

GGU-Fallbeispiel

Schwingungsuntersuchungen an einem Glockenturm

Aufgabe

Es war in einfacher Weise zu untersuchen, in welchem Maße ein historischer Glockenturm durch das Geläut der Glocken in Schwingungen versetzt würde und ob zukünftige Schäden durch das Geläut zu erwarten wären.

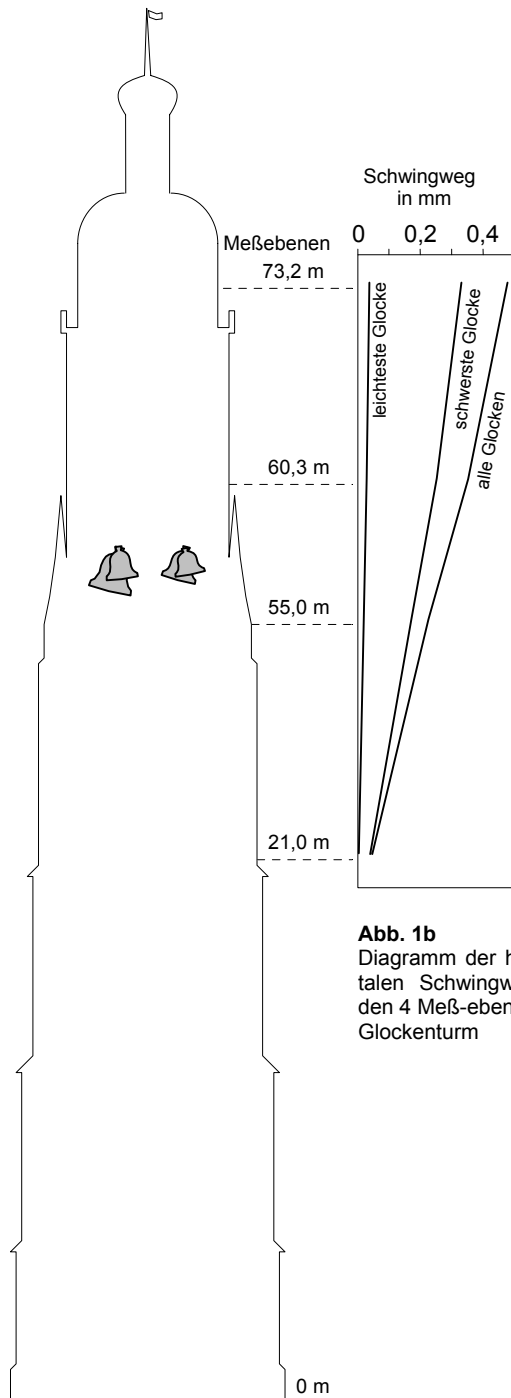


Abb. 1b
Diagramm der horizontalen Schwingwege in den 4 Meß-ebenen am Glockenturm

Abb. 1a
Glockenturm mit 4 Glocken und 4 Meßebenen der Schwingungsuntersuchungen

Meßprogramm

- Dreikomponentenmessung der Schwinggeschwindigkeit und des Schwingweges
- Meßwertaufnahme ohne und mit Geläut einzelner und aller Glocken
- Meßwertaufnahme in 4 Meßebenen am Glockenturm sowie in einer Meßebene am Kirchenschiff
- Registrierung mit Ein- und Ausschwingvorgängen

Ergebnisse

Im Glockenturm sind in 57,5 m Höhe vier Glocken mit Massen zwischen 1,6 und 3,8 t angebracht (siehe Abb. 1a). Die Glocken schwingen quer zur Kirchenlängsachse. Die Läutfrequenzen der Glocken wurden in einem engen Periodenbereich von 0,36 bis 0,41 Hz festgestellt. Dementsprechend wurden breitbandige Messungen durchgeführt, die Aussagen über tieffrequente Schwingungen bereits ab 0,1 Hz erlauben. Es wurden die horizontalen Schwingkomponenten in Schwingrichtung der Glocken und senkrecht dazu (parallel zur Kirchenlängsachse) sowie die vertikale Komponente gemessen.

Die Meßergebnisse besagen folgendes:

- ♦ Die Glocken sind für die Schwingungen des Turmes maßgebend; die Schwingamplituden sind ohne Geläut wesentlich kleiner (maximal gemessener Ruheschwingweg unter 0,02 mm) als mit Geläut (maximal gemessener Wert 0,47 mm, siehe Abb. 1b).
- ♦ Die beiden leichten Glocken bewirken jeweils eine etwa 5-fach stärkere Schwingung als die mittlere Ruheschwingung. Bei der schwersten Glocke ist die Schwingamplitude 40-mal stärker als die der Ruheschwingung. Die Schwingamplitude durch das Geläut aller Glocken zusammen liegt nur rund 30 % über der durch die schwerste Glocke.
- ♦ Die Glocken regen den Turm v.a. in ihrer eigenen Schwingrichtung, d.h. quer zur Kirchenlängsachse an. Die anderen Schwingkomponenten sind solange bedeutungslos, wie die Glocken ordnungsgemäß orientiert und befestigt sind. Die orthogonale horizontale Schwingrichtung (längs der Kirchenachse) wird gegenüber der mittleren Ruheschwingung maximal um den Faktor 3 und die vertikale um den Faktor 2 erhöht.
- ♦ Die Schwingamplituden nehmen bei Geläut bedingt durch die Anregungshöhe, der Turmverankerung im Baugrund und der Massenverteilung des Turmes von unten nach oben stark zu (siehe Abb. 1b). Dies gilt auch für die Ruheschwingung.
- ♦ Die Schwingamplituden am Glockenturm und am direkt benachbarten Mauerwerk des Kirchenschiffes sind identisch. D.h., daß beide Gebäudeteile kraftschlüssig miteinander verbunden sind und die Schwingungen auch auf das Mauerwerk der Kirche übertragen werden.

◆ Die größte Glocke regt den Turm nahezu monofrequent mit der dreifachen Läutfrequenz (1,08 Hz) an (siehe Abb. 2, T1 und F1). Der Turm wird dadurch in seiner Eigenschwingung angeregt. Es kommt zur Resonanzüberhöhung des wenig schwingungsgedämpften Turmes um mindestens einen Faktor 3 (siehe Abb. 2, T1, Anstieg des Betrages des Schwingweges im Zeitabschnitt C).

◆ Bei Anregung durch das Geläut aller Glocken kommt es zu Schwebungen mit entsprechenden Amplitudenüberhöhungen durch konstruktive Interferenz bis zu 30% gegenüber der schwersten Glocke (siehe Abb. 2, T2). Aus dem Amplitudenspektrum (Abb. 2, F2) sind die nahe beieinanderliegenden Anregungsfrequenzen der Glocken und ihr Beitrag zum Schwingweg ersichtlich. Die Eigenschwingung des Turmes ist hier aus der Einhüllenden dieser Kurve mit etwa 1,15 Hz gut abschätzbar. Der aus der Ruheschwingung ermittelte Resonanzwert stimmt damit nahezu überein. Die dreifachen Läutfrequenzen der Glocken liegen sehr nahe an der Eigenschwingung des Turmes.

◆ Zur Bewertung der Meßwerte kann die DIN 4150, Teil 3 "Erschütterungen im Bauwesen, Einwirkungen auf bauliche Anlagen" nur bedingt herangezogen werden, da die dort genannten Anhaltswerte für Gebäude mit ruhender Beanspruchung gelten und bei Gebäuden mit dynamischer Beanspruchung diese entsprechend stärker bemessen wurden. Allerdings handelt es sich hier um ein kritischer zu betrachtendes historisch wertvolles Bauwerk. Es erscheint deshalb

gerechtfertigt den DIN-Anhaltswert für stationäre Schwingungen im obersten Stockwerk von 5 mm/sek horizontaler Schwinggeschwindigkeit als Maximalwert heranzuziehen. Der höchste gemessene Wert bei Geläut aller Glocken liegt in der obersten Meßebeine bei 3 mm/sek also noch unterhalb dieses DIN-Anhaltswertes.

◆ Ein Abschalten der schwersten Glocke bringt eine Sicherheitsreserve gegenüber dem DIN-Anhaltswert um einen Faktor 5.

Fazit

Aufgrund der Schwingungsmessungen konnten die Bewegungen des Glockenturmes sowie die Zusammenhänge ihrer Entstehung geklärt werden. Die Glocken regen den Turm mit ihrer dreifachen Läutfrequenz deutlich in seiner Eigenschwingung an. Die maximalen Schwingamplituden befinden sich jedoch noch unterhalb des herangezogenen DIN-Anhaltswertes.

Kostengrößenordnung des angesprochenen Umfangs

Messung, Auswertung, Bericht: 2 bis 3 TEur

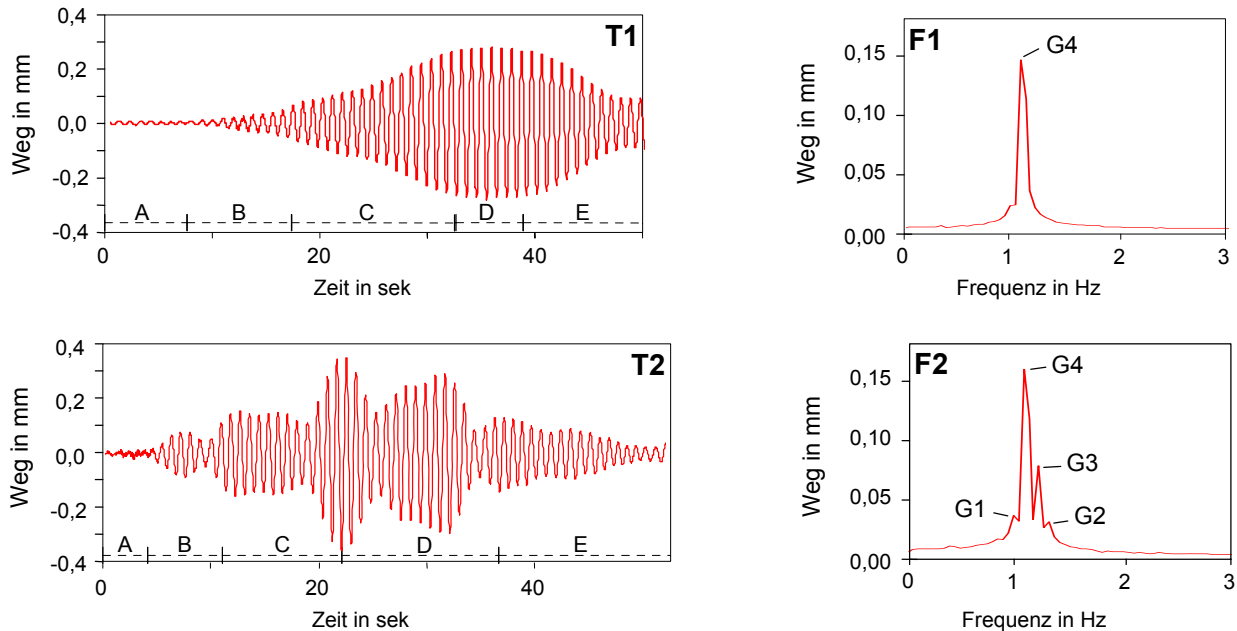


Abb. 2 Schwingwege und -frequenzen

- T1, T2: zeitlicher Verlauf der Schwingwege bei Geläut der Glocke 4 (T1) und aller Glocken (T2)
 F1, F2: zugehörige Amplitudenspektren
 A, ..., E: zeitlicher Verlauf der Schwingungszustände
 A: Ruheschwingung, B: Einschwingen der Glocke(n),
 C: Beginn des Geläuts bis zur maximalen Turmschwingung (Einschwingen des Turmes),
 D: (stationärer) Schwingungszustand, E: Ausschwingen der Glocke(n) und des Turmes.
 G1, ..., G4: Beitrag der Glocken zu den Turmschwingungen (G4: schwerste Glocke)