

"Mysteriöse" Schwingungen eines massiven Parkhauses

Martin G. Koller und Sylvette Thomassin
Résonance Ingénieurs-Conseils SA, Carouge

1 Ausgangslage: "mysteriöse" Schwingungen

Zum Einkaufszentrum Balexert in Genf gehört ein sechsstöckiges Parkhaus in Massivbauweise (Bilder 1 und 2). Dieses weist einen exzentrisch angeordneten Stahlbetonkern auf, der in der Mitte der linken Bildhälfte von Bild 1 zu erkennen ist. Darüber hinaus ist das Parkhaus horizontal mit Stahlverbänden ausgesteift (Bild 3).



Bild 1: Massives sechsstöckiges Parkhaus mit Clubschule im obersten Geschoss. Der exzentrisch angeordnete Stahlbetonkern ist in der Mitte der linken Bildhälfte zu erkennen.

Im obersten Geschoss wird eine Clubschule betrieben, in der unterschiedlichste Kurse angeboten werden, von Sprach- oder Computerkursen über Mal- und Kochkurse bis hin zu Gymnastikkursen.

Unser Büro wurde zu Rate gezogen, nachdem während mehrerer Abende "mysteriöse" Schwingungen unbekanntem Ursprungs aufgetreten waren. Mehrere Teilnehmer an Kursen mit ausschließlich ruhiger, sitzender Tätigkeit, wie etwa Sprachkursen, hatten ihre Kurse mit der Erklärung verlassen, sie fühlten sich unwohl und befürchteten, demnächst in Ohnmacht zu fallen. Wir wurden deshalb gebeten, diese rätselhaften Schwingungen zu dokumentieren,

deren Ursachen herauszufinden und Wege aufzuzeigen, wie diese vermieden oder wenigstens vermindert werden könnten.



Bild 2: Weitere Ansichten des massiven sechsstöckigen Parkhauses.

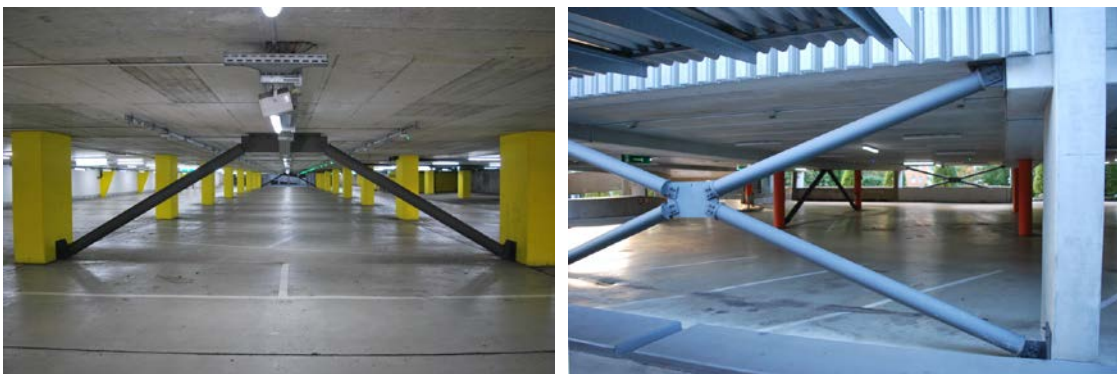


Bild 3: Stahlverbände, welche die horizontale Aussteifung durch den exzentrisch angeordneten Stahlbetonkern ergänzen.

Die erwähnten Schwingungen schienen nur abends aufzutreten, während der stärksten Auslastung des Kurszentrums – entsprechende "Zeugen"ausagen waren allerdings teilweise widersprüchlich. Der Auftraggeber hegte deshalb den Verdacht, es könnte sich um einen Defekt bei der Lüftung handeln, die jeweils abends, bei starker Auslastung des Zentrums, ebenfalls mit einer höheren Auslastung arbeitete als tagsüber.

2 Suche nach der Ursache: 1. Messkampagne

Eine erste Messkampagne hatte zum Ziel, die Ursache der "mysteriösen" Schwingungen herauszufinden. Gemessen wurde an einem Abend in einem leeren Unterrichtszimmer, dem Saal 19 (vgl. Bild 9), in dem die Schüler am Vorabend die Schwingungen besonders stark gespürt hatten. Für diese Messungen kam ein hochempfindliches, tieffrequentes, dreiaxiales Seismometer, ein Lennartz LE-3D-5s, mit einer Eigenperiode von 5 s, zum Einsatz. Bild 4 zeigt den Verlauf der Schwingungsamplituden von 17:55 bis 20:30 Uhr. Als erstes fällt auf, dass relativ starke Schwingungen in beide horizontale Richtungen, aber nicht in vertikaler Richtung auftraten (die vereinzelt stärkeren Ausschläge auf dem vertikalen Schrieb, zwischen 20:00 und 20:10 Uhr, wurden von einer Person verursacht, die im Unterrichts-

zimmer umherging). Tatsächlich liegen die Eigenfrequenzen der tiefsten vertikalen Schwingformen weit über 10 Hz, so dass in vertikale Richtung keine Probleme zu erwarten waren.

Die ersten starken Schwingungen traten kurz vor 18:30 Uhr auf und sättigten die Messkette in der anfänglich verwendeten Verstärkerkonfiguration. Um 19:25 Uhr herum und zwischen 20:20 und 20:25 Uhr traten wiederum starke Schwingungen auf, mit Amplituden bis 1.5 mm/s in Längs- und sogar 2.0 mm/s in Querrichtung bezüglich der Gebäudeachsen. Die Messoperateurin – die zweite Autorin des vorliegenden Beitrags – empfand die aufgetretenen Schwingungen subjektiv als ausgesprochen unangenehm.

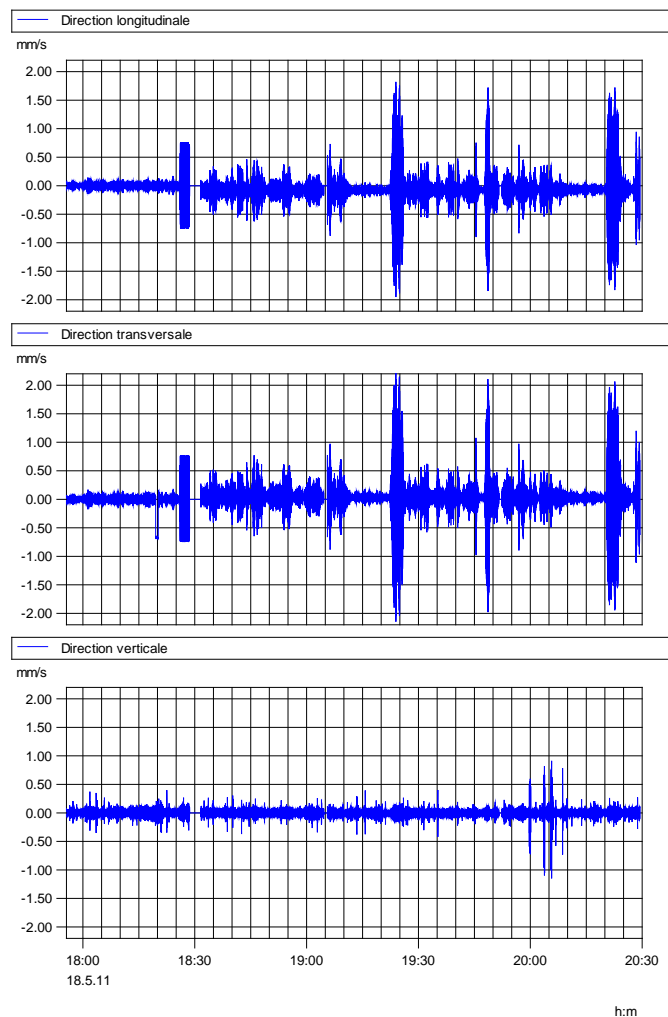


Bild 4: Amplitudenverlauf der Schwingungen im Unterrichtszimmer 19, von 17:55 bis 20:30 Uhr. Oben: in Längsrichtung; Mitte: in Querrichtung; unten: in vertikaler Richtung. Die Zumba-Kurse begannen um 18:20, 19:15 und 20:15.

Am Messabend fanden gleichzeitig in drei Sälen Gymnastikkurse unterschiedlichster Art statt. Beobachtungen in den entsprechenden Säle liessen schnell den Verdacht aufkommen, dass der Zumba-Kurs, der "bewegtteste" aller Kurse, die Schwingungen verursachen könnte. Die starken Schwingungen waren zum ersten Mal gut fünf Minuten nach Beginn des ersten Zumba-Kurses aufgetreten. Die Kursleiterin wurde deshalb gebeten, in den zwei folgenden Kursen genau das gleiche Musik- und Tanzprogramm durchzuspielen, und tatsächlich waren beide Male wieder circa fünf Minuten nach Kursbeginn starke Schwingungen identischer

Dauer zu beobachten. Zu beachten ist dabei, dass diese starken Schwingungen von nur gut 20, überwiegend schlanken bis sehr schlanken Frauen verursacht wurden, mit einem durchschnittlichen Gewicht von kaum über 50 kg. Dies bedeutete zwingend, dass ein ausgeprägtes Resonanzphänomen zugrunde liegen musste. Anders hätten sich die aufgetretenen Schwingungsamplituden nicht erklären lassen.

Bild 5 zeigt die Fourierspektren der horizontalen Schwingungskomponenten, in rot für Messungen vor Beginn jeglicher Kurse, und in blau für die Phasen stärkster Amplituden. Rot zeigt im Wesentlichen eine Eigenschwingung mit 1.64 Hz, und blau eine erzwungene Schwingung mit derselben Grundfrequenz, wobei aber auch die erste Oberfrequenz deutlich angeregt ist: Diese Kurven bestätigen, dass es sich ganz offensichtlich um ein Resonanzproblem handelt. Auffallend ist, dass die Eigenfrequenzen, soweit von Auge erkennbar, in beide Richtungen identisch sind. Es muss somit eine Torsions- oder Biegetorsionsschwingung des ganzen Parkhauses vorliegen.

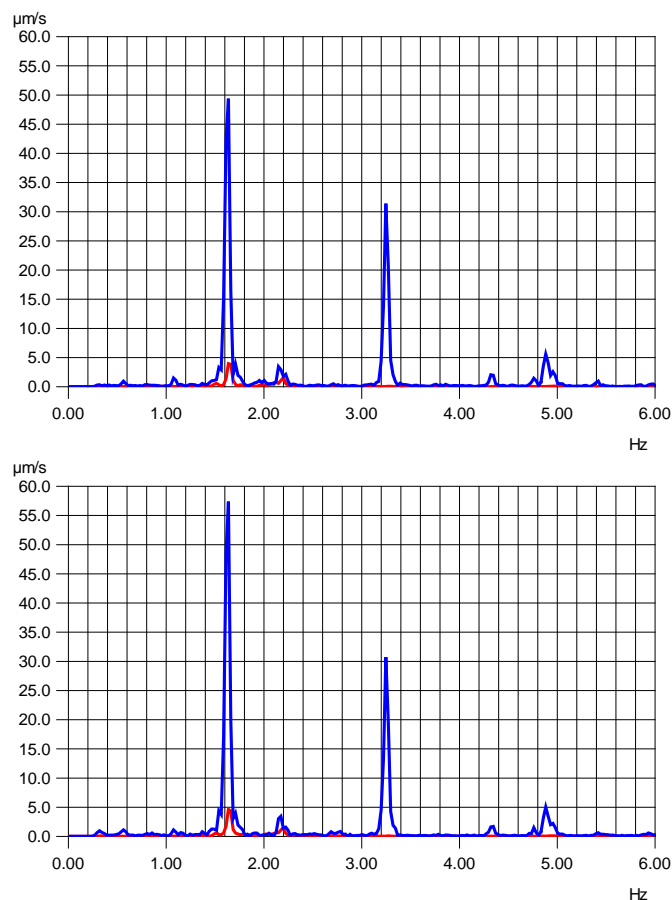


Bild 5: Fourierspektren der horizontalen Schwingungskomponenten (oben in Längsrichtung, unten in Querrichtung). Rot: Spektrum einer Messung vor Beginn jeglicher Kurse; blau: Spektrum während einer der Phasen maximaler Amplituden.

Die Frage war nun, wie sich eine horizontale Eigenschwingung mit einer Eigenfrequenz von 1.64 Hz mit einem Tanzschritt anregen lässt. Genauer Beobachten des grosse Schwingungsamplituden verursachenden Tanzschrittes, zusammen mit einem Auszählen des Musiktaktes, erlaubte schliesslich, sich Klarheit zu verschaffen. Bild 6 veranschaulicht, wie die Anregung der Biegetorsionsschwingung letztlich zustande kam: Zu jedem Takt wurde ein Schritt

getanzt, der "kick-pose-change" genannt wird. Es handelt sich dabei um drei schnelle Schritte und eine kurze Pause. Der letzte der drei Schritte wird abwechselnd seitlich nach links oder rechts ausgeführt. Die grossen Schwingungsamplituden ergaben sich bei etwa 65 Takten pro Minute (TPM). 65 TPM bedeutet eine Taktdauer von 0.91 s, was 1.5-mal der Schwingdauer der Gebäude-Eigenschwingung entspricht. Damit ergibt sich eine Anregung (rote Pfeile in Bild 6) bei jedem dritten Nulldurchgang der Gebäudeschwingung.

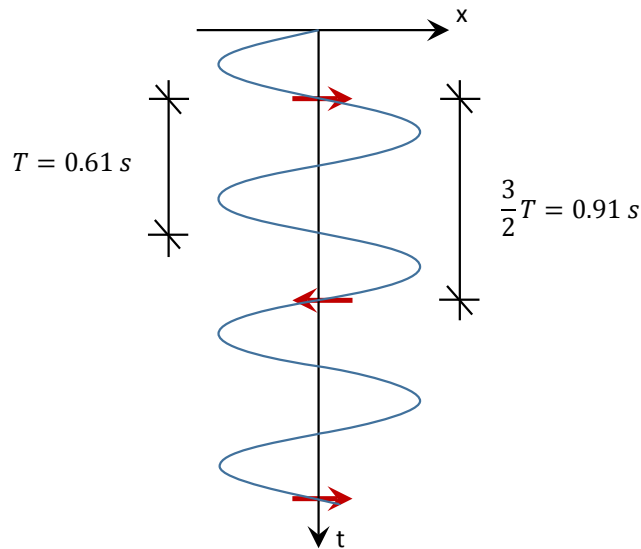


Bild 6: Veranschaulichung der Anregung der horizontalen Gebäudeschwingungen: alle 0.91 s wird abwechselungsweise ein seitlicher Schritt nach links oder rechts ausgeführt.

3 Bestimmung der kritischen Taktzahlen: 2. Messkampagne

Ausserhalb der Phasen mit den stärksten Schwingungen blieben die Amplituden auf Maximalwerten von 0.5 mm/s beschränkt. Solche Amplituden sind zwar deutlich spürbar und werden oft schon als störend empfunden, bewirkten aber noch kaum Gefühle von Unwohlsein bei den Kursteilnehmern mit ruhiger Tätigkeit. Es stellte sich deshalb die Frage, ob zumindest als Sofortmassnahme die Möglichkeit bestünde, die kritischsten Taktzahlen zu vermeiden, so dass keine Amplituden mehr aufträten, die grösser als 0.5 mm/s sind.

Im Rahmen einer zweiten Messkampagne wurde deshalb ein ausgesprochen rhythmisches Musikstück in verschiedenen Geschwindigkeiten abgespielt, und die Zumba-Kursteilnehmer wurden gebeten, dazu immer wieder den "kick-pose-change"-Tanzschritt auszuführen. Abgedeckt wurden dabei die Taktzahlen von 56 bis 72 TPM. Bild 7 zeigt die zeitlichen Aufzeichnungen der Schwingungen, die sich bei diesen Versuchen ergaben, und Bild 8 stellt die maximal erreichten Amplituden in Funktion der Taktzahl dar.

Die Taktzahlen 64, 65 und 66 TPM bewirkten die stärksten Schwingungen, mit komponentenweisen Maximalwerten von etwa 2 mm/s. Grössere Amplituden als 0.5 mm/s ergaben sich für alle Taktzahlen von 60 TPM bis 68 oder gar 70 TPM. Unter 60 TPM aber wird der Rhythmus so langsam, dass er langweilig wirkt und nicht mehr zum Tanzen anregt. Und ab einer Taktzahl von 72 TPM wird der Rhythmus zu schnell als dass er sich noch mit dem "kick-pose-change"-Schritt auch nur während einer Minute tanzen liesse. Die Idee, einfach die

kritischsten Taktzahlen zu meiden, den "kick-pose-change"-Schritt aber beizubehalten, führte deshalb nicht zum Ziel.

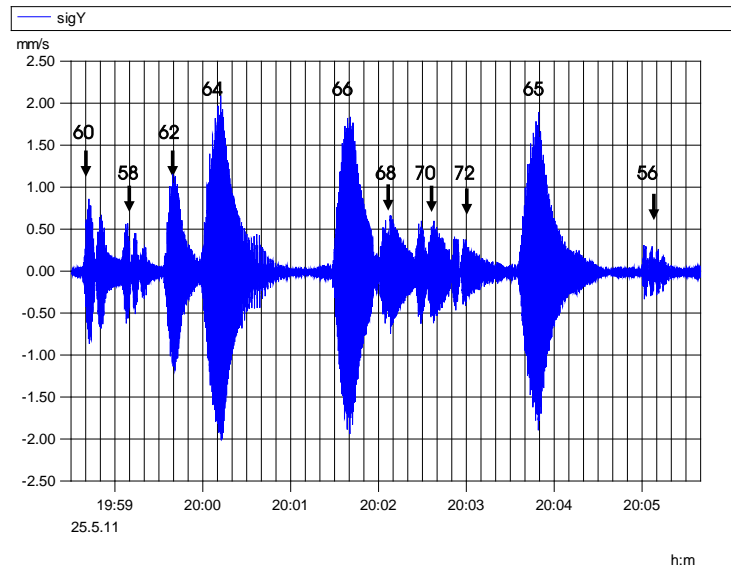


Bild 7: Versuche mit dem "kick-pose-change"-Tanzschritt zu verschiedenen Takten (TPM von 56 bis 72).

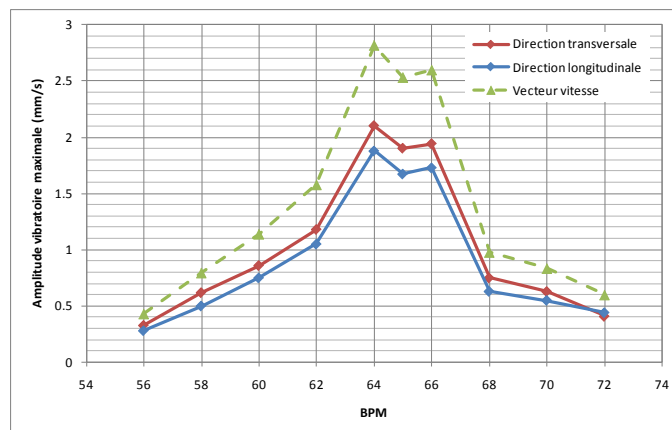


Bild 8: Versuche mit dem "kick-pose-change"-Tanzschritt zu verschiedenen Takten: Maximale Amplituden in Funktion der Taktzahl TPM (manchmal auch BPM genannt).

4 Suche nach einfachen Lösungen: 3. Messkampagne

Aus rein ingenieurmässiger Sicht hätte die naheliegendste Lösung natürlich darin bestanden, im untersten Geschoss des Parkhauses eine Art Gymnastikzentrum einzurichten und die Zumba-Kurse dorthin zu verlegen. Diese Lösung kam aber insbesondere aus Kostengründen nicht in Frage.

Da offensichtlich eine Torsions- oder Biegetorsionsschwingung angeregt wurde, drängte sich als Lösungsansatz auf, die Zumba-Kurse in einen Saal zu verlegen, der sich möglichst nahe beim Steifigkeitszentrum des Parkhauses befindet. Bild 9 zeigt die Lage des sehr massiven

Stahlbeton-Liftschachts im Grundriss. Da die horizontale Aussteifung des Parkhauses im Übrigen aus deutlich weniger steifen Stahlverbänden besteht (Bild 3), dürfte sich das Steifigkeitszentrum in der Nähe des Liftschachts befinden.

Die Zumba-Kurse wurden bis anhin im Saal 27 abgehalten, mit ausgeprägter Exzentrizität in Bezug auf den Liftschacht, und die Schwingungen wurden im Saal 19 gemessen. In unmittelbarer Nähe zum Liftschacht befinden sich keine Säle, die sich zur Durchführung der Zumba-Kurse geeignet hätten. Einzig der Zeichensaal bot sich an, mit wohl etwa halber Exzentrizität in Bezug auf das Steifigkeitszentrum. Versuchsweise wurde deshalb ein Zumba-Kurs in den Zeichensaal verlegt, und tatsächlich haben die Messungen gezeigt, dass die Schwingungsamplituden um einen Faktor von knapp 2 geringer ausfielen. Damit ergaben sich Schwingungen mit Amplituden von etwa 1 mm/s, welche aber immer noch als allzu störend empfunden wurden.

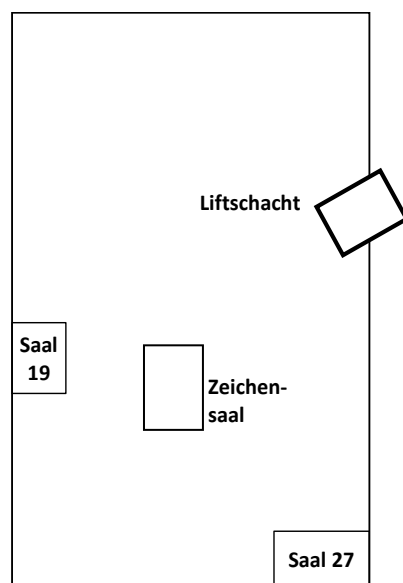


Bild 9: Anordnung der im Text erwähnten Säle in Bezug auf den Stahlbeton-Liftschacht.

Die Teilnehmerinnen der Zumba-Kurse im Saal 27 waren jeweils mit Blick in Richtung der langen Saalwand, in Richtung des Liftschachtes, ausgerichtet. In diesem Fall wirken die seitlichen Kräfte, die in Bild 6 schematisch dargestellt sind, parallel zur kurzen Gebäudeachse, also mit maximaler Exzentrizität in Bezug auf den Liftschacht. Bei einer um 90 Grad gedrehten Aufstellung hingegen wären die horizontalen Kräfte fast direkt zum Liftschacht hin gerichtet, so dass sich eine deutlich geringere Anregung der Torsion oder Biegetorsion ergeben sollte. Deshalb wurde, in einem weiteren Kurs, ein entsprechender Versuch durchgeführt.

Bild 10 zeigt einmal mehr die Schwingungen, die mit dem "kick-pose-change"-Schritt erzeugt wurden, wie sie im Saal 19 gemessen wurden. Zuerst tanzten 20 Teilnehmerinnen in der üblichen Ausrichtung zu drei Musikstücken, und unmittelbar anschliessend tanzten dieselben Teilnehmerinnen zu den exakt gleichen Musikstücken, aber in um 90 Grad gedrehter Ausrichtung. Dabei ergab sich, wie erwartet, eine starke Abnahme der angeregten Schwingungen. Bei 20 Teilnehmerinnen resultierten noch maximale Amplituden von etwa 0.5 mm/s. Schwingungen dieser Stärke blieben zwar noch immer deutlich spürbar, veranlassten aber niemanden mehr, die betroffenen Räume zu verlassen.

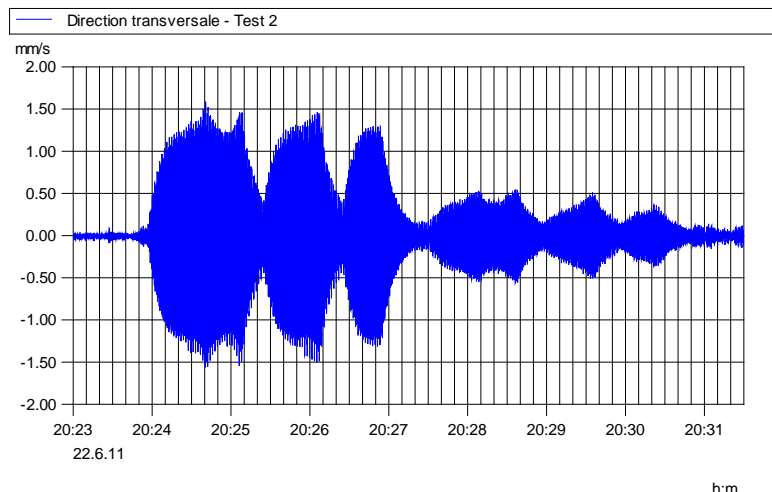


Bild 10: Reduktion der Schwingungsamplituden um knapp einen Faktor 3 durch eine Drehung um 90 Grad der Ausrichtung der Tänzerinnen.

Aufgrund dieser Versuchsergebnisse wurde der Schulleitung im Sinne einer Sofortmassnahme empfohlen, die Zumba-Kurse mit um 90 Grad gedrehter Ausrichtung der Teilnehmerinnen durchzuführen. Allerdings: Die ursprüngliche Ausrichtung führte zu nur wenigen Reihen von Teilnehmerinnen, die sich hintereinander befinden, und erlaubte deshalb allen einen mehr oder weniger ungestörteren Blick auf die vortanzende Kursleiterin. Eine um 90 Grad gedrehte Ausrichtung hingegen führte zu mehr Reihen hintereinander, so dass aus den hinteren Reihen kaum noch ein freier Blick auf die Kursleiterin bestand. Schliesslich werden deshalb die Zumba-Kurse mit der ursprünglichen Ausrichtung der Teilnehmerinnen durchgeführt, auf den "kick-pose-change"-Schritt aber wird seither schlicht und einfach verzichtet.

5 Schlussfolgerungen

Es ist, zumindest in Fachkreisen, weitherum bekannt, dass Gymnastik- und Tanzkurse zu starken Schwingungen führen können, die im Extremfall nicht nur ein Komfort-, sondern unter Umständen sogar ein Tragsicherheitsproblem darstellen können. Hierbei handelt es sich aber in der Regel um Vertikalschwingungen von Decken, und zwar fast ausschliesslich von Decken mit einer Grundeigenfrequenz, die unter 7 oder 8 Hz liegt. Dass aber nur gerade 20 bis 25 Tänzerinnen ein grosses, sechsstöckiges Parkhaus in Massivbauweise zu so starken horizontalen Schwingungen anregen können, dass mehrere Leute das Gebäude verlassen, hielten die Autoren des vorliegenden Beitrages nicht für möglich, bevor sie mit dem hier vorgestellten Fall konfrontiert worden waren.

Mit einer Grundeigenfrequenz von 1.64 Hz weist das untersuchte Parkhaus keineswegs exotische Parameter auf. Bei einem Neubau eines Gebäudes, das Tanz- oder Gymnastikschulen beherbergen wird, sollten deshalb nicht nur vertikale Deckenschwingungen untersucht werden. Auch der Möglichkeit einer Aufschaukelung horizontaler Schwingungen sollte gebührende Beachtung geschenkt werden.