

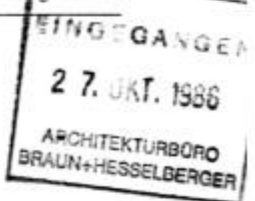
*In Ordnung, an eine aufgeschaltete gute
und harmonische Zusammenarbeit* *Trüben*

Entwurf - Berechnung - Ausführung

Bauingenieur

© Springer-Verlag 1986

Bauingenieur 61 (1986) 427-435



Errichtung eines Wohn- und Geschäftshauses im innerstädtischen Bereich mit teilweiser Gründung auf einem S-Bahn-Tunnel

H. Grundmann, F. H. Müller, R. Müller und A. Staller, München

1 Beschreibung der Baumaßnahme

Im Zuge des Verkehrsausbauers vor den Olympischen Spielen 1972 entstand die Münchner S-Bahn und mit ihr eine Schnellbahnverbindung zwischen Haupt- und Ostbahnhof.

Diese unterirdische Linie verläuft teilweise in geringer Tiefe quer durch die Innenstadt. Ihre Erstellung in offener Baugrube hinterließ u. a. die ca. 85 m lange Baulücke an der Rosenheimer Straße im Münchner Stadtteil Haidhausen (Bild 1).



Bild 1. Baulücke an der Rosenheimer Straße

Im Rahmen der städtebaulichen Sanierung Haidhausens sollte diese Baulücke nach über einem Jahrzehnt geschlossen werden. Das Bebauungsprogramm sah in den vier Obergeschossen und dem Dachgeschoß Wohnungen des sozialen Wohnungsbaues vor. Das Erdgeschoß sollte Läden, eine Gaststätte mit Bürgersaal und Büros beherbergen. Wo es die Lage des Tunnels erlaubte, sollte eine Tiefgarage angelegt werden.

Die Besonderheiten dieser Baumaßnahme liegen im Untergrund, den Beschränkungen hinsichtlich der Belastbarkeit des S-Bahn-Tunnels und den Schwingungsanregungen, die von der S-Bahn ausgehen (Bild 2):

- Der S-Bahn-Tunnel verläuft in einer Tiefe von nur ca. 2,5 m bis 4,5 m unter GOK schräg durch das Grundstück. Außerdem befand sich im Grundstück um die Jahrhun-

dertwende eine Sandgrube, die später mit losem Material verfüllt wurde. In beiden Bereichen sind die Lastabtragungsmöglichkeiten stark eingeschränkt.

- Der Körperschallübergang aus dem S-Bahn-Tunnel mußte durch besondere Maßnahmen auf ein zumutbares Maß begrenzt werden. Die erheblichen Belästigungen in den bestehenden Nachbargebäuden durch Erschütterung und Körperschall zeigen dies deutlich.

Die folgenden Grundsatzentscheidungen mußten sich diesen Besonderheiten unterordnen:

- Stellung und Größe der einzelnen Baukörper
- Lage der Erschließungstürme
- Wahl der Tragkonstruktionen
- Wahl des Innenausbauers.

Eine Reihe von Tragmodellen wurde gemeinsam mit den planenden Architekten diskutiert. Dabei wurde klar, daß nur eine sehr leichte und anpassungsfähige Konstruktion den statischen und wirtschaftlichen Anforderungen genügen konnte.

Eine brückenartige Überbauung des Tunnels war nicht möglich, da dieser Eingriff die gesamte Breite der Rosenheimer Straße betroffen und eine längere Sperrung dieser wichtigen Ausfallstraße notwendig gemacht hätte.

Voruntersuchungen von im Gebäude integrierten weitgespannten Trag- und Hängewerken ergaben kaum lösbare technische Schwierigkeiten und hohe Kosten.

Als technisch machbar und wirtschaftlich sinnvoll stellte sich eine Konstruktion heraus (Bild 3), bei der die Gebäude-lasten in den kritischen Bereichen auf die Kellerlängs- und -querwände abgegeben werden, die als tragende Elemente eines Rostes die Gebäudelasten auf die Tunnelwände und die zur Herstellung des Tunnels verwendeten Stahlbeton-Schlitzwände sowie Großbohrpfähle weiterleiten. Setzungs-unterschiede zwischen Tunnelwand und Schlitzwand werden - zum Schutz der dazwischenliegenden Wandisolierung - durch die Anordnung von Lastverteilungsbalken längs der Nahtstelle vermieden.

Das darüberliegende Tragwerk mit sechs Geschossen wird aus Stahlstützen, Stahlvollwandträgern, normalen Verbunddecken für die Decke über dem Kellergeschoß und sehr leichten Verbunddecken - System HAMBRO - mit nur 7 cm dicken Stahlbetonplatten [1, 2] für die Geschoßdecken gebildet (Bild 4).

Die Aussteifung erfolgt über Deckenscheiben und Vertikalverbände sowie durch Anbindungen an die Erschließungstürme. Weitere konstruktive Einzelheiten, vor allem in bezug auf den Innenausbau, enthalten [3] und [4].

Bereits im Vorentwurfstadium wurde eine konsequente Abtrennung der aufgehenden Geschosse in Höhe der Unterkante der Decke über dem Kellergeschoß aus Gründen des Körperschallschutzes vorgesehen. Eine Ausnahme wurde

Prof. Dr.-Ing. H. Grundmann ist Inhaber des Lehrstuhls für Baumechanik an der Technischen Universität München. Dr.-Ing. F. H. Müller war seinerzeit wissenschaftlicher Assistent an diesem Institut. Dr.-Ing. R. Müller ist Inhaber des gleichnamigen Ingenieurbüros für Baustatik, Baudynamik und Baukonstruktion. Dr.-Ing. A. Staller ist Mitinhaber des für die Tragwerksplanung des Bauwerkes verantwortlichen Ingenieurbüros Suess u. Staller.

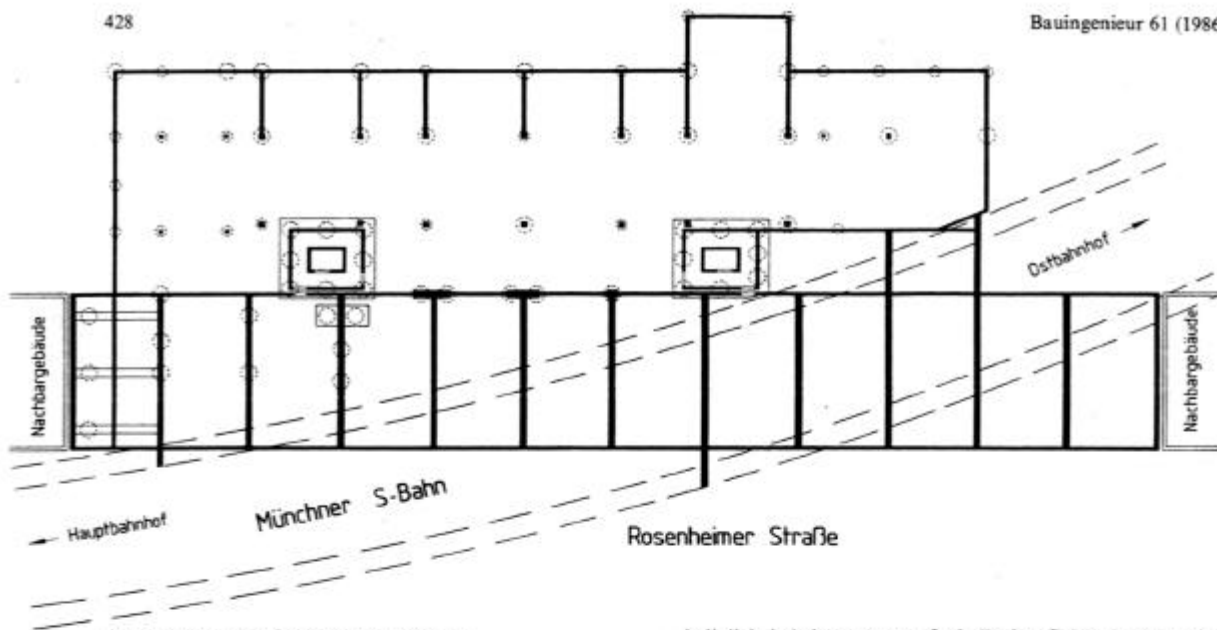


Bild 2. Kellergeschoß mit Lage der S-Bahn

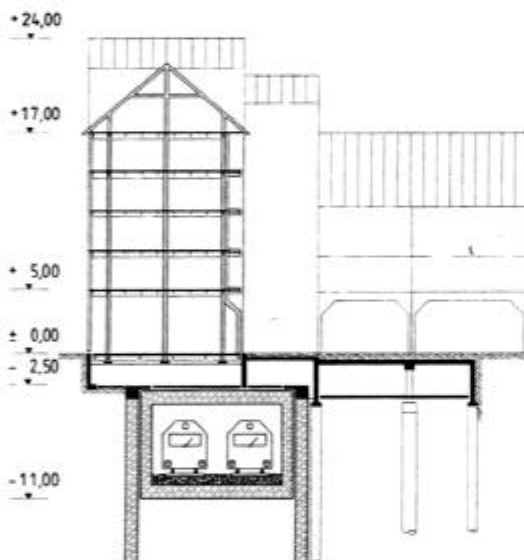


Bild 3. Schnitt durch Haus und S-Bahn-Tunnel

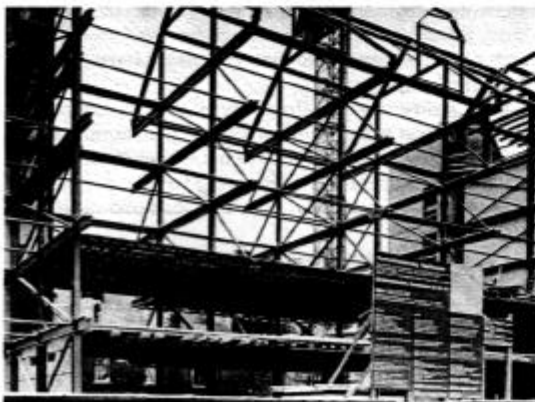


Bild 4. Stahlskelett mit Erschließungsturm

lediglich bei den etwas außerhalb der Gebäude stehenden Erschließungstürmen gemacht.

An sämtlichen Verbindungspunkten zur Abtragung von Vertikal- oder Horizontallasten zwischen dem massiven Kellergeschoß und den Erschließungstürmen einerseits und dem Stahlskelett andererseits wurden zur Hemmung des Körperschallüberganges dicke Elastomer-Lager spezieller Anfertigung vorgesehen.

Genauere Untersuchungen im Rahmen des vom Bauherrn in Auftrag gegebenen schwingungstechnischen Gutachtens zeigten, daß umfassende Maßnahmen zur Körperschalldämmung aufgrund der Eigenart des Gebäudes und der Stärke der Körperschallanregung notwendig waren.

2 Auf das Gebäude einwirkende Erschütterungen und Körperschallschwingungen

Der S-Bahn-Tunnel ist mit einem normalen ungedämmten Gleisbett mit Schotterlage ausgeführt und überträgt dadurch erhebliche Erschütterungen auf das umgebende Erdreich und die bestehenden Gebäude. Der zweigleisige Tunnel wird tagsüber in der Zeit von 6 Uhr bis 22 Uhr von ca. 540 Zügen und nachts in der Zeit von 22 Uhr bis 6 Uhr von ca. 80 Zügen befahren bei einer Ruhepause zwischen 1 Uhr und 4 Uhr. Die Züge folgen während der Hauptverkehrszeiten in minimalen Abständen von weniger als 2 Minuten aufeinander.

Um die an den Kontaktstellen zwischen dem Tunnel und dem aufgehenden Gebäude zu erwartenden Erschütterungen auch quantitativ bestimmen zu können, wurden vor Beginn der Detailplanungen Messungen der Körperschallschwingungen in den Kellern der direkt angrenzenden Gebäude vom Materialprüfungsamt für das Bauwesen der Technischen Universität München im Auftrag des Bauherrn durchgeführt.

In den Bildern 5 bzw. 6 ist ein typischer Zeitverlauf der Erschütterungen infolge einer Zugvorbeifahrt bzw. das dazugehörige Spektrum der quadrierten Amplituden einer Fourieranalyse dargestellt, aufgenommen quer zur Kellerwand eines der in direktem Kontakt mit dem Tunnel stehenden Nachbargebäude.

Die gemessenen Erschütterungen, die gut mit den später an den Lastverteilungsbalken im Untergeschoß festgestellten übereinstimmen, sind so erheblich, daß sie in den Oberg-

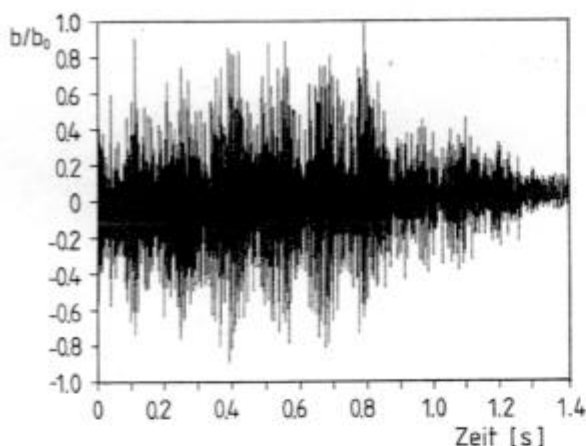


Bild 5. Normierter Beschleunigungsverlauf b/b_0 während einer Zugvorbeifahrt, gemessen quer zu Kellerwand des Gebäudes Rosenheimerstraße 133

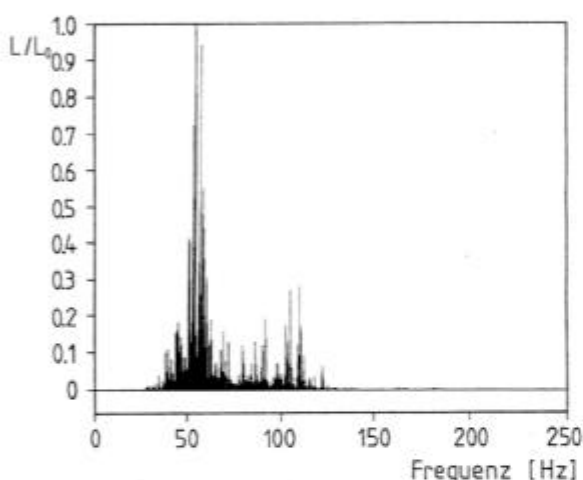


Bild 6. Normiertes Spektrum L/L_0 der Quadrate der Fourieramplituden für den in Bild 5 dargestellten Beschleunigungsverlauf

schossen der bestehenden Nachbargebäude spürbare Vibrationen sowie unangenehme dumpfe, rumpelnde Geräusche, in denen die einzelnen Waggonen noch deutlich zu unterscheiden sind, hervorgerufen.

Aus Bild 6 ist zu ersehen, daß die energiereichsten und damit für die schwingungstechnische Dimensionierung des aufgehenden Gebäudes maßgebenden Anregungen im Bereich von ca. 50–ca. 80 Hz liegen. Die aus den Messungen ermittelten maximalen Terzpegel (für ein Terzintervall ermittelte Summenpegel) lagen bei ca. 68–70 dB(v).

Die höherfrequenten Anregungsanteile, die in der dargestellten Aufzeichnung teilweise herausgefiltert waren, in anderen Messungen jedoch erfaßt wurden, waren für die Auslegung nicht ausschlaggebend.

Ein Spektrum (Periodogramm), wie das in Bild 6 dargestellte, ist für eine umfassende Beurteilung der Gesamtheit aller Störungen noch ungeeignet. Vielmehr sind die Einzelergebnisse einer Reihe von Fourieranalysen für eine Weiterverarbeitung noch geeigneten Mittelungen nach statistischen Gesichtspunkten zu unterwerfen.

Mit verschiedenen Vereinfachungen wurde das Terzpegeldiagramm in Bild 7 als Bemessungsgrundlage für die vorliegende Aufgabe aus den Ergebnissen der Körperschallmessungen in den Nachbargebäuden sowie aus weiteren Meßergebnissen, die von vergleichbaren anderen Meßstellen derselben Tunnelstrecke vorlagen, abgeleitet.

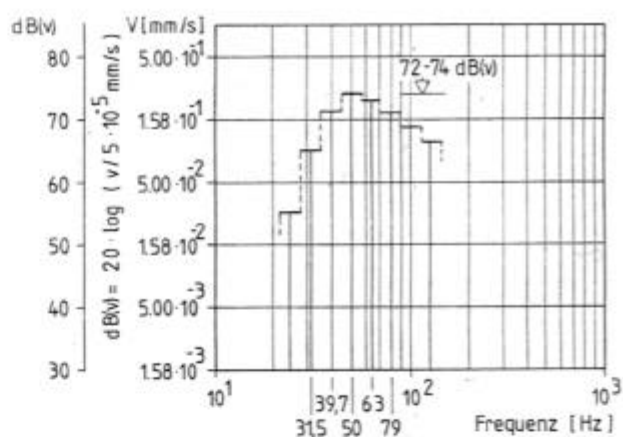


Bild 7. Terzpegeldiagramm der erwarteten mittleren Maximalpegel in Höhe der Tunneldecke als Grundlage für die Bemessung der Dämmvorkehrungen

Bei der Festlegung dieses Diagrammes wurden Sicherheitszuschläge wegen der Entfernung der Meßpunkte zu den Kontaktstellen zwischen Tunnel und Lastverteilungsbalken, wegen der Kürze der Meßzeit und wegen eventuell künftig eintretender Verschlechterungen des Schienen- und Schotterbettzustandes im Tunnel gemacht.

Das Diagramm diente als Grundlage für die weiteren Untersuchungen und damit für die Dimensionierung der Dämm-Maßnahmen. Aufgetragen sind die den einzelnen Terzen mit z. B. 40, 50, 63, oder 79 Hz Mittenfrequenz jeweils zugeordneten zu erwartenden mittleren Maximalpegel als Summenpegel in dB(v) bzw. in mm/s. Die maximal zu erwartenden Pegel wurden auf 72–74 dB(v) festgesetzt.

3 Anforderungen bzw. Zielwerte hinsichtlich des Schall- und Erschütterungsschutzes

Maßgebend für das Geräuschempfinden des Menschen ist letztlich der aus einer Überlagerung sämtlicher Frequenzanteile aller abstrahlenden Flächen im Raum entstehende Summenleistungspegel, wobei das menschliche Gehörorgan jeden einzelnen Frequenzanteil unterschiedlich verarbeitet, was durch die sog. A-Bewertung angenähert berücksichtigt wird.

Auf seinem Weg durch das Bauwerk wird jeder einzelne Frequenzanteil (bzw. Terzpegel) unterschiedlich umgewandelt und schließlich abgestrahlt.

Dieser sog. abgestrahlte Luftschall ist durch die Dämmvorkehrungen auf ein zumutbares Maß zu reduzieren, das sich an den einschlägigen Richtlinien orientiert. Zielwerte für den durch die S-Bahn hervorgerufenen abgestrahlten Luftschall waren dabei die Pegelwerte nach der VDI-Richtlinie 2719 [5], die abhängig von der Nutzungsart des Raumes folgende maximale Pegelwerte in dB(A) vorschreibt (Tabelle 1):

Tabelle 1. Zulässige Pegelwerte in dB(A) nach VDI RiLi 2719 [5]

<i>Erdgeschoß (Geschäftsbereich):</i>	tagsüber	nachts
Mittlerer Maximalpegel:	45–55	–
Beurteilungspegel		
DIN 45641:	35–45	–
<i>Obergeschoße (Wohnbereiche):</i>		
Mittlerer Maximalpegel:	45–50	40–45
Beurteilungspegel:	35–40	30–35

Zielwerte für die im Gebäude auftretenden Erschütterungen waren die sog. KB-Werte nach DIN 4150 Vornorm [6], denen je nach der Frequenz der auftretenden Schwingung und der Nutzungsart des Raumes maximal zulässige Amplituden der Schwingung zugeordnet sind. Dabei sollte die Fühlschwelle des Menschen ($KB = 0,1$) möglichst nicht überschritten werden.

4 Ausgeführte Maßnahmen zur Dämmung der Erschütterungen und Körperschallschwingungen

Um eine wirtschaftliche und dennoch möglichst gute Abschirmung des Gebäudes gegenüber den von der S-Bahn ausgehenden Körperschallschwingungen zu erreichen, wurde das Gebäude entsprechend der vorgesehenen Nutzung und den unterschiedlichen Anforderungen in drei Dämmzonen eingeteilt.

4.1 Zone 1

Hierunter fallen im wesentlichen alle Untergeschoßbereiche sowie die Treppenhäustürme.

In dieser Zone wurden Maßnahmen ergriffen, um ein Eindringen von Störungen auf ein möglichst niedriges Niveau zu begrenzen. So wurden nur die statisch unbedingt notwendigen Kontaktstellen zwischen dem tragenden Untergeschoß aus Stahlbetonwänden und -querscheiben und den Lastverteilungsbalken über den Tunnelaußenwänden ungedämmt belassen. Sämtliche übrigen Berührungsflächen zwischen den Bodenplatten und den Wänden und Stützen sowie zwischen dem anstehenden Erdreich und den Wänden bzw. den Fundamenten zwischen den Pfählen wurden durch weiche verrottungsbeständige Mineralfilztrennlagen abgedämmt.

4.2 Zone 2

In diese Zone fallen die als Läden, Büros und Gaststätten gewerblich genutzten Räume des Erdgeschosses sowie das gesamte tragende Stahlskelett und die Brandwände.

Folgende Maßnahmen wurden für diese Bereiche ergriffen:

- Das gesamte aufgehende Gebäude wurde unterhalb der Decke über dem Untergeschoß von dem Stahlbetontragwerk im Untergeschoß vollständig abgetrennt.
- An sämtlichen Auflagerpunkten des aufgehenden Stahlskeletts, an denen vertikale oder horizontale Kräfte an die Unterkonstruktion abgegeben werden müssen, wurden speziell angefertigte dicke Elastomerlager zwischen geschaltet (Bild 8).



Bild 8. Elastomerlager am Übergang zum Stahlskelett

- Jeglicher direkte harte Kontakt zwischen der Decke über dem Untergeschoß und Bauteilen der Zone 1 im Untergeschoß sowie dem umgebenden Gelände mußte vermieden werden, um Körperschallbrücken weitgehend auszuschließen – dies galt auch für sämtliche Installationsleitungen und Schächte, die die Zonen 1 und 2 miteinander verbinden.
- Der schwimmende Estrich auf der Decke über dem Untergeschoß wurde in seinem Aufbau so abgestimmt, daß von der in die Deckenkonstruktion eingetragenen Schwingungsenergie möglichst wenig nach oben abgestrahlt wird.

4.3 Zone 3

Dieser Zone sind entsprechend den höheren Anforderungen an den Schall- und Erschütterungsschutz sämtliche Wohnbereiche der Obergeschosse zugeordnet. Hier wurden u. a. folgende Dämmvorkehrungen getroffen:

- Die einzelnen Wohnbereiche sind angesichts der starken Anregung und der hohen Anforderungen schwingungstechnisch als in sich geschlossene und eigens abgedämmte Zellen ausgebildet. Dazu wurden unter den Auflagern der Gitterträger der Verbunddecken am Stahlskelett einzelne gerippte Elastomerlager vorgesehen und jeglicher übrige Kontakt zum Stahlskelett vermieden (Bild 9). So wurden z. B. die Gipskartontrennwände an ihren Auflagerlinien von dem Stahlskelett durch weiche Zwischenlager getrennt.
- Sämtliche Wände, Fassaden und Fensterflächen im Erdgeschoß stehen auf der Decke über dem Untergeschoß auf einzelnen weichen Gummipuffern, um eine Körperschallübertragung aus der Zone 2 möglichst zu vermeiden.

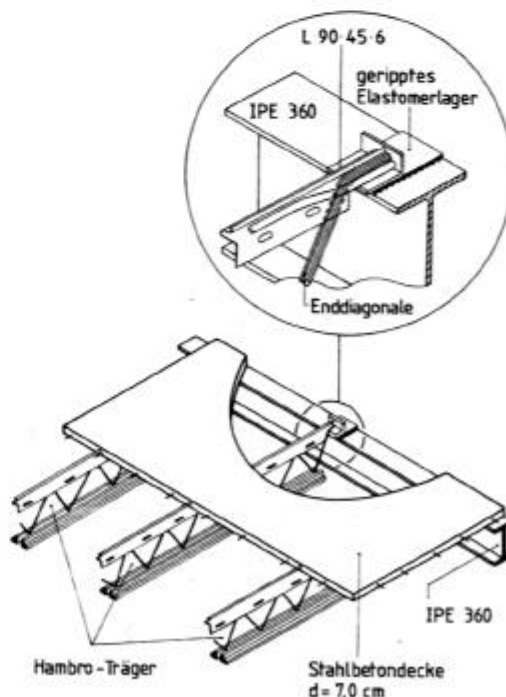


Bild 9. „HAMBRO“-Träger mit Auflagerdetail

- Sämtliche Installationsleitungen sind im Erdgeschoß mit körperschalldämmenden Kupplungen versehen.
- Die Unterdecken sind federnd an den Gitterträgern der Geschoßdecken befestigt, um die Schallabstrahlung nach unten zu begrenzen.
- Wie bei der Decke über dem Untergeschoß wurde auch bei allen Geschoßdecken ein schwingungs- und schalltechnisch abgestimmter Estrich ausgeführt.

5 Angaben zu den rechnerischen Nachweisen

5.1 Allgemeine Angaben

Verglichen mit anderen Gebäuden, die im Einflußbereich unterirdischer Verkehrsanlagen errichtet wurden [7], ist der vorstehend beschriebene Aufwand für schalldämmende Maßnahmen hoch. Maßgeblich dafür ist die sehr leichte Konstruktion, die, wie die nachfolgende Betrachtung zeigt, in weit stärkerem Maße Störungen über die elastische Fußpunktlagerung aufnimmt, als dies bei einer massiven Bauweise der Fall wäre.

Dies wird nachfolgend anhand einiger weniger Formeln vereinfacht erläutert, die den Übergang einer longitudinalen Störungswelle aus einem Stab 1 über eine elastische Zwischenschicht in einen Stab 2 beschreiben.

Zuvor ist die Wellengleichung entsprechend aufzubereiten:

Für einen mit einer Frequenz ω periodischen longitudinalen Wellenfortpflanzungsvorgang ergeben sich für die Teilchengeschwindigkeit bzw. für die zugeordnete Druckkraft die Lösungen in komplexer Darstellung (komplexe Größen sind unterstrichen dargestellt) [8],

$$\underline{v} = (\underline{v}_p \cdot e^{-ikx} + \underline{v}_n \cdot e^{+ikx}) \cdot e^{i\omega t}, \quad (1)$$

bzw.

$$\underline{F} = (\underline{F}_p \cdot e^{-ikx} + \underline{F}_n \cdot e^{+ikx}) \cdot e^{i\omega t}, \quad (2)$$

in denen jeweils der erste Beitrag eine in positiver x -Richtung fortschreitende Welle mit den Amplituden $\underline{v}_p$ bzw. $\underline{F}_p$ und der zweite Anteil eine gegen die positive x -Richtung fortschreitende Welle mit den Amplituden $\underline{v}_n$ bzw. $\underline{F}_n$ bedeutet.

Die im Exponenten der e -Funktion auftauchende Wellenzahl k und die Frequenz ω sind über

$$k = \omega/c_L \quad (3)$$

mit der Wellengeschwindigkeit $c_L = \sqrt{E \cdot A/\mu}$ verknüpft, welche von der Dehnsteifigkeit $E \cdot A$ und der Massenbelegung μ abhängig ist.

Die Gleichgewichtsbedingung am Stabelement

$$\frac{\partial F}{\partial x} = -\mu \frac{\partial v}{\partial t} \quad (4)$$

ergibt nach Einsetzen der Lösungen (1) und (2) einen Zusammenhang zwischen den Kraft- und den Geschwindigkeitsamplituden, die unter Verwendung der Impedanz (auch „Eingangswiderstand“)

$$Z = \sqrt{E \cdot A \cdot \mu} \quad (5)$$

für eine in positiver bzw. negativer x -Richtung fortschreitende Welle in der Form

$$\underline{F}_p = Z \cdot \underline{v}_p \quad \text{bzw.} \quad \underline{F}_n = -Z \cdot \underline{v}_n \quad (6a, b)$$

geschrieben werden kann.

Wird vereinfachend der 2. Stab als unendlich lang angesehen, so tritt dort nur eine fortschreitende Welle

$$\underline{v}_2 = \underline{v}_{2p}, \quad \underline{F}_2 = \underline{F}_{2p} \quad (7a, b)$$

auf, während im Stab 1 eine auftreffende und eine reflektierte Welle zu berücksichtigen ist:

$$\underline{v}_1 = \underline{v}_{1p} + \underline{v}_{1n}, \quad \underline{F}_1 = \underline{F}_{1p} + \underline{F}_{1n}. \quad (8a, b)$$

Die Gleichgewichtsbedingung an der Zwischenschicht lautet

$$\underline{F}_{2p} = \underline{F}_{1p} + \underline{F}_{1n}, \quad (9)$$

während die Kraft-Verformungs-Beziehung der elastischen Schicht mit der Federsteifigkeit c die Form

$$(\underline{v}_1 - \underline{v}_2)/i\omega = \underline{F}_{2p}/c \quad (10)$$

annimmt.

Dabei war zu beachten, daß sich für den angenommenen sinusförmigen Zeitverlauf die Verschiebung aus der Geschwindigkeit mittels Division durch $i\omega$ ergibt.

Indem die Gln. (6)–(10) zusammengefaßt werden, folgt mit den Impedanzen Z_1 und Z_2 der Stäbe 1 und 2 die Beziehung [8]

$$\underline{v}_2 = \frac{2 \cdot \underline{v}_{1p}}{1 + Z_2/Z_1 + i \cdot \omega \cdot Z_2/c}, \quad (11)$$

die zeigt, daß die elastische Zwischenschicht um so weniger Dämmung bewirkt, je kleiner die Eingangsimpedanz des aufgehenden Bauwerks – hier einer Profilstütze – ist.

Trotz der Vereinfachungen, die dieser Abschätzung zugrundeliegen, wird doch ersichtlich, daß die ausgeführte Konstruktion wegen ihrer vergleichsweise kleinen Dehnsteifigkeit am Fußpunkt einen relativ hohen Störungsanteil aufnimmt. Um die Erschütterungs- und Schallbeeinträchtigungen dennoch im erforderlichen Maße begrenzen zu können, waren eingehendere Untersuchungen und konstruktive Maßnahmen notwendig.

Es muß an dieser Stelle jedoch auch erwähnt werden, daß die leichte, gegliederte Skelettstruktur andererseits erhebliche Vorzüge aufweist, indem sie die Störung nur linienförmig weiterleitet und indem vor einer Abstrahlung von den Wand- und Deckenflächen Umsetzungen an Kreuzungs- und Verzweigungspunkten auftreten, die eine erhebliche Dämmung bewirken.

Jede Störung, die in das Stahlskelett eingetreten ist, trifft nach Durchlaufen eines Stützenabschnitts auf einen Kreuzungspunkt, wo sie erneut in weiterlaufende und reflektierte Anteile umgewandelt wird. Sämtliche an irgend einer Stelle in der Struktur reflektierten Anteile treffen schließlich nach weiteren Umwandlungen wieder auf den Tragwerksfußpunkt auf, werden dort zum Teil erneut reflektiert und bilden so schließlich mit der einlaufenden Störung mehr oder weniger gleichlaufende Wellenzüge. Entsprechend dem insgesamt zurückgelegten Weg und der Frequenz passen ein einlaufender Wellenzug mit sinusförmigem Verlauf und die zugehörigen gleichlaufenden reflektierten Wellenzüge unterschiedlich gut hinsichtlich ihrer Phase zusammen – sie können sich daher gegenseitig verstärken oder auch löschen.

Der erstgenannte Fall tritt ein, wenn die Frequenz der eingetretenen Störung gleich einer der Eigenfrequenzen der Konstruktion ist. (Die Eigenfrequenz kann aus der Forderung der Phasengleichheit der Wellenzüge hergeleitet werden.)

Um die Frage der Resonanzgefahr unter der einwirkenden Anregung realistisch einschätzen zu können, ist es notwendig, den regellosen Charakter der Anregung zu betrachten.

Eine Aufzeichnung des zeitlichen Verlaufs der durch den S-Bahn-Verkehr hervorgerufenen Störungen wurde bereits in Bild 5 gezeigt. Trotz gewisser Gemeinsamkeiten qualitati-

ver Art sind in den Details alle derartigen Aufzeichnungen voneinander verschieden. Unter Berücksichtigung der Zufälligkeit der Anregung sind daher nur Aussagen über die statistischen Merkmale der im Gebäude zu erwartenden Erschütterungen und Körperschallschwingungen möglich. Die Zusammenhänge können nach der Theorie der Zufallsschwingungen, mit deren Hilfe das Anregungsspektrum in ein Antwortspektrum umgesetzt wird, beschrieben werden. Die dabei benötigte Übertragungsfunktion, deren Betrag mit der bekannteren Vergrößerungsfunktion übereinstimmt, ist angesichts der komplizierten Struktur des Gebäudes für den höherfrequenten Bereich nicht zuverlässig zu ermitteln. Für die entsprechenden Anteile der Anregung wird daher, wie nachfolgend skizziert, quasi deterministisch unter Verwendung der Pegelwerte, ein einfacherer Weg beschritten.

Im Hinblick auf die Bewertung der in das Gebäude eingebrachten Störungen sind nach den Vorschriften die maßgeblichen Antwortgrößen über gewisse Frequenzintervalle – für den Schallschutz z. B. über Terzen – als Pegel zusammenzufassen. Eine derartige aus einem Terzintervall resultierende Bewegungsgröße weicht bei annähernd gleichmäßiger Verteilung der Anregungen innerhalb einer Terz hinsichtlich der Form und – weniger ausgeprägt – auch der Nulldurchgangsabstände vom regelmäßigen Verlauf der mit der Intervallmittelfrequenz veränderlichen Sinusschwingung ab:

Nimmt man z. B. für einen Bewegungsvorgang, dessen Amplitudenspektrum innerhalb einer Terz konstant ist, eine zufällige Verteilung der Phasenverschiebungen an, so ergibt sich für 10 Hz bzw. 60 Hz Terzmittenfrequenz an einer festgehaltenen Stelle x der in den Bildern 10a und b dargestellte zeitabhängige Verlauf. (Würde man übrigens alle Teilamplituden unter der Annahme gleicher Phasenlage einfach aufaddieren und der Terzmittenfrequenz zuordnen, so ergäbe sich ein sinusförmiger Verlauf mit der Amplitude 1.)

Einen Bewegungsverlauf, wie er sich aus der Überlagerung einer einlaufenden Longitudinalwelle mit reflektierten, infolge Dämpfung abgeminderten Wellenzügen entwickelt, zeigen wieder für eine feste Stelle x die Bilder 10c und d. Die Reflexionsstelle hat in beiden Fällen den gleichen Abstand. Die Verhältnisse sind so gewählt, daß sich für rein sinusförmige Wellenzüge Resonanzerscheinungen 1. bzw. 6. Ordnung aufbauen würden, wobei ohne Wirkung einer Dämpfung die Maximalausschläge linear mit der Zeit zunehmen. Bei Annahme der gleichen Dämpfung, wie sie den Bildern 10a und b zugrundeliegt, wären die Ausschläge der sinusförmigen Schwingungen nach Ablauf der dargestellten Zeitspanne bereits auf das 15- bzw. 6fache der Anfangsamplitude angewachsen.

Aus den Bildern wird ersichtlich, daß ein resonanzartiges Anwachsen der Ausschläge aus der Überlagerung der einlaufenden und der reflektierten Störungsanteile für eine Anregung, deren Amplituden ein Terzintervall gleichmäßig überdecken, nur für die relativ langwelligen, d. h. für die niederfrequenten Anteile (Bild 10c) zu erwarten ist. Dagegen bewirken die Abweichungen von der regelmäßigen Sinusform für die relativ kurzwelligen, d. h. höherfrequenten Anteile (Bild 10d) keine besondere Überhöhung.

Resonanzerscheinungen sind damit, sofern das Anregungsspektrum keine ausgeprägten Spitzen aufweist, nur für Anregungen im Bereich der niedrigen Eigenfrequenzen zu erwarten. Für alle höheren Frequenzen, bei denen sich die Überlagerung bereichsweise verstärkend, bereichsweise aber auch abschwächend auswirkt, kann das Systemverhalten im Hinblick auf die Störungsabstrahlung der Größenordnung nach zutreffend, jedoch wesentlich vereinfacht dadurch erfaßt werden, daß nur die einlaufenden Wellen verfolgt werden.

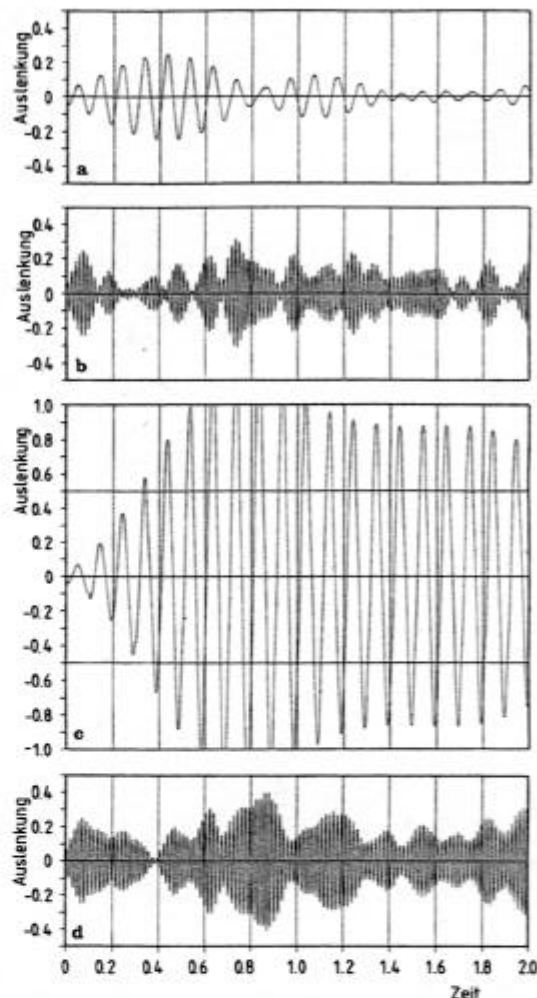


Bild 10 a–d. Wellenzug, zugeordnet zu gleichverteilten Amplituden innerhalb einer Terz der Mittenfrequenz a 10 Hz und b 60 Hz bei zufälligen Phasenverschiebungen. Überlagerung des Wellenzugs c nach Bild 10 a und d nach Bild 10 b mit den zugehörigen reflektierten Anteilen

Durch eine Ermittlung der Übertragungsfunktion der Konstruktion oder – weniger aufwendig – durch die Ermittlung der Eigenfrequenzen mußte unter Beachtung etwaiger Spitzen im Anregungsspektrum vorab entschieden werden, für welche Anregungsanteile das Systemverhalten als erzwungene Schwingung und für welche als Wellenausbreitungsvorgang zu beschreiben war.

Nachdem der mögliche Berechnungsaufwand aus wirtschaftlichen Gründen von vornherein relativ eng begrenzt war, ließ sich das Verhalten des wirklichen räumlichen Systems mit seiner mehrstieligen Skelettstruktur, seinen orthotropen Mehrschichtenverbunddecken und Gipskartonwänden nur näherungsweise durch einfache Ersatzsysteme beschreiben. Diese Vorgehensweise schien jedoch nicht nur zur Begrenzung des Aufwandes sinnvoll, sondern auch vernünftig, nachdem die höheren Eigenfrequenzen des Systems angesichts zu vieler nicht zuverlässig zu erfassender Systemwirkungen ohnehin nicht zutreffend zu ermitteln waren.

5.2 Ermittlung erzwungener Schwingungen

Als Ersatzsysteme der wirklichen Struktur wurden die Einzelbauteile wie Decken und Wände sowie mehrgeschossige ebene Skeletttragwerke untersucht. Bei der Berechnung der letzteren ließ sich die Mitwirkung der Wände nur näherungsweise durch eine Schätzung der mitbewegten Massen berücksichtigen. Um Rechenschaft über die von dieser Vereinfachung ausgehenden Auswirkungen auf das Verhalten der Struktur zu erhalten, wurden die Eingangsparameter systematisch variiert. Die Berechnungen zeigten, daß die Grundfrequenz der Skelettstruktur deutlich unter 10 Hz, die 2. Eigenfrequenz unter 25 Hz und die 3. Eigenfrequenz im Bereich von ca. 40 Hz–50 Hz liegt.

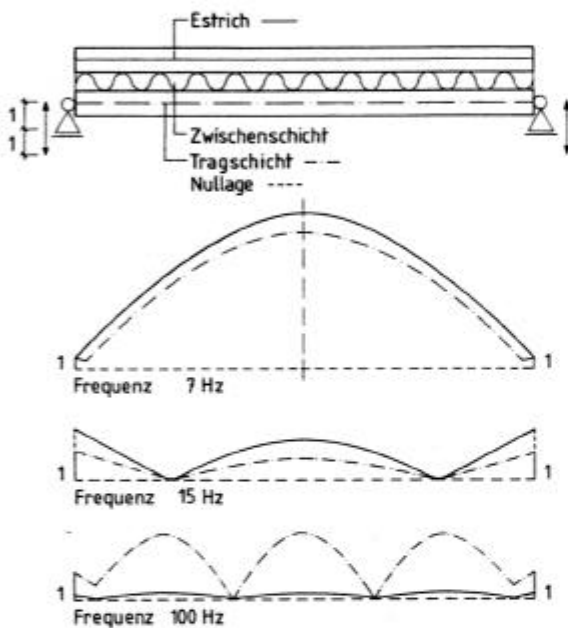


Bild 11. Schwingungsgrenzzlinien für Estrich und Tragschicht bei Fußpunkterregung der Tragschicht

Als Beispiel für die Untersuchung der Deckenschwingung sind in Bild 11 in Abhängigkeit von verschiedenen Frequenzen die Schwingungsgrenzzlinien der HAMBRO-Decke mit schwimmendem Estrich, die in der dargestellten Weise mit entsprechend abgestimmter Massenbelegung und Steifigkeit vereinfacht abgebildet wurde, gezeigt. Auch hier liegen die Grundfrequenz, die Frequenz der nicht dargestellten 1. antisymmetrischen sowie der 2. symmetrischen Eigenschwingung unter 30 Hz. Von dieser Frequenz an nehmen die Auslenkungen der Deckschicht kontinuierlich ab, die Anregung verbleibt zunehmend in der unmittelbar damit beaufschlagten Tragschicht.

Nach den Ergebnissen dieser Berechnungen wurden unter Berücksichtigung des im Mittel relativ glatten Anregungsspektrums die Systemreaktionen für Frequenzen unterhalb von ca. 40 Hz nach der Theorie erzwungener Schwingungen, darüber nach der Theorie der Wellenfortpflanzung bestimmt. Die „weiche“ Ausbildung der einzelnen Bauteile, die relativ niedrige Eigenfrequenzen zur Folge hat, bewirkt, daß die starken Anregungsanteile oberhalb von ca. 35 Hz im Bereich höherer Systemeigenfrequenzen liegen und somit kaum Resonanzen auslösen können.

5.3 Untersuchung der Wellenfortpflanzung

Die aus der Tunnelröhre aufsteigende Störung trifft, wie bereits erwähnt, über das elastische Fußpunktlager auf die Stahlstützen und setzt sich im Prinzip ähnlich, wie im Abschn. 5.1 dargestellt, in einen reflektierten und einen weitergeleiteten Anteil um, wobei die Mitwirkung der Kellertragkonstruktion und der Tunnelröhre unter Beachtung ihrer flächenhaften Ausdehnung zu berücksichtigen war. Diese Einflüsse konnten nur abgeschätzt werden, nachdem Angaben in der Literatur nicht zu finden waren und genauere Untersuchungen zu aufwendig gewesen wären. Für den Übergang der in die Stütze eingedrungenen Störung über die Knotenpunkte hinweg liegen in [8] Angaben vor, die in entsprechender Verallgemeinerung auf die vorliegende Aufgabenstellung zu übertragen waren.

Die eingetragene Störung erreicht schließlich die Geschosdecken und Wände. Für den Übergang aus dem Stahlskelett in die Decke werden die Eingangsimpedanzen der Gipskartonwände und der orthotropen Mehrschichtdecke benötigt. Um letztere zu ermitteln, mußten die Lösungen der Differentialgleichungen für die mehrschichtige Platte den entsprechenden Randbedingungen angepaßt werden, wie in [9] ausführlicher dargestellt.

Mit der dergestalt berechneten Eingangsimpedanz der Decke und der geschätzten Eingangsimpedanz der Gipskartonwände konnte wieder in ähnlicher Weise, wie in den Gl. (6)–(10) dargestellt, der Übergang der vertikalen Störung aus dem Stahlskelett in die Decke und in die Wand ermittelt werden.

Trotz ihrer geringen Dicke bietet die Gipskartonwand mit ihrem Eingangswiderstand gegenüber in ihrer Ebene wirkenden Störungen in Verbindung mit den nachgiebigen Gummilagern eine wirksame Abpufferung, die den Übergang der Störung aus der Tragkonstruktion auf die Tragschicht der Mehrschichtenplatte erheblich herabsetzt.

Die Untersuchungen nach der Theorie der Wellenfortpflanzung bestätigen die Berechnungen nach der Resonanztheorie, wonach sich mit steigenden Frequenzen die Estrichschicht immer weniger an den Bewegungen beteiligt. So verkleinert sich z.B. das Verhältnis zwischen der Schwinggeschwindigkeit des Estrichs und des Hauptträgers im Stahlgerüst für eine Anregung mit 100 Hz auf rund 1/10 des Wertes bei 50 Hz. Die jeweils weitergeleitete Störung nimmt an allen Kreuzungspunkten oder Übergängen über elastische Zwischenschichten weiter ab. Die Dämmwirkung wird oberhalb von ca. 50 Hz mit zunehmender Frequenz des Anregungsanteiles immer größer.

6 Ergebnisse und Erfahrungen

Zur Überprüfung der Maßnahmen zur Körperschalldämmung wurden vom Bauherrn im Zuge der Ausführung begleitende Körperschallmessungen in Auftrag gegeben. Die Messungen sollten darüber Auskunft geben, inwieweit die vorausbestimmten Abminderungen des Körperschalls tatsächlich eintraten und ob eventuell weitere Maßnahmen zur Dämmung bzw. Entstörung notwendig werden könnten.

Nach Ausführung der wesentlichen Arbeiten wurden abschließende Körperschall- sowie Luftschallmessungen in verschiedenen Räumen der einzelnen Dämmzonen durchgeführt.

Anhand der Meßergebnisse ließ sich das Verhalten der Konstruktion mit dem Baufortschritt recht gut verfolgen. So wurde z. B. im Kellergeschoß nach dem Einbau der Dämmplatten zwischen dem Erdreich bzw. den Bodenplatten und

dem tragenden Stahlbetonrost eine deutliche Abnahme der Körperschallpegel um ca. 3–5 dB(v) festgestellt.

Nach Fertigstellung der Decke über dem Kellergeschoß wurden generell günstigere Körperschallpegel als ursprünglich erwartet gemessen, worauf auf den Einbau zusätzlicher Dämm- bzw. Entstör-Maßnahmen verzichtet wurde.

Andererseits ergaben sich nach Fertigstellung des Rohbaues einschließlich der schwimmenden Estriche an den Stahlstützen (Zone 2) und am schwimmenden Estrich (Zone 3) vorübergehend stellenweise ungünstigere Körperschallwerte, als vorausbestimmt. Dies konnte jedoch anhand theoretischer Überlegungen mit Resonanzerscheinungen des Gebäudes im Rohbaustadium erklärt werden, in dem ohne die gegenseitige Behinderung der schwingenden Decken durch die später eingebauten Wände, Fassaden und abgehängten Decken Schwingformen angeregt werden konnten, deren Auftreten im Endzustand nicht mehr möglich war.

Nach Fertigstellung des Bauwerkes wurden wieder günstigere Körperschallwerte gemessen, die durchwegs in der Höhe der erwarteten Pegel lagen, wobei sich allerdings während des Baufortschritts entstandene höhere Erwartungen nicht erfüllten. Dies wurde aufgrund der Analysen sowie theoretischer Überlegungen auf die neben den dominierenden Anteilen mit 50 Hz – ca. 80 Hz ebenfalls vorhandenen nicht ganz unerheblichen Anteile mit 120 Hz – ca. 150 Hz zurückgeführt, die auf Körperschallbrücken hindeuten, die in der Endphase der Bauausführung mit dem Einbau der Trennwände im Keller und im Erdgeschoß sowie dem Anschluß des Geländes bzw. der Gehwege am Gebäude entstanden sein könnten. Eine zweifelsfreie Klärung der Ursachen war nach Fertigstellung der komplexen Baumaßnahme ohne größeren Aufwand nicht mehr möglich.

Die nach Fertigstellung des Bauwerkes und Einzug der Bewohner in bestimmten Räumen der verschiedenen Dämmzonen durchgeführten Luftschallmessungen der Spitzengeräusche einzelner Zugvorbeifahrten stimmten recht gut mit den aus den gemessenen Körperschallwerten abgeleiteten und den prognostizierten Werten des abgestrahlten Luftschalles überein. Lediglich im 1. Obergeschoß wurden vereinzelt etwas über den erwarteten Pegeln liegende Werte gemessen, was vermutlich auf die bereits erwähnten Körperschallbrücken zurückzuführen ist.

Im Erdgeschoß ist das Geräusch aus der S-Bahn entsprechend der Auslegung der Dämmmaßnahmen teilweise noch recht deutlich zu vernehmen, wobei die Spitzengeräusche aus dem Straßenverkehr etwa die gleiche Größenordnung haben. Hier kommt ein bei der Auslegung der Schalldämmung der Schaufensterfassaden bewußt eingeplanter Überlagerungseffekt zum Tragen. Die Spitzengeräuschpegel liegen mit ca. 40 dB(A) bis maximal ca. 50 dB(A) noch deutlich unter den nach [5] geforderten Werten (Tabelle 1).

In den Wohnbereichen der Obergeschosse können die Geräusche aus der S-Bahn lediglich vereinzelt im 1. Obergeschoß noch relativ deutlich wahrgenommen werden, bei Spitzenpegeln von ca. 35 dB(A) – ca. 45 dB(A). In den übrigen Geschossen sind die S-Bahn-Geräusche nur bei gleichzeitigem Nachlassen des Straßenverkehrs schwach zu vernehmen.

Im Gegensatz zu den Bewohnern der Nachbargebäude in der Rosenheimer Straße fühlte sich keiner der befragten Bewohner durch die Geräusche aus der S-Bahn in seinem Wohlbefinden beeinträchtigt.

Bzüglich der Erschütterungen wurden in guter Übereinstimmung mit den Prognosen folgende Ergebnisse erhalten: Die aus den Effektivwerten der gemessenen maximalen Schwinggeschwindigkeiten nach [6] bestimmten KB-Werte

liegen im Erdgeschoß in der Regel unter 0,12 und in den Obergeschossen unter dem Wert 0,10 in guter Übereinstimmung mit den tatsächlichen Eindrücken. Die Erschütterungen sind danach im Erdgeschoß vereinzelt noch als leichtes Zittern zu spüren. In den Obergeschossen waren keine Erschütterungen mehr wahrzunehmen.

Aufgrund der Erfahrungen, die bei der Abwicklung dieses in bezug auf den Schutz vor Körperschall besonders komplexen Bauwerkes gemacht wurden, sind nach Meinung der Verfasser neben der ausreichenden Bemessung der Dämmvorkehrungen vor allem folgende Punkte besonders beachtenswert:

- Sämtliche Dämm-Maßnahmen sollten konsequent in den Detailplanungen des Architekten und der Projektanten Eingang finden. Es ist zu empfehlen, den schwingungstechnischen Fachmann mit der Koordinierung dieser Arbeiten zu beauftragen.
- Es ist eine detaillierte Kontrolle der Ausführung aller Dämmvorkehrungen durch den schwingungstechnischen Sachverständigen im Rahmen einer Fachbauleitung anzuraten, da sonst aus Unkenntnis oder Nachlässigkeit Fehler bei der Ausführung entstehen könnten, die später eventuell nur mit erheblichem Aufwand zu beseitigen wären. Bekanntlich haben kleine Ursachen im Sinne eines örtlichen Ausfalles der Körperschalldämmung analog zu den Nebenwegsübertragungen im baulichen Schallschutz oft große schädliche Auswirkungen. Die normale Bauleitung ist bei der Überwachung dieser speziellen Ausführungsdetails in der Regel überfordert.

7 Zusammenfassung

Mit Hilfe der beschriebenen statischen und schwingungstechnischen Maßnahmen ist es gelungen, eine anfangs von mancher Seite skeptisch beurteilte Baumaßnahme erfolgreich zum Abschluß zu bringen. Insbesondere konnten die mit der direkten Gründung auf der ungedämmten Tunnelröhre verbundenen schwingungs- und körperschalltechnischen Probleme befriedigend gelöst und die aus dem S-Bahn-Tunnel in das Gebäude eindringenden Störungen auf ein der jeweiligen Nutzung zugeordnetes, zumutbares Maß reduziert werden, das im Rahmen der einschlägigen Richtlinien über Geräusch- und Erschütterungsbelastungen liegt.

Ausdrücklich erwähnt sei nochmals die Tatsache, daß bei Aufgaben dieser Art der konstruktiven Durchbildung im Detail und vor allem der Bauüberwachung größte Bedeutung zukommt, da durch Unachtsamkeit an einzelnen Stellen möglicherweise entstehende Schallbrücken das Erreichen des Planungszieles gefährden könnten.

Danksagungen

An dieser Stelle sei die außergewöhnlich gute Zusammenarbeit mit der Architektengemeinschaft Dietrich, Braun und Hesselberger, dem Prüflingenieur Prof. Dr.-Ing. G. Knittel, dem bauphysikalischen Berater Prof. Dr.-Ing. N. V. Waubke sowie den übrigen am Bau maßgeblich beteiligten Fachleuten hervorgehoben, ohne die es schwerlich gelungen wäre, die vielen Detailprobleme zufriedenstellend zu lösen.

Der Bauherrin, der Münchner Gesellschaft für Stadterneuerung (MGs), ist zu danken für ihr Verständnis für die besonderen technischen Probleme bei diesem ungewöhnlichen Bauvorhaben sowie für ihre tatkräftige Unterstützung bei der Bauabwicklung.

Literatur

1. Wohn- und Geschäftshaus in München-Haidhausen. Elem. Fertigbau 3 (1984) 39–48
2. Suess K.; Staller A.: Einführung eines kanadischen Deckensystems in Deutschland – Beratende Ingenieure als Mittler technischen Wissens über Landesgrenzen hinweg. In: Konstruktiver Ingenieurbau, VBI. Berlin: Ernst & Sohn 1985
3. Haus über der S-Bahn in München. Baumeister (1984) 53–57
4. „Modernes Wohnen über der S-Bahn“. Innenausbau (1984) 20–25
5. Schalldämmung von Fenstern. VDI-Richtlinie 2719, Okt. 1973
6. Erschütterungen im Bauwesen, Teil 2. DIN 4150 – Vornorm, Sept. 1975
7. Wietlake, K. H.: Körperschallisolierte Gründung eines Wohnhauses oberhalb einer U-Bahn-Trasse. Bauingenieur 60 (1985) 235–238
8. Cremer L.; Heckl M.: Körperschall. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1967
9. Grundmann, H.; Müller F. H.; Müller R.: Erschütterungs- und Schallschutzmaßnahmen für ein Gebäude über einem S-Bahn-Tunnel. In: Dynamische Probleme, Modellierung und Wirklichkeit. Mitt. Curt-Risch-Inst., Univ. Hannover 1984

Kurze Technische Berichte

Schwingungsisoliertes Gebäude unter Erdbebenbeanspruchung

In San Bernardino, Kalifornien, ist erstmals das Verhalten eines schwingungsisolierten Gebäudes – eine 4stöckige Stahlrahmenkonstruktion – unter Erdbebenbelastung dokumentiert worden. In dem Gebäude, dem Gerichtshof des San Bernardino County, sind die Übergänge der Stützen in die Fundamente mit Elastomerlagern nach den Plänen von Reit & Tarcis Assoc., Inc., San Francisco, ausgebildet worden (Bild 1). Bei dem Beben wurde in der Nähe des Gebäudes eine maximale Bodenbeschleunigung von 0,04 g registriert, im Gebäude selbst jedoch nur noch eine maximale Beschleunigung von 0,03 g. In fünf vergleichbaren Gebäuden ohne Schwingungsisolierung, die ebenfalls mit Meßgeräten ausgestattet waren, wurde hingegen eine Vergrößerung der Gebäudebeschleunigung zur Bodenbeschleunigung um den Faktor 2 bis 5 beobachtet. So wurde in einem 5stöckigen Stahlbetongebäude, das teilweise durch Schubwände ausgesteift ist, eine maximale Bodenbeschleunigung von 0,03 g und eine maximale Beschleunigung im Gebäude von 0,15 g registriert. Eine Vergrößerung der Beschleunigung – wahrscheinlich durch das Zusammenfallen der Boden- mit einer Gebäuderesonanzstelle hervorgerufen – wie sie aus vielen anderen Erdbeben bekannt ist.

Das Erdbeben hatte eine lokale Magnitude von 4,9, woraus auf eine Dauer der Bodenbeschleunigung von weniger als 5 Sekunden geschlossen werden kann. Eine Zeitdauer, die für ein Aufschaukeln im Resonanzfall ausreichend ist. Die oben genannten Gebäude waren zwischen 15 und 30 km vom Epizentrum entfernt.

Gebäude mit schwingungsisolierten Fundamenten widerstanden auch schon im Iran und Jugoslawien unbeschadet größeren Erdbeben. Jedoch waren diese Gebäude nicht mit Meßinstrumenten ausgestattet, so daß keine eindeutigen Aussagen über den tatsächlichen Einfluß der Schwingungsisolierung auf die Gebäudebeanspruchung möglich war. Auch im Zentrum von Me-



Bild 1. Elastomerlager an den Stützenfüßen im Gerichtsgebäude von San Bernardino County

xiko Stadt überstand ein schwingungsisoliertes 5stöckiges Gebäude, eine Stahlbetonrahmenkonstruktion mit Mauerwerksausfachung, die starken Beben vom September 1985 ohne sichtbare Schäden. Das Herzstück der Schwingungsisolierung waren hier Kugellager mit einem Durchmesser von 61 cm.

Als ein Anzeichen des wachsenden Interesses an schwingungsisolierten Fundamenten kann der Beschluß des kalifornischen Gesetzgebers angesehen werden, in dem die oberste staatliche Baubehörde aufgefordert wird, neue Technologien anzuwenden, welche die Einwirkung von Erdbeben auf öffentliche Gebäude „unter Einbezug von, aber nicht beschränkt auf schwingungsisolierte Fundamente“ mindert.

[Nach: Base isolation concept proven in mild coast earthquake. Eng. News Rec. Dec. 5 (1985) 11.]

J. R. Scherer, München

Über die von Sägegattern erregten mechanischen Schwingungen

1 Einleitung. Sägegatter gelten als Maschinen mit großer dynamischer Belastung für ihre Fundamente. Aus einer in [1] veröffentlichten Umfrage geht hervor, daß 76% der Gatterfundamente direkt auf dem Boden ruhen. Da der Boden ein gutes Medium für die Ausbreitung von Schwingungen bildet, wird oft von Schäden an Objekten berichtet, die in beträchtlicher Entfernung von der Schwingungsquelle liegen. In Wohn-, Büro- und sonstigen Gebäuden sind die Schwingungen lästig oder sogar gesundheitsschädlich.

Aus diesen Gründen ist es notwendig, eine komplexe dynamische Analyse der Gatterfundamente durchzuführen. Ein Versuch derartiger Analyse wurde in [5] vorgenommen, woraus hervorgeht, daß eine weitgehende Diskrepanz zwischen der gegenwärtig angewandten theoretischen Analyse und den Meßergebnissen an tatsächlichen Objekten besteht.

Dieser Artikel bildet eine abgekürzte Darstellung der in weitem Ausmaß durchgeführten Untersuchungen über die Einwirkung eines Satzes von 4 Gattern auf ein 407 m entferntes Wohngebäude.

Die Gatter mit einer Frequenz der Erregung von 5,67 Hz und einer Erregungskraft der 1. Ordnung von je 230 kN sind auf unabhängigen Blockfundamenten gegründet. Der Boden bis 1,2 m Tiefe besteht aus Torf, darunter hingegen liegen wasserhaltige Sande. Der Torf wurde im Bereich der Gründung durch verdichteten Sand ersetzt.

Tabelle 1. Zusammenstellung der Schwingungsweiten an Gatterfundamenten [μm]

Gatter	Berechnete Schwingungsweiten		Gemessene Schwingungsweiten	
	Vertikal	Horizontal	Vertikal	Horizontal
1			73,2	38,6
2			72,0	52,7
3	158	67	70,1	51,2
4			64,7	51,2

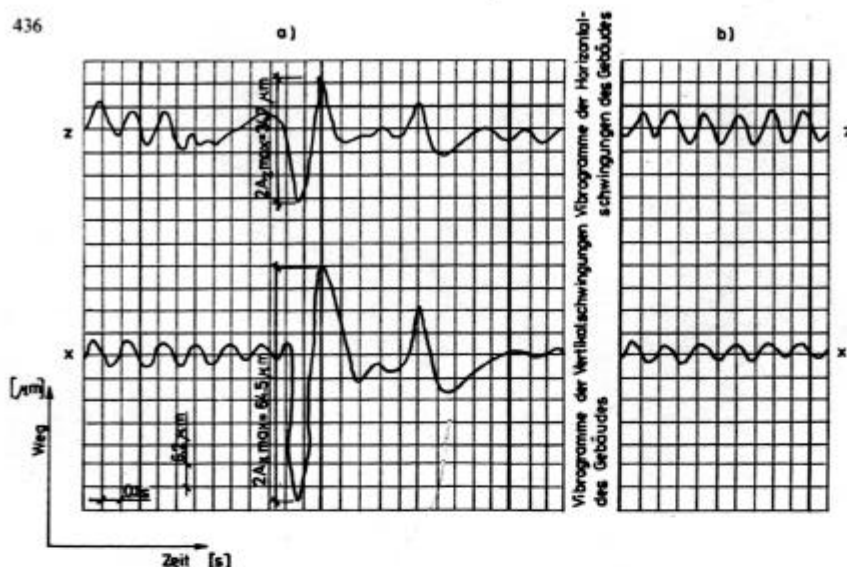


Bild 1 a und b. Vibrogramme der vertikalen (x) und horizontalen (z) Schwingungen für einen Meßpunkt auf dem Wohngebäude. a Zustand vor Generalüberholung der Gatter; b Zustand nach Generalüberholung der Gatter

Das untersuchte Wohngebäude, in dem deutliche Schwingungen wahrgenommen wurden, ist ein einstöckiges Gebäude aus Ziegelmauerwerk mit den Abmessungen von 13,6 m $\times$ 11,4 m im Grundriß.

2 Die Untersuchungsmethode

2.1 Berechnungsergebnisse. Die verbreitete, auch in [1, 2, 6, 8] angewandte Berechnungsmethode wurde angewandt, indem das System Gatter-Fundament als starrer Körper mit 3 Freiheitsgraden auf elastischer Unterlage betrachtet wurde. Die Eigenkreisfrequenzen und die Schwerpunktschwingungsweiten des Systems wurden berechnet. Die Amplitude der Vertikalschwingungen betrug 147 μ m, und die Amplituden der pendelnden Schwingungen betrugen 62 μ m und $1,01 \cdot 10^{-5}$ rad. Auf dieser Grundlage konnte die Schwingungsweite der Vertikalschwingungen am Wohngebäude im Werte von 0,8 μ m ermittelt werden, indem die bekannte Formel für die Ausbreitung von Schwingungen im Boden angewandt wurde. Wegen der niedrigen Schwingungsfrequenz wurde die Interaktion vernachlässigt. Somit kann diese Schwingungsweite als die der Vertikalschwingungen des Gebäudes selbst betrachtet werden. Ebenfalls ist die Eigenfrequenz der Schwingungen des Wohngebäudes berechnet worden und sie betrug 5,13 Hz. Diese Berechnungsergebnisse bildeten keine quantitative Begründung für das Auftreten deutlich spürbarer Schwingungen im Gebäude. Lediglich dürften die daran nahekommenden Werte der Frequenz der Erregung sowie der Eigenfrequenz des Gebäudes und des Bodens, die nach [7] ca. 4 Hz betragen, erhöhte Schwingungen vermuten lassen.

2.2 Empirische Verifikation. Es wurden Schwingungsmessungen an zahlreichen Meßpunkten vorgenommen. Die Messungen wurden bei verschiedenen Arbeitsvarianten der Gatter, das ist beim Anlauf, Leerlauf und unter Belastung, wiederholt.

Die Messungen an der Schwingungsquelle haben ergeben, daß die Schwingungsweiten der Gatterfundamente bedeutend kleiner sind als die Berechnungswerte. Ein Vergleich der Meßwerte mit den Berechnungswerten ist in Tabelle 1 dargestellt. Die Unterschiede sind auf das vereinfachte mathematische Modell des Systems Gatter-Fundament zurückzuführen.

Die gemessenen Schwingungsweiten am Wohngebäude waren mehrfach größer als der Berechnungswert (0,8 μ m), überstiegen aber im allgemeinen nicht die zulässigen Schwingungsweiten gemäß Zellers Skala und SWD [3]. In den Vibrogrammen aus den Messungen an der Schwingungsquelle sind jedoch Spitzenwerte in den Schwingungsweiten festgestellt worden, die in unregelmäßigen Zeitabständen erscheinen (Bild 1a). Vorerst wurden die großen Schwingungsweiten mit einem Subresonanzeffekt [4] begründet. Eine weitere Analyse der Meßergebnisse führte jedoch zur Erkenntnis, daß die Spitzenwerte nur dann erscheinen, wenn ein gewisses Gatter (zusammen mit mindestens einem anderen Gatter) in Betrieb war. Es stellte sich heraus, daß dieses Gatter die größten Umdrehungsschwankungen

im Bereich von 320 bis 345 U/min zeigte. Es wiederholten sich somit die Situationen, wo die dynamischen Kräfte des nebenstehenden Gatters mit denen des erwähnten Gatters phasenähnlich oder auch phasengleich waren und vorübergehend erhöhte Schwingungen verursachten.

Eine Generalüberholung des Gatters wurde empfohlen. Aus technischen Gründen wurde die gesamte technologische Linie, das ist zwei Gatter, generalüberholt.

Die nachfolgend durchgeführten Messungen erwiesen keine Unregelmäßigkeiten in der am Wohngebäude ermittelten Schwingungsweitenverteilung, was aus dem Vibrogramm (Bild 1b) hervorgeht.

3 Schlußbemerkungen

1. Es besteht die Notwendigkeit, die Methoden und das Berechnungsmodell für Maschinenfundamente weiterzuentwickeln. Die gegenwärtig angewandte Berechnungsmethode für Fundamente führt nicht zu befriedigenden Resultaten, was u.a. aus den in [1] angeführten Umfrageergebnissen hervorgeht.

2. Beim Bau neuer, „schwingungsproduzierender“ Betriebe, z.B. Sägewerke, ist bereits in der Entwurfsphase die bestehende Verbauung der Umgebung zu analysieren, um gegebenenfalls, nach eingehenden geologischen Untersuchungen, angemessene Maßnahmen gegen die Ausbreitung der Schwingungen zu unternehmen.

3. Um eine bessere Erkennung der Schwingungserscheinungen zu gewinnen, wird eine experimentelle Verifikation der Berechnungen an neuerrichteten Gebäuden empfohlen.

Literatur

- Moore, P.; Werner, D.: Damage from vibrations of gangsaws foundations. Raport JoB No.10 Ins. for jord-och bergmekanik, Kungl. tekniska högskolan. Stockholm 1978
- PN-80/B-03040. Fundamenty i konstrukcje wsporne pod maszyny. (Polnische Norm: Maschinenfundamente und -stützkonstruktionen) PKNiJ Warszawa 1980
- Ciesielski, R.: Ocena szkodliwosci wplywow dynamicznych wo budownictwie. (Auswertung der Schädlichkeit dynamischer Einwirkungen im Bauwesen) Arkady. Warszawa 1973
- Naleszkiewicz, J.: Considerations on periodic forces causing vibrations of machine foundations. Arch. Mech. Stos., Gdansk 1950, Bd. II, Heft 3
- Filipkowski, J.; Falkowski, J.: O drganiach mechanicznych wywolanych praca traktow. (Mechanical vibrations caused by running gang saws). Inż. i Bud. (im Druck)
- Prakash, S.: Soil dynamics. New York: McGraw-Hill 1964
- Schultze, E.; Muhs, H.: Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten, 2. Aufl., Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1967
- Barkan, D. D.: Dynamics of bases and foundations. McGraw-Hill 1962
J. Falkowski, Köslin (Polen)