

Müller-BBM GmbH  
Robert-Koch-Straße 11  
82152 Planegg / München

Telefon +49 (89) 85602-0  
Telefax +49 (89) 85602-111

www.MuellerBBM.de

Dipl.-Geol. Wolfgang Daiminger  
Telefon +49 (89) 85602-276  
Wolfgang.Daiminger@MuellerBBM.de

8. April 2011  
M92 665/2 dai/zpl

## **Würzburger Straßenbahn GmbH**

### **Erschütterungstechnische Untersuchung zum Neubau einer Straßenbahnlinie in die Stadtbezirke Frauenland und Hubland**

**Bericht Nr. M92 665/2**

Auftraggeber:	Würzburger Straßenbahn GmbH Friedrich-Spee-Str. 58 – 64 97072 Würzburg
Bearbeitet von:	Dipl.-Geol. Wolfgang Daiminger
Berichtsumfang:	Insgesamt 24 Seiten

## Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>4</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>6</b>
1.1 Situation und Aufgabenstellung	6
<b>2 Beschreibung der Trassenführung, Problembereiche</b>	<b>6</b>
<b>3 Beurteilungskriterien</b>	<b>8</b>
3.1 Erschütterungen	8
3.1.1 Zur Beurteilung herangezogene Anhaltswerte	11
3.2 Sekundärer Luftschall	11
3.2.1 Vorbemerkung	11
3.2.2 Beurteilungskriterien nach VDI-Richtlinie 2719	12
3.2.3 Beurteilungskriterien nach TA Lärm	13
3.2.4 Beurteilungskriterien in Anlehnung an die 24. BImSchV	13
3.2.5 Zur Beurteilung heranzuziehende Anhaltswerte	14
3.3 Einwirkungen auf empfindliche technische Geräte	15
3.4 Sekundärer Luftschall Hochschule für Musik	15
3.5 Erschütterungen, Bauwerksschäden	16
<b>4 Prognose der durch den geplanten Straßenbahnbetrieb zu erwartenden Erschütterungs- und sekundären Luftschallimmissionen</b>	<b>16</b>
4.1 Grundsätzliche Vorgehensweise	16
4.2 Emissionsspektren	17
4.3 Prognoseberechnungen	17
4.3.1 Untersuchte Gebäudestrukturen	17
4.3.2 Ermittlung der KB-Werte	18
4.3.3 Ermittlung der sekundären Luftschallwerte	18
4.4 Ergebnisse der Prognoseberechnungen	19
4.5 Hinweis zur Rechengenauigkeit und zur Rundung	21
<b>5 Beurteilung der prognostizierten Immissionssituation</b>	<b>21</b>
5.1 Vorbemerkung	21
5.2 Erschütterungen	21
5.3 Sekundäre Luftschallimmissionen	21
5.3.1 Beurteilung nach TA Lärm	21

5.3.2	Beurteilung in Anlehnung an die 24. BImSchV	22
5.4	Weichen und Schienenkreuze	22
<b>6</b>	<b>Maßnahmen</b>	<b>22</b>
<b>7</b>	<b>Zitierte Unterlagen</b>	<b>24</b>

## Zusammenfassung

Die Würzburger Straßenbahn GmbH plant die Erweiterung der Straßenbahn in die Stadtbezirke Frauenland und Hubland.

Im Rahmen einer Untersuchung für das Neubauvorhaben wurde die erschütterungstechnische Verträglichkeit des Straßenbahnbetriebes mit der angrenzenden schutzbedürftigen Universitäts- und Wohnbebauung untersucht.

Dazu wurden die vom Straßenbahnbetrieb auf der Neubaustrecke zu erwartenden Erschütterungen und die damit verbundenen sekundären Luftschallimmissionen in der angrenzenden Bebauung auf der Basis von Referenzmessungen und baulynamischen Analysen besonders betroffener Gebäude prognostiziert und nach einschlägigen Regelwerken beurteilt.

Die Untersuchung führte zu folgenden Ergebnissen:

Die Zugfahrten können in Abstandsbereichen bis ca. 20 m spürbar wahrgenommen, in den Bereichen mit Abständen bis zu 8 m sogar deutlich. Die Anhaltswerte für die Beurteilungsschwingstärke  $KB_{FT}$  werden auch für die kürzesten Abstände zu den Gleisen nur sehr gering überschritten. Ab einem Abstand von ca. 7 m können alle Anhaltswerte auch für ein Wohngebiet nachts eingehalten werden.

Die Bewertung der sekundären Luftschallimmissionen ist abhängig von den angewandten Regelwerken.

Bei einer Beurteilung nach TA Lärm gemäß den Empfehlungen des LfU Bayern kommt als maßgebendes Kriterium die Anforderung an den Maximalpegel nachts von 35 dB(A) zum Tragen. Dieses Kriterium kann erst ab einem Abstand von > 16 m eingehalten werden.

Bei einer Beurteilung in Anlehnung an die 24. BImSchV, wie sie das Eisenbahnbundesamt für ihre Planungen an Schienenverkehrswegen heranzieht, wird der maßgebende Beurteilungspegel von 30 dB(A) für Schlafräume nachts ab einem Abstand von > 7 m eingehalten.

Weichen und Schienenkreuze existieren auf der gesamten Strecke nur bei dem Abzweig der Neubaustrecke von den bestehenden Strecken am Barbarossaplatz.

Erfahrungen aus einer Vielzahl von Verkehrsbetrieben zeigen jedoch, dass im Umfeld von Weichen und Schienenkreuze mit Flachrillen typischer Weise bis mindestens zu einem Abstand von 20 m mit Einwirkungen von Erschütterungen und sekundärem Luftschall zu rechnen ist, die über den Anforderungen an einen ausreichenden Immissionsschutz liegen, falls keine zusätzliche Maßnahmen zur Emissionsminderung vorgesehen werden.

Auf Grund der Prognoseberechnungen und der Untersuchungen der baulichen Strukturen wurden mögliche Konfliktbereiche benannt, in denen eine Beeinträchtigung durch Erschütterungen und/oder sekundärem Luftschall zu erwarten ist und für die Maßnahmen zur Minderung von Erschütterungen und sekundärem Luftschall vorzusehen sind.

Als mögliche und sinnvollste Maßnahmen kommen elastischen Abkopplungen der Gleistragplatten vom Untergrund in Form eines Masse Feder Systems in Frage.

Die Mehrkosten einer solchen Maßnahme sind stark abhängig von den baulichen Gegebenheiten und Randbedingungen. Im Allgemeinen wird von Kostenansätzen zwischen 1000 € und 1500 € je Meter Gleis ausgegangen.

Bei einer Bewertung nach TA Lärm ergibt sich ein Bedarf von insgesamt 2950 Gleismeter Masse Feder Systeme. Bei oben genanntem Kostenansatz ergeben sich damit Mehrkosten für Schutzmaßnahmen von ca. 2,95 Mio. bis 4,43 Mio. €.

Bei einer Bewertung in Anlehnung an die 24. BImSchV ergibt sich ein Bedarf von insgesamt 1735 Gleismeter Masse Feder Systeme. Bei oben genanntem Kostenansatz ergeben sich damit Mehrkosten für Schutzmaßnahmen von ca. 1,74 Mio. bis 2,6 Mio. €.

Dieser Bericht darf nur in seiner Gesamtheit, einschließlich aller Anlagen, vervielfältigt, gezeigt oder veröffentlicht werden. Die Veröffentlichung von Auszügen bedarf der schriftlichen Genehmigung durch Müller-BBM.

Für den technischen Inhalt verantwortlich:



Dipl. Geol. Wolfgang Daiminger  
Telefon 0 89 / 8 56 02 – 276



Durch die DGA Deutsche Gesellschaft für Akkreditierung mbH  
nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium.  
Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren.

## 1 Einleitung

### 1.1 Situation und Aufgabenstellung

Die Würzburger Straßenbahn GmbH plant die Erweiterung der Straßenbahn in die Stadtbezirke Frauenland und Hubland.

Im Rahmen einer Untersuchung für das Neubauvorhaben ist die erschütterungstechnische Verträglichkeit des Straßenbahnbetriebes mit der angrenzenden schutzbedürftigen Bebauung abzuklären.

Dazu sind die vom Straßenbahnbetrieb auf der Neubaustrecke zu erwartenden Erschütterungen und die damit verbundenen sekundären Luftschallimmissionen in der angrenzenden Bebauung auf der Basis von Referenzmessungen zu prognostizieren und nach den einschlägigen Regelwerken zu beurteilen.

Bei Überschreitung der Immissionsgrenzwerte sollen Vorschläge für prinzipielle Immissionsschutzmaßnahmen erarbeitet werden.

## 2 Beschreibung der Trassenführung, Problembereiche

Die Neubaustrecke klinkt am Barbarossaplatz aus der bestehenden Straßenbahnlinie in der Juliuspromenade bzw. Kaiserstraße aus und führt durch die Theaterstraße zum Residenzplatz. Hier biegt sie in die Balthasar-Neumann-Promenade ein und führt an der Westseite der Balthasar-Neumann-Promenade bis zum Josef-Stangl-Platz. Hier verschwenkt die Trasse in die Ottostraße und verläuft bis zum Sanderring in der Ottostraße. Bis hierher wird das Gleis auf einer Betontragplatte mit untergossenen Stützpunkten (Untergussmasse Icosit KC330U) und einer Eindeckung mit Natur- bzw. Betonsteinen verlegt.

Nach dem Sanderring biegt die Trasse über die Ottostraße in den Friedrich-Ebert-Ring ein und verläuft hier ein kurzes Stück als Rasengleis bis zur Sieboldstraße. Der weitere Verlauf führt durch die Sieboldstraße, verschwenkt an der Friedensstraße in die Zeppelinstraße und überquert auf den vorhandenen Brückenbauwerken die Bahnlinie Treuchtlingen - Würzburg und den südlichen Stadtring. In diesem Teil ist der Oberbau wiederum als mit Betonpflaster eingedecktes Gleis ausgebildet.

Nach dem Ende der Brückenbauwerke wechselt die Oberbauart der Trasse zu einem Schottergleis und wird so, mit Ausnahme der Haltestelle Frauenlandplatz, über die Zeppelin-, Schlör- und Zu Rhein Straße bis zur Wittelsbacherstraße geführt. Ab der Wittelsbacherstraße wechselt die Oberbauart wieder zu einem eingepflasterten Gleis und verläuft über den Wittelsbacher Platz in den Zwerchgraben. Ab hier verläuft die Strecke wieder als Schottergleis über den Zwerchgraben, die Grünanlagen an der Maurmeierstraße und das anschließende Wiesengelände zum Campus Hubland. Nach Überquerung der Straße Am Galgenberg tritt die Trasse in das ehemalige Kasernengelände des Leighton Areal ein und verläuft hier bis zur Wendeschleife an der Endhaltestelle Gerbrunner Tor.

Auf Grund der Enge der Straßenräume besitzt die Straßenbahnlinie zum Teil nur sehr geringe Abstände zur anliegenden Bebauung. Einwirkungen von Erschütterungen und sekundäre Luftschallimmissionen können in diesen Gebäuden daher nicht generell ausgeschlossen werden.

Nachstehend sind die Abstände der geplanten Streckenführung zu betroffenen Gebäuden für verschiedene Straßenzüge aufgeführt. Genannt werden nur Bereiche, für die auf Grund ihrer Lage (Abstand) und ihrer Nutzung die Möglichkeit von störenden Einwirkungen von Erschütterungen und/oder sekundärem Luftschall bestehen könnte. Angegeben ist dabei jeweils der kürzeste Abstand der Gebäude zu den Gleistrassen.

## Theaterstraße

Hier betragen die Abstände der Gebäude zwischen 4 m und 6 m. Es liegt eine stark gemischte Nutzung von Wohnen, Büros und Läden vor. Die Bausubstanz der Gebäude ist stark unterschiedlich (Altbauten, Wiederaufbauten nach dem 2. Weltkrieg mit unklarer Bausubstanz und Neubauten).

## Balthasar – Neumann - Promenade

Hier befindet sich die Hochschule für Musik, die Abstände zu den beiden Gleisen betragen zwischen 8 und 10 m. Im weiteren Verlauf besitzen die schützenswerten Gebäude größere Abstände zwischen 15 und 20 m. Zum Ende der Balthasar-Neumann-Promenade (Hausnummern 8 bis 9) rücken die Gebäude wieder näher ans Gleis (Abstände ca. 10 m).

## Ottostraße

Im Verlauf der Ottostraße (zwischen der alten Handelskammer und der Hausnummer 16) besitzen die Gebäude wieder sehr geringe Abstände zwischen 4 und 7 m zu den beiden Gleisen.

## Seiboldstraße

In der Seiboldstraße besitzen die Gebäude an der nördlichen Straßenseite Abstände um die 5 m und an der südlichen Straßenseite um die 10 m.

## Zeppelinstraße

Betroffen ist ein Gebäude direkt an der Haltestelle Südbahnhof (Hausnummer 13), die Abstände betragen zwischen 5 und 8 m für die beiden Gleise. Im weiteren Verlauf östlich des südlichen Stadtrings liegen die Gebäude (Zeppelinstraße 1 bis 9) in einem Abstand zwischen 12 und 15 m.

## Schulbereiche in der Schlörstraße

Die beiden betroffenen Schulgebäude in der Schlörstraße besitzen Abstände zwischen 7 und 12 m.

## Zu Rhein Straße

Die Gebäude südlich der Haltestelle Frauenlandplatz (Hausnummern 2 bis 4) besitzen Abstände zwischen 8 und 11 m, die Kirche und Pfarrhaus an der nördlichen Seite Abstände zwischen 6 und 9 m und im weiteren Anschluss zwischen Franz Schubert Straße und Wittelsbacherstraße zwischen 8 und 11 m auf beiden Seiten der Strecke.

## Trautenuerstraße

Hier liegen zwischen der Voglerstraße und der Franz List Straße zwei Wohngebäude mit Abständen zwischen 11 und 14 m.

In den ehemaligen Kasernenbereichen des Leighton Areal sind Campusgebäude und auch Wohngebäude geplant. Konkrete Planungen liegen dafür allerdings noch nicht vor. Es besteht dabei die Möglichkeit die konstruktive Gestaltung der neuen Gebäude im Hinblick auf die Einwirkungen aus dem Straßenbahnbetrieb zu optimieren, so dass diese Gebäude in der vorliegenden Untersuchung nicht explizit betrachtet werden.

Weichen und Schienenkreuze existieren nur bei dem Abzweig der Neubaustrecke am Barbarossaplatz.

### 3 Beurteilungskriterien

#### 3.1 Erschütterungen

Zur Bewertung der Einwirkung von Erschütterungen auf Menschen wird die bewertete Schwingstärke  $KB_F(t)$  herangezogen.

Die bewertete Schwingstärke  $KB_F(t)$  ist dabei nach DIN 4150 / 2 [2] als gleitender Effektivwert des frequenzbewerteten Erschütterungssignals (Zeitbewertung 0,125 sec, „FAST“) definiert.

Die Beurteilung erfolgt nach DIN 4150 / 2 [2] anhand von zwei Beurteilungsgrößen:

- $KB_{Fmax}$ , die maximale bewertete Schwingstärke
- $KB_{FTr}$ , die Beurteilungsschwingstärke.

Die maximale bewertete Schwingstärke  $KB_{Fmax}$  ist der Maximalwert der bewerteten Schwingstärke  $KB_F(t)$ , der während der jeweiligen Beurteilungszeit (einmalig oder wiederholt) auftritt.

Die Beurteilungsschwingstärke  $KB_{FTr}$  berücksichtigt die Häufigkeit und Dauer der Erschütterungsereignisse. Die Beurteilungsschwingstärke  $KB_{FTr}$  wird mit Hilfe eines Taktmaximalwertverfahrens (Taktzeit = 30 sec) ermittelt.

Die Beurteilungsschwingstärke  $KB_{FTr}$  ergibt sich dabei nach folgender Gleichung:

$$KB_{FTr} = KB_{FTm} \cdot \sqrt{\frac{T_e}{T_r}} \quad (1)$$

mit

$T_r$  = Beurteilungszeit (tags 16 Std., nachts 8 Std.)

$T_e$  = Einwirkzeit.

$KB_{FTm}$  = Taktmaximal-Effektivwert, wobei der Taktmaximal-Effektivwert die Wurzel aus dem Mittelwert der quadrierten Taktmaximalwerte ( $KB_{Fmax}$ -Werte) der Einzelereignisse (hier Zugfahrten) ist.

Die Beurteilung erfolgt nach nachstehend beschriebener Vorgehensweise:

Es ist die maximale bewertete Schwingstärke  $KB_{Fmax}$  zu ermitteln und mit den Anhaltswerten  $A_u$  und  $A_o$  nach Tabelle 1 zu vergleichen:

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



- Ist  $KB_{Fmax}$  größer als der (obere) Anhaltswert  $A_o$ , dann ist die Anforderung nicht eingehalten.
- Ist  $KB_{Fmax}$  größer als  $A_u$ , aber kleiner, höchstens gleich  $A_o$ , gilt die Anforderung dieser Norm dann als eingehalten, wenn die Beurteilungs-Schwingstärke  $KB_{FTr}$  nicht größer als  $A_r$  nach Tabelle 1 ist.

Die in der DIN 4150 / 2 [2] angegebenen Anhaltswerte für die Beurteilung von Erschütterungen in Wohnungen und vergleichbar genutzten Räumen sind in Tabelle 1 aufgelistet:

**Tabelle 1.** Anhaltswerte nach DIN 4150 / 2 (Tabelle 1) für die Beurteilung von Erschütterungen in Wohnungen und vergleichbar genutzten Räumen

Zeile	Einwirkungsort	Tag			Nacht		
		$A_u$	$A_o$	$A_r$	$A_u$	$A_o$	$A_r$
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 Gebietseinteilung in der BauNVO aber auch anderen planerischen Erfordernissen Rechnung trägt.

Für die Beurteilung von Erschütterungseinwirkungen aus Schienenverkehr gelten folgende Besonderheiten:

- Die Beurteilung erfolgt anhand der Kriterien  $A_u$  (für  $KB_{Fmax}$ ) und  $A_r$  (für  $KB_{FTr}$ ). Die (oberen) Anhaltswerte  $A_o$  erhalten beim Schienenverkehr eine andere Bedeutung (siehe unten).

- Bei der Ermittlung von  $KB_{FTT}$  wird der Faktor 2 zur Berücksichtigung der erhöhten Störwirkung für Einwirkungen während der Ruhezeiten nicht angewendet.
- Bei oberirdischen Strecken des ÖPNV gelten die um den Faktor 1,5 angehobenen  $A_{U-}$  und  $A_{r-}$ -Werte.
- Für den Schienenverkehr hat der (obere) Anhaltswert  $A_o$  nachts *nicht* die Bedeutung, dass bei dessen seltener Überschreitung die Anforderungen der Norm als nicht eingehalten gelten. Liegen jedoch nachts einzelne  $KB_{FTT}$ -Werte bei oberirdischen Strecken gebietsunabhängig über  $A_o = 0,6$ , so ist nach der Ursache bei der entsprechenden Zugeinheit zu forschen (z. B. Flachstellen an Rädern) und diese möglichst rasch zu beheben. Diese hohen Werte sind bei der Berechnung von  $KB_{FTT}$  zu berücksichtigen.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Anhaltswerte indikatorischen Charakter haben und eine Beurteilung jeweils im Einzelfall - auch unter Berücksichtigung der Messunsicherheit - zu erfolgen hat.

In der VDI-Richtlinie 2057, Blatt 3<sup>1</sup> werden Zusammenhänge zwischen bewerteten Schwingstärken und subjektiver Wahrnehmung angegeben:

**Tabelle 2.** Zusammenhang zwischen bewerteter Schwingstärke und subjektiver Wahrnehmung

KB-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

In den Erläuterungen zur Norm DIN 4150 / 2 wird bezüglich „gerade spürbarer“ Erschütterungen angemerkt:

„Einen Hinweis auf die Fühlbarkeit der Erschütterungseinwirkung gibt die Größe  $KB_{Fmax}$ . Die Fühlschwelle liegt bei den meisten Menschen im Bereich zwischen  $KB = 0,1$  und  $KB = 0,2$ . In der Umgebungssituation „Wohnung“ werden auch bereits gerade spürbare Erschütterungen als störend empfunden. Erschütterungseinwirkungen um  $KB = 0,3$  werden beim ruhigen Aufenthalt in Wohnungen überwiegend bereits als gut spürbar und entsprechend stark störend wahrgenommen.“

<sup>1</sup> Die VDI 2057, Blatt 3 wurde im September 2002 zurückgezogen, da im Zuge der Anpassung der Arbeitsrichtlinien an das europäische Recht sich für diesen Bereich die Bewertungsverfahren geändert haben. Der in der zurückgezogenen Richtlinie beschriebene Zusammenhang zwischen bewerteter Schwingstärke und der subjektiven Wahrnehmung von Erschütterungseinwirkungen kann aber weiterhin allgemein gültig verwendet werden.

### 3.1.1 Zur Beurteilung herangezogene Anhaltswerte

Auf Grund der Nutzungen ist von den in Tabelle 1, Zeilen 3 und 4 unter Berücksichtigung der Sonderregelungen für den ÖPNV genannten Anforderungen auszugehen. Diese Werte liegen auch den Empfehlungen des Bayerischen Landesamt für Umwelt für Planfeststellungsverfahren für Landverkehrswege zu Grunde.

**Tabelle 3.** Zur Beurteilung der Erschütterungsimmissionen herangezogene Anhaltswerte nach Tabelle 1 der DIN 4150 / 2

Zeile	Einwirkungsort	tags			nachts		
		A <sub>u</sub>	A <sub>o</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>u</sub>	A <sub>o</sub>	A <sub>r</sub>
3	Misch-, Kerngebiete	0,3	6	0,15	0,225	0,6	0,105
4	Wohngebiete	0,225	3	0,105	0,15	0,6	0,075

## 3.2 Sekundärer Luftschall

### 3.2.1 Vorbemerkung

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 der Trasse abgewandten und bei gut schalldämmten Räumen zu.

Für die Beurteilung der Sekundärluftschallimmissionen aus öffentlichen Verkehrsmitteln liegen derzeit weder eingeführte Regelwerke noch verbindlichen Richtwerte vor. Daher wird ersatzweise auf Regelwerke, die Anforderungen an Innenraumpegel angeben, zurückgegriffen und die darin genannten Anhaltswerte zur Beurteilung herangezogen.

Als Anhaltspunkte für die Beurteilung des sekundären Luftschalls kommen derzeit folgende Regelwerke in Betracht:

- VDI 2719 [4]
- TA Lärm [5]
- 24. BImSchV [6]

Die VDI 2719 dient der Auslegung der Schalldämmung von Fenstern und Fensterbauteilen zum Schutz von Räumen gegen von außen über die Fassaden eindringenden Lärm. Sie weist entsprechend des jeweiligen Nutzungskonzeptes eines Gebäudes spezielle Anforderungen aus, die als Zielgrößen für die Beurteilung von Innenraumpegel herangezogen werden können.

Die TA Lärm ist ein Regelwerk, das zur Beurteilung von Gewerbelärm geschaffen wurde. Sie behandelt allerdings als einziges Regelwerk explizit die Übertragung von Körperschall in schützenswerte Räume eines Gebäudes.

Die 24. BImSchV macht Angaben über das erforderliche Schalldämm-Maß der Außenbauteile eines Gebäudes in Abhängigkeit vom Außenpegel (Direktschall) bei Verkehrsgeräuschen in Verbindung mit der 16. BImSchV [7], aus dem sich ebenfalls Anforderungen an die Innenraumpegel ableiten lassen.

### 3.2.2 Beurteilungskriterien nach VDI-Richtlinie 2719

Nach Tabelle 6 der VDI-Richtlinie 2719 [4] sollen die Mittelungspegel ( $\bar{L}_m$ ) für von außen in Aufenthaltsräume eindringende Verkehrsgeräusche die in der nachfolgenden Tabelle 5 angegebenen Anhaltswerte nicht überschreiten. Unterscheiden sich Mittelungspegel und auftretende mittlere Maximalpegel um mehr als 10 dB, so ist nach den Anforderungen an den mittleren Maximalpegel  $\bar{L}_{max}$  zu beurteilen.

**Tabelle 4.** Anhaltswerte für Innengeräuschpegel nach VDI-Richtlinie 2719, Tabelle 6

Raumart, Nutzungszeit	Gebiet	Mittelungspegel $\bar{L}_m$ in dB(A) *	mittlerer Maximalpegel $\bar{L}_{max}$ in dB(A) *
Schlafräume, nachts (lauteste Nachtstunde zwischen 22.00 Uhr und 6.00 Uhr)	Reine und Allgemeine Wohngebiete	25 - 30	35 - 40
	Sonstige Gebiete	30 - 35	40 - 45
Wohnräume tagsüber	Reine und Allgemeine Wohngebiete	30 - 35	40 - 45
	sonstige Gebiete	35 - 40	45 - 50
Kommunikations- und Arbeits- räume tagsüber: Unterrichtsräume, ruhebedürftige Einzelbüros, wissenschaftliche Arbeitsräume, Bibliotheken, Kon- ferenz- und Vortragsräume, Arzt- praxen, Operationsräume, Kirchen, Aulen		30 - 40	40 - 50
Büros für mehrere Personen		35 - 45	45 - 55
Großraumbüros, Gaststätten, Schalträume, Läden		40 - 50	50 - 60

\* Der jeweils höhere Wert stellt die Mindestanforderung dar.  
Der mittlere Maximalpegel  $\bar{L}_{max}$  in dB ist das energetische Mittel der Schallpegelspitzen.

### 3.2.3 Beurteilungskriterien nach TA Lärm

In der TA Lärm [5] sind die nachfolgend genannten Immissionsrichtwerte „innen“ für Körperschallübertragung in schutzbedürftige Räume aufgeführt.

**Tabelle 5.** Immissionsrichtwerte „innen“ nach TA Lärm

Bezugszeitraum	Mittelungspegel $\bar{L}_m$ in dB(A)	Maximalpegel $L_{max}$ in dB(A)
Tag	35	45
Nacht	25	35

Die genannten Anhaltswerte gelten unabhängig von der Gebietsausweisung.

Hierbei dürfen einzelne kurzzeitige Geräuschspitzen die Immissionsrichtwerte  $L_m$  um nicht mehr als 10 dB übersteigen bzw. dürfen die Maximalpegel  $L_{max}$  nicht überschritten werden.

### 3.2.4 Beurteilungskriterien in Anlehnung an die 24. BImSchV

Die 24. BImSchV [6] macht Angaben über das erforderliche Schalldämm-Maß der Außenbauteile eines Gebäudes in Abhängigkeit vom Außenpegel (Direktschall) in Verbindung mit Genehmigungsverfahren nach der 16. BImSchV [7]. Zur Bestimmung von Fenster-Schallschutzklassen (aus dem Fenster-Schalldämm-Maß  $R'_{w,res}$ ) zum Schutz vor Außenlärm (Direktschall) werden Korrektursummanden  $D$  angegeben.

Aus dem Vergleich mit den allgemeinen Formeln für das bewertete Schalldämm-Maß in der VDI 2719 ergibt sich näherungsweise:

$$L_i = D + 3dB(A)$$

$L_i$  ist der A-bewertete Innenschallpegel in dB(A), der im zu beurteilenden Raum nicht überschritten werden sollte bzw. durch das bewertete Schalldämm-Maß der Außenfläche erreicht werden kann.

Die Korrektursummanden  $D$  sind also um 3 dB(A) reduzierte, einzuhaltende Innengeräuschpegel (A-bewertete Mittelungspegel) gemäß den angegebenen Raumnutzungen für schutzbedürftige Aufenthaltsräume

**Tabelle 6.** Korrektursummanden *D* nach 24. BImSchV

Raumnutzung	Korrektursummand <i>D</i> 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

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

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

Der Nachtwert entspricht der Obergrenze des in der VDI 2719 angegebenen Bereiches für Schlafräume in allgemeinen Wohngebieten. Der Tagwert entspricht der Obergrenze des Bereiches für Wohnräume in Misch- und Gewerbegebieten nach VDI 2719. Die 24. BImSchV berücksichtigt keine Maximalwertkriterien.

### 3.2.5 Zur Beurteilung heranzuziehende Anhaltswerte

Die genannten Richtlinien unterscheiden sich in der Beurteilung des Innengeräuschpegels und wenden unterschiedliche Richtwerte an. In der TA-Lärm und VDI 2719 werden sowohl die Mittelungspegel als auch die Maximalpegel für die Beurteilung herangezogen. In der 24. BImSchV werden dagegen nur die Mittelungspegel bewertet. Die Bezugszeiträume sind dabei für alle gleich (Tag: 06:00 bis 22:00 Uhr und Nacht: 22:00 bis 06:00 Uhr).

Das LfU Bayern empfiehlt in einer Stellungnahme [8] zur Beurteilung der Sekundärluftschallimmissionen für eine Wohnnutzung die TA Lärm und die darin genannten Anhaltswerte heranzuziehen. Dabei soll die Beurteilung auf die Mittelungspegel  $L_m$  abgestellt werden, bei mehr als fünf Zugfahrten pro Nacht sollte dann zusätzlich das Maximalwertkriterium zur Anwendung kommen. Dies wird ähnlich auch von den meisten Umweltämtern und Genehmigungsbehörden der Länder gesehen und auch vom Umweltbundesamt (UBA) präferiert.

Bei Vorhaben der Realisierung von Schienenverkehrswegen für deren Genehmigung das Eisenbahnbundesamt (EBA) zuständig ist, wird vom EBA generell auf die Anwendung der aus der 24. BImSchV abgeleiteten Grenzwerte abgestellt. Die Anwendung der aus der 24. BImSchV abgeleiteten Grenzwerte führt zu einem deutlich geringeren Anspruch zum Schutz vor sekundären Luftschallimmissionen als die vorstehend genannten Regelwerke und mündet regelmäßig zu Klagen von Betroffenen gegen Planfeststellungsbeschlüsse des EBA. Die Rechtmäßigkeit dieser Beschlüsse im Hinblick auf die Anwendung der aus der 24. BImSchV abgeleiteten Grenzwerte wird aber regelmäßig durch die Verwaltungsgerichte der Länder und dem Bundesverwaltungsgericht bestätigt. Allerdings existieren auch völlig widersprüchliche Entscheidungen zu diesem Thema durch Verwaltungsgerichte der Länder.

### **3.3 Einwirkungen auf empfindliche technische Geräte**

Bei erschütterungsempfindlichen Geräten und Einrichtungen, wie z. B. Elektronenmikroskope, Analysen- und Diagnosegeräte etc., können u. U. Fehlfunktionen bzw. Störungen auftreten, wenn die Erschütterungsimmissionen am Aufstellungsort der Geräte oder innerhalb der Einrichtungen geforderte Spezifikationen überschreiten.

In dem hier zu untersuchenden Streckenbereich ist derzeit nichts über das Vorhandensein solcher Geräte bekannt. 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, die Geräte werden deshalb i.d.R. körperschallisoliert aufgestellt. Somit wären sie auch gegen die Erschütterungsimmissionen aus dem Straßenbahnbetrieb geschützt. Eine exakte Abschätzung eventuell möglicher Konfliktsituationen kann allerdings erst nach Vorliegen konkreter Anforderungen und Begutachtungen der Aufstellungsorte dieser Geräte erfolgen.

### **3.4 Sekundärer Luftschall Hochschule für Musik**

In den Gebäuden der Hochschule für Musik an der Balthasar Neumann Promenade existieren Musikräume und Probenräume. Die schalltechnischen Anforderungen für solche Räume gehen häufig deutlich über die Anforderungen der TA Lärm für Schlafräume nachts hinaus. In vielen Fällen besteht die Forderung, dass maximale Störpegel 25 dB(A) nicht überschreiten.

### 3.5 Erschütterungen, Bauwerksschäden

Die durch Schienenverkehr verursachten Erschütterungen in Gebäuden liegen auch für Vollbahnen (lokbetriebene Züge) selbst bei sehr geringen Abständen typischerweise um Faktoren von 10 bis 20 unter den für Gebäudeschäden anzusetzenden Anhaltswerten. Nach allgemeinem wissenschaftlichen Erkenntnisstand können mögliche Gebäudeschäden durch Erschütterungen, die aus Schienenverkehr verursacht sind, ausgeschlossen werden. Es wurde daher in vorliegender Untersuchung auf eine detaillierte Betrachtung möglicher Einwirkung im Hinblick auf Erschütterungsschäden aus dem Straßenbahnbetrieb verzichtet.

## 4 Prognose der durch den geplanten Straßenbahnbetrieb zu erwartenden Erschütterungs- und sekundären Luftschallimmissionen

### 4.1 Grundsätzliche Vorgehensweise

Erschütterungsprognosen werden auf der Basis von Messergebnissen (Referenzspektren) und theoretischen Überlegungen durchgeführt, 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 Gebäuden (entfernungsbedingte Pegelabnahme im Erdboden)
- Ausbreitung der Schwingungen vom Erdboden (vor dem Gebäude) in die zu betrachtenden Räume innerhalb der Gebäude (gebäudespezifische Übertragungsfaktoren). Von entscheidender Bedeutung ist die Abhängigkeit der Immissionen von individuellen Eigenschaften der Gebäude bzw. deren Bauart und Bausubstanz (Deckenbauteile verschiedener Bauarten, Deckenstärken und Spannweiten, d. h. verschiedener Eigenfrequenzen, Eigenschwingverhalten schwimmender Estriche etc.).

Eine Erschütterungsprognose ist um so genauer, je mehr von den oben genannten Einflussgrößen bekannt sind bzw. messtechnisch ermittelt werden können. Dies ist für einzelne Gebäude, bei denen Detailuntersuchungen durchgeführt werden können, möglich. Müssen Aussagen über Bereiche eines größeren Streckenabschnitt getroffen werden, so können die Einflussgrößen nur über statistische Betrachtungen und theoretische Ableitungen getroffen werden, die die lokalen Verhältnisse der Prognosesituation mit berücksichtigt. Die theoretische Ableitungen sind soweit wie möglich durch lokale messtechnische Untersuchungen zu unterstützen und zu kalibrieren.

Die für die Prognosen herangezogenen Einflussgrößen werden spektral, d. h. getrennt für jedes Frequenzband, betrachtet. Durch Kopplung der einzelnen Einflussgrößen werden die zu erwartenden Erschütterungsmissionen in den betrachteten Gebäuden spektral ermittelt. Aus den ermittelten spektralen Erschütterungsmissionen können die Einzel-Beurteilungswerte (KB-Werte und sekundäre Luftschallpegel) bestimmt und gemäß festgelegten Beurteilungskriterien bewertet werden.



Diese Vorgehensweise zur Ermittlung der Prognose berücksichtigt dabei auch entsprechende Erkenntnisse aus Literatur und Regelwerken [1] [10] [11].

## 4.2 Emissionsspektren

Zur Beschreibung der Schwingungsemissionen aus dem Straßenbahnbetrieb und zur Ausbreitung der Erschütterungen zwischen Straßenbahngleisen und Gebäuden bei verschiedenen Abständen wurden Referenzmessungen an der Straßenbahnstrecke in der Petrinistraße in Würzburg durchgeführt. Die Oberbauarten in den kritischen Bereichen der Neubaustrecke unterscheiden sich von der untersuchten Strecke in der Petrinistraße nur in der Art der Eindeckung (Asphalt bzw. Pflaster), die dynamischen Eigenschaften der Oberbauverhältnisse sind jedoch vergleichbar.

Die Messungen wurden bei Geschwindigkeiten von 45 km/h, 30 km/h und 25 km/h für Abstände von 4 m, 6 m, 8 m und 16 m bei Betrieb der Straßenbahntypen GTN und GTE durchgeführt. Die untersuchten Abstandsbereiche decken dabei im Wesentlichen die kritischsten Bereiche der geplanten Strecke ab. Aus den Ergebnissen wurden für die Prognose auch noch Emissionsspektren für die Abstandsbereiche 10 m und 12 m interpoliert. Da sich die Messergebnisse für die Fahrten mit den Geschwindigkeiten von 30 km/h und 25 km/h nicht wesentlich unterschieden, wurde für die vorliegende Prognose nur von den Geschwindigkeiten von 30 km/h und 45 km/h ausgegangen.

Eine genaue Beschreibung der Messungen kann dem Müller BBM Bericht Nr. M92 665/1 [12] entnommen werden.

## 4.3 Prognoseberechnungen

### 4.3.1 Untersuchte Gebäudestrukturen

Da die betroffenen Gebäude im Bereich der vorliegenden Straßenbahnplanung, für die ein Konfliktpotential angenommen werden kann, zum Teil sehr unterschiedliche konstruktive Merkmale aufweisen, wurde zur Prognoseberechnung eine Matrix aus einer Vielzahl baudynamischer Parameter berücksichtigt. Neben dem Übergang Boden-Bauwerksfundament werden dabei im wesentlichen die Deckeneigenfrequenzen der Gebäude berücksichtigt. Angesetzt wurden dabei Deckeneigenfrequenzen im Frequenzbereich zwischen 10 Hz und 25 Hz. Deckeneigenfrequenzen unter 10 Hz werden nur selten bei sehr alten Gebäuden mit weit gespannten Holzbalkendecken oder Saalbauten mit großen ungestützten Deckenbereichen beobachtet. Deckeneigenfrequenzen über 25 Hz treten nur bei sehr massiven Bauten auf. Die in den Prognoseberechnungen berücksichtigten Deckeneigenfrequenzen werden in einem weiteren Schritt mit den Eigenfrequenzen schwingfähiger Fußbodensystem gekoppelt. Berücksichtigt werden dabei Eigenfrequenzen zwischen 50 Hz und 100 Hz, in diesem Bereich liegen die Abstimmungen üblicher schwimmender Estriche im Wohnungsbau.

Die in den vorstehenden Kapiteln beschriebenen Einflussfaktoren wurden mit den ausgewiesenen Emissionsspektren gekoppelt. Als Ergebnis liegen für verschiedene Gebäudestrukturen, beschrieben durch die Bauteileigenfrequenzen, Schnellepegel – Terzspektren der Schwinggeschwindigkeit am Immissionsort vor.

### 4.3.2 Ermittlung der KB-Werte

Zur Bewertung der Einwirkung von Erschütterungen auf Menschen werden sogenannte KB-Werte herangezogen. Die KB-Werte werden typischerweise durch eine Zeit- und Frequenzbewertung des Schnellesignals am Immissionsort ermittelt. Die Prognoseberechnungen werden jedoch im Frequenzbereich durchgeführt. In diesem Fall kann der KB-Wert ersatzweise aus dem in der Prognose berechneten Schnellepegel-Terzspektrum gebildet werden. Die für die Immissionsorte berechneten Schnellepegel – Terzspektren der Schwinggeschwindigkeit werden dabei terzweise einer Korrektur unterzogen, die der KB-Bewertung des Erschütterungszeitsignals entspricht. Der KB-Wert entspricht dann dem delogarithmierten Wert des Summenpegels des KB-korrigierten Schnellepegelspektrums. Dieser KB-Wert stellt auf Grund der verwendeten Emissionsgrößen einen mittleren Maximalwert des KB-Wertes der jeweiligen Zugart dar und kann damit auch als  $KB_{FTm}$  Wert gemäß DIN 4150/2 für die Berechnung der Beurteilungsgrößen  $KB_{FTr}$  eingesetzt werden.

Die so ermittelten KB-Werte weisen systematisch geringfügig höhere Werte auf als die nach DIN 4150 direkt aus einem Zeitsignal ermittelten Werte. Der Grund liegt darin, dass der  $KB_{Fmax}$  Wert aus dem Zeitsignal sich exakt auf einen Zeitpunkt des Zeitsignals bezieht, während das Maximalwertspektrum seine Energieanteile in den einzelnen Frequenzbändern aus unterschiedlichen Zeitpunkten des jeweils ausgewerteten Zeitfensters beziehen kann.

Die Abweichungen bei den genannten Näherungen, speziell bei Zugverkehr, sind im Allgemeinen aber gering, so dass diese Verfahrensweise berechtigt ist. Zudem liegen die so ermittelten, mit dem  $KB_{Fmax}$  Wert vergleichbaren Schwingschnellen auf der „sicheren Seite“.

### 4.3.3 Ermittlung der sekundären Luftschallwerte

Bauwerksschwingungen werden von Raumbegrenzungsflächen (Wände und vor allem Geschossdecken) abgestrahlt und können als tieffrequenter Luftschall wahrgenommen werden.

Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Schwingschnelle auf den Raumbegrenzungsflächen, den jeweiligen Abstrahl- und Absorptionsverhältnissen im Raum und den daraus resultierenden Schalldruckpegeln im Raum. Ein allgemein gültiges Berechnungsverfahren kann jedoch aufgrund des sehr komplexen Wirkungsgefüges der o. g. Zusammenhänge im hier bestimmenden Frequenzbereich unter 100 Hz derzeit nicht angegeben werden.

Auf Grund von Erfahrungen, basierend auf einer Vielzahl messtechnischer Untersuchungen, kann der sekundär abgestrahlte Luftschall aber in guter Näherung nach folgender Formel abgeschätzt werden:

$$L_{pA}(f_T) = L_{vA}(f_T) + 10 \log 4 S/A(f_T) + 10 \log \sigma(f_T) \quad \text{in dB(A)}$$

Dabei bedeuten:

$L_{pA}(f_T)$	=	Terzpegel des A-bewerteten Schalldrucks im Raum
$L_{vA}(f_T)$	=	Terzpegel der A-bewerteten Schwingschnelle der Raumbegrenzungsflächen, bezogen auf $5 \cdot 10^{-8}$ m/s
S	=	Größe der schwingerregten Fläche in $m^2$
A ( $f_T$ )	=	äquivalente Absorptionsfläche des Raumes in $m^2$
$\sigma(f_T)$	=	Abstrahlgrad
$f_T$	=	Terzmittenfrequenz

Für eine genauere Abschätzung des sekundären Luftschalls müsste die mittlere Schnellepegelverteilung aller abstrahlenden Flächen mit den zugehörigen Abstrahlgraden und den äquivalenten Absorptionsflächen bekannt sein.

Auf Grund von Erfahrungswerten für raumakustische Verhältnisse in Wohnräumen und mit Wohnräumen vergleichbar ausgestatteten Räumen können zur Abschätzung folgende Werte für S, A und  $\sigma$  angesetzt werden:

S	$\approx$	2 x Grundrissfläche G
A ( $f_T$ )	$\approx$	0,8 x Grundrissfläche G (wird in der Näherung als konstant angesetzt)
$\sigma(f_T)$	=	1 für Frequenzen > 63 Hz. Für tiefere Frequenzen (< 63 Hz) erfolgt eine Absenkung.

Diese Korrektur wird terzweise zu den Prognosespektren addiert. Die so ermittelten sekundären Luftschallpegel stellen mittlere Maximalpegel  $\bar{L}_{max}$  während der Zugfahrten dar. Die Berechnung erfolgt im Frequenzbereich von 4 bis 315 Hz.

Bei Ansatz der oben genannten Parameter ergeben sich in der Regel etwas zu hohe Pegel, die Prognose liegt auch hier auf der „sicheren Seite“.

#### 4.4 Ergebnisse der Prognoseberechnungen

Die Ergebnisse der Prognoseberechnungen können den Tabellen 7 (KB-Werte) und 8 (sekundäre Luftschallpegel) entnommen werden. Die sekundären Luftschallpegel sind dabei auf ganze dB gerundet angegeben.

Ziel der Prognose ist eine allgemein gültige Abschätzung der Einwirkungen von Erschütterungen und sekundärem Luftschall auf die betroffenen Gebäude, die nach Möglichkeit alle Eventualitäten in der Reaktion der Gebäude berücksichtigt. Für die weiteren Bewertungen wurde dabei für alle untersuchten Prognosefälle der Streubereich der Prognoseergebnisse eingesetzt, welcher sich aus der Variation der angesetzten baodynamischen Parameter ohne Einschränkungen der Bauformen ergibt. Die zugehörigen  $KB_{FTr}$  bzw.  $L_r$  Werte wurden dabei jeweils für den höchsten  $KB_{Fmax,prog}$  bzw.  $L_{max,prog}$  Wert anhand des geplanten Fahrprogramms ermittelt. Dabei ist mit einem Zugaufkommen von 25 Zügen nachts und 190 Zügen tags zu rechnen. Es werden die Zugtypen GTE und GTN gemeinsam eingesetzt. Auf Grund des vorhandenen Wagenmaterials ist dabei von einem Anteil von 60 % für Zugfahrten des Typs GTN auszugehen.

Die angegebenen Werte sind somit als Obergrenze der möglichen Immissionswerte zu verstehen und stellen eine „worst-case“-Abschätzung für den Fall eines Zusammentreffens besonders ungünstiger baodynamischer Parameter dar. Diese Werte müssen daher nicht zwingend auftreten, es sind durchaus auch etwas geringere Immissionswerte möglich.

**Tabelle 7.** KB-Werte:  $KB_{Fmax,prog}$  und  $KB_{FTr}$  bei Straßenbahnvorbeifahrten

Zugart	v [km/h]	KB	Abstand					
			4 [m]	6 [m]	8 [m]	10 [m]	12 [m]	16 [m]
GTN	30	$KB_{Fmax,prog}$	0,24- 0,64	0,16- 0,43	0,11- 0,36	0,07- 0,19	0,05- 0,14	0,05- 0,18
GTN	45	$KB_{Fmax,prog}$	0,23- 0,62	0,16- 0,47	0,13- 0,4	0,07- 0,21	0,06- 0,16	0,06- 0,16
GTE	30	$KB_{Fmax,prog}$	0,11- 0,28	0,08- 0,21	0,04- 0,1	0,03- 0,09	0,03- 0,07	0,01- 0,03
GTE	45	$KB_{Fmax,prog}$	0,11- 0,26	0,07- 0,18	0,04- 0,1	0,03- 0,08	0,02- 0,06	0,01- 0,04
		$KB_{FTr}$						
GTN/GTE	30	Tag	0,17	0,12	0,09	0,05	0,04	0,05
GTN/GTE	30	Nacht	0,085	0,058	0,046	0,024	0,018	0,023
GTN/GTE	45	Tag	0,17	0,12	0,1	0,05	0,04	0,04
GTN/GTE	45	Nacht	0,082	0,06	0,05	0,026	0,02	0,02

**Tabelle 8.** Sekundäre Luftschallpegel: Maximalpegel  $L_{max,prog}$  und  $L_r$  in dB(A); (auf ganze dB gerundet)

Zugart	v [km/h]	L	Abstand					
			4 [m]	6 [m]	8 [m]	10 [m]	12 [m]	16 [m]
GTN	30	$L_{max,prog}$	49-57	45-52	40-47	38-45	35-43	31-36
GTN	45	$L_{max,prog}$	49-56	46-53	41-48	39-46	36-43	31-35
GTE	30	$L_{max,prog}$	50-59	50-57	41-48	42-50	40-47	29-37
GTE	45	$L_{max,prog}$	52-58	49-57	42-49	41-50	39-47	29-36
		$L_r$						
GTN/GTE	30	Tag	43	40	33	33	30	22
GTN/GTE	30	Nacht	37	34	27	27	24	16
GTN/GTE	45	Tag	42	40	34	33	30	21
GTN/GTE	45	Nacht	36	34	28	27	24	15

#### 4.5 Hinweis zur Rechengenauigkeit und zur Rundung

In diesem Bericht werden alle Pegelgrößen unter Berücksichtigung der Rundungsvorschriften in DIN 1333 (Februar 1992) auf ganze dB gerundet angegeben. Alle Berechnungen werden jedoch beim Rechnen von Hand mit einer Stelle hinter dem Komma und bei EDV-Berechnungen mit der vollen Rechengenauigkeit des verwendeten Rechenprogramms durchgeführt. Gerundet wird erst für die Ergebnisangabe im Bericht. Hierdurch ist sichergestellt, dass im Rahmen von Berechnungen keine zusätzlichen Rundungsfehler entstehen.

### 5 Beurteilung der prognostizierten Immissionssituation

#### 5.1 Vorbemerkung

Die folgende Beurteilung geht von den Bedingungen aus, welche bei der Ermittlung der Referenzspektren vorgelegen haben und berücksichtigen das derzeit bei der Straßenbahn Würzburg eingesetzte Wagenmaterial der Zugtype GTN und GTE. Der Streckenzustand bei den Referenzmessungen war ohne Auffälligkeiten. Die Referenzmessungen wurden bei Betrieb der auf der Strecke verkehrenden Regelzüge durchgeführt, auffällige Fahrzeuge wurden dabei am Messtag nicht beobachtet. Der Prognose liegen somit normale Betriebsverhältnisse zu Grunde.

Erfahrungsgemäß ergeben sich bei Prognoseberechnungen Immissionswerte, die in der Realität meist etwas unterschritten werden. Es wird jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Einhaltung der einschlägigen Anhaltswerte nicht ausschließt, dass die Zugfahrten als Erschütterungen spürbar wahrgenommen werden können bzw. als einzelne Schallereignisse zu hören sind. Dies gilt vor allem für die Zeiten mit sehr niedrigen Umgebungsgeräuschen.

#### 5.2 Erschütterungen

Es zeigt sich, dass Fahrten des Zugtyps GTN höhere Erschütterungen in den anliegenden Gebäuden verursacht als Fahrten des Zugtyps GTE, die Unterschiede bei unterschiedlichen Geschwindigkeitsbereichen sind eher gering.

Die Zugfahrten können in Abstandsbereichen bis ca. 20 m spürbar wahrgenommen, in den Bereichen mit Abständen bis zu 8 m sogar deutlich. Die Anhaltswerte für die Beurteilungsschwingstärke  $KB_{FT}$  werden auch für die kürzesten Abstände zu den Gleisen nur sehr gering überschritten. Ab einem Abstand von ca. 7 m können alle Anhaltswerte, auch für ein Wohngebiet nachts eingehalten werden.

#### 5.3 Sekundäre Luftschallimmissionen

##### 5.3.1 Beurteilung nach TA Lärm

Bei einer Beurteilung nach TA Lärm gemäß den Empfehlungen des LfU Bayern [8] kommt als maßgebendes Kriterium die Anforderung an den Maximalpegel nachts von 35 dB(A) zum Tragen.

Dieses Kriterium kann erst ab einem Abstand von > 16 m eingehalten werden.

### 5.3.2 Beurteilung in Anlehnung an die 24. BImSchV

Die Beurteilung in Anlehnung an die 24. BImSchV wird ausschließlich auf der Basis von Beurteilungspegeln durchgeführt. Der maßgebende Beurteilungspegel von 30 dB(A) für Schlafräume nachts kann ab einem Abstand von > 7 m eingehalten werden.

## 5.4 Weichen und Schienenkreuze

Weichen und Schienenkreuze existieren auf der gesamten Strecke nur bei dem Abzweig der Neubaustrecke von den bestehenden Strecken am Barbarossaplatz.

Die Schienenkreuze sind bei Straßenbahnen aus fahrtechnischen Gründen als Flachrillenkreuzungen ausgebildet. Bei Flachrillenkreuzungen fährt der Spurkranz in der Flachrille auf, was zu punktuellen stoßförmigen Erschütterungsemissionen führt. Eine verlässliche Prognose dieser Einwirkungen ist sehr schwierig, da hierfür eindeutige Referenzspektren zur Emissionsbeschreibung auf Grund lokaler Besonderheiten nur schwer zu ermitteln sind.

Erfahrungen aus einer Vielzahl von Verkehrsbetrieben zeigen jedoch, dass im Umfeld von Weichen und Schienenkreuze mit Flachrillen typischer Weise bis mindestens zu einem Abstand von 20 m mit Einwirkungen von Erschütterungen und sekundärem Luftschall zu rechnen ist, die über den Anforderungen an einen ausreichenden Immissionsschutz liegen, falls keine zusätzliche Maßnahmen zur Emissionsminderung vorgesehen werden.

## 6 Maßnahmen

Auf Grund der Prognoseberechnungen und der Untersuchungen der baulichen Strukturen zeigt sich, dass im Wesentlichen die sekundären Luftschallimmissionen zu Überschreitungen der anzusetzenden Anhaltswerten führen. Die Erstreckung der möglichen Konfliktbereiche ist dabei abhängig von den angewandten Regelwerken.

Maßnahmen zur Minderungen der Erschütterungen und der sekundären Luftschallimmissionen sind daher für alle Bereiche mit Abständen < 16 m bei Anwendung der TA Lärm gemäß den Empfehlungen des LfU Bayern und < 7 m bei Anlehnung an die 24. BImSchV, wie sie das Eisenbahnbundesamt für ihre Planungen heranzieht, vorzusehen.

Als mögliche und sinnvollste Maßnahmen kommen elastischen Abkopplungen des Gleisbereiches vom Untergrund in Form eines Masse Feder Systems in Frage.

Die A-bewerteten Emissionsspektren der Fahrzeuge weisen ihre Energiemaxima im Bereich der 40 Hz bis 80 Hz Terz auf. Maßnahmen, die durch eine elastische Abkopplung der Gleistragplatte eine deutliche Verminderung dieser Emissionen bewirken sollen, müssen daher zwischen 16 Hz und 20 Hz abgestimmt werden. Dies lässt sich mit einem vollflächig gelagerten Masse Feder System bewerkstelligen. Damit eine ausreichende Wirksamkeit dieser Maßnahme gewährleistet wird ist es wichtig, dass die zur Entkopplung vorgesehene Elastomerschicht nicht, wie häufig praktiziert, direkt auf dem Erdplanum sondern auf einer stabilen Betonplatte, bzw. einer zementverfestigten Tragschicht, verlegt wird.

Die Mehrkosten einer solchen Maßnahme ist stark abhängig von den baulichen Begebenheiten und Randbedingungen. Im Allgemeinen wird von Kostenansätzen zwischen 1000 € und 1500 € je Meter Gleis ausgegangen.

Im Einzelnen ist mit folgenden Streckenbereichen auszugehen, in Abhängigkeit von den angewandten Beurteilungskriterien, für die Maßnahmen benötigt werden:

### *Bewertung nach TA Lärm*

- Theaterstraße einschließlich Weichenbereiche am Barbarossaplatz; ca. 500 m beide Gleise
- Balthasar Neumann Promenade Bereich Hochschule für Musik und Bereich der Gebäude 8 bis 9; ca. 140 m beide Gleise
- Ottostraße; ca. 180 m beide Gleise
- Seiboldstraße; ca. 170 m beide Gleise
- Zeppelinstraße Bereich Gebäude 13 und Gebäude 1 bis 9; ca. 135 m beide Gleise
- Schlörstraße Schulbereich; ca. 50 m beide Gleise
- Zu Rhein Straße; ca. 240 m beide Gleise
- Trautenuerstraße Bereich zwischen Vogler- und Franz List Straße; ca. 60 m beide Gleise

Damit ergibt sich ein Bedarf von insgesamt 2950 Gleismeter Masse Feder Systeme. Bei oben genannten Kostenansatz ergeben sich damit Mehrkosten für Schutzmaßnahmen von ca. 2,95 Mio. bis 4,43 Mio. €

### *Bewertung in Anlehnung an die 24. BImSchV*

- Theaterstraße einschließlich Weichenbereiche am Barbarossaplatz; ca. 500 m beide Gleise
- Balthasar Neumann Promenade Bereich Hochschule für Musik ; ca. 80 m beide Gleise
- Ottostraße; ca. 180 m beide Gleise
- Seiboldstraße; ca. 170 m ein Gleis
- Zeppelinstraße Bereich Gebäude 13; ca. 45 m ein Gleis

Damit ergibt sich ein Bedarf von insgesamt 1735 Gleismeter Masse Feder Systeme. Bei oben genannten Kostenansatz ergeben sich damit Mehrkosten für Schutzmaßnahmen von ca. 1,74 Mio. bis 2,6 Mio. €

## 7 Zitierte Unterlagen

Diesem Bericht liegen zugrunde:

- [1] DIN 4150 Teil 1: Erschütterungen im Bauwesen, Vorermittlung von Schwingungsgrößen. Juni 2001
- [2] DIN 4150 Teil 2: Erschütterungen im Bauwesen, Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden. Juni 1999
- [3] VDI-Richtlinie 2057, Blatt 3; Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen, Beurteilung; Mai 1987 (zurückgezogen September 2002).
- [4] VDI-Richtlinie 2719: Schalldämmung von Fenstern und deren Zusatzeinrichtungen. August 1987
- [5] Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm - TA Lärm) vom 26. August 1998, GMBI 1998, Nr. 26, S. 503
- [6] Vierundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, 24. BImSchV - Verkehrswege-Schallschutzmaßnahmenverordnung
- [7] Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (16. BImSchV) vom 12. Juni 1990 (BGBl. I Nr. 27 vom 20.06.1990 S. 1036), zuletzt geändert am 19. September 2006 durch Artikel 3 des Ersten Gesetzes über die Bereinigung von Bundesrecht im Zuständigkeitsbereich des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BGBl. I Nr. 44 vom 30.09.2006 S. 2146)
- [8] Borgmann, R.; Schutz vor Erschütterungen und sekundärem Luftschall an Schienenverkehrswegen; Schriftenreihe des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz (LfU), Heft 147, 2001
- [9] Schall- und Erschütterungsschutz im Planfeststellungsverfahren für Landverkehrswege; BayLfU 2005-Ref.2/2 Stand: 08.2005
- [10] VDI-Richtlinie 2716: Luft- und Körperschall bei Schienenbahnen des öffentlichen Personennahverkehrs. März 2001
- [11] VDI-Richtlinie 3837 (Entwurf): Erschütterungen durch oberirdische Schienenbahnen; Spektrales Prognoseverfahren. Juni 2004
- [12] Würzburger Straßenbahn GmbH; Messtechnische Untersuchung zur Ermittlung von Referenzspektren für Erschütterungsprognosen an der Straßenbahnlinie in der Mergentheimer Straße; Müller-BBM Bericht Nr. M92 665/1 vom 13.04.2011
- [13] Würzburger Straßenbahn GmbH Pläne des Bauvorhabens Maßstab 1:500 Planstand 08/2010