

VIEL BEWEGUNG IM SPIEL

Die Glocken der Kirche St. Konrad in Zürich läuten ohrenbetäubend, und die Turmspitze, in der sie hängen, schwingt während des Läutens 70 mm hin und her. Für die Turmkonstruktion waren die Bewegungen zu stark. Die Ingenieure von Wolfseher und Partner, Urech Bärtschi Maurer Consulting sowie Trombik Ingenieure setzten die Turmkonstruktion deshalb instand. Sie passten unter anderem die Anzahl Glockenschläge pro Minute an. Das Resonanzproblem ist allerdings damit nicht behoben.

Die Kirche St. Konrad in Zürich Albisrieden wurde 1955 nach den Plänen des Kirchenbauers Ferdinand Pfammatter erstellt. Der nahezu quadratische Grundriss des Turms besteht aus vier Stahlbeton-Eckwinkeln (Abb. 04), die mit der inneren Treppenkonstruktion verbunden sind. Die vertikalen Flächen dazwischen sind mit filigranen Kunststein-Gitterelementen geschlossen (Abb. 01) und ziehen sich über die gesamte Turmhöhe von 45 m. Sechs Glocken hängen in der Turmspitze an einem Glockenstuhl aus Stahl (Abb. 06), der losgelöst vom Turm auf einem eigenen Fundament auf einer Betonzwischendecke steht; von hier werden alle Belastungen in die Tragkonstruktion des Turms geleitet. Die fünf kleineren Glocken schwingen parallel zu den Aussenflächen bzw. zur Strasse, und die sechste, schwerste und grösste Glocke schwingt in Diagonalrichtung, weil sie nur so genügend Platz findet.

KORRODIERT, ABGEPLATZT UND DURCH SCHWINGUNGEN GERISSEN

Im Sommer 2007 erfassten die Ingenieure von Wolfseher und Partner den Zustand des Glockenturms und stellten Schäden an der Bausubstanz fest: Die Bewehrung lag aussen und innen nahe an der Oberfläche, und die elektromagnetisch gemessene Überdeckung war wesentlich kleiner als nach SIA-Normen vorgeschrieben. In den Anschlüssen der Treppenhänge an die Eckwinkel, in den Fugen der Kunststein-Gitterelemente und in den horizontalen Arbeitsfugen verzeichnete man Rissbildungen und -bewegungen. Die Risse waren mit maximal 0.05 mm zwar klein, doch könnten sie ohne Instandsetzung und Schutzmassnahmen in kurzer Zeit durch Frostschäden stark zunehmen. Zudem war die Karbonatisierung des Betons sowohl aussen, wo der Acrylschutzanstrich abgewittert war, als auch innen, wo kein Schutzanstrich aufgetragen war, stark fortgeschritten, und bei einigen korrodierenden Bewehrungsstäben war die Betonüberdeckung abgesprengt.

Neben den statischen untersuchten die Ingenieure auch baodynamische Aspekte. Glockentürme werden bei Glockenbetrieb durch harmonische Glockenschwingungen angeregt – durch Schwingungen also, die dem Vielfachen der Turmeigenfrequenz entsprechen (vgl. «Glocken schaukeln den Turm auf», S. 27). Die daraus resultierende Beanspruchung kann bemessungsrelevant werden und die Dauerhaftigkeit des Bauwerks reduzieren. Um abschätzen zu können, welchen Einfluss die Schwingungen haben und inwiefern sie statische, bauphysikalische oder gar Resonanzprobleme verursachen, wurden die Eigenfrequenzen des Turms mit den Anregungsfrequenzen der Glocken verglichen. Die massgebenden Eigenfrequenzen des Kirchturms ermittelte das Büro Urech Bärtschi Maurer anhand eines FE-Schalenmodells. Die dafür benötigten Parameter galt es vorab zu bestimmen: Die rechnerisch in der Bemessung nicht berücksichtigte Tragwirkung der Kunststein-Gitterelemente und die Steifigkeit der Turmfundation spielen im relevanten Bereich in der Nähe der Anregungsfrequenzen eine entscheidende Rolle. Das Ausmass der Tragwirkung der Kunststeinelemente konnte genau genug ermittelt werden; die Steifigkeit bewirkt einen beinahe starren Verbund zwischen den Eckpfeilern. Die Steifigkeit des Baugrunds und der Foundation liess sich aber ohne empirische Untersuchungen nur unzureichend abschätzen. Daher empfahlen die Ingenieure, das Schwingungsverhalten des Turms messtechnisch zu ermitteln.

AM BAU BETEILIGTE

Bauherrschaft: Röm.-kath. Kirchengemeinde St. Konrad, Zürich

Architektur: BKG-Architekten/Marcel Barth, Zürich

Tragkonstruktion und Materialtechnologie: Wolfseher und Partner AG, Zürich

Beratender Bauingenieur: Urech Bärtschi Maurer Consulting AG, Ehrendingen

Baudynamik: Trombik Ingenieure AG, Zürich



| Glocke (Nr.) | Gewicht (kg) | Schlagzahl N (Schläge/Min.) |
|--------------|--------------|-----------------------------|
| 1 | 5046 | 44.5 |
| 2 | 2524 | 50 |
| 3 | 1450 | 53 |
| 4 | 1030 | 56→57 |
| 5 | 718 | 61→59 |
| 6 | 428 | 63 |

02

01 Fuss des Glockenturms der Kirche St. Konrad in Zürich Albisrieden: Die Flächen zwischen den Betoneckwinkeln sind mit Kunststein-Gitterelementen geschlossen. Ihre Steifigkeit bewirkt einen nahezu starren Verbund mit den Betoneckelementen. (Foto: cvr)

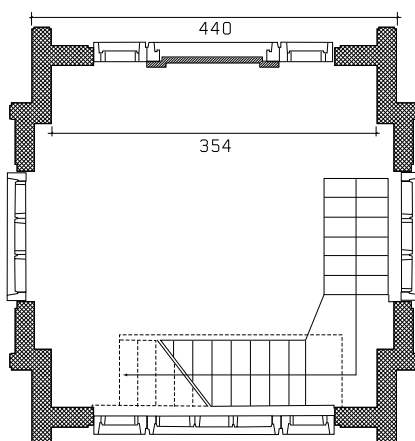
02 Masse und Schlagzahlen der sechs Glocken, die in der Turmspitze hängen. Die Schlagzahlen der Glocken 4 und 5 wurden angepasst (vorher → nachher), um das bestehende Resonanzproblem zu entschärfen. (Tabelle: Trombik Ingenieure)

03 Anregungsfrequenzen der sechs Glocken: Die 3. harmonische Schwingung der sechs Glocken ist massgebend, da sie den Glockenturm aufschaukelt. Fällt die Eigenfrequenz des Turms auf eine dieser sechs Frequenzen, so verursacht dies Resonanz. (Diagramm: Trombik Ingenieure)

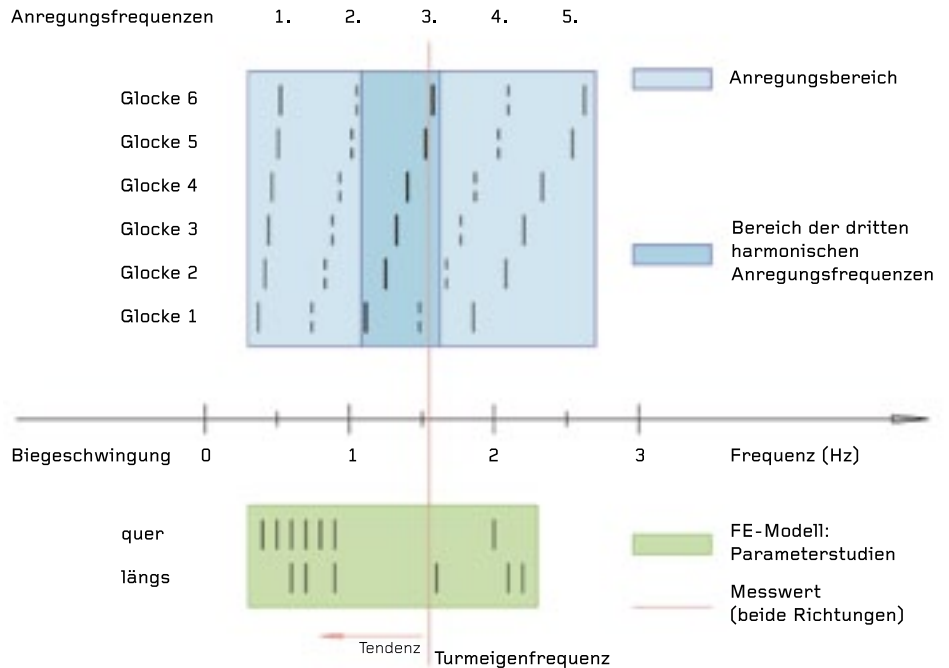
04 Quadratischer Grundriss: In den vier Ecken steht jeweils ein Eckwinkel aus Beton.

Die Treppenpodeste verbinden diese Winkel.

(Plan: Archiv Kirchgemeinde St. Konrad, Ferdinand Pfammatter/Bearb. Red.)



04



03

GLOCKENTURM INSTANDSETZEN

Bevor die Ingenieure Messungen durchführten, wurden im Sommer 2009 die Schäden am Bauwerk behoben. Die oberflächennahen, stark korrodierenden Bewehrungsstäbe wurden freigelegt, sandgestrahlt und mit einem Korrosionsschutz auf Epoxidharzbasis beschichtet, wobei der zweite Anstrich abgesandet wurde, damit er sich gut mit dem Reprofiliermörtel verband. Die rissigen Fugen wurden mit flexiblem Material verfüllt, um die Bewegungen aus den Schwingungen schadensfrei aufnehmen zu können. Schliesslich erhielten alle Oberflächen eine schützende hochflexible Beschichtung, die langfristig die Risse, vor allem in den horizontalen Arbeitsfugen, zuverlässig überbrückt. Dafür wurden die Oberflächen mit einem Hochdruckreiniger behandelt, um einen sauberen Traggrund zu erhalten und oberflächennahe Lunkern aufzubrechen. Zudem entkoppelte man die stark beanspruchten Treppelläufe mit einem vertikalen Schnitt von den Zwischenpodesten und stützte sie auf eine mit Zwischenlagern von den Podesten getrennte Stahlschiene mit Gleitlager ab (Abb. 05). Ohne die Turmsteifigkeit zu verringern, vermied man so konstruktiv an dieser Stelle ungewünschte Zwängungen und lokale Spannungsspitzen, die unter Schwingungseinwirkung entstanden.

SCHWINGENDE MASEN, SCHLAGZAHL UND RESONANZ

Nach Abschluss der Instandsetzungsarbeiten untersuchten Trombik Ingenieure die dynamischen Eigenschaften und das Schwingungsverhalten des Turms. Repräsentativ verteilte triaxiale Messpunkte auf der Zwischendecke zeigten das Bild der Schwingungssituation mit Amplituden/Zeitbereich, Frequenzen usw., insbesondere beim Läuten der Glocken. Die ersten beiden Eigenfrequenzen des Turms betragen in beide horizontalen Richtungen 1.6 Hz. Sie dominierten die Messresultate so stark, dass die weiteren Eigenformen wie Torsionsschwingungen oder höhere Biegeschwingungen nicht exakt bestimmt werden konnten – was bedeutet, dass sie kaum angeregt werden und somit nicht relevant sind. Die Eigenschwingungen der Glocken liegen ebenfalls in diesem tieffrequenten Bereich. Indem Glocke und Klöppel leicht mitschwingen, beeinflussen sie die Resultate. Da beide aber ohnehin Teil des Gesamtsystems sind, war auch dieser Effekt vernachlässigbar. Das Glockengeläut schwingt mit Schwingkadenzen im Bereich von 44 bis 63 Schlägen pro Minute (Abb. 02). Mit diesen Schlagzahlen ermittelten die Ingenieure die Anregungsfrequenz jeder einzelnen Glocke und verglichen diese jeweils mit der Eigenfrequenz des Turms: Die Turmeigenfrequenz liegt inmitten der verschiedenen Anregungsbereiche der einzelnen Glocken (Abb. 03). Die 3. Harmonischen der Glockenschwingungen liegen in der Nähe der

Eigenfrequenzen des Turms (vgl. «Glocken schaukeln den Turm auf», S. 27). Die einfache Bemessungsregel, mit der Resonanzzustände verhindert werden, ist somit nicht eingehalten: Um 20% bei gerechneten Werten oder um 10% bei gemessenen müssten sich die beiden Frequenzen f_{Glocke} und f_{Turm} unterscheiden. Um diesen kritischen Zustand zu entschärfen, veränderten die Planenden vorerst die Schlagzahl der motorgesteuerten kritischen Glocke 5. Dabei achtete man darauf, einen ausgewogenen Glockenklang zu erhalten, indem alle Glocken wieder aufeinander abgestimmt wurden. Hierfür wurde auch die Schlagzahl der Glocke 4 angepasst. Die anschliessend gemessenen Auslenkungen führten zu keiner Überschreitung der zulässigen (Ermüdungs-)Spannungen in den vorhandenen Querschnitten der Tragelemente – wenn keine Glockenschwingung den Turm massgebend anregt, gibt es auch keine zu starke Amplifikation.

Diese Massnahmen genügten aber noch nicht: Die Turmeigenfrequenz liegt grundsätzlich zu nahe an den Anregungsfrequenzen, was ein gefährliches Resonanzproblem birgt. Zudem erwartet man, dass die wiederkehrende Beanspruchung durch Geläut und Wind die Steifigkeit der Tragkonstruktion reduziert und sich dadurch die Eigenfrequenz des Glockenturms verkleinert. Entsprechend tiefer läge die Turmeigenfrequenz im Bereich der 3. harmonischen Anregungsschwingungen, was wiederum die Schadensanfälligkeit vergrössern würde. Man müsste also alle Anregungsfrequenzen um 10% von der Turmeigenfrequenz nach unten verschieben. Um diese vertrackte Situation zu lösen, verglich das Büro Urech Bärtschi Maurer die Messergebnisse mit den rechnerischen Analysen, die vor den Instandsetzungsarbeiten gemacht worden waren. Die Ingenieure kalibrierten das rechnerische Modell und analysierten nun detailliert die Einflüsse einzelner Parameter. Mit der verfeinerten FE-Berechnung erhielten sie Aussagen für die gesamte Struktur und konnten die verschiedenen Eigenmodi besser erfassen. Es zeigte sich, dass das Problem ohne bauliche Massnahmen nicht zu lösen war.

RESONANZ VERHINDERN ODER GLOCKENKLANG ERHALTEN?

Gegen bauliche Eingriffe sprechen allerdings zwei Gründe: Die Verteilung der Anregungsfrequenzen enthält keine Lücke, in der die Eigenfrequenz des Turms hätte liegen können (Abb. 03). Ausserdem wären die Kosten für solche Massnahmen unverhältnismässig hoch gewesen – eine Versteifung des Turms kann zum Beispiel nur mit einer Vergrösserung der Abmessungen im Grundriss erreicht werden. Der Turm wird nun periodisch gemessen und die Veränderung der Eigenfrequenz und der Schwingungsamplituden festgehalten.

GLOCKENKLANG – HARMONISCH UND DISHARMONISCH

Der Klang einer Glocke setzt sich aus mehreren einzelnen Tönen zusammen. Der im Vordergrund am lautesten zu hörende Ton heisst Schlagton (oder Nominalton). Neben dem Schlagton klingen beispielsweise die Oberoktave, die Terz, die Unteroktave, die Quinte und die Prime. Das Zusammenspiel der einzelnen Teiltöne wird (ebenso wie der Nachklang, die Weichheit des Tons und andere klangliche Faktoren) von der Glockenrippe bestimmt, dem Querschnitt des Glockenkörpers.

Die planvolle Zusammenstellung der Glocken (Intervalle der einzelnen Schlagtöne) unter Berücksichtigung ihrer Schlagtonhöhen wird in der Regel nach musikalischen Motiven wie z. B. liturgischen Elementen oder Liedern gewählt. Man nennt diese Intervallfestlegung (ähnlich wie beim Orgelbau) auch Disposition. Je mehr Glocken zur Verfügung stehen, umso reichhaltiger ist die Disposition. Die offiziell eingesetzten Läuteordnungen legen den

Tag, den Zeitpunkt, die Länge und die Anzahl der zu verwendenden Glocken fest.

In Bezug auf die musikalischen Dispositionen können kaum konfessionelle Unterschiede ausgemacht werden. Im Volksmund wird jedoch oft behauptet, reformierte Glockenspiele würden disharmonisch und katholische Glockenspiele harmonisch klingen.

Ausgewählte klassische Dispositionen

- rein melodische Disposition: C – D – E
- rein harmonische Disposition (Molldreiklang): C – Es – G
- Te-Deum-Motiv: C – Es – F
- Gloria-Motiv: C – D – F
- Salve-Regina-Motiv: C – E – G – A
- Molldreiklang mit Quarte: C – Es – F – G
- Kombination aus Gloria und Te Deum: C – D – F – G
- St. Konrad, Zürich: As – C – Es – F – G – B

Zusätzliche Informationen

Für Glockengeläut-Interessierte führen DRS 1 und DRS Musikwelle das online verfügbare Dossier «Glocken der Heimat» mit mehreren ausgewählten Glockenseiten (www.drsmusikwelle.ch/www/de/drsmusikwelle/sendungen/72657.glocken.html): Das jeweilige Geläut wird hier als Audiodatei angeboten; weitere Zusatzinformationen wie Name und Bild der Kirche, Gussjahr und Giesser der einzelnen Glocken etc. werden mitgeliefert.



05

05 Die Treppen waren ursprünglich monolithisch mit den Podesten verbunden. Mit den Instandsetzungsarbeiten trennte man sie von den Podesten und lagerte sie auf Gleitlagern auf Stahlkonsolen. Auf diese Weise verhinderte man an diesen Stellen ungewünschte Zwängungen und lokale Spannungsspitzen, die unter Schwingungseinwirkung entstanden. (Foto: cvr)

06 Sechs Glocken hängen in der Turmspitze an einem Glockenstuhl aus Stahl. Ihre Schwingungen verursachen Schäden in der Turmkonstruktion. (Foto: cvr)



06

Die Beteiligten sind überzeugt, dass technische Massnahmen erst dann ergriffen werden sollen, wenn sich die Situation verschärft, wenn also die Schwingungsamplituden zunehmen. Zur Überwachung installierte man ein einfaches, auf die Grundeigenfrequenz des Turms abgestimmtes Fadenpendel. Es zeigt die maximale Auslenkung bei üblichem Glockenbetrieb und gleichbleibender Anregung. Sobald die Schwingungsamplituden zunehmen, müssten Schwingungstilger oder Dämpfungselemente eingebaut werden, die die Auslenkungen deutlich reduzieren würden. Dafür ist es wiederum sinnvoll, den Einfluss der nichttragenden Bauteile auf das Schwingungsverhalten zu kennen. Ebenso sind dann die Auswirkungen von Schwingungseinflüssen auf nichttragende Bauteile zu berücksichtigen, insbesondere in Bezug auf unplanmässige Beanspruchungen. Die rechnerischen Analysen am FE-Schalenmodell sind hierfür ein wertvolles Werkzeug.

NACHMESSUNGEN UND KONSEQUENZEN

Ende 2011 wurde erstmals nachgemessen. Die ersten beiden Grundsicherungen in horizontaler Richtung liegen bei 1.4 Hz und 1.3 Hz und sind somit tatsächlich tiefer als die im November 2009 gemessenen Frequenzen von je 1.6 Hz. War es 2009 noch die zweit-leichteste Glocke 5, die nahe des Resonanzbereichs lag, so sind es nun die grösseren Glocken 2 und 3. Auch die Glocke 1 liegt neu näher bei den Eigenfrequenzen des Turms, und die Amplifikation während des Läutens war deutlich nachweisbar. Die Ingenieure überprüfen den Turm deshalb weiterhin periodisch hinsichtlich seines Schwingungsverhaltens und vergleichen die Ergebnisse mit der Widerstandsfähigkeit des Turms.

Dr. Roland Wolfseher, dipl. Bau-Ing. ETH/SIA, Wolfseher und Partner AG, Zürich, info@wolfseher.ch

Dr. Roland Bärtschi, dipl. Bau-Ing. ETH/SIA, Urech Bärtschi Maurer Consulting AG, Ehrendingen/Baden, baertschi@ubm-consulting.ch

Pascal Stefan Fleischer, dipl. Bau-Ing. MSc/ETH/HTL/SIA, Trombik Ingenieure AG, Zürich, p.fleischer@trombik.ch

Literatur

- Hugo Bachmann, Walter Ammann: Schwingungsprobleme bei Bauwerken. Zürich 1987.
- Glocken I, Merkblatt des Bundesamtes für Zivilschutz, Sektion Kulturgüterschutz.
- Deutsche Norm – DIN 4178: Glockentürme. Berlin 2005.