

Nachträgliche Schwingungsminderung bei weitgespannten leichten Bürodecken

François Dunand*, Christos Baltas*, Christian Meinhardt**, Martin Koller*

*Résonance Ingénieurs-Conseils SA, **GERB Schwingungsisolierungen GmbH & Co. KG

1 Störende Schwingungen in einem 2015 erstellten Bürohaus

Bei einem 2015 erstellten, von den Londoner Architekten SOM (Skidmore, Owings & Merrill) entworfenen Bürogebäude in Genf beklagen sich zahlreiche Benutzer über störende Schwingungen. Es handelt sich um ein architektonisch ausgesprochen ansprechendes Gebäude mit einem ingenieurtechnisch anspruchsvollen Tragwerk in Stahl, das teilweise einen frei tragenden Kragarm bildet (Bild 1). Das Gebäude hat sieben Obergeschosse, ist 108 m lang und 78 m breit. Die Geschossdecken weisen relativ wenig Masse auf, bestehen sie doch aus nur 14 cm starken Verbunddecken, die auf Stahlträgern aufliegen. Die wichtigsten Abmessungen und Charakteristiken dieser Decken gehen aus Bild 2 hervor.

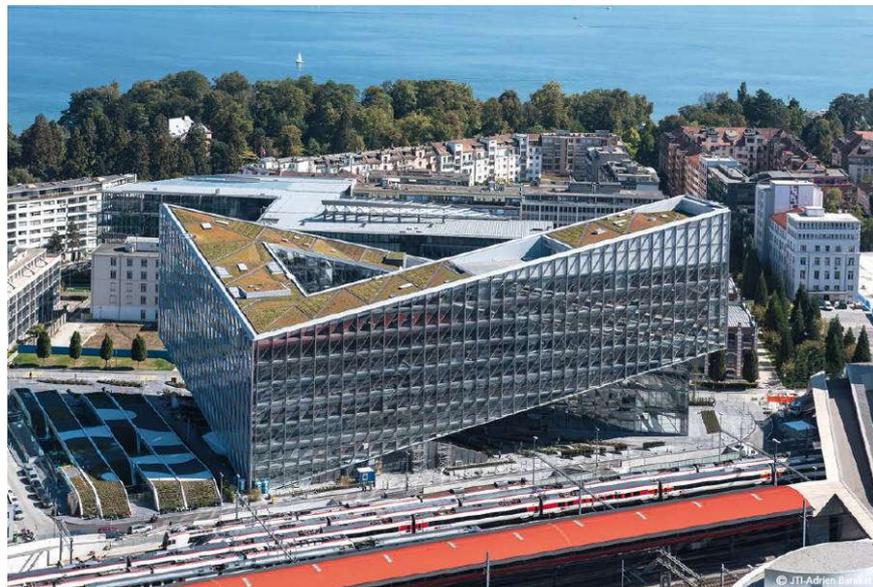


Bild 1: Bürogebäude mit teilweise frei auskragendem Tragwerk aus Stahl der SOM Architekten, London.

Messungen bei normalem Bürobetrieb, ohne gehende Personen im unmittelbaren Umfeld, haben ergeben, dass im "Normalfall" keine spürbaren Schwingungen auftreten. Selbst in der Mitte eines Deckenfeldes wurde das Schwingungskriterium VC-A eingehalten.

Eine Fouriertransformation der aufgezeichneten Schwingungen hat erlaubt, zahlreiche Eigenfrequenzen zu identifizieren (Bild 3). Besonders hervorgetreten sind eine Eigenfrequenz von 1.0 Hz, entsprechend einer horizontalen Gebäude-Eigenschwingung vorherrschend in Quer-

richtung, sowie eine Eigenfrequenz von 5.1 Hz, die im Wesentlichen der Grundeigen-
 schwingung des in Bild 2 rot umrahmten Deckenfeldes entspricht (mehr Details dazu unter
 Punkt 2). Es lassen sich aber auch weitere Eigenfrequenzen erkennen. Im Zusammenhang mit
 der hier diskutierten Schwingungsproblematik interessieren nur weitere vertikale Decken-
 eigenschwingungen: Solche sind erkennbar mit Eigenfrequenzen von 3.3, 7.3 und 9.9 Hz,
 auch wenn sie bei Zufallsanregung offenbar weit weniger stark angeregt werden.

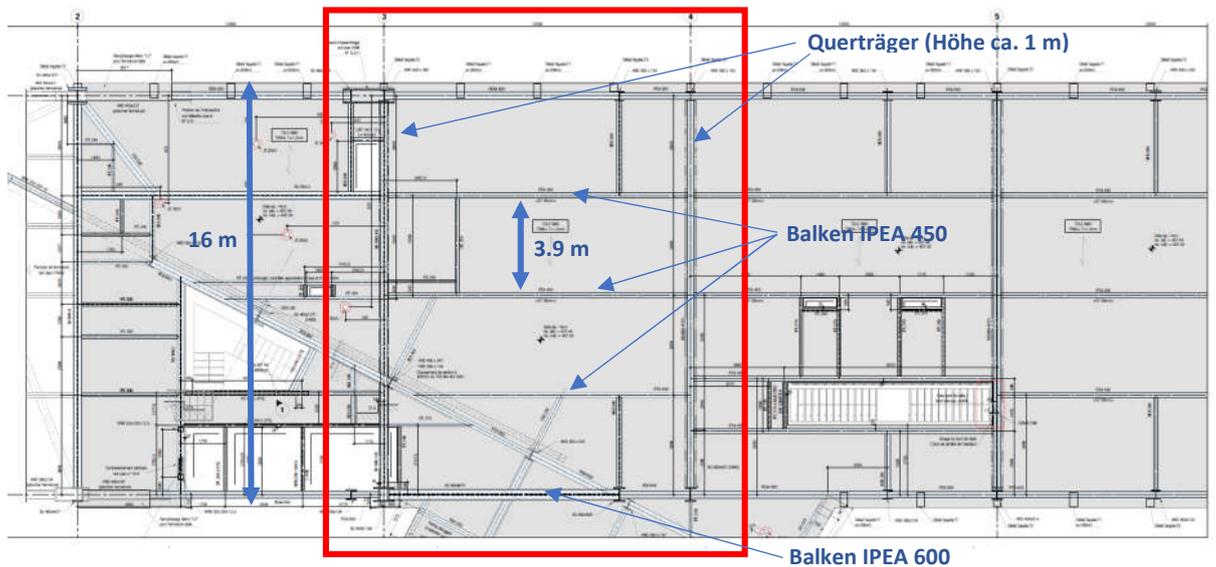


Bild 2: Aufbau der Geschossdecke in einer verhältnismässig "übersichtlichen" Zone.

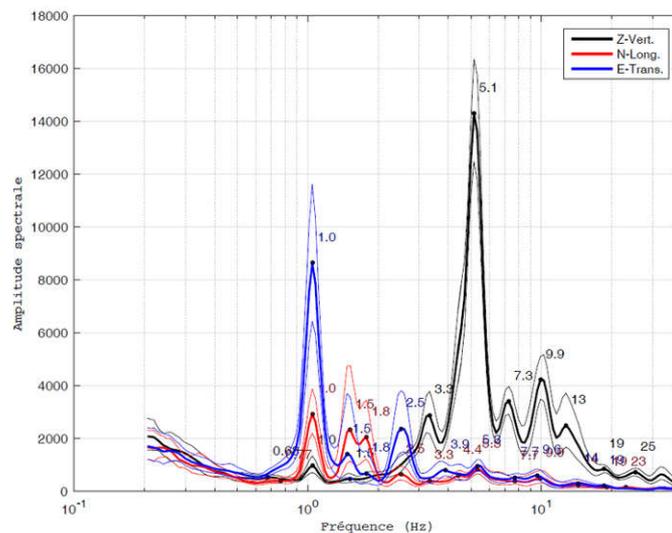


Bild 3: Fouriertransformation der in Deckenfeldmitte gemessenen ambienten
 Schwingungen bei "normalem" Bürobetrieb (Aufnehmer: Lennartz 5s).

Mit Hilfe der "Methode des Random Dekrements" [1, 2] wurde die Dämpfung für die
 horizontale Gebäudeeigenschwingung bei 1.0 Hz zu circa 0.8 % der kritischen Dämpfung
 bestimmt. Für die vertikale Deckeneigenschwingung bei 5.1 Hz ergab sich eine Dämpfung von
 knapp 2 %.

Durchschreitet eine Person gemächlich, mit einer Schrittfrequenz von 1.7 Hz, das in Bild 2 gezeigte Deckenfeld, so ergibt sich eine Resonanz zwischen der 2. Harmonischen der Schrittfrequenz und der Deckenfeld-Eigenfrequenz. Ein Versuch mit einer Person, die mit zufälliger, gemächlicher Frequenz das Deckenfeld durchschritt, ergab vertikale Schwingungen, welche die Wahrnehmungsschwelle überschritten, aber immer noch, absolut gesehen, relativ bescheiden blieben (Bild 4). Trotzdem fühlten sich mehrere Personen gestört. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, dass die Computerbildschirme an den Arbeitsplätzen an leichten Schwenkarmen befestigt sind, die ihrerseits leicht zu schwingen beginnen und das subjektive Empfinden der auftretenden Schwingungen verstärken.

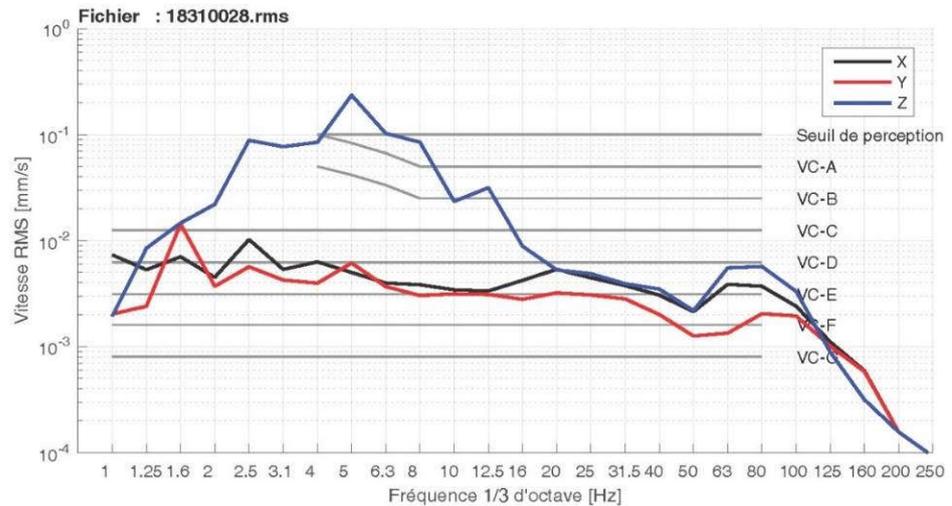


Bild 4: *Terzbandspektrum der in Deckenfeldmitte, auf dem vorhandenen Hohlboden gemessenen Schwingungen bei einer in Feldmitte umhergehenden Person (Aufnehmer: SYSCOM 3D MR3000C).*

2 Identifikation der relevanten Deckeneigenschwingungen

Würde man nur das in Bild 2 rot eingerahmte Deckenfeld für sich allein modellieren, mit starr gelagerten, aber frei drehbaren Rändern, so ergäbe sich eine Grundeigenschwingung mit einer modalen (genauer: generalisierten) Masse von 8'200 kg und einer Eigenfrequenz von circa 5 Hz. Tatsächlich aber laufen die Decken kontinuierlich über mehrere Felder, so dass eine solch vereinfachte Modellierung, zumindest was die generalisierte Masse anbelangt, zu falschen Schlussfolgerungen führt. Es wurden deshalb fünf durchgehende Deckenfelder modelliert.

Bild 5 zeigt zwei Deckeneigenschwingungen, die denjenigen entsprechen dürften, für die Eigenfrequenzen von 3.3 und 5.1 Hz gemessen worden sind. Rechnerisch wurden Eigenfrequenzen von 3.49 und 5.25 Hz gefunden, mit zugehörigen generalisierten Massen von 51'000 kg bzw. 28'000 kg.

Wie aus den Bildern 3 und 4 hervorgeht, ist die Deckeneigenschwingung mit 5.1 bzw. 5.25 Hz diejenige, die am stärksten angeregt wird. Sie weist eine generalisierte Masse auf, die 3.5-mal grösser ist, als wenn das in Bild 2 rot umrandete Deckenfeld für sich allein schwingen könnte.

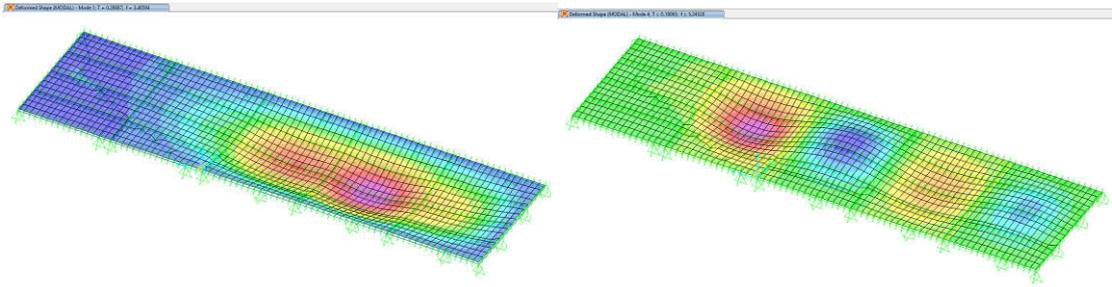


Bild 5: Links: Deckeneigenschwingung mit einer rechnerischen Eigenfrequenz von 3.49 Hz (gemessen: 3.3 Hz). Rechts: Deckeneigenschwingung mit einer rechnerischen Eigenfrequenz von 5.25 Hz (gemessen: 5.1 Hz). Diese Deckeneigenschwingung entspricht im Wesentlichen der Grundschwingung eines Deckenfeldes, wie in Bild 2 gezeigt, weist aber eine deutlich höhere generalisierte Masse auf, da mehrere solche Deckenfelder gleichzeitig schwingen.

3 Schwingungstechnische Beurteilung und mögliche Maßnahmen

Der Leitfaden HIVOOS [3] erlaubt eine Beurteilung einer Decke bzw. eines Deckenfeldes aus schwingungstechnischer Sicht mit Hilfe des sogenannten OS-RMS₉₀-Kriteriums, auf das hier aber nicht weiter eingegangen werden muss. Die generalisierte Masse und Eigenfrequenz der kritischen Deckeneigenschwingung betragen 28'000 kg und 5.1 Hz. Die Dämpfung liegt bei knapp 2 % der kritischen Dämpfung. Geht man mit diesen Werten ins Diagramm von Bild 6 (gültig für eine Dämpfung von 2 %), so landet man mit diesen Werten im untersten Bereich der Klasse C, beim Übergang zur Klasse D. Gemäß Bild 7 liegt man damit für eine gewöhnliche Büronutzung klar im "empfohlenen" Bereich.

Unseres Wissens wurden von den projektierenden Ingenieuren im Projektstadium keine expliziten Schwingungsanalysen durchgeführt. Hätten sie aber solche vorgenommen, wären sie zumindest gemäss dem Leitfaden HIVOOS zum Schluss gekommen, dass die schwingungstechnische Gebrauchstauglichkeit der Decke klar ausreichend wäre. Nichtsdestotrotz: zahlreiche Büroinsassen beklagen sich über störende Erschütterungen.

Aus den Bildern 6 und 8 lassen sich theoretisch drei mögliche Maßnahmen ablesen:

- Eine Erhöhung der Steifigkeit, die zwingend auch eine gewisse Erhöhung der Masse zur Folge hätte. Um aber in die Klasse B zu gelangen, müsste die Eigenfrequenz verdoppelt und damit die Steifigkeit vervierfacht werden. Ein solch schwerer Eingriff in die Decken-tragstruktur ist bei einem fertig bezogenen und eingerichteten Büro unrealistisch.
- Eine Erhöhung der Masse, die mit einer Verringerung der Eigenfrequenz einher ginge. Die Masse müsste aber mindestens um einen Faktor 4 erhöht werden, um (knapp) in die Klasse B zu gelangen, was eine aufwendige Verstärkung der gesamten Tragstruktur des Gebäudes erfordern würde. Auch diese Maßnahme ist unrealistisch.
- Eine Erhöhung der effektiven Dämpfung mit Hilfe von Schwingungstilgern, fortan kurz "Tilger" genannt. Aber selbst wenn die effektive Dämpfung auf, sagen wir, 9 % erhöht würde, was realisierbar wäre, würde dies nicht ausreichen, um in die Klasse B zu gelangen. Bestenfalls ließe sich der mittlere oder eventuell obere Bereich der Klasse C erreichen (Bild 8).

Andere denkbare Maßnahmen wurden mit dem Kunden besprochen. In erster Linie die Idee, die Computerbildschirme, die an leichten Schwenkarmen montiert sind, konventionell auf

den Pulten abzustellen. Oder das Auslegen eines weicheren Bodenbelags in den Zonen, in denen Personen verkehren, um die Kräfte beim Aufsetzen der FüÙe leicht zu reduzieren. Beide Ideen wurden vom Kunden verworfen. Damit blieb nur noch die Hoffnung, die Erschütterungen mit Hilfe von Tilgern mindern zu können.

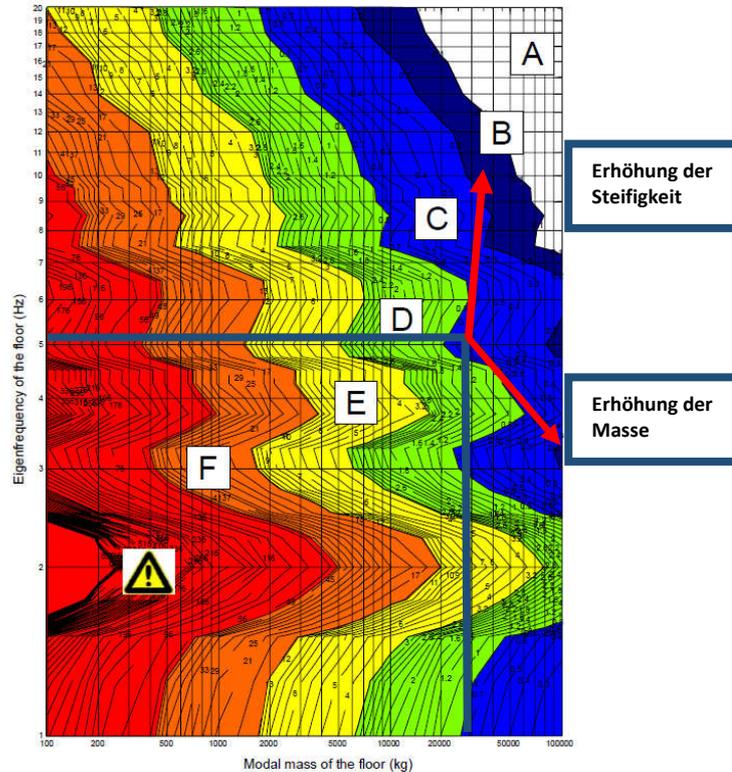


Bild 6: Deckenklassifikation gemäß Leitfaden HIVOSS [3] in Funktion der generalisierten Masse (28'000 kg) und der Grundeigenfrequenz (5.1 Hz) für eine Dämpfung der Deckeneigenschwingung von 2 %.

Class	OS-RMS ₉₀		Function of Floor												
	Lower Limit	Upper Limit	Critical Workspace	Health	Education	Residential	Office	Meeting	Retail	Hotel	Prison	Industrial	Sport		
A	0.0	0.1	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green		
B	0.1	0.2	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green		
C	0.2	0.8	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green		
D	0.8	3.2	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green		
E	3.2	12.8	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green		
F	12.8	51.2	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red		

Legend:
■ Recommended
■ Critical
■ Not recommended

Bild 7: Empfehlungen gemäß Leitfaden HIVOSS [3] für die Eignung von Deckenklassen für unterschiedliche Nutzungen: die bestehende Decke liegt für Büronutzung klar im empfohlenen Bereich.

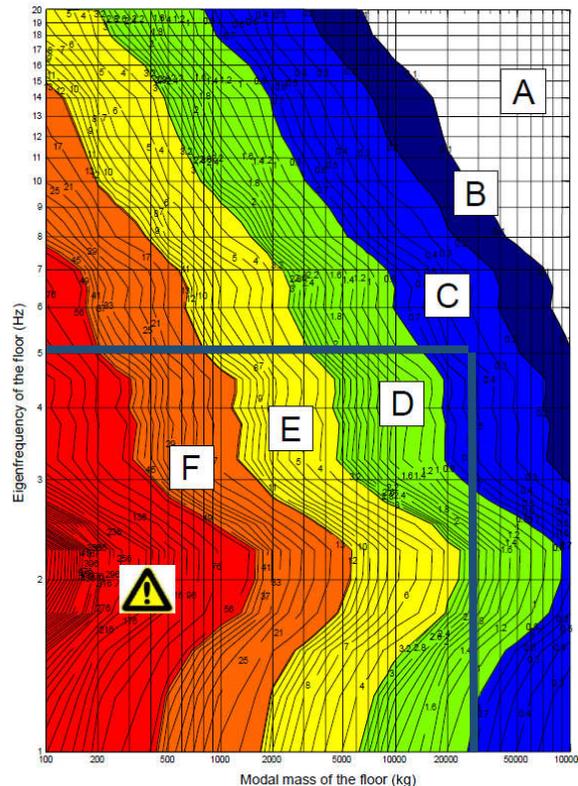


Bild 8: Deckenklassifikation gemäß Leitfaden HIVOSS [3] in Funktion der generalisierten Masse (28'000 kg) und der Grundeigenfrequenz (5.1 Hz) für eine Dämpfung der Deckeneigenschwingung von 9 %.

Im vorliegenden Fall war a priori nicht zu erwarten, dass Tilger eine ausreichende, in Anbetracht des relativ beträchtlichen Aufwandes zufriedenstellende Wirkung hervorrufen würden, und dies aus drei Gründen:

- Geeignet abgestimmte Tilger bewirken beeindruckende Schwingungsminderungen, wenn die Ausgangsdämpfung des zu beruhigenden Systems $< 1\%$ ist. Im vorliegenden Fall weist das zu beruhigende Deckenfeld aber bereits eine Dämpfung von 1.7% auf.
- Erfahrungsgemäß sind Flächentragwerke schwieriger zu beruhigen als lineare Tragwerke, da sie oft mehrere wichtige Eigenschwingungen, oft mit nahe beieinander liegenden Eigenfrequenzen, aufweisen. Für jede zu beruhigende Eigenschwingung aber braucht es einen eigenen Tilger.
- Die Platzverhältnisse und statischen Tragreserven lassen nur relativ bescheidene Tilgermassen zu.

Trotz der Vorwarnung, dass sich die Wirkung von Tilgern als enttäuschend herausstellen könnte, hat sich der Kunde dafür entschieden, eine Pilotinstallation für das in Bild 2 gezeigte Deckenfeld vorzunehmen. Dieses Deckenfeld schien hierzu insofern besonders geeignet zu sein, als hier eine einzige Deckeneigenschwingung vorherrschte. Bei anderen Deckenfeldern, bei denen sich die Benutzer ebenfalls beklagten, ergaben Messungen, dass in der Regel mehrere Deckeneigenschwingungen an den störenden Schwingungen beteiligt waren. Dort wären somit unterschiedlich abgestimmte Tilger notwendig gewesen.

4 Konzeption von Tilgern

Bei Systemen mit schwacher Dämpfung von $< 1\%$ der kritischen Dämpfung reichen in der Regel bewegliche Tilgermassen aus, die 2 bis 3 % der generalisierten Masse entsprechen. Da die Decke im vorliegenden Fall aber bereits eine Dämpfung von knapp 2 % aufwies, wurde eine bewegliche Tilgermasse von 5 % angestrebt. Bei einer generalisierten Masse von 28'000 kg bedeutet dies eine bewegliche Tilgermasse von 1'400 kg. Dies entsprach auch etwa dem Maximum, das ohne statische Deckenverstärkung möglich war.

Zumindest für die Pilotinstallation wurde beschlossen, den bzw. die Tilger unter dem Hohlboden zu installieren, da dies eine einfache Montage erlaubte. Allerdings mussten dadurch die horizontalen Abmessungen der Tilger (1.15 m x 0.48 m) so gewählt werden, dass diese zwischen den Hohlboden-Abstützungen Platz haben (Bild 9). Und die Höhe der Tilger wurde im Ruhezustand auf 10.5 cm beschränkt, mit einer maximalen vertikalen Amplitude von ± 5 mm, da die lichte Höhe unter dem Hohlboden nur knapp 13 cm beträgt.

Schließlich wurden von der Firma GERB Schwingungsisolierungen GmbH & Co. KG sechs Tilger mit je einer bewegten Masse von 250 kg entworfen, die in der Mitte des Deckenfelds eingebaut wurden, welches in Bild 2 rot umrandet ist.



Bild 9: Geschosdecke mit den Stützen des Hohlbodens bei entfernten Abdeckplatten in der Mitte des Deckenfeldes.

Bild 10 zeigt die eingebauten Tilger. Die Feinabstimmung vor Ort erfolgte mit Hilfe eines Schwingungsgenerators des Typs Wölfel BD.5 (auf Bild 10 sichtbar), der in der Lage ist, zwischen 1 und 100 Hz Vertikalschwingungen mit einer Kraft von bis zu 500 N zu erzeugen. Die Eigenfrequenz der Tilger hätte sich über Änderungen bei den Federn regulieren lassen; die werkseitige Einstellung erwies sich jedoch auf Anhieb als die optimale Abstimmung der Tilger.



Bild 10: Die in der Mitte eines Deckenfeldes eingebauten sechs Tilger, bei abgedecktem Hohlboden. Im mittleren Bereich rechts ist der Schwingungsgenerator Wölfel BD.5 sichtbar.

5 Wirksamkeit der Tilger

Zur Feinabstimmung der Tilger wurden mit dem Schwingungsgenerator Sweeps zwischen 1 und 10 Hz gefahren und die dabei maximal erreichten Amplituden für verschiedene Federn miteinander verglichen. Der Einsatz eines Schwingungsgenerators erlaubt, die Decke mit einer ausreichend genau reproduzierbaren Quelle anzuregen, so dass auch kleine Unterschiede in den resultierenden Amplituden erkennbar werden. Bei einer Anregung mit zufällig umhergehenden Personen ist diese Reproduzierbarkeit nur bedingt gegeben, dafür aber handelt es sich um einen wesentlich realitätsnäheren Versuch.

Bild 11 zeigt die Zeitsignale für eine Anregung mit Hilfe des Schwingungsgenerators mit je einem Sweep von 1 bis 10 Hz, einerseits für blockierte Tilger ("ohne Tilger") und andererseits für optimal abgestimmte, frei schwingende Tilger ("mit Tilger"). Klar zu erkennen sind eine deutliche Abnahme der Amplitude der von den Tilgern beruhigten Eigenschwingung sowie eine leichte Zunahme der Amplituden bei den unmittelbar benachbarten Frequenzen (infolge der Sweep-Anregung kann der Amplitudenverlauf des Zeitsignals qualitativ auch als Spektrum interpretiert werden), genau wie von der Theorie her erwartet.

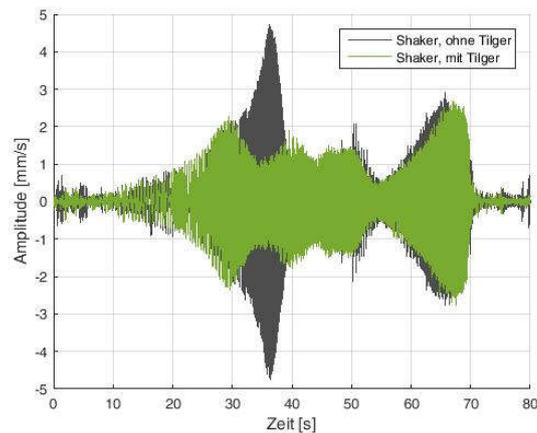


Bild 11: Zeitsignale infolge je einer Sweep-Anregung mit dem Schwingungsgenerator von 1 bis 10 Hz, mit und ohne Tilger, einander überlagert dargestellt.

Bild 12 präsentiert die Fourierspektren der in Bild 11 gezeigten Zeitsignale: Die Wirkung der Tilger ist deutlich zu erkennen.

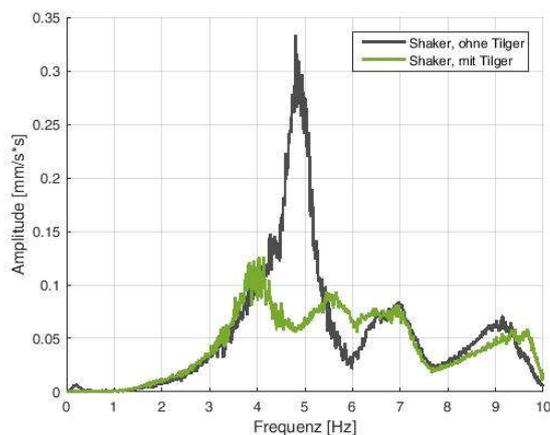


Bild 12: Fourierspektren der in Bild 11 gezeigten Zeitsignale.

Bild 13 schließlich zeigt die Schwingungen, wie sie von zwei zufällig umhergehenden Personen erzeugt wurden. Es handelte sich in beiden Fällen um dieselben Personen, die versuchten, sich möglichst "gleich zufällig" zu bewegen. Erwartungsgemäß blieb die Wirkung der Tilger bescheiden. Die in Bild 13 ersichtliche Abnahme der Amplituden war aber subjektiv trotzdem deutlich wahrnehmbar. Mit Hilfe des logarithmischen Dekrements wurde eine Zunahme der äquivalenten Dämpfung der von den Tilgern beruhigten Eigenschwingung von 1.7 % auf 3.5 % gemessen.

Zur Beurteilung der Wirkung der Tilger eignet sich eine Darstellung der Schwingungsniveaus in Form von Terzspektren am besten. Bild 14 zeigt die Terzspektren der in Bild 11 dargestellten Zeitsignale, und in Bild 15 sind die Terzspektren für die in Bild 13 enthaltenen Zeitsignale zu sehen. In beiden Fällen wurden die Amplituden in der maßgebenden Terz um einen Faktor von 2.5 bis 3 verringert.

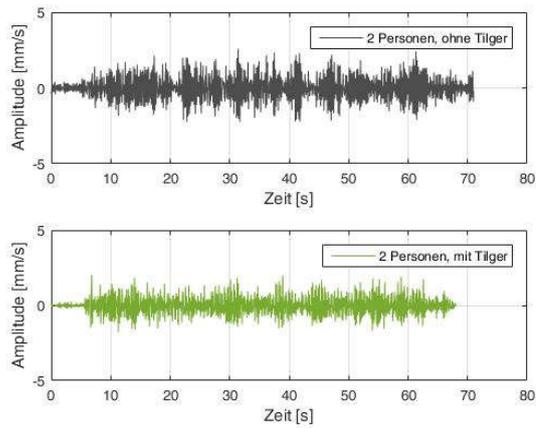


Bild 13: Zeitsignale infolge zweier zufällig umhergehender Personen, mit und ohne Tügel – einzeln dargestellt, da überlagert nur schwer auseinander zu halten.

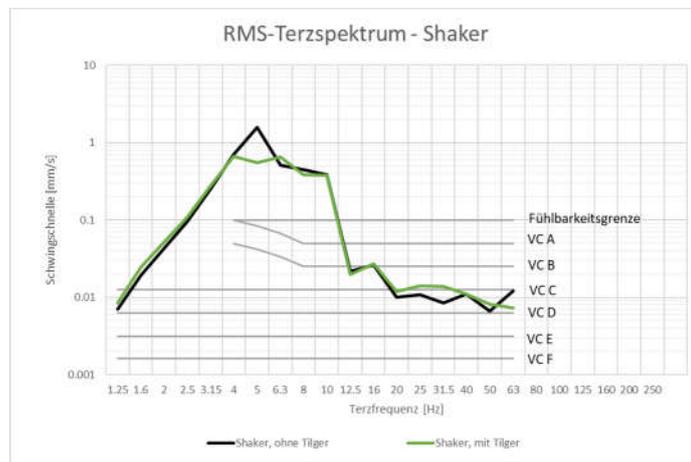


Bild 14: Terzbandspektren der in Bild 11 dargestellten Zeitsignale.

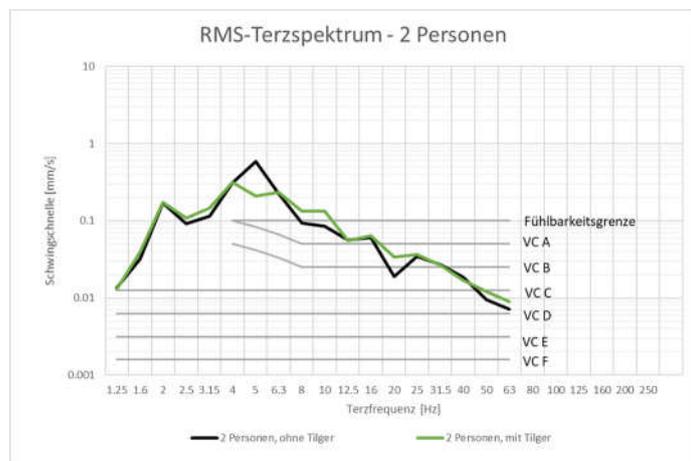


Bild 15: Terzbandspektren der in Bild 13 dargestellten Zeitsignale.

Wie anhand von Bild 15 zu erkennen ist, bleiben die Schwingungen bei zwei gemächlich herumgehenden Personen trotz des Einbaus der Tilger immer noch im wahrnehmbaren Bereich.

6 Schlussfolgerungen

Aus den hier dargestellten Untersuchungen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Das Einhalten der Schwingungs-Kriterien des Leitfadens HIVOSS [3] ist keine absolute Garantie dafür, dass sich die Gebäudebenutzer nicht über störende Schwingungen beklagen werden. Klagen dürften vor allem dann auftreten, wenn Einrichtungen (wie etwa leichte Schwenkarme zur Haltung von Bildschirmen) vorhanden sind, die selbst leicht zu Schwingungen angeregt werden können.
- Bei (zu) leichten und "weichen" Bürodecken ist es praktisch unmöglich, die von umhergehenden Personen verursachten Schwingungen nachträglich mit vertretbarem Aufwand mit passiven Systemen ausreichend zu beruhigen.

Im hier dargestellten Fall hat der Kunde schließlich darauf verzichtet, weitere Tilger einbauen zu lassen. Auch wenn mit der Pilotinstallation eine spürbare Schwingungsminderung erzielt werden konnte, wurde diese als nicht ausreichend befriedigend eingestuft – insbesondere nicht in Anbetracht des Aufwands, der selbst für eine bescheidene Schwingungsminderung notwendig wäre.

7 Quellen

- [1] Caughey T.K. und H.J. Stumpf. "Transient Response of a Dynamic System Under Random Excitation", Journal of Applied Mechanics, pp. 563-566, 1961.
- [2] Dunand F., P.Y. Bard, J.L. Chatelain, Ph. Guéguen, T. Vassail und M.N. Farsi. "Damping and Frequency from Randomdec Method Applied to In Situ Measurements of Ambient Vibrations: Evidence for Effective Soil Structure Interaction". Proceedings of the 12th European Conference of Earthquake Engineering, London, 2002.
- [3] HIVOOS Guide – European Commission – Technical Steel Research: "Generalisation of criteria for floor vibrations for industrial, office, residential and public building and gymnastic halls", RFCS Report EUR 21972 EN, ISBN 92-79-01705-5, 2006, <http://europa.eu.int>