

# Diagnose und Ueberwachung des Tragverhaltens von Glockentürmen

Autor(en): **Gerasch, Wolf-Jürgen**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE reports = Rapports AIPC = IVBH Berichte**

Band (Jahr): **70 (1993)**

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-53288>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

## **Diagnose und Ueberwachung des Tragverhaltens von Glockentürmen**

Analysis and Monitoring of the Safety of Bell Towers

Analyse et surveillance de la sécurité des clochers

**Wolf-Jürgen GERASCH**

Civil Eng.

Univ. Hannover

Hannover, Germany

### **ZUSAMMENFASSUNG**

Die Messung von Eigenfrequenzen, Eigenschwingungsformen und Dämpfung bei Glockentürmen ist bei historischen Bauwerken eine Voraussetzung, um die wirklich einwirkenden Kräfte zu ermitteln. Die beim Läuten der Glocken auf die Türme einwirkenden dynamischen Kräfte, können zu Resonanzschwingungen anfachen. Die Berechnung der Eigenfrequenzen ist unpräzise, weil wesentliche Parameter nur ungenau ermittelt werden können. Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Standsicherheit von Türmen über die Messung der Eigenfrequenzen und der Eigenschwingungsformen überwacht werden können. Schäden, welche die Standsicherheit der Türme beeinträchtigen, werden durch diese Methode festgestellt.

### **SUMMARY**

The measurement of natural frequencies, eigenforms and damping of bell towers is a prerequisite for determining the forces effecting historical buildings. The dynamic forces engaged when ringing the bells may lead to resonance vibrations of the structure. The calculation of natural frequencies is not precise, because important parameters are unknown. Test results prove that the stability of towers can be assessed by measuring the natural eigenforms. Cracks, which are a risk for the stability of towers, will be discovered. Damages having an influence on the safety of towers can be identified with this method.

### **RÉSUMÉ**

La mesure des fréquences naturelles et des vibrations et amortissements correspondants de clochers est nécessaire, dans les bâtiments historiques, pour déterminer les forces réellement en présence. Les forces dynamiques agissantes sur les clochers lors de la sonnerie des cloches, peuvent mettre la construction en résonance. Le calcul des fréquences naturelles n'est pas très précis car des paramètres essentiels ne sont connus que de façon approximative. Les résultats d'étude ont montré que la sécurité des tours peut être contrôlée sur la base des mesures de fréquences naturelles et de vibrations correspondantes. Les dégâts qui influencent la résistance des tours peuvent être déterminés à l'aide de cette méthode.



## 1 Einleitung

Schwingungsmessungen an Kirchtürmen werden zur Zeit vorwiegend aus zwei Gründen durchgeführt. Sind Schäden an einem Turm vorhanden, so wird untersucht, ob die Schäden durch die dynamischen Kräfte, die vom Glockengeläut auf die Konstruktion einwirken, verursacht worden sind. Sollen in einem Turm weitere Glocken eingebaut werden, so ist festzustellen, ob die zusätzlich auftretenden dynamischen Kräfte vom Turm aufgenommen werden können. Es fehlen aber systematische Untersuchungen, z.B. auch an Kirchtürmen, um Veränderungen des globalen Zustandes der Tragkonstruktion zu beschreiben. An einem Beispiel wird gezeigt, daß, trotz Befürchtungen von Statikern, sich das Tragverhalten eines Kirchturmes in einem Zeitraum von 20 Jahren nicht verändert hat. Bei einem zweiten Turm wurden Mauerwerksbögen und ein Teil des Mauerwerks abgebrochen. Die Stabilität des Turmes wurde vor dem Abbruch und danach ermittelt. Dabei wird auch auf die Besonderheit der Glockentürme eingegangen. Die Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen eines weiteren Kirchturmes wurden gemessen. Es wurde anschließend ein mathematisches Modell (FE-Modell) erstellt, das die gleichen Eigenfrequenzen wie der Glockenturm aufweist. Das Eigenschwingungsverhalten des Modells wird außerdem für Mauerwerk mit durchgehenden Vertikalrissen untersucht.

## 2 Diagnose

Bevor mit der Sanierung von Schäden an historischen Bauwerken begonnen wird, sollte die Ursache, die für den Schaden verantwortlich ist, gefunden werden. Da Kirchtürme im wesentlichen Wind- und Glockenkräften ausgesetzt sind, ist unter anderem zu untersuchen, ob diese Kräfte die Schäden verursacht haben können. Dort wo starker Straßenverkehr ist, wird auch untersucht, ob die Erschütterungen zu einer Umlagerung des Bodens unterhalb der Fundamente führen konnten, so daß unterschiedliche Setzungen der Konstruktion möglich waren.

Die Beanspruchung der Türme durch die Windbelastung kann vom Statiker abgeschätzt werden. Zur Zeit werden Messungen an einem Kirchturm durchgeführt, um die Windlastannahme noch zu verbessern. Es ist aber in der Regel bei historischen Kirchtürmen nicht möglich die dynamische Belastung aus Glockengeläut genau genug zu ermitteln, da die Steifigkeit, die Masse und der Elastizitätsmodul des Mauerwerks häufig nicht ausreichend genau vorliegen. Die Beanspruchung der Kirchtürme durch das Glockengeläut hängt aber wesentlich vom Verhältnis der Glockenerregerfrequenzen und der wesentlichen Eigenfrequenzen des Turmes ab (Resonanzregung)[1]. Die Eigenfrequenzen und Dämpfung der Türme lassen sich aus Messungen sehr leicht ermitteln. Sind hochempfindliche Schwinggeschwindigkeits- oder Schwingbeschleunigungsaufnehmer vorhanden, so ist schon eine Windgeschwindigkeit von  $v \geq 3 \text{ m/s}$  ausreichend, um die Eigenschwingungsgrößen aus Messungen zu ermitteln. Der Winddruck in Windrichtung stellt eine stochastische Erregung dar, bei der der Turm in seinen Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen antwortet. Die Autokorrelationsfunktion [2]

$$\psi(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T y(t) \cdot y(t + \tau) dt \quad (1)$$

der Antwort eines gedämpften Systems ist bei stochastischer Anregung identisch mit der aus einem Ausschwingvorgang (freie Schwingung) zu gewinnende Abklingkurve.

$$\psi(\tau) = \text{Konst.} \cdot e^{-\delta \cdot f \cdot \tau} \quad (2)$$

mit:  $\delta$ : log. Dekrement  $f$ : Eigenfrequenz

Somit sind aus den Messungen die wesentlichen Eigenschwingungsgrößen bekannt. Häufig besteht auch die Möglichkeit, mittels einer Impulserregung (Springen im Turm in Horizontalrichtung) aus der freien Schwingung die Eigenfrequenzen, Eigenformen und Dämpfungen zu ermitteln. Besonders geeignet sind Türme mit einer Eigenfrequenz von  $f = 0,5 \text{ Hz} \div 2,0 \text{ Hz}$ . Liegen steifere Konstruktionen vor, so reicht der Impuls für eine Anregung nicht aus. Die Bewegungen, auch Rißbewegungen, des Turmes bei Glockengeläut können gemessen werden oder bei Kenntnis der Glocken kann eine theoretische Berechnung durchgeführt werden.

Das Glockengeläut erzeugt dynamische Kräfte mit tiefen Frequenzen  $f < 2,0 \text{ Hz}$  durch die schwingende Masse der Glocken. Beim Anschlagen des Klöppels an die Glocken wird wegen des kurzen Impulses ein Spektrum bis  $f \cong 500 \text{ Hz}$  angeregt. Die hochfrequenten Wellen werden über den Glockenstuhl in das Mauerwerk transportiert. Ungünstig sind Stahlglockenstühle, da die hohen Frequenzen ungedämpft in das Mauerwerk übertragen werden. Treten im Mörtel hohe Beschleunigungen auf, so ist nicht auszuschließen, daß er schneller altert. Es können zur Zeit aber noch keine quantitativen Angaben über die Wirkung von Beschleunigungen auf die Alterung des Mörtels vorgelegt werden.

Führen stark befahrene Straßen dicht an einem Kirchturm vorbei, so ist auch zu untersuchen, ob die vom Straßenverkehr im Boden erzeugten Schwingungen zu einer Kornumlagerung führen, so daß es zu unterschiedlichen Setzungen der Konstruktion kommen kann. Diese Gefahr bestand in der Vergangenheit sicherlich wesentlich häufiger, da die Fahrzeuge nicht abgedefert waren und ein unebener Straßenbelag vorlag. In Abhängigkeit vom Boden können Beschleunigungsamplituden von  $a \geq \frac{1}{10} g$ , [ $g$ : Erdbeschleunigung] die unterhalb der Fundamente im Boden auftreten, Bodenumlagerungen bewirken. Führen asphaltierte oder verkehrsberuhigte Straßen an Kirchtürmen vorbei, so sind durch die vorhandenen Schwingungen keine Bodenumlagerungen zu erwarten.

### 3 Überwachung

Auf dem Weg zu einer Diagnose ist es auch erforderlich, daß die dynamischen Eigenschaften des Tragwerks beschrieben werden. Mit Kenntnis dieser Eigenschaften kann über eine Langzeitüberwachung die Standsicherheit eines Turmes beobachtet werden. Eine Schwächung des Mauerwerks, d.h. ein Verlust an Stabilität — durch Vertikalrisse — muß sich, wenn sie für die globale Standsicherheit einen Einfluß hat, in der Veränderung der Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen wiederfinden.

Zeigen sich bei der Überwachung über Jahre keine Veränderungen in den dynamischen Eigenschaften eines Turmes, so ist auch davon auszugehen, daß bezogen auf das globale Tragverhalten, keine Änderungen eingetreten sind.

Die tiefsten Eigenfrequenzen von Kirchtürmen setzen sich aus der Drehung auf dem Untergrund und der Biegung des Turmschaftes zusammen.

$$f_{ges} = \frac{f_D \cdot f_B}{f_D + f_B} \quad (3)$$

Es müßte noch untersucht werden, ob durch die Veränderung der Drehfrequenz auf Vorgänge im Boden geschlossen werden kann. Die reinen Biegeeigenfrequenzen können aus den Meßsignalen der Dehnungsmeßstreifen berechnet werden. Die Schwinggeschwindigkeits- oder Schwingbeschleunigungsaufnehmer, die im Turm installiert sind, zeigen  $f_{ges}$ , so daß  $f_D$  berechnet werden kann.



Treten Frequenzänderungen in Kirchtürmen auf, so können diese zu zwei Erscheinungen führen:

- 1.) Eintreten von Resonanzschwingungen  
(Glockenerregerfrequenz = Eigenfrequenz des Turmes),
- 2.) Minderung des globalen Tragverhaltens.

Die Möglichkeit, daß eine Schwächung des Querschnittes zu einer Vergrößerung der dynamischen Lasten führen kann, stellt, bezogen auf historische Bauwerke, sicherlich eine Ausnahme dar, die für diese Tragwerke aber von Bedeutung sein können. Frequenzveränderungen von  $\Delta f = 0,01 \text{ Hz}$  können dargestellt werden. Somit sind Steifigkeitsveränderungen, die bei 2% liegen, zu beobachten.

## 4 Beispiele

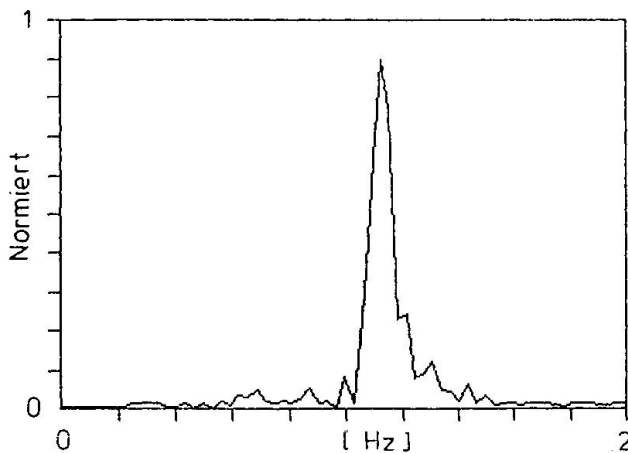
### 4.1 Kirchturm A (Langzeitüberwachung)

Ein Kirchturm, der eine Höhe von 50 m aufweist, war 1974 von Prof. Dr. F. Müller auf sein Eigenschwingungsverhalten und das Schwingungsverhalten bei Glockengeläut (5 Glocken) untersucht worden. Nach 18 Jahren sollte festgestellt werden, ob sich das Eigenschwingungsverhalten des Turmes verändert hat, da der subjektive Eindruck bei einigen Beobachtern zu dem Ergebnis geführt hatte, daß sich die Schwingungen bei Glockengeläut in den letzten Jahren vergrößert hätten.

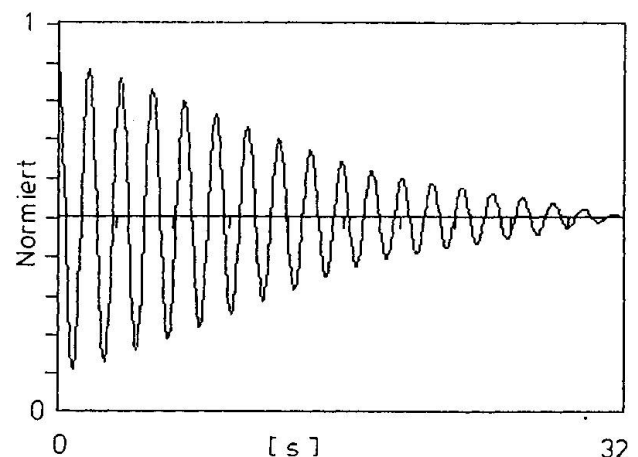
Die Messungen im Jahr 1974 hatten zu folgenden tiefsten Eigenfrequenzen geführt:  $f_x = 1,16 \text{ Hz}$  (Glockenschwingrichtung) und  $f_y = 0,95 \text{ Hz}$ . Die Dämpfung war zu  $\delta = 0,15$  (richtungsunabhängig) berechnet worden.

Dem Spektrum bei Winderregung konnten bei der Messung im Jahr 1992 die Eigenfrequenzen und Dämpfungen entnommen werden. (Bilder 1 u. 2)

$$\begin{aligned} f_x &= 1,15 \pm 0,01 \text{ Hz} & \delta_x &= 0,11 \\ f_y &= 0,93 \pm 0,01 \text{ Hz} & \delta_y &= 0,14 \end{aligned}$$



**Bild 1:** Spektrum bei Winderregung



**Bild 2:** Autokorrelationsfunktion

Die maximalen Amplituden an der Turmspitze bei Glockengeläut ergaben sich zu  $s = \pm 5,5 \text{ mm}$  (1974) und  $s = \pm 4,3 \text{ mm}$  (1992). Der geringe Unterschied hat seine Ursache im Einbau eines neuen Glockenstuhls im Jahre 1985, als die Klöppelanschlagzahl der großen Glocke von 46 Schlägen/Min. auf 40 Schläge/Min. reduziert wurde. Die maximalen Dehnungen ergaben sich bei vollem Geläut zu  $\varepsilon = 4,0 \cdot 10^{-5}$ . Wird für das Mauerwerk ein mittlerer E-Modul von  $E = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ MN/m}^2$  eingesetzt, so ergibt sich eine maximale Spannung aus Glockengeläut von  $\sigma_{max} = \pm 180 \text{ kN/m}^2$ . Ist die Schwinggeschwindigkeitsamplitude an der

Spitze des Turmes bekannt, so kann die Spannung im Mauerwerk auch über die Beziehung [3]

$$\sigma_{max} = \sqrt{E \cdot \rho} \cdot 1,71 \cdot 1,0 \cdot v_{max}$$

berechnet werden. Bekannt sein müssen ebenfalls der E-Modul und außerdem die Dichte des Mauerwerks. Bei einer Schwinggeschwindigkeitsamplitude von  $v_{max} = 30 \text{ mm/s}$  wird die Materialspannung zu:

$$\sigma_{max} = \sqrt{4,5 \cdot 10^6 \cdot 1,8} \cdot 1,71 \cdot 0,03 = 146 \text{ kN/m}^2.$$

Da die auf den beiden unterschiedlichen Wegen ermittelten Spannungen gleich groß sind, kann der E-Modul folgendermaßen berechnet werden:

$$\begin{aligned} \varepsilon \cdot E &= \sqrt{E \cdot \rho} \cdot 1,7 \cdot 1,0 \cdot v_{max} \\ \searrow \quad E &= \frac{(1,7 \cdot 1,0 \cdot v_{max})^2}{\varepsilon^2} \end{aligned} \quad (4)$$

Die Dichte des Mauerwerks muß bekannt sein, um den E-Modul berechnen zu können. Wird der E-Modul über die Laufzeit der Longitudinalwelle ermittelt

$$E = v_L^2 \cdot \rho \quad (5)$$

so muß ebenfalls die Dichte bekannt sein.

Obwohl beim Glockengeläut sehr stark spürbare Schwingungen im Kirchturm erzeugt werden, sind bisher keine Schäden aufgetreten und die Systemeigenschaften haben sich nur unwesentlich verändert. Der Abstand zwischen der dritten Erregerfrequenz der großen Glocke und der Eigenfrequenz liegt bei

$$\eta = \frac{f_{Err.}}{f_{Eig.}} = \frac{1,0}{1,16} = 0,86$$

Der Vergrößerungsfaktor der Kräfte der Glocke 1 in der dritten Erregerfrequenz liegt bei  $V = 4,5$ . Wird der Kirchturm durch Vertikalrisse, d.h. durch die Schwächung des Querschnitts, weicher, so kann sich der Vergrößerungsfaktor auf  $V = 28,5$  erhöhen, was zu Schäden an der Konstruktion führt.

Immer dann, wenn die Eigenfrequenz etwa 10% ÷ 20% über der dritten Erregerfrequenz einer großen Glocke liegt, sollten in Abständen von etwa zehn Jahren erneut Messungen erfolgen. Es gibt zahlreiche Kirchtürme bei denen das Verhältnis  $\eta = 0,8 \div 0,95$  beträgt und bei denen eine Veränderung der Steifigkeit zur wesentlichen Erhöhung der Kräfte führt.

Werden Risse beseitigt, so kann sich die Eigenfrequenz, da das Bauwerk eine größere Steifigkeit erhält, erhöhen, und somit von

$$\eta = \frac{f_{Err.}}{f_{Eig.}} > 1,0$$

zu  $\eta = 1,0$  streben, wodurch die sanierte Konstruktion stärker beansprucht werden kann als vor der Sanierung.

## 4.2 Kirchturm B (Sanierung)

Das Messen der Eigenfrequenzen vor und nach der Sanierung ist ohne großen Aufwand durchzuführen. Im *Bild 3* ist die freie Schwingung nach einer Impulserregung dargestellt. (Springen gegen eine Außenwand) Bei dem Bauwerk (*Bild 4*) handelt es sich um einen Turm, der eine Höhe von  $h = 80 \text{ m}$  aufweist. Da in den Bögen und Querwänden Risse aufgetreten sind,



sollte ein wesentlicher Teil abgetragen werden. (Bild 5) Die Eigenfrequenzen wurden vor dem Abtragen der Konstruktion und danach erfaßt.

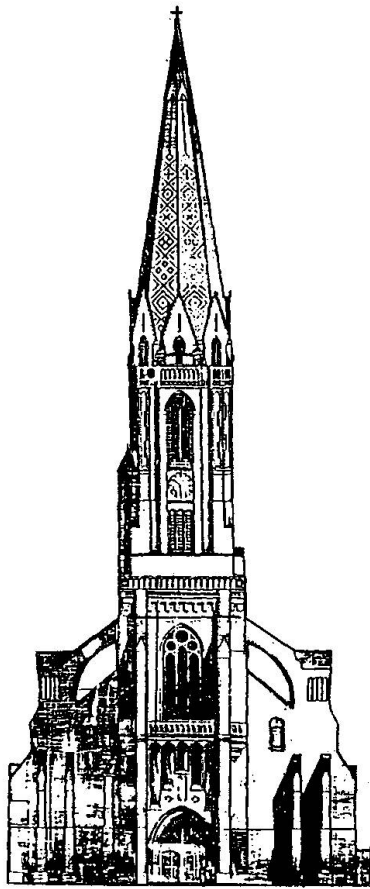


Bild 4: Kirchturm

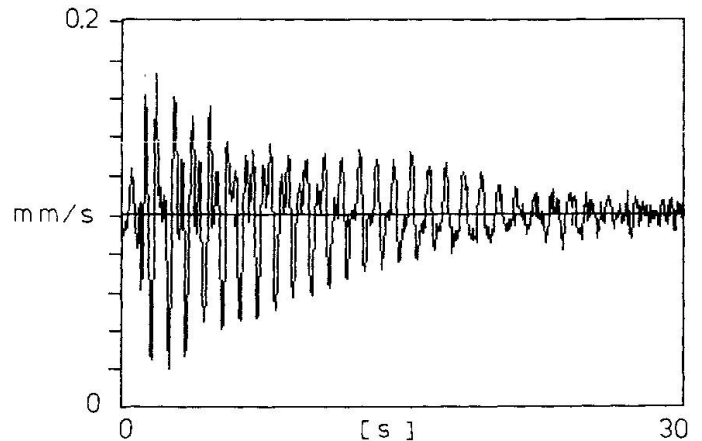


Bild 3: Freie Schwingung nach Impulserregung (Sprung)

Es ergaben sich folgende Werte:  
Vor dem Umbau:

$$f_x = 1,06 \text{ Hz}$$

$$f_y = 1,25 \text{ Hz}$$

$$\delta_{x,y} = 0,2$$

Nach dem Abtragen von Wandteilen:

$$f_x = 1,02 \text{ Hz}$$

$$f_y = 1,24 \text{ Hz}$$

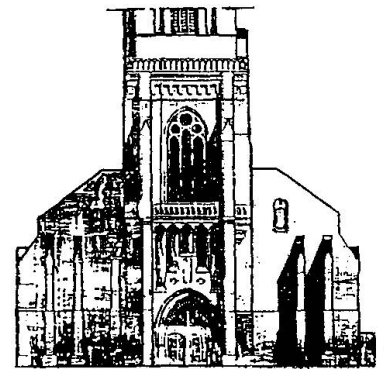


Bild 5: Abriß eines Teils der Bögen und der Querwand

Die wesentliche Erregerfrequenz der großen Glocke liegt bei  $f = 1,05 \text{ Hz}$ . Betrug die Schwingungsamplituden vor dem Umbau maximal  $s_x = \pm 1,8 \text{ mm}$ , so gingen sie auf  $s_x = \pm 0,8 \text{ mm}$  nach dem Abtragen der Querwand herunter. Um zu vermeiden, daß nach der Sanierung wieder Resonanzschwingungen auftreten, soll zwischen dem Turm und dem neu aufgemauertem Wandteil ein Luftschlitz gelassen werden.

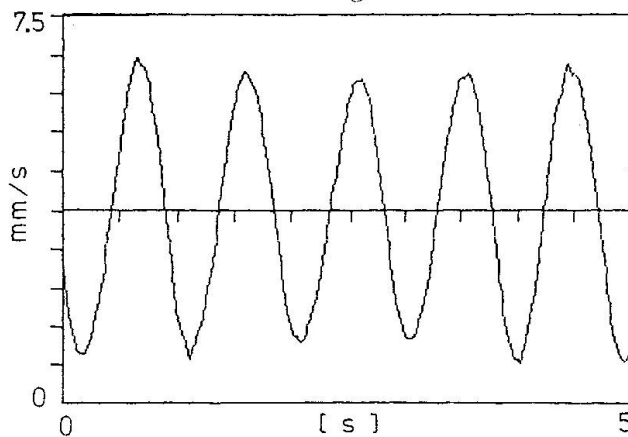


Bild 6: Zeitverlauf der Bogenschwingung (volles Geläut)

Vor dem Umbau führten die Mauerwerksbögen und die Seitenwand Bewegungen beim Glockengeläut von  $s = 1,1 \text{ mm}$  aus. Die Schwinggeschwindigkeitsamplituden ergaben sich zu  $v = 6,9 \text{ mm/s}$  (Bild 6). Entsprechend [4] sind bei stationären Vorgängen Schäden an der Konstruktion nicht auszuschließen. Die vor der Sanierung vorhandenen Risse können durch die jahrzehntelange dynamische Beanspruchung entstanden sein.

Nach der Sanierung werden wieder Schwingungsmessungen durchgeführt, um eine Aussage über die Einwirkung der dynamischen Belastung auf die Konstruktion vornehmen zu können.

Außerdem werden zur Zeit Messungen durchgeführt, um die Beanspruchung des Turmes bei Sturm zu erfassen.

### 4.3 Kirchturm C (Schadensfrüherkennung)

Die Veränderung der Eigenfrequenzen ist ein Indiz dafür, daß sich die Steifigkeit des Systems verändert hat, wenn davon ausgegangen werden kann, daß die Massen gleich geblieben sind. Die exakte Ermittlung der Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen kann nur über Messungen erfolgen. Dafür ist aber eine Dauerüberwachung nicht erforderlich, da sich Schäden, wenn nicht außergewöhnliche Beanspruchungen vorliegen, langfristig ausbilden. Besonders sinnvoll sind Messungen zur Ermittlung der Eigenfrequenzen nach der umfassenden Sanierung eines Turmes, da dann davon auszugehen ist, daß die Standsicherheit der Konstruktion vorliegt. Bei geschädigten Bauwerken kann durch Messungen, die in kürzeren Abständen erfolgen sollten, festgestellt werden, ob sich die Standsicherheit verändert. Schwierig wird es sein, was eventuell über FE-Berechnungen, die parallel durchgeführt werden können, möglich wird, eine Versagenswahrscheinlichkeit zu benennen.

An einem Beispiel, einem gemauerten Glockenturm, der eine Höhe von  $H = 30\text{ m}$  aufweist und etwa 40 Jahre alt ist, soll gezeigt werden, wie sich Risse auf Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen bemerkbar machen.

Bevor ein mathematisches Modell aufgestellt wurde, erfolgten Schwingungsmessungen am Kirchturm, weil die Befürchtung geäußert worden war, daß beim Läuten der Glocken „große“ Schwingungen auftreten. Die Schwingungsmessungen führten zu Eigenfrequenzen von  $f_x = 1,29\text{ Hz}$ ,  $f_y = 1,89\text{ Hz}$ ,  $\delta_{x,y} = 0,09$ . Bei vollem Glockengeläut (4 Glocken) traten an der Turmspitze Wegamplituden von  $s = \pm 1,9\text{ mm}$  auf. Die dritten Erregerfrequenzen liegen etwas unterhalb der Eigenfrequenz von  $f = 1,89\text{ Hz}$ .

Erregerfrequenzen:  $f_{3G_1} = 1,63\text{ Hz}$ ,  $f_{3G_2} = 1,69\text{ Hz}$ ,  $f_{3G_3} = 1,75\text{ Hz}$

Die Vergrößerung der statischen Lasten liegen bei dem zur Zeit vorhandenem Frequenzabstand im Mittel bei  $V \cong 5,0$ . Treten Schäden am Mauerwerk auf, (Vertikalrisse) so kann sich die Eigenfrequenz auf die Erregerfrequenzen zubewegen, so daß eine Vergrößerung von  $V \cong 21$  eintreten kann. Um dieses zu vermeiden, wurde vorgeschlagen Wiederholungsmessungen in Abständen von  $5 \div 10$  Jahren durchzuführen.

Da vom Kirchturm verlässliche Baupläne vorlagen, (Masseverteilung und Trägheitsmomente) wurde ein mathematisches Modell aufgestellt. (FE-Modell *NASTRAN*) Das Ausgangsmodell hatte einen E-Modul von  $E = 3,3 \cdot 10^3\text{ MN/m}^2$  für das Mauerwerk. Die berechneten Eigenfrequenzen lagen etwa 20% unterhalb der gemessenen Frequenzen. Wird ein E-Modul von  $E = 4,5 \cdot 10^3\text{ MN/m}^2$  im Modell verwandt, so ergeben sich die Eigenfrequenzen, die auch bei der Messung ermittelt worden waren.

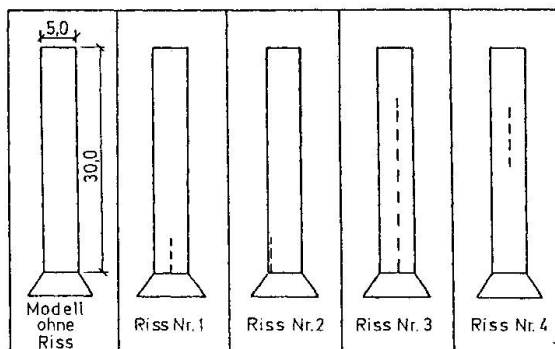
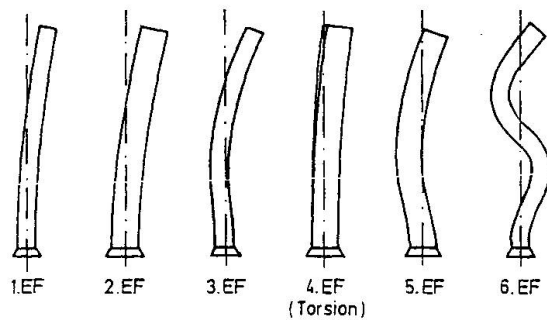


Bild 7: Darstellung der Risse

Eigenformen	Risse				
	ohne	Riß 1	Riß 2	Riß 3	Riß 4
1	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34
2	1,88	1,60	1,87	1,38	1,84
3	6,66	5,70	6,57	4,71	6,52
4	7,21	6,04	7,04	3,60	6,40
5	9,36	7,80	9,21	6,18	9,27
6	14,60	11,66	13,60	8,80	10,10

Tabelle 1: Eigenfrequenzen [Hz] in Abhängigkeit von den Vertikalrissen





**Bild 8:** Darstellung der Eigenschwingungsformen (ungerissener Zustand)

Glocke kommen und sich somit die Beanspruchung des Turmes wesentlich erhöhen, so daß der Riß vergrößert wird. Die Veränderung der Eigenfrequenzen ist beim Riß 2 gering. Es ist eine Senkung der Eigenfrequenzen in der dritten und vierten Eigenschwingungsform zu erkennen. Extreme Auswirkungen auf das Eigenschwingungsverhalten des Turmes hat der Riß 3. Es verändern sich nicht nur die Eigenfrequenzen, sondern auch die Eigenformen verschieben sich. Die dritte Eigenschwingungsform des Ausgangssystems wird zur vierten Eigenschwingungsform, da sich die Frequenz der Torsionsschwingung stark verändert. Ein Riß im oberen Bereich des Turmes hat unwesentliche Auswirkungen auf die ersten beiden Eigenfrequenzen. Veränderungen in der dritten und vierten Eigenschwingungsform treten aber deutlich hervor.

Die Untersuchungen zeigen, daß auch bei kleinen Rissen, die die Stabilität der Türme nicht beeinträchtigen, Veränderungen in den Eigenfrequenzen zu beobachten sind. Das vorgestellte Verfahren ist für Türme geeignet, um die Standsicherheit zu überwachen. Wie vorher beschrieben, können die beiden Grundbiegeeigenfrequenzen aus der Antwort der Türme bei Winderregung oder einem Impuls (Springen) meßtechnisch ohne großen Aufwand ermittelt werden. Sollen aber mindestens die ersten sechs Eigenschwingungsformen angeregt werden, so ist eine andere Erregung erforderlich. Die Türme können mittels einer statischen Last ausgelenkt werden. (Ein Seil wird zwischen dem Turm und einem Autokran gespannt) Es erfolgt dann eine plötzliche Entlastung, so daß die Türme frei ausschlagen können. Die Energie ist ausreichend, um auch höhere Eigenformen anzuregen.

## Literaturverzeichnis

1. PIEPER K., Sicherung historischer Bauten. Verlag von Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin und München 1983.
2. NATKE H.G., Einführung in Theorie und Praxis der Zeitreihen- und Modalanalyse. Verlag Vieweg, 1992.
3. GASCH R., Eignung der Schwingungsmessung zur Ermittlung der dynamischen Beanspruchung in Bauteilen. Berlin 1968
4. DIN 4150, Teil 3. Bcuth Verlag, Mai 1986

In das mathematische Modell werden vier unterschiedliche Risse eingebaut. (Bild 7) Die Veränderung der Eigenfrequenzen ist in Tabelle 1 dargestellt. Die Eigenschwingungsformen für den ungerissenen Zustand sind in Bild 8 zusammengestellt. Es ist zu erkennen, daß der Riß 1 zu einer Senkung der Eigenfrequenz in der wesentlichen Eigenschwingungsform führt. Tritt in diesem Bereich ein Vertikalriß auf, so kann es zu einer Resonanzregung mit der dritten Erregerfrequenz einer

regung mit der dritten Erregerfrequenz einer

regung mit der dritten Erregerfrequenz einer