

| | |
|--|-------|
| Unterlage | Nr. 1 |
| zum | |
| Planfeststellungsbeschluss | |
| vom 18.12.2019 | |
| Gz. VII-1 – 61-k-04 # 2.054g | |
| Wiesbaden, den 19.12.2019 | |
| Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen | |
| Im Auftrag | |




Ingenieri, Baudirektor

**Institut für Umweltschutz
und Bauphysik**

VMPA anerkannte Schallschutzprüfstelle für
Güteprüfungen nach DIN 4109 –
Messstelle nach § 29b BImSchG

Unterlage 01 C

Erläuterungsbericht Planänderung Tunnel

Anlage 2.2 Erschütterungstechnische Untersu- chung zur Bauphase des Riederwaldtunnels

Projekt: Neubau der BAB 66
(Frankfurt a. M. – Hanau)
Teilabschnitt Riederwaldtunnel

Auftraggeber: Hessen Mobil
Straßen- und Verkehrsmanagement
Dezernat BA 11 Bau Riederwaldtunnel
Westerbachstraße 73-79
60489 Frankfurt

Projekt-Nr.: 22623

Datum: 11.09.2017



DAkkS
Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-PL-20137-02-00

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Aufgabenstellung | 1 |
| 2 | Grundlagen zur erschütterungstechnischen Untersuchung | 2 |
| 2.1 | Beurteilungsgrundlagen | 4 |
| 2.1.1 | Erschütterungen bezogen auf den Menschen (DIN 4150 Teil 2) | 4 |
| 2.1.2 | Erschütterungen bezogen auf Gebäude (DIN 4150 Teil 3) | 7 |
| 2.1.3 | Sekundärer Luftschall | 9 |
| 2.2 | Prognoseberechnung..... | 11 |
| 2.2.1 | Emissionsermittlung Schienenverkehr..... | 14 |
| 2.2.2 | Emissionsermittlung Verbau von Spundbohlen | 14 |
| 2.2.3 | Verdichtungsarbeiten | 15 |
| 2.2.4 | Bohrungen..... | 16 |
| 3 | Beschreibung des Untersuchungsgebietes | 17 |
| 3.1 | Teilbereich 1: „Vatterstraße“ | 17 |
| 3.1.1 | Sonderfall Pestalozzischule / Kindertagesstätte | 17 |
| 3.1.2 | Sonderfall Kleingartengebiet..... | 18 |
| 3.2 | Teilbereich 2: „Am Erlenbruch“ | 18 |
| 3.3 | Teilbereich 3: „Borsigallee“ | 19 |
| 3.3.1 | Bereich Museumsarchive (Borsigallee 8) | 19 |
| 3.3.2 | Gewerblich und industriell genutzte Gebäude im Bereich der Borsigallee..... | 19 |
| 4 | Ermittlung der Erschütterungsemissionen und Einwirkbereiche | 21 |
| 4.1 | Stadtbahn | 21 |
| 4.2 | Verbau von Spundbohlen | 23 |
| 4.2.1 | Verbau mittels Einpressen | 23 |
| 4.2.2 | Sonderfall: Verbau mittels Schlagrammung..... | 25 |
| 4.3 | Verdichtungsarbeiten | 27 |
| 4.3.1 | Verdichtungen mittels Rüttelplatte bis maximal 0.5 t..... | 27 |
| 4.3.2 | Verdichtungen mittels kleiner Walze bis 3.0 t | 28 |
| 4.3.3 | Verdichtungen mit großer Walze bis 12.0 t..... | 30 |
| 4.4 | Bohrungen..... | 31 |
| 4.4.1 | Erstellen von Bohrpfählen | 31 |
| 4.4.2 | Ankerbohrungen..... | 32 |
| 5 | Beurteilung der Erschütterungsimmissionen in den einzelnen Bereichen | 34 |
| 5.1 | Teilbereich 1: „Vatterstraße“ | 34 |
| 5.1.1 | Sonderfall Pestalozzischule / Kindertagesstätte | 35 |
| 5.2 | Teilbereich 2: „Am Erlenbruch“ | 36 |
| 5.3 | Teilbereich 3: „Borsigallee“ | 37 |
| 6 | Schutzmaßnahmen | 39 |
| 7 | Messkonzept | 41 |

| | | |
|----------|-----------------------------------|-----------|
| 8 | Zusammenfassung | 43 |
| 9 | Literaturverzeichnis | 44 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-------------|---|----|
| Tabelle 1: | Anhaltswerte A gemäß DIN 4150, Teil 2 für die Beurteilung von Erschütterungsimmissionen in Wohnungen und vergleichbaren Räumen (für Neubaustrecken ohne Vorbelastung) | 5 |
| Tabelle 2: | Anhaltswerte nach DIN 4150-2 für die Beurteilung von Erschütterungen durch Baumaßnahmen im Tageszeitraum | 6 |
| Tabelle 3: | Anhaltswerte der DIN 4150 Teil 3, Tabelle 1 | 8 |
| Tabelle 4: | Anhaltswerte der DIN 4150 Teil 3, Tabelle 4 | 8 |
| Tabelle 5: | Aus der 24. BImSchV abgeleitete Anhaltswerte für sekundären Luftschall | 10 |
| Tabelle 6: | Aus der VDI 2719 abgeleitete Anhaltswerte für sekundären Luftschall | 10 |
| Tabelle 7: | Kenndaten Einpressen von Spundbohlen | 24 |
| Tabelle 8: | Kenndaten Schlagrammung von Spundbohlen | 26 |
| Tabelle 9: | Kenndaten Verdichtungsarbeiten mit Rüttelplatten | 27 |
| Tabelle 10: | Kenndaten Verdichtungsarbeiten mit kleinen Rüttelwalzen | 29 |
| Tabelle 11: | Kenndaten Verdichtungsarbeiten mit großen Rüttelwalzen | 30 |
| Tabelle 12: | Kenndaten Ankerbohrgeräte | 32 |

Formelverzeichnis

| | | |
|-----------|--|----|
| Formel 1: | Berechnung des Immissionspegels in Anlehnung an VDI 3837 | 11 |
| Formel 2: | Theoretische Berechnung der Amplitudenabnahme für Erschütterungen im Fernfeld | 12 |
| Formel 3: | Empirische Berechnung der Amplitudenabnahme für Erschütterungen im Fernfeld | 12 |
| Formel 4: | Grundformel zur Berechnung der Schwingschnelle im Abstand R zur Erschütterungsquelle | 12 |
| Formel 5: | Prognose der Schwingschnelle v [mm/s] im Abstand R [m] zur Erschütterungsquelle | 15 |
| Formel 6: | Grundformel zur Berechnung der Schwingschnelle [mm/s] im Abstand R [m] zur Verdichtungsmaschine mit dem Gewicht G in [t] | 15 |

Anhänge

| | |
|-----------|--|
| Anhang 1: | Relevante Bauleitplanung |
| Anhang 2: | Datenblätter Immissionsorte |
| Anhang 3: | Ergebnisse der Prognoseberechnung bauzeitliche Verlegung der Stadtbahn |
| Anhang 4: | Lageplanskizzen Erschütterungen |
| Anhang 5: | Immissionsschutzkonzept für die Archivgebäude an der Borsigallee 8 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--------------------|--|
| AMF | Archäologisches Museum Frankfurt („Steinhalle“) |
| A ₀ | oberer Anhaltswert im Sinne der DIN 4150-2 |
| A _r | Anhaltswert für die Beurteilungsschwingstärke |
| A _u | unterer Anhaltswert im Sinne der DIN 4150-2 |
| BAB | Bundesautobahn |
| BImSchG | Bundes-Immissionsschutzgesetz |
| BImSchV | Bundes-Immissionsschutz Verordnung zum BImSchG |
| DB | Deutsche Bahn AG |
| dB | Dezibel, bezogen auf Bezugsschwingschnelle (Erschütterungen) oder Bezugsdruck (Luftschall) |
| dB(A) | A bewerteter Luftschallpegel in Dezibel |
| DIN | Deutsches Institut für Normung e. V. |
| EG | Erdgeschoss |
| EN | Euro-Norm |
| FNP | Flächennutzungsplan |
| F _u | Fundament |
| GOK | Geländeoberkante |
| ISG | Institut für Stadtgeschichte |
| ISO | Internationale Organisation für Normung |
| KB _{Fmax} | maximale bewertete Schwingschnelle im Sinne der DIN 4150-2 |
| KB _{FTr} | Beurteilungsschwingstärke im Sinne der DIN 4150-2 |
| MWK | Museum für Weltkulturen |
| OG | Obergeschoss |
| SO | Schienenoberkante |
| ÜF | Übertragungsfunktion |
| VDI | Verein Deutscher Ingenieure |
| V _{max} | maximale Schwinggeschwindigkeit im Sinne der DIN 4150-3 |

1 Aufgabenstellung

Im Zuge des Neubaus der Bundesautobahn (BAB) 66 (Frankfurt a.M. – Hanau) sind im Teilbereich Riederwaldtunnel bauzeitlich teilweise erschütterungsintensive Arbeiten vorgesehen; weiterhin wird die Stadtbahn bauzeitlich verlegt.

Im Bereich des geplanten Baufeldes befinden sich u.a. mehrere Wohngebäude, denkmalgeschützte Bauwerke und Museumsarchive.

Im Rahmen der erschütterungstechnischen Untersuchung wird auf der Grundlage von Literaturwerten und Messergebnissen eine Prognose erstellt, um die Auswirkungen der erschütterungsintensiven Arbeiten abschätzen zu können.

Die Beurteilung der prognostizierten Schwinggeschwindigkeiten findet anhand der einschlägigen Regelwerke statt:

- DIN 4150 Teil 2 (Einwirkungen auf den Menschen in Gebäuden) [6]
- DIN 4150 Teil 3 (Einwirkungen auf bauliche Anlagen) [7].
- Sekundärer Luftschall nach VDI 2719 [9] und 24. BImSchV [8]

Für die im Untersuchungsgebiet befindlichen Archivgebäude mehrerer Museen, in denen teilweise wertvolle und/ oder fragile Objekte gelagert werden, sind keine Regelwerke bekannt, nach denen eine Beurteilung der Erschütterungen erfolgen könnte, sodass hierfür anhand von Messungen ein Immissionsschutzkonzept erstellt wurde (siehe Anhang 5).

Um die Beeinträchtigung der Anwohner durch das Bauvorhaben zu verringern sind bereits folgende Schutzmaßnahmen berücksichtigt worden:

- Die Bauarbeiten werden ausschließlich zwischen 7:00 und 20:00 Uhr und damit vollständig im Tageszeitraum der DIN 4150-2 durchgeführt.
- Die tägliche Betriebszeit erschütterungsintensiver Baumaschinen wird auf acht Stunden am Tag begrenzt.
- Es wird auf weitestgehend emissionsarme Verfahren zurückgegriffen.

Bei dieser Untersuchung werden die direkten Erschütterungseinwirkungen auf Gebäude beurteilt.

2 Grundlagen zur erschütterungstechnischen Untersuchung

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

Zur Beurteilung der Erschütterungsimmissionen existieren keine gesetzlichen Regelwerke. Üblicherweise sind folgende Normen bzw. Vorschriften anzuwenden:

- DIN 4150-2 (Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden) [6]
- DIN 4150-3 (Einwirkungen auf bauliche Anlagen) [7]

Zur Beurteilung des durch sekundären Luftschall hervorgerufenen Rauminnenpegels gibt es keine gesetzlichen Grenzwerte. Aus folgenden Regelwerken kann jedoch ein zulässiges Maß für Immissionen des sekundären Luftschalls abgeleitet werden:

- 24. BImSchV (Verkehrswege-Schallschutzmaßnahmen Verordnung) bzgl. des passiven Schallschutzes bei Straßen Schienenwegen [8]
- VDI-Richtlinie 2719 (Schalldämmung von Fenstern und deren Zusatzeinrichtungen) [9]

Die Erschütterungsprognose für die bauzeitliche Verlegung der Stadtbahn erfolgt anhand der DB-Richtlinie 820.2050 [16].

Für die Erschütterungsprognose von Bauverfahren gibt es keine vorgeschriebenen Verfahren. Ein sachgerechtes Verfahren zur Prognose solcher Erschütterungen ist die Herleitung der Stärke der Erschütterungsemissionen aus Kennwerten der erschütterungsintensiven Arbeitsgeräte (z.B. Gewicht, Leistung, Arbeitsfrequenz, etc.).

Die Ausbreitung der Erschütterungen im Erdboden ist von den Eigenschaften der Erschütterungsquelle, den Bodeneigenschaften und dem Abstand zur Erschütterungsquelle abhängig. Das heißt auch, dass sich je nach Ausdehnung der Erschütterungsquelle, Art der Anregung, sowie durch Bodenschichtung und Position der Anregung die Übertragungseigenschaften des Bodens in gewissem Maß verändern können. Die Übertragungseigenschaften des Erdbodens sind frequenzabhängig, wobei in der Regel tiefe Frequenzen eine geringere Dämpfung als hohe Frequenzen erfahren.

Die in den beurteilungsrelevanten Gebäudeteilen auftretenden Schwingungen hängen maßgeblich von den Gebäudeeigenschaften und den Wechselwirkungen zwischen Gebäude und Erdboden ab.

Zur Prognose der Erschütterungsimmissionen wird auf nachfolgend aufgeführte Literatur Bezug genommen:

- Melke 1992 (Durchführung von Immissionsprognosen für Schwingungs- und Körperschalleinwirkungen) [10]

- Melke 1995 (Erschütterungen und Körperschall des landgebundenen Verkehrs) [11]
- DIN 4150-1 Vorermittlung von Schwingungsgrößen [5]
- Rockhill 2003 (Ground-borne vibrations due to press-in piling operations) [12]
- Said 2003 (Spektrale Korrelationsfunktionen zur Ermittlung des sekundären Luftschalls aus dem Schienenverkehr) [13]
- Said et al. 2006 (Ermittlung des sekundären Luftschalls aus dem Schienenverkehr) [24]
- Achmus et al. 2006 (Bauwerkserschütterungen durch Tiefbauarbeiten) [14]
- VDI 3837 (Erschütterungen in der Umgebung von oberirdischen Schienenverkehrswegen, Spektrales Prognoseverfahren) [15]
- DB Richtlinie 820.2050 (Erschütterungen und sekundärer Luftschall) [16]

Zur Prognose und Beurteilung der erschütterungstechnischen Situation liegen weiterhin folgende projektspezifische Unterlagen vor:

- Ortsbesichtigungen vom 18.07.2016 durchgeführt von Obermeyer Planen + Beraten
- Erschütterungsmessungen vom Mai und August 2016, durchgeführt von Obermeyer Planen+ Beraten (siehe Anhänge 1 und 2)
- Erschütterungsmessungen während der Proberammungen aus den Jahren 2013 und 2014, durchgeführt vom Ingenieurbüro Schütz [17]
- Bebauungs- und Flächennutzungspläne der Stadt Frankfurt (siehe Anhang 1)
- Auszug aus dem Geoinformationssystem (Stadtgrundkarte) der Stadt Frankfurt, © Stadtvermessungsamt Frankfurt a.M. von 2011
- Bauablaufplanung, Stand September 2016, bereitgestellt durch Hessen Mobil (siehe Unterlage 01 C, Anlage 2.1, Anhang 2)
- IVL- und CAD-Pläne Stand August 2016, bereitgestellt durch Hessen Mobil
- Zugzahlen der VGF vom Dezember 2016 (siehe Anhang 3)

In Kapitel 2.1 werden die Beurteilungsgrundlagen näher beschrieben. In Kapitel 2.2 werden die Grundlagen zur Prognoseberechnung aufgeführt. Die Darstellung der Prognoseberechnung unter Berücksichtigung der projektspezifischen Rahmenbedingungen erfolgt in Kapitel 4. In Kapitel 3 werden die örtlichen Gegebenheiten beschrieben.

2.1 Beurteilungsgrundlagen

In den nachfolgenden Kapiteln werden die einschlägigen Regelwerke zur Beurteilung der Erschütterungseinwirkungen auf Menschen in Gebäuden bzw. auf die Gebäude selbst vorgestellt. Weiterhin wird auf den Beurteilungsmaßstab für den sekundären Luftschall eingegangen.

2.1.1 Erschütterungen bezogen auf den Menschen (DIN 4150 Teil 2)

Grundlage zur Beurteilung von Erschütterungen in Bezug auf den Menschen sind KB-Werte (bewertete Schwingschnelle). Der $KB_{F,max}$ -Wert ist die maximale bewertete Schwingstärke, die „während der jeweiligen Beurteilungszeit (einmalig der wiederholt) auftritt und der zu untersuchenden Ursache zuzuordnen ist.“ Die KB-Werte sind am Fußboden eines (Wohn)raumes zu ermitteln und dann mit Anhaltswerten aus der DIN 4150-2 verglichen.

Liegen die Erschütterungen stets unter dem unteren Anhaltswert (A_U), so sind die Anforderungen der DIN 4150-2 eingehalten. Liegt mindestens ein $KB_{F,max}$ -Wert über dem A_U wird im Falle von Bauerschütterungen und Erschütterungen aus dem Schienenverkehr) die Beurteilungsschwingstärke ($KB_{F,Tr}$) ermittelt. Bei der Bildung des $KB_{F,Tr}$ werden Häufigkeit, Dauer und Intensität der Erschütterungen berücksichtigt. Im Fall von Bauerschütterungen spielt es weiterhin eine Rolle, ob die Erschütterungen während der Ruhezeiten erfolgt sind (werktags 6 bis 7 Uhr und 19 bis 22 Uhr).

Für die erschütterungstechnische Beurteilung sind der Schienenverkehr und baubedingte Erschütterungen gemäß Punkt 6.5 der DIN 4150-2 getrennt zu betrachten.

Gemäß Punkt 1 (Anwendungsbereich) der DIN 4150-2 „[...] werden Anforderungen und Anhaltswerte genannt, bei deren Einhaltung erwartet werden kann, daß in der Regel erhebliche Belästigungen von Menschen in Wohnungen und vergleichbar genutzten Räumen vermieden werden. [...]“. Zur Schutzbedürftigkeit von Schulen, Menschen am Arbeitsplatz (wie z.B. in Büroräumen) und von Kleingärten wird keine Aussage getroffen.

Erschütterungen aus dem Schienenverkehr:

In Tabelle 1 der DIN 4150-2 werden Anhaltswerte für Erschütterungsimmissionen genannt.

| Zeile | Einwirkungsort | Tags | | Nachts | |
|---|---|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | A _u | A _r | A _u | A _r |
| 1 | Einwirkungsorte, in deren Umgebung nur gewerbliche Anlagen und gegebenenfalls ausnahmsweise Wohnungen für Inhaber und Leiter der Betriebe sowie für Aufsichts- und Bereitschaftspersonen untergebracht sind (vergleiche Industriegebiete BauNVO, § 9) | 0,4 | 0,2 | 0,3 | 0,15 |
| 2 | Einwirkungsorte, in deren Umgebung gewerbliche Anlagen untergebracht sind (vergleiche Gewerbegebiete BauNVO, § 8) | 0,3 | 0,15 | 0,2 | 0,1 |
| 3 | Einwirkungsorte, in deren Umgebung weder vorwiegend gewerbliche Anlagen noch vorwiegend Wohnungen untergebracht sind (vergleiche Kerngebiete BauNVO, § 7, Mischgebiete BauNVO, § 6, Dorfgebiete BauNVO, § 5) | 0,2 | 0,1 | 0,15 | 0,07 |
| 4 | Einwirkungsorte, in deren Umgebung vorwiegend oder ausschließlich Wohnungen untergebracht sind (vergleiche reines Wohngebiet BauNVO, § 3, allgemeine Wohngebiete BauNVO, § 4, Kleinsiedlungsgebiete BauNVO, § 2) | 0,15 | 0,07 | 0,1 | 0,05 |
| 5 | Besonders schutzbedürftige Einwirkungsorte, z.B. in Krankenhäusern, Kurkliniken, soweit sie in dafür ausgewiesenen Sondergebieten liegen | 0,1 | 0,05 | 0,1 | 0,05 |
| In Klammern sind jeweils die Gebiete der BauNVO angegeben, die in der Regel den Kennzeichnungen unter Zeile 1 bis 4 entsprechen. Eine schematische Gleichsetzung ist jedoch nicht möglich, da die Kennzeichnung unter Zeile 1 bis 4 ausschließlich nach dem Gesichtspunkt der Schutzbedürftigkeit gegenüber Erschütterungseinwirkungen vorgenommen ist, die Gebietseinteilung in der BauNVO aber auch anderen planerischen Erfordernissen Rechnung trägt. | | | | | |

Tabelle 1: Anhaltswerte A gemäß DIN 4150, Teil 2 für die Beurteilung von Erschütterungsimmissionen in Wohnungen und vergleichbaren Räumen (für Neubaustrecken ohne Vorbelastung)

In Absatz 6.5 der DIN 4150, Teil 2 werden Regelungen für unterschiedliche Erschütterungsverursacher getroffen, in Abs. 6.5.3 wird die Beurteilung der Erschütterungsimmissionen durch Schienenverkehr beschrieben. Die oberen Anhaltswerte A_o erhalten beim Schienenverkehr eine andere Bedeutung, siehe Abs. 6.5.3.1 - 6.5.3.4 der Norm.

Nach Absatz 6.5.3.1 sind Einwirkungen in Ruhezeiten nicht zusätzlich zu gewichten. Nach Absatz 6.5.3.3 gelten für den ÖPNV die um den Faktor 1.5 angehobenen Werte der Tabelle 1 der DIN 4150-2.

Erschütterungen aus Bauarbeiten:

Erschütterungseinwirkungen auf den Menschen während der Bauphase sind nach DIN 4150-2 [6] Abschnitt 6.5.4 zu beurteilen.

Für Baumaßnahmen im Tageszeitraum werden grundsätzlich höhere Anhaltswerte zugelassen als nach Tabelle 1 der DIN 4150-2. Die Häufigkeit des Auftretens von einzelnen KB_{Fmax}-Spitzen (bewertete Schwingschnelle) ist maßgeblich für deren zulässige Höhe. Je mehr Tage die Erschütterungseinwirkungen andauern, desto geringer sind die zulässigen Anhaltswerte. Tage, an denen die baubedingten

Erschütterungen unter dem A_U oder unter dem A_r der Tabelle 1 der DIN 4150-2 liegen sind dabei nicht mitzuzählen. Da es i.d.R. nicht während der gesamten Bauzeit zu erschütterungsintensiven Arbeiten kommt, unterscheiden sich somit auch die Beurteilungsdauer nach DIN 4150-2 und die tatsächliche Bauzeit.

Die DIN 4150-2 unterscheidet drei Beurteilungsdauern für Bauerschütterungen:

- $D \leq 1$ Tag (mit Abstufung bis 6 Tage)
- > 6 und ≤ 26 Tage
- > 26 und ≤ 78 Tage

| Anhaltswert | $D \leq 1$ Tag | | | 6 Tage $< D \leq 26$ Tage | | | 26 Tage $< D \leq 78$ Tage | | |
|-------------|----------------|----------|-------|---------------------------|----------|-------|----------------------------|----------|-------|
| | A_U | $A_0^*)$ | A_r | A_U | $A_0^*)$ | A_r | A_U | $A_0^*)$ | 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 $A_0 = 6$

Tabelle 2: Anhaltswerte nach DIN 4150-2 für die Beurteilung von Erschütterungen durch Baumaßnahmen im Tageszeitraum

Für länger einwirkende Bauerschütterungen macht die DIN 4150-2 keine Angaben. Es sollte „nach den besonderen Gegebenheiten des Einzelfalls individuell beurteilt werden“.

Die in Tabelle 2 aufgeführten Anhaltswerte ergeben sich nicht nur in Abhängigkeit der Dauer, sondern auch gemäß den genannten (Informations-)Stufen:

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 4150-2:

- 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 4150-2 einzuhalten.

2.1.2 Erschütterungen bezogen auf Gebäude (DIN 4150 Teil 3)

Die Einwirkungen von Erschütterungen auf bauliche Anlagen werden in der DIN 4150-Teil 3 [7] behandelt. Es werden Anhaltswerte genannt, bei deren Einhaltung nicht mit Schäden im Sinne einer Gebrauchswertminderung von Gebäuden oder Gebäudeteilen zu rechnen ist.

Es wird hierbei zwischen kurzzeitigen Erschütterungen und Dauererschütterungen auf Bauwerke unterschieden.

Kurzzeitige Erschütterungen:

Kurzzeitige Erschütterungen im Sinne der DIN 4150-3 sind „Erschütterungen, deren Häufigkeit des Auftretens **nicht** ausreicht um Materialermüdungserscheinungen hervorzurufen, und deren zeitliche Abfolge und Dauer **nicht** geeignet ist, um in der betroffenen Struktur eine wesentliche Vergrößerung der Schwingungen durch Resonanzerscheinungen zu erzeugen“. Bei kurzzeitigen Erschütterungen ist nicht mit Gebäudeschäden zu rechnen, wenn an Wohn- und Bürogebäuden oder in der Nutzung entsprechenden Bauten folgende maximale Schwinggeschwindigkeiten an Fundament oder der obersten Deckenebene nicht überschritten werden:

| Zeile | Gebäudeart | Anhaltswerte für die Schwinggeschwindigkeit v in mm/s | | | | |
|-------|---|---|-----------|------------|---|-----------------------------|
| | | Fundament Frequenz | | | Oberste Deckenebene, horizontal $i = x, y$ | Decken, vertikal $i = z$ |
| | | 1 -10 Hz | 10 -50 Hz | 50 -100 Hz | alle Frequenzen | alle Frequenzen |
| 1 | Gewerblich genutzte Gebäude, Industriebauten und ähnlich strukturierte Bauten | 20 | 20 bis 40 | 40 bis 50 | 40 | 20 |
| 2 | Wohngebäude und in ihrer Konstruktion oder Nutzung gleichartige Gebäude | 5 | 5 bis 15 | 15 bis 20 | 15 | 20 |
| 3 | Bauten, die wegen ihrer besonderen Erschütterungsempfindlichkeit nicht denen nach Zeile 1 und Zeile 2 entsprechen und besonders erhaltenswert (z.B. unter Denkmalschutzstehend) sind | 5 | 5 bis 15 | 15 bis 20 | 15 | 20 |

Tabelle 3: Anhaltswerte der DIN 4150 Teil 3, Tabelle 1

Dauererschütterungen:

Dauererschütterungen sind alle Erschütterungen, auf die die Definition der kurzzeitigen Erschütterungen nicht zutrifft. Es ist nicht mit Gebäudeschäden im Sinne der DIN 4150-3 (Gebrauchswertminderung) zu rechnen, wenn an Wohn- und Bürogebäuden oder in der Nutzung entsprechenden Bauten folgende maximale Schwinggeschwindigkeiten nach Tabelle 4 der DIN 4150-3 nicht überschritten werden:

| Zeile | Gebäudeart | Anhaltswerte für die Schwinggeschwindigkeit v in mm/s | |
|-------|---|---|-----------------------------|
| | | Oberste Deckenebene, horizontal $i = x, y$ | Decken, vertikal $i = z$ |
| | | alle Frequenzen | alle Frequenzen |
| 1 | Gewerblich genutzte Gebäude, Industriebauten und ähnlich strukturierte Bauten | 10 | 10 |
| 2 | Wohngebäude und in ihrer Konstruktion oder Nutzung gleichartige Gebäude | 5 | 10 |
| 3 | Bauten, die wegen ihrer besonderen Erschütterungsempfindlichkeit nicht denen nach Zeile 1 und Zeile 2 entsprechen und besonders erhaltenswert (z.B. unter Denkmalschutzstehend) sind | 2,5 | 10 |

Tabelle 4: Anhaltswerte der DIN 4150 Teil 3, Tabelle 4

Die Werte sind so bemessen, dass sich für Wohngebäude bereits eine Gebrauchswertminderung ergibt, wenn kleine Risse im Putz auftreten, oder vorhandene Risse sich vergrößern.

2.1.3 Sekundärer Luftschall

Durch Körperschallübertragung bzw. -anregung der Raumbegrenzungsflächen kann in Gebäuden sogenannter „sekundärer Luftschall“ entstehen und einen u.U. nicht zu vernachlässigenden Anteil am gesamten Innenraumpegel hervorrufen. Im Vergleich zum üblichen Bau- oder Verkehrslärm handelt es sich beim sekundären Luftschall um ein Geräusch, das von allen Raumbegrenzungsflächen abgestrahlt wird. Dies führt dazu, dass der sekundäre Luftschall nicht richtungsorientiert hörbar ist und im Vergleich zum üblichen Grundgeräusch als tieffrequent einzustufen ist (gemäß DB-Richtlinie 820.2050 [16] nur Terzbänder $\leq 100\text{Hz}$).

Dieser Effekt kann vor allem dort zu Belästigungen führen, wo der primäre Luftschall (Direktschall), der durch die Außenhaut des Gebäudes nach innen dringt, eine geringe Rolle spielt. Das kann z.B. in Räumen zutreffen, die eine besonders hohe Schalldämmung haben oder sich in einem der Erschütterungs- bzw. Geräuschquelle abgewandten Gebäudeteil befinden. Zur Beurteilung des sekundären Luftschalls fehlen gesetzliche Regeln und Grenzwerte. Analog zum primären Luftschall wird davon ausgegangen, dass eine Beurteilung nicht nur von dem prognostizierten Rauminnenpegel, sondern auch von der Art des Verursachers (z.B. Gewerbe, Bau, Verkehr) des sekundären Luftschalls abhängig ist. Im Folgenden wird zwischen dem durch Schienenverkehr und dem durch Bauarbeiten verursachten sekundären Luftschall unterschieden.

Schienenverkehr

Zur Beurteilung des sekundären Luftschalls aus dem Schienenverkehr fehlen gesetzliche Regeln und Grenzwerte. Bis zur Festlegung gesetzlich verbindlicher Grenzwerte kommt als Anhaltspunkt für die Beurteilung des sekundären Luftschalls die 24. BImSchV [8] in Betracht, welche sich in ihrer Gültigkeit auf von Verkehrsgeräuschen verursachte Innengeräuschpegel bezieht.

In der 24. BImSchV wird nur der Mittelungspegel bewertet. Da diese ein für die Beurteilung von Verkehrslärm in Innenräumen geschaffenes Regelwerk ist, wird sie hier als geeignete Beurteilungsgrundlage angesehen. Dieses Vorgehen wurde in zahlreichen Planfeststellungsverfahren angewandt und von der Rechtsprechung nicht beanstandet z.B. [18], [19].

Aus der 24. BImSchV lassen sich folgende Anhaltswerte für den Mittelungspegel ableiten, anhand deren der sekundäre Luftschall für die bauzeitliche Verlegung der Stadtbahn beurteilt wird:

| | |
|-----------------|-------------------------------------|
| in Wohnräumen | 40 dB(A) am Tag (6-22 Uhr) |
| in Schlafräumen | 30 dB(A) in der Nacht (22-6 Uhr) |

Tabelle 5: Aus der 24. BImSchV abgeleitete Anhaltswerte für sekundären Luftschall

Baumaßnahmen

Da die 24. BImSchV sich ausschließlich auf Verkehrslärm bezieht, wird sie zur Beurteilung des sekundären Luftschalls aus dem Betrieb von Baustellen als ungeeignet angesehen.

Die TA-Lärm [3] nennt unabhängig von der Gebietsnutzung Immissionsrichtwerte für schutzbedürftige Immissionsorte innerhalb von Gebäuden. Allerdings ist die TA-Lärm gemäß Punkt 1 f) ausdrücklich nicht auf Baustellen anzuwenden.

Die Richtwerte der AVV Baulärm [2] sind lediglich für den Außenbereich gültig (0.5m vor dem geöffneten Fenster). Bei der Beurteilung des „Primärschalls“ aus Baulärm hängt der Innenpegel maßgeblich von dem außen anliegenden Beurteilungspegel und dem Schalldämmmaß der Fassade ab.

Die VDI-Richtlinie 2719 [9], welche sich mit dem Schalldämmung von Fenstern und deren Zusatzeinrichtung beschäftigt, werden in Tabelle 6 der VDI 2719 Anhaltswerte für maximale und mittlere Innenschallpegel in Abhängigkeit von der Raum- und Gebietsnutzung genannt. Diese werden im Folgenden zur Beurteilung des sekundären Luftschalls aus Baumaßnahmen herangezogen. Diese Vorgehensweise wurde von der aktuellen Rechtsprechung nicht beanstandet [20].

| Zeile | Raumart und Gebietsnutzung | Mittelungspegel [dB(A)] | Mittlere Maximalpegel [dB(A)] |
|-------|---|-------------------------|-------------------------------|
| 1.1 | Schlafräume (nachts) in reinen und allgemeinen Wohngebieten, Krankenhaus und Kurgebieten | 25 bis 30 | 35 bis 40 |
| 1.2 | Schlafräume (nachts) in allen übrigen Gebieten | 30 bis 35 | 40 bis 45 |
| 2.1 | Wohnräume (tags) in reinen und allgemeinen Wohngebieten, Krankenhaus und Kurgebieten | 30 bis 35 | 40 bis 45 |
| 2.2 | Wohnräume(tags) in allen übrigen Gebieten | 35 bis 40 | 45 bis 50 |
| 3.1 | Unterrichtsräume (tags), ruhebedürftige Einzelbüros, wissenschaftliche Arbeitsräume, Bibliotheken, Arztpraxen, Operationsräume, Kirchen und Aulen | 30 bis 40 | 40 bis 50 |
| 3.2 | Büros für mehrere Personen (tags) | 35 bis 45 | 45 bis 55 |
| 3.3 | Großraumbüros, Gaststätten, Schallerräume, Läden (tags) | 40 bis 50 | 50 bis 60 |

Tabelle 6: Aus der VDI 2719 abgeleitete Anhaltswerte für sekundären Luftschall

Da die Baumaßnahmen und gerade die Einwirkungen durch sekundären Luftschall zeitlich begrenzt und nicht dauerhaft sind, erscheint es angemessen, dass jeweils der höhere Anhaltswert zur Beurteilung des sekundären Luftschalls aus Baumaßnahmen

herangezogen wird. Die Beurteilung im Nachtzeitraum entfällt, da keine Bauarbeiten im Nachtzeitraum stattfinden.

2.2 Prognoseberechnung

Bei der Prognoseberechnung ist es in Anlehnung an VDI 3837 [15] zweckmäßig, zwischen Emissions-, Transmissions- und Immissionssystem zu unterteilen. Die Immissionen können demnach wie folgt berechnet werden:

$$L_{v,Raum}(f) = L_E(f) + L_B(f) + L_{G1}(f) + L_{G2}(f) + L_M(f)$$

Formel 1: Berechnung des Immissionspegels in Anlehnung an VDI 3837

Mit $L_{v,Raum}$ als Immissionspegel, L_E als Emissionspegel, L_B als boden- und abstandsbedingte Pegeldifferenz, L_{G1} als Übertragungsfunktion zwischen Erdboden und Gebäudefundament, L_{G2} als Übertragungsfunktion vom Gebäudefundament zu den Geschossdecken und L_M als Pegeldifferenz durch Schutzmaßnahmen. Die Berechnung ist spektral für die jeweiligen Terzmittenfrequenzen (f) durchzuführen.

Nachfolgend werden Grundlagen genannt, wie die einzelnen Teile der obigen Gleichung ermittelt werden können.

Erschütterungen – maximale Schwingschnelle im Freifeld (L_E und L_B)

Gemäß Bild 1 der DIN 4150-1 [5] wird die geometrische Abnahme der Schwingungsamplitude vor allem durch drei Faktoren beeinflusst:

- Geometrie der Quelle (Punkt- oder Linienquelle)
- Art der Anregung (impulsartig oder harmonisch/ stationär)
- Wellenart (Raumwelle oder Oberflächenwelle)

Hierbei wäre z.B. ein langes, schwingendes Fundament eher als Linienquelle einzustufen, wohingegen die erschütterungsintensiven Bauarbeiten i.d.R. als Punktquelle anzusehen sind. Beispiele für impulsartige Erschütterungsquellen sind fallende Massen oder Schlagrammen mit einer ausreichenden Abklingzeit zwischen den Schlägen. Typische stationäre Quellen sind Verdichtungsmaschinen (Rüttler oder Walze) oder Vibrationsrammen. Neben den genannten Anregungsarten kommen z.B. beim Anfahren oder unregelmäßigem Betrieb von Geräten auch Übergangsschwingungen (transiente Schwingungen) vor.

Zusätzlich zur geometrischen Abnahme der Schwingungsamplitude spielt die Materialdämpfung des Bodens eine Rolle. Die Dämpfungseigenschaften des Erdbodens sind frequenzabhängig, wobei in der Regel tiefe Frequenzen eine geringere Dämpfung als hohe Frequenzen erfahren. Die Dämpfung wird durch den Abklingkoeffizienten bestimmt.

Nach DIN 4150-1 [5] kann die Abnahme der Amplitude im Fernfeld mit Formel 2 berechnet werden, wobei der erste Teil der Formel die geometrische Abnahme beschreibt und der zweite Teil die Materialdämpfung.

$$v_2 = v_1 \cdot \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^{-n} \cdot e^{-\alpha(R_2-R_1)}$$

Formel 2: Theoretische Berechnung der Amplitudenabnahme für Erschütterungen im Fernfeld

Mit der Schwingschnelle v in [mm/s], dem Abstand R in [m], dem Exponenten der geometrischen Ausbreitung n (ohne Einheit) [] und dem Abklingkoeffizienten α in [1/m].

Im Nahfeld können sich aufgrund der Wellencharakteristik von Körperschall große Abweichungen zwischen der berechneten und tatsächlich vorhandenen Amplitude ergeben.

Bei stark inhomogenen Böden oder bei einer messtechnischen Ermittlung der Ausbreitungsdämpfung kann die Berechnung nach Melke [10] wie folgt zusammengefasst werden:

$$v_2 = v_1 \cdot \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^{-m}$$

Formel 3: Empirische Berechnung der Amplitudenabnahme für Erschütterungen im Fernfeld

Im vorliegenden Fall wurden an mehreren Querschnitten Ausbreitungsmessungen durchgeführt, wobei die Anregung durch eine 1.5 t - Tandemwalze an der Erdoberfläche erfolgt ist [26].

Achmus et al. [14] haben für verschiedene erschütterungsintensive Bauarbeiten Formeln zur Berechnung der Schwinggeschwindigkeit in Abhängigkeit des Abstands und der eingetragenen Schwingenergie zusammengestellt. Hierbei werden zahlreiche Literaturwerte vorgestellt und mit eigenen Messergebnissen verglichen. Zusammenfassend lässt sich dies mithilfe von Formel 4 beschreiben:

$$v = k \cdot \frac{\sqrt{E}}{R^m}$$

Formel 4: Grundformel zur Berechnung der Schwingschnelle im Abstand R zur Erschütterungsquelle

mit der Schwingschnelle v in [mm/s], dem Abstand zur Erschütterungsquelle R in [m], dem Schwingungsenergieeintrag E in [kJ], dem dimensionslosen Ausbreitungskoeffizienten m , und der dimensionslosen Konstanten K , welche von der Bodenart und der Erschütterungsquelle abhängig ist.

Achmus et al. machen verschiedene Vorschläge, wie aus üblichen Gerätekenndaten die eingeleitete Schwingungsenergie abgeleitet werden kann. Der Ausbreitungskoeff-

fizient liegt je nach Literatur und Bauverfahren zwischen 0.5 und 1.5, meistens jedoch bei 1.0. Die Konstante K ist ebenfalls vom Boden und Bauverfahren abhängig und weist eine insbesondere bei Rammarbeiten eine große Streuung zu den vorgeschlagenen Werten auf.

Neben der theoretischen Ermittlung von Erschütterungsemissionen können die Erschütterungsemissionen auch durch eine messtechnische Erfassung erfolgen. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass gemessene Emissionswerte nur unter vergleichbaren Bedingungen zwischen Mess- und Prognosesituation Verwendung finden können. Im Fall der Bauarbeiten ist dies zum derzeitigen Planungsstand nicht möglich, da noch nicht detailliert festgelegt werden kann, welche Baumaschinen tatsächlich eingesetzt werden und nicht sicher ist, welche Wechselwirkungen zwischen der jeweiligen Maschine und dem Baugrund auftreten. Im vorliegenden Fall wurde die messtechnische Emissionsermittlung nur für die Stadtbahn angewandt, da während der Bauzeit die gleichen Zugtypen und Zuglängen bei gleichem, oder zumindest vergleichbarem Oberbau eingesetzt werden.

Es ist anzumerken, dass nach Melke (Seite 9-7) [10] mit Prognoseunsicherheiten von bis zu 300 % zu rechnen ist, wenn ausschließlich theoretische Daten vorliegen. Selbst bei einer umfassenden messtechnischen Erfassung der Gebäudeeigenschaften, Ausbreitungsbedingungen und Emissionen wird die Prognosesicherheit mit einem Fehler von 50 % angegeben. Da für die Vorliegende Untersuchung vor allem die Emissionsansätze, aber auch die Berücksichtigung der Gebäudeeigenschaften und Ausbreitung im Erdboden eher konservativ, also mit geringer Überschreitungswahrscheinlichkeit gewählt werden, ist davon auszugehen, dass die den tatsächlichen Immissionen in der Regel geringer ausfallen werden als die im Rahmen der Prognose berechneten Schwinggeschwindigkeiten.

Erschütterungen – Gebäudeübertragungsfunktion (L_{G1} und L_{G2})

Die Übertragungsfunktionen von Gebäuden sind nach Melke [10] in gewissem Maß von der Art und Position der Erschütterungsquelle abhängig. Da im Rahmen der Voruntersuchungen [26] nur eine stichprobenartige Ermittlung der Gebäudeeigenschaften stattfinden konnte, wird auf die empirisch ermittelten Gebäudeübertragungsfunktionen in Abhängigkeit von der Deckenbauart und der maßgeblichen Resonanzfrequenz entsprechend der DB-Richtlinie 820-2050A02 [16] zurückgegriffen. Für den Schienenverkehr wird eine spektrale Berechnung nach DB-Richtlinie [16] durchgeführt, bei den Baumaßnahmen, wird jeweils die der ungünstigste Fall (resonante Anregung) bei der voraussichtlich maßgeblichen Arbeitsfrequenz ermittelt.

Erschütterungen – Bewertete Schwingstärke (KB_{Fmax} und KB_{FTR})

Die Berechnung der zeitlich und frequenzabhängig bewerteten Schwingschnelle aus Messsignalen erfolgt entsprechend den Festlegungen der DIN 45669-1 [21], auf die auch die DIN 4150-2 Bezug nimmt. Da bei der Prognoseberechnung für Bauerschütterungen die spektrale Verteilung der Immissionen nicht bekannt ist, sondern maximale Schwingschnellen prognostiziert werden, erfolgt die Ermittlung der KB-Werte nach dem empirischen Verfahren laut DIN 4150-2, Punkt 7.

Sekundärer Luftschall

Die messtechnische Ermittlung des sekundären Luftschalls ist derzeit nicht eindeutig geregelt und im Fall des Schienenverkehrs nur bei unterirdischen Zugstrecken mit vertretbarem Aufwand durchführbar. Das hier angewendete Prognoseverfahren beruht auf den (spektralen) Körperschallschnelle-Pegeln, welche physikalisch mit dem Abstrahlgrad der Raumbegrenzungsflächen verbunden sind.

Die Ermittlung des Abstrahlverhaltens Körperschall-Luftschall in den betroffenen Gebäuden (von der Bausubstanz abhängig) ist nur mit hohem Aufwand möglich. Es hat sich insbesondere beim Schienenverkehr eine Vorgehensweise entwickelt und bewährt, den Zusammenhang zwischen dem Schwinggeschwindigkeitspegel in Fußbodenmitte und dem im Raum entstehenden sekundären Luftschallpegel bzw. Gesamtinnenschallpegel durch Korrelationsbetrachtungen aus messtechnisch ermittelten und statistisch verwerteten Beziehungen zu bestimmen.

Die Vorgehensweise ist in der Richtlinie 820.2050A02 der DB [16] beschrieben. Hierbei wird auf die Ermittlung mithilfe der „Einzahlmethode“ zurückgegriffen. In Abhängigkeit von der Bauweise der Gebäude (Betondecken oder Holzbalkendecken) werden aus den prognostizierten oder gemessenen spektralen Körperschallschnelle-Pegeln am Fußboden sekundäre Luftschall-Pegel (mittlere Pegel über die Vorbeifahrzeit, als Maximalpegel zu verstehen) ermittelt. Die Beurteilungspegel L_i werden daraus über die Einwirkungsdauer der Erschütterungen im Beurteilungszeitraum bestimmt. Im Fall des Stadtbahnverkehrs entspricht dies den Vorbeifahrzeiten der Stadtbahn, im Fall der Bauarbeiten den Zeiträumen nach Punkt 2.1.1 („effektive Einwirkzeit“). Für die Bauarbeiten ist einem (gemittelten) Beurteilungspegel auch der Maximalpegel zu bewerten. Für eine höhere Prognosesicherheit im Fall des Maximalpegelkriteriums, wird die von Said et al. [24] beschriebene Standardabweichung für Fernbahnen entsprechend der Deckenart hierfür berücksichtigt. Im Fall des Schienenverkehrs wird der Maximalpegel aus dem sekundären Luftschall nicht berücksichtigt, da die 24. BImSchV hierzu keine Aussage macht.

2.2.1 Emissionsermittlung Schienenverkehr

Im Fall des Schienenverkehrs wurden die Emissionen entsprechend der Max-Hold-Methode gemäß DB-Richtlinie 820.2050A02 [16] messtechnisch ermittelt [26].

2.2.2 Emissionsermittlung Verbau von Spundbohlen

Bei der Emissionsermittlung für den Verbau von Spundbohlen muss grundsätzlich zwischen den für dieses Bauvorhaben in Frage kommenden Verfahren (Schlagen und Einpressen) unterschieden werden.

Schlagammung

Die Schlagammung ist sehr erschütterungsintensiv und wird in verschiedenen Stellen der einschlägigen Literatur beschrieben. Achmus et al. [14] geben einen besonders ausführlichen Überblick zu verschiedenen Berechnungsverfahren, die im In- und

Ausland ermittelt wurden und vergleichen die Literaturangaben mit eigenen Messwerten. Es wird festgestellt, dass die Erschütterungsemission maßgeblich vom Boden abhängig ist. Je nach Bodenart und Literaturangabe schwanken die k-Werte (vgl. Formel 4) zwischen 7,9 (Whyley & Sarsby, „weicher Boden“) und 158 (Hiller & Crabb, „Rammung auf Widerstand/ Fels“). Am wahrscheinlichsten erscheinen die Angaben, die Achmus et al. der ENV 1993-5 entnehmen. Demnach liegen die k-Werte bei weichem bzw. lockerem Untergrund bei 15,8 und bei sehr steifem Untergrund bei 31,6. Den Ausbreitungskoeffizient m nach Formel 4 geben Achmus et al. für Schlagrammung mit 1.3 an. Die Erschütterung der Schlagrammung können zur Abschätzung des KB-Wertes als Einzelereignisse von kurzer Dauer eingestuft werden (entspricht Zeile 4a) der Tabelle 3 der DIN 4150-2).

Einpressen

Die Erschütterungsemissionen beim Einpressen sind deutlich geringer als beim Verbau mittels Schlag- oder Vibrationsrammung. Nach Rockhill et al. [12] kann die Schwinggeschwindigkeit im Freifeld und bei einem Abstand von > 2 m durch folgende Gleichung abgeschätzt werden:

$$v = \frac{10.43}{R}$$

Formel 5: Prognose der Schwingschnelle v [mm/s] im Abstand R [m] zur Quelle

Messergebnisse, die beim Einpressen von Spundbohlen im Raum Berlin ermittelt wurden [23], sprechen ebenfalls für die geringen Erschütterungsemissionen beim Einpressen. Demnach entstehen während des Einpressens nur im Nahfeld messbare Erschütterungen, die vor allem durch das kurzzeitige Packen und Loslassen der Spundbohlen bestimmt werden. An der nächstgelegenen Bebauung wurde in diesem Fall nur in Ausnahmefällen die Fühlschwelle von 0.1 mm/s überschritten.

2.2.3 Verdichtungsarbeiten

Das Maß der Erschütterungsemissionen durch Vibrationsverdichtungen ist vor allem von Gewicht, Amplitude und Frequenz des schwingenden Elementes sowie der Art der Anregung abhängig. Achmus et al. [14] haben verschiedene Methoden zusammengestellt, wie aus üblicherweise verfügbaren Gerätedaten (z.B. Leistung oder Gewicht) die Schwinggeschwindigkeit an einem Immissionspunkt (Freifeld oder Fundament) ermittelt werden kann. Je nach Prognoseformel und Überschreitungswahrscheinlichkeit, ändern sich der Ausbreitungskoeffizient und der k-Wert. Bei einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 16 % kann die Schwingungsamplitude mit folgender Formel berechnet werden:

$$v = 7.59 \cdot \frac{\sqrt{G}}{R}$$

Formel 6: Grundformel zur Berechnung der Schwingschnelle [mm/s] im Abstand R [m] zur Verdichtungsmaschine mit dem Gewicht G in [t]

2.2.4 Bohrungen

Bohrungen sind hinsichtlich der Erschütterungen i.d.R. als vergleichsweise emissionsarm einzustufen. Allerdings können Bohrungen aufgrund der teilweise hohen Drehzahl zu einem nennenswerten Maß an sekundärem Luftschall in nahegelegenen Wohnhäusern führen.

Die höchsten Emissionen sind während der Schlagbohrung zu erwarten, welche voraussichtlich bei der Verankerung der Spundwände eine Rolle spielt. Die Berechnung der Emissionen findet analog zur Schlagammung statt, wobei natürlich die eingetragene Energie bei einer Schlagbohrung deutlich geringer und die „Schlagzahl“ deutlich höher ist.

3 Beschreibung des Untersuchungsgebietes

Der Einwirkbereich von Erschütterungen („Körperschall“) ist in der Regel deutlich geringer als der Einwirkbereich des Luftschalls. Aufgrund der Bauart, Gebietseinstufung und Nutzung wird das Untersuchungsgebiet in Teilgebiete unterteilt, die im nachfolgenden näher beschrieben werden. Eine Auflistung der Bauleitplanung, auf die zur Gebietseinstufung zurückgegriffen wurde, findet sich in Anhang 1.

3.1 Teilbereich 1: „Vatterstraße“

Für den Bereich der Vatterstraße gilt der Bebauungsplan („Fluchtlinienplan“) F 1682 von 1955. Da in diesem Bebauungsplan keine Festsetzung bezüglich der Gebietsnutzung gemacht wird, wird das Gebiet anhand einer Ortsbesichtigung als vorwiegendes Wohngebiet eingestuft (vgl. Zeile 4 Tabelle 1 der DIN 4150-2). Diese Einstufung stimmt auch mit dem Flächennutzungsplan 2010 überein.

Es handelt sich um unterkellerte Wohngebäude mit vier Obergeschossen. Im Rahmen von Erschütterungsmessungen wurde festgestellt, dass es sich augenscheinlich bei allen Geschosdecken um Betondecken handelt. Die Einstufung der baulichen Struktur entspricht Zeile 2 gemäß den Tabellen 1 und 3 der DIN 4150-3 (Wohngebäude).

Der Abstand der Gebäude zur nächstgelegenen Baufeldgrenze beträgt etwa 40 bis 50 m, der Abstand zur Stadtbahn verringert sich während der bauzeitlichen Verlegung von etwa 60 m auf etwa 12 m zu den nächstgelegenen Wohngebäuden.

Gemäß den Bodengutachten entspricht die obere Bodenschicht einer Auffüllung (ca. 4 m Tiefe), die darunterliegenden Schichten sind je nach Bereich Auelehm, Torf und/oder Terrassensand und ab einer Tiefe von etwa 10 m Rupelton. Die Bodenarten sind aus erschütterungstechnischer Sicht als eher weich einzustufen. Erwartungsgemäß konnte somit auch messtechnisch eine nennenswerte Bodendämpfung vor allem im höheren und mittleren Frequenzbereich nachgewiesen werden [26].

3.1.1 Sonderfall Pestalozzischule / Kindertagesstätte

Der Gebäudekomplex, welcher die Pestalozzischule und eine Kindertagesstätte beherbergt, unterscheidet sich sowohl in seiner baulichen Struktur, als auch in seiner tatsächlichen Nutzung und Nutzungsdauer von der übrigen Wohnbebauung an der Vatterstraße.

Die Anhaltswerte der DIN 4150-2 können entsprechend des Anwendungsbereichs der Norm (siehe Kapitel 2.1.1) nur hilfswise für Schulen und Kindertagesstätten herangezogen werden. Am ehesten entspricht die Schutzbedürftigkeit der Zeile 4 in Tabelle 1 der DIN 4150-2. Entsprechend den Aussagen der Schulleitung im Dezember 2016 findet der Schulunterricht bis 13:10 Uhr statt, Zusatzangebote der Pestalozzischule laufen bis 15:30 Uhr. Die Kindertagesstätte wird zwischen 7:30 und 17:00 Uhr genutzt.

Das Gebäude hat drei Obergeschosse, ist teilweise unterkellert und zum Großteil auf gemauerten Streifenfundamenten gelagert. Bei der baulichen Struktur handelt es sich um Betondecken, wobei die Deckeneigenresonanzen für Betondecken relativ niedrig (bei etwa 12,5 Hz) liegen [26]. Dies kann durch die großen Deckenspannweiten begründet werden. Die Einstufung der baulichen Struktur entspricht Zeile 2 gemäß den Tabellen 1 und 3 der DIN 4150-3.

Der Abstand des Gebäudes zur nächstgelegenen Baufeldgrenze beträgt etwa 100 bis 110 m, der Abstand zur Stadtbahn verringert sich während der bauzeitlichen Verlegung von etwa 130 m auf etwa 70 m.

3.1.2 Sonderfall Kleingartengebiet

Im Kleingartengebiet ist davon auszugehen, dass sich die Nutzer vorwiegend im Außenbereich aufhalten. Die DIN 4150-2 macht jedoch nur Angaben zu Erschütterungseinwirkungen auf den Menschen in (Wohn-)Gebäuden.

Weiterhin unterscheidet sich die bauliche Struktur der Gartenhäuschen deutlich von den in der DIN 4150-3 genannten Gebäudearten und kann daher keiner Kategorie zugeordnet werden.

Auf den Kleingartenbereich an der Vatterstraße sind Teile 2 und 3 der DIN 4150 nicht anwendbar. Auch eine vergleichende Beurteilung, wie sie z.B. für Büros oder Schulen, für welche die Anhaltswerte der DIN 4150-2 streng genommen auch nicht bindend sind, herangezogen wird, erscheint nicht angemessen, da Boden („Freifeld“) und bauliche Strukturen sich erschütterungstechnisch deutlich voneinander unterscheiden und die Erschütterungen auch anders wahrgenommen werden.

3.2 Teilbereich 2: „Am Erlenbruch“

Für den Bereich der Vatterstraße gelten die Bebauungspläne („Fluchtlinienplan“) „F 1682“ von 1955, „F 1287“ von 1931 und „Am Erlenbruch“ (NO 22b Nr1) von 1963. Da in keinem dieser Bebauungspläne eine Festsetzung bezüglich der Gebietsnutzung gemacht wird, wird das Gebiet anhand einer Ortsbesichtigung als vorwiegend Wohngebiet eingestuft (vgl. Zeile 4 Tabelle 1 der DIN 4150-2). Diese Einstufung stimmt auch mit dem Flächennutzungsplan 2010 überein.

Es handelt sich um unterkellerte Wohngebäude mit drei Obergeschossen, wobei sich im 3. OG teilweise keine Wohnräume befinden. Im Rahmen von Erschütterungsmessungen wurde festgestellt, dass es sich bei der Decke zwischen Keller und EG augenscheinlich um eine Betondecke und bei den übrigen Geschossdecken um Holzbalkendecken handelt. Die Einstufung der baulichen Struktur entspricht gemäß den Tabellen 1 und 3 der DIN 4150-3 der Zeile 3 (denkmalgeschützte Häuser) und im Fall des Gebäudes am Erlenbruch 130 bis 134 der Zeile 2 (Wohngebäude).

Der Abstand der Gebäude zur nächstgelegenen Baufeldgrenze beträgt teilweise weniger als 10 m, wobei sich der Abstand zur Stadtbahn vergrößert.

Wie im Bereich der Vatterstraße entspricht die obere Bodenschicht gemäß den Bodengutachten einer Auffüllung (ca. 4 m Tiefe), die darunterliegenden Schichten sind je nach Bereich Auelehm, Torf und/ oder Terrassensand und ab einer Tiefe von etwa 10 m Rupelton. Ab Bau-km 2+190 (etwa bei den Häusern Am Erlenbruch 124 bis 134) liegt allerdings ab einer Tiefe von 20 m auch der als relativ hart einzustufende Cyrenenmergel vor. Sollten Erdbauarbeiten, Bohrungen oder Rammungen im Bereich dieser Bodenschicht stattfinden ist mit höheren Widerständen und somit auch erhöhten Erschütterungsemissionen zu rechnen, die bei der Immissionsberechnung berücksichtigt werden.

3.3 Teilbereich 3: „Borsigallee“

Im Bereich der Borsigallee gibt es nur nördlich der Kreuzung zwischen Friesstraße und Borsigallee und südlich, im Bereich der Wächtersbacher Straße, gültige Bebauungspläne. Im Flächennutzungsplan 2010 wird der Bereich durchgehend als gewerbliche Baufläche eingestuft.

Auf die verschiedenen baulichen Anlagen und die spezifische Schutzbedürftigkeit in diesem Bereich wird in den nachfolgenden Unterkapiteln eingegangen.

Gemäß dem Bodengutachten besteht die obere Bodenschicht im Baufeld parallel zur Borsigallee meist aus einer etwa 2 bis 4 m tiefen Auffüllung. Ab einer Tiefe von etwa 8 m liegt in diesem Bereich weitestgehend der als hart einzustufende Cyrenenmergel vor. Dazwischen befinden sich eine oder mehrere Bodenschichten aus Auelehm, Schleichsand und Terrassensand.

3.3.1 Bereich Museumsarchive (Borsigallee 8)

Im Bereich der Museumsarchive sind das Institut für Stadtgeschichte (ISG), das Museum für Weltkulturen (MWK) und das archäologische Museum Frankfurt (AMF, oder „Steinhalle“) angesiedelt. Für den Bereich gibt es keinen gültigen Bebauungsplan.

Aufgrund der teilweise (sehr) wertvollen und/ oder fragilen Objekte die in den Archiven aufbewahrt werden, wurde empirisch ein Immissionsschutzkonzept (siehe Anhang 5) erarbeitet, welches zulässige Schwingschnellen an bestimmten Referenzmesspunkten nennt.

Die speziell für dieses Vorhaben ermittelten zulässigen Schwingschnellen stellen deutlich schärfere Anforderungen dar als die der DIN 4150-2 oder DIN 4150-3 für diesen Bereich.

3.3.2 Gewerblich und industriell genutzte Gebäude im Bereich der Borsigallee

Die üblichen baulichen Anlagen im Bereich der Borsigallee haben großteils einen gewerblichen bzw. industriellen Charakter. Da sich in diesem Gebiet keine Wohngebäu-

de befinden, findet für diesen Bereich keine Beurteilung anhand der DIN 4150-2 statt.

Die bauliche Substanz der meist ein- bis zweigeschossigen Gebäude wird gemäß den Tabellen 1 und 3 der DIN 4150-3 der Zeile 1 zugeordnet.

4 Ermittlung der Erschütterungsemissionen und Einwirkbereiche

Gemäß der vorliegenden Bauablaufplanung (siehe Unterlage 01 C, Anlage 2.1, Anhang 2), wurden aus erschütterungstechnischer Sicht folgende Arbeiten als relevant identifiziert:

- Spundwandverbau
- Verdichtungsarbeiten
- Bohrungen

Im nachfolgenden werden die angesetzten Emissionen, die Berechnungsgrundlagen zur Ausbreitung und die maßgeblichen Einwirkbereiche für die jeweiligen Erschütterungsquellen identifiziert. Eine individuelle Beurteilung der Erschütterungssituation erfolgt in Kapitel 5 und mithilfe von Datenblättern (Anhang 2).

Da die maßgeblichen Anhaltswerte der DIN 4150-2 für Bauarbeiten von der Einwirkdauer abhängig sind, wird auch ein Einwirkbereich nach DIN 4150-2, Tabelle 1 ermittelt. Zusammen mit dem Baufortschritt, lässt sich so die Einwirkdauer an jedem Immissionsort einzeln bestimmen (Kapitel 5 und Anhang 2). In der Regel beträgt die Einwirkdauer zwischen 26 und 78 Tagen.

4.1 Stadtbahn

Zur Ermittlung der Erschütterungsemissionen und der Pegelabnahme im Erdboden wurden Erschütterungsmessungen durchgeführt [26]. Aus den messtechnisch erfassten Daten wurden gemäß der im „Leitfaden der DB“ [16] beschriebenen Vorgehensweise die Emissionen und die Pegelabnahme im Erdboden ermittelt, welche in den nachfolgenden Diagrammen dargestellt sind. Zur Berechnung der Erschütterungsimmissionen sind demnach die „Max-Hold-Spektren“ maßgeblich. Es wird zwischen den Emissionen der U4 und U7 unterschieden, welche sich lediglich in Ihrer Länge unterscheiden und ein sehr ähnliches Emissionsspektrum aufweisen. Im Bereich der messtechnischen Ermittlung der Emissionen waren verschiedene Störstellen vorhanden, deren Einfluss eliminiert wurde. Abbildung 1 zeigt die gemessenen Spektren.

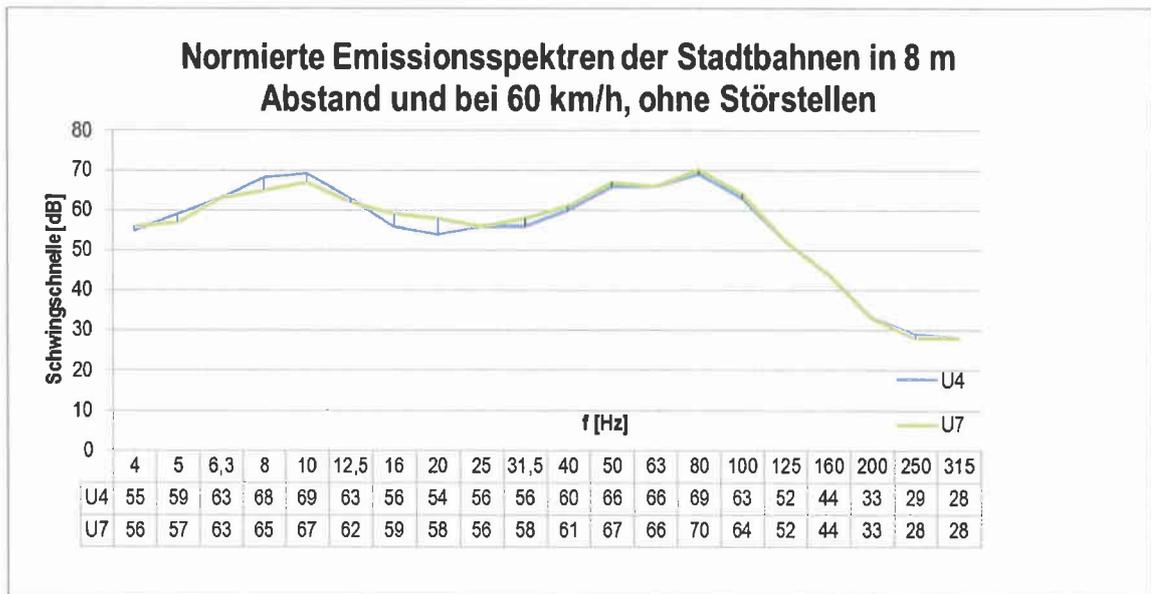


Abbildung 1: Emissionspegel Stadtbahn

Die ermittelte Pegelabnahme im Erdboden in Abbildung 2 zeigt, dass im tiefen Frequenzbereich (≤ 16 Hz) keine nennenswerte Dämpfung der Erschütterungen stattfindet, wohingegen im mittleren und hohen Frequenzbereich mit einer relativ hohen Bodendämpfung zu rechnen ist. Die dargestellte Pegelabnahme wurde auf den Abstand zwischen 8 und 80 m normiert.

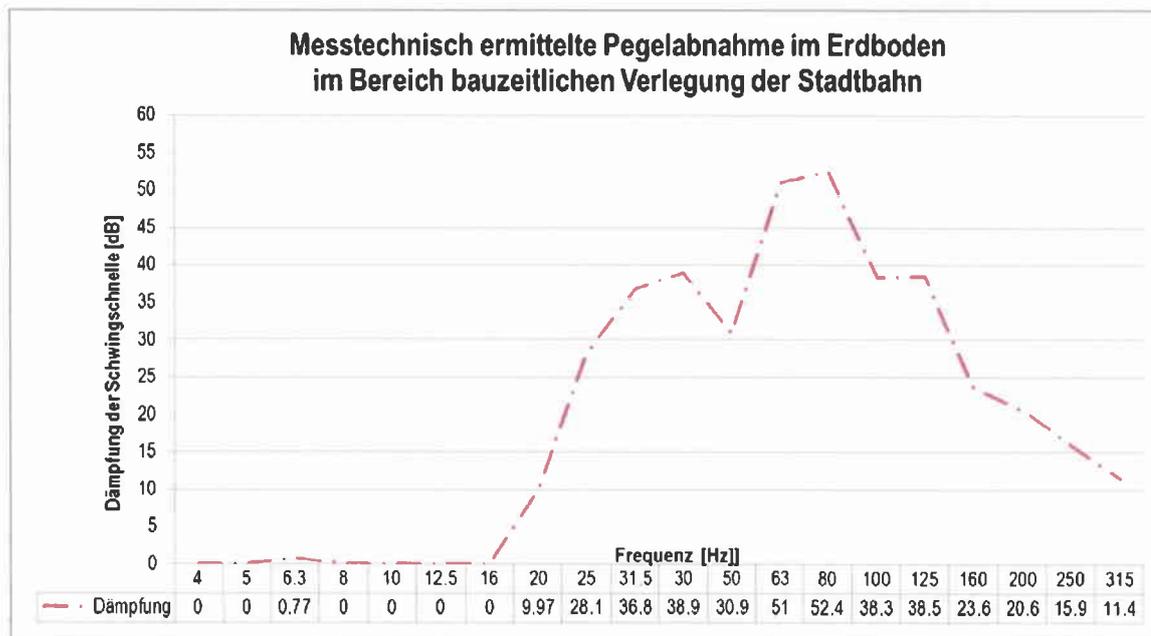


Abbildung 2: Pegelabnahme im Erdboden Bereich Vatterstraße

Durch die bauzeitliche Verlegung der Stadtbahn rücken die Gleise näher an die Bebauung der Vatterstraße heran, sodass hier mit höheren Erschütterungsimmissionen aus dem Schienenverkehr zu rechnen ist.

Zur Erschütterungsprognose wird das von der Verkehrsgesellschaft Frankfurt (VGF) angegebene Zugprogramm für die bauzeitliche Verlegung der Stadtbahn herangezogen.

gen (siehe Anhang 3, „wöchentliches Mittel“). Es ist zu beachten, dass sich im Bereich der Pestalozzischule sowohl im Prognosenullfall als auch während der bauzeitlichen Verlegung der Stadtbahn die Haltestelle Schöfflestraße befindet, sodass hier eine reduzierte Fahrzeuggeschwindigkeit von 35 km/h und die doppelte Anzahl an Zugvorbeifahrten angesetzt werden (An- und Abfahrt belegen jeweils einen Takt nach DIN 4150-2).

Die Ergebnisse der Prognoseberechnung für Erschütterungen und den sekundären Luftschall sind in Anhang 3 dargestellt und werden in Kapitel 5 für die einzelnen Bereiche diskutiert.

4.2 Verbau von Spundbohlen

Im Zuge der Baumaßnahme werden Spundbohlen vor allem zur bauzeitlichen Sicherung der Baugrube(n) verbaut. Mit wenigen Ausnahmen, in denen Bohrpfähle anstelle von Spundwänden eingebracht werden, wird die Baugrubensicherung durch Spundwände sichergestellt. Hierbei werden die Zwischenwände („Schotten“) zu den benachbarten Baugruben während des Bauablaufs bereits geöffnet (gezogen), wohingegen die umschließenden Spundwände erst nach der Fertigstellung der Tunnelbauwerke gezogen werden.

Die Einbringtiefe liegt je nach Bauwerk bei ca. 15 bis 30 m unter der Geländeoberkante (GOK). Nach dem derzeitigen Planungsstand werden die Spundbohlen fast ausschließlich eingepresst. Da aufgrund der örtlichen Gegebenheiten, vor allem bei besonders harten Bodenschichten im westlichen Teil (etwa ab der Mergenthalerstraße), nicht vollständig ausgeschlossen werden kann, dass eine ausreichende Einbringtiefe nur mit Hilfe einer Schlagrammung erreicht werden kann, werden dort auch die Emissionen und Auswirkungen einer möglichen Schlagrammung aufgezeigt.

4.2.1 Verbau mittels Einpressen

Die Spundbohlen werden in vorgebohrte Löcher eingepresst. Es ist zu erwarten, dass die Emissionen der Austausch- oder Lockerungsbohrungen vergleichbar oder geringer sind als die Emissionen durch Einpressen mit gleichzeitiger Bohrung. Von den verschiedenen Einpressverfahren ist zum derzeitigen Planungsstand am wahrscheinlichsten, dass ein Verfahren angewendet wird, bei dem die Spundbohle mit einem konstanten Druck in den Boden gepresst wird, wobei gleichzeitig ein Bohrgerät in der Mitte der Spundbohle den Boden während des Einpressvorgangs auflockert (vgl. „Silent Piler“ der Fa. Giken („Super-Crush-Verfahren“)¹).

Aus dem Bauablaufplan (siehe Unterlage 01 C, Anlage 2.1, Anhang 2) und dem geometrischen Umfang der einzelnen Baugruben (also inklusive der Schotten) wurde je Gerät ein durchschnittlicher täglicher Fortschritt von etwa 10 m für das Einpressen ermittelt. Der Baufortschritt für das Einpressen kann je nach Einbringtiefe und Bodenart etwas variieren. In Tabelle 7 werden die Kenndaten für das Einpressen dargestellt.

¹ <http://www.giken.co.uk/de/piling-method/super-crush-mode/> (zuletzt aufgerufen am 19.01.2017)

| | |
|--|---|
| Bezeichnung des Bauverfahrens | Einpressen von Spundwänden |
| Maximal gleichzeitig einwirkende Geräte | 2 (für einige Bauwerke ist zwar der gleichzeitige Einsatz von 4 Geräten geplant, diese beeinflussen sich aufgrund des geringen Einwirkbereiches nur geringfügig) |
| Maßgebliche (Teil-) Erschütterungsquelle(n) | Motor (Übertragung auf Spundbohle) Bohrer Greifen / Loslassen der Spundbohle |
| Kenndaten, die für die Prognoseberechnung angenommen wurden, Literaturquellen / Herstellerdaten | <ul style="list-style-type: none"> • Quelle 1: Universitätsstudie in Zusammenarbeit mit Fa. Giken zu verschiedenen Einpressmethoden (Super Auto, NT, Super Crush) bei variierenden Bodenarten, Spundwandprofilen und Spundwandlängen [12] • Quelle 2: Messbericht zum Super-Crush-Verfahren der Firma Giken beim Einbau von Spundbohlen am Landwehrkanal in Berlin [23] |
| Art der Erschütterungsquelle | Punktquelle |
| Art der Anregung | harmonisch (Bohren und Motor) / impulsartig (Greifen und Loslassen) [12]; [23] |
| Typische Arbeitsfrequenz | 50 Hz [23] |
| Betroffene Bauwerke | alle Bauwerke |
| Voraussichtliche tägliche Arbeitszeit | 8.0 Stunden |
| Tägliche Dauer während der tatsächlich Erschütterungen auftreten | 8,0 Stunden (100% der Arbeitszeit) |
| Durchschnittlicher Arbeitsfortschritt | 18 m / Tag (entspricht etwa 10 m / Gerät) beim Einbringen 30 m / Tag beim Ziehen |
| Sonstige Angaben | Einbringen in vorgebohrte Löcher, das Ziehen der Spundwände erfolgt mit dem gleichen Gerät die hierbei auftretenden Erschütterungen sind erfahrungsgemäß vergleichbar oder sogar geringer als beim Einbringen |

Tabelle 7: Kenndaten Einpressen von Spundbohlen

Einwirkbereiche für bauliche Anlagen

Die Erschütterungsprognose für das Einpressen zeigt, dass mit diesem Bauverfahren selbst bei ungünstigen Übertragungsbedingungen und unter Berücksichtigung der geringeren Anhaltswerte für denkmalgeschützte Gebäude keine Überschreitungen der Anhaltswerte der DIN 4150-3 [7] im Bereich des Riederwaldtunnels zu erwarten sind (Einwirkbereich bis zu etwa 10 m).

Einwirkbereiche für Menschen in Gebäuden

Aus der Prognose lässt sich ableiten, dass der A_U (unterer Anhaltswert) gemäß Tabelle 1 der DIN 4150-2 [6] überschritten wird. Zur Beurteilung von Bauerschütterungen ist jedoch Tabelle 2 der DIN 4150-2 maßgeblich. Bei einer Beurteilungsdauer (Tage, an denen Erschütterungen einwirken, siehe Kapitel 2.1.1) von 26 bis 78 Tagen ist damit zu rechnen, dass die Anforderungen der DIN 4150-2 ab einem Abstand von etwa 25 m (Stufe II) eingehalten werden.

Einwirkbereiche sekundärer Luftschall nach VDI 2719

Im Bereich von Wohngebieten ist unabhängig von der Deckenbauart ab einem Abstand von 50 m mit der Einhaltung der Kriterien für sekundären Luftschall zu rechnen, bei Mischgebieten ab einem Abstand von ca. 30 m.

4.2.2 Sonderfall: Verbau mittels Schlagrammung

Bei Proberammungen wurde zur Schlagrammung der Hydrohammer S-70 der Firma IHC eingesetzt. Nach Herstellerangaben² liegt die maximale Schlagzahl bei maximal 50 Schlägen pro Minute. Die Schlagenergie ist nach Herstellerangaben zwischen 2 und 70 kNm einstellbar.

Da die Schlagramme nur in Ausnahmefällen eingesetzt werden soll, ist davon auszugehen, dass die Einsatzdauer im Vergleich zum Einpressen sehr gering ist. Es wird davon ausgegangen, dass das Einbringen der Spundbohlen in den Cyrenenmergel Schwierigkeiten bereiten könnte, weshalb angenommen wird, dass nordwestlich des Bauwerks T3 der letzte Meter der Spundwände eingeschlagen werden muss. Um bei einem eventuellen Einsatz der Schlagramme nicht die Anzahl der Tage mit Erschütterungseinwirkungen gemäß DIN 4150-2 maßgeblich zu erhöhen, ist der eventuelle Einsatz der Schlagramme auf wenige Tage zu beschränken. Beispielhaft bedeutet dies, dass die Schlagrammung besser an drei Tagen für 6 Stunden betrieben wird, statt an 18 Tagen für eine Stunde. Nachfolgend werden die maßgeblichen Kenndaten dargestellt, die zur Berechnung der Emissionen mittels Schlagrammung berücksichtigt werden.

² <http://www.ihcees.fr/products/ihc-equipments/s-serie/> (zuletzt aufgerufen am 19.01.2017)

| | |
|--|---|
| Bezeichnung des Bauverfahrens | Schlagrammung (von Spundwänden) |
| Maximal gleichzeitig einwirkende Geräte | 1 |
| Maßgebliche (Teil-) Erschütterungsquelle(n) | Rambbär (Übertragung auf Spundbohle, maßgebliche Emission am unteren Ende der Spundbohle) |
| Kenndaten, die für die Prognoseberechnung angenommen wurden, Literaturquellen / Herstellerdaten | Maximale Schlagenergie: 70 kJ Maximale Schlagzahl: 30 / min (um resonante Anregung zu vermeiden, die technisch mögliche Schlagzahl liegt bei etwa 50 Schlägen pro Minute) |
| Art der Erschütterungsquelle | Punktquelle |
| Art der Anregung | impulsartig |
| Typische Arbeitsfrequenz | Abhängig vom Boden, Annahme aus Erfahrungswerten: 30 Hz |
| Betroffene Bauwerke | Theoretisch möglich bei: BGT3; BG-T4; BG-T5; BG-T6.1; BG-T6.2; BG-T7; BG-B1; BG-B2; BG-B3 |
| Voraussichtliche tägliche Arbeitszeit | 8.0 Stunden (Annahme, dass die Ramme nur kurzzeitig an einem Ort im Einsatz ist) |
| Tägliche Dauer während der tatsächlich Erschütterungen auftreten | 4.0 Stunden (50% der Arbeitszeit unter der Annahme, dass nur der letzte Meter geschlagen wird, also das Gerät regelmäßig versetzt werden muss. Dafür finden keine „Rüstzeiten“ für Transport und Justieren der Spundbohlen an) |
| Durchschnittlicher Arbeitsfortschritt | ca. 30 m/d |
| Sonstige Angaben | Schlagenergie ist auf ein Minimum zu begrenzen, in den unten angegebenen Einwirkbereichen nur bei zeitgleicher Überwachungsmessung durchzuführen |

Tabelle 8: Kenndaten Schlagrammung von Spundbohlen

Einwirkbereiche für bauliche Anlagen

Entsprechend der Erschütterungsprognose kann bei der Schlagrammung (auf dem letzten einzubringenden Meter) je nach Gebäudeart und Abstand eine Überschreitung der Anhaltswerte nach DIN 4150-3 [7] nicht ausgeschlossen werden. Bei denkmalgeschützten Gebäuden beträgt dieser Abstand bis zu etwa 60 m, bei Wohngebäuden bis zu etwa 40 m.

Einwirkbereiche für Menschen in Gebäuden

Aus der Prognose lässt sich ableiten, dass der A_U (unterer Anhaltswert) gemäß Tabelle 1 der DIN 4150-2 [6] selbst bei Abständen von mehr als 200 m (bei homogenen Bodenverhältnissen im Erdreich) durch die Schlagrammung überschritten werden kann. Zur Beurteilung von Bauerschütterungen ist jedoch Tabelle 2 der DIN 4150-2 maßgeblich. Bei einer Beurteilungsdauer (Tage, an denen Erschütterungen einwirken, siehe Kapitel 2.1.1) von 26 bis 78 Tagen damit zu rechnen, dass die Anforderungen der DIN 4150-2, Stufe II ab einem Abstand von etwa 120 m und für Stufe III ab etwa 90 m eingehalten werden.

Einwirkbereiche sekundärer Luftschall nach VDI 2719

Im Bereich von Wohngebieten ist bei Holzbalkendecken ab einem Abstand von etwa 80 m und bei Betondecken ab etwa 110 m mit der Einhaltung der Kriterien für sekundären Luftschall zu rechnen. Bei Mischgebieten liegen diese Abstände bei etwa 30 m (Holzbalkendecken) bzw. etwa 60 m (Betondecken).

4.3 Verdichtungsarbeiten

Das Maß der Erschütterungsemissionen durch Vibrationsverdichtungen ist vor allem von Gewicht, Amplitude und Frequenz des schwingenden Elementes sowie der Art der Anregung abhängig. Bei mittleren und schweren Walzen liegt die Arbeitsfrequenz meist zwischen 16 und 40 Hz, bei kleineren Geräten ggf. auch höher.

Für die vorliegende Untersuchung wird eine Unterteilung in drei Gewichtsklassen von Verdichtungsgeräten vorgenommen, die jeweils für unterschiedliche Arbeiten und dementsprechend auch in unterschiedlichen Abständen und zu unterschiedlichen Zeiten (bzw. Bauphasen) eingesetzt werden.

4.3.1 Verdichtungen mittels Rüttelplatte bis maximal 0.5 t

Die Geräte sollen im Randbereich des Baufelds eingesetzt werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass bis zu zwei Geräte gleichzeitig auf ein Gebäude einwirken. Der behelfsweise ermittelte Arbeitsfortschritt liegt bei etwa 15 m/d. Die Kenndaten für Verdichtungsarbeiten mit der Rüttelplatte sind in Tabelle 9 dargestellt.

| | |
|--|---|
| Bezeichnung des Bauverfahrens | Verdichtung mittels Rüttelplatte bis zu max. 0.5 t |
| Maximal gleichzeitig einwirkende Geräte | 2 |
| Maßgebliche (Teil-) Erschütterungsquelle(n) | Vibrationsplatte |
| Kenndaten, die für die Prognoseberechnung angenommen wurden, Literaturquellen / Herstellerdaten | Maximales Gewicht: 0.5 t |
| Art der Erschütterungsquelle | Punktquelle |
| Art der Anregung | stationär |
| Typische Arbeitsfrequenz | 20-80 Hz, beim „Anfahren“ auch tiefere Frequenzen möglich |
| Betroffene Bauwerke | Vsl. alle Bauwerke |
| Voraussichtliche tägliche Arbeitszeit | 8.0 Stunden |
| Tägliche Dauer während der tatsächlich Erschütterungen auftreten | 4.0 Stunden (50% der Arbeitszeit unter der Annahme, dass die Verdichtungsarbeiten regelmäßig unterbrochen werden) |
| Durchschnittlicher Arbeitsfortschritt | ca. 15 m/d |
| Sonstige Angaben | |

Tabelle 9: Kenndaten Verdichtungsarbeiten mit Rüttelplatten

Einwirkbereiche für bauliche Anlagen

Die Erschütterungsprognose für den Betrieb von Rüttelplatten bis 0.5 t zeigt, dass selbst bei ungünstigen Übertragungsbedingungen und unter Berücksichtigung der geringeren Anhaltswerte für denkmalgeschützte Gebäude keine Überschreitungen der Anhaltswerte der DIN 4150-3 [7] im Bereich des Riederwaldtunnels zu erwarten sind, sie können jedoch auch nicht sicher ausgeschlossen werden (Einwirkbereich bis zu etwa 10 m).

Einwirkbereiche für Menschen in Gebäuden

Aus der Prognose lässt sich ableiten, dass der A_U (unterer Anhaltswert) gemäß Tabelle 1 der DIN 4150-2 [6] durch den Betrieb der Rüttelplatten in einem Abstand von bis zu etwa 80 m überschritten werden kann. Zur Beurteilung von Bauerschütterungen ist jedoch Tabelle 2 der DIN 4150-2 maßgeblich. Bei einer Beurteilungsdauer (Tage, an denen Erschütterungen einwirken, siehe Kapitel 2.1.1) von 26 bis 78 Tagen damit zu rechnen, dass die Anforderungen der DIN 4150-2 ab einem Abstand von etwa 15 m (Stufe II) eingehalten werden.

Einwirkbereiche sekundärer Luftschall nach VDI 2719

Im Bereich von Wohngebieten ist unabhängig von der Deckenbauart ab einem Abstand von 30 m mit der Einhaltung der Kriterien für sekundären Luftschall zu rechnen, bei Mischgebieten ab einem Abstand von 20 m.

4.3.2 Verdichtungen mittels kleiner Walze bis 3.0 t

Die Geräte sollen zur Erstellung des Erdplanums, also vor allem im mittleren Bereich des Baufeldes, eingesetzt werden. Das Gewicht sollte laut Angaben der Planer 3 t nicht überschreiten, damit die Walze auch mit einem Kran in die Baugrube gehoben werden kann. Es kann davon ausgegangen, dass bis zu zwei Geräte gleichzeitig auf ein Gebäude einwirken. Der behelfsweise ermittelte Arbeitsfortschritt liegt bei etwa 10 m/d.

| | |
|--|---|
| Bezeichnung des Bauverfahrens | Verdichtung mittels kleiner Rüttelwalze bis zu max. 3.0 t |
| Maximal gleichzeitig einwirkende Geräte | 1.2 (Annahme, dass die zweite Walze aufgrund des Abstands die Erschütterungen einer Walze um maximal 20 % am Immissionsort erhöht) |
| Maßgebliche (Teil-) Erschütterungsquelle(n) | Stahlbandage |
| Kenndaten, die für die Prognoseberechnung angenommen wurden, Literaturquellen / Herstellerdaten | Maximales Gewicht: 3.0 t |
| Art der Erschütterungsquelle | Punktquelle |
| Art der Anregung | stationär |
| Typische Arbeitsfrequenz | 20-50 Hz, beim „Anfahren“ auch tiefere Frequenzen möglich |
| Betroffene Bauwerke | Vsl. alle Bauwerke |
| Voraussichtliche tägliche Arbeitszeit | 8.0 Stunden |
| Tägliche Dauer während der tatsächlich Erschütterungen auftreten | 4.0 Stunden (50% der Arbeitszeit unter der Annahme, dass sich die Geräte aufgrund des täglichen Baufortschritts und mehrerer „Fahrten“ pro Tag nur zeitweise im Einwirkungsbereich der Häuser befinden) |
| Durchschnittlicher Arbeitsfortschritt | ca. 10 m/d |
| Sonstige Angaben | |

Tabelle 10: Kenndaten Verdichtungsarbeiten mit kleinen Rüttelwalzen

Einwirkungsbereiche für bauliche Anlagen

Die Erschütterungsprognose für den Betrieb von Vibrationswalzen bis 3.0 t zeigt, dass selbst bei ungünstigen Übertragungsbedingungen und unter Berücksichtigung der geringeren Anhaltswerte für denkmalgeschützte Gebäude keine Überschreitungen der Anhaltswerte der DIN 4150-3 [7] im Bereich des Riederwaldtunnels zu erwarten sind (Einwirkungsbereich bis zu etwa 20 m).

Einwirkungsbereiche für Menschen in Gebäuden

Aus der Prognose lässt sich ableiten, dass der A_U (unterer Anhaltswert) gemäß Tabelle 1 der DIN 4150-2 [6] durch den Betrieb der kleineren Vibrationswalzen in einem Abstand von bis zu etwa 150 m überschritten werden kann. Zur Beurteilung von Bauerschütterungen ist jedoch Tabelle 2 der DIN 4150-2 maßgeblich. Bei einer Beurteilungsdauer (Tage, an denen Erschütterungen einwirken, siehe Kapitel 2.1.1) von 26 bis 78 Tagen damit zu rechnen, dass die Anforderungen der DIN 4150-2 ab einem Abstand von etwa 30 bis 35 m (Stufe II) eingehalten werden.

Einwirkungsbereiche sekundärer Luftschall nach VDI 2719

Im Bereich von Wohngebieten ist bei Holzbalkendecken ab einem Abstand von etwa 40 m und bei Betondecken ab etwa 60 m mit der Einhaltung der Kriterien für sekundären Luftschall zu rechnen. Bei Mischgebieten liegen diese Abstände bei etwa 15 m (Holzbalkendecken) bzw. etwa 25 m (Betondecken).

4.3.3 Verdichtungen mit großer Walze bis 12.0 t

Die Vibrationswalzen mit bis zu 12.0 t sollen bei der Überschüttung des Tunnels zur Erstellung des Planums für die darüber liegenden Stadtstraßen eingesetzt werden. Ihr Einsatz beschränkt sich also wie bei den 3.0 t Walzen vor allem im mittleren Bereich des Baufeldes. Es kann davon ausgegangen werden, dass bis zu zwei Geräte gleichzeitig auf ein Gebäude einwirken, wobei ein Gerät maßgeblich zu den Bauwerkserschütterungen beiträgt. Der behelfsweise ermittelte Arbeitsfortschritt liegt bei etwa 15 m/d.

| | |
|---|---|
| Bezeichnung des Bauverfahrens | Verdichtung mittels Rüttelwalze bis zu max. 12.0 t |
| Maximal gleichzeitig einwirkende Geräte | 1.2 (Annahme, dass die zweite Walze aufgrund des Abstands die Erschütterungen einer Walze um maximal 20 % am Immissionsort erhöht) |
| Maßgebliche (Teil-) Erschütterungsquelle(n) | Stahlbandage |
| Kenndaten, die für die Prognoseberechnung angenommen wurden, Literaturquellen / Herstellerdaten | Maximales Gewicht: 12.0 t |
| Art der Erschütterungsquelle | Punktquelle |
| Art der Anregung | stationär |
| Typische Arbeitsfrequenz | 16-40 Hz, beim „Anfahren“ auch kurzzeitig tiefere Frequenzen möglich |
| Betroffene Bauwerke | vsl. alle Bauwerke |
| Voraussichtliche tägliche Arbeitszeit | 8.0 Stunden |
| Tägliche Dauer während der tatsächlich Erschütterungen auftreten | 4.0 Stunden (50% der Arbeitszeit unter der Annahme, dass sich die Geräte aufgrund des täglichen Baufortschritts und mehrerer „Fahrten“ pro Tag nur zeitweise im Einwirkungsbereich der Häuser befinden) |
| Durchschnittlicher Arbeitsfortschritt | ca. 15 m/d |
| Sonstige Angaben | |

Tabelle 11: Kenndaten Verdichtungsarbeiten mit großen Rüttelwalzen

Einwirkungsbereiche für bauliche Anlagen

Die Erschütterungsprognose für den Betrieb von Vibrationswalzen bis 12.0 t zeigt, dass die Anhaltswerte der DIN 4150-3 [7] ab einem Abstand von etwa 25 m für Wohngebäude und ab einem Abstand von etwa 50 m für denkmalgeschützte Gebäude eingehalten werden können.

Einwirkungsbereiche für Menschen in Gebäuden

Aus der Prognose lässt sich ableiten, dass der A_U (unterer Anhaltswert) gemäß Tabelle 1 der DIN 4150-2 [6] selbst bei Abständen von mehr als 200 m (bei homogenen Bodenverhältnissen im Erdreich) durch die Verdichtung mittels großer Vibrationswalzen überschritten werden kann. Zur Beurteilung von Bauerschütterungen ist jedoch Tabelle 2 der DIN 4150-2 maßgeblich. Bei einer Beurteilungsdauer (Tage, an denen

Erschütterungen einwirken, siehe Kapitel 2.1.1) von 26 bis 78 Tagen damit zu rechnen, dass die Anforderungen der DIN 4150-2 ab einem Abstand von etwa 70 m (Stufe II) bzw. 50 m (Stufe III) eingehalten werden.

Einwirkbereiche sekundärer Luftschall nach VDI 2719

Im Bereich von Wohngebieten ist bei Holzbalkendecken ab einem Abstand von etwa 110 m mit der Einhaltung der Kriterien für sekundären Luftschall zu rechnen. Bei Mischgebieten liegen diese Abstände bei etwa 35 m (Holzbalkendecken) bzw. etwa 45 m (Betondecken).

4.4 Bohrungen

4.4.1 Erstellen von Bohrpfählen

An einigen wenigen Stellen werden anstatt der Spundwände Bohrpfähle im Randbereich der Baugrube erstellt. Zur Erstellung wird u.a. ein Großlochdrehbohrgerät verwendet, welches bei der Erstellung der Bohrpfähle voraussichtlich die stärksten Schwingungen hervorruft. Die Arbeitsfrequenz der Bohrgeräte liegt bei etwa 25 Hz bis 50 Hz.

Einwirkbereiche für bauliche Anlagen

Aus der Erschütterungsprognose für die Erstellung der Bohrpfähle lässt sich ableiten, dass es aufgrund der verhältnismäßig geringen Energie i.d.R. nicht zu einer Beeinträchtigung der Bausubstanz kommen wird. Bei ungünstigen Übertragungsbedingungen können sogenannte leichte Schäden im Sinne der DIN 4150-3 [7] im Nahbereich der Bohrpfähle nicht ausgeschlossen werden (Einwirkbereich bis zu etwa 20 m bei denkmalgeschützten Gebäuden und 10 m bei Wohngebäuden).

Einwirkbereiche für Menschen in Gebäuden

Aus der Prognose lässt sich ableiten, dass der A_U (unterer Anhaltswert) gemäß Tabelle 1 der DIN 4150-2 [6] durch die Erstellung der Bohrpfähle in einem Abstand von bis zu etwa 90 m überschritten werden kann. Zur Beurteilung von Bauerschütterungen ist jedoch Tabelle 2 der DIN 4150-2 maßgeblich. Bei einer Beurteilungsdauer (Tage, an denen Erschütterungen einwirken, siehe Kapitel 2.1.1) von 26 bis 78 Tagen ist damit zu rechnen, dass die Anforderungen der DIN 4150-2 ab einem Abstand von etwa 40 m (Stufe II) bzw. 25 m (Stufe III) eingehalten werden.

Einwirkbereiche sekundärer Luftschall nach VDI 2719

Im Bereich von Wohngebieten ist bei Holzbalkendecken ab einem Abstand von etwa 40 m mit der Einhaltung der Kriterien für sekundären Luftschall zu rechnen. Bei Mischgebieten liegen diese Abstände bei etwa 20 m.

4.4.2 Ankerbohrungen

Die Spundwände werden zur Standsicherheit verankert. Je nach Position und Bodenart, gibt es zwei bis vier Ankerlagen. Die Anker haben eine Länge von etwa 5 bis etwa 45 m und erreichen aufgrund ihrer Länge teilweise einen sehr kurzen Abstand zu den Hausfundamenten. Zum Einbringen der Anker ist davon auszugehen, dass es sich zumindest im Bereich des Cyrenenmergels um eine Schlagbohrung handelt. Vereinfachend wird als „worst-case-Szenario“ betrachtet, dass die Schlagbohrung im gesamten Bauabschnitt angewendet wird. Der tägliche Arbeitsfortschritt wird mit 2.5 m bei vier gleichzeitig arbeitenden Geräten angenommen, wobei davon auszugehen ist, dass maximal zwei Ankerbohrgeräte gleichzeitig auf ein Gebäude einwirken.

| | |
|---|---|
| Bezeichnung des Bauverfahrens | Ankerbohrungen mittels Schlagbohrung |
| Maximal gleichzeitig einwirkende Geräte | 2 (Es arbeiten i.d.R. vier Geräte je Baugrube, wovon aufgrund der örtl. Gegebenheiten maximal 2 Geräte gleichzeitig auf ein Gebäude einwirken können) |
| Maßgebliche (Teil-) Erschütterungsquelle(n) | Schläge während der Bohrung |
| Kenndaten, die für die Prognoseberechnung angenommen wurden, Literaturquellen / Herstellerdaten | Leistung: ca. 20 kW Schlagenergie: ca. 0.4 kJ |
| Art der Erschütterungsquelle | Punktquelle |
| Art der Anregung | stationär |
| Typische Arbeitsfrequenz | ca. 100 Hz |
| Betroffene Bauwerke | Im gesamten Bereich, wo auch Spundwände eingebracht werden |
| Voraussichtliche tägliche Arbeitszeit | 8.0 Stunden |
| Tägliche Dauer während der tatsächlich Erschütterungen auftreten | 8.0 Stunden (100% unter der Annahme, dass mindestens immer ein Gerät in Betrieb ist) |
| Durchschnittlicher Arbeitsfortschritt | ca. 2.5 m/d (1.25 m/d je Gerät) |
| Sonstige Angaben | Minimal ca. 1.5 m unter Fundamentkante, im Bereich des Cyrenenmergels ca. 14 m unter Fundamentkante (Bauwerk BG T4) |

Tabelle 12: Kenndaten Ankerbohrgeräte

Einwirkbereiche für bauliche Anlagen

Aus der Erschütterungsprognose für das Einbringen der Anker lässt sich ableiten, dass es aufgrund der verhältnismäßig geringen Energie i.d.R. nicht zu einer Beeinträchtigung der Bausubstanz kommen wird. Bei ungünstigen Übertragungsbedingungen können sogenannte leichte Schäden im Sinne der DIN 4150-3 [7] im Nahbereich

der Anker nicht ausgeschlossen werden (Einwirkungsbereich bis zu etwa 15 m). Es ist zu bedenken, dass im Extremfall der Abstand vom Anker zur Fundamentunterkante nur etwa ein bis zwei Meter betragen kann (Am Erlenbruch 124 bis 128).

Einwirkungsbereiche für Menschen in Gebäuden

Aus der Prognose lässt sich ableiten, dass der A_U (unterer Anhaltswert) gemäß Tabelle 1 der DIN 4150-2 [6] durch das Einbringen der Anker in einem Abstand von bis zu etwa 50 m überschritten werden kann. Zur Beurteilung von Bauerschütterungen ist jedoch Tabelle 2 der DIN 4150-2 maßgeblich. Bei einer Beurteilungsdauer (Tage an denen Erschütterungen einwirken, siehe Kapitel 2.1.1) von 26 bis 78 Tagen damit zu rechnen, dass die Anforderungen der DIN 4150-2 ab einem Abstand von etwa 20 m (Stufe II) eingehalten werden.

Einwirkungsbereiche sekundärer Luftschall nach VDI 2719

Im Bereich von Wohngebieten ist bei Holzbalkendecken ab einem Abstand von etwa 50 m mit der Einhaltung der Kriterien für sekundären Luftschall zu rechnen. Bei Mischgebieten liegen diese Abstände bei etwa 30 m.

5 Beurteilung der Erschütterungsimmissionen in den einzelnen Bereichen

Nachfolgend werden die Auswirkungen der Erschütterungen auf Menschen in Gebäuden und auf die baulichen Anlagen für die jeweiligen Teilbereiche entsprechend der in Kapitel 2.1 vorgestellten Normen und Regelwerke beurteilt.

Für den sekundären Luftschall wird Schwelle der Unzumutbarkeit aus den in Kapitel 2.1.3 beschriebenen Anhaltswerten der VDI 2719 abgeleitet. In der Praxis werden (im Fall des primären Luftschalls) kurzzeitige Überschreitungen als zumutbar angesehen. Daher werden in dieser Untersuchung alle Fälle hervorgehoben, bei denen sich eine (rechnerische) Betroffenheit an mehr als 15 Tagen ergibt. Die Ermittlung der tatsächlichen Betroffenheit, ist auf Grundlage von (stichprobenartigen) Messungen festzustellen (siehe Kapitel 7), mit deren Hilfe beurteilt werden kann inwieweit die prognostizierten sekundären Luftschallpegel zutreffend sind. Bei Überschreitungen der Anhaltswerte für sekundären Luftschall könnten Entschädigungsleistungen analog zum Vorgehen beim Baulärm (Abwägungsunterlage Schallschutz Kapitel 2.3) angewendet werden.

Wie bereits in Kapitel 2.2 beschrieben, sind die Erschütterungsprognosen und insbesondere die Prognose des sekundären Luftschalls mit Prognoseunsicherheiten behaftet. Die Berechnungsansätze wurden daher „konservativ“, also zu Gunsten der Anwohner, gewählt sodass die tatsächlichen Immissionen mit hoher Wahrscheinlichkeit geringer ausfallen (wobei nicht auszuschließen ist, dass sich vereinzelt auch höhere Immissionen ergeben können). Die Prognose dient als Abwägungsgrundlage vor der Baumaßnahme, die eventuelle Konflikte aufzeigen soll. Zur Ermittlung der tatsächlichen Immissionen wird in Kapitel 7 ein Messkonzept vorgestellt. Auf Grundlage von Messergebnissen können bei Bedarf weitergehende Schutz- und Ausgleichsmaßnahmen angeordnet werden.

5.1 Teilbereich 1: „Vatterstraße“

Bauzeitliche Verlegung der Stadtbahn

Entsprechend den Ergebnistabellen in Anhang 3 werden unter Berücksichtigung der messtechnisch ermittelten Gebäudeübertragungsfunktionen die Anhaltswerte für Wohngebiete an den nächstgelegenen Wohngebäuden in der Vatterstraße eingehalten.

Da im Rahmen der messtechnischen Ermittlung vor Ort nicht alle Räume des Gebäudes berücksichtigt werden können, werden zur Berechnung außerdem die statistischen Übertragungsfunktionen nach DB-Richtlinie [16] angesetzt. Für den Fall, dass die Deckeneigenresonanzen im Bereich der ersten Bebauungsreihe der Vatterstraße bei ≤ 12.5 Hz liegen, ist zwar mit Überschreitungen der Anhaltswerte der DIN 4150-2 zu rechnen, allerdings beträgt die Erhöhung der Erschütterungen weniger als 25% im Vergleich zum Prognosenullfall, da es im tiefen Frequenzbereich keine nennenswerte Bodendämpfung gibt. Das Kriterium einer wesentlichen Änderung ist somit für den Fall der Erschütterungen nicht erfüllt, zumal Wohnräume mit Deckeneigenresonanzen ≤ 12.5 Hz selten anzutreffen sind.

Bei der bauzeitlichen Verlegung der Stadtbahn werden die Anforderungen für Erschütterungen eingehalten.

Die aus der 24. BImSchV abgeleiteten Kriterien für den sekundären Luftschall werden ebenfalls eingehalten. Die berechneten Beurteilungspegel sind je nach Beurteilungszeitraum 10 bis 20 dB(A) niedriger als der abgeleitete Richtwert.

Baumaßnahmen

Im Bereich der Vatterstraße liegen keine nennenswerten Beeinträchtigungen durch Bauerschütterungen vor. Die Anforderungen der DIN 4150-2 und DIN 4150-3 werden eingehalten, sodass weder mit Gebäudeschäden noch einer unzumutbaren Beeinträchtigung im Sinne der DIN 4150-2 zu rechnen ist. Allerdings ist nicht auszuschließen, dass die Kriterien des sekundären Luftschalls, abgeleitet aus der VDI 2719, in der ersten Gebäudereihe der Vatterstraße nicht eingehalten werden, insbesondere während der Ankerbohrungen auf der Nordseite des Tunnels und während der Verdichtungsarbeiten mit der großen Walze zur Erstellung der Stadtstraße. Unter Berücksichtigung der großen Unsicherheiten bei der Prognose und den eher konservativen Berechnungsansätzen errechnen sich an bis zu etwa 45 Tagen Überschreitungen in der ersten Gebäudereihe. Bei dem begründeten Verdacht, dass es an diesen Gebäuden tatsächlich zu einer deutlichen Beeinträchtigung durch den sekundären Luftschall kommt, ist dieser messtechnisch zu erfassen (siehe Kapitel 7) und bei Überschreitungen sind Minderungsmaßnahmen anzuordnen (siehe Kapitel 6).

5.1.1 Sonderfall Pestalozzischule / Kindertagesstätte

Bauzeitliche Verlegung der Stadtbahn

Das Gebäude der Pestalozzischule stellt mit den großen Deckenspannweiten eine Ausnahme dar. Hier wurden Deckeneigenresonanzen bei etwa 12.5 Hz im zweiten und dritten OG festgestellt [26]. Sowohl auf Grundlage der vor Ort gemessenen Übertragungsfunktionen als auch unter Berücksichtigung der statistischen Übertragungsfunktionen für Betondecken geht hervor, dass die Anhaltswerte für Wohngebiete bei niedrigen Deckeneigenfrequenzen im Bereich der Pestalozzischule überschritten werden. Allerdings beträgt die Erhöhung der Erschütterungsimmissionen weniger als 25% im Vergleich zum Prognosenullfall, sodass mit keiner erheblichen Verschlechterung der Erschütterungssituation zu rechnen ist.

Bei der bauzeitlichen Verlegung der Stadtbahn werden die Anforderungen für Erschütterungen eingehalten.

Die aus der 24. BImSchV abgeleiteten Kriterien für den sekundären Luftschall werden ebenfalls eingehalten. Die berechneten Beurteilungspegel betragen im beurteilungsrelevanten Tageszeitraum 30 dB(A) weniger als die der abgeleitete Richtwert.

Baumaßnahmen

Durch die Baumaßnahmen ist weder mit Gebäudeschäden, noch mit einer unzumutbaren Belästigung durch Erschütterungen zu rechnen. Eine Überschreitung der aus der VDI 2719 abgeleiteten Kriterien für den sekundären Luftschall ist nicht gänzlich auszuschließen, wird aber im Zuge der Berechnungen als sehr unwahrscheinlich eingestuft.

5.2 Teilbereich 2: „Am Erlenbruch“

Bauzeitliche Verlegung der Stadtbahn

Da die Stadtbahn bei der bauzeitlichen Verlegung deutlich von der Wohnbebauung Am Erlenbruch abrückt, verbessert sich die erschütterungstechnische Situation im Fall des Schienenverkehrs, d.h. dass die von der Stadtbahn hervorgerufenen Erschütterungen während der bauzeitlichen Verlegung voraussichtlich sogar unter der üblichen Fühlschwelle liegen.

Baumaßnahmen – DIN 4150-3 (bauliche Anlagen)

Im Fall der Bauerschütterungen können aufgrund der strengeren Anhaltswerte für denkmalgeschützte Gebäude (leichte) Schäden im Sinne der DIN 4150-3 in mehreren Fällen nicht ausgeschlossen werden. Aufgrund des Abstands zum Baufeld trifft dies vor allem für das Gebäude Am Erlenbruch 98 - 100, sowie das Gebäude Am Erlenbruch 124 -128 zu. Bauverfahren, bei denen Überschreitungen der Anhaltswerte nach DIN 4150-2 nicht ausgeschlossen werden können, sind vor allem Verdichtungsarbeiten bei der Überschüttung (Walze 12t), sowie Ankerbohrungen im Nahbereich. Im Fall der Gebäude Am Erlenbruch 124 – 128 und 130-134 können Gebäudeschäden durch die Erstellung der Bohrpfähle und durch die Schlagrammung nicht ausgeschlossen werden. Bei den genannten Bauphasen sind Überwachungsmessungen durchzuführen (siehe Kapitel 7), um somit eventuelle Überschreitungen der Anhaltswerte möglichst zu vermeiden.

Baumaßnahmen – DIN 4150-2 (Menschen in Gebäuden)

Durch die unmittelbare Nähe zum Baufeld ist davon auszugehen, dass an den meisten Gebäuden die Einwirkdauer der Erschütterungen bei durchschnittlich etwa 50 Tagen liegt. Im Fall der Gebäude Am Erlenbruch 124 – 128 und 130-134 beträgt die Einwirkdauer allerdings bis zu über 100 Tagen, da sich einerseits die relativ langsam wandernde Bauphase zur Erstellung der Bohrpfähle in unmittelbarer Nähe befindet, andererseits dieses die Wohngebäude mit dem geringsten Abstand zum möglichen Einsatzort einer Schlagramme sind, welche eventuell auch in einem Abstand von bis zu 200 m spürbar ist. In diesen Fällen werden dennoch die Anhaltswerte angesetzt, die für Bauerschütterungen mit einer Dauer zwischen 26 und 78 Tagen gelten, da die erschütterungsintensiven Bauarbeiten zum einen nicht durchgehend, sondern in zwei Phasen stattfinden und zum anderen, da die DIN 4150-2 keine weiteren Angaben zu Baumaßnahmen mit einer Einwirkdauer von mehr als 78 Tagen macht. In den Datenblättern in Anhang 2 sind Immissionsorte mit Einwirkdauer von mehr als 78 Tagen mit einer roten Schraffierung hervorgehoben.

Nach der Prognose kann für die Gebäude Am Erlenbruch 82 bis 122 nicht ausgeschlossen werden, dass die Zumutbarkeitsgrenze an etwa 1 bis 10 Tagen (entspricht Stufe III, Tabelle 2 der DIN 4150-2) überschritten werden kann. In den Gebäuden Am Erlenbruch 124 – 128 und 130-134 kann es während etwa 10 bis 40 Tagen zu Überschreitungen der Zumutbarkeitsgrenze kommen. Durch Überwachungsmessungen ist nachzuweisen, ob und in welchem Ausmaß es tatsächlich zu einer unzumutbaren Beeinträchtigung kommt, ggf. sind auf Grundlage der Messergebnisse Maßnahmen zur Minderung zu ergreifen oder ggf. Entschädigungen zu leisten (Vgl. Kapitel 6 und 7).

Baumaßnahmen – Sekundärer Luftschall

Durch die unmittelbare Nähe zum Baufeld, ist davon auszugehen, dass es an den Wohngebäuden der Straße Am Erlenbruch während der Bauzeit an mehreren Tagen zu Überschreitungen der aus der VDI-Richtlinie 2719 abgeleiteten Kriterien für sekundären Luftschall kommt. Je nach Baufortschritt betragen die ermittelten Überschreitungsdauern durchschnittlich etwa 55 und maximal bis zu etwa 90 Tage (Am Erlenbruch 130). Wie auch im Fall der Erschütterungen ist messtechnisch zu überprüfen, wie hoch die tatsächliche Belastung während der Bauzeit ist (siehe Kapitel 7), bei Überschreitungen sind Minderungsmaßnahmen (Kapitel 6) zu prüfen.

5.3 Teilbereich 3: „Borsigallee“

Bauzeitliche Verlegung der Stadtbahn

Der Bereich der Borsigallee ist nicht von der bauzeitlichen Verlegung der Stadtbahn betroffen, sodass sich hier keine Veränderung der erschütterungstechnischen Situation ergibt.

Baumaßnahmen – DIN 4150-3 (bauliche Anlagen)

Aufgrund der verhältnismäßig hohen Anhaltswerte für Industriebauten bzw. gewerblich genutzte Gebäude ist davon auszugehen, dass die Anhaltswerte der DIN 4150-3 eingehalten werden.

Baumaßnahmen – DIN 4150-2 (Menschen in Gebäuden)

Die Beurteilungskriterien gemäß DIN 4150-2 sind nur auf Wohngebäude oder ähnlich genutzte Gebäude anzuwenden.

Hinweis: In den Datenblättern (Anhang 2) wird informativ auch für die gewerblich genutzten Bauten angegeben an wie vielen Tagen es zu Überschreitungen der Anhaltswerte der DIN 4150-2 kommen würde.

Baumaßnahmen – Sekundärer Luftschall

Im Fall des sekundären Luftschalls sind die aus der VDI-Richtlinie 2719 abgeleiteten Kriterien anzuwenden. Entsprechend der Prognoseberechnung ist an den nächstgelegenen Gebäuden in der Borsigallee an bis zu etwa 30 bis 45 Tagen mit Überschreitungen der Kriterien für den sekundären Luftschall zu rechnen. Sollte sich während der Bauausführung z.B. durch Messungen an Nachbargebäuden oder Beschwerden der begründete Verdacht ergeben, dass die Kriterien des sekundären Luftschalls tatsächlich überschritten werden, so ist zumindest eine messtechnische Ermittlung des sekundären Luftschalls in diesem Bereich vorzusehen.

Baumaßnahmen – Beurteilung der Archivgebäude

An den Archivgebäuden kann insbesondere während der Schlagrammung und der Verdichtungsarbeiten mit einer schweren Walze nicht ausgeschlossen werden, dass es zu einer Überschreitung vorläufig der als zulässig definierten Schwingschnellen kommt (siehe in Anhang 5). Es ist durch Messungen und ggf. weitergehende Maßnahmen sicherzustellen, dass es durch Baumaßnahmen zu keiner Beeinträchtigung der Exponate kommt.

6 Schutzmaßnahmen

Bauzeitliche Verlegung der Stadtbahn

Im Fall der bauzeitlichen Verlegung der Stadtbahn wurde davon ausgegangen, dass ein aus erschütterungstechnischer Sicht zum jetzigen Zustand gleichwertiger Oberbau verbaut wird. Bei einwandfreier Bauausführung sind keine weiteren Schutzmaßnahmen notwendig. Es ist zu beachten, dass die Position der Weichen zum derzeitigen Planungsstand günstig ist, da diese im Verhältnis zum nächstgelegenen Punkt der Strecke relativ weit vom nächstgelegenen Wohngebäude entfernt sind. Sollte die Lage der Weichen zu einem späteren Planungsstand verändert werden, ist zu prüfen, inwiefern dies Einfluss auf die Erschütterungsprognose für den Schienenverkehr haben kann.

Baumaßnahmen – bereits berücksichtigte Minderungsmaßnahmen

Für die Durchführung der Baumaßnahmen, wurden bereits in vorangegangenen Planungsschritten Maßnahmen zum Schutz der Anwohner getroffen. Diese bereits berücksichtigten Maßnahmen sind:

- Die Bauarbeiten werden ausschließlich zwischen 7:00 und 20:00 Uhr und damit vollständig im Tageszeitraum der DIN 4150-2 durchgeführt.
- Die tägliche Betriebszeit erschütterungsintensiver Baumaschinen wird auf acht Stunden am Tag begrenzt.
- Verwendung möglichst erschütterungsarmer Verfahren, vor allem der weitgehende Ersatz einer Schlagramme durch das Einpressverfahren

Baumaßnahmen – Minderungsmaßnahmen an der Quelle

In einigen Fällen können besonders erschütterungsintensive Arbeiten aufgrund der technischen Machbarkeit bzw. der wirtschaftlichen Verhältnismäßigkeit nicht ausgeschlossen werden. Hierzu zählen vor allem die Schlagrammung oder Verdichtungsarbeiten mit relativ schweren Rüttelwalzen, wie sie im Straßenbau üblich sind. Hier sollte die Leistung der Geräte möglichst gering gehalten werden.

Es empfiehlt sich, z.B. die Rammungen mit einer besonders geringen Leistung zu beginnen und mit Hilfe der Überwachungsmessungen bis auf ein noch akzeptables Maß zu erhöhen. Es wird darauf hingewiesen, dass für den vorliegenden Fall davon auszugehen ist, dass Verwendung einer Schlagramme zumindest bezüglich möglicher Bauwerksschäden günstiger ist als die Verwendung einer Vibrationsramme.

Im Fall der Rüttelwalze kann die Betroffenheit bei der Verwendung einer leichteren Walze verringert werden (sofern sich die Einsatzzeit der Walze dadurch nicht wesentlich verlängert), allerdings können auch bei Verdichtungsarbeiten mit einer 7.5 t – Walze Gebäudeschäden und unzumutbare Belästigungen nicht ausgeschlossen werden.

Baumaßnahmen – Weitere Minderungsmaßnahmen

Im vorliegenden Fall können aufgrund des teilweise sehr geringen Abstands zu den nächstgelegenen Gebäuden keine Minderungsmaßnahmen im Ausbreitungsweg realisiert werden. Auch Minderungsmaßnahmen am Gebäude, wie z.B. eine elastische Lagerung sind bei Bestandsgebäuden nicht mit einem vertretbaren Aufwand realisierbar.

Um die Beeinträchtigung für die Anwohner zu mindern, nennt die DIN 4150-2 folgende Maßnahmen:

- 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

Der Nachweis der tatsächlich auftretenden Erschütterungen kann vor allem mithilfe von Messungen erfolgen. Im Kapitel 7 wird das Messkonzept vorgestellt.

7 Messkonzept

Auf Grundlage der Prognoseberechnungen können während der Baumaßnahmen in bestimmten Phasen weder Gebäudeschäden noch unzumutbare Belästigungen durch Erschütterungen und sekundären Luftschall an den nächstgelegenen Gebäuden ausgeschlossen werden. Daher wird ein Messkonzept vorgestellt, mit dem die tatsächlichen Erschütterungsimmissionen ermittelt und dokumentiert werden können. Auf dieser Grundlage können ggf. Maßnahmen ergriffen werden, um die Erschütterungseinwirkungen während des Bauablaufs zu minimieren. Falls keine verhältnismäßigen Maßnahmen zur Verfügung stehen, oder trotz Minderungsmaßnahmen mit einer unzumutbaren Beeinträchtigung zu rechnen ist, können die Messdaten eine Grundlage zur Abwägung von Ausgleichsmaßnahmen darstellen.

Die Messungen erfüllen verschiedene Funktionen und sind dementsprechend durchzuführen und auszuwerten. Es wird empfohlen, an zwei Wohngebäuden Dauermesspunkte zu installieren, mit deren Hilfe die tatsächliche Erschütterungseinwirkung auf Menschen in Gebäuden nach DIN 4150-2 ermittelt werden kann.

Aufgrund ihrer Nähe zur Baustelle werden vor allem die beiden Gebäude Am Erlenbruch 98 – 100 und Am Erlenbruch 130 – 134 als geeignet angesehen. Bei erschütterungsintensiven Arbeiten, bei denen Gebäudeschäden an den genannten Gebäuden nicht ausgeschlossen werden können, sollte eine bemannte Messung stattfinden, um ggf. die Erschütterungsintensität der Bauverfahren auf ein akzeptables Maß anpassen zu können. Im Gebäude Am Erlenbruch 128 sind außerdem mindestens stichprobenartige Messungen bei der Erstellung der Bohrpfähle, während der Ankerbohrungen und während der Schlagrammung durchzuführen. An diesen Gebäuden ist außerdem eine Aussage dazu zu treffen, inwiefern die Kriterien des sekundären Luftschalls eingehalten werden. Es empfiehlt sich, hierzu zumindest orientierende Luftschallmessungen vorzunehmen, um zu überprüfen inwiefern die für den Schienenverkehr festgestellten Korrelationen zwischen Schwingschnelle an der Deckenfeldmitte und dem Luftschallpegel im Raum auch bei Bauerschütterungen im vorliegenden Fall anwendbar sind.

Sollte sich herausstellen, dass die Anforderungen der DIN 4150-3 an den nächstgelegenen Gebäuden nicht eingehalten werden können oder dass mit einer unzumutbaren Beeinträchtigung aufgrund von Erschütterungen oder sekundärem Luftschall zu rechnen ist, sind weitergehende stichprobenartige Messungen an den weiter entfernten Wohngebäuden durchzuführen (z.B. Görresstraße, Karl-Marx-Straße, Lahmeyerstraße, etc.), um aus den Dauermessungen Rückschlüsse auf den tatsächlichen Einwirkungsbereich der Baustelle ziehen zu können.

Bei dem begründeten Verdacht, dass es im Bereich der Vatterstraße oder im Bereich der Borsigallee zu erheblichen oder unzumutbaren Beeinträchtigungen durch die Bauverfahren kommt, sind geeignete stichprobenartige Messungen an diesen Stellen durchzuführen.

Für die Dauerüberwachungen eignen sich vor allem leerstehende Wohnungen oder wenig benutzte aber repräsentative Räume im Gebäude, da dort Störsignale weitgehend vermieden werden. Es ist außerdem eine geeignete Methodik zu wählen, um bei unbemannten Messungen Korrelationen zur Baustelle herstellen zu können.

Neben den Messungen ist außerdem zur Feststellung möglicher Gebäudeschäden eine Beweissicherung zur Dokumentation des Ist-Zustandes (vor der Baumaßnahme) an potenziell gefährdeten Gebäuden vorzusehen. Es wird empfohlen die Beweissicherung mindestens im Bereich an den nächstgelegenen Gebäudereihen durchzuführen, was im Bereich der Wächtersbacher Str., der Borsigallee und der Vatterstraße aus erschütterungstechnischer Sicht als ausreichend erscheint. Südlich des Tunnelbauwerks sollten zusätzlich zur ersten Bebauungsreihe (Am Erlenbruch 76 bis 134) auch Gebäude in den Nebenstraßen bis zur Lassallestraße bei der Beweissicherung berücksichtigt werden.

Es ist zu beachten, dass für die Museumsarchive an der Borsigallee 8 ein eigenes Immissionsschutzkonzept gilt, bei dem ebenfalls dauerhafte Überwachungen während der Bauzeit vorzusehen sind und wofür sich ggf. zumindest eine stichprobenartige Dokumentation des Zustandes verschiedener Museumsobjekte anbietet (falls dies nicht ohnehin schon von den Museumsarchiven dokumentiert ist).

8 Zusammenfassung

Im Zuge des Neubaus der BAB 66 finden im Teilbereich Riederwaldtunnel für eine Dauer von etwa acht Jahren umfangreiche Baumaßnahmen auf einer Länge von etwa zwei Kilometern statt, bei denen zum einen eine Autobahnverbindung zwischen der A66 und der A661 hergestellt wird und zum anderen die über dem Tunnel liegenden Stadtstraßen teilweise erneuert werden.

Erschütterungsintensive Baumaßnahmen und die zeitweise Verlegung der Stadtbahn sind anhand einschlägiger Regelwerke erschütterungstechnisch zu beurteilen, daher war eine Prognose über die zu erwartenden Erschütterungsimmissionen an der umliegenden Bebauung zu erstellen. Es wird unterschieden in Einwirkungen auf bauliche Anlagen [7], Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden [6] und sekundären Luftschall [8], [9]. Außerdem befinden sich im Einwirkbereich der Baustelle Museumsarchive, für die keine festgelegten Beurteilungsmaßstäbe vorliegen, weshalb hierfür ein eigenes Immissionsschutzkonzept erstellt wurde (Anhang 5).

Aus der Prognoseberechnung zur bauzeitlichen Verlegung der Stadtbahn ergibt sich, dass die Anforderungen für Erschütterungen und den sekundären Luftschall im Untersuchungsgebiet eingehalten werden.

Bei der Prognose der Erschütterungsimmissionen aus dem Baubetrieb, die naturgemäß zum jetzigen Zeitpunkt eine relativ geringe Präzision aufweist, können bei den nahegelegenen Gebäuden am Erlenbruch weder Gebäudeschäden im Sinne der DIN 4150-3 noch unzumutbare Beeinträchtigungen ausgeschlossen werden.

Um die Beeinträchtigungen zu reduzieren, werden die Baumaßnahmen ausschließlich im Tageszeitraum durchgeführt, es wird weitestgehend auf emissionsarme Bauverfahren zurückgegriffen und es findet eine umfangreiche erschütterungstechnische Überwachung der Baustelle durch Messungen statt. Die Messungen dienen dazu, nach Möglichkeit Einfluss auf den Bauablauf zu nehmen, um die Intensität der Erschütterungen zu verringern, zumindest aber zu dokumentieren.

Ebenso ist durch Messungen und falls nötig weitergehende Maßnahmen sicherzustellen, dass durch die Baumaßnahmen keine Schäden an den Exponaten im Bereich der Museumsarchive auftreten.

OBERMEYER Planen + Beraten

Institut für Umweltschutz und Bauphysik

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

i. A. Andreas Frücht, B.Sc.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) in der aktuell gültigen Fassung.
- [2] Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Schutz gegen Baulärm – Geräuschmmissionen – vom 19. August 1970.
- [3] Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm) vom August 1998.
- [4] Verordnung über die bauliche Nutzung der Grundstücke (Baunutzungsverordnung – BauNVO) vom 23. Januar 1990.
- [5] DIN 4150 Teil 1 „Erschütterungen im Bauwesen – Vorermittlung von Schwingungsgrößen“ von 2001
- [6] DIN 4150 Teil 2 „Erschütterungen im Bauwesen – Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden“ von 1999
- [7] DIN 4150 Teil 3 „Erschütterungen im Bauwesen – Einwirkungen auf bauliche Anlagen“ von 2016
- [8] 24. BImSchV Verkehrswege-Schallschutzmaßnahmen Verordnung von 1990
- [9] VDI-Richtlinie 2719 „Schalldämmung von Fenstern und deren Zusatzeinrichtungen“ vom August 1987
- [10] Melke (Landesanstalt für Immissionsschutz Nordrhein-Westfalen) LIS-Berichte Nr. 107 „Durchführung von Immissionsprognosen für Schwingungs- und Körperschalleinwirkungen“ von 1992
- [11] Melke (Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen) Materialien Nr. 22 „Erschütterungen und Körperschall des landgebundenen Verkehrs - Prognose und Schutzmaßnahmen“ von 1995
- [12] Rockhill et al. (Cambridge University Engineering Department) „Ground-borne vibrations due to press-in piling operations“ von 2003
- [13] Said (Obermeyer Planen + Beraten GmbH) „Spektrale Korrelationsfunktionen zur Ermittlung des sekundären Luftschalls aus dem Schienenverkehr“ von 2003
- [14] Achmus et al. (Institut für Bauforschung e.V. Hannover) „Bauwerkserschütterungen durch Tiefbauarbeiten“ von 2006
- [15] VDI-Richtlinie 3837 „Erschütterungen in der Umgebung von oberirdischen Schienenverkehrswegen – Spektrales Prognoseverfahren“ von 2013
- [16] DB Richtlinie 820.2050 „Erschütterungen und sekundärer Luftschall“ gültig ab 01.01.2017
- [17] Messberichte zu den Proberammungen (Einbringen und Ziehen der Spundwände) im Bereich des Riederwaldtunnels erstellt durch das Ingenieurbüro Schütz aus den Jahren 2013 und 2014
- [18] Planfeststellungsbeschluss gemäß § 18 AEG für das Vorhaben „Stuttgart 21, PFA 1.3a (Neubaustrecke mit Station NBS L 1192/ L 1204, Südumgehung Plieningen)“ vom 14.07.2016
- [19] BVerwG, Urteil vom 21. Dezember 2010 – 7 A 14/09 -, Rn. 41, juris
- [20] BVerwG, Urteil vom 10. Juli 2012 – 7 A 12/11 -, Rn. 72, juris

- [21] DIN 45669-1, Messung von Schwingungsimmissionen -. Teil 1: Schwingungsmesser – Anforderungen und Prüfungen vom September 2010
- [22] DIN 45669-2, Messung von Schwingungsimmissionen – Teil 2: Messverfahren vom Juni 2005
- [23] Erschütterungsmessungen im Verlauf der Einbringung einer Spundwand mit einem Crush-Piler am Landwehrkanal in Berlin Kreuzberg, Gutachten Nr. 5164.1-10 der BeSB GmbH Berlin vom Mai 2010
- [24] Said, Grütz, Garburg (Zeitschrift für Lärmbekämpfung Ausgabe 53) „Ermittlung des sekundären Luftschalls aus dem Schienenverkehr“; Heft Nr. 1 vom Januar 2006
- [25] Messbericht Mai 2016 zur Ermittlung der bestehenden Erschütterungsexposition ausgewählter Objekte an den Archivgebäuden der Borsigallee 8, erstellt durch OBERMEYER Planen + Beraten GmbH
- [26] Messbericht August 2016 zur Ermittlung von Gebäudeübertragungsfunktionen, Erschütterungsausbreitung an der Erdoberfläche und Emissionen der Stadtbahn, erstellt durch OBERMEYER Planen + Beraten GmbH