DIN 4178 "GLOCKENTÜRME", Fassung 2005-04

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Haupt

1 Einleitung

Die frühere Norm DIN 4178 "Glockentürme, Berechnung und Ausführung" erschien im August 1978 und wurde fast genau 27 Jahre alt. Das ist für eine technische Norm aus dem Bauwesen ein sehr respektables Alter. Man kann sagen, dass sie sich im Wesentlichen bewährt hat und in ihrem Kern, nämlich der Berechnung und dem Ansatz der Kräfte aus Glockenläuten, auch heute noch dem Stand von Wissenschaft und Technik entspricht. Andererseits ist im Laufe der Zeit deutlich geworden, dass inzwischen einige wichtige Aspekte fehlen: Da seit einigen Jahrzehnten bei den kirchlichen Baumaßnahmen der Erhalt und die Sanierung bestehender Bauwerke gegenüber dem Neubau von Kirchen zunehmend in den Vordergrund rückt, war im Hinblick auf die Untersuchung bestehender Türme – und hier insbesondere historischer Bauwerke – der Bedarf zur Erweiterung der Norm entstanden. Eng damit zusammen hängt das Gebiet der Schwingungsmessung und -messtechnik, das in der damaligen Norm überhaupt nicht behandelt wird.

Daher wurde die DIN 4178 „Glockentürme“ weitgehend überarbeitet und ist in der neuen Fassung seit April 2005 gültig. Im Folgenden werden neben einigen wesentlichen Punkten, die aus der alten Norm beibehalten wurden, die wichtigsten Neuerungen und Ergänzungen kurz beschrieben und kommentiert.

2 Übersicht

2.1 Gliederung

Bei der Neufassung ist die Norm im Umfang stark angewachsen. Aus seinerzeit 11 Seiten sind jetzt 33 Seiten geworden. Dies hat im Wesentlichen zwei Gründe: Zunächst einmal konnten viele Mitarbeiter im Ausschuss auf Fälle von Fehlinterpretationen und Missverständnissen der bisherigen Norm verweisen. Um solcher falschen Anwendung vorzubeugen, bestand somit die Notwendigkeit, den Text präziser, d.h. im Endeffekt meistens ausführlicher zu formulieren. Allerdings muss man sich darüber klar sein, dass eine Norm niemals so eindeutig verfasst werden kann, dass sie nicht doch irgendwann fehlinterpretiert wird.

Entscheidend für den jetzigen Umfang der Norm ist jedoch die Einfügung von mehreren neuen Kapiteln. Aus dem folgenden Vergleich der Gliederungen gehen die hinzugefügten Abschnitte Nr. 7 bis Nr. 9, die für sich fast ein Drittel des Umfanges (9,5 Seiten) ausmachen, hervor.

Gliederung

1978	2005
1. Geltungsbereich und Zweck	1. Anwendungsbereich
2. Mitgeltende Normen Glockentabelle	2. Normative Verweise
3. Begriffe	3. Begriffe
4. Bautechnische Unterlagen	4. Einwirkungen, Lastannahmen
5. Baustoffe	5. Berechnungen
6. Berechnungsgrundlagen (6)	6. Auslegung von Neubauten (10,5)
	7. Messungen
	8. Beurteilung und Sanierung bestehender Bauten
	9. Glockentragwerk (9,5)
	A1 Glockentabelle
7. Hinweise zur konstruktiven Gestaltung	B Bautechnik
	Literaturhinweise

Bild 1: Vergleich der Gliederungen, frühere/jetzige Fassung

Auf folgende Punkte ist im Einzelnen hinzuweisen:

> Der Komplex der Berechnungen ist in der Weise eingeteilt, dass die Einwirkungen, Lastannahmen und Berechnungsverfahren für sich behandelt werden. Daher können diese Abschnitte sowohl bei Neubauten (Abschnitt 6) als auch bei bestehenden Bauwerken (Abschnitt 8) unmittelbar Anwendung finden.

> Die Besonderheiten bei der Beurteilung und Sanierung insbesondere historischer Bauwerke sind in einem eigenen Kapitel 8 zusammengefasst.

> Davor befindet sich logischerweise das Kapitel, das sich mit den Messungen befasst, denn diese sind besonders bei historischen Glockentürmen sehr häufig die einzige Möglichkeit, deren Schwingungsverhalten zutreffend zu erfassen. Die Messtechnik und die Auswerteverfahren haben in den letzten Jahrzehnten eine solch enorme Entwicklung erlebt, dass normative Aussagen hierzu unbedingt erforderlich sind.

> Die Glockentabelle befindet sich im Anhang, weil sie nicht Gegenstand der Normung ist.

> Das Glockentragwerk wird in einem eigenen Kapitel 9 behandelt. Da z.B. die Ausbildung des Jochs nicht unwesentlich die dynamischen Horizontalkräfte aus dem Glockenläuten beeinflusst, muss dieser Fragenkomplex notwendigerweise Teil der Norm sein.

> Abschließend werden Literaturhinweise gegeben. Da es keine zusammenfassenden Darstellungen oder Handbücher über die spezielle Problematik der Schwingungen von Glockentür-

men gibt – sieht man von den beiden längst vergriffenen Bändchen von F.P. Müller und von J. Kanya aus dem Jahre 1968 ab -, wurde es als notwendig erachtet, einige wichtige Veröffentlichungen zu verschiedenen Problemkreisen anzuführen. Dort kann man weiterführende Literatur finden. Hilfreich sind auch die beiden Bände „Glocken in Geschichte und Gegenwart“.

2.2 Text

In der jetzigen Fassung des Textes ist das Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte berücksichtigt.

Man hat angestrebt, im Text einen vernünftigen Mittelweg zu finden zwischen einerseits der reinen Vorschrift, in der sich nur Anforderungen und Bestimmungen finden, und auf der anderen Seite einer eher beschreibenden Darstellung der Probleme und ihrer Lösung, die eigentlich nicht in eine Norm gehört. Da aber, wie erwähnt, die Literatur verstreut und nicht immer leicht zugänglich ist, wurden auch Hinweise und Erklärungen in den Text aufgenommen in einem Umfang, der das Verständnis für die Zusammenhänge erleichtert, ohne dass die Norm in zu starkem Maße Lehrbuchcharakter erhielt. Der wenig erfahrene Ingenieur wird aber nicht umhin kommen, sich anhand der angeführten Literatur weiter in das Gebiet einzuarbeiten.

Ein Gesichtpunkt, der in der früheren Norm völlig fehlte, der aber in der Fassung 2005-04 an verschiedenen Stellen angesprochen wird, ist die Musikalität des Geläutes. Auch wenn die DIN 4178 eine Baunorm ist, und diesbezügliche Bestimmungen und Anforderungen selbstverständlich im Vordergrund stehen, sollte nach Ansicht der Verfasser die Frage nach einer harmonischen Klangentfaltung des Geläutes nicht außer Acht gelassen werden. Wenn durch Maßnahmen an den Glocken deren Schwingfrequenzen und Horizontalkräfte so verändert werden, dass zwar der Turm die dynamischen Beanspruchungen aufzunehmen vermag, das Geläut aber flach und schräg klingt, ist die Sanierung des Gesamtsystems „Glockenturm“ im Grunde genommen nicht richtig gelungen.

3 Berechnungen

3.1 Einwirkungen, Lastannahmen

In diesem Abschnitt sind im Vergleich zur früheren Norm nur wenige wesentlichen Änderungen eingetreten, denn der Stand der Technik in Bezug auf die Theorie der dynamischen Kräfte aus der Bewegung der Glocken hat sich seit der erwähnten Veröffentlichung von F.P. Müller nicht geändert. Die Berechnung der Horizontal- bzw. Vertikalkräfte $H_n(t)$ und $V_n(t)$ erfolgt nach den bekannten Beziehungen:

$$H_n(t) = \sum_i H_{ni}(t) = c_n \cdot G_n \cdot \sum_i \beta_{ni}^h \cdot \sin(\Omega_{ni} \cdot t), \qquad i = 1, 3, 5...$$

$$V_n(t) = \sum_i V_{ni}(t) = c_n \cdot G_n \cdot \sum_i \beta_{ni}^v \cdot \cos(\Omega_{ni} \cdot t), \qquad i = 2, 4, 6...$$

Dabei ist nach Norm:

G_n das Gewicht der *n*-ten Glocke einschließlich Joch;

c_n der Formbeiwert der *n*-ten Glocke einschließlich Joch, siehe Tabelle A.1 der Norm;

β_{ni}^h die vom Läutewinkel α abhängige, bezogene Amplitude der horizontalen Erregerkraft (siehe Bild 2) der *n*-ten Glocke in der *i*-ten Teilschwingung;

β_{ni}^v die vom Läutewinkel α abhängige, bezogene Amplitude der vertikalen Erregerkraft der *n*-ten Glocke in der *i*-ten Teilschwingung;

Ω_{ni} die Erreger-Kreisfrequenz der *n*-ten Glocke in der *i*-ten Teilschwingung ($= i \cdot \pi \cdot A_n / 60$) .

Die bezogenen Amplituden sind wie bisher den Diagrammen in der Norm zu entnehmen, z.B. für die Horizontalkräfte dem Diagramm in Bild 2. Der zeitliche Verlauf der Horizontalkräfte in den ersten drei ungeraden Teilschwingungen ist in Bild 3 dargestellt.

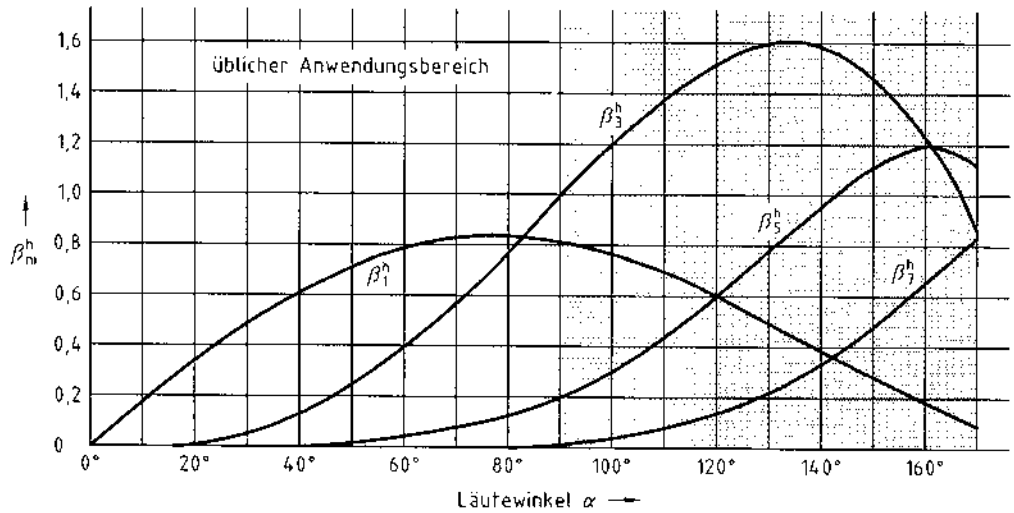

Bild 2: Bezogene Amplituden für Horizontalkräfte nach DIN 4178

Neu aufgenommen in die Norm 2005-04 sind jedoch Beziehungen für das Zusammenwirken von mehreren Glocken. Für die Nachweise der Standsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit werden die dynamischen Auswirkungen R_n der Glocken (Anzahl = N) absolut addiert gemäß:

$$R_{ges} = \sum_{n=1}^{N} |R_n|$$

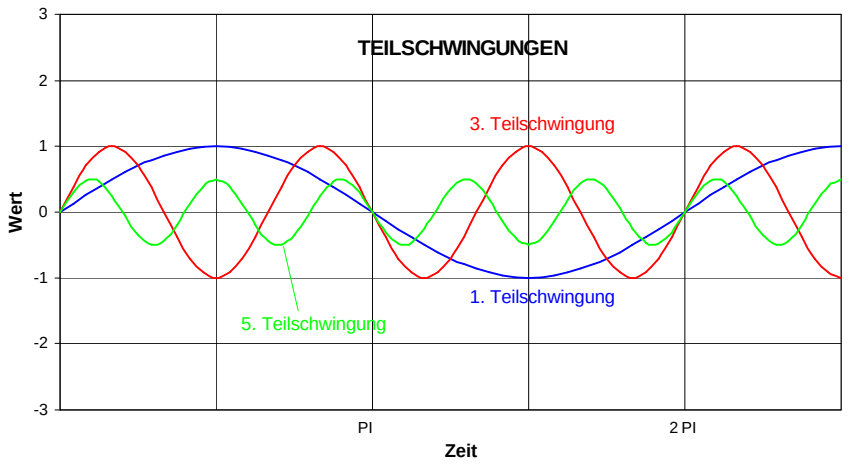

Bild 3:
Zeitverlauf der Horizontalkräfte

Die Addition in dieser Form ist sinnvoll, denn der absolute Maximalwert der Einwirkungen, der sich aus der gleichsinnigen Addition der Einzelbeiträge der Glocken ergibt, ist ein Lastfall, der zwar nicht häufig, aber immer wieder einmal auftritt bzw. auftreten kann. Er muss daher nachgewiesen werden. Für den Ermüdungsnachweis kann dagegen mit der Beziehung:

$$R_{ges} = \sum_{n=1}^{2} |R_n| + \left(\sum_{n=3}^{N} R_n^2 \right)^{1/2}$$

gerechnet werden. Hier werden die Beiträge ab der 4. Glocke nur in der geometrischen Addition berücksichtigt, weil, wie erwähnt, die absolute Summe aller Einzeleinwirkungen bei einem Geläut mit mehreren Glocken nur selten auftritt, und die Beiträge der höheren Glocken damit nicht ermüdungsrelevant sind.

Seit Anfang der 80-er Jahre haben sich die Möglichkeiten der statischen und dynamischen Berechnung von Tragkonstruktionen stark verbessert. Nicht einfache Strukturen werden inzwischen fast immer mit der FE-Methode behandelt. Damit hat sich auch die echte dynamische Berechnung von Konstruktionen stark vereinfacht, denn viele gängige Programmsysteme bieten neben dem Programmteil für die statische Berechnung auch die dynamische Variante. Eine Alternative besteht unter bestimmten Voraussetzungen, die in den meisten Fällen gegeben sind, in der Verwendung des Ersatzlastverfahrens, das sich auch für eine einfache Überprüfung von dynamischen Rechnungen anbietet. Die Berechnungsformel für die horizontale Ersatzlast der n-ten Glocke wird in Abschnitt 5 der Norm angegeben:

$$H_n^{ers} = 1{,}1 \cdot c_n \cdot G_n \cdot \max \left| \sum_{i=1}^{5} \beta_{ni}^{h} \cdot DLF_{ni} \cdot \mathrm{sign}\left(1 - \frac{\Omega_{ni}}{\omega_{01}}\right) \cdot \sin\left(\Omega_{ni} \cdot t\right) \right|$$

$$DLF_{ni} = \left[\left(1 - \left(\frac{\Omega_{ni}}{\omega_{01}} \right)^2 \right)^2 + \left(2\vartheta_1 \cdot \frac{\Omega_{ni}}{\omega_{01}} \right)^2 \right]^{-1/2}$$

Dabei ist i = 1, 3, 5 und $\omega_{01} = 2\pi \cdot f_{01}$, die Kreisfrequenz der tiefsten, ungedämpften Eigenschwingung des Turms, die bei der üblicherweise geringen Dämpfung näherungsweise gleich der gedämpften Eigenkreisfrequenz ω_{e1} ist. Der dynamische Lastfaktor DLF entspricht der Resonanzfunktion für eine konstante Anregungskraft. Die 10 %-ige Erhöhung der Kraft dient zur Abdeckung von Ungenauigkeiten gegenüber der exakten Berechnung. Mit dieser Formel wird eine statische Ersatzlast berechnet, unter welcher der Turm dieselbe Verformung bzw. das Mauerwerk dieselbe Beanspruchung erfährt wie unter den tatsächlichen dynamischen Kräften aus Glockenläuten.

Wenn bei einem Kirchturm die 1. Teilschwingfrequenz einer Glocke f_{n1} unterhalb der Eigenschwingfrequenz f_{01} liegt, die 3. Teilschwingfrequenz f_{n3} aber über dieser Eigenfrequenz − wie das häufig der Fall ist, siehe Bild 4 −, so bewegt sich der Turm etwa gleichphasig mit der 1. Glockenteilschwingung, aber gegenphasig zur 3. Teilschwingung. Bei der üblichen geringen Dämpfung von Glockentürmen (1-3 %) ist das Phänomen ausgeprägt. Das bedeutet: Bei einer Anregungsfrequenz $f_{n3} > f_{01}$ ist die Reaktionsschwingung des Turms in Gegenphase zur anregenden Kraft. Damit die Ersatzlast diesen Zusammenhang widerspiegelt, muss die 3. Teilschwingkraft der Glocke mit (-1) multipliziert werden. Wie aus Bild 5 zu ersehen ist, ergibt sich bei der gegenphasigen Addition eine größere Maximalkraft als für den Fall der gleichphasigen Addition, die bei einer Hochabstimmung des Turms gegenüber der 3. Teilschwingfrequenz vorzunehmen ist. Bei der exakten dynamischen Berechnung erhält man automatisch das richtige Ergebnis, beim Ersatzlastverfahren muss jedoch dieser Zusammenhang explizit mit der sign-Funktion berücksichtigt werden.

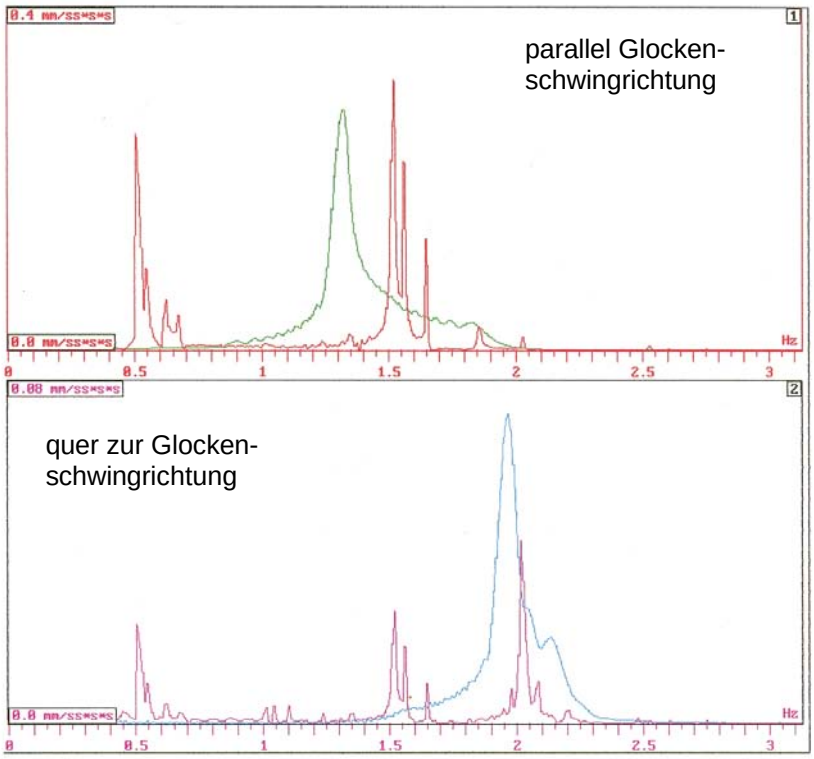

Bild 4: Frequenzspektren bei vollem Geläut und aus Eigenfrequenzbestimmung (Mühlfeldkirche, Bad Tölz)

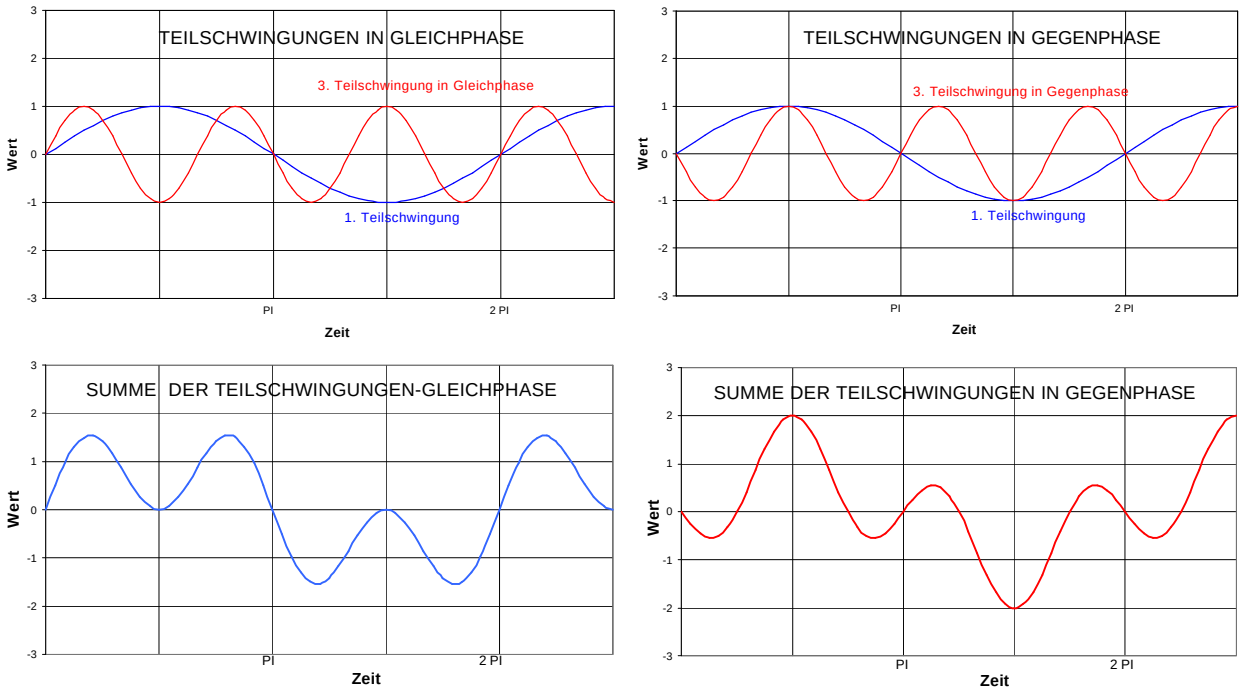

Bild 5: Gleichphasige und gegenphasige Addition der 1. und 3. Teilschwingung

3.2 Berechnungen, Auslegung von Neubauten

Zur Berücksichtigung des elastischen Verhaltens des Baugrundes bei der Turmschwingung sind Ersatzfedern zur Simulierung der dynamischen Bodenreaktion auf der Grundlage der Halbraumtheorie eingeführt worden. Diese Ersatzgrößen entsprechen dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik. In der Norm wird als wichtigste nur die Ersatz-Drehfeder für die Kippschwingung eines Blockfundamentes aufgeführt. Wegen der Formeln für die Federgrößen in anderen Freiheitsgraden wird auf die Literatur verwiesen. Genau genommen sind die Ersatzfedern frequenzabhängig, aber für die Zwecke der Berechnung von Kirchturmschwingungen kann der Frequenzeinfluss vernachlässigt werden.

Erfahrungsgemäß gehen etwa 20 – 40 % der Horizontalauslenkung eines Turms in Höhe der Glockenstube auf die Kippschwingung des Fundamentes, d.h. auf die Starrkörperbewegung um eine horizontale Achse in Höhe der Gründungssohle zurück. Daher ist bei der dynamischen Berechnung der Turmbauwerke in Zukunft die Bodenreaktion immer zu berücksichtigen.

In der Fassung 2005-04 der Norm wird bei der Auslegung von Neubauten eingehend auf die Nachweise zur Ermüdungsfestigkeit eingegangen und auf die einschlägigen Vorschriften für die verschiedenen Baustoffe verwiesen.

4 Messungen

4.1 Messtechnik

Messtechnischen Untersuchungen kommt insbesondere bei historischen Kirchtürmen, für welche keine belastbaren Bauunterlagen existieren, eine große Bedeutung zu, denn für diese Bauwerke stellen sie i.A. den Primärzugang, wenn nicht überhaupt den einzigen Zugang dar. Auch bei Neubauten oder nach größeren Umbauten an bestehenden Türmen sollten Messungen zur Überprüfung des Resonanzabstandes erfolgen. Dieses Kapitel ist völlig neu in die Norm aufgenommen worden

Auf dem Gebiet der Schwingungsmessungen hat es in den letzten Dekaden eine rapide Entwicklung gegeben, sowohl was die Messtechnik, als auch was die Auswertemöglichkeiten betrifft. Für die Aufbereitung der elektronisch gespeicherten Rohdaten stehen sehr leistungsfähige Signalanalysatoren zur Verfügung, die jedoch in zunehmendem Maße mit Programmsystemen auf PC in Konkurrenz stehen. Diese sind hinsichtlich der Verarbeitungsgeschwindigkeit der Messsignale den Analysatoren inzwischen mindestens ebenbürtig und bezüglich der Flexibilität i.A. überlegen.

Es ist heute üblich, bei der Messung und Auswertung von Kirchturmschwingungen die genannten elektronischen Hilfsmittel einzusetzen. Die Norm lässt jedoch bewusst auch andere Möglichkeiten zu. So können z.B. auch Registrierungen auf Papier verwendet werden, wenn die Maximalwerte der Schwingungen und die Frequenzen genau genug bestimmbar sind. Allerdings ist mit diesem Verfahren in der Regel keine detaillierte Betrachtung des Einflusses von einzelnen Teilschwingungen möglich. Hierfür sind elektronische Geräte mit der Möglichkeit der Signalreproduzierung und Frequenzanalyse unverzichtbar.

Schwingungsmessungen an Kirchtürmen sind schwierig und erfordern eine genaue Kenntnis des Messsystems und große Erfahrung. Die Schwierigkeit liegt in der genauen Erfassung von Schwingungen mit sehr tiefen Frequenzen bis herab zu etwa 0,3 Hz, was der 1. Teilschwingfrequenz großer Glocken entspricht. Gängige Schwingungsmessgeräte auf der Basis von Schwinggeschwindigkeitsaufnehmern, die für Erschütterungsmessungen im Bauwesen ausgelegt sind, zeigen unterhalb von 1 Hz eine starke Abnahme der Empfindlichkeit, die bei der Auswertung der Messungen unbedingt berücksichtigt werden muss. Andernfalls wird die 1. Teilschwingung unzulässig stark unterdrückt. In diesem tiefen Frequenzbereich ist die Kalibrierung der Schwingungssensoren allerdings schwierig und wird von den Geräteherstellern i.A. nicht mitgeliefert. Einen Ausweg bietet die Verwendung sehr empfindlicher Beschleunigungsaufnehmer oder spezieller Kompensationsaufnehmer, die den tiefen Frequenzbereich problemlos abdecken.

Die Frequenzen der 1. und der 3. harmonischen Teilschwingungen stehen definitionsgemäß in dem festen Verhältnis von 1:3 zueinander. Übliche Geräte zur Messung der Schwinggeschwindigkeit zeigen in dem sehr tiefen Frequenzbereich relativ große Änderungen der Phasenlage in Abhängigkeit von der Frequenz, so dass die 1. und die 3. Teilschwingung bei der Messung immer

phasenverschoben gegeneinander erfasst werden. Dies führt bei Hochabstimmung des Turms zu einer systematischen Überschätzung des Maximalwertes der Gesamtschwingung, welche im ungünstigsten Fall bis zu 30 % betragen kann. Das Phänomen ist theoretisch bekannt, lässt sich praktisch aber nicht vermeiden.

Das elektronische Messsystem muss in der Lage sein, Schwingungssignale von mehr als 100 s Dauer zu registrieren und zu reproduzieren, damit die Frequenz mit einer Auflösung von 0,01 Hz ermittelt werden kann. Diese Genauigkeit wird als notwendig erachtet für eine ausreichend genaue Bestimmung des Resonanzabstandes.

4.2 Durchführung der Messungen

Der Umfang der Messung hängt von der Fragestellung und den für die weiteren Untersuchungen erforderlichen Informationen ab. Er kann die Erfassung folgender Größen beinhalten:

- Maximale Horizontalauslenkung des Turms in der höchsten Ebene des Mauerwerks beim Läuten der Glocken einzeln und zusammen sowie bei künstlicher Anregung in Glockenschwingrichtung und rechtwinklig dazu,
- die Biegeverformung des Turms und die Kippschwingung des Fundamentes bei diesen Anregungen,
- die Glockenschwingfrequenzen und die Turmeigenfrequenzen in Glockenschwingrichtung und rechtwinklig dazu,
- die Läutewinkel,
- bei Doppelturmanlagen auch die Schwingungen in dem Turm, in dem sich nicht die läutende Glocke befindet, und die Ermittlung der Frequenzen der vier Eigenformen,
- die dynamische Änderung von Rissbreiten.

Die Kernaussage, die den Baudynamiker in erster Linie interessiert, ist nach wie vor die Resonanzkurve, aus der die Eigenfrequenz und der Dämpfungsgrad hervorgehen. Die Dämpfung wird zweckmäßigerweise aus einer Ausschwingkurve über das logarithmische Dekrement ermittelt, siehe Bild 6.

Die Zahl und Anordnung der Schwingungsaufnehmer ist ebenfalls eine Funktion der Fragestellung. Um alle wesentliche Schwingungsgrößen zu ermitteln, sollten die Aufnehmer in folgender Weise angeordnet werden:

- In der höchsten zugänglichen Messebene − möglichst auf der Mauerkrone − je zwei Aufnehmer an den Außenwänden mit horizontaler Messrichtung parallel zur Glockenschwingrichtung und rechtwinklig dazu,
- über die Turmhöhe verteilt zwei zusätzliche Aufnehmer mit Messrichtung horizontal in Glockenschwingrichtung,

> am Fundament auf beiden Seiten außen am Turm in der Ebene der Glockenschwingrichtung je ein Aufnehmer mit Schwingrichtung vertikal.

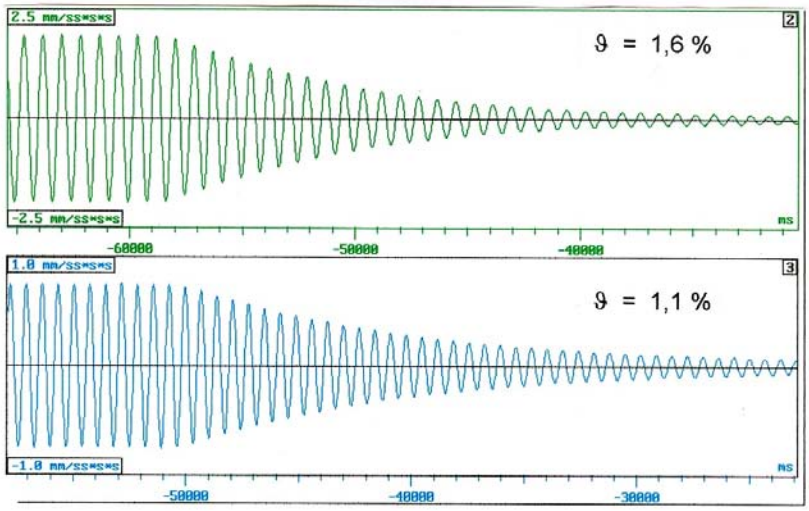

Bild 6:
Ausschwingkurven bei typischer Größenordnung des Dämpfungsgrades; (Mariä Himmelfahrt, Bad Aibling)

Es ist nicht notwendig, alle Positionen gleichzeitig zu bestücken, sie können auch nacheinander abgefragt werden. Bei der Wahl der Messpunkte ist darauf zu achten, dass die Aufnehmer auf jeden Fall die Schwingungen des Mauerwerks erfassen. Holzbalken der Dachkonstruktion oder

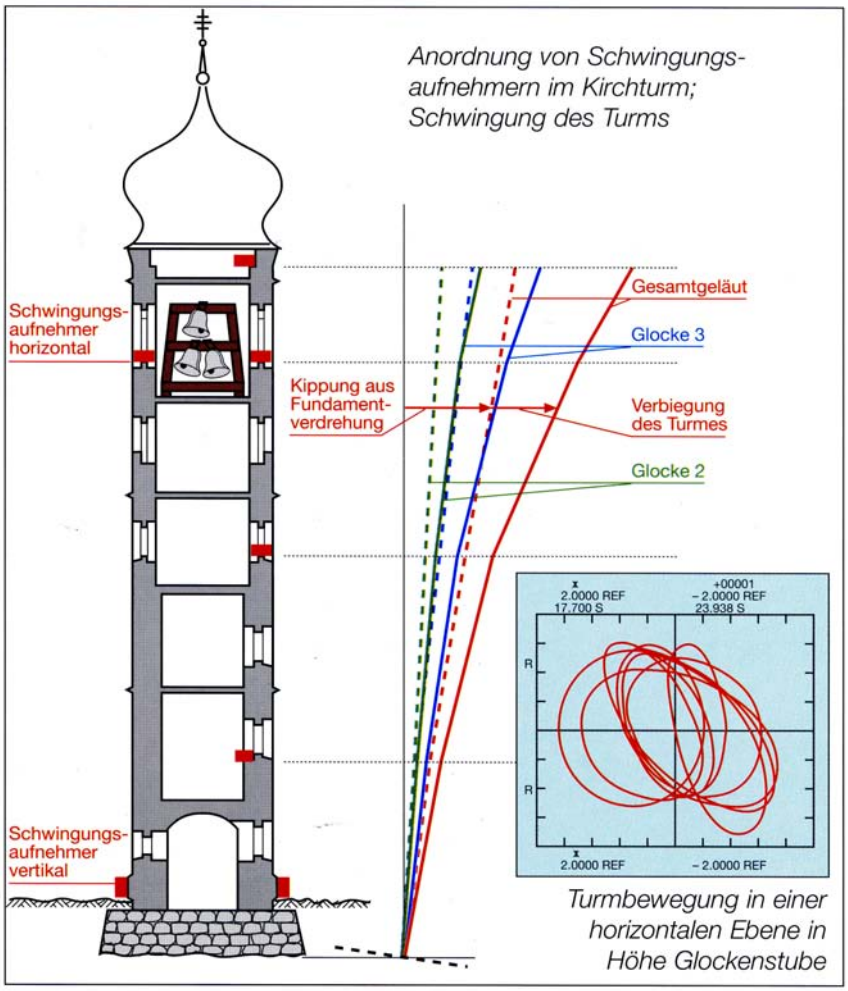

Bild 7:
Anordnung der Schwingungsaufnehmer und Messergebnisse

von Treppen oder Galerien sind wenn irgend möglich zu meiden. Die beschriebene Aufnehmeranordnung ist in Bild 7 exemplarisch dargestellt. Die zu erlangende Information bezieht sich auf die Auswirkung der Kippschwingung des Fundamentes, der Biegeverformung des Turmschaftes und das Zusammenspiel der Schwingungen in den zwei rechtwinklig aufeinander stehenden Richtungen. Zusätzlich werden Angaben über die Torsionsschwingung des Turms um seine Hochachse erhalten.

Die künstliche Schwingungsanregung des Turms auf niedrigem Kraftniveau (Stoß, Wind, Mikroseismik) soll in Zukunft der reinen Orientierungsmessung vorbehalten bleiben. Bei Untersuchungen, deren Ergebnisse zu einer Nachbemessung des Turms und/oder ggf. zu Maßnahmen am Geläut oder an der Bausubstanz führen können, sollte ein künstlich angeregtes Schwingungsniveau angestrebt werden, das dem durch Glockenläuten verursachten in der Größenordnung vergleichbar ist. Zumindest soll eine Extrapolation möglich sein. Die Eigenfrequenz von Türmen nimmt aufgrund des nichtlinearen Stoffverhaltens zwischen einem extrem kleinen Schwingungsniveau (Wind) und dem tatsächlich beim Glockenläuten vorhandenen Niveau i.A. deutlich ab. Der relative Betrag der Abnahme kann durchaus in der Größenordnung von 10% und mehr liegen, siehe Beispiel in Bild 8. Dort sind die einzelnen Messwerte der Eigenfrequenz bei künstlicher Anregung mit unterschiedlichen Kräften durch eine gestrichelte Trendlinie verbunden. Aus der Darstellung ist die Position der Turmschwingung beim Glockenläuten nach Auslenkung und Frequenz relativ zu den Eigenfrequenzlinien zu entnehmen. Solche präzise Eigenfrequenzbestimmung lässt sich nur mit Hilfe eines Unwucht-Schwingungsgenerators bei stationärer Anregung in der jeweiligen Eigenfrequenz über mindestens zwei Minuten erreichen.

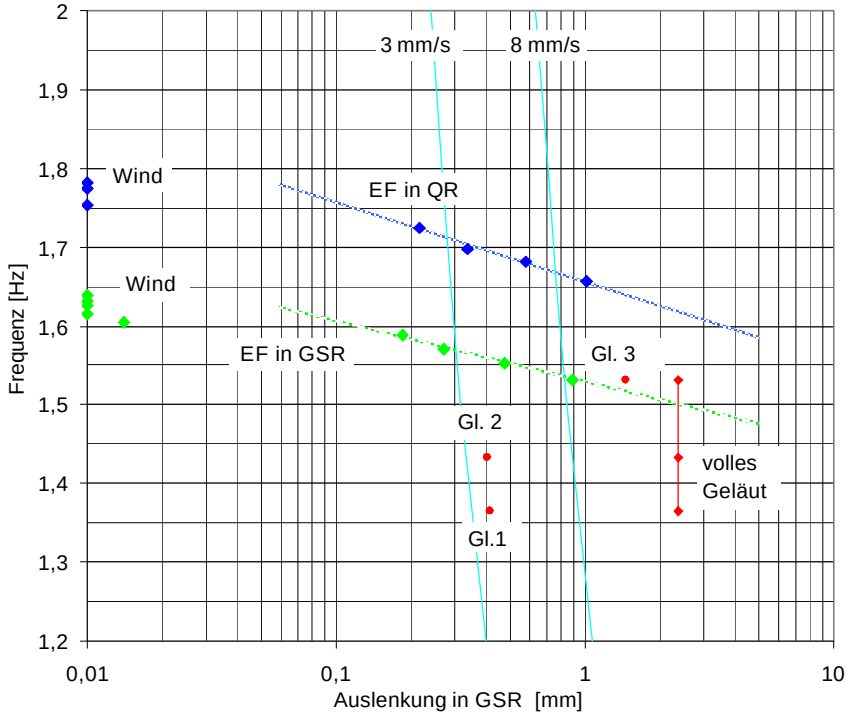

Bild 8:
Abhängigkeit der Eigenfrequenz von der Schwingungsauslenkung in der obersten Messebene; Auslenkung beim Glockenläuten (St. Andreas, Elbach)

GSR = Glockenschwingrichtung; QR = Richtung quer zur GSR

5 Bestehende Bauten

5.1 Beurteilungskriterien

Das einfachste Beurteilungskriterium für die Schwingungsbeanspruchung von Kirchtürmen ist nach wie vor die Frequenzbedingung: Der Resonanzabstand f_{n3} zur Turmeigenfrequenz f_e soll größer 10% sein. Bei Einhaltung dieser Bedingung bleiben i.A. die dynamischen Beanspruchungen unterhalb kritischer Werte. Die Anwendung des Kriteriums setzt allerdings eine zuverlässige Eigenfrequenzbestimmung (siehe vorhergehenden Abschnitt) voraus. Es ist darauf zu achten, dass bei der Berechnung von r_{an} die Turm-Eigenfrequenz, die sich bei vollem Geläut einstellt, zu Grunde gelegt wird, denn dies ist der maßgebende Lastfall.

$$r_{an} = \left[\frac{f_{n3}}{f_e} - 1\right] \cdot 100; \qquad \left|r_{an}\right| \geq 10\ \%$$

Als wesentliche Neuerung ist eine Tabelle von Orientierungswerten der Schwinggeschwindigkeit für unterschiedliche Bauarten von Glockentürmen in die Fassung 2005-04 der Norm aufgenommen worden, siehe Bild 9. Sie soll dem Ingenieur einen ersten und groben Maßstab – eine Orientierung – für die Beurteilung der schwingungstechnischen Situation an die Hand geben. Zweck der Tabelle ist auch, übertriebenen und unnötigen Aufwand bei den Untersuchungen zu vermeiden. In Bild 8 sind zwei Orientierungswerte eingetragen.

Werden die Orientierungswerte eingehalten, so sind nach bisheriger Erfahrung keine weiteren Untersuchungen messtechnischer oder rechnerischer Art erforderlich. Bei einer Überschreitung der Werte sind jedoch nicht automatisch Schäden zu erwarten. Es sollen dann lediglich weitere Überlegungen, u.U. auch weitere Untersuchungen vorgenommen werden. Solche Überlegungen können im einfachsten Fall in der Anwendung von Erfahrungen bestehen, d.h. im Vergleich des betreffenden Bauwerkes mit ähnlichen Türmen, an denen ausführlichere Untersuchungen vorgenommen wurden. Auch Plausibilitätsüberlegungen oder einfache rechnerische Abschätzungen können im Einzelfall bereits ausreichen, um die Unschädlichkeit der Schwingungen nachzuweisen. Erst bei stärkerer Überschreitung ist eine Nachbemessung empfehlenswert.

Zeile	Bauart	Orientierungswert v 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

Bild 9: Orientierungswerte der Schwinggeschwindigkeit bei Glockentürmen

Auf keinen Fall sind die Orientierungswerte so zu verstehen, dass nur bei ihrer Einhaltung die Kirchturmschwingungen unbedenklich sind. Sie stellen vielmehr eine untere Grenze dar, ab welcher entsprechend dem Maße ihrer Überschreitung Überlegungen zur dynamischen Beanspruchung des Bauwerks und ggf. weitere Untersuchungen anzustellen sind.

Die Orientierungswerte der Tabelle in Bild 9 sind Erfahrungswerte, die an Glockentürmen gewonnen wurden. Auch wenn diese Zahlen wertmäßig mit den an verschiedenen Stellen in der DIN 4150-3 "Erschütterungen im Bauwesen; Einwirkungen auf bauliche Anlagen" genannten Anhaltswerten übereinstimmen, besteht doch keinerlei Zusammenhang zwischen den beiden Typen von Werten. Die Anhaltswerte der DIN 4150 beruhen auf Erfahrungen mit wesentlich höherfrequenteren Schwingungen aus Sprengungen, Verkehr oder Maschinenbetrieb, nicht aber mit tieffrequenten Turmschwingungen. Eine logische Verbindung zwischen den Orientierungswerten der DIN 4178 und den Anhaltswerten der DIN 4150 besteht somit nicht.

Nach wie vor stellt die regelrechte Nachbemessung die sicherste Beurteilungsgrundlage dar, wobei jedoch bei historischen Bauwerken der richtigen Einschätzung der Verformungseigenschaften und der Festigkeit des Mauerwerks entscheidende Bedeutung zukommt.

5.2 Historische Bauwerke

In einem besonderen Kapitel wird auf die speziellen Probleme bei historischen Bauwerken eingegangen. Dieser eher beschreibende Text stellt eine gute und nach Ansicht der Verfasser notwendige Zusammenstellung der einzelnen Untersuchungsschritte bei der Feststellung des Zustandes der Bausubstanz eines alten Gebäudes dar. Leider wird diesbezüglich häufig nicht die Sorgfalt und der Aufwand, die erforderlich wären, von dem untersuchenden Ingenieur aufgebracht bzw. vom Bauherrn zugestanden. Es ist zu wünschen, dass durch die Darstellung in der Norm diese Untersuchungen in Zukunft mehr Gewicht erhalten.

5.3 Minderungsmaßnahmen

Zur Verminderung der dynamischen Horizontalkräfte aus Glockenläuten stehen verschiedene Maßnahmen am Geläut zur Verfügung:

- Änderung des Läutewinkels,
- Gegengewichte,
- Kröpfung des Jochs,
- Gegenpendelanlagen,
- Drehung der Läuterichtung.

In der Regel haben die verschiedenen Maßnahmen außer der angestrebten auch noch andere Auswirkungen zur Folge, die bei der Planung zu beachten sind. So wird z.B. durch die Verminderung des Läutewinkels die Horizontalkraft verringert (siehe Bild 2), aber gleichzeitig die Frequenz heraufgesetzt. Insgesamt sind den Maßnahmen am Geläut relativ enge Grenzen gesetzt, wenn man nicht eine musikalische Verstimmung des Geläutes in Kauf nehmen will.

Bild 10:
Nachträglich angebrachtes Gegengewicht auf normempfohlenem Joch
(St. Arsatius, Ilmmünster

Bild 11:
Gegenpendelanlage
(St. Arsatius, Ilmmünster)

Als Ertüchtigungsmaßnahmen am Bauwerk stehen alle Möglichkeiten der modernen Bautechnik zur Verfügung. Im Anhang B "Bautechnik" der Norm werden zur speziellen Problematik der Glockentürme einige nützliche Hinweise gegeben.

6 Glockentragwerk

Da das Glockentragwerk, das aus dem Joch, dem eigentlichen Glockenstuhl und ggf. einer Unterkonstruktion besteht, als integrierter Bestandteil der gesamten Konstruktion anzusehen ist, wird ihm in der jetzigen Fassung der Norm ein eigenes Kapitel gewidmet. Aus glockentechnischen, ästhetischen und musikalischen Gründen bevorzugt man heute Joche und Glockenstühle aus Holz gegenüber den früher häufig ausgeführten Tragwerken aus Stahl. An die Konstruktion sind hinsichtlich der Passgenauigkeit, der Holzgüte und der Verbindungsmittel hohe Anforderungen zu stellen. Insbesondere ist das Schwinden des Holzes bei Austrocknung zu beachten.

Bei den Holzjochen wird heute als Idealform ein gerades Joch mit einem Kopfholz angestrebt, bei dem das Maßverhältnis Jochbalken/Kopfholz 2:3 beiträgt, siehe Bild 12 (auch Bild 10). Die Glockentabelle einschließlich der Formbeiwerte c bezieht sich auf Glocken, die an solchen Jochen

aufgehängt sind. Es werden jedoch auch Angaben gemacht, die die Anwendung der Tabelle auf Glocken an schlanken Jochen, d.h. an Jochen ohne nennenswertes Obergewicht, erlauben.

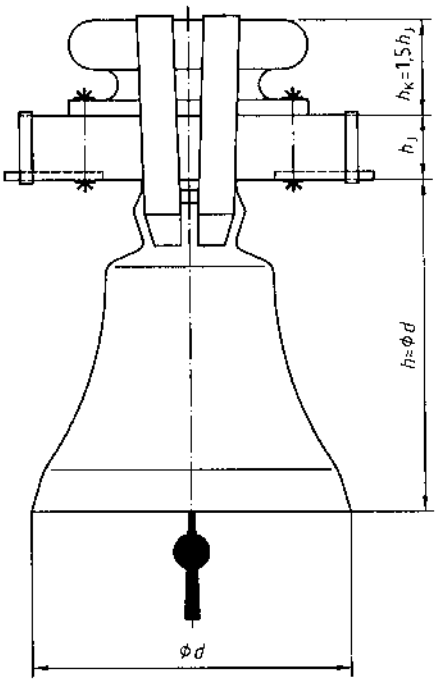

Bild 12: Prinzipskizze Jochausführung

7 Schluss

Vorstehend sind einige wesentlichen Punkte und Zusammenhänge, die bei der Überarbeitung der DIN 4178 "Glockentürme, Berechnung und Ausführung" von 1978 in die neue Fassung 2005-04 neu aufgenommen bzw. übernommen worden sind, in einem kurzen Abriss beschrieben. Die Auflistung ist nicht vollzählig, und es können nicht alle Gesichtspunkte dargestellt werden. Es ist zu wünschen, dass die neue Fassung „Glockentürme“ sich ebenso bewähren wird, wie es die alte getan hat.

Literatur

DIN 4178 "Glockentürme, Berechnung und Ausführung" August 1978.

DIN 4178 „Glockentürme“ April 2005.

DIN 4150-3 "Erschütterungen im Bauwesen; Einwirkungen auf bauliche Anlagen", Febr. 1999.

Müller, F.P.: Berechnung und Konstruktion von Glockentürmen. Verlag von Wilhelm Ernst u. Sohn, Berlin/München 1968.

Kanya, J.: Glockentürme; Entwurf, Konstruktion, Berechnung. Bauverlag GmbH, Wiesbaden/ Berlin 1968.

Glocken in Geschichte und Gegenwart, Bände 1 und 2. Hrsg. Beratungsausschuss für das Deutsche Glockenwesen, Badenia Verlag Karlsruhe, 1986/1997