

Schulanlage Leutschenbach: Dynamische Aspekte der Turnhalle im 5. OG

Dr. Walter Kaufmann, dsp Ingenieure & Planer AG, Greifensee/Zürich, CH
kaufmann@dsp.ch

Einleitung

Das städtebaulich und architektonisch überzeugende Bauwerk der Schulanlage Leutschenbach ging im Jahre 2003 als Siegerprojekt aus einem zweistufigen Projektwettbewerb hervor (Abb. 1) und wurde anschliessend weiter entwickelt und realisiert (Abb. 2).

Am Rohbau waren primär folgende Personen und Firmen beteiligt:

<i>Bauherrschaft:</i>	Amt für Hochbauten, Stadt Zürich
<i>Architekten:</i>	Christian Kerez, Zürich BGS Architekten, Rapperswil
<i>Bauingenieure:</i>	Dr. Schwartz Consulting AG, Zug (Wettbewerb/Konzept, Federführung, Massivbau) dsp Ingenieure & Planer AG, Zürich / Greifensee (Stahlbau, Baugrube, Foundation)
<i>Stahlbau:</i>	Zwahlen + Mayr SA, Glattbrugg / Aigle (Montagegemeinschaft mit Geilinger)
<i>Baumeister:</i>	Barizzi AG, Bertschikon
<i>Spezialtiefbau:</i>	Kibag, Zürich
<i>Experten / Berater:</i>	Prof. Dr. M. Fontana, ETH Zürich (Brandschutz) Ziegler Consultants (Schwingungsmessungen)



Abb. 1 Vision des Architekten (Wettbewerbsprojekt)

Aus ingenieurtechnischer Sicht weist das Bauwerk verschiedenen Besonderheiten auf, welche sich wie folgt zusammenfassen lassen:

<i>Tragstruktur:</i>	Mehrgeschossige, teilweise aussenliegende Fachwerke Im EG nur sechs Auflagerpunkte (Dreibein, maximal 35'000 kN Vertikallast pro Dreibein) Turnhalle im 5. Obergeschoss Hohlprofile mit optimiertem Querschnitt
<i>Materialien:</i>	Hochfester, thermomechanisch gewalzter Stahl (S460M) Decken in Leichtbeton
<i>Brandschutz:</i>	Dämmungsbildender Brandschutzanstrich (innen R60, aussen R30, bis 2'350 μm Schichtstärke)
<i>Thermische Trennung: der Stahlfachwerke</i>	Spezialknoten mit Hochleistungskunststoffeinlagen (maximal 9'000 kN Last pro Knoten)
<i>Foundation:</i>	Tiefgründig schlecht tragfähiger Baugrund Pfahlfundation (schwimmende Pfähle)
<i>Herstellung/Montage: der Stahlkonstruktion</i>	Herstellung in Werkstatt / Feldwerkstatt Montage mit Raupenkran (Demag CC 2300) Sehr geringe Montagetoleranzen

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit dem dynamischen Verhalten der Turnhalle im 5. Obergeschoss, wofür primär die Stahlfachwerke und die Fassadenkonstruktion von Interesse sind. Auf die weiteren Besonderheiten wird nicht näher eingetreten.



Abb. 2 Bauwerk von Südosten

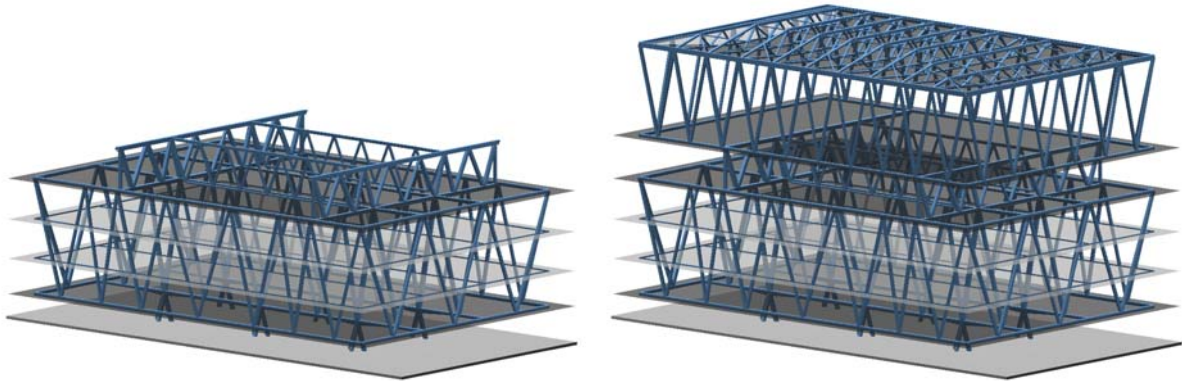


Abb. 3 Tragstruktur ohne Turnhalle / Dach (Bauzustand) und Endzustand

Tragwerk der Turnhalle und Problemstellung:

Die Turnhalle misst im Grundriss rund 30x46 m. Sie wird, wie auch das Dach, primär durch vier ausserhalb der Fassaden angeordnete Fachwerke getragen, welche an vier Punkten auf den darunterliegenden, quer angeordneten Fachwerken aufliegen (Abb. 3-Abb. 5). Zusätzlich wird der Boden der Turnhalle durch zwei sekundäre, längslaufende Fachwerke direkt gestützt.

Die Auflagerpunkte der umlaufenden Fachwerke liegen 27 m auseinander, so dass die umlaufenden Fachwerke an beiden Stirnseiten verhältnismässig grosse Auskragungen von 11.6 m (Ostseite) resp. 7.1 m (Westseite) aufweisen. Diese Auskragungen werden durch die Fluchtbalkone nochmals um jeweils 2.15 m vergrössert. Dank dieser Auskragungen können die darunter liegenden Räume im 4. OG mit durchgehend freier Fassade ausgebildet werden.

Zur Verhinderung von Körperschallimmissionen (unter der Turnhalle befinden sich zwar keine Schulzimmer, aber doch schulisch genutzte Räume) wurde ein Schwingboden mit elastischer Lagerung durch Feder-Dämpferelemente vorgesehen (Eigenfrequenz ca. 15 Hz).



Abb. 4 Stahlfachwerke vor der Montage von Turnhalle und Dach

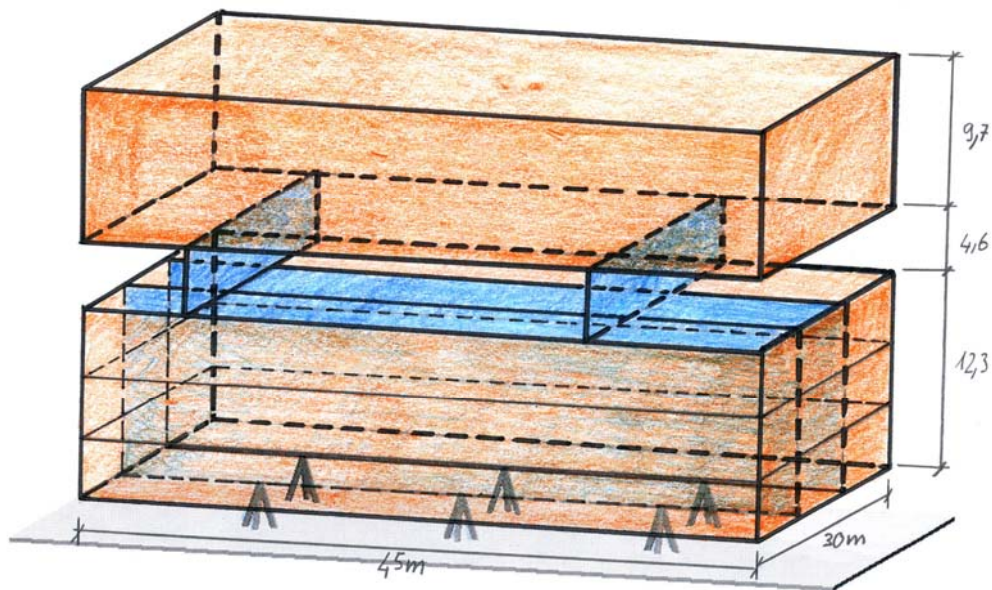


Abb. 5 Schema Tragstruktur (ohne sekundäre Längsfachwerke im 4. OG)

Statisch bieten die Auskragungen der umlaufenden Fachwerke keine besonderen Probleme, da die Fachwerke eine ausreichende statische Höhe aufweisen (Achsmass 9.865 m). In dynamischer Hinsicht waren jedoch besondere Überlegungen erforderlich, da die Eigenfrequenz der Kragarmschwingungen deutlich unterhalb des normgemässen Grenzwertes liegt, oberhalb dessen auf dynamische Berechnungen verzichtet werden kann (8.0 Hz) und eine Erhöhung der Eigenfrequenz durch steifere Ausbildung der Fachwerke mit vertretbarem (Material-)Aufwand nicht möglich war.

Der vorliegende Beitrag befasst sich ausschliesslich mit den Kragarmschwingungen der Turnhalle, wobei der massgebende Fall (grösserer Kragarm, Ostseite) behandelt wird. Das Verhalten des Schwingbodens oder Eigenschwingungen der Geschossdecken werden nicht behandelt.

Schwingungsverhalten der auskragenden Turnhallenbereiche

Aufgrund von linear elastischen Finite-Element-Berechnungen wurde die Eigenfrequenz der Kragarmschwingung auf der Ostseite zu rund 3.0 Hz ermittelt. Dies liegt am oberen Rand der durch Hüpfen direkt anregbaren Frequenzen, so dass bei der für ein Stahltragwerk zu erwartenden geringen Dämpfung (ca. 0.5% der kritischen Dämpfung) mit Schwingungsproblemen zu rechnen gewesen wäre.

Da eine steifere Ausbildung der Fachwerke mit vertretbarem Aufwand nicht realisierbar war und zusätzliche dämpfende oder stützende Elemente im darunterliegenden Geschoss unerwünscht waren, musste ein anderer Weg gesucht werden, um die Schwingungen zu begrenzen.

Dämpfung der Fassade

Die Fassade wurde als reine Glaskonstruktion (Dreifachverglasung mit Verbundglas-Schwertern) ausgeführt. Der obere Glasrand der Fassade des 4. OG liegt in einer Nut der Decke (Turnhallenboden), wobei das Glas beidseits durch 27 mm dicke, 40 mm hohe Silikonfugen (Sikasil WS) gehalten wird, so dass gewisse vertikale Bewegungen unter Nutzlast aufgenommen werden können (rechnerisch maximal 20 mm). Obschon die Silikonfugen ver-



Abb. 6 Schwingungsmessungen (linke Seite: Shaker auf Fluchtbalkon, Messpunkt 1)

hältnismässig weich sind, leisten sie aufgrund der grossen Länge (gesamter Fassadenumfang) einen erheblichen Anteil zur Dämpfung.

Zusätzlich leistet auch die Fassade der Turnhalle einen Beitrag zur Schwingungsdämpfung. Zwar ist auch diese als reine Glaskonstruktion ausgeführt worden, die Stossfugen gewährleisten aber dennoch eine gewisse Schubsteifigkeit der Verglasung.

Insgesamt zeigte eine Abschätzung, bei welcher die Dämpfung der Silikonfugen aufgrund der Energiedissipation angenähert wurde, dass unter Berücksichtigung der Fassaden eine Dämpfung von 3-5% der kritischen Dämpfung erzielt werden sollte, was für die Begrenzung der Schwingungen ausreichend sein sollte.

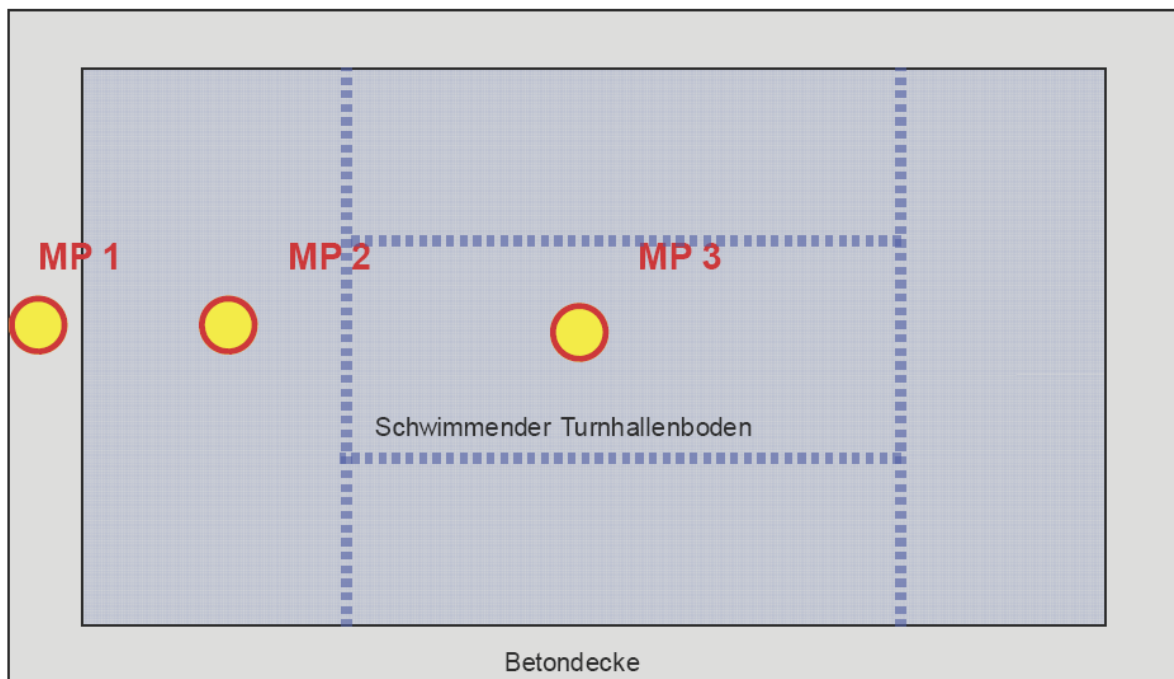


Abb. 7 Messpunkte im Grundriss (gestrichelt: innenliegende Fachwerke im 4. OG, auf welchen die Turnhallendecke – zusätzlich zu den umlaufenden Fachwerken – direkt aufliegt)

Schwingungsmessungen

Um die getroffenen Annahmen zu überprüfen, wurden Schwingungsmessungen am Bauwerk durchgeführt. Diese wurden durch die Firma Ziegler Consultants in drei Etappen vorgenommen (Abb. 6):

- vor dem Einbau der Fassaden (31.10.2007)
- nach dem Einbau der Turnhallenfassade (11.8.2008)
- nach dem Einbau der Fassade im 4. OG unter der Turnhalle (19.3.2009)

Es wurden jeweils mindestens drei Messpunkte aufgenommen, siehe Abb. 7.

Die Dämpfung (ermittelt im Ausschwingversuch) betrug für die hier interessierende Kragarm-schwingung vor dem Einbau der Fassaden rund 0.6% der kritischen Dämpfung. Durch den Einbau der Turnhallenfassade erhöhte sie sich auf 1.6%, und nach dem Einbau der Fassaden im 4. OG betrug die Dämpfung rund 3.5% der kritischen Dämpfung (siehe Abb. 8).

Die Eigenfrequenzen wurden durch den Einbau der Turnhallenfassade (zusätzliches Gewicht) von 3.0 Hz auf 2.8 Hz verringert. Nach dem Einbau der Fassaden im 4. OG lag die Eigenfrequenz wieder etwas höher (3.1 Hz, siehe Abb. 8), was sich durch die versteifende Wirkung der zwischenzeitlich eingebauten sekundären Längsträger im Dach erklären lässt.

Bei der dritten Messung wurde auch das Verhalten unter harmonischer Anregung (Shaker mit einer schwingenden Masse von 31 kg) untersucht. Das Frequenzspektrum für Messpunkt 1 ist in Abb. 9 angegeben.

Bei allen Messungen wurde jeweils auch das Verhalten unter Anregung durch Personen untersucht (Rennen von drei Personen im Takt), wobei nur die Messpunkte innerhalb der Turnhalle gemessen wurden (Abb. 10). Hier zeigte sich bei der letzten Messung, dass sich die Kragarmschwingungen (Eigenfrequenz rund 3 Hz) kaum mehr anregen lassen.

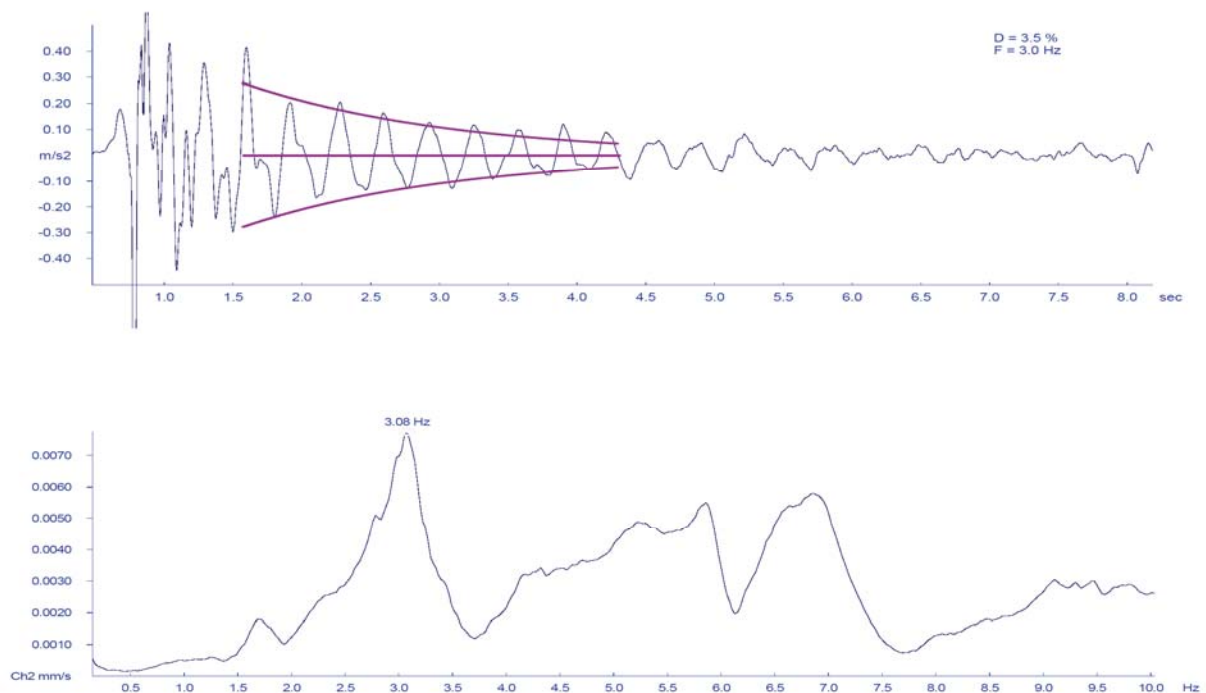


Abb. 8 Ausschwingversuch (Heeldrop, Messpunkt 1)

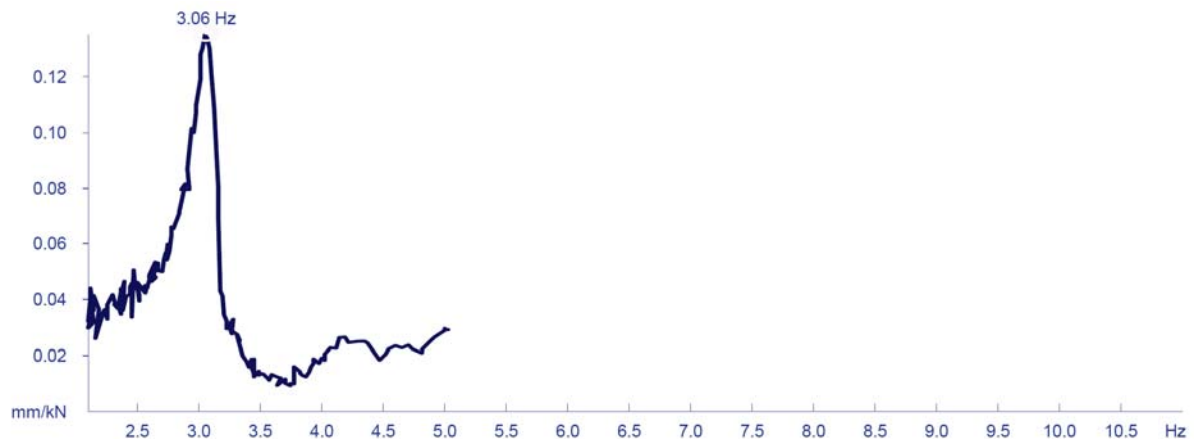


Abb. 9 Resonanzkurve unter harmonischer Anregung durch Shaker (Messpunkt 1)

Zusammenfassung

Die Turnhalle der Schulanlage Leutschenbach (Abb. 11, Abb. 12) weist grosse Auskragungen auf, deren Eigenfrequenz bezüglich Schwingungen nicht unproblematisch ist.

Da andere Massnahmen nicht in Frage kamen, wurde die Dämpfung der Fassaden gezielt genutzt, um die Schwingungen auf ein vertretbares Mass zu begrenzen.

Um die rechnerischen Abschätzungen zu überprüfen, wurden Schwingungsmessungen durchgeführt. Diese bestätigen die getroffenen Annahmen weitgehend.

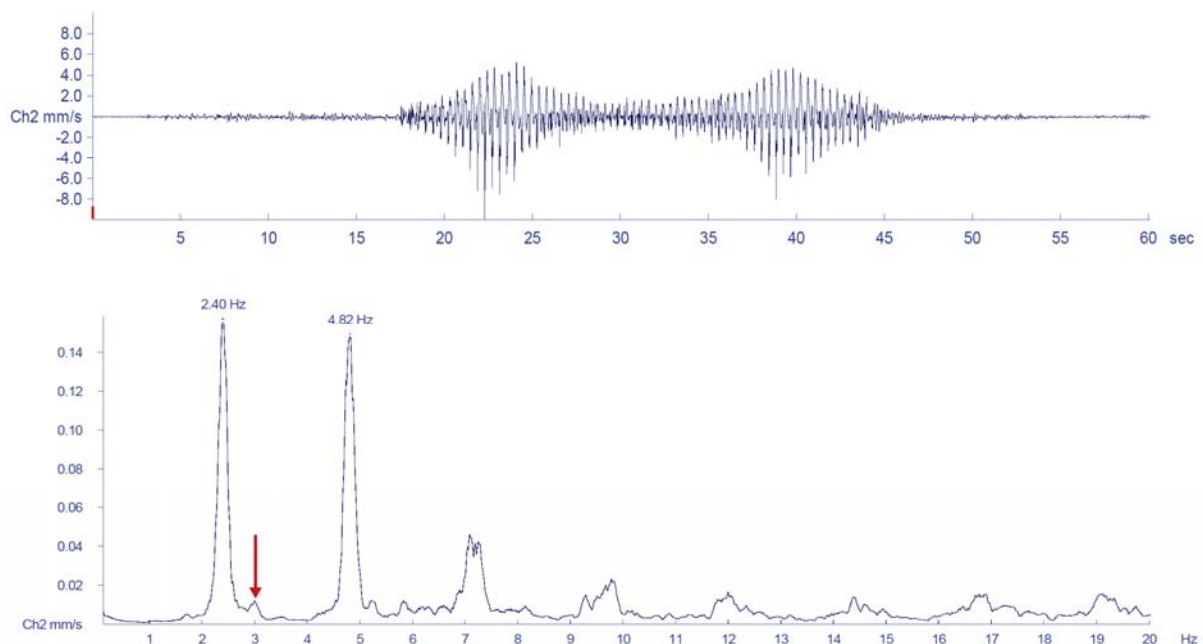


Abb. 10 Verhalten unter Anregung durch Personen (Messpunkt 2)



Abb. 11 Bauwerk von Nordwesten



Abb. 12 Bauwerk von Westen (Stirnseite)