

~~2. S-Bahn-Stammstrecke München~~

geändert

DB ProjektBau GmbH 31.07.2012

gez.: Tppa. Scheller i.V. 

~~Planfeststellung~~

~~Erläuterungsbericht (nachrichtlich)~~

~~Erschütterungstechnische Untersuchung~~

~~Planfeststellungsabschnitt 1~~

München, den 19.07.2005

Erstellt im Auftrag der
DB AG

Vorhabenträger:

~~Die Bahn~~ 

~~DB ProjektBau GmbH
Niederlassung Süd~~

2. S-Bahn-Stammstrecke München

Planfeststellung

Erläuterungsbericht (nachrichtlich)

Erschütterungstechnische Untersuchung

Planfeststellungsabschnitt 1

Vorhabenträger:



DB Netz AG
Regionalbereich Süd
Richelstraße 3, 80634 München



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

München, den 30.07.2012
Erstellt im Auftrag der DB AG



DB Energie GmbH
Energieversorgung Süd
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 / ~~DE-Consult GmbH~~ DB International GmbH / PSP Beratende Ingenieure München Consulting Engineers GmbH

Planungsgemeinschaft 2. S-Bahn-Stammstrecke München

Generalplanung Los 1 und 3

Lahmeyer München Ingenieurgesellschaft mbH / ~~Dorsch-Consult Ingenieurgesellschaft mbH~~ Gruppe DC Verkehr und Infrastruktur GmbH

Fachplaner, Gutachter

OBERMEYER Planen+Beraten GmbH

Institut für Umweltschutz und Bauphysik

ARGE-RA

~~Meidert und Kollegen, Rechtsanwälte~~

~~RA Hartmut Heinrich~~

HD Rechtsanwälte

RAe Heinrich und Doerner

	Inhaltsverzeichnis	Seite
1	Allgemeines	2
1.1	Projektbeschreibung	2
1.2	Aufgabenstellung	3
2	Grundlagen der erschütterungstechnischen Untersuchung	6
2.1	Allgemeines.....	6
2.2	Einflüsse auf die Erschütterungsimmission	6
2.3	Vorgehensweise	7
3	Beurteilung von Erschütterungen.....	9
3.1	Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden	9
3.2	Einwirkungen auf bauliche Anlagen.....	11
3.3	Einwirkungen auf empfindliche technische Geräte.....	11
3.4	Sekundärer Luftschall	12
3.5	Zusammenfassung der erschütterungstechnischen Anforderungen	13
4	Ablauf und Umfang der Untersuchung.....	14
5	Berechnung der zu erwartenden Erschütterungs-Immissionen.....	15
5.1	Emissions-Spektren	16
5.1.1	Einfluss der Geschwindigkeit.....	16
5.1.2	Einfluss des Fahrzeuges.....	17
5.2	Übertragungsfunktionen.....	17
5.2.1	Ausbreitung im Erdboden	17
5.2.2	Gebäudespezifische Übertragungsfaktoren	18
5.3	Berechnung der KB-Werte.....	19
5.4	Berechnung des sekundären Luftschalls.....	20
5.5	Ergebnisse und Beurteilung für die einzelnen Bereiche.....	21
5.5.1	Laim bis Donnersbergerbrücke.....	21
5.5.2	Umweltverbundröhre.....	22
5.5.3	Donnersbergerbrücke bis Hauptbahnhof.....	22
5.5.4	Hauptbahnhof bis Lenbachplatz	22
6	Erschütterungsschutzmaßnahmen.....	24
6.1	Maßnahmen am Oberbau.....	24
6.1.1	Unterschottermatten	24
6.1.2	Masse-Feder-Systeme.....	25
6.1.3	Elastische Schienenlagerung.....	25
6.1.4	Elastische Schwellenlagerung	26
6.2	Erschütterungsschutzmaßnahmen an Gebäuden (passive Maßnahmen)	26
6.3	Auswahl geeigneter Maßnahmen	26
7	Erschütterungen während der Bauzeit.....	28

8	Zusammenfassung	30
	Anhang : Grundlagenverzeichnis	31
	Anhang : Emissionsspektren	32

Tabellenverzeichnis

Seite

Tab. 1:	Zusammenhang zwischen bewerteter Schwingstärke und subjektiver Wahrnehmung	9
Tab. 2:	Anhaltswerte nach DIN 4150, Teil 2, Tabelle 1 für die Beurteilung von Erschütterungen in Wohnungen und vergleichbar genutzten Räumen	10
Tab. 3:	Korrektursummanden D gemäß 24.BImSchV	13
Tab. 4:	Abschnittunterteilung für die Erschütterungsprognose	15
Tab. 5:	Anhaltswerte nach DIN 4150, Teil 2 für die Beurteilung von Erschütterungen durch Baumaßnahmen	28

Abkürzungsverzeichnis

A

ABS Ausbaustrecke

B

BauNVO Baunutzungsverordnung

Bf München Ost München Ostbahnhof Personenbahnhof

Bf Bahnhof

Bft Bahnhofsteil

BImSchG Bundesimmissionsschutzgesetz

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

EÜ Eisenbahn-Überführung

F

G

GI Gleis

GOK Geländeoberkante

H

Hbf Hauptbahnhof

Hz Hertz, Einheit der Frequenz

I

K

KB-Wert Maß für Schwingstärke

L

M

MFS	Masse-Feder-System
ML	Bf München Laim
MAMP	München Abzw. Max-Weber-Platz
MPRA	München Abzw Praterinsel
m	Meter (Einheit)

N

O

OK	Oberkante
OL	Oberleitung
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr

P

Pbf	Personenbahnhof
PFA	Planfeststellungsabschnitt

R

S

SBSS	S-Bahn-Stammstrecke
SO	Schienenoberkante

T

U

USM	Unterschottermatte
UVR	Umweltverbundröhre

V

V	Volt, Einheit der Spannung
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

Z

Begriffsdefinitionen

2. S-Bahn-Stammstrecke

~~Bezeichnet wird hiermit die geplante zweigleisige S-Bahn-Stammstrecke, beginnend im Bf Laim und endend im Bf Ostbahnhof bzw. Bf Leuchtenbergring mit den dazwischen liegenden Stationen Hauptbahnhof und Marienhof.~~

Bezeichnet wird hiermit die neu zu errichtende zweigleisige S-Bahnstrecke, beginnend im Bf Laim und endend im Bft Leuchtenbergring mit den dazwischen liegenden Haltepunkten Hauptbahnhof Bahnhofplatz, Marienhof und Ostbahnhof tief.

Hauptast / Nebenast

~~Beide Äste sind Bestandteil der 2. S-Bahn Stammstrecke München. Als Hauptast wird die Anlage vom Bf Laim bis Bf Ostbahnhof, als Nebenast die Anlage vom Abzweig Max-Weber-Platz bis zum Bf Leuchtenbergring bezeichnet.~~

Ostast / Südast

Als Ostast wird die Anlage von der Abzw Praterinsel bis Bft Leuchtenbergring bezeichnet. Der Ostast als Teilstrecke der 1. Ausbaustufe der 2. S-Bahn-Stammstrecke München ist Gegenstand der vorliegenden Planfeststellungsunterlagen.

Der Südast ist Bestandteil einer späteren Ausbaustufe der 2. S-Bahn-Stammstrecke. Der Südast soll die Anbindung der südlichen Streckenäste des Münchener S-Bahnnetzes aus Richtung Giesing an die 2. S-Bahn-Stammstrecke ermöglichen.

Hochlage / Tieflage

Mit „Hochlage“ wird eine oberflächennahe Trasse des 2. S-Bahntunnels bezeichnet (rd. 16 m unter GOK), während die „Tieflage“ bis zu 42 m unter GOK reicht.

1 Allgemeines

1.1 Projektbeschreibung

Die heutige S-Bahn-Stammstrecke zwischen Laim und Ostbahnhof ist mit rd. 1 000 Fahrten täglich das Herzstück und gleichzeitig eine 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.

~~Da auf den bestehenden zwei Gleisen der S-Bahn-Stammstrecke technisch keine weitere Steigerung der Zugzahlen möglich ist und um eine nachhaltige Verbesserung der Situation bei Betriebsstörungen zu erreichen, ist der Neubau einer 2. S-Bahn-Stammstrecke (2.SBSS) von Laim bis Ostbahnhof/Leuchtenbergring vorgesehen.~~

~~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.~~

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 wurden 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.

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 PFA 1.

Der Planfeststellungsabschnitt erstreckt sich von Bau-km 100,6+00 bis Bau-km 105,9+96. Er beginnt im Westen westlich der Anlagen des Bf Laim und endet im Osten an der Grenze zu Planfeststellungsabschnitt PFA 2 an der Westseite des Karlsplatzes.

Im Wesentlichen sind dabei folgende Baumaßnahmen vorgesehen:

- Um- und Neubau von oberirdischen Gleisanlagen im Bereich Bf Laim mit Neubau der Mittelbahnsteige A und B (kompletter Umbau des Bf Laim) sowie Anpassung mit Teilrückbau der bestehenden Eisenbahnüberführung Wotanstraße
- Neubau der Eisenbahnüberführung Wotanstraße neu, sog. Umweltverbundröhre (UVR) mit Bushaltestelle als Erweiterung der Eisenbahnüberführung über die Wotanstraße mit Zugangsbauwerk Ost zu den S-Bahn-Bahnsteigen des Bf Laim
- Neubau der Überwerfungsbauwerke Laim mit Überführung der 2. S-Bahn-Stammstrecke über die Gleise der bestehenden S-Bahn-Stammstrecke sowie das Richtungsgleis Petershausen der S-Bahnlinie S2
- Erweiterung der Eisenbahnüberführung über den Südring (Objekt V) für die 2. S-Bahn-Stammstrecke
- Erstellung von Lärmschutzwänden südlich der Fernbahngleise als aktive Schallschutzmaßnahmen
- Erstellung der unterirdischen Bahnanlagen (Hauptast) vom Tunnelportal westlich der Donnersbergerbrücke bis zur östlichen Grenze des Planfeststellungsabschnitts einschließlich dem Portal vorgeschaltetem Trogbauwerk und Stützmauern
- Herstellung der Station Bf Hp Hauptbahnhof-Bahnhofplatz als tiefliegender Bahnhof unter den bestehenden Bahnanlagen und dem bestehenden Hauptbahnhof München

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

Im Rahmen der Planfeststellung wird neben der bestehenden EÜ Wotanstraße
die sog. Umweltverbundröhre (UVR) als Vorhaben der Landeshauptstadt Mün-
chen zur Genehmigung eingereicht. Auch hierzu sind im Zuge der vorliegenden
Untersuchung Aussagen zu machen.

Auch die zu erwartende Erschütterungsimmissions-Situation während der Bauphase und deren Beurteilung wird beschrieben.

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 zur Beschreibung der Erschütterungseinwirkungen am meisten 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
- Einfluss der 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

Detailliert beschrieben sind diese Einflussparameter unter Ziffer 5.1.1- 5.2.2. 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 alle 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 aus der prognostizierten Körperschallschnelle in Anlehnung an die DIN 4150, Teil 2 [4]. Der sekundäre Luftschallpegel wird gemäß der Information der Deutschen Bahn AG „Körperschall- und Erschütterungsschutz, Leitfaden Körperschall und Erschütterungen“ [9] ermittelt. Die Vorgehensweise wird unter Ziffer 5.3 und 5.4 erläutert.

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 $KB_{F_{max}}$ -Wert bezeichnet.

Zur Veranschaulichung der $KB_{F_{max}}$ -Werte im Zusammenhang mit der subjektiven Wahrnehmung kann Tabelle 1 der VDI-Richtlinie 2057, Blatt 3 [8], herangezogen werden:

$KB_{F_{max}}$ -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 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 $KB_{F_{max}}$ mit den Anhaltswerten A_u , (unterer Anhaltswert) und A_o (oberer Anhaltswert) nach Tabelle 1 der DIN 4150, Teil 2, zu vergleichen:

- Ist $KB_{F_{max}}$ kleiner oder gleich dem (unteren) Anhaltswert A_u , dann ist die Anforderung dieser Norm eingehalten.
- Ist $KB_{F_{max}}$ größer als der (obere) Anhaltswert A_o , dann ist die Anforderung dieser Norm nicht eingehalten.

Nach Absatz 6.5.3.5 der Norm hat für Schienenwege der obere Anhaltswert nicht die Bedeutung, dass bei dessen seltener Überschreitung die Anforderungen der Norm als nicht eingehalten gelten.

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

- Ist $KB_{F_{max}}$ größer als der untere Anhaltswert A_u , sind die Anforderungen dieser Norm dann eingehalten, wenn die Beurteilungsschwingstärke KB_{FT_r} 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 Betriebspersonen 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 Gebietseinteilung 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 regelmäßi-

gen, weder dauernd noch selten einwirkenden Erschütterungsereignissen Rechnung getragen. Nach Absatz 6.5.3.5 der Norm wird für Schienenwege durch seltene 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} 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 Erschütterungsvorbelastungen 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 dem 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 z.Zt. aus der 24.BImSchV [3] abgeleitete Richtwerte in Betracht.

In der 24.BImSchV werden die Mittelungspegel, in den Bezugszeiträumen Tag (6 bis 22 Uhr) und Nacht (22 bis 6 Uhr) bewertet. Die sekundären Luftschallimmissionen 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)

3.5 Zusammenfassung der erschütterungstechnischen Anforderungen

Die Beurteilung der Erschütterungen aus der geplanten S-Bahn-Stammstrecke richtet sich für die fühlbaren Vibrationen nach den Anhaltswerten der DIN 4150, Teil 2 für Wohnungen 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

Die Trassenführung ergibt verschiedene Rahmenbedingungen für die Erschütterungs-Emissionen in den Erdboden. Für die Erschütterungsprognose wird die Strecke in Abschnitte unterteilt, innerhalb derer die für die Erschütterungen 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 [9] 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 entsprechend der Gebietsnutzung und Gebäude-Übertragungseigenschaften (Deckenresonanzfrequenzlagen) in 3 Klassen ermittelt (siehe Ziffer 5.2.2), entsprechend der Maxima der jeweiligen Frequenzlage.

Je nach dem Ausmaß der ermittelten Betroffenheit werden Erschütterungsminierungsmaßnahmen erwogen und anhand deren 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 Ausbreitungen in die Umgebung gemessen werden.

5 Berechnung der zu erwartenden Erschütterungs- Immissionen

Der Immissionsberechnung für Erschütterungseinwirkungen aus dem Betrieb der S-Bahn liegt das Betriebsprogramm zum Prognose-Horizont ~~2015~~ 2025 mit **Startkonzept Mitfall 6** zu Grunde. In diesem ist festgelegt:

Abschnitt	Tag / Nacht
▪ Hauptast, Gleis Laim – Abzweig Max-Weber-P. (ML - MAMP):	203 / 39
▪ Hauptast, Gleis Laim – Abzw Praterinsel (ML - MPRA):	185 / 31
▪ Hauptast, Gleis Abzweig Max-Weber-P. – Laim (MAMP - ML):	203 / 39
▪ Hauptast, Gleis Abzw Praterinsel – Laim (MPRA - ML):	185 / 31

Für die Erschütterungsprognose wurde der Planfeststellungsabschnitt in Bereiche unterteilt, innerhalb derer die maßgeblichen Parameter für die Erschütterungsemission als konstant anzusehen sind. Maßgeblich ist die Streckenführung (ebenerdig, in Einschnitt- oder Trog-Lage, in Rechteck- oder Kreisquerschnitt-Tunnel), die Strecken-Auslastung (Anzahl, Geschwindigkeit) und die Gebietsnutzung.

In folgender Tabelle sind die Abschnitte aufgeführt:

Abschnitts-Nr.	Bau-km von - bis	Streckenführung	Geschwindigkeit v_e , km/h
1	100,6+00 - 103,0+00	Freie Strecke	120
2	103,0+00 - 103,2+80	Trog	120
3	103,2+80 - 103,4+75	Rechteck-Tunnel	120
4	103,4+75 - 105,2+50	Kreisquerschnitt-Tunnel	120
5	105,2+50 - 105,7+14	Überleitstelle und Haltepunkt Hauptbahnhof	120
6	105,7+14 - 105,9+96	Kreisquerschnitt-Tunnel	80

Tab. 4: Abschnittunterteilung für die Erschütterungsprognose

Als Ausgangsdaten werden messtechnisch ermittelte Emissionsspektren, der Fachliteratur entnommene Ausbreitungsmodelle und -faktoren sowie gebäude-spezifische Übertragungsfaktoren zugrundegelegt. Die Berechnung erfolgt als Körperschallschnelle im für Erschütterungseinwirkungen aus dem Schienenver-

kehr 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 werden. 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 – Eisenbahnversuchsanstalt [14]
- S-Bahn-Vorbeifahrten im Trog: Messungen an der Trog-Strecke München-Flughafen (Besucherpark) von 1995 [15]
- Offene Bauweise - Tunnelabschnitte (bei geringer Überdeckung) mit Rechteck-Querschnitt [13]
- Kreisquerschnitt-Tunnel: Münchner S-Bahn Bereich „Am Gasteig“. Messquerschnitt ohne Erschütterungsschutzmaßnahmen (Vergleichs-Messpunkte) [12]

5.1.1 Einfluss der Geschwindigkeit

Bei Abweichung der Messgeschwindigkeit zur Geschwindigkeit im Prognosefall 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. [13]). Danach zeigen sich Tendenzen, dass der neue Typ ET 423 z.T. geringere Erschütterungs-Emissionen aufweist als der Typ ET 420. Zugunsten der Betroffenen wurden die Ergebnisse für den Typ ET 420 als Erschütterungs-Emissionen verwendet.

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 Annahmen über die Übertragungsfunktionen der Ausbreitung der Erschütterungen im Boden und der Übertragung in die Gebäude bzw. innerhalb der Gebäude zu treffen.

5.2.1 Ausbreitung im Erdboden

Die Ausbreitung im Boden ist abhängig von der geometrischen Entfernung zwischen Erschütterungsquelle und Immissionsort, der Quellenart und von der Bodenart, 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 Gegenstände wie Kanäle, Injektionskörper, Versorgungsleitungen etc., beeinflussen zusätzlich die Ausbreitung der Erschütterungen.

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 bzw. Gleisachse 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 [9] angesetzt.

An unterirdischen Tunnelbauwerken entsteht ab Tunnelaußenwand 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 [11] 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.

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“ [9] 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.

Die Übertragungsfunktionen wurden in Abhängigkeit von den Eigenfrequenzen der Decken im Frequenzbereich zwischen 10 und 80 Hz in Terz-Bandbreite angesetzt und in drei Gruppen zusammengefasst. Diese Frequenzbereiche sind:

- ca. 10 Hz bis 20 Hz (entspricht etwa Bandbreite der Oktave, Mittenfrequenz 16 Hz)
- ca. 20 Hz bis 40 Hz (Oktav-Mittenfrequenz 31.5 Hz)
- ca. 40 Hz bis 80 Hz (Oktav-Mittenfrequenz 63 Hz)

Für diese Eigenfrequenzgruppen wurde die Deckenverstärkung und Frequenzlage mit dem jeweiligen Maximum innerhalb der in [9] (Information der DB AG, s.o.) in Terz-Bandbreite ermittelten Frequenzbereiche angesetzt.

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

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 Zeitbereich. 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-korrigierten Schnellepegelspektrums.

Die 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 für die drei Gruppen der untersuchten Deckeneigenfrequenzen der Gebäude unter Berücksichtigung des jeweils ungünstigsten Ergebnisses der Abstand ermittelt, bei dessen Unterschreitung 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.

Der „Leitfaden Körperschall und Erschütterungen“ der Deutschen Bahn AG [9] (Überarbeitung 2004) gibt für die Abschätzung des sekundären Luftschallpegels

folgende Gesamtpegel-Korrelationsbeziehungen an, die aus der statistischen Auswertung einer Vielzahl von Messungen an Bahnstrecken ermittelt wurde:

Betondecken: $L_{A-Sek} = 15.75 + 0.60 \cdot L_{vA}$

Holzbalkendecken: $L_{A-Sek} = 19.88 + 0.47 \cdot L_{vA}$

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.

Die angegebenen Einwirkungsbereiche bezeichnen Abstände horizontal zur nächstgelegenen Gleis- bzw. 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 [9] angesetzten Übertragungsfaktoren von Überschreitungen der Beurteilungskriterien betroffen werden.

5.5.1 Laim bis Donnersbergerbrücke

Dieser Streckenbereich erstreckt sich vom Beginn der 2.SBSS von Bau-km 100,6+00 bis Bau-km 103,7+00; er verläuft gebündelt mit den Hauptgleisen der Fernbahn und der bestehenden S-Bahn-Stammstrecke in Richtung Hauptbahnhof München. Die 2.SBSS verläuft oberirdisch, fällt ab ca. Bau-km 103,1 ab und geht über ein Trogbauwerk in die Tunnelstrecke über. Ab Bau-km 103,4+75 verläuft die Strecke in Tunnel mit Kreisquerschnitt und etwa kontinuierlicher Absenkung bis ca. Bau-km 103,7+00.

Ohne Berücksichtigung der Vorbelastung aus der bestehenden Bahnanlage ergibt sich ein Einwirkungsbereich von **kleiner** 35 m (für Mischgebietsnutzung), welcher sich im Trog- und Rechteck-Querschnittbereich des Tunnels verringert. In diesem Bereich befindet sich keine Wohnbebauung, so dass hier nicht mit Erschütterungseinwirkungen aus der geplanten 2.SBSS zu rechnen ist. Es sind keine Erschütterungsschutzmaßnahmen erforderlich.

5.5.2 Umweltverbundröhre

Nennenswerte Erschütterungen aus Straßenverkehr – hier also aus dem Betrieb der Buslinien in der UVR – sind nur bei sehr geringen Abständen von der Straße und bei Überfahren von Straßenunebenheiten zu erwarten. Im vorliegenden Vorhaben kann dies ausgeschlossen werden.

Ein prognostizierbarer Einfluss der UVR auf die Erschütterungswirkungen des Schienenverkehrs ist nicht zu erkennen.

5.5.3 Donnersbergerbrücke bis Hauptbahnhof

Dieser Abschnitt erstreckt sich von Bau-km 103,7+00 bis Bau-km 105,6+50. Die Überdeckung des Tunnels bleibt bis Unterquerung der bestehenden SBSS gleich und sinkt zum Hauptbahnhof hin in die Tieflage ab.

Von Bau-km 103,7 bis Bau-km 104,0 liegt im Einwirkungsbereich für Mischgebiete (**kleiner** 22 m) keine Bebauung. Die Bebauung des Arnulfparks befindet sich in geringfügig größerem Abstand als der Einwirkungsbereich und ist mit relativ tiefer Gründung geplant. In diesem Bereich ist nicht mit Überschreitungen der Beurteilungskriterien zu rechnen und es sind keine Erschütterungsschutzmaßnahmen notwendig. Da die Bebauung bis nahe an den Einwirkungsbereich heranreicht, ist dieses Ergebnis nach Fertigstellung des Tunnel-Rohbaus und vor Einbringen des Oberbaus messtechnisch zu überprüfen.

Im weiteren Verlauf, bis Bau-km 105,6+50, liegt keine zu beurteilende Bebauung.

5.5.4 Hauptbahnhof bis Lenbachplatz

Die Trasse der geplanten 2.SBSS verläuft in Tieflage unter dem Kaufhaus Hertie und dem Justizpalast, von Bau-km 105,6+50 bis Bau-km 105,9+96. Das Rechenmodell ergibt für die entfernungsbedingte Ausbreitungsdämpfung in diesem

Abschnitt keinen Einwirkungsbereich (für Mischgebietsnutzung) an der Erdoberfläche. Es sind keine Erschütterungsschutzmaßnahmen notwendig.

Da es unter Umständen möglich ist, dass bei Tiefgründung von Gebäuden (z.B. Hertie), in Abweichung zum Rechenmodell, durch Übertragung von Schwingungen auf die Fundamente eine Überschreitung der Beurteilungskriterien auftritt, ist dieses Ergebnis nach Fertigstellung des Tunnel-Rohbaus und vor Einbringen des Oberbaus messtechnisch zu überprüfen.

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 abgefederten 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 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

Die derzeit bekannte und auch erprobte Maßnahme bei Beton-Fahrwegen zur Reduzierung der Erschütterungs-Immissionen ist der Einbau eines Masse-Feder-Systems.

Folgende Unterteilung gliedert die Art von Masse-Feder-Systemen im Fernbahn-Schienenverkehr:

- leichtes Masse-Feder-System, Abstimmfrequenz ca. 16–20 Hz, Wirksamkeit ab ca. 31,5 Hz
- mittleres Masse-Feder-System, Abstimmfrequenz ca. 10–16 Hz, Wirksamkeit ab ca. 20 Hz
- schweres Masse-Feder-System, Abstimmfrequenz ca. 7–10 Hz, Wirksamkeit ab ca. 15 Hz

Die Abstimmfrequenz kann mit Elastomer-Material unter Einfluss der Lagerfläche eingestellt werden. Bei bereits erprobten Systemen unterscheiden sich o.g. Systeme (leicht, mittel, schwer) nicht nur in der Masse. „Leichte“ Systeme sind vollflächig gelagert, bei „mittel“ sind Streifenlager im Einsatz, das „schwere“ System wird punktförmig gelagert.

Wegen der sehr hohen Kosten ist die Verhältnismäßigkeit dieser Maßnahme zum Schutzzweck sorgfältig zu prüfen. Die vollflächige Lagerung des Oberbaus (Unterschottermatte oder „leichtes MFS“) ist mit geringeren Herstellungskosten verbunden als die „schwereren“ Systeme.

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 beschränkt sich auf Minderung der Schallabstrahlung des Bauwerkes (sekundärer Luftschall) und ist erst ab ca. 50 Hz gegeben.

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 bei USM und wegen der relativ hohen dynamischen Steifigkeit erst ab ca. 40 Hz vorhanden.

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 geeigneter 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 Körperschallschnellepegel 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 einem Auftreten von Überschreitungen der Beurteilungskriterien zu rechnen. Eine Ausnahme hiervon stellen hohe Resonanzverstärkungen bei einzelnen Gebäuden in Frequenzbereichen unterhalb von 16 Hz dar. In diesem Frequenzbereich sind wirksame Erschütterungsschutzmaßnahmen 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 „leichte“ 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.

In Teilbereichen sollen nach Fertigstellung des Tunnel-Rohbaus die Übertragungsverhältnisse messtechnisch überprüft werden. Falls sich bei den Messungen in der Rohbauphase des Tunnels oder nach Inbetriebnahme bestätigt, dass in einzelnen Gebäuden aufgrund besonderer Übertragungsverhältnisse oder Deckenresonanz-Verstärkungen die Beurteilungskriterien überschritten werden, muss geprüft werden, ob hier Maßnahmen (aktiv oder passiv) erforderlich werden.

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 Spundwanddrummungen auftreten.

Im Planfeststellungsabschnitt PFA 1 sind im Wesentlichen die unterirdischen Tunnelvortriebsarbeiten aus erschütterungstechnischer Sicht zu betrachten. Erschütterungsintensive oberirdische Bauarbeiten erfolgen nicht in kritischen Abständen zu Gebäuden. Im Zusammenhang mit den Tunnelvortriebsarbeiten sind entsprechend der geologischen Verhältnisse nur in untergeordneter Größenordnung Festgesteine zu erwarten. Das Lösen des Erdbodens, auch dieser Gesteinsschichten, erfolgt mit den Vortriebsgeräten. Daraus sind keine hohen Erschütterungseinwirkungen zu erwarten.

Die Erschütterungseinwirkungen während der Bauphase sind nach Kapitel 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. 5: Anhaltswerte nach DIN 4150, Teil 2 für die Beurteilung von 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 1 sind keine Betroffenheiten aufgrund erschütterungsintensiver Arbeiten zu erwarten.

8 Zusammenfassung

Die Trasse der geplanten 2.S-Bahn-Stammstrecke verläuft im Untersuchungsgebiet des Planfeststellungsabschnittes PFA 1 weitgehend mit bestehenden Gleisanlagen des Fern- und S-Bahnverkehrs gebündelt und ab Donnersbergerbrücke in parallel geführten eingleisigen Tunneln mit Kreisquerschnitt. Bestehende Bebauung wird dabei in Tieflage unterfahren.

Auf der Grundlage von Erschütterungs-Emissionsspektren, Ausbreitungsberechnungsmodellen und statistisch festgelegter Übertragungsfunktionen für Gebäude werden in der vorliegenden Untersuchung die zu erwartenden Erschütterungsimmersionen prognostiziert. Dabei werden 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 nicht mit Überschreitungen der Beurteilungswerte an der anliegenden Bebauung gerechnet werden muss. Aufgrund unvermeidbarer Prognose-Unsicherheiten ist nach Fertigstellung der Tunnel als Rohbau (vor Einbringen des Oberbaus) im Bereich tiefgegründeter Gebäude der Übertragungsweg messtechnisch zu überprüfen und ggf. der Einsatz von Erschütterungsschutzmaßnahmen in Form von Unterschottermatten oder leichten Masse-Feder-Systemen zu erwägen.

Die erschütterungstechnische Untersuchung, Anlage 20.1, umfasst 30 Seiten

OBERMEYER Planen + Beraten GmbH
Institut für Umweltschutz und Bauphysik



i.V. Dr. rer. nat. W. Herrmann



i.A. Dipl.-Ing. (FH) D. Fleischer

ANHANG : GRUNDLAGENVERZEICHNIS

- [1] Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) vom 14.05.1990
- [2] Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, 16. BImSchV vom 12.06.1990 – Verkehrslärmschutzverordnung
- [3] Vierundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, 24.BImSchV vom 4.02.1997 - Verkehrswege-Schallschutzmaßnahmenverordnung (BGBl.I, ab S. 172)
- [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, vom Februar 1999
- [6] Verordnung über die bauliche Nutzung der Grundstücke (Baunutzungsverordnung-BauNVO) vom 23.01.1990
- [7] VDI-Richtlinie 2719: Schalldämmung von Fenstern und deren Zusatzeinrichtungen, vom August 1987
- [8] VDI-Richtlinie 2057, Blatt 3: Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen, Beurteilung; vom Mai 1987 (zurückgezogen September 2002. Der in der zurückgezogenen Richtlinie beschriebene Zusammenhang zwischen bewerteter Schwingstärke und der subjektiven Wahrnehmung von Erschütterungseinwirkungen kann aber weiterhin allgemein gültig betrachtet werden.)
- [9] Information der DB AG, ZBT 511: Körperschall- und Erschütterungsschutz, Leitfaden für den Planer, Stand Februar 1999; Entwurf der Überarbeitung Stand 23.03.2004
- [10] Heckl; Müller: Technisches Taschenbuch der Akustik, Springer-Verlag
- [11] Forschungsbericht 155 der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin: Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrserschütterungen, Theoretische Untersuchungen, Dr.-Ing. Lutz Auersch, Oktober 1988
- [12] VersA, Bericht 956 059 vom 12.10.1990, Anlage 5
- [13] Fa. Müller-BBM, Bericht 51 534/3 vom 14.03.2002, Anhang A, Seite 4 und 5
- [14] VersA, Bericht 356 032 vom 18.03.1994, Anlage 8 und 9
- [15] Fa. Obermeyer Planen + Beraten GmbH, Bericht 10781-12/G.020 von 02.1995

ANHANG : EMISSIONSSPEKTREN

Strecke: Geschwindigkeit, km/h	Freie Strecke		Trog		Rechteck-Tunnel			Kreisquerschnitt-Tunnel			
	120	60	120	60	120	70	60	120	100	80	70
Frequenz [Hz]											
4	35.5	30.0	37.4	31.4	37.0	32.3	31.0	40.8	39.2	37.3	36.1
5	36.5	31.0	36.9	30.9	37.5	32.8	31.5	41.8	40.2	38.3	37.1
6.3	37.5	32.0	43.6	37.6	38.0	33.3	32.0	42.8	41.2	39.3	38.1
8	38.5	32.5	50.1	44.1	39.5	34.8	33.5	44.3	42.7	40.8	39.6
10	39.5	33.0	48.8	42.8	41.0	36.3	35.0	48.8	47.2	45.3	44.1
12.5	40.5	33.5	49.8	43.8	46.2	41.5	40.2	48.8	47.2	45.3	44.1
16	42.0	34.0	50.8	44.8	43.3	38.6	37.3	47.8	46.2	44.3	43.1
20	46.0	44.0	53.0	47.0	48.0	43.3	42.0	51.3	49.7	47.8	46.6
25	59.0	62.5	57.3	51.3	58.2	53.5	52.2	57.3	55.7	53.8	52.6
31.5	60.5	60.5	63.4	57.4	58.0	53.3	52.0	55.7	54.1	52.2	51.0
40	70.5	62.5	64.1	58.1	64.5	59.8	58.5	62.8	61.2	59.3	58.1
50	79.0	68.0	65.4	59.4	72.0	67.3	66.0	68.3	66.7	64.8	63.6
63	74.0	66.0	65.3	59.3	71.5	66.8	65.5	69.8	68.2	66.3	65.1
80	66.5	61.5	63.2	57.2	68.7	64.0	62.7	64.8	63.2	61.3	60.1
100	67.0	60.5	59.0	53.0	61.0	56.3	55.0	61.8	60.2	58.3	57.1
125	62.0	59.5	45.5	39.5	55.5	50.8	49.5	56.8	55.2	53.3	52.1
160	58.5	55.0	45.0	39.0	52.7	48.0	46.7	54.8	53.2	51.3	50.1

Emissionsspektren für die Erschütterungsprognose in dB