

2. S-Bahn-Stammstrecke München

Planfeststellung

Erläuterungsbericht (nachrichtlich)

Erschütterungstechnische Untersuchung

Planfeststellungsabschnitt 3neu

Vorhabenträger:



DB Netz AG
Regionalbereich Süd
Richelstraße 3, 80634 München



DB Station & Service AG
Bahnhofsmanagement München
Bayerstraße 10a, 80335 München

München, den 26.02.2010
Erstellt im Auftrag der DB AG



DB Energie GmbH
Richelstraße 3, 80634 München

Projektgesellschaft:



DB ProjektBau GmbH
Großprojekt 2. S-Bahn-Stammstrecke München
Arnulfstr. 27, 80335 München, Tel 089/1308-0

Beteiligte Planer und Gutachter:

Planungsgemeinschaft 2. S-Bahn-Stammstrecke München
Gesamtkoordinierung und Generalplanung Los 2 und 4
OBERMEYER Planen+Beraten GmbH / DB-International / PSP Beratende Ingenieure München

Planungsgemeinschaft 2. S-Bahn-Stammstrecke München
Generalplanung Los 1 und 3
Lahmeyer München Ingenieurgesellschaft mbH / Dorsch Gruppe DC Verkehr und Infrastruktur GmbH

Fachplaner, Gutachter

DB Energie GmbH
DB System
DC Systemtechnik
DB ProjektBau GmbH, NL Süd
DB AG Sanierungsmanagement
Balfour Beatty Rail GmbH, Power Systems
Pöyry Infra GmbH

HD Rechtsanwälte
RA Heinrich und Dörner

m-Plan eG
STUVA – Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V.
TU München, Zentrum Geotechnik

Inhaltsverzeichnis

Seite

1	Allgemeines.....	2
1.1	Allgemeines, Vorhabensziele.....	2
1.2	Aufgabenstellung	3
2	Grundlagen der erschütterungstechnischen Untersuchung	4
2.1	Allgemeines.....	4
2.2	Einflüsse auf die Erschütterungsimmission	4
2.3	Vorgehensweise	5
2.4	Grundlagen der Untersuchung.....	6
3	Beurteilung von Erschütterungen.....	7
3.1	Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden	7
3.2	Einwirkungen auf bauliche Anlagen.....	9
3.3	Einwirkungen auf empfindliche technische Geräte	9
3.4	Sekundärer Luftschall	9
3.5	Zusammenfassung der erschütterungstechnischen Anforderungen	10
4	Ablauf und Umfang der Untersuchung	12
5	Berechnung der zu erwartenden Erschütterungs-Immissionen.....	13
5.1	Emissions-Spektren	14
5.1.1	Einfluss der Geschwindigkeit.....	14
5.1.2	Einfluss des Fahrzeuges.....	15
5.2	Übertragungsfunktionen.....	15
5.2.1	Ausbreitung im Erdboden	15
5.2.2	Gebäudespezifische Übertragungsfaktoren	16
5.2.3	Messtechnisch untersuchte Gebäude	17
5.3	Berechnung der KB-Werte.....	17
5.4	Berechnung des sekundären Luftschalls.....	18
5.5	Ergebnisse und Beurteilung für die einzelnen Bereiche.....	19
5.5.1	Bereich Praterinsel.....	20
5.5.2	Zwischen Innere Wiener Straße und Preysingstraße.....	20
5.5.3	Zwischen Preysingstraße und östlich der Metzstraße	21
5.5.4	Zwischen östlich der Metzstraße und Hp München Ostbahnhof tief	22
5.5.5	Bereich Hp München Ostbahnhof tief.....	23
5.5.6	Zwischen Hp München Ostbahnhof tief und Tunnelportal.....	23
5.5.7	Freie Strecke in Richtung Leuchtenbergring	24
6	Erschütterungsschutzmaßnahmen	25
6.1	Maßnahmen am Oberbau.....	25
6.1.1	Unterschottermatten	25
6.1.2	Masse-Feder-Systeme.....	26
6.1.3	Elastische Schienenlagerung.....	26
6.1.4	Elastische Schwellenlagerung	26
6.2	Erschütterungsschutzmaßnahmen an Gebäuden (passive Maßnahmen)	26
6.3	Auswahl der geeigneten Maßnahmen	27

6.4	Erforderliche Erschütterungsschutzmaßnahmen.....	28
7	Erschütterungen während der Bauzeit	29
8	Zusammenfassung	31
9	Grundlagenverzeichnis	33
Anhang I:	Emissionsspektren.....	34
Anhang II:	Gebäude-Übertragungsfaktoren	35

Tabellenverzeichnis

Seite

Tab. 1:	Zusammenhang zwischen bewerteter Schwingstärke und subjektiver Wahrnehmung	7
Tab. 2:	Anhaltswerte nach DIN 4150, Teil 2, Tabelle 1 für die Beurteilung von Erschütterungen in Wohnungen und vergleichbar genutzten Räumen	8
Tab. 3:	Korrektursummanden D gemäß 24.BImSchV	10
Tab. 4:	Abschnittunterteilung für die Erschütterungsprognose	13
Tab. 5:	Messergebnisse MP7* (Übertragungsfaktoren aus der Untersuchung zum PFA 3 (alt))..	20
Tab. 6:	Messergebnisse MP1 und MP2	21
Tab. 7:	Messergebnisse MP3 – MP5	22
Tab. 8:	Messergebnisse MP6	22
Tab. 9:	Abschnitte mit erforderlichen Schutzmaßnahmen	28
Tab. 10:	Abschnitte mit erforderlicher Überprüfung im Rohbau	28
Tab. 11:	Anhaltswerte nach DIN 4150, Teil 2 für Erschütterungen durch Baumaßnahmen.....	29
Tab. 12:	Emissionsspektren für die Erschütterungsprognose	34
Tab. 13:	Gemessene Übertragungsfaktoren der untersuchten Gebäude, in dB	35

Abkürzungsverzeichnis

A

ABS Ausbaustrecke

B

BauGB Baugesetzbuch

BauNVO Baunutzungsverordnung

BBPL Bebauungsplan

Bf München Ost München Ostbahnhof Personenbahnhof

Bf Bahnhof

BImSchG Bundes-Immissionsschutzgesetz

BImSchV Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes

C

D

dB (A) Dezibel A (bewerteter Schallpegel)

DB AG Deutsche Bahn AG

DIN® Verbandzeichen des Deutschen Instituts für Normung e.V.

E

EBA Eisenbahn-Bundesamt

F

G

G Gewerbegebiet (Nutzungsart)

Gl Gleis

GOK Geländeoberkante

H

Hbf Hauptbahnhof

Hp Haltepunkt

Hz Hertz, Einheit der Frequenz

I

J

K

KB-Wert	Maß für Schwingstärke
KiZ	Kinderzimmer
L	
LHM	Landeshauptstadt München
Ig	Dekadischer Logarithmus (Basis 10)
I	Länge der Züge
M	
M	Maßstab
M	Mischgebiet (Nutzungsart)
MFS	Masse-Feder-System
MP	Messpunkt
ML	Bf München Laim
MLEU	Bft München Leuchtenbergring
MOPS	Bf München Ostbahnhof Pbf (S-Bahn)
m	Meter (Einheit)
N	
O	
OG	Obergeschoss
OK	Oberkante
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
P	
Pbf	Personenbahnhof
PfG	Planfeststellungsgrenze
PFA	Planfeststellungsabschnitt
Q	
R	
S	
SBSS	S-Bahn-Stammstrecke
SO	Schienenoberkante
SPNV	Schienenpersonennahverkehr
S-V	Sondergebiet Verwaltung
S-Sch	Sondergebiet Schule
SZ	Schlafzimmer

T

U

USM Unterschottermatte

V

VDI Verein Deutscher Ingenieure

VersA Versuchsanstalt der Deutschen Bahn, Abteilung für Elektrophysik bzw. Zentralbereich Forschung und Versuche, Versuchszentrum 3

v_e, v (Entwurfs-) Geschwindigkeit

v_{max} Maximale Geschwindigkeit

VwVfG Verwaltungsverfahrensgesetz

W

W Wohngebiet (Nutzungsart) in Immissionsergebnistabellen

WZ Wohnzimmer

X

Y

Z

Begriffsdefinitionen

2. S-Bahn - Stammstrecke

Bezeichnet wird hiermit die geplante zweigleisige S Bahn-Stammstrecke, beginnend in Laim und endend im Bf München Ost im Bft Leuchtenbergring mit den dazwischen liegenden Haltepunkten Hauptbahnhof Bahnhofplatz tief, Marienhof und Ostbahnhof tief.

1 Allgemeines

1.1 Allgemeines, Vorhabensziele

Die heutige S-Bahn-Stammstrecke zwischen Laim und Ostbahnhof ist mit rd. 1 000 Fahrten täglich das verkehrliche Herzstück und gleichzeitig eine betriebliche Engstelle im gesamten Münchener S-Bahnnetz. Durch die Bündelung der S-Bahnlinien auf der bestehenden Stammstrecke können sich Störungen im Betrieb auf das gesamte S-Bahnnetz auswirken.

Mit dem Ausbau des S-Bahnnetzes zur Realisierung eines 10 Minutentaktes auf bestimmten Linien wurde die Leistungsfähigkeit der bestehenden S-Bahn-Stammstrecke von 24 auf max. 30 Züge je Stunde und Richtung zu Beginn des Jahresfahrplanes 2005 erhöht. Aufgrund des Ausbauprogramms wurde bereits im Ostbahnhof ein weiteres Gleis mit Bahnsteigkante (Gleis 5) für den S-Bahnverkehr bereitgestellt. Durch diese Maßnahmen kann eine Verdichtung der Zugfolge auf drei westlichen und zwei östlichen Streckenästen realisiert werden.

Um weitere Linien mit Taktverdichtungen fahren zu können, sind über die zur Zeit geplanten und in der Umsetzung befindlichen Ausbaumaßnahmen hinaus zusätzliche Maßnahmen erforderlich.

Da auf den bestehenden zwei Gleisen der S-Bahn-Stammstrecke über die vorgesehenen 30 Züge je Stunde und Richtung technisch keine weitere Steigerung mehr möglich ist, ist eine zusätzliche S-Bahn-Stammstrecke zwischen den Bahnhöfen Laim und Ostbahnhof erforderlich.

Eine weitere wesentliche Aufgabe für eine 2. S-Bahn-Stammstrecke ist es auch, im Falle einer Betriebsstörung auf einer der beiden bestehenden Strecken deren Verkehr teilweise oder ganz zu übernehmen. Im Unterschied zur heutigen Situation können dadurch die Verkehrsbeziehungen mit der S-Bahn von außen in die Münchner Innenstadt aufrecht erhalten werden.

Im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie sowie der DB Netz AG, der Landeshauptstadt München und der Münchener Verkehrs- und Tarifverbund GmbH wurde seit 1999 in mehreren aufeinander aufbauenden Planungsstudien eine 2. S-Bahn-Stammstrecke untersucht. Das Ergebnis dieser Untersuchungen war die 2. S-Bahn-Stammstrecke in der Linienführung Laim – Hauptbahnhof – Marienhof – Ostbahnhof / Leuchtenbergring. Für diese wurde im Jahr 2003 durch das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie eine landesplanerische Überprüfung beantragt. Das Ergebnis der landesplanerischen Überprüfung war, dass die Linienführung mit den Zielen der Landesplanung in

Übereinstimmung steht. Aufgrund der aktuellen Planungsänderungen im Streckenabschnitt östlich der Isar haben die Vorhabenträger DB Netz AG, DB Station & Service AG und DB Energie GmbH eine ergänzende Landesplanerische Überprüfung beantragt. Das Ergebnis einer sog. Offensichtlichkeitsprüfung der Regierung von Oberbayern als höhere Landesplanungsbehörde liegt zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vor.

Gemäß einer Vereinbarung zwischen dem Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie und der Deutschen Bahn AG wurde die DB ProjektBau GmbH beauftragt, die Planungen zu vertiefen und das Planfeststellungsverfahren mit integrierter Umweltverträglichkeitsprüfung vorzubereiten und durchzuführen.

1.2 Aufgabenstellung

Der gegenständliche Bericht enthält die erschütterungstechnische Untersuchung für den Planfeststellungsabschnitt 3neu.

Der vorliegende Planfeststellungsabschnitt 3neu, erstreckt sich von der Gemarkungsgrenze am westlichen Isarufer (Gemarkungsgrenze zwischen Sektion 2 und Sektion 9) bis zum Bahnhof Leuchtenbergring. Er schließt im Westen an den Planfeststellungsabschnitt 2, im Osten an die bestehenden Gleise im Bereich Bft Leuchtenbergring an.

Im Wesentlichen sind dabei folgende Baumaßnahmen vorgesehen:

- Erstellung der unterirdischen Bahnanlagen von der Abschnittsgrenze an der Isar bis zum Bft Leuchtenbergring einschließlich anschließendem Trogbauwerk und Stützmauern (Gleis 200) sowie Anschluss an das im Planfeststellungsabschnitt 3A, München-Leuchtenbergring geplante Trogbauwerk (Gleis 100)
- Um- und Neubau von oberirdischen Gleisanlagen im Bereich Bf München Ost Pbf – Bft Leuchtenbergring mit Anpassung des vorhandenen Bahnsteiges A im Bft Leuchtenbergring.
- Neubau eines Fußgängersteiges an den westlichen Enden der Bahnsteige A und C des Bft Leuchtenbergring einschl. der barrierefreien Erschließung der Bahnsteige.

Inhalt der Untersuchung ist die Prognose der zu erwartenden Erschütterungsimmissionen aus dem S-Bahn-Verkehr der 2.SBSS in den Gebäuden entlang der Strecke, ihre Beurteilung nach anerkannten Regelwerken sowie ggf. die Ermittlung der erforderlichen Schutzmaßnahmen.

Auch wird die zu erwartende Situation bezüglich Erschütterungsimmissionen während der Bauphase beschrieben und beurteilt.

2 Grundlagen der erschütterungstechnischen Untersuchung

2.1 Allgemeines

Erschütterungsimmissionen bestehen aus - fühlbaren - mechanischen Schwingungen (Vibrationen, Erschütterungen) und - hörbarem - sekundärem Luftschall, welcher durch die Schallabstrahlung schwingender Raumbegrenzungsflächen entsteht.

Die physikalische Größe, die vorwiegend zur Beschreibung der Erschütterungseinwirkungen verwendet wird, ist die Schwinggeschwindigkeit (oder Körperschallschnelle), die i.d.R. als Pegel (in dB, bezogen auf $5 \cdot 10^{-8}$ m/s) angegeben wird. Sie ist in Festkörpern (Erdboden, Bausubstanz) stark frequenzabhängig und muss daher spektral betrachtet werden. Zur Beurteilung der Einwirkungen von Erschütterungen auf den Menschen wird nach DIN 4150, "Erschütterungen im Bauwesen": Teil 2 „Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden“ [4] eine Frequenzbewertung auf die Körperschallschnelle am Immissionsort angewendet und daraus die bewertete Schwingstärke KB ermittelt. Die Immissionen des sekundären Luftschalls werden aus der Körperschallschnelle abgeleitet und anhand der an das Gehör angepassten Frequenzbewertung (A-Bewertung) in ihrer Wirkung auf den Menschen bewertet.

2.2 Einflüsse auf die Erschütterungsimmission

Die Entstehung und Ausbreitung der durch die Vorbeifahrten der S-Bahn erzeugten mechanischen Schwingungen wird u.A. beeinflusst durch:

- Streckenführung
- Tunnelbauart
- Geschwindigkeit
- technisches und betriebliches Verhalten der eingesetzten Fahrzeuge
- Ausbreitung im Erdboden (Beschaffenheit des umgebenden Erdbodens, z.B. Art des Bodens, Inhomogenitäten, Grundwasser)
- Übertragungseigenschaften der Gebäude

Unter Ziffer 5.1.1 bis 5.2.2 ist der Einfluss dieser Parameter näher beschrieben. Aufgrund der Vielzahl von Einflüssen sind die Zusammenhänge bei der Erschütterungsentstehung und -übertragung sehr schwierig zu erfassen. Die Körperschalleinleitung in den Erdboden, die Ausbreitung im Erdboden und die Körperschalleinleitung in das Bauwerk unter Berücksichtigung der Bodeneigenschaften, von Brechung und Reflexion der Wellen an Grenzschichten und Übergängen

(z.B. Bodenschichtungen, Oberfläche, Gebäudefundament), sind über Rechenmodelle mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand nur näherungsweise zu bestimmen.

Im Bereich der Einleitung der Schwingungen vom Erdboden in die Gebäude ist die dynamische Anregbarkeit des Bauwerks für die Fortleitung der Schwingungen bestimmend. Die Anregung des Gebäudefundaments wird bei normaler Bauausführung in der Regel mit überhöhten Intensitätswerten an den Decken und Wänden der übrigen Stockwerksbereiche beantwortet.

Zur Erstellung der Erschütterungsprognose sind Messungen zur Ermittlung der fahrzeug-, fahrweg-, orts- und gebäudespezifischen Ausgangsdaten erforderlich. Aus diesen lassen sich statistische Mittelwerte finden und damit unter Berücksichtigung der entsprechenden Streuung Prognosen erstellen.

2.3 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise bei Erschütterungsprognosen basiert auf Messergebnissen und theoretischen Überlegungen, wobei das gesamte System in folgende, voneinander entkoppelte Teilsysteme unterteilt wird:

- Erschütterungsemission (Einleitung in den Erdboden im Nahbereich der Erschütterungsquelle)
- Ausbreitung der Schwingungen im Boden bis zu den Gebäuden (entfernungsbedingte Pegelabnahme im Erdboden)
- Änderung der Schwingungen beim Übergang vom Erdboden (vor dem Gebäude) in die zu betrachtenden Räume innerhalb der Gebäude (gebäudespezifische Übertragungsfaktoren)

Zur Durchführung von erschütterungstechnischen Untersuchungen müssen die o. g. Größen spektral, d. h. getrennt für jedes Frequenzband, bekannt sein und betrachtet werden. Mit Hilfe dieser Ausgangsdaten können die zu erwartenden Erschütterungsimmissionen als Körperschallschnelle spektral ermittelt werden. Daraus können die Einzahl-Beurteilungswerte (KB-Werte und sekundäre Luftschallpegel) bestimmt und gemäß den festgelegten Kriterien beurteilt werden.

Von entscheidender Bedeutung ist die Abhängigkeit der Immissionen von individuellen Eigenschaften der Gebäude bzw. deren Bauart und Bausubstanz. Die Streuung der Gebäude-Eigenschaften (Übertragungsfaktoren) wurde in Untersuchungen messtechnisch ermittelt und in Abhängigkeit der Bausubstanz und Resonanzfrequenzlage statistisch ausgewertet.

Für die Prognose der Erschütterungen in Gebäuden wird ein Rechenmodell angewendet. Die Ergebnisse sind jedoch von vielen Parametern abhängig, deren Erfassung für Rechenmodelle einen großen Aufwand darstellt. Die Prognosen sind daher mit großen Unsicherheiten behaftet.

Es ist möglich, in der Bauphase die Übertragungsverhältnisse mit einer Ersatzanregung messtechnisch zu erfassen und somit die Prognose zu verfeinern.

Die Berechnung der KB-Werte erfolgt in Anlehnung an die DIN 4150, Teil 2 [4]. Der sekundäre Luftschallpegel wird gemäß dem Leitfaden der Deutschen Bahn AG „Körperschall- und Erschütterungsschutz“ [8] ermittelt. Die Vorgehensweise wird unter Ziffer 5.3 und 5.4 erläutert.

2.4 Grundlagen der Untersuchung

In der schalltechnischen Untersuchung wurden folgende Grundlagen verwendet:

- Lage- und Höhenpläne des Planfeststellungsabschnittes von der Planungsgemeinschaft 2. S-Bahn-Stammstrecke München – Gesamtplanung Los 2 und 4
- Lage- und Höhenpläne des Planfeststellungsabschnittes von der Planungsgemeinschaft 2. S-Bahn-Stammstrecke München – Gesamtplanung Los 1 und 3
- Digitaler Grundplan des Planfeststellungsabschnittes von der Deutschen Bahn AG
- Übersichtslageplan des Untersuchungsbereiches
- Luftbild des Untersuchungsbereiches
- Bebauungspläne der Landeshauptstadt München
- Ortsbesichtigung im September 2004 und Dezember 2009
- Verkehrsprognose Prognose ohne Baumaßnahme der Deutschen Bahn AG vom März 2005
- Verkehrsprognose Mitfall 6 – Startkonzept 2. S-Bahn-Stammstrecke vom November 2009 (Deutsche Bahn AG)

3 Beurteilung von Erschütterungen

3.1 Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden

Zur Bewertung der Einwirkung von Erschütterungen auf Menschen werden sogenannte KB-Werte herangezogen, welche die frequenzabhängige Wahrnehmung des Menschen für Erschütterungen beschreiben. Der höchste auftretende KB-Wert eines Erschütterungsereignisses wird dabei als KB_{Fmax} -Wert bezeichnet.

Zur Veranschaulichung der KB_{Fmax} -Werte im Zusammenhang mit der subjektiven Wahrnehmung kann Tabelle 1 der ehemaligen VDI-Richtlinie 2057, Blatt 3 [7], herangezogen werden:

KB_{Fmax} -Werte	Beschreibung der Wahrnehmung
< 0,1	nicht spürbar
0,1	Fühlschwelle
0,1 - 0,4	gerade spürbar
0,4 - 1,6	gut spürbar
1,6 - 6,3	stark spürbar

Tab. 1: Zusammenhang zwischen bewerteter Schwingstärke und subjektiver Wahrnehmung

Die Erschütterungseinflüsse werden nach den in der DIN 4150, Teil 2 [4] festgelegten Beurteilungsgrößen und Anhaltswerten für die Wahrnehmungsstärke (KB-Werte) beurteilt. DIN 4150, Teil 2 gibt Anhaltswerte an, bei deren Einhaltung eine erhebliche Belästigung von Menschen in Gebäuden vermieden wird. Bei diesen Anhaltswerten handelt es sich nicht um rechtlich verbindliche Grenzwerte, sondern um empfohlene Anhaltswerte, deren Überschreitung nicht grundsätzlich zu einer erheblichen Belästigung von Menschen in Gebäuden führt.

Zur Beurteilung der KB-Werte sind die bewerteten maximalen Schwingstärken KB_{Fmax} mit den Anhaltswerten A_u , (unterer Anhaltswert) nach Tabelle 1 der DIN 4150, Teil 2, zu vergleichen:

- Ist KB_{Fmax} kleiner oder gleich dem (unteren) Anhaltswert A_u , dann ist die Anforderung dieser Norm eingehalten.

Als weitere Beurteilungsgröße dient der Wert KB_{FTr} , der sowohl die Stärke als auch die Anzahl der Erschütterungsereignisse für die Beurteilungszeiträume Tag bzw. Nacht berücksichtigt. KB_{FTr} ist mit den Anhaltswerten A_r nach Tabelle 1 der DIN 4150, Teil 2, zu vergleichen:

- Ist KB_{Fmax} größer als der untere Anhaltswert A_u , sind die Anforderungen dieser Norm dann eingehalten, wenn die Beurteilungs-Schwingstärke KB_{FTr} kleiner oder gleich dem Anhaltswert A_r ist.

Zeile	Einwirkungsort	Tag 6–22 Uhr			Nacht 22–6 Uhr		
		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 (vgl. Industriegebiete § 9 BauNVO)	0,4	6	0,2	0,3	0,6	0,15
2	Einwirkungsorte, in deren Umgebung vorwiegend gewerbliche Anlagen untergebracht sind (vgl. Gewerbegebiete § 8 BauNVO)	0,3	6	0,15	0,2	0,4	0,1
3	Einwirkungsorte, in deren Umgebung weder vorwiegend gewerbliche Anlagen noch vorwiegend Wohnungen untergebracht sind (vgl. Kerngebiete § 7 BauNVO, Mischgebiete § 6 BauNVO, Dorfgebiete § 5 BauNVO)	0,2	5	0,1	0,15	0,3	0,07
4	Einwirkungsorte, in deren Umgebung vorwiegend oder ausschließlich Wohnungen untergebracht sind (vgl. Reine Wohngebiete § 3 BauNVO, allgemeine Wohngebiete § 4 BauNVO, Kleinsiedlungsgebiete § 2 BauNVO)	0,15	3	0,07	0,1	0,2	0,05
5	Besonders schutzbedürftige Einwirkungsorte, z. B. Krankenhäuser, 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 - 4 entsprechen. Eine schematische Gleichsetzung ist jedoch nicht möglich, da die Kennzeichnung unter Zeile 1 bis 4 ausschließlich nach dem Gesichtspunkt der Schutzbedürftigkeit gegen Erschütterungseinwirkung vorgenommen werden ist, die Gebieteinteilung in der BauNVO aber auch anderen planerischen Erfordernissen Rechnung trägt.

Tab. 2: Anhaltswerte nach DIN 4150, Teil 2, Tabelle 1 für die Beurteilung von Erschütterungen in Wohnungen und vergleichbar genutzten Räumen

Für Erschütterungen aus Schienenverkehr enthält die DIN 4150, Teil 2 besondere Regelungen. Damit wird dem Charakter des Schienenverkehrs mit regelmäßigen, weder dauernd noch selten einwirkenden Erschütterungsereignissen Rechnung getragen. Nach Absatz 6.5.3.5 der Norm wird für Schienenwege bei seltener Überschreitung eines oberen Anhaltswertes nachts (oberirdisch: A_o = 0,6 und unterirdisch: A_o = 0,3, unabhängig von der Gebietsnutzung) vorgegeben, dass die Ursache bei der verursachenden Zugeinheit untersucht und behoben werden soll. Die Werte gehen aber in die Berechnung der Beurteilungsgröße KB_{FT_r} ein, bei häufigerem Auftreten führen sie somit zur Überschreitung des Anhaltswertes A_r. Nach Absatz 6.5.3.1 sind Einwirkungen in Ruhezeiten nicht zusätzlich zu gewichten.

Die Beurteilung von Erschütterungsimmissionen aus bestehenden Schienenwegen kann nach DIN 4150, Teil 2, Absatz 6.5.3.4 nicht anhand der Anhaltswerte vorgenommen werden. Die Beurteilung in Bereichen mit Vorbelastung durch Erschütterungsimmissionen beruht daher auf der Rechtsprechung des Bundesverwaltungsgerichts zum primären Luftschall vor Inkrafttreten der 16. BImSchV [2], wonach Betroffene sich Vorbelastungen aus vorhandenen Anlagen zurechnen lassen müssen. Wenn Vorbelastungen durch Erschütterungen aus bestehenden

Gleisanlagen bestehen, dürfen diese infolge von Ausbaumaßnahmen nicht wesentlich erhöht werden.

3.2 Einwirkungen auf bauliche Anlagen

Die DIN 4150, Teil 3 „Einwirkungen auf bauliche Anlagen“ [5] nennt Anhaltswerte, bei deren Einhaltung keine Gebäudeschäden im Sinne einer Verminderung des Gebrauchswertes zu erwarten sind. Diese Anhaltswerte liegen um ein Vielfaches höher als die Anhaltswerte bei Einwirkung auf Menschen in Gebäuden. Aus dem Betrieb der 2. S-Bahn-Stammstrecke (2.SBSS) sind keine Überschreitungen im Sinne dieser Norm zu erwarten.

3.3 Einwirkungen auf empfindliche technische Geräte

Bei erschütterungsempfindlichen Geräten und Einrichtungen können u.U. Fehlfunktionen bzw. Störungen auftreten, wenn die Erschütterungsimmissionen am Aufstellungsort der Geräte oder innerhalb der Einrichtungen geforderte Spezifikationen überschreiten. Hinsichtlich einer einwandfreien Funktion solcher Geräte und Einrichtungen können die Erschütterungseinwirkungen jedoch erst bei Vorliegen entsprechender Anforderungen beurteilt werden. Solche Störungen können aber auch durch die Nutzer oder die Haustechnik innerhalb des Gebäudes verursacht werden, weshalb die Geräte i.d.R. körperschallisoliert aufgestellt werden. Somit wären sie auch gegen die Erschütterungsimmissionen aus der 2.SBSS geschützt.

3.4 Sekundärer Luftschall

Durch Körperschallübertragung bzw. -anregung der Raumbegrenzungsflächen kann in Gebäuden sogenannter „sekundärer Luftschall“ entstehen und einen nicht zu vernachlässigenden Anteil am gesamten Innenraumpegel erreichen. Dieser Effekt kann vor allem dort zu Belästigungen führen, wo der primäre Luftschall, der durch die Außenhaut des Gebäudes nach innen dringt, eine geringe Rolle spielt. Das trifft vor allem bei vom Schienenweg abgewandten oder gut schallgedämmten Räumen sowie bei Tunnelstrecken zu.

Eine Beurteilung des sekundären Luftschalls aus öffentlichen Verkehrsmitteln ist z.Zt. nicht ohne weiteres möglich, da gesetzliche Regeln und Grenzwerte fehlen. Als Anhaltspunkte für die Beurteilung des sekundären Luftschalls aus Schienenverkehr kommen aus der 24.BImSchV [3] abgeleitete Richtwerte in Betracht.

In der 24. BImSchV werden die Mittelungspegel innerhalb der Bezugszeiträume Tag (6 bis 22 Uhr) und Nacht (22 bis 6 Uhr) bewertet. Die sekundären Luftschall-Immissionen werden errechnet über die Dauer der Geräusche während einer

Vorbeifahrt als mittlere Maximalpegel und anhand der Häufigkeit über die Bezugszeiträume Tag und Nacht gemittelt.

Die 24. BImSchV macht Angaben über das erforderliche Schalldämm-Maß der Außenbauteile in Abhängigkeit vom Außenpegel (Direktschall) bei öffentlichen Verkehrswegen. Zur Dimensionierung von passiven Schallschutzmaßnahmen zum Schutz vor Außenlärm (Direktschall) werden Korrektursummanden D angegeben. Die Korrektursummanden D sind um 3 dB(A) reduzierte, einzuhaltende Innengeräuschpegel (A-bewertete Mittelungspegel) gemäß den angegebenen Nutzungen für schutzbedürftige Aufenthaltsräume.

Raumnutzung	Korrektursummand D in dB(A)
Räume, die überwiegend zum Schlafen benutzt werden	27
Wohnräume	37
Behandlungs- und Untersuchungsräume in Arztpraxen, Operationsräume, wissenschaftliche Arbeitsräume, Leseräume in Bibliotheken, Unterrichtsräume	37
Konferenz- und Vortragsräume, Büroräume, allgemeine Laborräume	42
Großraumbüros, Schalterräume, Druckerräume von DV-Anlagen, soweit dort ständig Arbeitsplätze vorhanden sind	47
Sonstige Räume, die zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind	entsprechend der Schutzbedürftigkeit der jeweiligen Nutzung

Tab. 3: Korrektursummanden D gemäß 24.BImSchV

Demnach betragen die höchstzulässigen Innengeräuschpegel (Mittelungspegel über die Beurteilungszeiten):

- in Wohnräumen 40 dB(A) am Tag
- in Schlafräumen 30 dB(A) in der Nacht
- in Behandlungs- und Unterrichtsräumen 40 dB(A)
- in Konferenz-, Vortrags- und Büroräumen 45 dB(A)

In vorbelasteten Bereichen stellt sich die Frage, ob die Vorbelastung durch das Bauvorhaben wesentlich erhöht wird. Dies ist nach allgemeiner Beurteilungspraxis dann der Fall, wenn sich der Schallpegel um mindestens 3 dB(A) erhöht.

3.5 Zusammenfassung der erschütterungstechnischen Anforderungen

Die Beurteilung der Erschütterungen aus der geplanten 2.SBSS richtet sich für die fühlbaren Vibrationen nach den Anhaltswerten der DIN 4150, Teil 2 für Woh-

nungen und vergleichbar genutzte Räume in Abhängigkeit von der Gebietsnutzung nach Bebauungsplänen bzw. tatsächlicher Nutzung. Die sekundären Luftschallimmissionen werden anhand der Richtwerte beurteilt, die aus der 24. BImSchV abgeleitet sind.

4 Ablauf und Umfang der Untersuchung

Aus der Trassenführung ergeben sich verschiedene Rahmenbedingungen für die in den Erdboden eingeleiteten Erschütterungs-Emissionen. Für die Erschütterungsprognose wird die Strecke in Abschnitte unterteilt, innerhalb derer die maßgeblichen Parameter als konstant betrachtet werden. Grundsätzlich werden oberirdische Streckenabschnitte, sowie Trogbereiche (bei Absenkung in Tunnellage) und unterschiedliche Tunnelquerschnitte getrennt betrachtet. In Tunnelabschnitten wird zusätzlich die unterschiedliche Überdeckung betrachtet. Weiterhin hat die Geschwindigkeit der S-Bahn Einfluss auf die Erschütterungs-Emission.

Die Ausgangsdaten werden messtechnisch ermittelt bzw. aus Literaturdaten entnommen. Die gebäudespezifischen Eigenschaften (Übertragungsfaktoren) werden aus Erfahrungswerten und Literatur [8] entsprechend ihrer statistischen Streuung berücksichtigt. Aus diesen Daten werden Abstände zur Trasse der S-Bahn ermittelt, innerhalb derer mit Überschreitungen der Beurteilungskriterien zu rechnen ist (im Folgenden „Einwirkungsbereiche“ genannt). Die Einwirkungsbereiche werden je Gebietsnutzung nach Gebäude-Übertragungseigenschaften (Deckenresonanzfrequenzlagen) in 3 Klassen ermittelt (siehe Ziffer 5.2.2), entsprechend der Maxima der jeweiligen Frequenzlage.

Zur Absicherung dieser Ergebnisse wurden Messungen an ausgewählten Objekten innerhalb des Untersuchungsraumes entlang der Trasse vorgenommen. Es handelt sich um 6 Gebäude, die nach Bauart und Abstand zur S-Bahntrasse als typische Beispiele für die jeweiligen Bereiche gelten können. Für diese Objekte wurde auf Grundlage der gemessenen Übertragungsfunktionen eine individuelle Prognose erstellt. Die Lage der untersuchten Gebäude ist aus den Lageplänen, Anlage 20.2.1, und 20.2.2 ersichtlich.

Je nach dem Ausmaß der ermittelten Betroffenheit wurden Erschütterungsminierungsmaßnahmen erwogen und anhand ihrer Wirksamkeit bewertet. Geeignete Schutzmaßnahmen werden in die zur Genehmigung eingereichte technische Planung integriert.

Eine Präzisierung der Prognose ist in der Bauphase möglich, indem in den Tunnelrohbauten mit einer Ersatzquelle Erschütterungen angeregt werden und deren Ausbreitung in die Umgebung gemessen wird.

5 Berechnung der zu erwartenden Erschütterungs- Immissionen

Der Immissionsberechnung für Erschütterungseinwirkungen aus dem Betrieb der S-Bahn liegt das Betriebsprogramm Prognose „Mitfall 6 – Startkonzept 2. S-Bahn-Stammstrecke“ zu Grunde. In diesem ist festgelegt:

	Tag / Nacht
▪ Gleis 100 Laim – Leuchtenbergring (ML - MLEU):	194 / 34
▪ Gleis 200 Leuchtenbergring– Laim (MLEU - ML):	194 / 34

Für die Erschütterungsprognose wurde der Planfeststellungsabschnitt in Bereiche unterteilt, innerhalb derer die maßgeblichen Parameter für die Erschütterungsemission als konstant anzusehen sind. Maßgeblich sind die Streckenführung, die Streckenauslastung (Anzahl, Geschwindigkeit) und die Gebietsnutzung.

In folgender Tabelle sind die Abschnitte aufgeführt:

Ab-schnitts-Nr.	Bau-km von – bis*	Streckenführung, Bereich	Geschwindigkeit v_e in km/h
1	107,8+90 - 107,9+90	Kreisquerschnitt-Tunnel, Bereich Praterinsel	100
2	108,2+00 - 108,4+60	Kreisquerschnitt-Tunnel, Innere Wiener Straße – Preysingstraße	100
3	108,4+60 - 108,9+10	Kreisquerschnitt-Tunnel, Preysingstraße – östl. Metzstraße	100
4	108,9+10 - 109,2+30	Kreisquerschnitt-Tunnel, östl. Metzstraße – Hp München Ostbahnhof tief	100 (100 – 60)
5	109,2+30 - 109,4+50	Rechteckquerschnitt-Tunnel, Bereich Hp München Ostbahnhof tief	100 (60)
6	109,4+50 - 110,0+25	Kreisquerschnitt-Tunnel, Hp München Ostbahnhof tief – Tunnelportal	100 (60 – 100)
7	110,0+25 - PfG	Trog, Freie Strecke, Freie Strecke in Richtung Leuchtenbergring	100 / 80

* Die Kilometrierung der Abschnittsunterteilung bezieht sich auf das Gleis 100 (Tunnelröhre ML – MLEU); die in Klammern angegebene Geschwindigkeit ist die tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit vor und nach dem Haltepunkt

Tab. 4: Abschnittsunterteilung für die Erschütterungsprognose

In den Einwirkungsbereichen wurde jeweils an mehreren Querschnitten die Berechnung zur Erschütterungsprognose durchgeführt. Hierbei wurde ggf. die Vorbelastung aus der Tram, der U-Bahn und den Bahnstrecken der DB AG entsprechend berücksichtigt.

Als Ausgangsdaten wurden messtechnisch ermittelte Emissionsspektren, der Fachliteratur entnommene Ausbreitungsmodelle und -faktoren sowie gebäude-spezifische Übertragungsfaktoren zugrundegelegt. Die Berechnung erfolgte als Körperschallschnelle im für Erschütterungseinwirkungen aus dem Schienenverkehr relevanten Frequenzbereich 4 Hz bis 100 Hz (für KB-Werte) bzw. max. 160 Hz, spektral in Terz-Bandbreite.

5.1 Emissions-Spektren

Die Prognosen im Bereich des Schienenverkehrs erfolgen auf der Basis von Referenz-Spektren, die an bestehenden vergleichbaren Strecken mit vergleichbaren Zuggattungen und Betriebszuständen im Nahbereich der Strecke, vorzugsweise in 8 m oder 16 m Abstand von der Gleisachse, messtechnisch ermittelt wurden. Die Emissionen bei Fahrten in einer Tunnelstrecke werden an der Tunnelwand gemessen. Für die Münchner S-Bahn liegen eine Vielzahl von Messdaten vor, so dass bei Prognosen für verschiedenste Rahmenbedingungen von statistisch abgesicherten Daten ausgegangen werden kann.

Die verwendeten Emissions-Spektren sind im Anhang angegeben. Sie wurden entsprechenden Untersuchungen entnommen bzw. daraus abgeleitet.

- Freie Strecke: Messungen an der S-Bahn-Linie in Vaterstetten [11]
- S-Bahn-Vorbeifahrten im Trog: Messungen an der Trog-Strecke München-Flughafen (Besucherpark) [12]
- Tunnel mit Kreisquerschnitt: Münchner S-Bahn Bereich „Am Gasteig“. Messquerschnitt ohne Erschütterungsschutzmaßnahmen (Vergleichs-Messpunkte) [13] sowie Messungen am S-Bahn-Tunnel Stuttgart [15]
- Tunnelabschnitte in offener Bauweise - (bei geringer Überdeckung) mit Rechteck-Querschnitt [14]

5.1.1 Einfluss der Geschwindigkeit

Bei Abweichung der Geschwindigkeit im Prognosefall von der bei den Emissionsmessungen dokumentierten Geschwindigkeit in den einzelnen Abschnitten wurden die Messergebnisse korrigiert. Erfahrungsgemäß und nach einschlägiger Literatur kann für geringfügige Geschwindigkeitsänderungen folgende (nicht spektrale) Annahme getroffen werden, um die Körperschallschnelle-Emissionspegel L_v für andere Geschwindigkeiten zu korrigieren:

$$L_{v,\text{gesucht}} = L_{v,\text{gemessen}} + 20 \log (v_{\text{gesucht}} / v_{\text{gemessen}})$$

5.1.2 Einfluss des Fahrzeuges

Im Jahre 2002 wurden in Tunneln mit Rechteckquerschnitt Vergleichsmessungen der beiden damals gleichzeitig verkehrenden Zugtypen (ET 420 und ET 423) durchgeführt (siehe z.B. [14]). Danach zeigen sich Tendenzen, dass der neue Typ ET 423 im Mittel geringere Erschütterungs-Emissionen aufweist als der Typ ET 420. Zugunsten der Betroffenen wurden die Ergebnisse für den Typ ET 420 als Erschütterungs-Emissionen verwendet. Messungen im Flughafentunnel Stuttgart von 2008 (Typ ET 423 im Tübbingtunnel) [15], bestätigen die Verwendbarkeit der Daten.

5.2 Übertragungsfunktionen

Die Übertragung der Erschütterungen (Körperschallschnelle) in unterschiedlichen Festkörpern (Erdboden, Gebäude) ist, wie bereits angesprochen, frequenzabhängig (spektral) zu betrachten und ist von vielen Einflüssen abhängig.

Zur Ermittlung der Einwirkungsbereiche der Erschütterungsimmissionen und des sekundären Luftschalls sind geeignete Ansätze für die Übertragungsfunktionen der Ausbreitung der Erschütterungen im Boden und der Übertragung in die Gebäude bzw. innerhalb der Gebäude zu wählen.

5.2.1 Ausbreitung im Erdboden

Die Ausbreitung im Boden ist abhängig von der geometrischen Entfernung zwischen Erschütterungsquelle und Immissionsort, der Quellenart und von den Eigenschaften des Bodens, die im wesentlichen durch die Ausbreitungsgeschwindigkeit der für die Ausbreitung maßgeblichen Wellenart beschrieben wird. Bodenschichtungen, Grundwasser und im Nahbereich zwischen Erschütterungsquelle und Immissionsort liegende massive Einbauten wie Kanäle, Injektionskörper, Versorgungsleitungen etc., beeinflussen zusätzlich die Ausbreitung der Erschütterungen.

Die Strecke verläuft im Wesentlichen unterirdisch in Tunnelbauwerken. An der Tunnelaußenwand entsteht eine Körperschall-Raumwelle, deren Amplitude aufgrund geometrischer Bedingungen mit zunehmender Entfernung abnimmt. Zusätzlich treten Dämpfungen durch Absorption der Schwingungsenergie im Erdboden aufgrund von Viskosität, Haftreibung und Materialdämpfung auf. Ein Berechnungsmodell der abstands- und frequenzabhängigen Ausbreitungsabnahme der Körperschallschnelle wurde aus einem Forschungsbericht der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung [10] abgeleitet.

Im Sinne eines Sicherheitszuschlages wurde dieser Ansatz erst ab 16 m Abstand von der Tunnelwand verwendet, da Beugung und Reflexion an Grenzschichten und Inhomogenitäten im Ausbreitungsweg über Rechenmodelle nicht eindeutig

erfassbar sind. Daher wird empfohlen, nach Fertigstellung des Tunnel-Rohbaus in bestimmten Abschnitten durch Fremdanregung die Übertragung der Schwingungen in benachbarte Häuser messtechnisch zu überprüfen.

Die in offener Bauweise erstellten Tunnelbereiche mit Rechteckquerschnitt und geringer Überdeckung, die Trogbereiche und die oberirdischen Streckenabschnitte rufen ab 8 bis 16 m Abstand von der Tunnelwand eine Oberflächenwelle (Rayleighwelle) hervor. Diese unterscheidet sich von den Raumwellen in Geometrie und Dämpfung im Ausbreitungsweg.

Die Körperschallminderung durch die Ausbreitung an der Erdoberfläche wurde aus den bei Schienenverkehr ermittelten statistisch fundierten Untersuchungsergebnissen [8] angesetzt.

5.2.2 Gebäudespezifische Übertragungsfaktoren

Im Bereich der Einleitung der Schwingungen vom Erdboden in die Gebäude ist die dynamische Anregbarkeit des Bauwerks (Eingangsimpedanz/ mechanischer Schwingwiderstand) für die Fortleitung der Schwingungen bestimmend. Im allgemeinen erfolgt hier eine Reduzierung der Schwingungsamplituden (wegen Brechung und Reflexion von Wellen an Grenzschichten und Übergängen) im Frequenzbereich ab 16 Hz um 5 bis 10 dB (entspricht einer Minderung etwa um einen Faktor 2 bis 3).

Die Anregung des Gebäudefundaments wird in der Regel bei normaler Bauausführung mit überhöhten Intensitätswerten an den Decken und Wänden der übrigen Stockwerksbereiche beantwortet. Erfahrungsgemäß ist bei Frequenzen ab ca. 10 Hz in einigen, bestimmten Bereichen (Eigenfrequenzen der Bauteile) mit einer Vergrößerung der Schwingungsamplituden durch Resonanzerscheinungen zu rechnen. Die durch Resonanz auftretenden Vergrößerungsfaktoren unterliegen großen Streuungen und erreichen erfahrungsgemäß an Fußböden Werte von 3 bis 18 (entspricht 10 dB bis 25 dB). Ebenso ist die Streuung der Frequenzlage zu berücksichtigen.

In der Information der DB AG „Körperschall und Erschütterungsschutz, Leitfaden für den Planer“ [8] wird dieser Zusammenhang angegeben, zusammengefasst für den Übertragungsweg *Erdboden - Fundament - Decke*.

Die gebäudespezifischen Eigenschaften (Übertragungsfaktoren) werden daraus entsprechend ihrer statistischen Streuung berücksichtigt. Aus diesen Daten werden die Einwirkungsbereiche ermittelt. Innerhalb dieser Abstände können bei einer bestimmten, von den spezifischen Eigenschaften der Gebäude abhängigen Empfindlichkeit Überschreitungen der Beurteilungskriterien auftreten.

Der Einwirkungsbereich gibt also an, bis zu welchem Abstand vom Tunnelbauwerk der 2. SBSS die Erschütterungsprognose in Abhängigkeit von der Fre-

quenzlage der Resonanzverstärkung der Geschossdecken ergibt, dass eines der Beurteilungskriterien für Erschütterungen oder sekundären Luftschall überschritten sein kann, wenn die Resonanzfrequenz der Gebäude zufällig die ungünstigste Frequenzlage aufweist.

Aufgrund der Emissionen aus der S-Bahn mit pegelbestimmenden Anteilen ab 40 Hz ist für die 2.SBSS vorwiegend der Einwirkungsbereich für Frequenzen von 40 bis 80 Hz maßgeblich.

5.2.3 Messtechnisch untersuchte Gebäude

An ausgewählten Objekten innerhalb des Untersuchungsraumes entlang der Trasse wurden Messungen zur Ermittlung der Übertragungsfaktoren vorgenommen. Es handelt sich um 6 Gebäude, die nach Bauart und Abstand zur Strecke als Beispiele für die jeweiligen Bereiche gelten. Diese Gebäude sind in den Anlagen 20.2.1 und 20.2.2 mit Objekt-Nr. MP1 bis MP6 und MP7* dargestellt. Für diese Objekte wurde auf Grundlage der gemessenen Übertragungsfunktionen jeweils eine individuelle Prognose zur Veranschaulichung und Absicherung der Einwirkungsbereiche erstellt. Die Übertragungsfunktionen dieser Objekte sind im Anhang angegeben.

Die Ermittlung des Übertragungsfaktors *Erdboden-Geschossdecke* konnte nicht an allen Gebäuden durchgeführt werden. Da in dicht bebauten Bereichen der Erdboden nahezu lückenlos versiegelt ist durch Gehwege, Hofbefestigungen und Straßen, kann hier keine einwandfreie Ankopplung der Messpunkte an den Erdboden erfolgen. In solchen Fällen wurde die Übertragungsfunktion *Fundament-Decke* herangezogen und die Minderung an der Einleitstelle Erdboden/Gebäude der Literatur entnommen [17], wobei die angesetzten Werte mit bis zu -6,6 dB erfahrungsgemäß eher auf der sicheren Seite liegen.

Die Ermittlung der Übertragungsfaktoren erfolgte durch Ersatzanregung an der Erdoberfläche, meist mit einer im Straßen- bzw. Gehwegbau üblichen Vibrationswalze oder, wo es möglich war, aus Vorbeifahrten der Straßenbahn.

Der maßgebliche Frequenzbereich der Emissionsspektren liegt zwischen 25 Hz und 100 Hz. Dieser Frequenzbereich konnte i.d.R. messtechnisch untersucht werden. In Einzelfällen wurden Frequenzbereiche, die durch Störungen beeinflusst waren, dem Verhalten der übrigen störungsfreien Frequenzbereiche angepasst (inter- bzw. extrapoliert).

5.3 Berechnung der KB-Werte

Die Ermittlung der KB-Werte erfolgt nach DIN 4150, Teil 2 durch eine Frequenzbewertung (KB-Bewertung) und gleitende Effektivwertbildung (Zeitkonstante „Fast“; 0,125 sec) des Erschütterungssignals (der Körperschallschnelle) im Zeit-

bereich. Den während eines Beobachtungszeitraumes aufgetretenen höchsten Wert des bewerteten Zeitsignals bezeichnet man als $KB_{F_{max}}$ -Wert. Die Prognoseberechnungen werden jedoch im Frequenzbereich durchgeführt, als Ergebnisse liegen nach dem „Max-Hold“ - Verfahren ausgewertete Spektren, jedoch keine Zeitsignale vor. „Max-Hold“ bedeutet, dass die in der Messzeit, z.B. Vorbeifahrt bzw. Einwirkungszeit aufgetretenen Maximalwerte je Frequenzbereich in Terz-Bandbreite vorliegen. In diesem Fall kann der $KB_{F_{max}}$ -Wert ersatzweise aus dem Terzspektrum der Schnellepegel berechnet werden. Dazu werden die Spektren terzweise einer Korrektur unterzogen, die der KB-Bewertung des Erschütterungssignals entspricht. Der $KB_{F_{max}}$ -Wert ergibt sich dann als der delogarithmierte Wert des Summenpegels des KB-bewerteten Schnellepegelspektrums.

Die messtechnische Erfassung von fühlbaren Erschütterungseinwirkungen ($KB_{F_{max}}$ -Werte) wird in der DIN 4150, Teil 2 beschrieben. Sie muss auf dem Fußboden des zu untersuchenden Raumes vorgenommen werden, und zwar an den Stellen, an denen die stärksten Erschütterungen zu erwarten sind, i.d.R. in der Mitte des Deckenfeldes. Hier werden die Übertragungsfaktoren der Gebäude gemessen, mit denen die KB-Wert-Prognose berechnet wird.

Anhand der zu erwartenden Maximalwerte und der daraus mit der Häufigkeit der Ereignisse innerhalb der Beurteilungszeiten bestimmten Beurteilungswerte KB_{FT} wurde in Abhängigkeit von den Deckeneigenfrequenzen der Gebäude unter Berücksichtigung des jeweils ungünstigsten Ergebnisses der maximale Abstand ermittelt, bis zu dem mit Überschreitungen der Beurteilungskriterien zu rechnen ist.

5.4 Berechnung des sekundären Luftschalls

Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der mittleren Schwingschnelle an den Raumbegrenzungsflächen, den jeweiligen Abstrahl- und Absorptionsverhältnissen im Raum und den daraus resultierenden Schalldruckpegeln im Raum.

Für den sekundären Luftschall wurde aus zahlreichen Messungen statistisch ein Zusammenhang zwischen der Körperschallschnelle am Fußboden (Messpunkt nach DIN 4150, Teil 2) und dem etwa in Raummitte gemessenen sekundären Luftschall bestimmt. Damit wurde die individuelle Streuung von Gebäuden üblicher Bauweise und Raumeigenschaften erfasst. Die Untersuchungen ergeben Korrelationsbeziehungen zwischen dem spektral im relevanten Frequenzbereich ermittelten Körperschallschnelle-Pegel am Messpunkt nach DIN 4150, Teil 2 und dem sekundären Luftschall im Raum.

In einer Veröffentlichung [16] sind Ergebnisse umfangreicher Untersuchungen dargestellt. Danach und nach [8] können für die Abschätzung des sekundären Luftschallpegels folgende Gesamtpegel-Korrelationsbeziehungen angewendet werden, die aus der statistischen Auswertung einer Vielzahl von Messungen an Bahnstrecken ermittelt wurden:

Betondecken:	$L_{A-Sek} = 15.8 + 0.60 \cdot L_{vA}$
Holzbalkendecken:	$L_{A-Sek} = 19.9 + 0.47 \cdot L_{vA}$
Darin bedeuten:	L_{A-Sek} : A-bewerteter sekundärer Luftschallpegel L_{vA} : A-bewerteter Körperschallschnelle-Pegel

Die so ermittelten Pegel des sekundären Luftschalls stellen mittlere Maximalpegel $\bar{L}_{i,max}$ während einer Vorbeifahrt dar. Daraus können die Beurteilungspegel $L_{i,r}$ als Mittelungspegel für die Beurteilungszeiträume Tag (6 – 22 Uhr) und Nacht (22 – 6 Uhr) anhand der Dauer und Häufigkeit der Ereignisse berechnet werden.

5.5 Ergebnisse und Beurteilung für die einzelnen Bereiche

Die Bereiche werden nach der in Ziffer 5 beschriebenen Abschnittunterteilung für die Erschütterungsprognose und zusätzlich ggf. nach Gebietsnutzungen unterteilt und in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

Die angegebenen Einwirkungsbereiche bezeichnen horizontale Abstände zur nächstgelegenen Tunnelachse ohne Erschütterungsschutzmaßnahmen und verlaufen i.d.R. parallel zur Streckenachse. Gebäude innerhalb dieser Bereiche können bei Übereinstimmung der Deckenresonanz-Frequenzlage und Verstärkung in der Größenordnung der aus [8] angesetzten Übertragungsfaktoren von Überschreitungen der Beurteilungskriterien betroffen werden.

In den Abschnitten, in denen eine Überschreitung der Beurteilungskriterien prognostiziert wird, werden unter Berücksichtigung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses aktive Schutzmaßnahmen (s. Ziffer 6) vorgesehen. Unter Berücksichtigung dieser Maßnahmen ist in der Regel die Einhaltung der Beurteilungskriterien zu erwarten.

In den Bereichen, wo sich schutzwürdige Bebauung in der Nähe der Trasse befindet, werden weitere Messungen nach der Herstellung des Tunnel-Rohbaus vorgesehen (s. hierzu auch Ziffer 2.3, 4, 5.2). In dieser Phase werden die aktiven Schutzmaßnahmen in ihrer Lage und Länge im Detail festgelegt und endgültig abgestimmt.

In Bereichen mit Überdeckung des Tunnels von weniger als 16 m, wird bei der Prognoseberechnung die abstandsbedingte Ausbreitungsdämpfung nicht angesetzt. Bei der Prognose der Anhaltswerte werden also erfahrungsgemäß wirksame Minderungseffekte vernachlässigt, so dass die Immissionswerte wahrscheinlich überschätzt wurden. Die Situation muss daher durch Messungen der Übertragungsfunktionen nach Fertigstellung des Tunnel-Rohbaus messtechnisch überprüft werden.

Abschließend sind auch nach Inbetriebnahme der Strecke noch Messungen unter dem tatsächlichen Verkehr durchzuführen, die passive Maßnahmen (s. Kap. 6.2) zur Folge haben können.

5.5.1 Bereich Praterinsel

Ab ca. Bau-km 107,8+90 bis Bau-km 107,9 + 90. Am Beginn des PFA 3neu liegt die Praterinsel mit Verwaltungs- und Kulturgebäuden und einem Wohngebäude. Die Gebietsnutzung der Praterinsel wird als Mischgebiet eingestuft.

Die minimale Tunnelüberdeckung in diesem Bereich beträgt ca. 22 m für das Gleis 100 und ca. 12 m für das Gleis 200. Für die Praterinsel beträgt der ermittelte Einwirkungsbereich rechts der Bahn (Gleis 100) 17 m und links der Bahn (Gleis 200) 22 m. Darin liegen das Wohngebäude und ein Verwaltungsgebäude, welche unterfahren werden.

Das Wohngebäude auf der Praterinsel wurde messtechnisch untersucht. Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse der Prognoseberechnung.

Messort mit Nr.	Raum-Lage	Anforderungen KB			Immissionen ohne Maßnahmen KB			Anforderg. sek. $L_{i,r}$		Immissionen ohne Maßnahmen sek. $L_{i,r}$		
		A_o	A_r		KB_{Fmax}	KB_{FTr}		Tag	Nacht	$L_{i,max}$	Tag	Nacht
			Nacht	Tag		Nacht	Tag					
MP7* Praterinsel 1	EG	0.3	0.10	0.07	0.16	0.06	0.04	40	30	36	20.3	12.8
	2.OG	0.3	0.10	0.07	<0.1	0.00	0.00	40	30	32	16.1	8.5

Tab. 5: Messergebnisse MP7* (Übertragungsfaktoren aus der Untersuchung zum PFA 3 (alt))

Für dieses Gebäude sind die Anhaltswerte eingehalten. Das Verwaltungsgebäude ist nach Augenschein von gleicher Bauart wie das Wohnhaus Praterinsel 1, so dass hierfür ebenfalls von Einhaltung der Anhaltswerte ausgegangen wird.

Für diesen Abschnitt werden zunächst keine Erschütterungsschutzmaßnahmen vorgesehen. Es wird jedoch empfohlen, nach den Tunnelrohbauarbeiten Erschütterungsmessungen zur Überprüfung der Übertragungsfunktion Tunnelwand / Gebäudfundament und somit der Prognoseberechnungen vorzunehmen. Ggf. können bei Erfordernis Erschütterungsschutzmaßnahmen dimensioniert werden.

5.5.2 Zwischen Innere Wiener Straße und Preysingstraße

Ab ca. Bau-km 108,2+00 bis Bau-km 108,4+60. Die 2.SBSS unterquert hier Wohngebiete sowie die St. Johannes-Kirche am Preysingplatz.

Die minimale Tunnelüberdeckung in diesem Bereich beträgt ca. 30 m für das Gleis 100 und ca. 14 m für das Gleis 200. Der ermittelte Einwirkungsbereich beträgt rechts der Bahn (Gleis 100) bis zu 17 m und links der Bahn (Gleis 200) bis zu 27 m. Es ergibt sich die Notwendigkeit von Erschütterungsschutzmaßnahmen in Form einer elastischen Lagerung des Oberbaues (s. Ziffer 6.1) an beiden Gleisen in entsprechender Länge (s. Tab. 12). Die erforderliche Länge der Maßnahme kann durch Messungen der Übertragungsfunktionen nach Fertigstellung des Tunnel - Rohbaus messtechnisch überprüft werden.

Es wurde ein Gebäude an der Inneren Wiener Straße sowie die St. Johannes-Kirche messtechnisch untersucht. Tabelle 6 zeigt die Ergebnisse der Prognoseberechnung für die beiden Objekte:

Messort mit Nr.	Raum- Lage	Anforderungen KB			Immissionen ohne Maßnahmen KB			Anforderg. sek. $L_{i,r}$		Immissionen ohne Maßnahmen sek. $L_{i,r}$		
		A_o	A_r		KB_{Fmax}	KB_{FTr}		Tag	Nacht	$L_{i,max}$	Tag	Nacht
		Nacht	Tag	Nacht		Tag	Nacht					
MP1, Innere Wiener Str. 11a	EG (Büro hinten)	0.3	0.07	0.05	<0.1	0.00	0.00	40	30	34	17.8	10.0
	1.OG (Büro vorne)	0.3	0.07	0.05	<0.1	0.00	0.00	40	30	36	19.1	11.4
	4.OG (Büro)	0.3	0.07	0.05	0.11	0.04	0.02	40	30	30	13.1	5.4
MP2, St. Johannes-Kirche	EG (Aufenthaltsraum)	0.3	0.07	0.05	0.23	0.07	0.04	40	30	39	21.6	14.0
	Kirchenschiff	0.3	0.07	0.05	0.16	0.05	0.03	40	30	38	20.5	13.0
	Empore vorne	0.3	0.07	0.05	0.58	0.20	0.12	40	30	42	25.5	18.0
	Empore hinten	0.3	0.07	0.05	0.27	0.09	0.06	40	30	37	20.5	12.9

Tab. 6: Messergebnisse MP1 und MP2

Die Prognoseberechnung ergab, dass am Gebäude Innere Wiener Str. 11a die Anhaltswerte auch mit Berücksichtigung der Immissionen aus der Straßenbahn eingehalten werden.

Die Prognoseberechnung ergab, dass im Bereich der Empore der St. Johannes-Kirche die Anhaltswerte für Erschütterungen im Beurteilungszeitraum Tag für Wohngebiete überschritten werden. Die Werte werden durch Deckenresonanz-Verstärkungen bei Frequenzen von 16 Hz bis 63 Hz hervorgerufen. Es bestätigt sich die Notwendigkeit von Erschütterungsschutzmaßnahmen.

5.5.3 Zwischen Preysingstraße und östlich der Metzstraße

Ab ca. Bau-km 108,4+60 bis ca. Bau-km 108,9+10. Die 2.SBSS unterquert hier Wohngebiete.

Die Tunnelüberdeckung in diesem Bereich beträgt zwischen 35 m bis 30 m für das Gleis 100 und zwischen 20 m bis 28 m für das Gleis 200. Der ermittelte Einwirkungsbereich beträgt rechts der Bahn (Gleis 100) 7 m und links der Bahn (Gleis 200) zwischen 22 m und 7 m. Es ergibt sich die Notwendigkeit von Erschütterungsschutzmaßnahmen in Form einer elastischen Lagerung des Oberbaues (s. Ziffer 6.1) an beiden Gleisen in entsprechender Länge (s. Tab. 12). Die genaue Länge und die technischen Eigenschaften der Maßnahmen können anhand von Messungen der Übertragungsfunktionen nach Fertigstellung des Tunnel - Rohbaus festgelegt werden.

Es wurden drei Gebäude in diesem Abschnitt messtechnisch untersucht. Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse der Prognoseberechnung für diese Objekte:

Messort mit Nr.	Raum- Lage	Anforderungen KB			Immissionen ohne Maßnahmen KB			Anforderg. sek. $L_{i,r}$		Immissionen ohne Maßnahmen sek. $L_{i,r}$		
		A_o	A_r		KB_{Fmax}	KB_{FTr}		Tag	Nacht	$\bar{L}_{i,max}$	Tag	Nacht
		Nacht	Tag	Nacht		Tag	Nacht					
MP3 Püttrichstr. 7	1.OG (WZ)	0.3	0.07	0.05	0.25	0.10	0.06	40	30	32	15.7	8.1
	4.OG (WZ)	0.3	0.07	0.05	0.28	0.11	0.07	40	30	30	13.8	6.2
MP4 Steinstr. 67	1.OG (KiZ)	0.3	0.07	0.05	<0.1	0.00	0.00	40	30	34	21.3	13.2
	2.OG (WZ)	0.3	0.07	0.05	0.16	0.06	0.04	40	30	28	16.2	8.0
MP5 Metzstr. 12	1.OG (Büro)	0.3	0.07	0.05	0.22	0.09	0.05	40	30	38	22.5	14.9
	2.OG (Büro)	0.3	0.07	0.05	0.30	0.12	0.07	40	30	34	17.9	10.3

Tab. 7: Messergebnisse MP3 – MP5

Die Prognoseberechnung ergab, dass am MP3 und MP 5 die Anhaltswerte überschritten werden. Die Werte werden durch Deckenresonanz-Verstärkungen bei Frequenzen zwischen 8 Hz bis 12 Hz und bei 63 Hz hervorgerufen. Es bestätigt sich die Notwendigkeit von Erschütterungsschutzmaßnahmen.

5.5.4 Zwischen östlich der Metzstraße und Hp München Ostbahnhof tief

Ab ca. Bau-km 108,9+10 bis Bau-km 109,2+30. Die 2.SBSS unterquert hier Wohngebiete.

Die Tunnelüberdeckung in diesem Bereich beträgt ca. 25 m für beide Gleise. Die Geschwindigkeit der fahrenden Züge wird reduziert zum Haltepunkt Ostbahnhof tief hin von zunächst 100 km/h bis auf 60 km/h. Der ermittelte Einwirkungsbereich beidseitig der Bahn (Gleis 100 und 200) beträgt zunächst 12 m und wird bis Bau-km 109,1 auf 0 m reduziert (kein Einwirkungsbereich aufgrund der niedrigen Geschwindigkeit). Es ergibt sich die Notwendigkeit von Erschütterungsschutzmaßnahmen in Form einer elastischen Lagerung des Oberbaues (s. Ziffer 6.1) an beiden Gleisen in entsprechender Länge (s. Tab. 12). Die genaue Länge und die technischen Eigenschaften der Maßnahmen können anhand von Messungen der Übertragungsfunktionen nach Fertigstellung des Tunnel - Rohbaus festgelegt werden.

Es wurde ein Gebäude messtechnisch untersucht. Tabelle 8 zeigt die Ergebnisse der Prognoseberechnung für dieses Objekt:

Messort mit Nr.	Raum- Lage	Anforderungen KB			Immissionen ohne Maßnahmen KB			Anforderg. sek. $L_{i,r}$		Immissionen ohne Maßnahmen sek. $L_{i,r}$		
		A_o	A_r		KB_{Fmax}	KB_{FTr}		Tag	Nacht	$\bar{L}_{i,max}$	Tag	Nacht
		Nacht	Tag	Nacht		Tag	Nacht					
MP6 Weißbürger Str. 38	1.OG (WZ)	0.3	0.07	0.05	<0.1	0.00	0.00	40	30	29	14.8	7.3
	2.OG (WZ)	0.3	0.07	0.05	<0.1	0.00	0.00	40	30	29	15.2	7.6

Tab. 8: Messergebnisse MP6

Die Prognoseberechnung ergab, dass am Gebäude Weißbürger Str. 38 die Anhaltswerte eingehalten werden.

5.5.5 Bereich Hp München Ostbahnhof tief

Ab ca. Bau-km 109,2+30 bis Bau-km 109,4+50. Die 2.SBSS unterquert hier zunächst Wohngebiete in der Weißenburger Straße und den Orleansplatz.

Die Tunnelüberdeckung des Rechtecktunnels in diesem Bereich beträgt ca. 22 m für beide Gleise. Die Geschwindigkeit der fahrenden Züge wird im Bereich des Hp Ostbahnhof tief einheitlich mit 60 km/h angesetzt. Der ermittelte Einwirkungsbereich für die Wohngebiete in der Weißenburger Straße beträgt beidseitig der Bahn (Gleis 100 und 200) ca. 12 m. Es ergibt sich die Notwendigkeit von Erschütterungsschutzmaßnahmen in Form einer elastischen Lagerung des Oberbaues (s. Ziffer 6.1) an beiden Gleisen in entsprechender Länge (s. Tab. 12). Die erforderliche Länge und die technischen Eigenschaften der Maßnahmen können anhand von Messungen der Übertragungsfunktionen nach Fertigstellung des Tunnel - Rohbaus festgelegt werden.

In diesem Bereich wurden keine Gebäude messtechnisch untersucht.

5.5.6 Zwischen Hp München Ostbahnhof tief und Tunnelportal

Ab ca. Bau-km 109,4+50 bis Bau-km 110,0+25. Die 2.SBSS unterquert hier zunächst die Bebauung Orleansplatz 7, 9 und 10, welche als Sondergebiet (Post) und Mischgebiet (Büros) eingestuft werden. Im Weiteren verläuft die 2.SBSS z.T. unter dem Gebiet des sich in Aufstellung befindenden Bebauungsplans Nr. 1956 „Haidenauplatz“ zunehmend in geringer Tieflage.

Die Tunnelüberdeckung in diesem Bereich beträgt zunächst ca. 22 m für beide Gleise und wird auf 0 m bis zum Tunnelportal reduziert. Die Geschwindigkeit der fahrenden Züge steigt ab dem Hp Ostbahnhof tief von 60 km/h auf maximal 80 km/h. Im Bereich der Bebauung Orleansplatz 7, 9 und 10 wurden keine Einwirkungsbereiche ermittelt. Erschütterungsschutzmaßnahmen sind daher nicht vorgesehen. Es wird jedoch empfohlen, nach den Tunnelrohbauarbeiten Erschütterungsmessungen zur Überprüfung der Übertragungsfunktion Tunnelwand / Gebäudefundament und somit der Prognoseberechnungen vorzunehmen. Ggf. können bei Erfordernis Erschütterungsschutzmaßnahmen dimensioniert werden

Für den sich in Aufstellung befindenden Bebauungsplan Nr. 1956 „Haidenauplatz“ steht zwar die konkrete Detailplanung noch nicht fest, wohl aber die grundsätzliche Zuordnung der Nutzungsarten. Daher wird Bereich West dieses Gebietes als Mischgebiet, der Bereich Ost als Kerngebiet beurteilt. Der hierfür ermittelte Einwirkungsbereich beträgt rechts und links der Bahn bis zu ca. 17 m entlang der beiden Gleisachsen. Um eine entsprechende Bebaubarkeit zu ermöglichen, ergibt sich die Notwendigkeit von Erschütterungsschutzmaßnahmen

in Form einer elastischen Lagerung des Oberbaues (s. Ziffer 6.1) an beiden Gleisen in entsprechender Länge (s. Tab. 12). Die genaue erforderliche Länge der Maßnahme und die technischen Eigenschaften der Maßnahmen können anhand von Messungen der Übertragungsfunktionen nach Fertigstellung des Tunnel - Rohbaus festgelegt werden.

5.5.7 Freie Strecke in Richtung Leuchtenbergring

Ab ca. Bau-km 110,0+25 bis PfG. Die 2.SBSS tangiert zunächst noch das Gebiet des sich in Aufstellung befindenden Bebauungsplans Nr. 1956 „Haidenauplatz“. Im weiteren Verlauf, bis zur Planfeststellungsgrenze hin werden die geplanten Gleise im bestehenden Gleisfeld geführt. Die benachbarte Bebauung liegt in einem deutlichen Abstand (>35 m) zu den beiden Gleisachsen; sie besteht aus Gewerbegebieten und einem Mischgebiet. Die Berechnungen ergeben für diesen Abschnitt unter Berücksichtigung der Vorbelastung keinen Einwirkungsbereich. Erschütterungsschutzmaßnahmen sind nicht vorgesehen.

6 Erschütterungsschutzmaßnahmen

Körperschallmindernde Maßnahmen an der Quelle werden als „aktive“ Maßnahmen bezeichnet. Weiterhin besteht die Möglichkeit, im Ausbreitungsweg bzw. an zu schützenden Gebäuden sog. „passive“ Maßnahmen vorzunehmen, um Erschütterungen abzuschirmen oder deren Einwirkung zu mindern.

Die Entscheidung über den Einsatz von Schutzmaßnahmen erfordert die Betrachtung des Kosten/Nutzen-Verhältnisses. Nach §74 Abs.2 des VwVfG können Schutzmaßnahmen unterbleiben, wenn sie für den Vorhabensträger „untunlich“ sind. In diesem Fall steht den Betroffenen eine angemessene finanzielle Entschädigung zu.

6.1 Maßnahmen am Oberbau

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, Erschütterungsschutzsysteme in der Form einer elastischen Lagerung des Oberbaus einzusetzen.

Die Wirksamkeit eines Erschütterungsschutzsystems ist an die Last und die Anregungsfrequenz anzupassen. Die Bezeichnung „Masse-Feder-System“ (MFS) gibt einen Hinweis auf die Funktionsweise: die Höhe der abgedeckten Masse und die Feder-Konstante (elastische Eigenschaft) ergeben den wirksamen Frequenzbereich. Im darunter liegenden Frequenzbereich nimmt die Wirksamkeit ab. Bei tiefen Frequenzen, etwa im Bereich unterhalb der halben Frequenz, bei der die Wirksamkeit beginnt, kann auch eine Verstärkung der Körperschallschnellepegel auftreten. Dieser Frequenzbereich (die „Abstimmfrequenz“ der elastischen Lagerung) soll unterhalb der Anregungsfrequenzbereiche liegen und nicht mit dem Frequenzbereich der Resonanzverstärkungen der Gebäude übereinstimmen.

6.1.1 Unterschottermatten

Unterschottermatten (USM) bestehen aus Elastomermaterialien und werden bei einem Schotteroberbau vollflächig zwischen dem Schotterbett und einem „Betonplanum“ (Tunnel- oder Trogsohle) verlegt. Die in der Richtlinie der DB AG TL 918 071 (Technische Lieferbedingungen - Unterschottermatten) festgelegten statischen Steifigkeiten der Matten lassen erfahrungsgemäß erst ab 25 Hz eine dämpfende Wirkung erwarten. Der Einbau von USM ist eine geeignete Maßnahme, um Erschütterungs-Immissionen (KB-Werte) bei Gebäuden mit Deckenresonanzfrequenzen ab 31,5 Hz zu vermeiden bzw. zu reduzieren, eine wirksame Reduzierung der sekundären Luftschall-Immissionen ist gegeben. Unterschottermatten werden vorzugsweise in Tunnelbauwerken und auf Brücken eingesetzt.

6.1.2 Masse-Feder-Systeme

Zur Reduzierung der Erschütterungs-Immissionen bei Fester Fahrbahn im Tunnel stellen Masse-Feder-Systeme geeignete und erprobte Maßnahmen dar. Folgende technische Ausführungen von Masse-Feder-Systemen sind bekannt, wobei die Abstimmfrequenz von den Werkstoffeigenschaften der Lagerung (i.A. Matten aus Elastomeren), der Fläche der Lager und der Masse der Fahrbahnplatte bestimmt wird:

- Masse-Feder-System mit vollflächiger elastischer Lagerung, Abstimmfrequenz ca. 16–20 Hz, Wirksamkeit ab ca. 31,5 Hz
- Masse-Feder-System mit Streifenlagern, Abstimmfrequenz ca. 10–16 Hz, Wirksamkeit ab ca. 20 Hz
- Masse-Feder-System mit Lagerung auf Einzelpunkten, Abstimmfrequenz ca. 7–10 Hz, Wirksamkeit ab ca. 15 Hz, wobei im untersten Frequenzbereich u.U. Stahlfeder – Lager erforderlich sind

Wegen der hohen Kosten für Masse-Feder-Systeme ist die Verhältnismäßigkeit dieser Maßnahme sorgfältig zu prüfen. Die vollflächige Lagerung des Oberbaus (Unterschottermatte oder „leichtes MFS“) ist mit geringeren Herstellungskosten verbunden als Systeme mit niedriger Abstimmfrequenz.

6.1.3 Elastische Schienenlagerung

Zwischen Schwelle und Rippenplatte werden elastische Zwischenplatten eingebaut. Weil auf diese Weise die Einleitung von Schwingungsenergie reduziert werden kann, werden z.B. in Brückenbauwerken mit schotterlosem Oberbau elastische Schienenbefestigungen mit Erfolg eingebaut. Die Wirksamkeit erstreckt sich vorwiegend auf den Frequenzbereich ab ca. 50 Hz.

6.1.4 Elastische Schwellenlagerung

Direkt unter der Schwelle wird eine elastische Matte aus Elastomer - Werkstoffen fest angebracht. Die Wirksamkeit (Einfügungsdämmmaß) dieser Maßnahme im Erschütterungsbereich ist nicht so hoch wie die von USM und wegen der relativ hohen dynamischen Steifigkeit erst ab ca. 40 Hz gegeben.

6.2 Erschütterungsschutzmaßnahmen an Gebäuden (passive Maßnahmen)

Zur Reduzierung der Erschütterungs-Immissionen kommen auch Maßnahmen am Gebäude selbst in Frage. In einzelnen Fällen kann eine Versteifung der Raumdecken oder eine Erhöhung der Materialdämpfung des Fußbodens in Betracht gezogen werden, um ein Zusammenfallen der Deckenresonanzfrequenzen mit den Anregungsfrequenzen zu vermeiden.

Mit entsprechendem technischen Aufwand ist auch die elastische Lagerung eines ganzen Gebäudes möglich. Dabei können Elastomerlager oder Stahlfedern die Gebäudelasten direkt an den Fundamenten oder über die lastverteilende Kellerdecke aufnehmen. In der Praxis wurde diese Maßnahme erfolgreich bei Neubauten und in Einzelfällen auch bei bestehenden Gebäuden eingesetzt.

6.3 Auswahl der geeigneten Maßnahmen

Erreicht wird eine wirksame Minderung der Körperschallschnelle für die deutlich über der Abstimmfrequenz liegenden Frequenzen. Etwa im Bereich ab der doppelten Abstimmfrequenz (also: eine Oktave höher) kann eine deutliche Wirksamkeit eintreten. Im Frequenzbereich nahe der Abstimmfrequenz nimmt die Wirksamkeit ab. Bei der Abstimmfrequenz kann auch eine Verstärkung der Körperschallschnelle auftreten.

Um bei Schienenverkehrswegen den Oberbau schwingungstechnisch durch eine entsprechend dimensionierte elastische Lagerung zu isolieren, ist es daher erforderlich, die Lage der Systemresonanzen der elastischen Lagerung im Verhältnis zur Deckenresonanz der zu schützenden Räume zu kennen. Eine falsche Dimensionierung der Systemresonanz kann die Maßnahme nicht nur wirkungslos machen, sie kann sogar zu einer Erhöhung der Erschütterungs-Immissionen führen.

Die für eine Reduzierung der Erschütterungs-Immissionen relevanten Frequenzbereiche an der 2.SBSS liegen aufgrund der Emissionsspektren oberhalb von ca. 31,5 Hz. Unterhalb dieses Frequenzbereichs ist nicht mit Auftreten von Überschreitungen der Beurteilungskriterien zu rechnen. Eine Ausnahme hiervon stellen bei einzelnen Gebäuden denkbare Resonanzverstärkungen in Frequenzbereichen unterhalb von 16 Hz dar. In diesem Frequenzbereich wirksame Erschütterungsschutzmaßnahmen sind nach dem Stand der Technik mit sehr hohem Aufwand verbunden und eine Wirksamkeit lässt sich nicht bis zu beliebig tiefen Frequenzen erzielen. Im Einzelfall muss der Einsatz passiver Maßnahmen für die ggf. betroffenen Gebäude erwogen werden.

Für die 2.SBSS in München ist im allgemeinen eine vollflächige Lagerung des Oberbaues zur Einhaltung der Beurteilungskriterien geeignet. Bei vollflächiger Lagerung des Schienenbettes auf Elastomer-Matten ist das Masse-Feder-System bei einer festen Fahrbahn gleichwertig mit den Unterschottermatten bei Schotteroberbau mit etwa gleicher Aufbauhöhe. Beide Maßnahmen führen auch zu einer deutlichen Reduzierung des sekundären Luftschalls.

Die elastische Lagerung der Schiene oder Schwelle kommt in Übergangsbereichen in Betracht.

6.4 Erforderliche Erschütterungsschutzmaßnahmen

Auf Grundlage der in Ziffer 5.5 beschriebenen Ergebnisse und Berechnungen sind die nachfolgenden Erschütterungsschutzmaßnahmen vorgesehen. Dabei kommt für die Feste Fahrbahn im Tunnel für die ausgewiesenen Bereiche eine elastische Lagerung des Oberbaues, als flächig gelagertes Masse-Feder-System, in Betracht.

Zu der Länge der erforderlichen Maßnahmen kommen Übergangsbereiche mit stufenweise anzupassender Steifigkeit der Oberbau-Lagerung hinzu. Der Umfang der Maßnahmen ist nach Fertigstellung des Tunnel-Rohbaus durch messtechnische Überprüfung der Übertragungsverhältnisse zu optimieren.

Falls sich bei den Messungen in der Rohbauphase des Tunnels oder nach Inbetriebnahme ergeben sollte, dass in weiteren Bereichen Überschreitungen der Beurteilungskriterien auftreten, muss geprüft werden, ob noch weitergehende Maßnahmen in Frage kommen.

In der nachfolgenden Tabelle werden die vorgesehenen Erschütterungsschutzmaßnahmen inkl. Überstandslängen zusammengefasst:

Bereich	ca. Bau-km		Länge im m
	von	bis	
Innere Wiener Straße bis Hp Ostbahnhof tief	108,1+75	109,3+75	1200
	208,1+80	209,3+75	1195
Bereich BBPI Nr. 1956 „Haidenauplatz“	109,8+00	110,2+10	410
	209,6+60	210,3+27	667

Tab. 9: Abschnitte mit erforderlichen Schutzmaßnahmen

In der nachfolgenden Tabelle werden die Bereiche zusammengefasst, für die keine Erschütterungsschutzmaßnahmen vorgesehenen werden, jedoch eine Überprüfung im Rohbau und nach Inbetriebnahme empfohlen wird:

Bereich	ca. Bau-km		Länge im m
	von	bis	
Praterinsel	107,8+90	107,9+90	--
	207,9+10	208,0+00	--
Orleansplatz 7, 9 und 10	109,4+50	109,6+00	--
	209,4+60	209,5+30	--

Tab. 10: Abschnitte mit erforderlicher Überprüfung im Rohbau

7 Erschütterungen während der Bauzeit

Erschütterungsintensive Arbeiten sind beim Bau von Verkehrswegen erfahrungsgemäß unvermeidbar. Verdichtungsarbeiten des Erdbodens, Aushub, Bewegungen von Bau- und Transportgeräten können Erschütterungsimmissionen hervorrufen. Hohe Belastungen durch Erschütterungsimmissionen können z.B. bei Spundwanddrammungen auftreten.

Im Planfeststellungsabschnitt 3neu sind im wesentlichen unterirdische Tunnelvortriebsarbeiten, Trog- und Tunnelbauarbeiten in offener Bauweise aus erschütterungstechnischer Sicht zu betrachten.

Im Zusammenhang mit den Tunnelvortriebsarbeiten sind entsprechend der geologischen Verhältnisse nur in untergeordneter Größenordnung Festgesteine zu erwarten. Das Lösen des Erdbodens, auch dieser Gesteinschichten, erfolgt mit den Vortriebsgeräten. Daraus sind keine hohen Erschütterungseinwirkungen zu erwarten. Trog- und Tunnelaushub in offener Bauweise erfordert eine Sicherung der Baugrube bzw. des angrenzenden Erdbodens.

Die Erschütterungseinwirkungen während der Bauphase sind nach Absatz 6.5.4 der DIN 4150, Teil 2, zu beurteilen. Grundsätzlich werden höhere Anhaltswerte zugelassen, als Tabelle 1 der DIN vorsieht. Die Häufigkeit des Auftretens von einzelnen KB_{Fmax} -Spitzen ist maßgeblich für die Beurteilungsgrößen. Erschütterungen, die nur an einem Tag auftreten, dürfen intensiver sein. Ab 6 Tagen bzw. 26 Tagen Dauer erschütterungsintensiver Arbeiten sind die Anhaltswerte jeweils strenger, ab 78 Tagen Dauer der Bauarbeiten ist die Erschütterungseinwirkung nach Tabelle 1 der DIN zu beurteilen. Für 2 bis 6 Tage Dauer werden die Anhaltswerte der ersten beiden Spalten interpoliert.

Dauer	D ≤ 1 Tag			6 Tage < D ≤ 26 Tage			26 Tage < D ≤ 78 Tage		
	A_u	$A_o^*)$	A_r	A_u	$A_o^*)$	A_r	A_u	$A_o^*)$	A_r
Stufe I	0,8	5	0,4	0,4	5	0,3	0,3	5	0,2
Stufe II	1,2	5	0,8	0,8	5	0,6	0,6	5	0,4
Stufe III	1,6	5	1,2	1,2	5	1,0	0,8	5	0,6

*) Für Gewerbe- und Industriegebiete gilt $A_o = 6$

Tab. 11: Anhaltswerte nach DIN 4150, Teil 2 für Erschütterungen durch Baumaßnahmen

Die in der obigen Tabelle genannten Stufen klassieren die Einwirkungen folgendermaßen:

- Stufe I: Bei Unterschreitung ist auch ohne besondere Vorinformation nicht mit erheblichen Belästigungen zu rechnen.

Stufe II: Bei Unterschreitung ist ebenfalls noch nicht mit erheblichen Belästigungen zu rechnen, falls die nachfolgend genannten Maßnahmen ergriffen werden. Bei zunehmender Überschreitung auch dieser Stufe werden mit wachsender Wahrscheinlichkeit erhebliche Belästigungen auftreten.

Ist zu erwarten, dass Erschütterungseinwirkungen auftreten, die oberhalb der Anhaltswerte der Stufe II liegen, so ist zu prüfen, ob der Einsatz weniger erschütterungsintensiver Verfahren möglich ist.

Stufe III: Zumutbarkeitsschwelle, bei deren Überschreitung die Fortführung von Bauarbeiten nur unter Berücksichtigung und Vereinbarung besonderer Maßnahmen möglich ist.

Als Maßnahmen zur Minderung erheblicher Belästigungen durch Erschütterungen aus Bauarbeiten nennt die DIN:

- die umfassende Information der Betroffenen vorab über die Arbeiten und die daraus zu erwartenden Erschütterungseinwirkungen
- die Aufklärung über die Unvermeidbarkeit
- die Anwendung baubetrieblicher Maßnahmen wie Einhaltung von Pausen und Ruhezeiten
- den Nachweis der tatsächlich auftretenden Erschütterungseinwirkungen

Diese Aufgaben obliegen dem die Baumaßnahme durchführenden Betrieb. Es ist möglich, während der Durchführung der Baumaßnahmen die Erschütterungen messtechnisch zu überwachen und im Rahmen der Baudurchführung darauf zu reagieren, um die Anforderungen der DIN einzuhalten.

Im Planfeststellungsabschnitt PFA 3neu sind erschütterungsintensive Arbeiten nur in wenigen Abschnitten zu erwarten. Tunnelabschnitte mit geringer Überdeckung und Trogabschnitte werden in offener Bauweise hergestellt. Für den Verbau werden Bohrpfähle eingebracht, wobei es sich um ein erschütterungsarmes Verfahren handelt.

Aus dem unterirdischen Tunnelvortrieb und den Arbeiten für die oberirdische Streckenführung sind keine Erschütterungseinwirkungen mit Überschreitungen der genannten Beurteilungsgrundlagen zu erwarten.

Bei der Erstellung des Hp Ostbahnhof tief werden erschütterungsarme Bauverfahren (z.B. Schlitzwandfräse) verwendet um Beeinträchtigungen durch Erschütterungen zu begrenzen.

8 Zusammenfassung

Die Trasse der geplanten 2. S-Bahn-Stammstrecke verläuft im Untersuchungsgebiet des Planfeststellungsabschnittes 3neu in zwei eingleisigen Tunnels. Die Aufgabenstellung der vorliegenden Untersuchung ist die Ermittlung und Beurteilung der hiervon ausgehenden Erschütterungseinwirkungen. Zum Ostbahnhof hin steigt die Tunnelstrecke an, um in Trog- bzw. Einschnittslage zu den oberirdisch liegenden Bahngleisen geführt zu werden.

Auf der Grundlage von Erschütterungs-Emissionsspektren, Ausbreitungsberechnungsmodellen, statistisch ermittelten Übertragungsfunktionen für Gebäude sowie messtechnisch ermittelten Übertragungsfunktionen stichprobenartig ausgewählter Gebäude wurden die zu erwartenden Erschütterungsimmissionen prognostiziert. Dabei wurden sog. Einwirkungsbereiche bestimmt. Diese geben die Abstände an, innerhalb derer bei einer bestimmten, von den spezifischen Eigenschaften der Gebäude abhängigen Empfindlichkeit mit einer Überschreitung der Beurteilungskriterien gerechnet werden muss. Die Beurteilung erfolgt für Erschütterungen nach DIN 4150, Teil 2 und für Immissionen des sekundären Luftschalls in Anlehnung an die 24.BImSchV.

Die Ergebnisse zeigen, dass in Teilabschnitten der Tunnelstrecken mit Überschreitungen der Beurteilungswerte an der darüber liegenden Bebauung gerechnet werden muss. Aufgrund der dichten Bebauung wird daher für eine Länge von insgesamt ca. 3472 m der Einsatz von Erschütterungsschutzmaßnahmen, voraussichtlich in Form von Masse-Feder-Systemen, vorgesehen. Die tatsächlich erforderlichen Längen und Systemeigenschaften sind aufgrund unvermeidbarer Prognose-Unsicherheiten nach Fertigstellung der Tunnel im Rohbau messtechnisch zu überprüfen bzw. festzulegen.

Auch in den Bereichen, in denen keine Erschütterungsschutzmaßnahmen vorgesehen wurden, ist wegen der unvermeidbaren Prognose-Unsicherheiten nach Fertigstellung der Tunnel - Rohbauten messtechnisch die Übertragungsfunktion zwischen Tunnel und Gebäudefundamenten zu erfassen und damit die Prognose zu überprüfen.

Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass an einzelnen Gebäuden Überschreitungen der Beurteilungswerte eintreten werden, welche auf sehr hohe Verstärkungen der Erschütterungseinwirkung durch tieffrequente Deckenresonanzercheinungen zurückzuführen sind. Da es sich dabei aber um Einzelfälle handeln wird, erscheinen weitergehende Schutzmaßnahmen für diese Abschnitte wirtschaftlich unverhältnismäßig. Ggf. kommen für diese Gebäude passive Maßnahmen bzw. Entschädigungen in Frage.

Während der Bauphase sind unter Umständen in Teilbereichen erschütterungstechnische Überwachungsmessungen erforderlich.

Die erschütterungstechnische Untersuchung, Anlage 20.1, umfasst 35 Seiten und zwei Übersichtslagepläne, Anlagen 20.2.1, 20.2.2.

Planungsgemeinschaft 2. S-Bahn-Stammstrecke München
Gesamtkoordinierung und Generalplanung Los 2 und 4



Dr. rer. nat. W. Herrmann



Dipl.-Ing. (FH) M. Gawlik

9 Grundlagenverzeichnis

- [1] Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) in der aktuell gültigen Fassung
- [2] Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, 16. BImSchV vom 12.06.1990 – Verkehrslärmschutzverordnung
- [3] Vierundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes - Verkehrswege-Schallschutzmaßnahmenverordnung, 24.BImSchV vom 4.02.1997
- [4] DIN 4150 Teil 2: Erschütterungen im Bauwesen, Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden, vom Juni 1999
- [5] DIN 4150 Teil 3: Erschütterungen im Bauwesen, Einwirkungen auf bauliche Anlagen, 02/1999
- [6] Verordnung über die bauliche Nutzung der Grundstücke (Baunutzungsverordnung - BauNVO) vom 23.01.1990
- [7] VDI-Richtlinie 2057, Blatt 3: Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen, Beurteilung; vom Mai 1987 (zurückgezogen September 2002; der in der Richtlinie beschriebene Zusammenhang zwischen bewerteter Schwingstärke und der subjektiven Wahrnehmung von Erschütterungseinwirkungen kann weiterhin als allgemein gültig betrachtet werden.)
- [8] Information der DB AG, ZBT 511: Körperschall- und Erschütterungsschutz, Leitfaden für den Planer, Stand Februar 1999; Entwurf der Überarbeitung Stand 1.12.2008
- [9] M. Heckl; H.A. Müller: Taschenbuch der technischen Akustik; Springer, 1994
- [10] Forschungsbericht 155 der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin: Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrserschütterungen, Theoretische Untersuchungen, Dr.-Ing. Lutz Auersch, Oktober 1988
- [11] VersA, Bericht 356 032 vom 18.03.1994, Anlage 8 und 9
- [12] Obermeyer Planen + Beraten GmbH, Bericht 10781-12/G.020 von 02/1995
- [13] VersA, Bericht 956 059 vom 12.10.1990, Anlage 5
- [14] Müller-BBM, Bericht 51 534/3 vom 14.03.2002, Anhang A, Seite 4 und 5
- [15] Obermeyer Planen + Beraten GmbH, Projekt 17018, Bericht vom Dezember 2008
- [16] Said, Grütz, Garburg, Zeitschrift für Lärmbekämpfung 53(2006), 12-18
- [17] J. Melke, Immissionsprognosen für Schwingungs- und Körperschalleinwirkungen, Landesamt für Immissionsschutz Nordrhein-Westfalen, Nr. 107, 1992

ANHANG I: EMISSIONSSPEKTREN

Strecke:	Freie Strecke	Trog	Rechteck-Tunnel	Kreisquerschnitt-Tunnel
Geschwindigkeit v in km/h	120	120	120	120
Frequenz [Hz]	Körperschallschnellepegel Lv in dB			
4	35.5	37.4	37.0	40.8
5	36.5	36.9	37.5	41.8
6.3	37.5	43.6	38.0	42.8
8	38.5	50.1	39.5	44.3
10	39.5	48.8	41.0	48.8
12.5	40.5	49.8	46.2	48.8
16	42.0	50.8	43.3	47.8
20	46.0	53.0	48.0	51.3
25	59.0	57.3	58.2	57.3
31.5	60.5	63.4	58.0	55.7
40	70.5	64.1	64.5	62.8
50	79.0	65.4	72.0	68.3
63	74.0	65.3	71.5	69.8
80	66.5	63.2	68.7	64.8
100	67.0	59.0	61.0	61.8
125	62.0	45.5	55.5	56.8
160	58.5	45.0	52.7	54.8

Tab. 12: Emissionsspektren für die Erschütterungsprognose

ANHANG II: GEBÄUDE-ÜBERTRAGUNGSFAKTOREN

Frequenz [Hz]	Praterinsel 1 MP7*		Innere Wienerstr. 11a MP1			St. Johannes-Kirche MP2			
	EG	2.OG	EG	1.OG	4.OG	EG	EG	Empore	Empore
Nutzung	WZ	WZ	Büro hin- ten	Büro vor- ne	Büro	Aufent- haltsraum	Kirchen- schiff	vorne	hinten
Bauweise	Holz	Holz	Beton	Beton	Beton	Beton	Beton	Holz	Holz
4	0.0	0.0	5.6	3.5	2.2	-2.6	-2.1	3.6	-0.3
5	0.0	0.0	2.8	3.8	5.0	-1.4	-0.6	4.6	1.3
6.3	0.0	0.5	1.0	4.1	5.4	-1.0	-0.1	5.3	1.3
8	0.6	0.8	0.8	3.1	5.8	-1.7	-2.0	5.1	2.3
10	1.2	1.1	-0.5	3.2	7.0	-1.8	0.2	7.2	2.7
12.5	3.8	3.6	1.7	5.4	11.9	-1.3	0.1	10.4	6.9
16	6.3	9.2	3.7	8.3	17.9	0.6	0.2	16.6	10.9
20	6.0	5.4	7.6	12.6	19.5	-2.1	-4.8	6.3	13.4
25	6.5	-2.0	4.2	12.7	19.4	-0.9	-4.1	9.0	7.8
31.5	1.1	-8.1	13.4	16.0	12.4	7.9	0.5	9.3	18.7
40	-5.7	-14.7	9.7	14.2	10.7	14.9	4.4	13.3	17.9
50	-2.6	-13.7	16.0	13.5	3.0	8.1	4.7	13.9	5.4
63	-2.0	-13.8	17.1	16.8	-1.1	5.2	5.2	18.1	1.3
80	-6.9	-11.2	10.3	12.7	-0.4	5.0	2.7	11.6	3.3
100	-9.1	-16.0	5.8	13.0	4.6	1.9	0.1	-1.3	0.3
125	-10.9	-17.0	7.6	12.5	23.4	2.3	-7.2	-8.0	0.7

Frequenz [Hz]	Pütrichstr. 7 MP3		Steinstr. 67 MP4		Metzstr. 12 MP5		Weissenburger Str. 38, MP6	
	1.OG	4.OG	1.OG	2.OG	1.OG	2.OG	1.OG	2.OG
Nutzung	WZ	WZ	KIZ	WZ	Büro	Büro	WZ	WZ
Bauweise	Holz b.	Holz b.	Holz b.	Holz b.	Holz b.	Holz b.	Holz b.	Holz b.
4	4.0	7.7	1.5	14.7	0.5	14.3	7.4	5.0
5	10.1	8.4	2.8	13.0	0.3	17.8	14.1	6.5
6.3	13.5	14.5	3.0	14.7	1.6	24.8	20.1	9.8
8	21.9	18.7	4.0	17.5	9.3	26.9	20.0	15.4
10	28.4	30.0	5.6	25.2	13.0	30.2	22.2	23.5
12.5	27.2	27.1	6.5	17.1	22.4	27.1	21.5	22.5
16	5.5	11.2	13.7	9.2	26.8	15.8	16.6	11.1
20	2.7	5.8	9.0	3.0	10.0	7.8	3.7	3.7
25	3.5	0.5	-1.9	-1.8	-3.0	-5.6	-0.4	-1.0
31.5	-1.2	1.4	0.3	-3.6	4.6	-4.1	-6.1	-3.6
40	-1.4	-3.8	1.1	-10.7	6.9	1.5	-5.3	-11.5
50	0.9	-4.3	0.9	-8.3	7.1	5.7	0.1	-2.2
63	1.7	-2.0	4.1	-6.9	17.1	7.2	-0.1	0.7
80	-5.9	-9.5	5.3	-8.8	15.3	4.9	-12.2	-8.1
100	-5.3	-10.7	-1.8	-9.1	11.5	-4.8	-12.8	-4.4
125	-12.7	-12.4	-6.2	-12.7	-2.3	-8.3	-18.4	-18.4

Tab. 13: Gemessene Übertragungsfaktoren der untersuchten Gebäude, in dB