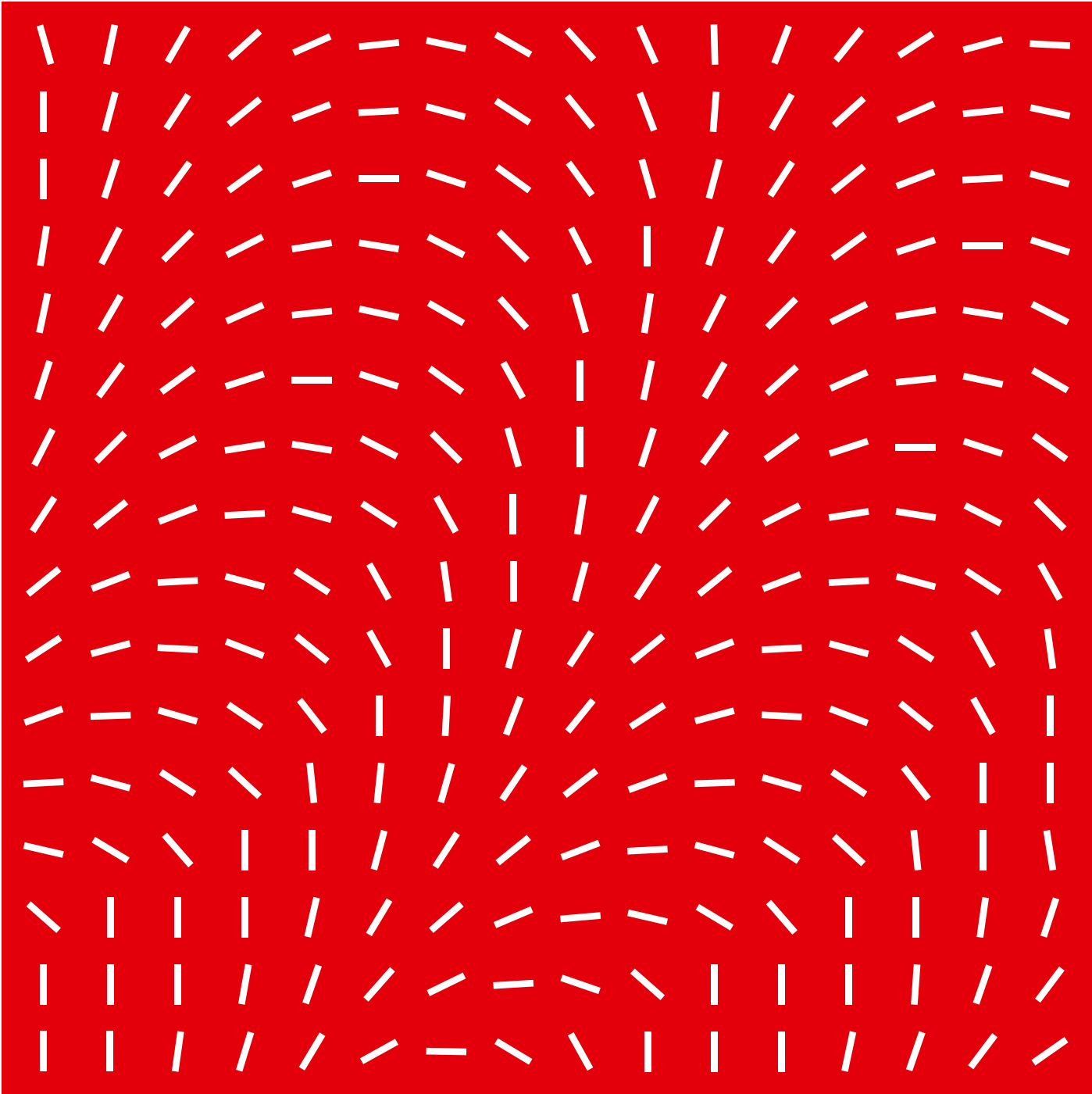


Dynamik der Glockentürme



Dynamik der Glockentürme

1 Einleitung

Glockentürme – Wahrzeichen der christlichen Religion: Möglichst hoch und schlank sollen sie sein, auf dass sie weitherum sichtbar seien. Zudem sollen zuoberst – am schwächsten Punkt – fünf, sechs oder noch mehr Glocken eingehängt werden. Tonnenschwere Gebilde, die mit Seilen in Schwingung versetzt werden. Und das ganze sollte über Jahrhunderte ohne Schaden zu nehmen funktionieren. Tausende solcher Glockentürme stehen zwischen dem Nordkap und Sizilien. Seit Jahrhunderten läuten ihre Glocken ohne irgendwelche Probleme. Nur wenige dieser Glockentürme – und erstaunlich ist, dass es nur so wenige sind – weisen beunruhigende Schwingungen auf. Irgendetwas ist bei diesen wenigen Türmen schief gelaufen. Die Dynamik der Tragwerke – angewendet auf Glockentürme – erlaubt uns zu verstehen, warum uns bestimmte Türme Sorgen bereiten und andere nicht.

2 Dynamik der Glockenschwingung

Die Glocke (ohne Klöppel) lässt sich – wie in Bild 2.1 und 2.2 dargestellt - in erster Näherung als mathematisches Pendel modellieren. Die bei der Glockenschwingung auftretende Horizontalkraft wird primär durch die Glockenmasse m , die Pendellänge L und den Auslenkwinkel α bestimmt.

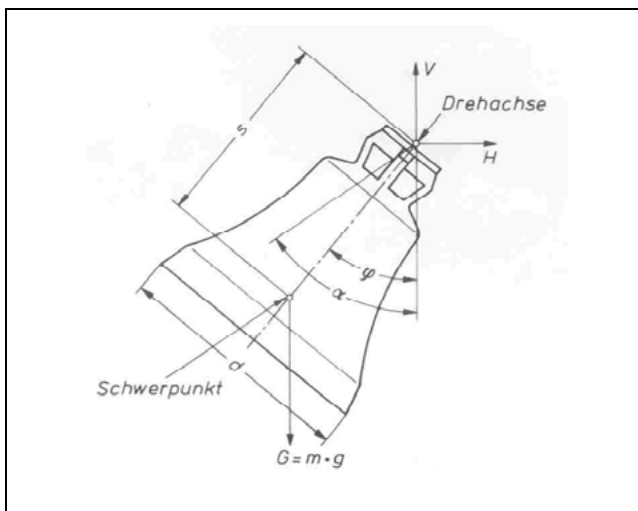


Bild 2.1 Glocke ohne Klöppel

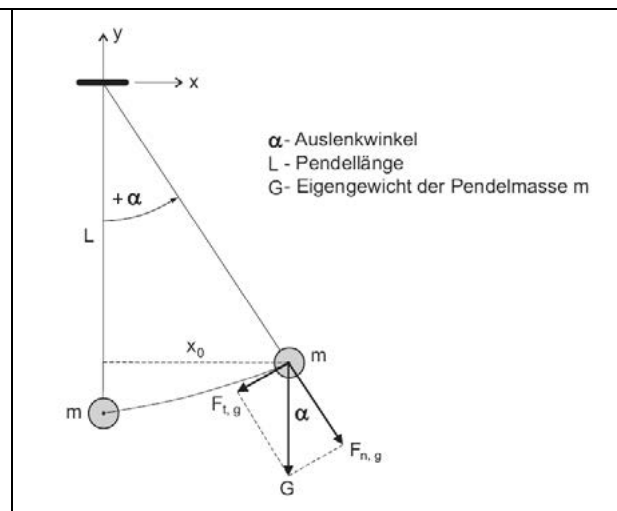


Bild 2.2 Mathematisches Pendel

Diese Horizontalkraft hat nicht – wie man vermuten könnte – einen sinusförmigen Verlauf. Da sie sich zusammensetzt aus Komponenten, die vom Auslenkwinkel α bestimmt sind, aber auch aus Komponenten, die von der Winkelbeschleunigung α'' abhängen, ergibt sich ein etwas komplizierterer Kraftverlauf, wie er in Bild 2.3 (für eine Glocke mit 0.8 t Masse, 1 m Pendellänge und 60 Grad Auslenkwinkel) dargestellt ist [1]. Im Gegensatz zu einer reinen Sinus-Anregung wird bei der Anregung von Bild 2.3 nicht nur die Grundfrequenz von 0.46 Hz sondern auch die

3. Harmonische mit 1.38 Hz und ganz schwach sogar noch die 5. Harmonische mit 2.29 Hz angeregt (siehe Bild 2.4).

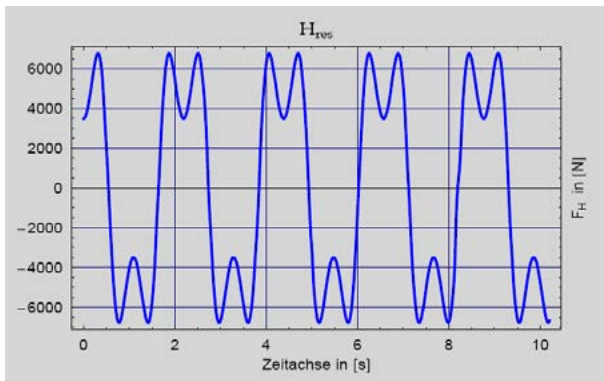


Bild 2.3 Zeitlicher Verlauf der Horizontalkraft [1]

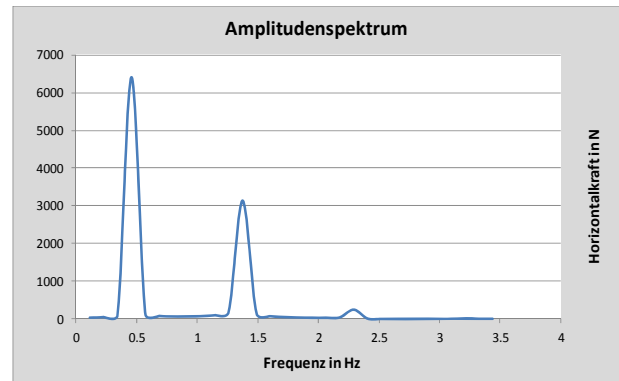
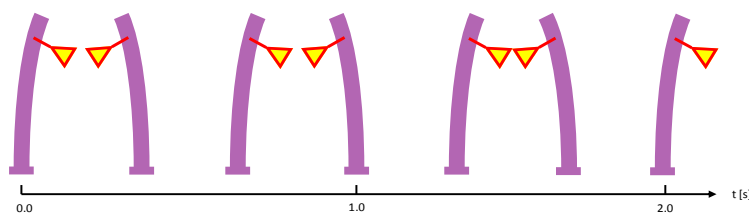
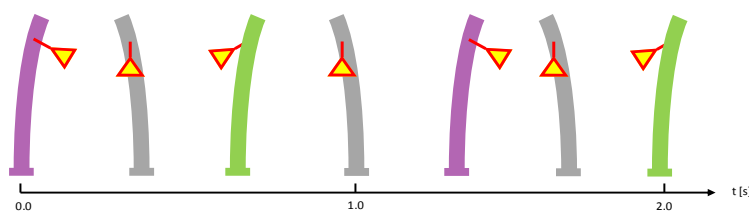


Bild 2.4 Amplitudenspektrum zu Bild 2a [1]

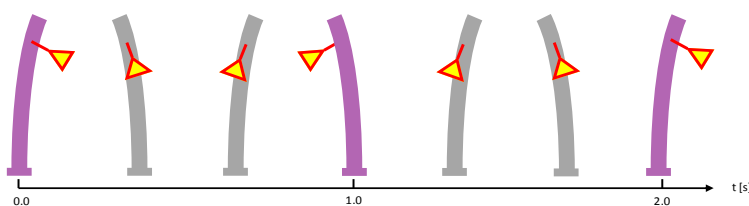
Was hier als komplizierte Mathematik erscheint, lässt sich auch auf anschauliche Art mit Hilfe von Bild 2.5 erklären: In einem Glockenturm mit einer Eigenfrequenz von 1.5 Hz wird (in der ersten Zeile von Bild 2.5) mit einer Glocke mit ebenfalls 1.5 Hz (was 180 Schläge pro Minute sind) geläutet. Mit jeder Schwingung wird der Turm durch die Glocke sowohl nach rechts als auch nach links gezogen. Derart schnelle Geläute gibt es nicht und ein Kirchturm würde diese Kräfte auch nicht aushalten. In der zweiten Zeile läutet die Glocke mit 0.75 Hz (d.h. mit 90 Schlägen pro Minute). Schwingt die Glocke nach rechts, so wird der Turm angeregt, schwingt sie nach links, wird er wieder gebremst. Die dynamische Wirkung wird quasi durch die Glocke selbst wieder ausgelöscht. In der dritten Zeile läutet die Glocke mit 0.5 Hz (d.h. mit 60 Schlägen pro Minute). Beim ersten Glockenschlag nach rechts wird der Turm nach rechts ausgelenkt und beim nächsten Schlag nach links wird er – nachdem er bereits eine volle Schwingung ohne grössere Anregung hinter sich hat – nach links ausgelenkt. Dies ist der Normalfall bei unseren Glockentürmen und dies ist auch der Grund warum die 3. Harmonische der Glockenschwingung von zentraler Bedeutung ist.



Turm: 1.5 Hz
Glocke: 1.5 Hz / 180 S
1. Harmonische



Turm: 1.5 Hz
Glocke: 0.75 Hz / 90 S
2. Harmonische



Turm: 1.5 Hz
Glocke: 0.5 Hz / 60 S
3. Harmonische

Bild 2.5 Anregung eines Glockenturmes durch Glockenschwingung. Violett stellt Phasen der Anregung, grün Phasen des Bremsens dar. Grau sind neutrale Phasen.

In der Regel wird bei Glocken die Schlagzahl S , d.h. die Anzahl Glockenschläge pro Minute, angegeben. Da pro Schwingung 2 Schläge auftreten und die Frequenz pro Sekunde angegeben wird, errechnet sich die 3. Harmonische mit $f_3 = 3 \cdot S / 120$. Fällt die 3. Harmonische mit der Eigenfrequenz des Kirchturmes zusammen, sind die besten Voraussetzungen für unliebsame Turmschwingungen geschaffen.

Die Kunst bei der dynamischen Auslegung eines Kirchturmes oder bei der Modifikation eines bestehenden Kirchturmes besteht somit darin, die kritischen Frequenzbereiche zu erkennen und sie so gut wie möglich zu meiden. Erschwerend kommt dazu, dass es sich in der Regel um Läutwerke mit vier, fünf oder noch mehr Glocken handelt und keine dieser Glocken sollte im kritischen Bereich liegen. Zur Illustration möge die Reformierte Kirche in Zürich-Wiedikon dienen. Mit fünf Glocken und Schlagzahlen zwischen 46 und 62 ist der Frequenzbereich von 1.15 bis 1.56 Hz zu meiden. Da die Eigenfrequenz des Glockenturms – wie in Bild 2.6 dargestellt – bei 2.29 Hz liegt, entstehen auch keine Probleme. Die maximale Schwingung beim Läuten aller Glocken liegt lediglich bei 1.3 mm/s.

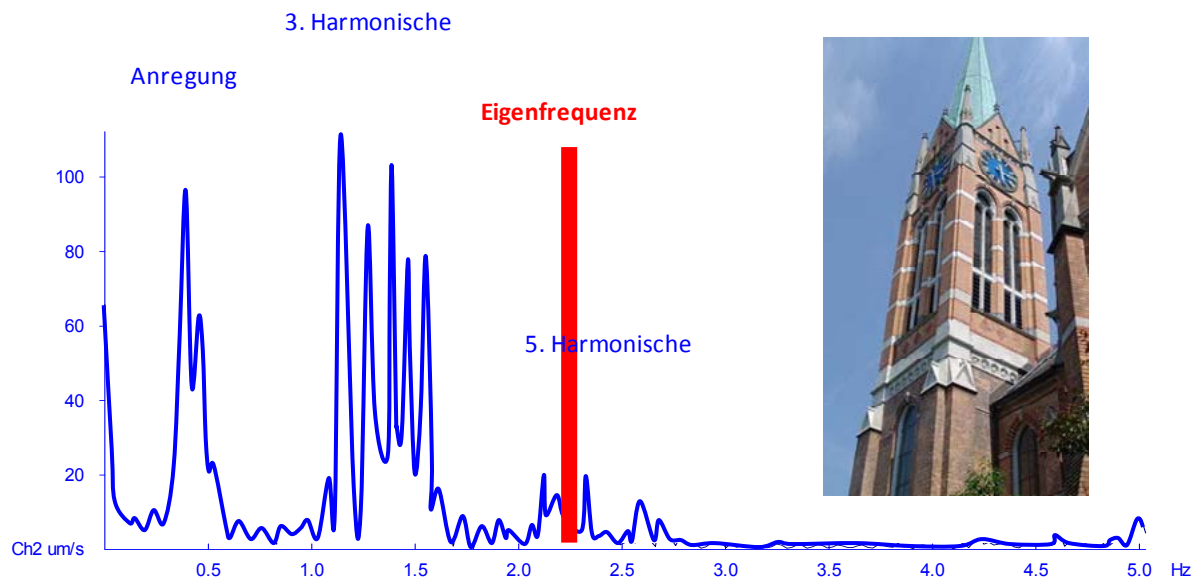


Bild 2.6 Amplitudenspektrum für Läuten mit allen Glocken bei der reformierten Kirche in Zürich-Wiedikon

3 Schwingungsmessungen am Glockenturm

Schwingungsmessungen an Glockentürmen werden meistens dann angeordnet, wenn „etwas nicht ganz stimmt“. Sei es dass der Turm offensichtlich so stark schwingt, dass Besucher Angst bekommen oder dass Risse aufgetreten sind. Sinnvollerweise werden auch vor dem Einbau einer zusätzlichen Glocke oder bei Änderungen am Glockenstuhl Schwingungsmessungen durchgeführt. Der Umfang einer Schwingungsmessung hat sich an den Anforderungen des Glockenbauers und des Ingenieurs der Kirche zu orientieren. In den meisten Fällen genügt eine Messung, wie sie in Bild 3.1 und 3.2 skizziert ist. Mit einem triaxialen Aufnehmer im Bereich der Glocken (MP 1) lässt sich die Eigenfrequenz des Turmes und die Schwingstärke beim Läuten der Glocken problemlos bestimmen. Horizontale Aufnehmer - verteilt über die Höhe des Turmes (MP 2 bis MP 4) - erlauben die Bestimmung der Deformation des Turmes. Gegebenenfalls sind weitere Aufnehmer (wie MP 7) einzusetzen, um bei Rissebildungen im Mauerwerk den Zusammenhang mit dem Läuten der Glocken zu untersuchen.

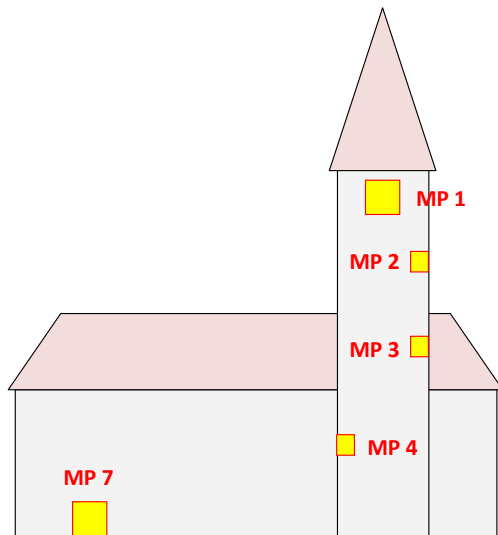


Bild 3.1 Anordnung der Messpunkte (längs zum Schiff)

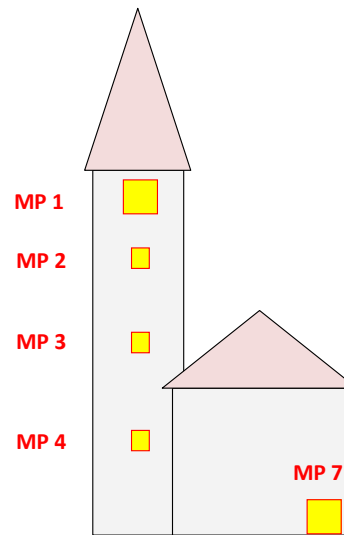


Bild 3.2 Anordnung der Messpunkte (quer zum Schiff)

3.1 Turm-Eigenfrequenz

Die Eigenfrequenz ist die wichtigste Grösse bei der Beurteilung des Schwingverhaltens eines Glockenturmes. Sie kann mit Hilfe eines Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer – durch Aufzeichnung der stets vorhandenen Hintergrundschwingungen – relativ einfach bestimmt werden. Die Abtastrate muss nicht hoch sein, da es um Frequenzen zwischen 1 und 10 Hz geht. Sofern man die Signallänge genügend gross wählt (mindestens 60 Sekunden) und genügend Signale überlagert (20 Signale genügen in der Regel), kann fast nichts schief gehen. Und trotzdem hat die Eigenfrequenzbestimmung ihre Tücken: Die Schwingungsamplituden der Hintergrundschwingungen (oft als „ambient vibration“ bezeichnet) sind nämlich wesentlich kleiner als die Schwingungsamplituden beim Läuten der Glocken. Die mittels „ambient vibration“ bestimmte Eigenfrequenz kann deshalb ohne weiteres 10 % höher liegen als die massgebende Eigenfrequenz. Diesem Sachverhalt ist bei der Interpretation der Messdaten gebührend Rechnung zu tragen. Gerade wenn die Eigenfrequenz des Turmes zwischen den oft nahe beieinander liegenden Anregungsfrequenzen der Glocken liegt, ist die exakte Kenntnis der Eigenfrequenz äusserst wichtig.

Die Anregung mit einem dynamischen Erreger, der eine grössere Schwingungsamplitude erreichen würde, ist zumeist kein gangbarer Weg, da die Platzverhältnisse auf einem Glockenturm dies nicht zulassen. Viel einfacher ist die Verwendung der – bereits vorhandenen – Glocken als dynamische Erreger. Dabei wird die Glocke, die mit ihrer 3. Harmonischen am nächsten bei der vermuteten Eigenfrequenz liegt, eingesetzt. Indem nun die Schlagzahl der Glocke leicht erhöht und leicht gesenkt wird, erkennt man sehr schnell, ob die Eigenfrequenz des Turmes höher oder tiefer liegt als die 3. Harmonische der Glocke (siehe Bild 3.3).

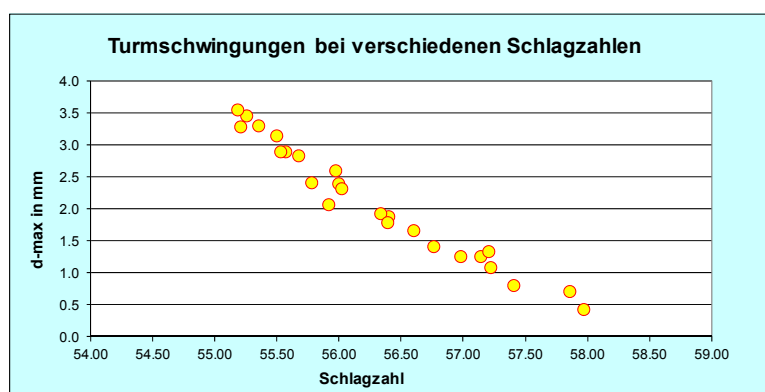


Bild 3.3 Veränderungen der Schwingungsamplitude beim Turm der reformierten Kirche Zürich-Altstetten bei einer Variation der Schlagzahl der Glocke 4. Durch Erhöhung der Schlagzahl von 55 auf 58 reduziert sich die Wegamplitude um einen Faktor 7.

3.2 Maximale Schwingstärke

Beschwerden von Besuchern, Befürchtungen seitens der Kirchgemeinde oder Änderungen am Glockenstuhl können die Messung der maximalen Turmschwingungen erforderlich machen. Dabei sollten stets die Schwingungen, die von den einzelnen Glocken verursacht werden, und die Schwingungen beim Läuten aller Glocken gemessen werden. Während für die Eigenfrequenzbestimmung der Geschwindigkeitssensor der Sensor erster Wahl darstellt, wird man – gerade bei starken Turmschwingungen – den Beschleunigungssensor vorziehen, da dieser keine Begrenzung in der maximalen Wegamplitude aufweist. Die Abtastrate ist auf die gestellte Aufgabe abzustimmen: geht es tatsächlich nur um die Turmschwingungen, so genügt eine relativ tiefe Abtastrate um die Eigenfrequenzen von 1 bis 10 Hz abzubilden. Sollten aber auch die Risse im Turm und in den angrenzenden Mauern beurteilt werden, so wird man Frequenzen bis 250 Hz darstellen wollen.

Um zu erkennen, welcher Anteil der Erschütterungen durch die Glockenschwingung selbst und welcher Anteil durch den Aufprall des Klöppels entstehen, kann die Darstellung in Form des Terzbandspektrums hilfreich sein. Bild 3.4 zeigt das Terzbandspektrum für eine Messung beim Läuten aller Glocken. Man erkennt den Beitrag der Glockenschwingungen in den Frequenzbändern 1.0 bis 3.1 Hz und den Anteil des Klöppel-Aufpralls in den hohen Frequenzbändern zwischen 125 und 250 Hz.

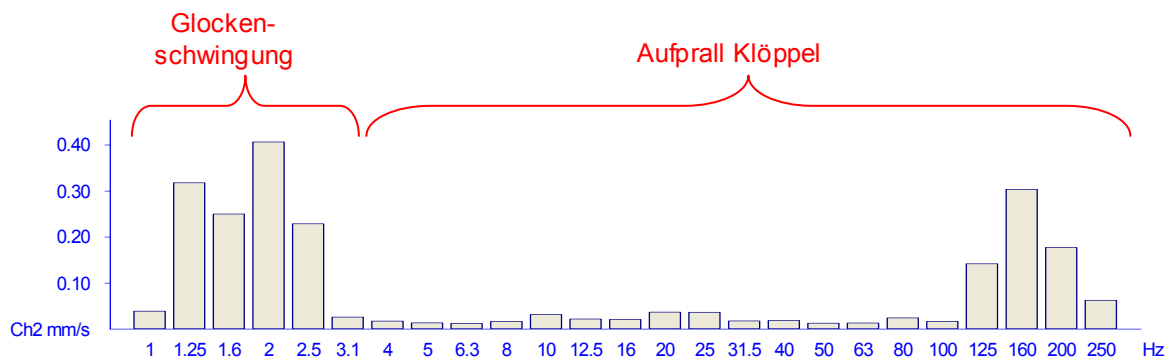


Bild 3.4 Terzband-Darstellung zur Trennung zwischen Glockenschwingung und Klöppel-Aufprall

4 Dynamisches Verhalten von 18 Glockentürmen

Ein Quervergleich des dynamischen Verhaltens verschiedener Glockentürme bietet einen interessanten Einblick in das Verhalten von Glockentürmen und zeigt, welche dynamischen Eigenschaften eher zu Problemen führen. Die nachstehend aufgeführten Daten stammen aus Messungen, die der Autor zusammen mit Herrn Spielmann (H. Rüetschi AG, Glockenguss und Kirchturmtechnik) in den letzten 10 Jahren durchgeführt hat. Diese Messungen wurden im Rahmen der regelmässigen Wartungsarbeiten vorgenommen, um die geplanten Sanierungen optimal zu gestalten.

In Tabelle 4.1 sind die wichtigsten dynamischen Grössen von 18 Glockentürme zusammengestellt. Die Bauweise (Typ) ist durch eine Zahl angegeben, die sich der Einteilung der DIN 4178 bedient und der Zeilenummer in Tabelle 6.1 entspricht. Der Wert f_{amb} gibt die Eigenfrequenz in Glockenschwingrichtung an, wie er sich aus der „Ambient vibration“-Messung ergibt. Wie bereits erwähnt, handelt es sich hier um die Eigenfrequenz bei sehr kleinen Dehnungsamplituden. Die Dämpfung (D) ist in Prozent der kritischen Dämpfung angegeben. Es folgt die maximale Schwinggeschwindigkeit (v_{max} in mm/s) und die maximale Wegamplitude (d_{max} in mm) beim Läuten aller Glocken. Es muss betont werden, dass die angegebenen Werte die Schwingungsamplituden vor der Sanierung des Kirchturmes darstellen. Die Spalten f_{3-1} bis f_{3-6} geben die Fre-

quenz der 3. Harmonischen der Glocken 1 bis 6 an. Diese Frequenzen und vor allem ihr Abstand von der massgebenden Turm-Eigenfrequenz sind ein wichtiger Indikator für das Schwingverhalten des Glockenturms. Die massgebende Glocke, d.h. die Glocke, welche die stärkste Schwingung verursacht, ist mit roter Schrift gekennzeichnet. Die tiefste und höchste Schlagzahl (Glockenschläge pro Minute) stehen, wie weiter oben erläutert, in einem festen Verhältnis zur tiefsten und höchsten Frequenz der 3. Harmonischen (d.h. Schlagzahl = $1/3 \cdot f_3 \cdot 120$).

Tabelle 4.1 Dynamische Kenngrössen von 18 Glockentürmen

	Typ	f_{amb}	D (%)	v_{max}	d_{max}	f_{3-1}	f_{3-2}	f_{3-3}	f_{3-4}	f_{3-5}	f_{3-6}	Schlagzahl	
Stadtkirche Aarau	1	2.37		2.57	0.400	1.04	1.18	1.29	1.31	1.44	1.66	42	66
Ref. Kirch Altstetten	5	1.56	1.5	33.70	4.000	1.15	1.20	1.32	1.39	1.51		46	60
Domkirche Arlesheim	1	2.33		2.40	0.252	1.32	1.34	1.44	1.56			53	62
Berner Münster	1	1.29	1.5	14.30	2.050	0.93	1.07	1.07	1.17	1.20	1.22	37	49
Kirche Eriswil	1	2.90		1.48	0.202	1.25	1.39	1.59	1.93			50	77
Fraumünster Zürich	1	1.66		4.29	0.528	1.15	1.29	1.44	1.59			46	64
Ref. Kirche Andeer	1	2.57		2.43	0.400	1.38	1.47	1.66	1.68	1.92		55	77
Ref. Kirche Muri	5	5.50	1.5	2.11	0.197	1.32	1.39	1.44	1.54	1.61		53	64
Kath. Kirche Rudolfstetten	5	1.29	1.4	57.40	6.500	1.27						51	51
Ref. Kirche Sargans	5	4.00		2.09	0.280	1.34	1.42	1.54	1.66	1.71		54	68
Ref. Kirche Seebach	5	2.37		6.46	0.780	1.10	1.20	1.29	1.39	1.46		44	58
St. Josefs-Kirche Luzern	5	2.29	1.1	6.31	0.830	1.22	1.27	1.32	1.42	1.56		49	62
Kath. Kirche St. Moritz	1	1.37	1.4	42.60	4.600	1.32	1.37	1.49	1.59			53	64
Kath. Kirche Thalwil	3	2.50		2.73	0.490	1.07	1.17	1.27	1.31	1.40		43	56
Drei-König-Kirche Visp	1	2.20	1.1	13.00	1.300	1.34	1.17	1.51	1.51	1.64	1.56	47	66
Ref. Kirche Wiedikon	3	2.29		1.27	0.169	1.15	1.27	1.39	1.46	1.56		46	62
Kath. Kirche Herznach	1	1.60		4.84	0.57	1.40	1.52	1.67				56	67
Kath. Kirche Egg	4	2.98		43.70	7.44	1.43	1.54	1.62				57	65

Am wenigsten unterscheiden sich die 18 Kirchen in den Schlagzahlen. Offensichtlich muss sie für die schwerste Glocke bei etwa 45 liegen und für die leichteste bei etwa 65. Dies bedeutet wiederum, dass der kritische Bereich für die Eigenfrequenz von Glockentürmen zwischen 1.1 und 1.6 Hz liegt. Alle Glockentürme in Tabelle 4.1 mit Eigenfrequenzen über 1.6 Hz haben relativ geringe Schwingungsamplituden. Typisch für diese Kirchen ist auch, dass die schwerste Glocke die massgebende Glocke ist. Es handelt sich bei diesen Glockentürmen auch nicht um ein dynamisches Phänomen sondern um eine quasi-statische Belastung ohne Resonanzerscheinung, da die Eigenfrequenz höher liegt als die 3. Harmonischen.

Besonders interessant war das Verhalten des Glockenturms der reformierten Kirche in Zürich-Altstetten (Bild 4.1): Die massgebende Glocke ist die Glocke Nr. 4 mit einer 3. Harmonischen von 1.39 Hz. Bei den ersten Versuchen zur Reduktion der Schwingungsamplitude ist man – irrtümlicherweise – davon ausgegangen, dass die Eigenfrequenz nicht stark von der Schwingungsamplitude beeinflusst wird und dass man mit einer Eigenfrequenz von $f = f_{amb} = 1.5$ Hz rechnen kann. Aus diesem Grund war es auch zunächst unverständlich, dass die Schwingungsamplitude mit abnehmender Schlagzahl, d.h. bei einer „Vergrösserung des Abstandes von der Eigenfrequenz“ zunahm. In Wirklichkeit lag die Eigenfrequenz (bei der hohen Schwingungsamplitude) einiges tiefer (wohl bei 1.3 Hz) und die Reduktion der Schlagzahl brachte eine „Annäherung“ an die Eigenfrequenz. Das gleiche Phänomen wurde auch bei der katholischen Kirche Rudolfstetten (Bild 4.2) beobachtet. Obwohl die 3. Harmonische mit 1.27 Hz unterhalb der Eigenfrequenz f_{amb} von 1.29 lag, brachte erst eine Erhöhung der Schlagzahl eine Verringerung der Schwingstärke.

Auch die katholische Kirche in St. Moritz wies vor der Sanierung relativ starke Schwingungen auf. Die wunderschöne Kirche mit freistehendem Campanile (Bild 4.3) wurde von Nicolaus Hartmann im Stile lombardischer Romanik erbaut. Ihm schwebten offensichtlich leichte Glocken wie im Süden üblich vor. Für den Pastor mit Wurzeln im nördlichen Nachbarland, der letzten Endes über die Beschaffung der Glocken entschied, mussten es schwere Glocken sein, wie in seiner Heimat üblich. Das Beispiel zeigt, dass auch kulturelle Unterschiede zu übermässigen Turmschwingungen führen können.

Interessant ist auch das Beispiel der katholischen Kirche Egg. Obwohl die Turmeigenfrequenz ausserhalb des kritischen Frequenzbereichs (von 1.43 bis 1.62 Hz) liegt, ergeben sich beim Läuten aller Glocken recht grosse Schwingungsamplituden. Es handelt sich hier nicht um ein dynamisches Problem mit Resonanzerscheinung sondern um ein quasi-statisches Problem.



Bild 4.1 Ref. Kirche Altstetten



Bild 4.2 Kath. Kirche Rudolfstetten



Bild 4.3 Kath. Kirche St. Moritz

5 Reduktion der Turmschwingung

Übermässige Turmschwingungen lassen sich zwar durch verschiedene Massnahmen korrigieren, doch leidet dabei oft die Qualität des Glockenklangs. Eine Versteifung des Turmes ist wohl die einzige Massnahme, die den Glockenklang nicht beeinflusst. Allerdings sind hier aus architektonischen Gründen oft sehr enge Grenzen gesetzt. In der Regel sind ganz erhebliche Veränderungen in der Tragstruktur erforderlich, um die gewünschte Veränderung in der Eigenfrequenz zu erreichen.

Die Veränderung der Schlagzahl der Glocken ist ein häufig eingesetztes Mittel zur Reduktion der Turmschwingungen. Idealerweise wird die Veränderung der Schlagzahl interaktiv mit der Schwingungsmessung vorgenommen, sodass jede Verbesserung oder Verschlechterung sofort erkannt werden kann. Auch hier sind – wegen dem Zusammenspiel mit den übrigen Glocken – relativ enge Grenzen gesetzt. Da jedoch Glockentürme eine sehr geringe Dämpfung aufweisen, bewirken bereits geringe Veränderungen in der Schlagzahl erstaunlich grosse Veränderungen in den Schwingungsamplituden.

Durch gekröpfte Joche, mit denen sich der Drehpunkt der Glocke in Richtung Glockenschwerpunkt verschiebt und dadurch geringere Horizontalkräfte auftreten, lassen sich Horizontalschwingungen ebenfalls reduzieren. Den gleichen Effekt haben Zusatzmassen über den Glocken. Aber auch hier gehen die Massnahmen oft auf Kosten des guten Glockenklangs.

Häufig wird auch die elastische Lagerung des Glockenstuhls als schwingungsmindernde Massnahme ins Feld geführt. Hier ist allerdings zu sagen, dass eine elastische Lagerung des Glockenstuhls von bestenfalls 7 Hz wohl kaum in der Lage sein wird, die Turmschwingungen von 1.5 Hz zu beeinflussen. Hingegen reduziert die elastische Lagerung des Glockenstuhls die Übertragung der vom Klöppel erzeugten Erschütterungen und schützt somit das Mauerwerk, auf dem der Glockenstuhl ruht.

6 Zulässige Turmschwingungen

Welche Schwingungen sind nun „zulässig“ und ab welcher Schwingstärke sind Sanierungsmaßnahmen erforderlich? Diese Frage stellt sich praktisch bei jeder Glockenstuhl-Sanierung. Für moderne Glockentürme aus Stahl oder Stahlbeton lässt sich diese Frage noch einigermaßen zuverlässig beantworten. Über die Materialeigenschaften und unter Berücksichtigung der Ermüdungsfestigkeit lassen sich gesicherte Werte über die zulässigen Schwingungsamplituden berechnen. Was soll aber mit den vielen Kirchen mit Natursteintürmen oder aus Sandstein geschehen? Wie lässt sich für diese Glockentürme, bei denen die Materialfestigkeit kaum bekannt ist und überdies örtlich variiert, eine gesicherte Aussage über die zulässigen Schwingungen herleiten?

Eine gewisse Hilfestellung bietet die Norm DIN 4178 mit ihren *Orientierungswerten der Schwinggeschwindigkeit bei Glockentürmen* (siehe Tabelle 6.1). Gemäss DIN 4178 sind bei Einhaltung dieser Werte (gemessen im obersten Turmgeschoss) nach bisherigen Erfahrungen keine weiteren dynamischen Untersuchungen rechnerischer oder messtechnischer Art erforderlich.

Tabelle 6.1 Orientierungswerte der Schwinggeschwindigkeit bei Glockentürmen

Zeile	Bauart	Orientierungswert v in mm/s
1	Historische Türme, allgemein	3
2	Historische Holztürme	5
3	Türme aus Ingenieurmauerwerk	5
4	Türme aus Ingenieurholzbau	8
5	Türme aus Stahlbeton	8
6	Stahltürme	10

Von den 18 Glockentürmen in Tabelle 4.1 liegen – wie man in Bild 6.1 sieht – tatsächlich die meisten unterhalb des Orientierungswertes der DIN 4178. Bei den Spitzenreitern mit Maximalwerten von 30 mm/s und mehr sind Massnahmen getroffen worden. Zumeist wurden die Schwingungen durch Veränderung der Schlagzahlen, durch Zusatzmassen oder durch eine Kombination beider Massnahmen reduziert. Die in Bild 6.1 dargestellten Werte stellen die Situation vor der Sanierung dar.

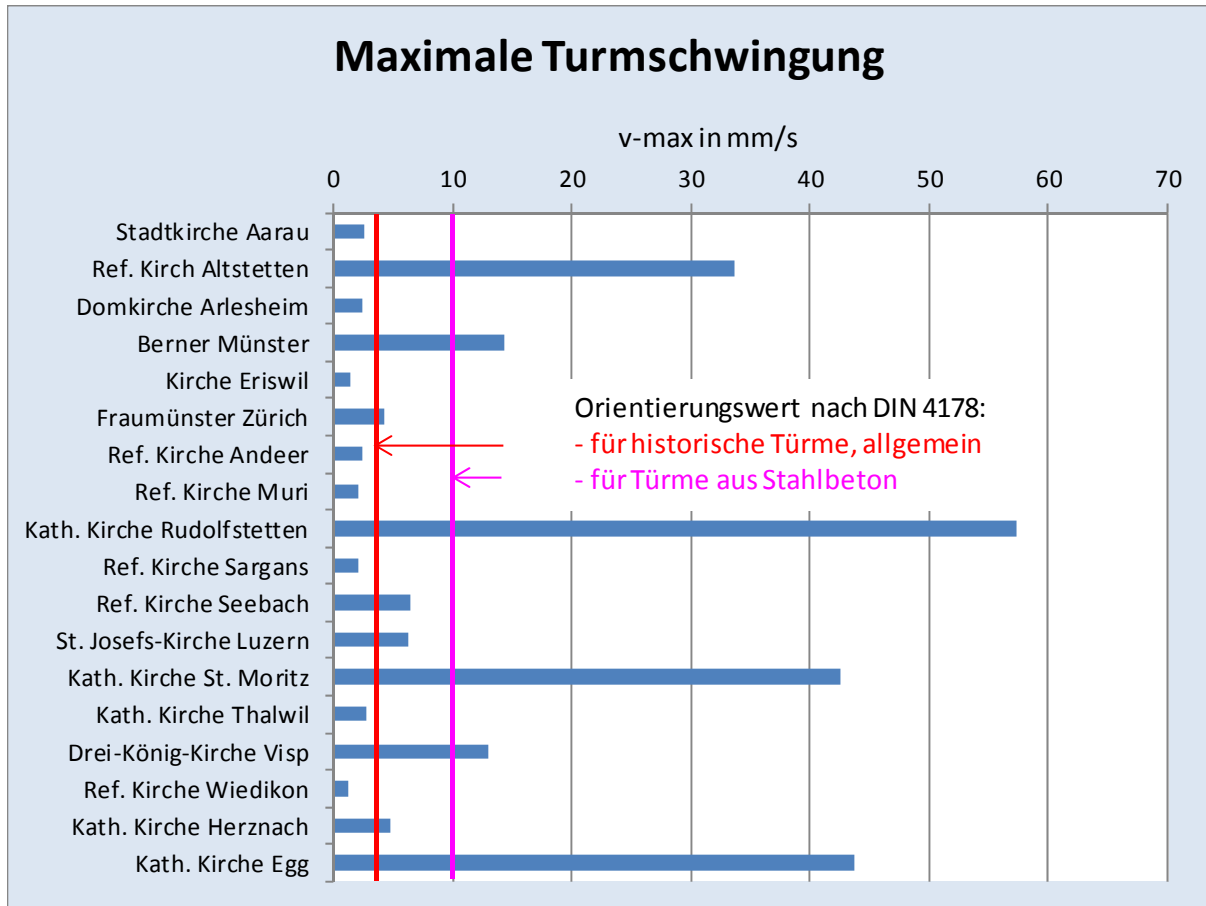


Bild 6.1 Vergleich der gemessenen maximalen Turmschwingungen vor der Sanierung mit den Orientierungswerten der DIN 4178

7 Fazit

Selbstverständlich ist jeder Kirchturm ein Spezialfall und es wird nicht möglich sein ein allgemeingültiges Rezept für die Sanierung von schwingungsanfälligen Kirchtürmen zu formulieren. Trotzdem lassen sich aufgrund der hier dargestellten dynamischen Grundlagen und mit dem Quervergleich der 18 untersuchten Kirchen gewisse allgemeingültige Schlussfolgerungen ziehen.

Primär ist abzuklären, ob die Eigenfrequenz des Glockenturms im kritischen Frequenzbereich liegt, d.h. im Bereich der 3. Harmonischen der Glockenfrequenzen. Liegt die Eigenfrequenz eindeutig ausserhalb des kritischen Frequenzbereiches, so handelt es sich nicht um ein dynamisches Problem sondern um ein quasi-statisches. Für diesen Fall müssen wir die Eigenfrequenz auch nicht auf die dritte Kommastelle genau kennen. Allfällige übermässige Schwingungsamplituden entstehen nicht durch ein Aufschaukeln, sondern durch die quasi-statischen Kräfte der schwingenden Glocken. Eine Veränderung der Schlagzahlen wird hier keine grosse Veränderung bringen.

Liegt die Eigenfrequenz innerhalb des kritischen Bereiches, so haben wir es in der Regel mit einem dynamischen Problem zu tun. In diesem Fall müssen wir die Eigenfrequenz sehr genau kennen und zwar – wie weiter oben erläutert – die Eigenfrequenz für grosse Amplituden, wie sie beim Läuten der Glocken auftreten. Bereits ein kleiner Fehler in der Bestimmung der Eigenfrequenz kann zu schwerwiegenden Fehlbeurteilungen führen. Ist die Eigenfrequenz bekannt, so wird man primär durch Veränderung der Schlagzahlen den Abstand zwischen Erregerfrequenz und Eigenfrequenz zu vergrössern suchen. Weitere Massnahmen wie gekröpfte Joche oder Zusatzmassen können die Schwingungen weiter reduzieren, werden aber am Resonanzproblem selbst nichts Grundlegendes ändern.

Eine elastische Lagerung des Glockenstuhls wird die Übertragung der höheren Frequenzen – hervorgerufen durch Klöppelschlag oder Getriebe – ganz entscheidend verringern und so die Beanspruchung des Mauerwerkes reduzieren. An der Turmschwingung selbst wird sich dadurch allerdings kaum etwas ändern.

Literatur

- [1] Slavik, M.: Überlegungen zur Baudynamik von Glockentürmen. Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH), Fachbereich Bauingenieurwesen/Architektur, Labor für Bauwerks- und Modellmessung, 2004 [<http://www.htw-dresden.de>]
- [2] Deutsche Norm - DIN 4178: Glockentürme. Beuth Verlag, Berlin April 2005