall (in benachbarten Gebäuden).

Im Gegensatz zu den zeitlich begrenzten Baumaßnahmen treten diese Emissionen und Immissionen solange auf, wie der Betrieb auf der Strecke durchgeführt wird.

Es besteht die Möglichkeit durch geeignete Maßnahmen die Schwingungsemissionen so weit zu mindern, dass sie zu keinen unzumutbaren Belästigungen¹ der in den benachbarten Gebäuden wohnenden und arbeitenden Menschen führen.

¹ In der Bewertung nach DIN 4150-2 wird von „erheblichen“ Belästigungen ausgegangen, die vermieden werden, wenn die Anhaltswerte nach Tabelle 1 der Norm eingehalten werden. Diese Werte sind in diesem Gutachten ebenfalls in der Tabelle 1 dargestellt.

Die Wirkung von Schall- (insbesondere Sekundärschall) und Erschütterungsimmissionen sind von den betroffenen Personen kaum zu trennen. Bei Messungen vor Ort werden in der Regel jedoch immer beide Messgrößen zusammen erfasst. Deckenschwingungen (Erschütterungen) werden mit Schwingungssensoren und der Sekundärschall mit Mikrofonen gemessen. Im Folgenden wird daher keine Unterscheidung beider Immissionsarten durchgeführt.

Sekundärschallimmissionen in den Gebäuden sind eine Folge der in die Gebäude übertragenen Schwingungen (Körperschall / Erschütterungen). Bei einer Prognose kann der Sekundärschall aus dem Körperschall abgeleitet werden. Daher ist zunächst der Körperschall zu bestimmen. Der Sekundärschall wird in der Regel bestimmt durch Frequenzanteile zwischen ca. 16Hz und 160Hz (250Hz), wobei die Bereiche um 40Hz in Altbauten und um 60Hz bis 80Hz bei neuen Häusern mit Betondecken in der Regel dominieren. Diese Angaben gelten für ein Schottergleis ohne ergänzende schwingungsmindernde Maßnahmen. Dies ist bei der Festlegung der zu treffenden Maßnahme - falls eine solche erforderlich sein sollte - zu berücksichtigen. In [8] wird der maßgebliche Frequenzbereich auf die Terzen 25Hz bis 80Hz begrenzt.

Erschütterungen, diese werden nach DIN 4150-2 anhand von KB_F -Werten bewertet, werden dagegen in der Regel von Schwingungen im Frequenzbereich von 8Hz bis 50Hz bestimmt. Laut Norm sind Erschütterungen Schwingungen im Frequenzbereich von 1Hz (4Hz) bis 80Hz. Der dominante Frequenzbereich hängt sehr stark von der Anregung, den Übertragungseigenschaften und insbesondere den Eigenfrequenzen f_{0D} der vorhandenen Decken in den Gebäuden ab.

5.6 Fahrbahnart

Für Immissionen aus dem Betrieb in Bahntunneln hat die Festlegung der Fahrbahnart einen maßgeblichen Einfluss auf die Akustik im Fahrzeug und auf Haltestellen (Einwirkung auf das Fahrpersonal und auf die Passagiere) sowie auf die Einleitung von Schwingungen über den Tunnel und Boden in benachbarte Gebäude.

Da die einzelnen Fahrbahnarten eine unterschiedliche bauliche Höhe erfordern, ist dies bereits bei der Festlegung des Tunneldurchmessers / der Tunnelhöhe zu berücksichtigen. Z.B. sind näherungsweise folgende Höhen zwischen Tunnelsohle und Schienenunterkante für drei typische Fahrbahnarten im Tunnel erforderlich:

- Klassischer Schotteroberbau: 25 cm Schotterhöhe +15 cm bis +20 cm für die Schwelle (inkl. Schienenbefestigungsmittel). Für eine Unterschottermatte, falls erforderlich, sind 2 cm bis 4 cm Höhe zusätzlich anzusetzen.
- Feste Fahrbahn: Je nach Ausführung 10 cm bis 15 cm hoher Längsbalken plus 4 cm bis 6 cm für ein (hoch) elastisches Schienenlager.
- Masse-Feder-System (möglich mit und ohne Schotterbettung): ca. 2 cm bis 6 cm für den Sockel (zum Ausgleich der rauen Tunnelsohle), ca. 4 cm bis 6 cm für die elastische Lagerung, zwischen 40 cm und 80 cm (teilweise auch noch mehr) für die schwingende Masse, 3 cm für die Schienenbefestigung bei einer Festen Fahrbahn.

Diese Beispiele zeigen, dass je nach Fahrbahnart sehr unterschiedliche Tunnelhöhen erforderlich sein können.

Darüber hinaus entstehen für die verschiedenen Oberbauformen sehr unterschiedliche Kosten (Spanne: ca. 1 bis 5 zwischen klassischem Schotteroberbau / Feste Fahrbahn und einem „hochwirksamen“ Masse-Feder-System).

Je nach gewählter Oberbauart werden unterschiedliche Frequenzen in das Tunnelbauwerk (Unterbau) eingeleitet, z.B. in folgenden Bereichen [20 bis 25]:

- Schotter: um die 63Hz-Terz,
- Elastische Schienenlager bei einer Festen Fahrbahn: um die 50Hz-/63Hz-Terzen,
- Hoch elastische Schienenlager bei einer Festen Fahrbahn: um die 40Hz-/50Hz-Terzen,
- Unterschottermatten: um die 31Hz-Terz, evt. auch etwas tiefer bei einer sehr weichen Matte,
- Masse-Feder-Systeme: um die 12Hz-Terz, evtl. etwas tiefer bei einem schweren MF-System (große Masse, geringe Steifigkeit).

Die genauen Werte hängen immer von der konkreten Auslegung der Oberbauform ab, wobei sowohl das Fahrzeug (u.a. unabgefederte Radsatzmasse) als auch die Tunnelsohlenadmittanz $Y_{mn}(if)$ gewisse Einflüsse haben.

Die mechanische Admittanz beschreibt die Anregbarkeit einer Struktur (hier: Tunnel, Boden, Gebäude). Es gilt hierfür allgemein [26]:

$$Y_{mn}(if) = \frac{v_m(if)}{F_n(if)} \quad \text{in (m/s)/N} \quad (3)$$

Es wird unterschieden nach „Eingangsadmittanz“ und nach „Übertragungsadmittanz“ [14]. Die erstgenannte Größe beschreibt zum Beispiel die Anregbarkeit des Tunnels (Sohle, Wand) und die zweitgenannte Größe die Übertragung der Schwingungen in die benachbarten Gebäude. Je höher die Admittanz, umso leichter lässt sich eine Struktur anregen bzw. werden die Schwingungen im Boden / Gebäude übertragen.

6 Prognose von Erschütterungen und Sekundärschall

6.1 Generelle Vorgehensweise für eine Immissionsprognose

Zur Prognose von Erschütterungen und Sekundärschall aus dem Schienenverkehr sind u.a. folgende Normen und Richtlinien heranzuziehen (siehe Literatur unter Abschnitt 11):

- DIN 4150-1,
- VDI 3837,
- pr DIN ISO 14837-1,
- DB Richtlinie 820.2050.

Außerdem existieren mehrere weitere Ansätze zur Prognose. Im Prinzip sind sie alle ähnlich aufgebaut. Es gilt folgender prinzipieller Zusammenhang (VDI 3837):

$$L_{v_4}(f_{Tn}) = L_{v_1}(f_{Tn}) + L_{H_{1a}}(f_{Tn}) + L_{H_2}(f_{Tn}) + L_{H_3}(f_{Tn}) + L_{H_4}(f_{Tn}) \quad (4)$$

Bei Sekundärschall wird diese Gleichung noch ergänzt mit der Schallabstrahlung im Raum. Es folgt somit:

$$L_{LS}(f_{Tn}) = L_{v_4}(f_{Tn}) + L_{H_5}(f_{Tn}) \quad (5)$$

Mit

$L_{v_4}(f_{Tn})$	Immissionsspektrum Erschütterungen im Gebäude,
$L_{v_1}(f_{Tn})$	Emissionsspektrum, z.B. Tunnelsohle oder Tunnelwand,
$L_{H_{10}}(f_{Tn})$	Ausbreitung der Erschütterungen von Tunnelsohle/Tunnelwand zum Emissionspunkt im Boden,
$L_{H_2}(f_{Tn})$	Ausbreitung der Erschütterungen im Boden (vom Emissionspunkt Boden zu einem Bodenpunkt vor (oder neben) dem Gebäude,
$L_{H_3}(f_{Tn})$	Übertragung der Erschütterungen vom Boden auf das Gebäudefundament,
$L_{H_4}(f_{Tn})$	Übertragung der Erschütterungen vom Gebäudefundament zur Gebäudedecke. Hieraus ist der KB_{FTm} -Wert zur Erschütterungsbewertung abzuschätzen.
$L_{H_5}(f_{Tn})$	Luftschallabstrahlung der Decke (und der anderen Raumbegrenzungsflächen). Hieraus ist der Sekundärschallpegel $L_{pAeq,m}$ und/oder $L_{pAFmax,m}$ zur Sekundärschallbewertung abzuschätzen.
f_{Tn}	n-te-Terz (Terzmitten-Frequenz in Hz), für Erschütterungen 4Hz bis 63Hz, für Sekundärschall 12Hz (25Hz) bis 160Hz (250Hz). Aufgrund der A-Bewertung werden die Terzpegel unterhalb von 25Hz stark gedämpft, sie tragen daher nur in Ausnahmefällen, z.B. bei Holzbalkendecken mit sehr niedrigen Deckeneigenfrequenzen, noch etwas zum A-bewerteten Gesamtpegel bei.

Der Index „ H_i “ bezeichnet eine „Übertragungsfunktion“ zwischen zwei Punkten im Übertragungsweg von der Tunnelsohle (Tunnelwand) zur Gebäudedecke.

Eine theoretische Ermittlung der jeweiligen Übertragungsfunktion H_i ist für praktische Fälle nicht (bzw. nur mit einem sehr hohen Aufwand) möglich, es sind so viele Unwägbarkeiten zu berücksichtigen, die in der Regel nicht bekannt und auch nur schwer vor Ort zu ermitteln sind. Daher haben sich für die Praxis weitgehend „statistische Modelle“ für eine Prognose etabliert, die in einzelnen Fällen sowohl durch Messungen vor Ort als auch durch theoretische Überlegungen, insbesondere für die Wirkung von schwingungsmindernden Oberbauformen (Einfügedämmung), ergänzt werden.

- Statistische Modelle beruhen auf der statistischen Auswertung von Messergebnissen für bestimmte Anregungs- und Ausbreitungssituationen. Für Tunnelstrecken bedeutet das z.B., dass Messergebnisse aus vergleichbaren Situationen herangezogen werden. In der Praxis haben sich z.B. Modelle als durchaus wirksam gezeigt, die auf den horizontalen Abstand zwischen Tunnelwand und Gebäudeaußenwand sowie auf eine grobe Bewertung des dazwischen vorhandenen Bodens (Fels, Lockerboden) und der Art des betroffenen Gebäudes (Ein- oder Mehrfamilienhaus, Art der Gebäudedecke: Holzdecke oder Betondecke)

beruhen. Solche Modelle können sowohl auf die Anwendung von Einzahlwerten, z.B. KB_{FTm} und / oder L_{pAFmax} bzw. $L_{pAeq,m}$, als auch anhand von Terzspektren aufgebaut sein. Terzspektren können sowohl für alle in Gleichung (4) genannten Übertragungsfunktionen in Form von Pegeln (logarithmische Größen der Schwinggeschwindigkeit) als auch nur für einzelne Übertragungsfunktionen herangezogen werden.

- Anhand von messtechnischen Untersuchungen vor Ort können, je nach Bauphase der Strecke, Teil-Übertragungsfunktionen oder auch, nach Fertigstellung der Tunnelstrecke, Gesamt-Übertragungsfunktionen gemessen werden. Hierzu werden unterschiedliche „künstliche“ Erreger eingesetzt, s. z.B. in [12] und DIN 45673-4 [3]. Werden Erreger mit einer gleichzeitigen Messung der anregenden Kraft eingesetzt, dann ergeben sich hieraus sogenannte mechanische Admittanzen $Y_{mn}(if)$. Diese Größen stellen einen guten Indikator für das Anregungs- und Ausbreitungsgeschehen vor Ort dar [14].

Messtechnische Untersuchungen bilden auch eine gute Ergänzung zu den statistischen Modellen. Z.B. können anhand von gemessenen Deckeneigenfrequenzen konkretere statistische Modelle herangezogen werden. So haben Holzbalkendecken in der Regel Eigenfrequenzen unterhalb von ca. 30Hz, Betondecken oberhalb von ca. 30Hz bis ungefähr 60Hz. Neben dem Werkstoff für die Decken bestimmt u.a. auch die Raumgröße (Länge x Breite) sowie die Einbindung der Decke in die Seitenwände ihre Eigenfrequenz(en). Als grobe Abschätzung gilt: Holzbalkendecken sind empfindlicher gegen Erschütterungen, Betondecken empfindlicher gegen Sekundärschall, wobei der Sekundärschall auch ganz wesentlich durch die Absorptionsfähigkeit (Abstrahlgrad) der Raumbegrenzungsflächen beeinflusst wird.

Näherungsweise können die ersten Eigenfrequenzen einer allseits gelenkig gelagerten Platte (Decke) wie folgt rechnerisch abgeschätzt werden (Parameter, siehe **Tabelle 3**):

$$f_{0.1,D} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right) \cdot \sqrt{\frac{E \cdot h^2}{12(1-\nu^2) \cdot \rho}} \quad (6)$$

Tabelle 3: Parameter zur Abschätzung der ersten Deckeneigenfrequenz

Parameter	Einheit	Beispiel (Beton B35)	
a, b	Deckenabmessung (Länge, Breite)	m, m	2m bis 24m
h	Deckendicke	m	0,2m
ν	Querkontraktionszahl	-	0,5
ρ	Dichte	kg/m ³	2.200
E	Elastizitätsmodul	N/m ²	33,5 x 10 ⁹

In **Bild 8** sind die sich hiermit ergebenden Eigenfrequenzen für das o.g. Beispiel (Parameter in **Tabelle 3**) dargestellt.

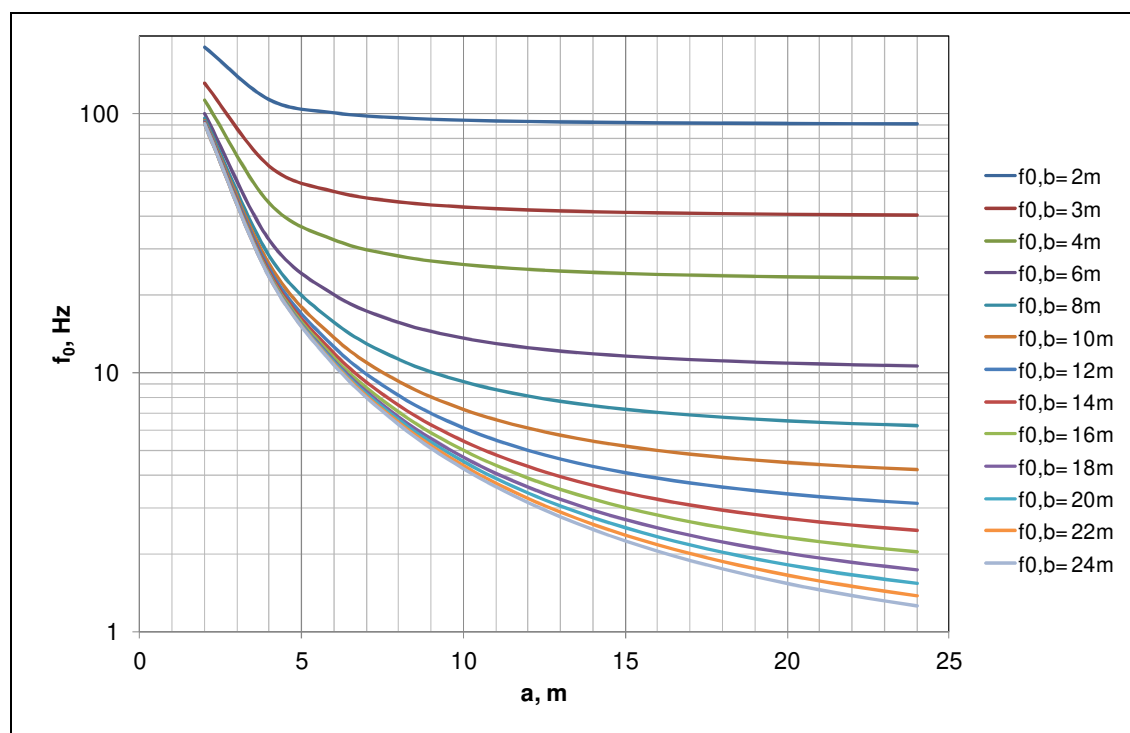


Bild 8: Erste Deckeneigenfrequenzen $f_{0,1,D}$ in Abhängigkeit von Länge, Breite, Dicke, Deckenwerkstoff, siehe Parameter in Tabelle 3

Bild 8 und Gleichung (6) zeigen, dass mit zunehmenden Deckenabmessungen (Länge, Breite, Dicke) die Eigenfrequenz abnimmt, die Decke wird empfindlicher für die Anregung von Erschütterungen.

Grundsätzlich gilt der Zusammenhang gemäß Gleichung (6) auch für Holzbalkendecken (und anderen Deckenkonstruktionen), die Werkstoffparameter – insbesondere von Holz – variieren jedoch erheblich stärker als die von Beton. Hierdurch ist eine einigermaßen realistische Abschätzung der bei diesen Decken sich ergebenden Eigenfrequenzen kaum möglich.

Nach ISO 14837-1 [6] wird zur Erschütterungs- und Sekundärschallprognose ein dreistufiges Verfahren empfohlen:

1. Projektierungsmodell,
2. Planungs- und Umweltbewertungsmodell sowie
3. Detailmodell.

Diese drei Modelle werden im Folgenden kurz vorgestellt.

6.2 Projektierungsmodell

Nach diesem Modell werden in einer ersten Phase folgende Parameter berücksichtigt:

- Art der Schienenbahn (hier U-Bahn),
- Art der eingesetzten Fahrzeuge (hier U-Bahnfahrzeug des Typs DT 6-A),

- Tunneltiefe: gering, mittel, tief,
- Typische Bodenverhältnisse: harter, mittelharter oder weicher Boden,
- (horizontaler) Abstand zwischen Tunnelwand und Gebäudeaußenwand,
- Schwingungsempfindlichkeit der Empfängergebäude: hoch (z.B. Hörsaal), mittel (z.B. Wohngebäude) oder niedrig (z.B. Gebäude für Gewerbe),
- Gebäude mit „schwingungsempfindlichen“ Geräten.

Anhand dieser ersten Untersuchung werden im Hinblick auf Erschütterungen und Sekundärschall unkritische und kritische Abschnitte entlang einer geplanten Strecke abgeschätzt.

Nach diesem Modell werden weitgehend nur Einzahlwerte für eine Abschätzung der zu erwartenden Immissionen herangezogen.

Dieses (Projektierungs-) Modell wird hier zunächst vorgestellt und für eine erste Abschätzung eingesetzt.

Die für diese Aufgabe benötigten Unterlagen umfassen folgende Bereiche:

- Aufnahme der im Umfeld der neuen Strecke vorhandenen und geplanten Gebäude im Abstand bis ca. 30 m vom Tunnel (jeweils Abstand Tunnelwand - Gebäudeaußenwand). Bewertung der Gebäude nach
 - Baunutzungsgebiet und Nutzung (dies ist insbesondere wichtig für die Ermittlung der jeweils anzuwendenden KB_F -Anhaltswerte),
 - Bodenprofil im Bereich des Tunnels und der Gebäude \Rightarrow zur Abschätzung dyn. Baugrundparameter bzw. globale Einstufung nach „steif, mittel, weich“.
 - Gründung und Konstruktion (Gebäude),
 - Deckenart zur Abschätzung der Eigenfrequenzen etc.,
 - Vorgesehener Betrieb, Fahrzeuktakt (Anzahl Fahrten Tag/Nacht).

Es wird eine generelle Bewertung von

- Fahrzeuge (Geschwindigkeit, Achslasten),
- Trassierung,

durchgeführt sowie eine

- Grobabschätzung der zu erwartenden Erschütterungs- und Sekundärschallimmissionen in den Gebäuden (Mittelwert über alle Geschosse) zur Ermittlung kritischer bzw. besonders zu schützender Gebäude erstellt.

Hilfreich für eine Prognose sind immer auch vorliegende Messergebnisse für weitgehend vergleichbare Situationen der gesamten Ausbreitungskette (Tunnel, Boden, Gebäude).

6.3 Planungs- und Umweltbewertungsmodell

Nach genauer Festlegung des Streckenverlaufs und der Bauwerksgeometrien werden die in der ersten Phase ermittelten kritischen Streckenabschnitte überprüft. Dies beinhaltet eine genauere Berücksichtigung von

- Gestaltung des Fahrwegs (Oberbauform als Schotteroberbau oder Feste Fahrbahn),
- Fahrzeugkonstruktion (soweit erforderlich und möglich),
- Genaue Trassenführung, auch Neigung und Bogen
- Weichenanlagen,
- Geschwindigkeiten (Haltestellen, Strecke).

In der Regel werden hierbei Terzspektren eingesetzt.

6.4 Detailmodell

In dieser dritten Phase, die evtl. erst nach Fertigstellung des Tunnelbauwerks erfolgt, werden sowohl die in den beiden ersten Phasen ermittelten Prognosen überprüft und auch konkrete Festlegungen hinsichtlich des erforderlichen Oberbaus gemacht.

In diesem Modell wird mit Terzspektren (und teilweise mit Schmalband-(FFT-)Spektren) gearbeitet.

Für dieses Modell werden u.a. die Vorgaben gemäß VDI 3837 berücksichtigt.

Zur Überprüfung einzelner kritischer Streckenabschnitte sind auch Admittanzmessungen im Tunnel sowie, falls möglich, zwischen Tunnel und Gebäude durchzuführen. Mit der messtechnischen Ermittlung von Übertragungsadmittanzen ist das Ausbreitungsverhalten von Schwingungen, z.B. vom Tunnel in die Gebäude, sehr gut zu beschreiben [12, 13, 14]. Prinzipiell können hier auch theoretische Modelle (FEM – Finite Element Methode) angewendet werden, die hierfür erforderlichen Eingangsdaten sind entweder abzuschätzen oder vor Ort zu ermitteln.

6.5 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse der theoretischen und messtechnischen Untersuchungen im Hinblick auf evtl. erforderliche Minderungsmaßnahmen

Die wesentliche Aufgabe besteht hierbei in der Abschätzung der zu erwartenden Erschütterungs- und/oder Sekundärschallimmissionen in den der Strecke benachbarten Gebäuden während des späteren Betriebes. Die theoretische Abschätzung des Einfügdämm-Maßes $D_e(f_{Tn})$ erfolgt nach DIN 45673-3 [3] (Schwingungsminderung einer isolierenden Maßnahme). Bei vorhandener Bebauung sind solche Maßnahmen am besten durch schwingungsmindernde Oberbauformen, z.B. Unterschottermatte, zu realisieren. Hiermit werden die in den Tunnel eingeleiteten Schwingungen (Emissionen) deutlich gemindert.

7 Umsetzung der Basis-Modelle für die U5 Ost

7.1 Oberbaueigenschaften

Nach derzeitigen Vorgaben ist ein Schotteroberbau für die neue Linie U5 Ost geplant. Dies bedeutet, dass folgende grundsätzliche Oberbauformen bzw. Oberbauvarianten möglich sind:

- Schotteroberbau ohne weitergehende schwingungsmindernde Maßnahmen, diese Oberbauform wird hier als Referenzoberbau bezeichnet,
- „Schotteroberbau mit elastischen Schienenlagern auf Schwellen (nur eine mögliche Variante und der Vollständigkeit halber hier erwähnt)“,
- Unterschottermatten mit unterschiedlicher Dicke, Steifigkeit und Materialeigenschaften (unterschiedlicher Bettungsmodul),
- Sogenannte Masse-Feder-Systeme. Hierbei wird das Schotterbett in elastisch gelagerten Betonrögen gelegt.

Zu beachten ist, dass alle genannten Systeme im Prinzip wie ein Masse-Feder-System wirken, das heißt, für sie alle gelten folgende prinzipielle Zusammenhänge:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (7)$$

Mit

f_0 Eigenfrequenz des Oberbaus in Hz,

k (dynamische) Steifigkeit des elastischen Elements (kann auch der Schotter sein) in N/m,

m (wirksame) schwingende Masse in kg. Hierzu gehören anteilige unabgefederte Radsatzmasse sowie anteilige Oberbaumasse. Je nach Oberbauform setzt sich diese aus unterschiedlichen Oberbauanteilen zusammen (siehe Normenreihe DIN 45673).

Die Übertragungsfunktion eines (einfachen) Masse-Feder-Systems kann wie folgt abgeschätzt werden, Gleichung (8) und **Bild 9**:

$$V_T = \sqrt{\frac{1 + 4D^2 \cdot \eta^2}{(1 - \eta^2)^2 + 4D^2 \cdot \eta^2}} = \frac{F_B}{F_{err}} \quad (8)$$

V_T Kraftübertragung eines Ein-Massen-Schwingers (z.B. elastisch gelagerter Oberbau),

D Dämpfung,

$$\eta = \frac{f}{f_0}$$

Nach **Bild 9** unterteilt sich die Kraft-Übertragungsfunktion eines Ein-Massen-Schwingers (Oberbau) in drei Frequenzbereiche:

$f \ll f_0$ Übertragung ohne eine Veränderung (Übertragung 1:1),

f um f_0 starke Verstärkung der eingeleiteten Kräfte (Schwingungen), die Größe der Verstärkung ist abhängig von der Dämpfung,

$f \gg f_0$ Minderung der eingeleiteten Kräfte (Schwingungen). Die Größe der Minderung ist auch von der Dämpfung abhängig.

Bei der praktischen Ausführung von Oberbauformen variieren diese Zusammenhänge mehr oder weniger. Dies hängt u.a. von der konkreten Oberbauform ab. Das physikalische Prinzip bleibt jedoch bestehen.

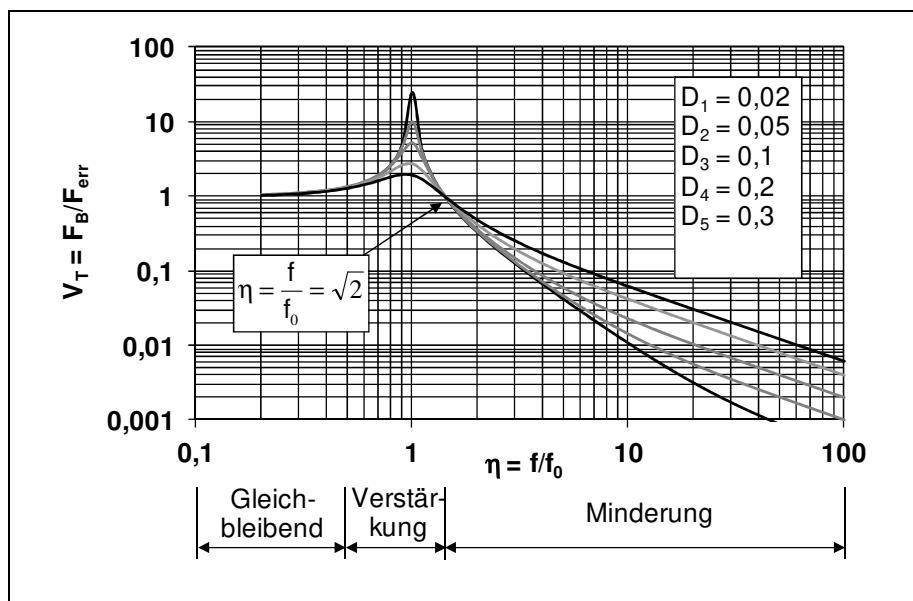


Bild 9: Kraftübertragung V_T beim Ein-Massen-Schwinger bezogen auf konstante Erregerkräfte. Für „Bodenkraft F_B “ wird auch der Begriff „Sohlkraft F_S “ verwendet.

Die Eigenfrequenz f_0 wird nach Gleichung (7) kleiner mit steigender Masse m (= MFS) oder mit geringerer Steifigkeit k (= weiche Schienenlager).

Im Prinzip gilt Gleichung (7) auch für ganze Gebäude. Hier repräsentiert die Masse m die Masse des gesamten Gebäudes m_G und die Steifigkeit KB die des Bodens. In [18] werden näherungsweise folgende Gesamtgebäude-Eigenfrequenzen f_{0G} genannt:

- Zweigeschossige Wohngebäude ca. 15 Hz,
- Drei bis sechsgeschossige (Wohn) Gebäude ca. 8 Hz – 12 Hz,
- Gebäude mit mehr als sechs Geschossen ca. 4 Hz – 8 Hz.

Diese Frequenzen werden in der Regel nur durch einen elastisch gelagerten Oberbau angeregt (MFS mit einer Eigenfrequenz < 20 Hz). Im Frequenzbereich < 10 Hz liegen auch Eigenfrequenzen des Drehgestells (Primär- und Sekundärfeder). Die ersten Biegeschwingungen von Radsätzen liegen dagegen im Bereich oberhalb von ca. 60 Hz.

7.2 Modelle zur Abschätzung der Immissionen – Projektierungsmodell

Für das Projektierungsmodell haben sich u.a. folgende zwei Anwendungen in der Praxis durchaus bewährt. Beide Anwendungen haben als wesentliches Kriterium den Abstand zwischen Tunnel (Quelle) und Gebäude (Empfänger).

7.2.1 Modell 1

In [14] werden folgende Gleichungen, getrennt nach Tunnleinbettung in Fels oder Lockerboden, für einen (durchschnittlich gepflegten) Schotteroberbau sowie einen Geschwindigkeitsbereich von ca. 60 km/h bis 80 km/h angegeben (konservative Betrachtung):

Tunneleinbettung in Fels (hart):

$$L_{pAF \max, m, sek}(R) = [(49 + k_E) - 10 \cdot \lg(R)] + k_{\ddot{U}} \quad (9)$$

Tunneleinbettung in Lockerboden (weich):

$$L_{pAF \max, m, sek}(R) = [(62 + k_E) - 20 \cdot \lg(R)] + k_{\ddot{U}} \quad (10)$$

Mit den Korrekturwerten:

k_E Emission: Einflüsse des Tunnels, die Tunnelsohle (Tunnel-Admittanz) sowie der Oberbau Einfügedämmung) und

$k_{\ddot{U}}$ Übertragung: Übertragung zwischen Tunnelsohle und Gebäude (Übertragungs-Admittanz).

Diese beiden Gleichungen sind eine Fortentwicklung der von J. Lang [19] bereits in den 70er Jahren vorgestellten Gleichung aufgrund von Untersuchungen an der Wiener U-Bahn:

$$L_{pA, sek}(R) = \left[59 - 20 \cdot \lg\left(\frac{R}{R_0}\right) \right] \pm 10 \text{ in dB(A)} \quad (11)$$

Mit

$R_0 = 1 \text{ m}$

R Abstand zwischen Tunnel (Außenwand) und Gebäude (Außenwand).

Der in der Lang'schen Gleichung angegebene (große) Streubereich von $\pm 10 \text{ dB(A)}$ berücksichtigt die Unterschiede der Anregung und der Ausbreitung.

In **Bild 10** sind die Abhängigkeiten grafisch dargestellt. Zusätzlich sind in diesem Bild enthalten, siehe Gleichungen (9) und (10):

- Abhängigkeiten von der Bodenart (weich, mittel, hart) sowie jeweils
 - einem durchschnittlich gepflegten Gleis und Fahrzeug (gestrichelte Linien),
 - einem gut gepflegten Rad/Schiene-System (-6 dB), dies wird hier als Standard vorausgesetzt (durchgezogene Linien),
 - für eine durchschnittlich wirkende Unterschottermatte (-15 dB) im Vergleich zu einem durchschnittlich gepflegten Gleis (punktierte Linien). Für Matten mit einer höheren mindernden Wirkung in Zusammenhang mit einem gut gepflegten Gleis ergeben noch geringere Immissionswerte.
- Anhaltswerte für $L_{pAF \max}$ nach TA Lärm: nachts =35 dB(A) und tags =45 dB(A).

Bei einer U-Bahnstrecke ist davon auszugehen, dass die Maximalpegel sich tags und nachts nicht unterscheiden. Somit ist in Wohngebäuden ein Anhaltswert von 35 dB(A) einzuhalten.

Erläuterungen zu **Bild 10**:

- Bodenart, diese kann u.a. durch die Scherwellengeschwindigkeit v_s beschrieben werden:
 - a. weich v_s : 100 m/s bis 150 m/s (z.B. sandiger Boden)
 - b. mittel v_s : 200 m/s bis 250 m/s (z.B. Sand und Kies, dicht gelagert)
 - c. steif v_s : 300 m/s bis > 500 m/s (bis 4.000 m/s) (z.B. lehmiger, toniger Boden bis unverwitterten Felsboden)
- AW-Tag: Anhaltswert tags, gilt für nur tagsüber genutzte Räume (Büros usw.)
- AW-Nacht: Anhaltswert nachts, gilt für Wohngebäude.

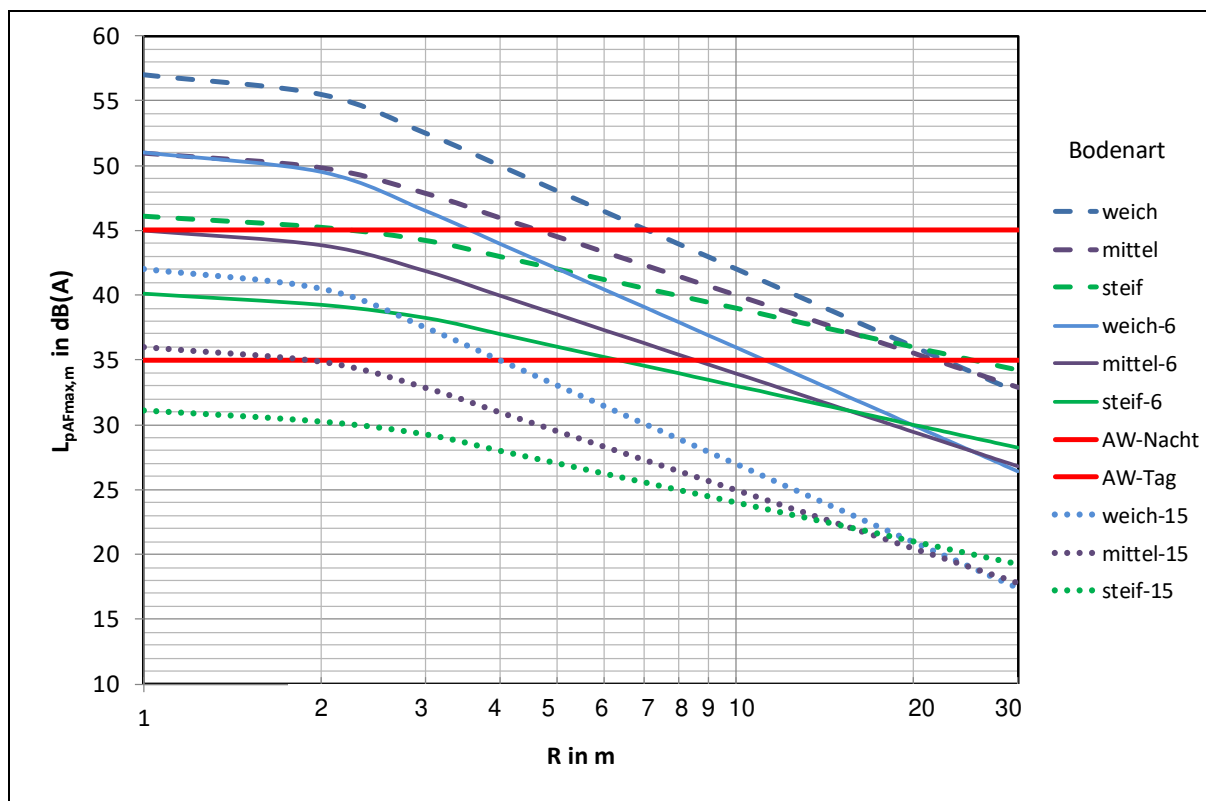


Bild 10: Grobe Abschätzung des zu erwartenden Sekundärschallpegels L_{pAFmax} in dB(A) in Gebäuden neben der geplanten U-Bahntrasse in Abhängigkeit von der Bodenart und der Entfernung zwischen den Außenwänden von Tunnel und Gebäude, konservative Betrachtung.

Anmerkung 1: Die Bezeichnungen „weich, mittel und steif“ beziehen sich auf die oben anhand der Scherwellengeschwindigkeiten beschriebenen Bodenarten.

Anmerkung 2: Höherwertige Unterschottermatten (USM) können eine weitere Minderung von bis zu 6 dB(A) bewirken, die punktierten Linien sind dann um diesen Wert zu mindern

Um genaue Daten zur Bodenart zu erhalten, wären umfangreiche Messungen vor Ort erforderlich (z.B. nach Anhang B von DIN 45672-1 [2] aus 2018-02). Da der Boden längs der Strecke nicht einheitlich ist, wären Messungen in dichten Abständen erforderlich. Hier wird daher von einer konservativen Betrachtung ausgegangen (zum Vorteil der Anwohner).

Für $R < 1$ m (= Überbauung bzw. quasi-Überbauung) gelten dieselben Pegel wie für den Abstand $R = 1$ m. In dem Bild wird keine Unterscheidung nach der Deckenart

getroffen. Dies muss in einem weiteren Schritt berücksichtigt werden (siehe auch Modell 3).

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die Erschütterungswerte (KB_F) des Fußbodens dann eingehalten werden, wenn der Sekundärschall $L_{pAFmax} < 35$ dB(A) bis 40 dB(A) beträgt. Nur bei leicht anzuregenden Holzbalkendecken kann ein umgekehrter Zusammenhang auftreten: Erschütterungswerte werden überschritten, der Sekundärschallpegel wird eingehalten.

7.2.2 Modell 2

Das im Folgenden beschriebene Prognosemodell wird in [17] für einen S-Bahnbetrieb mit und ohne Lok-Antrieb beschrieben sowie für eine sehr konservative Einschätzung der Randbedingungen. Auf der U5 Ost werden nur (moderne) Triebzüge eingesetzt, die Ursprungstabelle aus [17] war daher anzupassen. Dies gilt auch für die Bewertung von einer Tunneleinbettung in einer felsigen Umgebung.

Tabelle 4 zeigt zunächst eine globale Bewertung der lokalen Randbedingungen und **Tabelle 5** die hieraus abgeleiteten (erforderlichen) Schutzabstände.

Tabelle 4: Bewertung der für den Schutzabstand maßgebenden Randbedingungen nach [17], angepasst an neueren Erkenntnissen und Hamburger Verhältnissen

		Randbedingungen	Punkte	Anmerkung
1	Untergrund	<ul style="list-style-type: none"> - Sand - Kies - Schluff, Lehm, Ton - Fels - Grundwasser in Tunnelhöhe - Grundwasser in Bauwerkshöhe - Erdanker (nach dem Bau getrennt) - Erdanker (nicht getrennt) - Bodeninjektion - parallel zum Tunnel verlaufende Sparten mit Hausanschluss - tunnelkreuzende Sparten mit Hausanschluss 	<ul style="list-style-type: none"> 0 1 2 -1 2 3 1 2 2 1 2 	falls mehrere Parameter, kann ein Bonus von -1 in Ansatz gebracht werden
2	Tunnel	<ul style="list-style-type: none"> - Dicke der Wand ≥ 1 m - Dicke der Wand < 1 m 	<ul style="list-style-type: none"> 0 1 	
3	Oberbau, Trassierung	<ul style="list-style-type: none"> - Isolierstoß - Weiche mit starrem Herzstück - Bogen > 200 m - Bogen ≤ 200 m 	<ul style="list-style-type: none"> 1 2 0 2 	falls mehrere Parameter, kann ein Bonus von -1 in Ansatz gebracht werden
4	Bauwerk (Wohngebäude)	<ul style="list-style-type: none"> - bis zu 4 Stockwerke - mehr als 4 Stockwerke - Stahlbetonrahmen - Holzbalkendecke - Betondecke 	<ul style="list-style-type: none"> 0 1 2 1 0 	
5	Betrieb	<ul style="list-style-type: none"> - Geschwindigkeit = 80 km/h - Geschwindigkeit = 60 km/h 	<ul style="list-style-type: none"> 0 -1 	
6	Bewertung:	Summe aus 1 bis 5	<ul style="list-style-type: none"> 0 bis 2 3 bis 4 ≥ 5 	<ul style="list-style-type: none"> günstig mittel ungünstig

Die Bewertung nach **Tabelle 4** kann auch herangezogen werden für eine etwas genauere Immissionsabschätzung für Modell 1, **Bild 10**. Näherungsweise gilt:

- günstig unteres Drittel,
- mittel mittleres Drittel und
- ungünstig oberes Drittel

der für die jeweils vorhandenen Bodenverhältnisse angegebenen Streubereiche (gestrichelte Linien). Die ersten 3 Punkte und die Tunnelwanddicke sind dabei nur für Lockerböden von Bedeutung.

In **Tabelle 5** sind die sich mit obiger Bewertung der lokalen Anregungs- und Ausbreitungsbedingungen möglichen Schutzabstände dargestellt.

Tabelle 5: Bewertung der lokalen Verhältnisse, **Schutzabstand**

Oberbau	Bewertung	Räumlicher Schutzabstand zu den Gebäuden
Schotter 30 cm Schotter	ungünstig	> 25 m
	mittel	> 20 m
	günstig	> 15 m
Schotter, USM	ungünstig	> 12 m
	mittel	> 7 m
	günstig	> 1 m
hochwertige USM, MFS	ungünstig	0 m
	mittel	0 m
	günstig	0 m

7.2.3 Modell 3 – Richtlinie 820.2050 der DB AG

Anhand der Vorgaben in dieser Richtlinie [8] können die Erschütterungs- und Sekundärschallimmissionen mit einem Erschütterungsspektrum im Boden vor einem Gebäude abgeschätzt werden. Aufgrund der statistischen Auswertung von zahlreichen Messungen wurden Übertragungsfunktionen

- zwischen diesem Bodenpunkt und den Gebäudedecken (Körperschallübertragung) sowie
- zwischen den Deckenschwingungen und den in Räumen zu erwartenden sekundären Luftschall abgeleitet.

Je nach dominanter Deckeneigenfrequenz ergaben sich verschiedene Differenzspektren (Übertragungsfunktionen). Unterschieden wird zwischen Beton- und Holzbalkendecken. In **Bild 11** sind die Körperschall-Differenzspektren aus [8] dargestellt.

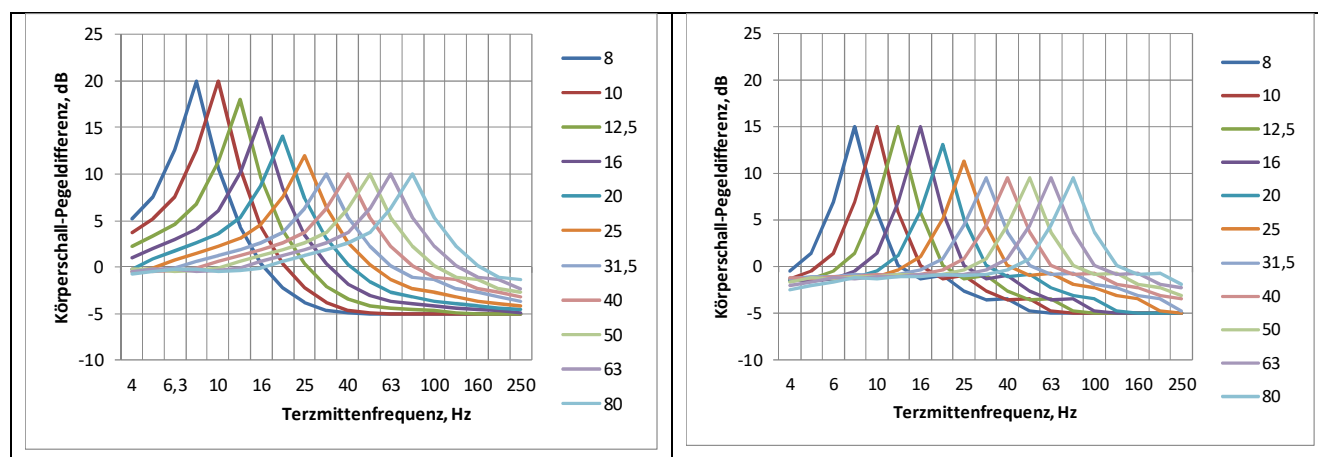


Bild 11: Körperschall-Differenzspektren zwischen einem Bodenmesspunkt und Gebäudedecken, links für Holzbalkendecken und rechts für Betondecken (nach DB Ril 820.2050).

Für die Abschätzung der Erschütterungen wird von einem sogenannten MAXHOLD-Spektrum als Eingangsgröße ausgegangen. Bei der Frequenzanalyse eines Erschütterungssignals von einer U-Bahn wird, je nach verwendeter Software, das Zeitsignal in eine Anzahl von Teil-Zeitbereichen aufgeteilt und für jeden dieser Teil-Zeitbereiche ein Spektrum erstellt. Die je Einzelspektrum ermittelten Maximalwerte bilden dann das MAXHOLD-Spektrum. Gegenüber einem Mittelwertspektrum (AVG, average), hierbei werden die spektralen Erschütterungswerte aller Teilspektren energetisch gemittelt, ergibt sich im Mittel ein um ca. 8 dB höherer Pegel für ein MAXHOLD-Spektrum. Für die Anwendung dieses „Prognoseverfahrens“ kann somit als erste Näherung auch von einem Mittelwertspektrum ausgegangen werden, die Terzpegel dieses Spektrums sind dann um 8 dB anzuheben.

Mit MAXHOLD-Spektren werden mögliche „Störungen“ an einzelnen Rädern, z. B. Flachstellen, stärker erfasst als mit Mittelungsspektren, bei denen die „Störungen“ verschmiert (gemittelt über die gesamte Vorbeifahrt) werden.

Bild 11 zeigt auch, dass im unteren Frequenzbereich die Schwingungen bei Holzbalkendecken „besser“ übertragen werden als bei Betondecken, sie sind somit anfälliger für Erschütterungsimmissionen. Ab etwa der Terz 31,5 Hz gleichen sich die Übertragungen an.

Wie bereits oben geschrieben, erfolgt für die U5 Ost eine Bewertung in Anlehnung an die TA Lärm. Für eine Bewertung nach der TA Lärm wird somit ein Mittelwert je Zugfahrt „i“ ($L_{pAeq,i}$) benötigt. Anhand der Vorgaben in der Ril 820.2050 werden diese Mittelwerte berechnet. Für eine Bewertung nach TA Lärm, diese wird zur Beurteilung der Sekundärschallimmissionen in den Gebäuden an der U5 Ost herangezogen, sind auch Maximalpegel $L_{pAFmax,i}$ zu berücksichtigen. Näherungsweise kann folgende Abschätzung für den Maximalpegel herangezogen werden:

$$L_{pAFmax,i} = L_{pAeq,i} + 4 \text{ dB.} \quad (12)$$

Zusammenfassend sind somit folgende Werte zur Immissionsabschätzung nach der DB Richtlinie erforderlich:

- Erschütterungs-Terzspektren im Boden vor dem zu bewertenden Gebäude:
 - MAXHOLD-Spektrum für die Erschütterungsbewertung und
 - Mittelwertspektrum zur Abschätzung des Sekundärschalls,
- Eigenfrequenzen der Gebäudedecken,
- Korrekturwert für die Differenz zwischen MAXHOLD- und Mittelwertspektrum (falls keine MAXHOLD-Spektren vorliegen (= 8 dB),
- Korrekturwert für die Differenz zwischen Mittelungspegel $L_{pAeq,i}$ und Maximalpegel $L_{pAFmax,i}$ (= 4 dB).

Die angegebenen Pegel, Pegelkorrekturen liegen auf der sicheren (konservativen) Seite. Im realen Fall können die Immissionen auch niedriger liegen.

Den Unterschied zwischen dem Mittelungspegel und dem Maximalpegel zeigt beispielhaft **Bild 12**. Um den Unterschied deutlich zu machen, wurde ein Erschütterungssignal

verwendet, welches in geringem Abstand zu einem Gleis in Hamburg aufgezeichnet worden ist. In größerem Abstand vom Gleis, und dies gilt insbesondere auch für Fahrten in einem Tunnel, verwischen sich die Pegel und der Unterschied zwischen beiden Größen ist deutlich geringer.

Die rechts im Bild vorhandene Pegelspitze von 68,1 dB(A) ist auf ein Fremdsignal zurückzuführen.

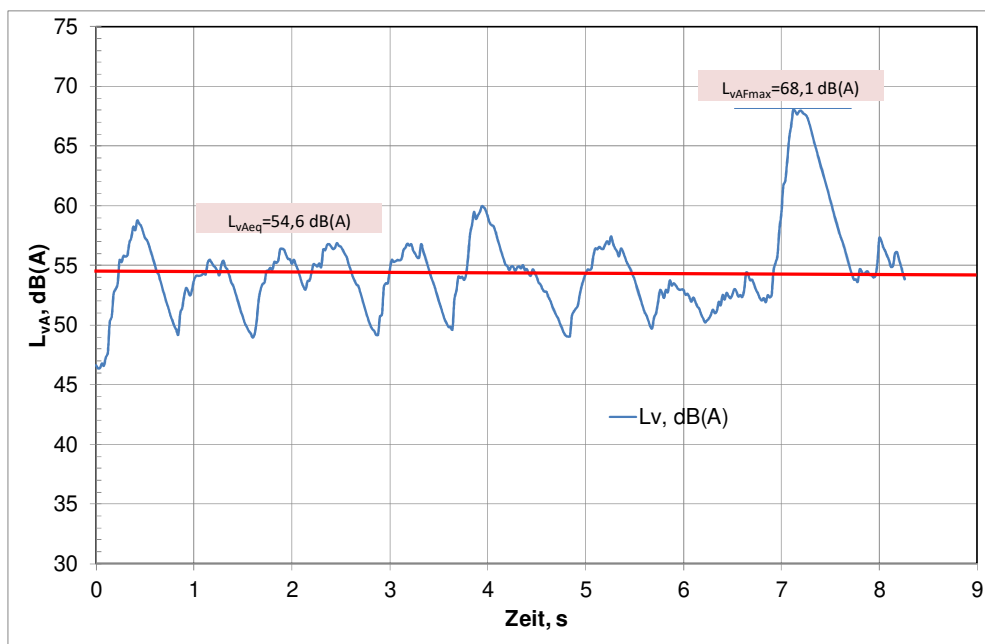


Bild 12: Beispiel für den Unterschied zwischen Maximalpegel und Mittelungspegel einer U-Bahnvorbeifahrt im Nahbereich eines ebenerdig verlaufenden Gleises.

8 Minderungsmaßnahmen

Die mindernde Wirkung verschiedener Oberbauformen (s. unter Abschnitt 5.6) wird ausgedrückt als Einfügedämmung (oder Einfügedämm-Maß $D_e(f_{Tn})$). Mit f_{Tn} wird die jeweilige Terzmittenfrequenz bezeichnet.

Anhand von Schwingungsmessungen an 2 Gleisen mit unterschiedlichen Oberbauformen oder einem Gleis, in dem nacheinander unterschiedliche Oberbauformen eingebaut werden, lässt sich dieser Wert wie folgt ermitteln, DIN SPEC 45673-3:

$$D_e(f_{Tn}) = L_{v1}(f_{Tn}) - L_{v2}(f_{Tn}) \quad (\text{mit der Schwinggeschwindigkeit } v) \quad (13)$$

oder

$$D_e(f_{Tn}) = L_{a1}(f_{Tn}) - L_{a2}(f_{Tn}) \quad (\text{mit der Schwingbeschleunigung } a). \quad (14)$$

Da es sich hier um die Differenz zweier Terz-Pegelspektren handelt, ergeben Schwinggeschwindigkeits- und Schwingbeschleunigungsmessungen grundsätzlich dieselben Ergebnisse.

Näherungsweise lässt sich dieser Wert auch an unterschiedliche Oberbauformen im Labor oder vor Ort in einem Tunnel durch „künstliche“ Anregung, z.B. mit einem Prüf-

hammer oder einer Rüttelplatte, ermitteln. Ebenfalls ist eine Abschätzung der Einfügungsdämmung anhand theoretischer Berechnungen möglich, DIN SPEC 45673-4. Wesentliche Parameter zur analytischen Abschätzung der Einfügungsdämmung sind hiernach:

- Radlast,
- Zugeordnete dynamische wirksame Masse je Achse (unabgefederte Radsatzmasse),
- Dynamisch wirksame Masse von Oberbauformen,
- Steifigkeit und Dämpfung des elastischen Elements,
- Admittanz des Unterbaus (bei Tunnelstrecken die Tunnelsohlenadmittanz).

Als generelle Lösung ergibt sich folgende theoretische Abhängigkeit zwischen den oben genannten Parametern:

$$D_e(f) = 20 \cdot \lg \left| 1 + \frac{Y_{el}(if)}{Y_o(if) + Y_u(if)} \right| \quad (15)$$

Mit

$Y_{el}(if)$ komplexe Admittanz des elastischen Elements,

$Y_o(if)$ komplexe Admittanz aller wirksamen Elemente oberhalb des elastischen Elementes,

$Y_u(if)$ komplexe Admittanz des Unterbaus (Tunnelsohle, auf dem das elastische Element aufliegt).

Insbesondere die theoretische Abschätzung der Admittanz oberhalb des elastischen Elementes ist sehr aufwändig, in der Regel wird – bei einfachen Modellen – nur die unabgefederte Radsatz-Masse angesetzt. Die Eigenschaften der Primärfeder und Sekundärfeder mit den zugehörigen Massen und Dämpfungen bleiben dabei unberücksichtigt.

Für die hinreichend genaue Abschätzung der Einfügungsdämmung anhand dieser Beziehung ist eine möglichst genaue Kenntnis der Admittanzen der oben genannten Parameter erforderlich, s. z.B. [12, 24] und DIN SPEC 45673-4 [3].

Beispielhaft zeigt **Bild 13** berechnete Einfügungsdämmungen aus DIN SPEC 45673-4 [3].

Zu beachten ist, und dies gilt mehr oder weniger für alle Oberbauformen, die eine gegenüber einem Standardoberbau zusätzliche schwingungsmindernde Wirkung aufweisen, dass im unteren Frequenzbereich (= Eigenfrequenzbereich des besonderen Oberbaus) eine Verstärkung auftreten kann. In der praktischen Anwendung fällt diese in der Regel geringer aus als anhand der theoretischen Abschätzung. In dem unten dargestellten Beispiel liegen diese Verstärkungen zwischen ca. 5 dB und 9 dB.

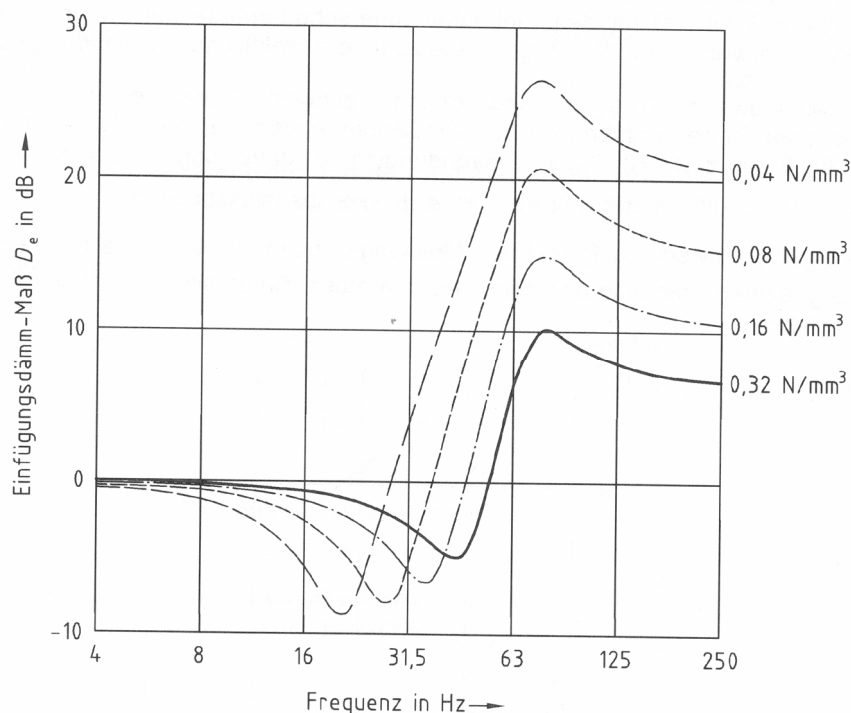


Bild 13: Berechnete Einfügungsdämm-Maße $D_e(f)$ von Unterschottermatten mit unterschiedlichen Bettungsmoduln bei Verwendung im Tunnel

9 Abschätzung der Immissionssituation und der erforderlichen Maßnahmen

9.1 Bewertungskriterien

Es wurden oben drei Vorgehensweisen zur Abschätzung der erforderlichen schwingungsmindernden Maßnahmen aufgrund von Immissionsabschätzungen beschrieben. Diese wurden alle auf die jeweiligen Tunnel/Gebäude-Situationen in den der U5 Ost benachbarten Gebäuden umgesetzt. Zur Bewertung der möglichen Immissionen wurden die folgenden Anhaltswerte herangezogen:

- a) Sekundärschall (vorrangiger Frequenzbereich zwischen 16 Hz und 160 Hz, teilweise bis 250 Hz)

Eindeutige Festlegungen zur Bewertung des Sekundärschalls aus dem (unterirdischen) Schienenverkehr sind in Gesetzen, Normen und Richtlinien nicht vorhanden. Ersatzweise werden - in Anlehnung an den Vorgaben der TA Lärm - die Werte in **Tabelle 6** herangezogen. Besondere Zeiten, z.B. Abend oder Wochenende, werden nicht berücksichtigt (siehe Abschnitt 5.3.1).

Tabelle 6: Bewertung Sekundärschall, Immissionsrichtwerte nach TA Lärm

	Tag (Büros usw.)	Nacht Wohnge- bäude)	Bemerkung
L_{pAeq}	35 dB(A)	25 dB(A)	Mittelungspegel über 16 Stunden (tags) und 8 Stunden (nachts). Diese Pegelwerte sind mit den Beurteilungspegeln $L_{r,T}$ und $L_{r,N}$ zu vergleichen.
L_{pAFmax}	45 dB(A)	35 dB(A)	

In der Regel werden die Sekundärschall-Immissionen von den betroffenen Anwohnern stärker als störend wahrgenommen als die Erschütterungen. Eine Ausnahme von dieser Regel sind Gebäude mit Holzbalkendecken, deren Eigenfrequenzen sehr niedrig liegen können (ca. < 20 Hz). Es ist hier auch darauf hinzuweisen, dass solche Gebäude oft nur durch sehr tiefabgestimmte Oberbausysteme (Eigenfrequenz des Oberbaus $f_0 < 10$ Hz) wirkungsvoll geschützt werden können. Um für diese Fälle eindeutige Aussagen treffen zu können, sind Erhebungen vor Ort erforderlich.

b) Erschütterungen

Die empfohlenen Anhaltswerte für Erschütterungsimmissionen nach DIN 4150-2 (1999) sind einzuhalten. Für Erschütterungsimmissionen aus dem Schienenverkehr ist der Frequenzbereich zwischen 4 Hz und 80 Hz zu beachten.

9.2 Vorgehensweise

Mit den drei dargestellten Abschätzverfahren wurden für die im Einwirkungsbereich der neuen Tunnelstrecke liegenden Gebäude die Immissionen abgeschätzt und mit den in **Tabelle 1** und **Tabelle 6** enthaltenden Bewertungen verglichen. Zur Lösung der möglichen Immissionsprobleme wurden die Oberbauformen nach ihrer anzunehmenden Wirkung hin ausgewählt.

- SCH – Standard Schotteroberbau (Holzschwellen mit ca. 30 cm Schotterhöhe unterhalb der Schwellenunterseite), keine beweglichen Herzstücke in Weichen,
- USM1 – Unterschottermatte mit mittlerer Steifigkeit,
- USM2 – hochwertige Unterschottermatte mit geringer Steifigkeit und anderen Materialeigenschaften.

9.3 Bodenspektren

Hilfswise wurden für die Berechnungen nach Richtlinie 820 der DB AG die in **Bild 14** dargestellten Spektren für Tunnelstrecken – Gebäudeabstände bis 30 m angenommen (die Abstände wurden jeweils um 5 m erhöht). Diese Spektren beschreiben die Bodenschwingungen vor den jeweiligen Gebäuden in den genannten Abständen.

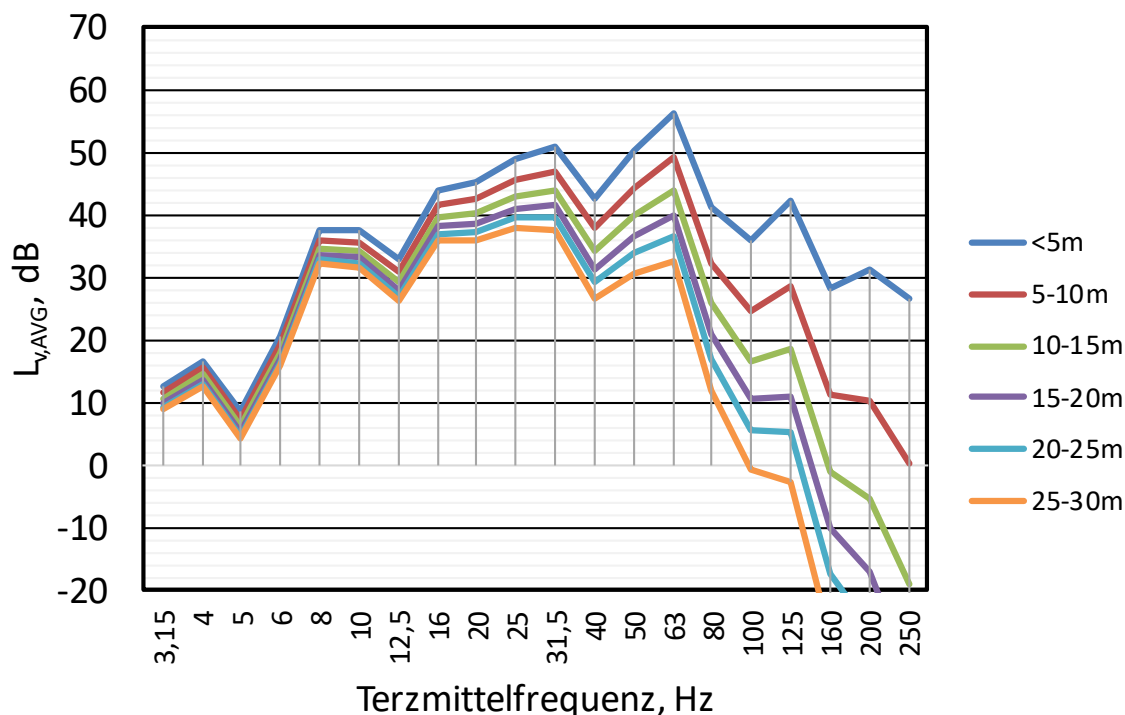


Bild 14: Aus Messungen abgeleitete (gemittelte, AVG) Bodenspektren für unterschiedliche Abstände zwischen Tunnelaußenwand und Gebäudeaußenwand

Die in **Bild 14** dargestellten Terzspektren (für Methode drei nach DB AG Richtlinie 820) wurden wie folgt aus vorhandenen Messergebnissen und den Festlegungen in DIN 4150-1 abgeleitet:

Als Ausgangsspektrum wurde ein gemessenes Bodenspektrum oberhalb einer U-Bahn-Tunnelstrecke in Hamburg herangezogen (v ca. **75 km/h bis 80 km/h**). Mit angepassten Ausbreitungsformeln nach DIN 4150-1 wurden für bestimmte Abstände die Boden-Eingangsspektren für die Gebäude abgeschätzt. Die Anpassung zur Erschütterungsausbreitung erfolgte anhand von vorliegenden Bodenspektren in verschiedenen Abständen zur Strecke, die an einer oberirdischen U-Bahn-Strecke im Hamburger Norden ermittelt worden sind.

Für die Berechnung der KB_F -Werte nach DIN 4150-2 mit der Richtlinie 820 werden zusätzlich sogenannte MAXHOLD-Spektren benötigt. Diese sind in **Bild 15**, ebenfalls für verschiedene Abstände, dargestellt.

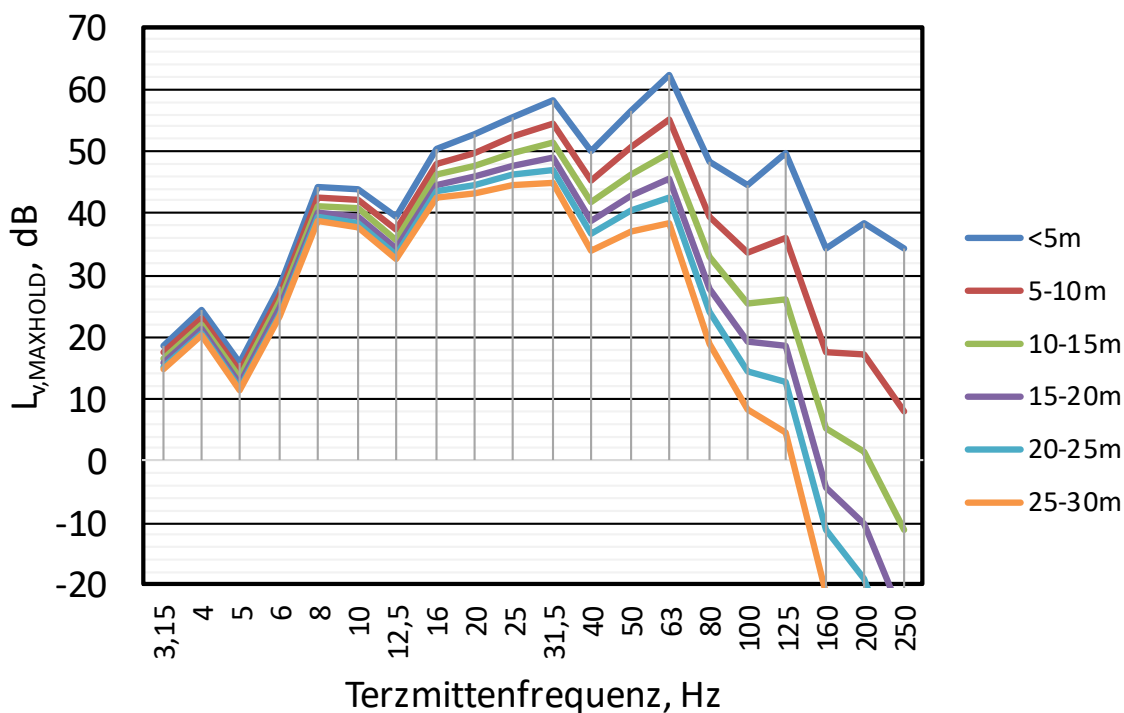


Bild 15: Aus Messungen abgeleitete (MAXHOLD) Bodenspektren für unterschiedliche Abstände zwischen Tunnelaußenwand und Gebäudeaußenwand

Mit der DB-Richtlinie 820 werden für den Sekundärschall Mittelungsspektren ermittelt. Für die U-Bahn in Hamburg (U5 Ost) erfolgt eine Bewertung des Sekundärschalls in Anlehnung an die TA Lärm (siehe **Tabelle 6**). Dies erfordert die Abschätzung eines Maximalpegels L_{pAFmax} . Näherungsweise können aus dem Mittelungspegel L_{peq} die Maximalwerte L_{pAFmax} mit einem Korrekturwert von +4 dB hinreichend genau abgeschätzt werden.

Für die drei angewandten Methoden zur Prognose erfolgte eine konservative Bewertung (zu Gunsten der Anwohner).

Die Abschätzmethode nach DB 820 berücksichtigt die Eigenfrequenzen (Terzen) von Gebäudedecken. Da in der Regel in jedem Gebäude unterschiedlich große Räume vorhanden sind, die dann auch verschiedene Eigenfrequenzen haben, wurde jeweils der ermittelte Maximalwert für die weitere Betrachtung herangezogen. Die Größe der Deckeneigenfrequenz f_{0D} hängt vorrangig von den Deckenabmessungen (Länge x Breite), dem Deckenmaterial (Holzdecke oder Betondecke) sowie der Einbindung der Decken in das vertikale Außen- und Innenmauerwerk ab. Auch die Möblierung, z.B. schwere Eichenmöbel, können Deckeneigenfrequenz beeinflussen. Im Allgemeinen gilt: Je größer die Decke und je weicher das Deckenmaterial, desto niedriger ist die dominante Deckeneigenfrequenz.

Für diese erste Immissionsabschätzung wurde weitgehend von einer Fahrzeug-Geschwindigkeit von ca. 70 km/h bis 80 km/h ausgegangen.

Beispielhaft sind in Tabelle 7 und Tabelle 9 die Ergebnisse der Abschätzung nach DB Richtlinie 820 für den Abstand zwischen Tunnelaußenwand und Gebäudeaußenwand <5m dargestellt. Entsprechende Abschätzwerte liegen auch für die anderen Abstände bis 30m vor.

Eingangsgrößen sind:

- Anzahl der Fahrten (siehe unter Abschnitt 4.5)
- Der Differenzpegel zwischen Mittelwert $L_{pAeq,Tp}$ und Maximalpegel L_{pAFmax} für den Sekundärschall wird mit 4 dB angesetzt (siehe unter Abschnitt 5.3.2),
 - Spektralmethode: Unterschiedliche Bewertung der einzelnen Terzen
 - Einzahlmethode: Bewertung des Summenpegels

Beide Bewertungen erfolgen jedoch in Abhängigkeit von den Deckeneigenfrequenzen (Terzen).

- Die Berechnung der Erschütterungsimmissionen (KB_F -Werte) erfolgt nach Abschnitt 5.2 (DIN 4150-2).

Anhand der durchgeführten Immissionsabschätzung mit verschiedenen Prognoseverfahren ergeben sich die in Tabelle 8 (Holzbalkendecken) und Tabelle 10 (Betondecken) dargestellten Schutzabstände. Grundsätzlich wurde immer der kritischste Wert für die Bewertung herangezogen. Anhand dieser Bewertung erfolgte dann die Gesamtbewertung für die einzelnen Gebäude im Nahbereich der U5 Ost, siehe Abschnitt 9.4.

Tabelle 7: Ergebnisse für Holzbalkendecken, Beispiel für Abstand <5m

Terz, Hz	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80
Erschütterungen											
KB_{FTm}	0,091	0,099	0,097	0,140	0,157	0,171	0,170	0,154	0,183	0,230	0,164
KB_{Fmax}	0,154	0,169	0,165	0,239	0,266	0,290	0,290	0,262	0,310	0,390	0,279
KB_{FTrTag}	0,074	0,081	0,079	0,115	0,128	0,139	0,139	0,126	0,149	0,187	0,134
$KB_{FTrNacht}$	0,066	0,073	0,071	0,103	0,114	0,125	0,124	0,113	0,133	0,168	0,120
Sekundärschall, Spektralmethode											
L_{pAFmax}	31,3	31,4	31,8	32,3	33,0	34,0	35,0	36,1	37,7	38,5	37,4
$L_{r,Tag}$	17,5	17,6	18,0	18,5	19,2	20,2	21,1	22,3	23,9	24,6	23,6
$L_{r,Nacht}$	16,5	16,6	17,0	17,5	18,2	19,2	20,2	21,3	22,9	23,7	22,6
Sekundärschall, Einzalmethode											
L_{pAFmax}	36,1	36,1	36,4	36,8	37,3	38,1	38,8	39,7	41,2	42,9	41,5
$L_{r,Tag}$	22,3	22,3	22,6	23,0	23,5	24,2	25,0	25,8	27,3	29,1	27,7
$L_{r,Nacht}$	21,3	21,3	21,6	22,0	22,6	23,3	24,0	24,9	26,4	28,1	26,7

Tabelle 8: Schutzabstände für Holzbalkendecken (Abstand Außenwände von Tunnel und Gebäude

Abstand		Oberbau	Oberbau		Oberbau	Oberbau
R		KB_F , Zeile3	KB_F , Zeile4		Spektral- methode	Einzahl- methode
< 5m	$KB_{Fmax} =$	USM1	USM1	$L_{pAFmax} =$	USM1	USM2
	$KB_{FTrTag} =$	USM1	USM2	$L_{m,Zug,Tag} =$	SCH	SCH
	$KB_{FTrNacht} =$	USM2	USM2	$L_{m,Zug,Nacht} =$	SCH	USM1
5-10m	$KB_{Fmax} =$	SCH	SCH	$L_{pAFmax} =$	SCH	USM1
	$KB_{FTrTag} =$	SCH	USM1	$L_{m,Zug,Tag} =$	SCH	SCH
	$KB_{FTrNacht} =$	USM1	USM1	$L_{m,Zug,Nacht} =$	SCH	SCH
10-15m	$KB_{Fmax} =$	SCH	SCH	$L_{pAFmax} =$	SCH	USM1
	$KB_{FTrTag} =$	SCH	SCH	$L_{m,Zug,Tag} =$	SCH	SCH
	$KB_{FTrNacht} =$	SCH	USM1	$L_{m,Zug,Nacht} =$	SCH	SCH
15-20m	$KB_{Fmax} =$	SCH	SCH	$L_{pAFmax} =$	SCH	SCH
	$KB_{FTrTag} =$	SCH	SCH	$L_{m,Zug,Tag} =$	SCH	SCH
	$KB_{FTrNacht} =$	SCH	SCH	$L_{m,Zug,Nacht} =$	SCH	SCH
20-25m	$KB_{Fmax} =$	SCH	SCH	$L_{pAFmax} =$	SCH	SCH
	$KB_{FTrTag} =$	SCH	SCH	$L_{m,Zug,Tag} =$	SCH	SCH
	$KB_{FTrNacht} =$	SCH	SCH	$L_{m,Zug,Nacht} =$	SCH	SCH
25-30m	$KB_{Fmax} =$	SCH	SCH	$L_{pAFmax} =$	SCH	SCH
	$KB_{FTrTag} =$	SCH	SCH	$L_{m,Zug,Tag} =$	SCH	SCH
	$KB_{FTrNacht} =$	SCH	SCH	$L_{m,Zug,Nacht} =$	SCH	SCH

Tabelle 9: Ergebnisse für Betondecken, Beispiel für Abstand <5m

Terz, Hz	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80
Erschütterungen											
KB_{FTm}	0,072	0,077	0,082	0,121	0,134	0,151	0,152	0,125	0,155	0,208	0,131
KB_{Fmax}	0,108	0,116	0,124	0,181	0,202	0,226	0,228	0,187	0,233	0,312	0,196
KB_{FTrTag}	0,059	0,063	0,067	0,099	0,110	0,123	0,124	0,102	0,127	0,170	0,107
$KB_{FTrNacht}$	0,052	0,057	0,060	0,088	0,098	0,110	0,111	0,091	0,114	0,152	0,095
Sekundärschall, Spektralmethode											
L_{pAFmax}	33,3	33,5	34,0	34,2	34,9	35,6	36,0	36,6	38,5	40,7	39,4
$L_{r,Tag}$	19,4	19,6	20,1	20,4	21,1	21,8	22,1	22,8	24,7	26,9	25,6
$L_{r,Nacht}$	18,5	18,7	19,2	19,4	20,1	20,8	21,2	21,8	23,7	25,9	24,6
Sekundärschall, Einzalmethode											
L_{pAFmax}	35,4	35,6	36,3	36,3	37,1	38,0	38,2	38,8	41,0	43,7	41,2
$L_{r,Tag}$	21,6	21,8	22,4	22,5	23,3	24,2	24,4	25,0	27,2	29,9	27,4
$L_{r,Nacht}$	17,6	17,8	18,5	18,5	19,3	20,2	20,4	21,0	23,2	25,9	23,4

Tabelle 10: Schutzabstände für Betondecken (Abstand Außenwände von Tunnel und Gebäude)

Abstand		Oberbau	Oberbau		Oberbau	Oberbau
R	Beurteilungsgröße	KB_F , Zeile3	KB_F , Zeile4	Beurteilungsgröße	Spektral	Summenpegel
< 5m	$KB_{Fmax} =$	USM1	USM1	$L_{pAFmax} =$	USM1	USM2
	$KB_{FTrTag} =$	USM1	USM2	$L_{m,Zug,Tag} =$	SCH	SCH
	$KB_{FTrNacht} =$	USM1	USM2	$L_{m,Zug,Nacht} =$	USM1	USM1
5-10m	$KB_{Fmax} =$	SCH	SCH	L_{pAFmax}	USM1	USM1
	$KB_{FTrTag} =$	SCH	USM1	$L_{m,Zug,Tag} =$	SCH	SCH
	$KB_{FTrNacht} =$	USM1	USM1	$L_{m,Zug,Nacht} =$	SCH	SCH
10-15m	$KB_{Fmax} =$	SCH	SCH	L_{pAFmax}	SCH	USM1
	$KB_{FTrTag} =$	SCH	SCH	$L_{m,Zug,Tag} =$	SCH	SCH
	$KB_{FTrNacht} =$	SCH	USM1	$L_{m,Zug,Nacht} =$	SCH	SCH
15-20m	$KB_{Fmax} =$	SCH	SCH	L_{pAFmax}	SCH	SCH
	$KB_{FTrTag} =$	SCH	SCH	$L_{m,Zug,Tag} =$	SCH	SCH
	$KB_{FTrNacht} =$	SCH	SCH	$L_{m,Zug,Nacht} =$	SCH	SCH
20-25m	$KB_{Fmax} =$	SCH	SCH	L_{pAFmax}	SCH	SCH
	$KB_{FTrTag} =$	SCH	SCH	$L_{m,Zug,Tag} =$	SCH	SCH
	$KB_{FTrNacht} =$	SCH	SCH	$L_{m,Zug,Nacht} =$	SCH	SCH
25-30m	$KB_{Fmax} =$	SCH	SCH	L_{pAFmax}	SCH	SCH
	$KB_{FTrTag} =$	SCH	SCH	$L_{m,Zug,Tag} =$	SCH	SCH
	$KB_{FTrNacht} =$	SCH	SCH	$L_{m,Zug,Nacht} =$	SCH	SCH

9.4 Zusammenfassende Darstellung der Prognose-Ergebnisse

9.4.1 Gebäudezusammenstellung 1 (U5 Ost)

Gebäude	SCH	USM1	USM2/	Abstand, m	Gebäude-nutzung	Ge-schosse
Nr. 1-Überseering 40 Teil 1	X	-	-	27	Büro	9
Nr. 1-Überseering 40 Teil 2	X	-	-	27	Büro	2
Nr. 2-Überseering 45	X	-	-	11	Büro	8
Nr. 3-New-York-Ring 1	X	-	-	22	Büro	8
Nr. 4-New-York-Ring 13 Teil1	X	-	-	59	Büro	9
Nr. 4-New-York-Ring 13 Teil 2	X	-	-	27	Büro	5
Nr. 4-New-York-Ring 15	X	-	-	20	Büro	7
Nr. 5-Überseering 32	X	-	-	18	Büro	15
Nr. 5-Überseering 34	X	-	-	18	Büro	15
Nr. 6-Überseering 30	-	X	-	4	Büro/ Wohnen	13
Nr. 7.1-Überseering 26_1.BA	-	X	-	28	Büro	3-7
Nr. 7.2-Überseering 26_1.BA	-	X	-	3	Büro	5-8
Nr. 8-Überseering 24	X	-	-	10	Büro	?

9.4.2 Gebäudezusammenstellung 2 (U5 Ost)

Gebäude	SCH	USM1	USM2/	Abstand, m	Gebäude-nutzung	Ge-schosse
Nr. 51-Langenbeckshöh 27-33	-	X	-	10	WG	5
Nr. 52-Langenbeckshöh 21, 23	-	-	X	1	WG	3
Nr. 53-Langenbeckshöh 17, 19	-	X	-	8	WG	4
Nr. 54-Langenbeckshöh 25	-	-	X	1	WG	4
Nr. 55-Rübenkamp 285, 283	-	-	X	2	WG	4
Nr. 56-Rübenkamp 279, 281	-	-	X	1	WG	4
Nr. 57-Rübenkamp 275, 277	-	-	X	1	WG	5
Nr. 58-Rübenkamp 271, 273	-	-	X	1	WG	5
Nr. 59-Langenbeckshöh 15	X	-	-	23	WG	5
Nr. 60-Rübenkamp 264-270	-	X	-	13	WG	3
Nr. 61-Rübenkamp 265, 267, 269	X	-	-	20	WG	4
Nr. 62-Rübenkamp 260, 262	-	-	X	1	WG	4
Nr.63-Carpserweg 19	-	X	-	7	WG	3
Nr. 64-Rübenkamp 256, 258	-	X	-	8	WG	3
Nr. 65-Carpserweg 5-15	-	-	X	1	WG	3
Nr. 66-Carpserweg 6-16	-	-	X	1	WG	3
Nr. 67-Carpserweg18-Buekweg 5,7	X	-	-	25	WG	3
Nr. 68-Zwanckweg 5-13	-	-	X	1	WG	3
Nr. 69-Zwanckweg 1, 3	X	-	-	21	WG	3
Nr. 70-Zwanckweg 2, 4	-	-	X	1	WG	3
Nr. 71-Böckelweg 1, 3	-	-	X	1	WG	3
Nr. 72-Böckelweg 2, 4, 6	-	-	X	1	WG	3
Nr. 73-1-Fuhlsbüttler Str. 527	X	-	-	29	WG	4
Nr. 73-2+3-Fuhlsbüttler Str.527	-	-	X	1	Gewerbe	1
Nr. 73-4-Fuhlsbüttler Str. 527	-	X	-	11	Gewerbe	2
Nr. 74-1-Zwanckweg 6,10,16	-	X	-	10	Büro	3
Nr. 74-2-Böckelweg 5	-	X	-	10	Büro	3

9.4.3 Gebäudezusammenstellung 3 (U5 Ost)

Gebäude	SCH	USM1	USM2	Abstand; m	Gebäude- nutzung	Ge- schosse
Nr. 101-Fuhlsbüttler Str. 570	X	-	-	62,0	WG	2
Nr. 102-Nordheimstr. 1, 3	-	-	X	3,0	WG	bis 7
Nr. 103-1-Fuhlsbüttler Str. 488	-	-	X	3,0	Büro	1
Nr. 103-2-Nordheimstr. 2	-	X	-	7,0	WG	8
Nr. 104-Nordheimstr. 5, 7	-	-	X	3,0	WG	bis 7
Nr. 105-Nordheimstr. 9, 11	X	-	-	16,0	WG	5
Nr. 106-Sahlenburger Str. 1, 3	-	-	X	3,0	WG	5
Nr. 107-Nordheimstr. 4	-	-	X	3,0	WG	8
Nr. 108-Sahlenburger Str. 2,4,6	-	-	X	4,0	WG	3
Nr. 109-Nordheimstr. 15, 17	X	-	-	20,0	WG	3
Nr. 110-Meister-Bertram-Str. 29	X	-	-	29,0	WG	4
Nr. 111-Nordering 26b	X	-	-	25,0	WG	4
Nr. 112-Nordering 24b	-	X	-	14,0	WG	5
Nr. 113-Nordering 22 a, b	-	X	-	8,0	WG	4
Nr. 114-Nordering 20a, b	-	-	X	2,0	WG	5
Nr. 115-Steilshooper Allee 47	-	X	-	8,0	Gewerbe	2
Nr. 116-Steilshooper Allee 8	X	-	-	23,0	WG	5
Nr. 117-Steilshooper Allee 18	X	-	-	33,0	WG	5
Nr. 118-Rouwoldtweg 11 A	-	X	-	7,0	Gewerbe	1
Nr. 119-Rouwoldtweg 11 B	X	-	-	0,9	Gewerbe	1
Nr. 120-Rouwoldtweg 9	X	-	-	0,9	Gewerbe	1
Nr. 121-Steilshooper Allee 51	X	-	-	0,9	Gewerbe	1
Nr. 122-Steilshooper Allee 49	-	-	X	0,9	Büro	2
Nr. 123-Rouwoldtweg 7	-	-	X	0,9	Büro	3
Nr. 124-Steilshooper Allee 53	-	-	X	0,9	Büro	2
Nr. 125-Steilshooper Allee 55	X	-	-	0,9	Gewerbe	1
Nr. 126-Rouwoldtweg 1	X	-	-	0,9	Gewerbe	2
Nr. 127-Steilshooper Allee 59	X	-	-	7,0	Gewerbe	2
Nr. 128-Gründgenstr. 18	X	-	-	1,0	Gewerbe	3
Nr. 129-Steilshooper Allee 61	X	-	-	11,0	Gewerbe	2
Nr. 130-Gründgenstr. 20	-	-	X	0,9	Büro	3
Nr. 131-Steilshooper Allee 5	X	-	-	28,0	Gewerbe	1
Nr. 132-Steilshooper Alle 9	X	-	-	26,0	Gewerbe	1

9.4.4 Gebäudezusammenstellung 4 (U5 Ost)

Gebäude	SCH	USM1	USM2	Abstand, m	Gebäude- nutzung	Ge- schosse
Nr. 151-Schreyerring 1 Teil1	-	-	X	5	WG	1
Nr. 151-Schreyerring 1 Teil 2	-	X	-	15	WG	12
Nr. 152-Gründgenstr. 22	X	-	-	21	Büro	2
Nr. 153-Cesar-Klein-Ring 2	-	-	X	2	WG	11
Nr. 154-Schreyerring 26	-	-	X	7	WG	bis 8
Nr. 155-Gründgenstr. 26	-	X	-	11	WG	11
Nr. 156-Gründgenstr. 28	X	-	-	25	Kirche	3
Nr. 157-Schreyerring 51 Teil1	-	-	X	1	WG	13
Nr. 157-Schreyerring 51 Teil2	X	-	-	21	Gewerbe	1
Nr. 158-Schreyerring 37-49	-	-	X	2	Gewerbe	1
Nr. 159-Gründgenstr. 32	X	-	-	24	Kirche	2
Nr.160-Erich-Ziegel-Ring88Teil1	-	X	-	8	Parken	1
Nr.160-Erich-Ziegel-Ring88Teil2	-	X	-	14	WG	10
Nr. 161-Erich-Ziegel-Ring1Teil1	-	X	-	8	Gewerbe	1
Nr. 161-Erich-Ziegel-Ring1Teil2	-	X	-	11	WG	9
Nr. 162-Borchertring 90 Teil1	-	-	X	4	WG	11
Nr. 162-Borchertring 90 Teil2	-	X	-	14	WG	10
Nr. 163-Borchertring 83	X	-	-	18	Gewerbe	?
Nr. 164-Leeschenblick 15	-	-	X	4	WG	2
Nr. 165-Leeschenblick 13 Teil1	X	-	-	26	WG	1
Nr. 165-Leeschenblick 13a Teil2	-	X	-	12	WG	2
Nr. 166-Leeschenblick 12	-	X	-	14	WG	2
Nr. 167-Leeschenblick 10	-	-	X	2	WG	2
Nr. 168-Leeschenblick 11	X	-	-	23	WG	1
Nr. 169-Sonnentauweg 1	-	-	X	1	WG	2
Nr. 170-Sonnentauweg 3	-	X	-	11	WG	2
Nr. 171-Sonnentauweg 2	-	-	X	1	WG	2
Nr. 172-Sonnentauweg 4	-	-	X	1	WG	2
Nr. 173-Sonnentauweg 6	-	X	-	12	WG	1
Nr. 174-Sonnentauweg 8	X	-	-	24	WG	2
Nr. 175-Leeschenblick 8	-	X	-	19	WG	2
Nr. 176-Leeschenblick 6	-	X	-	17	WG	2
Nr. 177-Leeschenblick 4	X	-	-	22	WG	2
Nr. 178-Fabricsiusstr. 277	X	-	-	25	WG	2
Nr. 179-Fabricsiusstr. 279	-	X	-	10	WG	2
Nr. 180-Fabricsiusstr. 281	-	-	X	1	WG	2
Nr. 181-Fabricsiusstr. 283	-	-	X	1	WG	2
Nr. 182-Fabricsiusstr. 285	-	X	-	8	WG	2
Nr. 183-Fabricsiusstr. 287	X	-	-	27	WG	2
Nr. 184-Fabricsiusstr. 270	-	-	X	1	Kirche	3
Nr. 185-Seekamp 27	-	-	X	2	WG	3
Nr. 186-Seekamp 25	X	-	-	25	WG	2
Nr. 187-Seekamp 23	X	-	-	32	WG	2
Nr. 188-Bramf.Chaussee 259Teil1	-	-	X	1	?	?
Nr.188-Bramf.Chaussee259Teil2	-	-	X	1	Büro	2
Nr.188-Bramf.Chaussee259Teil2a	-	-	X	1	WG	2
Nr.188-Bramf.Chaussee259Teil3	-	X	-	11	WG	2
Nr. 189-Bramf.Chaussee 261,263	-	X	-	14	Büro	2
Nr. 190-Bramfelder Chaussee 253	-	-	X	1	WG	5
Nr. 191-Bramfelder Chaussee 251	X	-	-	21	WG	4

9.4.5 Gebäudezusammenstellung 5 (U5 Ost)

Gebäude	SCH	USM1	USM2	Abstand, m	Gebäude- nutzung	Ge- schosse
Nr. 201.1-Bramfelder DP 1	X	-	-	27	Kirche	4
Nr. 201.1-Bramfeld DP 3	-	-	X	7	Restaurant	3
Nr. 201.2-Bramfeld DP 5 Teil1	X	-	-	24	WG	1
Nr. 201.2-Bramfeld DP 5 Teil2	-	-	X	6	WG	
Nr. 201.2-Bramfeld DP 5 Teil3	-	X	-	10	WG	
Nr. 202-Bramf. Chaussee 252-256	-	-	X	4	WG	6
Nr. 203-Bramfelder DP 7	-	-	X	3	Kirche	3
Nr. 204-Bramfelder DP 8	-	-	X	2	WG	5-6
Nr. 205-Bramfelder DP 19	-	-	X	3	WG	2
Nr. 206-Bramfelder DP 17	X	-	-	18	Gewerbe	?
Nr. 207-Bramfelder DP 15	X	-	-	33	Gewerbe	?
Nr. 208-Bramfelder DP 18	X	-	-	8	Gewerbe	2
Nr. 209-Bramfelder DP 21	-	X	-	2	Büro	3
Nr. 210-Bramfelder DP 23a	X	-	-	22	WG	?
Nr.211-Bramfelder DP 23_Teil 1	X	-	-	2	Gewerbe	2
Nr.211-Bramfelder DP 23_Tei 2	-	-	X	2	WG	1
Nr. 212-Bramfelder DP 25	-	-	X	4	WG	2
Nr. 213.1-Heukoppel 1	-	X	-	13	WG	3
Nr. 213.2-Heukoppel 1a-3a	-	-	X	1	WG	4
Nr. 213.3-Heukoppel 5-7	-	-	X	1	WG	5
Nr. 214-Heukoppel 9	-	X	-	9	WG	3
Nr.215-Bruchfinkenweg 2-4 Teil1	-	-	X	1	Gewerbe	1
Nr.215-Bruchfinkenweg 2-4 Teil2	-	-	X	1	WG	2
Nr. 216-Buchfinkenweg 6-8	-	-	X	1	WG	2
Nr. 217.1-Buchfinkenweg 10	-	X	-	16	WG	2
Nr. 217.2-Buchfinkenweg 12	X	-	-	16	WG	2
Nr. 218-Heukoppel 15	-	X	-	6	WG	2
Nr. 219-Heukoppel 17	-	-	X	5	WG	2
Nr. 220-Höhnkoppelort 3	X	-	-	18	WG	2
Nr. 221-Höhnkoppelort 5	-	X	-	11	WG	2
Nr. 222-Höhnkoppelort 7	-	-	X	1	WG	2
Nr. 223-Höhnkoppelort 9	-	-	X	1	WG	2
Nr. 224-Höhnkoppelort 11	-	-	X	5	WG	2
Nr. 225-Höhnkoppelort 13	-	X	-	12	WG	2
Nr. 226-Höhnkoppelort 14	X	-	-	24	WG	2
Nr. 227-Höhnkoppelort 12	X	-	-	19	WG	2
Nr. 228-Höhnkoppelort 10	-	-	X	1	WG	2
Nr. 229-Höhnkoppelort 8	-	-	X	1	WG	2
Nr. 230-Höhnkoppelort 6	-	-	X	1	WG	2
Nr. 231-Höhnkoppelort 4	-	X	-	11	WG	2
Nr. 232-Höhnkoppelort 2a	X	-	-	26	WG	2
Nr. 233-Heukoppel 33	-	-	X	1	WG	3
Nr. 234-Heukoppel 32 u. 34	-	X	-	6	WG	4
Nr. 235-Jahnkeweg 1	X	-	-	25	WG	4
Nr. 236-Heukoppel 37,39,41,43	-	-	X	3	WG	5

Anmerkung 1 – WG: Wohngebäude

Anmerkung 2 – Abstand: Horizontaler Abstand zwischen jeweils Tunnel- und Gebäudeaußenwand

Anmerkung 3 – Die mit „1“ gekennzeichneten Abstände bedeuten eine Unterfahrung (Gebäude stehen (teilweise) über dem Tunnel).

10 Abschätzung der Einfügedämmung von Maßnahmen

Die schwingungsmindernde Wirkung von Oberbauformen wird durch die Einfügedämmung $D_e(f_{Tn})$ beschrieben. In DIN SPEC 45673-3 wird die messtechnische Ermittlung und in DIN SPEC 45673-4 die rechnerische Abschätzung dieser Größe beschrieben. Es ist hier darauf hinzuweisen, dass es sich hier nicht um eine feste (absolute) Größe für einen bestimmten Oberbau handelt, die Einfügedämmung ist sowohl vom Messpunkt (bei der messtechnischen Ermittlung) als auch von den verschiedenen Oberbauständen (Ausführung und Wartung) abhängig.

In DIN SPEC 45673-4 werden unterschiedliche Verfahren zur rechnerischen Abschätzung der Einfügedämmung beschrieben.

Im Wesentlichen wird die Einfügedämmung beschrieben durch die dynamischen Eigenschaften

- der „Bauteile“ oberhalb des elastischen Elementes (unabgefederte Radsatzmasse, Schiene und Schwellen),
- denen des (dominanten) elastischen Elementes selber (Schotter oder Unterschottermatte) sowie
- dem Unterbau.

Diese dynamischen Eigenschaften können durch die jeweiligen Steifigkeiten, Admittanzen oder Impedanzen beschrieben werden (siehe DIN SPEC 45673-4). Für das im Folgenden dargestellte Ergebnis, **Bild 16**, wurden Impedanzfunktionen verwendet (die Impedanz Z beschreibt den Schwingwiderstand einer Struktur, z.B. Radsatz, Tunnelsohle, Boden, Gebäude usw.).

Den Vergleich zwischen berechneter und gemessener Einfügedämmung für eine Matte des Typs USM2 zeigt **Bild 17**. Bis auf die Terzen 80 Hz und 100 Hz ist im Mittel eine gute Übereinstimmung gegeben. Für den Vergleich wurde die messtechnisch ermittelte Einfügedämmung an der U4 herangezogen.

Für die Berechnung wurden folgende Steifigkeiten angesetzt:

$$SCH = 0,6 \cdot 10^9 \text{ N/m} = 0,6 \text{ N/mm}^3$$

$$USM1 = 0,4 \cdot 10^9 \text{ N/m} = 0,4 \text{ N/mm}^3$$

$$USM2 = 0,125 \cdot 10^9 \text{ N/m} = 0,125 \text{ N/mm}^3.$$

In **Bild 13** werden die Wirkungen der Matten im Vergleich zum Schotteroberbau positiv dargestellt. **Bild 16** zeigt hier die mindernde Wirkung einer Matte im negativen Bereich. Beide Darstellungsformen sind üblich und zeigen die schwingungsmindernde Wirkung von zusätzlichen elastischen Elementen im Oberbau im Vergleich zu einem reinen Schotteroberbau (Referenzoberbau).

Als wirksame Masse wurde die unabgefederte Achsmasse des Hamburger U-Bahn-Fahrzeuges DT5 (Vorgänger des DT6-A) mit $2 \times 1.015 \text{ kg}$ herangezogen. Die Berechnung erfolgte dann für einen 3,6 m langen Gleisabschnitt, dies entspricht näherungsweise dem Wirkungsbereich eines Drehgestells.

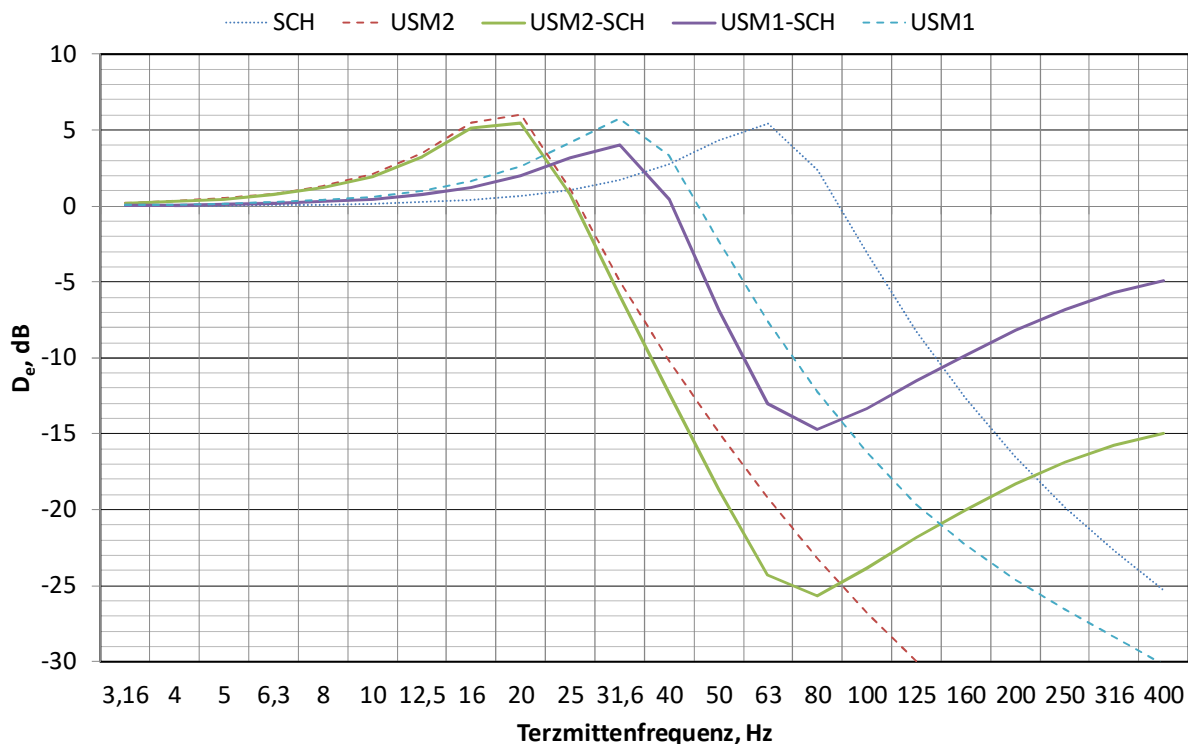


Bild 16: Berechnete Einfügedämmung D_e von zwei unterschiedlich steifen Unterschottermatten (USM1 und USM2) im Vergleich zur Einfügedämmung eines reinen Schotteroberbaus (SCH).

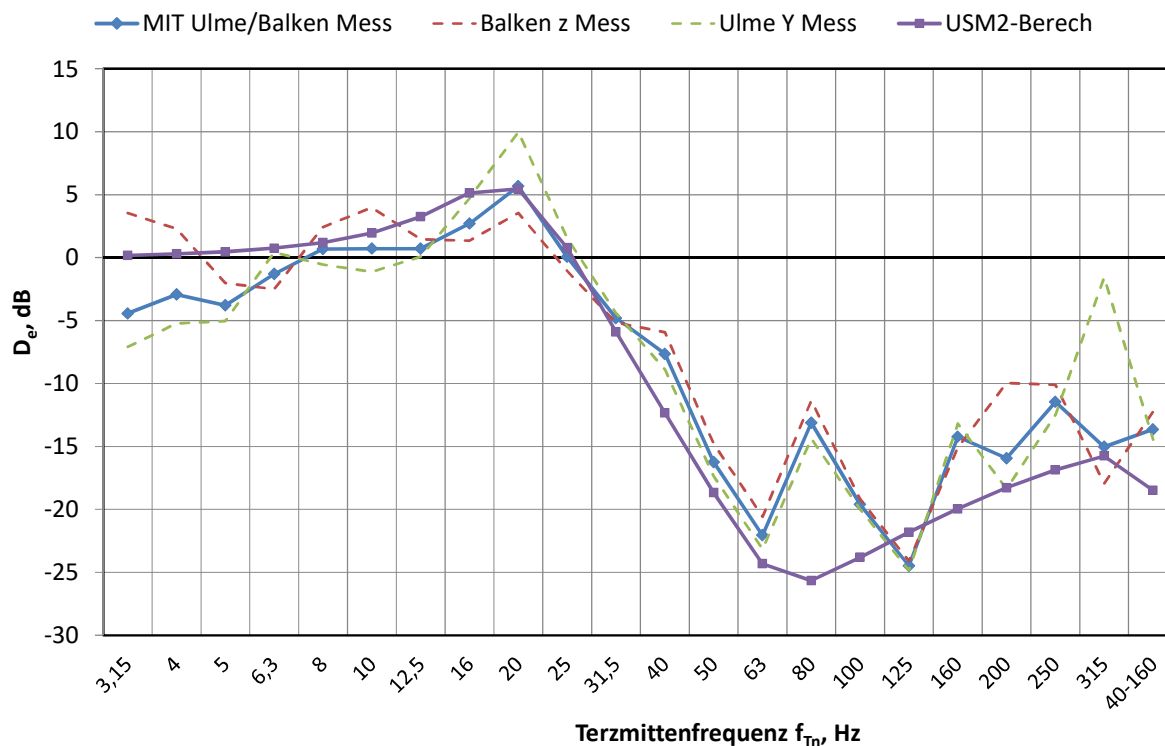


Bild 17: Vergleich zwischen berechneter und messtechnisch in der U4 ermittelter Einfügedämmung D_e für eine Unterschottermatte USM2

11 Literatur - zu berücksichtigende Regelwerke und Veröffentlichungen, Referenzen

11.1 Normen und Richtlinien

Im Folgenden sind einige wesentliche Regelwerke und Veröffentlichungen, die in die Bearbeitung berücksichtigt werden, zusammengestellt:

[1]	DIN 4150: Erschütterungen im Bauwesen. <ul style="list-style-type: none"> ○ Teil 1: Vorermittlung von Schwingungsgrößen ○ Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden ○ Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen
[2]	DIN 45672: Schwingungsmessungen in der Umgebung von Schienenverkehrswegen <ul style="list-style-type: none"> ○ Teil 1: Messverfahren ○ Teil 2: Auswerteverfahren
[3]	DIN 45673, Mechanische Schwingungen - Elastische Elemente des Oberbaus von Schienenfahrwegen <ul style="list-style-type: none"> ○ Teil 3: DIN SPEC Messtechnische Ermittlung der Einfügungsdämmung im eingebauten Zustand (Versuchsaufbau oder Betriebsgleis) ○ Teil 4: DIN SPEC Rechnerische Ermittlung der Einfügungsdämmung im eingebauten Zustand
[4]	<i>VDI 3837: Erschütterungen in der Umgebung von oberirdischen Schienenverkehrswegen - Spektrales Prognoseverfahren</i>
[5]	ISO 14837-1: Ground-borne noise and vibration arising from rail systems – Part 1: General guidance (Anmerkung: eine deutsche Übersetzung liegt vor, sie wurde aber nicht veröffentlicht)
[6]	ISO 14837-31: Ground-borne noise and vibration arising from rail systems – Part 31: Guideline on field measurements for the evaluation of human exposure in buildings.
[7]	TA Lärm : Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm) vom 26. August 1998
[8]	DB Richtlinie 820.2050 - Erschütterungen und sekundärer Luftschall (2017)
[9]	16. BImSchV 2014 mit Anlage 2 Schall 03 (Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung - 16. BImSchV) vom 12.06.1990, BGBl. I S. 1036, zuletzt geändert durch Art. 1 der Verordnung vom 18.12.2014 (BGBl. I S. 2153))
[10]	24. BImSchV: Vierundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verkehrswege- Schallschutzmaßnahmenverordnung - 24. BImSchV) Ausfertigungsdatum: 04.02.1997 Vollzitat: "Verkehrswege-Schallschutzmaßnahmenverordnung vom 4. Februar 1997 (BGBl. I S. 172, 1253), die durch Artikel 3 der Verordnung vom 23. September 1997 (BGBl. I S. 2329) geändert worden ist" Stand: Geändert durch Art. 3 V v. 23.9.1997 I 2329 Fußnote
[11]	leer

11.2 Literatur

[12]	Krüger, F. u.a.: Schall- und Erschütterungsschutz im Schienenverkehr. Kontakt & Studium; Expert Verlag, Band 565 (2006)
[13]	Krüger, F.: Handbuch Schall und Erschütterungen beim Schienennahverkehr. Bezug: Einkaufs- und Wirtschaftsgesellschaft für Verkehrsunternehmen (beka) mbH, Köln (2002)
[14]	Krüger, F.: Entwicklung eines admittanzorientierten Prognoseverfahrens zur immissionsgerechten Gestaltung des Gleisoberbaus im Rohbaustadium von Tunnelstrecken. Dissertation TU Berlin (1989)
[15]	Krüger, F./Becker, H. und P. Prüm: Schwingungsverhalten von Gebäuden unter dynamischer Ersatzanregung im Vergleich zur Zusanregung - Gebäudeschwingungen; BMFT-TV 8843 0, Projektleiter: Krüger, F., Januar 1994
[16]	Hamburger HOCHBAHN AG - Richtlinien für Planung, Entwurf und Bau von U-Bahn-Anlagen in Hamburg, Teil 3 Oberbau (RUO), Hamburg 2004
[17]	Eisenmann, J./Deischl, F. u. L. Steinbeißer: Körperschallemissionen und Immissionen bei Schienenbahnen: Messung – Dämmung – Prüfung. Mitteilungen des Prüfamtes für Bau von Landverkehrswegen der TU München. Heft 44, 1984. Hrsg.: Eisenmann, J.
[18]	Melke, J.: Erschütterungen und Körperschall des landgebundenen Verkehrs – Prognose und Schutzmaßnahmen. Landesamt für Immissionsschutz (Hrsg.): Materialien Nr. 22, Essen 1995
[19]	Lang, J.: Messergebnisse zum Körperschallschutz für U-Bahnen. Proceedings Seventh International Congress on Acoustics, Budapest 1971, pp. 421-424
[20]	Krüger, F. und H.-P. Schug: Schwingungsmessungen in der Umgebung innerstädtischer Bahn- und Straßentunnel; Hauptstufe Teil I: Bahntunnel, STUVA-Forschungsberichte 14/81, Dezember 1980, Projektleitung: Blennemann, F.
[21]	Krüger, F. und H.-P. Schug: Untersuchungen verschiedener Oberbauformen in einem U-Bahntunnel im Hinblick auf Schall- und Erschütterungsemissionen; Bericht 8*, März 1982, Projektleitung: Blennemann, F.
[22]	Krüger, F.: Minderung der Schwingungsabstrahlung von U-Bahntunneln durch hochelastische Gleisolationssysteme unter verschiedenen Tunnelrandbedingungen; Bericht 17*, Februar 1985, Projektleitung: Blennemann, F. und Uderstädt, D.
[23]	Krüger, F./Becker, H. und P. Prüm: Ermittlung von Kenngrößen aus Messungen an Rohbautunneln zur Festlegung des aus Immissionsschutzgründen notwendigen Oberbaus; Bericht 20*, Juni 1986, Projektleitung: Blennemann, F.
[24]	Krüger, F.: Entwicklung eines admittanzorientierten Prognoseverfahrens zur immissionsgerechten Gestaltung des Gleisoberbaus im Rohbaustadium von Tunnelstrecken; Dissertation an der TU Berlin, Dezember 1988
[25]	Krüger, F./Becker, H. und P. Prüm: Schwingungsminderung bei Schienenbahnen des Stadtverkehrs durch kontinuierliche Schienenlagerung, Bericht 24*, Juni 1990, Projektleiter; Blennemann, F.
[26]	Handbook of Urban Rail – Noise and Vibration Control (USA) (1982)