

Baudynamik und Erschütterungsschutz: Einfluss baudynamischer Gebäudeeigenschaften auf Erschütterungsimmissionen

Autor(en): **Rutishauser, Gérard / Stühler, Waldemar**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **118 (2000)**

Heft 14

PDF erstellt am: **26.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-79903>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Gérard Rutishauser, Zürich, Waldemar Stühler, Berlin

Baudynamik und Erschütterungsschutz

Einfluss baudynamischer Gebäudeeigenschaften auf Erschütterungs-immissionen

Verkehrslärm, das Dröhnen eines Kältekompressors oder das Geräusch eines Aufzugs werden innerhalb eines Hauses oft erst durch das Auftreten von Schwingungen zum Problem. Sie treten als spürbare Erschütterungen und/oder als hörbarer Körperschall zutage. Das Bauwerk selbst hat erheblichen Einfluss auf diese Phänomene. Viele, wenn auch nicht alle dieser Schwingungsprobleme sind technisch lösbar.

In unseren eng bebauten Siedlungsräumen und Stadtzentren kommt es immer häufiger vor, dass neue Gebäude in unmittelbarer Nähe zu Verkehrs- oder Industrieanlagen gebaut werden. Mit Schallschutzmassnahmen werden die Wohn- und Arbeitsplätze vor Lärm geschützt. Diese Massnahmen sind aber unwirksam gegen Schwingungen, die durch den Boden oder direkt über bauliche Verbindungen übertragen werden. Erschütterungen und Körperschall finden selbst aus einem Tunnel den Weg ins Büro oder ins Schlafzimmer. In Gebäuden, die direkt über einem Eisenbahntunnel stehen, wurden bei einer Zugvorbeifahrt schon Körperschallimmissionen von über 50 dB(A) gemessen. Gleichzeitig können Erschütterungen auftreten, die deutlich spürbar sind. Maximalwerte von über 0,3 mm/s (rms, re. 0,125 s; analog Einstellung «fast» bei Schallmessungen) sind keine Seltenheit. Solche Immissionen sind für Wohnungen und ruhige Arbeitsplätze nicht akzeptabel. Störende Geräusche und Vibrationen werden häufig auch von haustechnischen oder gewerblichen Anlagen im Haus selbst oder in unmittelbarer Nachbarschaft verursacht.

Richtwerte

Zum Thema Erschütterungen und Körperschall gibt es in der Schweiz zwar allgemeine Grundsätze im Umweltschutzgesetz, aber noch keine verbindlichen Vorschriften. Das Bundesamt für Umweltschutz (Buwal) hat den Auftrag, innert Kürze eine Erschütterungsschutzverordnung zu erarbeiten. Zusammen mit dem Bundesamt für Verkehr (BAV) hat das Buwal vor kurzem eine «Weisung für die

Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall bei Schienenverkehrsanlagen» (BEKS) erlassen. Darin wird im Wesentlichen auf die Norm DIN 4150, Teil 2, vom Juni 1999 verwiesen. Für den zulässigen Körperschall bei Bahnanlagen werden Grenzwerte definiert. Richtwerte für Körperschall sind auch der Norm SIA 181 «Schallschutz im Hochbau», die zur Zeit überarbeitet wird, zu entnehmen.

Elektronische Anlagen, Präzisions- und Laborgeräte u.a. können durch Schwingungen in ihrer Funktion gestört werden. Angaben über Grenzwerte sind selten zu kriegen. Vielfach helfen Versuche oder der Vergleich mit sozusagen alltäglichen Belastungen, unter denen solche Geräte in jedem Fall funktionieren müssen.

Resonanz

Starke Schwingungen können in einem Gebäude vor allem dann auftreten, wenn Resonanzeffekte mit im Spiel sind. Jedes Bauwerk ist ein resonanzfähiges System. Besonders ausgeprägt sind Resonanzschwingungen von Geschossdecken. Messungen von Verkehrserschütterungen haben ergeben, dass sich zwischen einem Punkt vor dem Haus und einem Mess-

punkt auf dem Fussboden eines Raums die Amplitude der Schwingungen häufig um das Drei- bis Zehnfache verstärkt. Es gibt aber auch Situationen, wo eine Verstärkung um mehr als das 30-fache gemessen wurde.

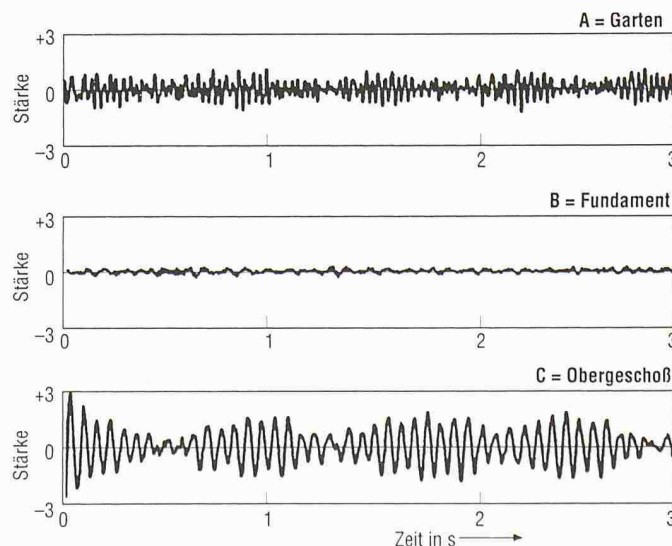
Bild 1 zeigt die typischen Messergebnisse, die wir erhalten, wenn wir an Häusern in der Nähe von Bahnanlagen messen. Man kann erkennen, dass die Schwingungen am Fundament des Hauses bedeutend geringer sind als auf der Bodenoberfläche neben dem Haus. Dies ist auf die Massenkraftkompensation des Gebäudes auf elastischem Untergrund zurückzuführen. Innerhalb des Hauses werden die Schwingungen hingegen erheblich verstärkt. Diese Verstärkung ist hauptsächlich auf Resonanz der Geschossdecken zurückzuführen.

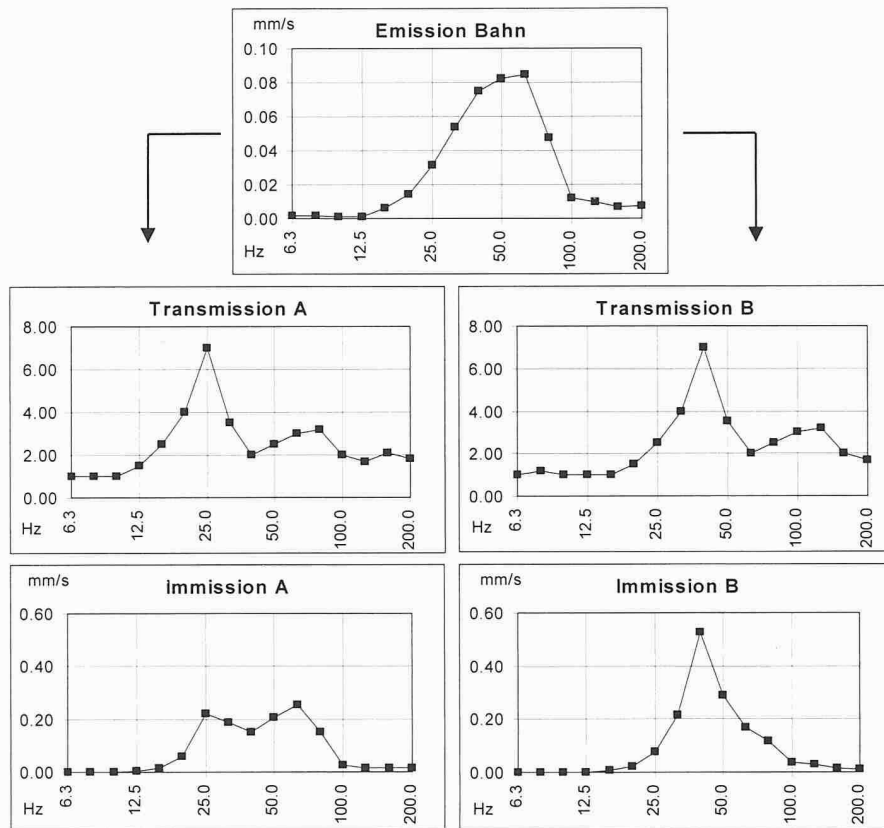
Die Stärke der Schwingungen auf der Geschossdecke ist im Wesentlichen von folgenden Faktoren abhängig:

- Anregungsstärke
- Deckenstärke, Auflagerbedingungen und Deckenspannweite (Steifigkeit)
- Konstruktionsart, Baumaterialien (Dämpfung)
- Masse der Decke und der Lasten auf der Decke.

Kleine Veränderungen der Eigenfrequenz können zu erheblichen Unterschieden in der Amplitude der Schwingungen führen, wie sich anhand von Bild 2 darlegen lässt. Als Emission ist das Terzbandspektrum der Schwingungen, gemessen an Punkt A gemäss Bild 1, dargestellt. Die Transmissionsfunktionen ergeben sich aus der Differenz

1
Schwingungsmessungen vor und im Haus bei einer Zugvorbeifahrt. Verstärkung zwischen Fundament und Obergeschoss infolge Deckenresonanz



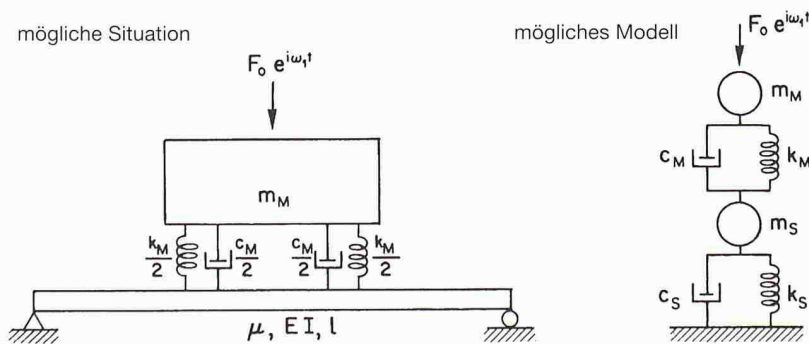


2

Von der Emission zur Immission, ein mögliches Beispiel: Unterschiedliches Ergebnis bei Verschiebung der Transmissionsfunktion um zwei Terzen: Die Immission wird mehr als verdoppelt

3

Das Modell des Zweimassenschwingers: Pumpe mit dynamischer Kraftanregung ($F_0 e^{i\omega t}$) und elastisch gelagertem Maschinensockel auf einer aufgelegten Decke als mögliche Situation. Bestimmung der Eigenfrequenzen des Systems (ω_s ist die Eigenkreisfrequenz der Decke)



$$\omega_{1,2}^2 = \frac{\omega_s^2}{2} \cdot \left[1 + \frac{k_m \cdot m_s}{k_s \cdot m_M} \cdot \left(1 + \frac{m_M}{m_s} \right) \mp \sqrt{\left[1 + \frac{k_m \cdot m_s}{k_s \cdot m_M} \cdot \left(1 + \frac{m_M}{m_s} \right) \right]^2 - 4 \frac{k_m \cdot m_s}{k_s \cdot m_M}} \right]$$

der Frequenzspektren von Punkt C und Punkt A. Das Transmissionspektrum A entspricht einem realen gemessenen Fall. Das Transmissionspektrum B hat genau die gleichen Werte wie A, ist aber um zwei Terzen nach oben verschoben. Das Ergebnis, also die Schwingung am Punkt C, ist allein aufgrund dieser Verschiebung sehr unterschiedlich. Im Fall B sind die Immissionen etwa doppelt so gross wie im Fall A.

Nicht nur Erschütterungen von aussen, sondern selbst umhergehende Personen im Innern eines Gebäudes können starke Resonanzschwingungen verursachen, die als unangenehm empfunden werden [1]. Solche Fälle treten oft in Gebäuden auf, wo im Rhythmus getanzt oder geturnt wird (Turnhallen, Fitness-Center).

Ohne Kenntnis der Resonanzfunktion beziehungsweise der Transmissionsfunktion zwischen Quelle und Empfänger ist keine Problemanalyse oder Massnahmenplanung möglich. Für die Erschütterungs- und Körperschallimmissionen ist die Resonanzverstärkung innerhalb des Gebäudes einer der wichtigsten Einflussfaktoren. Die Ausbreitung von Schwingungen innerhalb der Bauwerke ist bisher wenig untersucht und erforscht worden. Zwar gibt es eine Fülle von Messdaten, deren aufwendige Interpretation und Bewertung ist aber noch ausstehend.

Berechnung von Eigenfrequenz und Dämpfung

Die Eigenfrequenz von Teilstrukturen kann mit Finite-Elemente-Modellen berechnet werden. Die Modellierung ganzer Bauwerke ist aber äusserst komplex und aufwendig und lässt sich in den wenigsten Fällen rechtfertigen. Als Ersatz gibt es verschiedene vereinfachte Schätzmethode. Ohne Fachkenntnis und Erfahrung kann deren Anwendung aber zu Fehlschlüssen führen. In der Dynamik gibt es im Gegensatz zur Statik keine «sichere Seite». Es gibt nur eine passende oder eine nicht passende Auslegung dynamischer Systeme. In vielen Anwendungsfällen lässt sich die reale Situation relativ gut mit einem Mehrmassenschwinger darstellen und entsprechend berechnen (Bild 3). Eine weitere Möglichkeit besteht darin, anhand der statischen Deformation aus Eigengewicht und ständiger Last (nicht Nutzlast!), wie sie sich aus statischen Berechnungen ergibt, die Eigenfrequenzen von Balken und Platten zu bestimmen. Bild 4 gibt dazu die Formel und die Werte an.

Die Eigenfrequenzen allein genügen aber nicht, um eine Transmissionsfunktion und die Schwingstärke zu berechnen. Wichtig ist auch die Dämpfung (Umwandlung kinetischer Energie in Wärme,

Schätzformel: $f_0 [\text{Hz}] = \frac{c}{\sqrt{d_s}}$

mit d_s = max. statische Einsenkung unter Eigengewicht und mitschwingender Last in mm

Balken	beidseitig einfach gelagert	$c = 17,7$
	beidseitig eingespannt	$c = 17,7$
Platten	Ränder frei aufgelegt	$c = 18,7$
	Ränder eingespannt	$c = 22,0$

4

Schätzung der Eigenfrequenz von Balken und Decken (aus [2])

nicht zu verwechseln mit Schwingungsdämmung). Die Dämpfung von Strukturen aus verschiedenartigen und teilweise inhomogenen Materialien wie Holz, Mauerwerk oder Beton kann sehr unterschiedlich sein. Die Dämpfung einer schlaff armierten Betondecke mit Mikrorissen ist beispielsweise grösser als diejenige einer vorgespannten, ungerissenen Decke. Die Vorausbestimmung ist nur mit Erfahrungswerten möglich. Die Dämpfung gilt in Fachkreisen geradezu als launisch und unberechenbar.

Messung

Bei Neubauvorhaben in der Nähe von Erschütterungsquellen werden die Schwingungen an Ort und Stelle, auf dem Grundstück oder in der Baugrube gemessen.

Bei einem bestehenden Gebäude ist es mit relativ einfachen Mitteln möglich, das dynamische Verhalten in seinen wesentlichen Elementen messtechnisch zu erfassen. Sehr einfach ist die Messung von Eigenfrequenzen und Dämpfung von Decken durch Impulsanregung (Hammerschlag auf Holzklotz oder Stampfen). Für die Ermittlung des dynamischen Verhaltens ganzer Gebäude bedient man sich entweder einer bestehenden Erschütterungsquelle (Schienen- oder schwerer Strassenverkehr, Maschinen usw.) oder man installiert einen künstlichen Schwingungserreger. Es kann sich dabei um ein vibrierendes Baugerät (Plattenvibrator oder Vibrowalze), um eine Impulsanregung mittels Fallgewicht oder um besondere Einrichtungen zur Erzeugung von Schwingungen handeln. Baugeräte haben den grossen Nachteil, dass die Frequenz in der Regel nur wenig variiert werden kann.

In neuen Eisenbahntunnels wurde mit Erfolg das VibroScan-Verfahren, eine in Österreich entwickelte Technik, angewendet. Dabei werden im Tunnel, meist bevor der Innenausbau erstellt wird, mit einem

5

VibroScan-Schwingungsgenerator zur Simulation von Verkehrserschütterungen



schweren Vibrator (Bild 5) Schwingungen im gesamten massgeblichen Frequenzbereich (rund 8 bis 120 Hz) und in der zutreffenden Schwingstärke erzeugt. Messungen im Tunnel und in den darüberliegenden Häusern erlauben dann die Bestimmung der Transmissionsfunktion Tunnel-Geschossdecke. In dieser Funktion (Bild 6) sind das Verhalten des Tunnels, des Baugrunds und des Gebäudes bereits enthalten. So können Prognosen und Massnahmen bedeutend genauer als allein aufgrund theoretischer Modelle bestimmt werden.

Strukturdynamisch passend konstruieren

Im Einflussbereich externer Erschütterungsquellen (Verkehr, Industrie) sollte ein Gebäude so konstruiert sein, dass die Schwingungen durch das Bauwerk selbst möglichst wenig verstärkt oder sogar vermindert werden. Dabei sind die Konstruktionsprinzipien nach Bild 7 zu beach-

ten. Die Ausführung der erwähnten Verbesserungen und Massnahmen muss der konkreten Situation (Art und Ort der Erschütterungsquelle, Baugrund, Gebäudeabmessungen und Raumaufteilung, Nutzung) angepasst werden.

Die gleiche Massnahme kann in einem Fall sehr wirksam, in einem anderen Fall aber völlig falsch sein. Es gibt in der Baudynamik, wie erwähnt, keine sichere Seite, sondern eine passende Struktur und Konstruktion.

Peter-Merian-Haus Basel als Beispiel

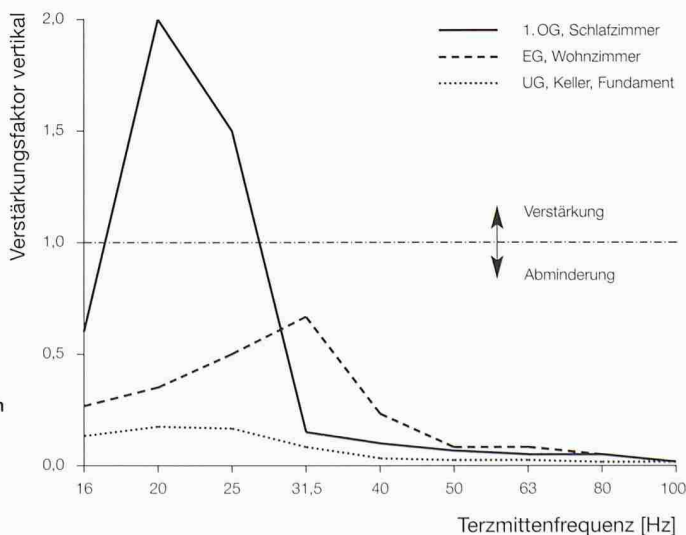
Bei der Planung des neuen Geschäftskomplexes am Bahnhof Basel (Bild 9) wurde der Baudynamiker in allen Phasen mit einbezogen. Das Bauwerk ist durch folgende Besonderheiten gekennzeichnet:

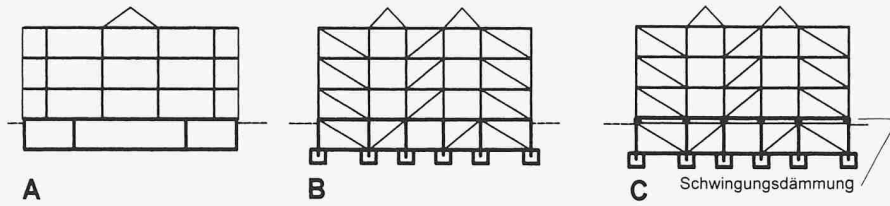
Erschütterungsquellen:

- SBB-Hauptbahnhof und Abstellanlagen
- Neue Trambrücke (im Bau)

6

Transmissionsfunktionen Tunnel-Gebäude, gemessen mit VibroScan; Unterschiedliche Decken-Resonanzverstärkung





Fall A Ungünstige Konstruktion	Fall B Baudynamische Verbesserung	Fall C Passive Schutzmassnahmen
<ul style="list-style-type: none"> Leichte Bodenplatte als Fundament Grosse Deckenspannweiten Schlanke Skelettbauweise mit vorgehängter Fassade Wechsel des Stützenrasters Tragende Bauteile aus Stahl oder Holz 	<ul style="list-style-type: none"> Schwere Fundamente, eventuell Bohrpfähle Massige Bauweise Durchgehender, unregelmässiger Stützenraster Tragende Wandscheiben Beton und Mauerwerk 	<ul style="list-style-type: none"> Elastische Gebäudelagerung (Bild 8) Körperschallisolierung von Durchgängen und Leitungen zu Nachbarbauwerken mit Schwingungsquellen Isolierung gegen Erdreich

7

Dynamisch passend konstruieren; A dynamisch ungünstig; B dynamisch passend konstruiert; C Schwingungsisolation zwischen UG und EG (siehe Bild 8)

- Stark befahrene Strassen (Nauenstrasse und Merian-Brücke)
- Dreigleisiger Postbahnhof im UG
- Zufahrtsrampen und Umschlagplatz für schwere Lastwagen im UG
- Parking im EG und UG
- Transport- und Umschlaganlagen der Post
- Haustechnikanlagen im obersten OG.

Struktur:

- Pfahlfundamente
- Stahlstützen
- Stützenraster UG: 17,52 × 14,60 m
- Stützenraster EG/OG: 5,84 × 7,30 m
- Abfangkonstruktion als Stahlfachwerk über 1. UG.

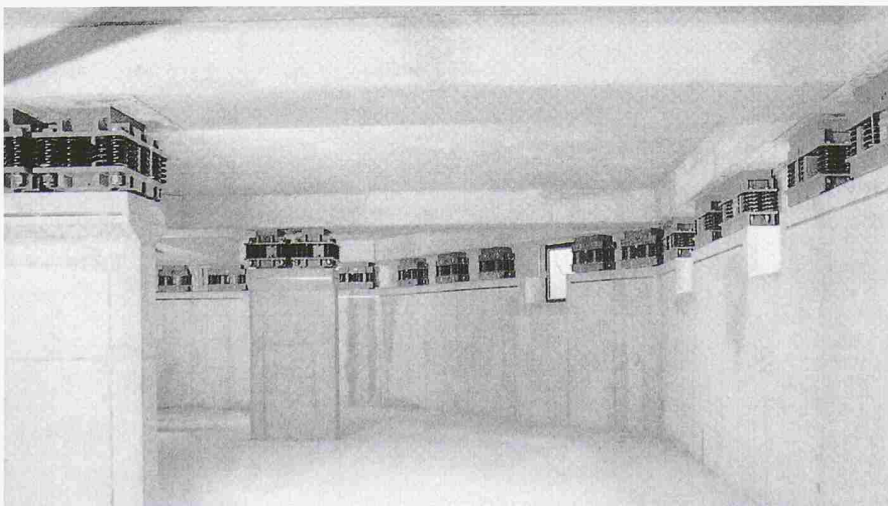
Aufgrund der hohen Komfortansprüche wurden im Einvernehmen mit dem Bauherrn hinsichtlich Erschütterungen und Körperschall strenge Planungsvorgaben festgelegt: Erschütterungen unterhalb der Fühlbarkeitsgrenze (rund 0,10 bis 0,15 mm/s (rms)), Körperschall entsprechend Norm SIA 181.

Besondere Vorkehrungen, die getroffen wurden:

- Tiefe, schwere Pfahlfundation
- Getrennte Pfahlfundation der Trambrücke
- Vermeidung bzw. Isolierung von Körperschallbrücken nach aussen, z.B. zur Merian-Brücke

8

Elastische Gebäudelagerung, Beispiel mit Federlagern zwischen UG und EG (Bild: Gerb AG)



Checkliste (aus [3])

Quellen?

- Äussere Quellen:
 - Nahe Strasse mit Schwerverkehr
 - Bahn oder Tram, auch Tunnel
 - Betrieb mit vibrierenden oder schlagenden Maschinen
- Innere Quellen:
 - Heizungs- oder Klimaanlage
 - Kompressoren oder Pumpen
 - Lift, automatische Tore
 - Gewerbliche Quellen

Auswirkungen?

- Störung am Arbeitsplatz
- Störung in öffentlichen Lokalen
- Störung in Wohnung tags oder nachts
- Störung empfindlicher Geräte oder Anlagen

Inhalt eines schwingungstechnischen Gutachtens

- Analyse der Quellen
- Prognose der Immissionen
- Beurteilung im Hinblick auf mögliche Störung auf der Grundlage von Regelwerken
- Konzeption von passenden Vorkehrungen und Massnahmen
- Dimensionierung in Zusammenarbeit zwischen Architekt, Statiker und Baudynamiker
- Qualitätssicherung in der Ausführung
- Abnahmemessungen

- Elastische Lagerung der Postgleise
- Verstärkung der Abfangkonstruktion beim Wechsel des Stützenrasters
- Verstärkung der obersten Geschossdecke unter der Haustechnik
- Dynamisch optimale Konstruktion schwimmender Böden.

Der Gebäudekomplex ist zurzeit teilweise bezogen. Es wurden Qualitätskontrollen bei der Ausführung, aber noch keine Abnahmemessungen durchgeführt. Es gab bisher keine Klagen wegen Erschütterungen oder Körperschall. Einzig im Bereich der Haustechnik musste die Lagerung eines Kompressors angepasst werden. Ein kleiner Fehler bei der Auslegung der Federelemente war der Grund. Vor kurzem fanden nun auch noch Messungen mit künstlicher Anregung auf der Trambrücke statt. Diese sollen die Frage beantworten, ob eine Unterschottermatte notwendig ist und welches die Systemanforderungen an eine allfällige Matte sind.

Fazit

Immer mehr werden auch Grundstücke in der Nähe von Erschütterungsquellen, wie Verkehrsanlagen oder Industrie- und Gewerbebetriebe, für anspruchsvolle Wohn- und Geschäftsbauten genutzt. Der gute Schallschutz ist in die-



sem Umfeld seit langem eine Selbstverständlichkeit. Mit den Erschütterungen und dem abgestrahlten Körperschall tun sich viele Architekten und Ingenieure aber noch schwer. Das Problem wird zum Teil nicht rechtzeitig erkannt, nicht ernst genommen oder fatalistisch akzeptiert. Tatsächlich sind baudynamische Fragen nicht einfach zu lösen. Gerade deshalb ist es äus-

serst wichtig, dass bereits in einem sehr frühen Stadium der Planung und in jeder Planungsphase das Prinzip der dynamisch passenden Konstruktion berücksichtigt wird. Dieses Prinzip beginnt mit der Festlegung der passenden Tragstruktur und endet, je nach Fall, bei der Ausführung der Trittschalldämmung oder der Kontrolle der Aufstellung empfindlicher Geräte.

Literatur

[1]

Bachmann H. (et al.): *Vibration problems in structures, practical guidelines*. Birkhäuser Basel, 1995

[2]

Steffens RJ.: *Structural vibration and damage (Building Research Establishment Report)*. Department of the Environment Building Research Establishment, 1974

[3]

Stübler W.: *Geräusche infolge Körperschall wirksam reduzieren*. Dokumentation Fachtagung vom 23.4.99 in Berlin, Veranstalter Fa. Schulz Baubedarf GmbH

9

Peter-Merian-Haus beim Bahnhof Basel, in erschütterungsintensiver Umgebung.

Bauherrschaft: Post/I.B.O. AG; Generalplaner: Projektgruppe Bahnhof Ost; Architekt: Zwimpfer Partner Architekten (Bild: Werner-Film, Basel)

Adresse der Verfasser:

Gévard Rutishauser, dipl. Ing. ETH, Rutishauser Ingenieurbüro für Bau, Verkehr und Umwelt, Drahtzugstrasse 18, 8008 Zürich, *Waldemar Stübler*, Prof. Dr.-Ing., Technische Universität Berlin, Institut für Mechanik, Ostpreussendamm 179a, D-12207 Berlin