Einfluss der Glockenzier auf den Klang von Kirchenglocken

Dipl.-Ing.(FH) Jochen Bauer
Dipl.-Ing.(FH) Lothar Schmidt
Prof. Dr. Benno Kotterba
md- pro GmbH, Karlsruhe

1 Einleitung

Im Frühjahr 2003 meldeten die Medien, dass bei der Prüfung der neuen Glocken der Frauenkirche Dresden ein „phänomenaler Missklang“ festgestellt worden sei. Dieser Missklang mache sich vor allem im Bereich des Prinzipaltons Prime bemerkbar. Es käme hier zu einem unangenehmen Doppelton. Als Ursache wurden die aufwändigen Verzierungen genannt, die auf die Außenhaut der Glocke aufgebracht worden waren [MZ2003].

2 Ziele der Untersuchung

Mit Hilfe von Messungen und Schallanalysen werden die Klangeigenschaften identifiziert, die zu dem störenden Missklang führen.

Die Schwingungssimulation nach der Finite Elemente Methode ermittelt die Eigenfrequenzen und Eigenformen aus einem dreidimensionalen Computermodell der Glocke. Es wird nachgewiesen, dass die errechneten Eigenfrequenzen und ihre Intervallverhältnisse auf die Innenharmonie einer realen Glocke übertragbar sind. Auf Grundlage dieses Modells wird der Einfluss der Glockenzier auf das Schwingungsverhalten der realen Glocke untersucht und nachgewiesen.

3 Akustische Resonanzanalyse

3.1 Messkette

Wie Abb. 1 zeigt, bestand die Messkette aus Mikrofon, Messverstärker und DAT-Rekorder. Im DAT-Rekorder werden die analogen Mikrofonsignale digitalisiert. Vom Rekorder werden die Daten in einen PC übernommen und dort weiterverarbeitet.

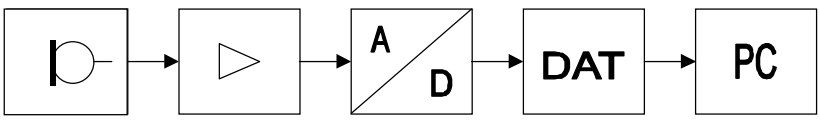


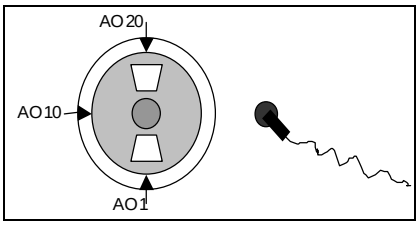
Abb. 1: Messkette.

Die Kalibrierung der Messkette mit einem Normal (Referenztongeber mit definiertem Schalldruck) ermöglicht bei der Signalverarbeitung und Ergebnisdarstellung die ermittelten physikalischen Größen richtig zu skalieren. Die Pegelangaben beziehen sich im folgenden auf $2\ 10^{-5}$ pa.

3.2 Messaufbau und Messungen

Die Glocke Hanna (f²), für die hier beispielhaft die Ergebnisse der Analysen dargestellt werden, wurde an einem Stahlseil frei schwingend aufgehängt. (Abb. 2)

Zur Kennzeichnung der Anregungsorte (AO) werden im Bereich des Schlagringes von außen auf dem halben Umfang in Winkeln von 9 Grad bis zu 20 Markierungen aufgebracht. AO 1 liegt mittig unter einer Schmuckplatte, AO 10 im Winkel von 90 Grad zu AO 1 und AO 20 wieder mittig unter der zweiten Schmuckplatte (Abb. 3). Das Messmikrofon wird im Abstand von 60 – 80 cm im Winkel von 180 Grad zu AO 10 positioniert.



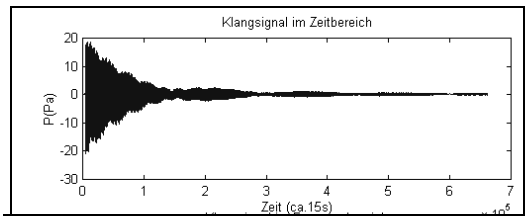
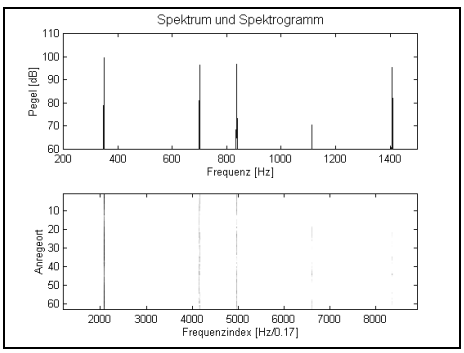


Abb. 2: Hanna (f²) des ersten Gusses, Messaufbau

Abb. 3: Messaufbau, Klangsignal

3.3 Frequenzlage

Das Klangsignal jedes Anschlags wird mit der Fast-Fourier-Transformation (FFT) analysiert. In Abb. 4 und Abb. 5 ist im oberen Diagramm jeweils ein Ausschnitt aus dem Gesamtspektrum für einen Anregeort abgebildet. Im unteren Diagramm wird jeweils auf der x-Achse der gleiche Frequenzbereich gezeigt, auf der y-Achse sind die Anregeorte angetragen. Die unterschiedlich hohen Pegel werden durch Grauwerte voneinander abgegrenzt. Pegelwerte unter 40 dB sind weiß, maximale Pegel schwarz dargestellt.



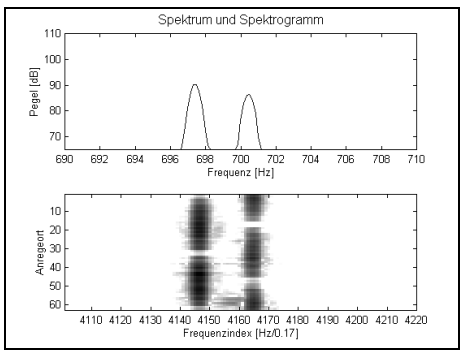


Abb. 4: Frequenzspektrum für einen und über 20 AO, Hanna, zweiter Guss, Ausschnitt Suboktave bis Oktave

Abb. 5: Frequenzspektrum für einen AO und über 20 AO, Hanna, zweiter Guss, Ausschnitt Prime

Im Primbereich (ca. 700 Hz) überlagern sich zwei Sinustöne, deren Frequenzen sich im Spektrum als Paar abbilden. Über den Verlauf der Anregungsorte ist zu erkennen, dass hoher und tiefer Anteil dieses Frequenzpaares abwechselnd auftreten. Die hohen Anteile dominieren bei AO 1, AO 10 und AO 20. Die tiefen Anteile dominieren bei AO 6 und 16.

In den Bereichen dazwischen schwingen beide Eigenformen mit ähnlicher Amplitude und führen zu einer Schwebung von etwa 3 Hz.

3.4 Pegel, An- und Abklingverhalten

Neben den Teiltonfrequenzen, Teiltonintervallen und Schwebungen wird die Klangwirkung der Glocke auch vom unterschiedlichen zeitlichen Auftreten und Verhalten der Teiltöne geprägt.

Deshalb werden zusätzlich der Maximalpegel, die Zeit vom Anregimpuls bis zum Erreichen des jeweiligen Maximalpegels und das Abklingverhalten der Teiltöne untersucht. Die folgenden zwei Abbildungen (Abb. 6, Abb. 7) zeigen jeweils die Pegelverläufe der Prime der Glocke Hanna (f^2) des ersten und zweiten Gusses.

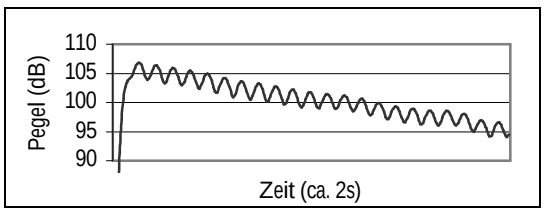


Abb. 6: Pegel der Prime über Zeit, Hanna, erster Guss

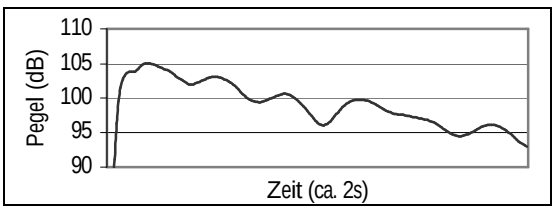


Abb. 7: Pegel der Prime über Zeit, Hanna, zweiter Guss

Es ist deutlich zu sehen, was im Vergleich des Höreindruckes beider Glocken wahrnehmbar ist: Die schnelle Schwebung der Prime der Glocke des ersten Gusses und die wesentlich langsamere Schwebung der Prime der Glocke des zweiten Gusses. Auch die Verläufe anderer Teiltöne sind auf diese Weise darstellbar. Die folgende Abbildung zeigt dies beispielhaft für die Glocke Hanna des ersten Gusses (Abb. 8).

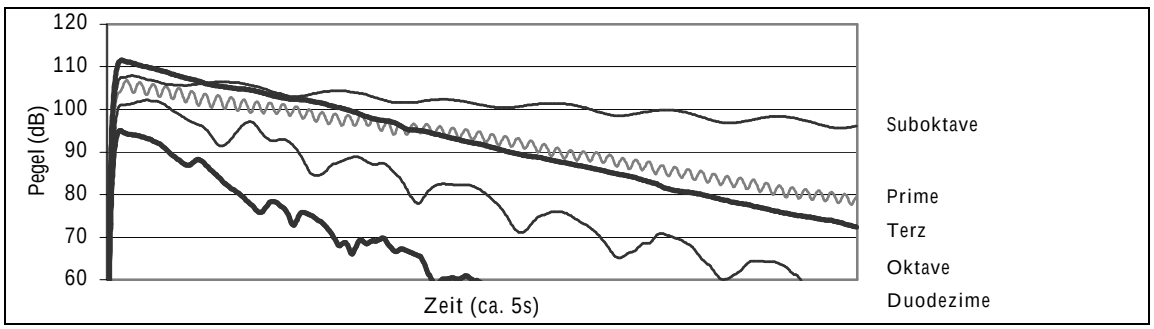


Abb. 8 Pegelverläufe ausgewählter Teiltöne der Glocke Hanna (f^2) des ersten Gusses

Aus den erfassten Klangdaten der Glocke lassen sich objektive Kennwerte ermitteln.

Objektive Kennwerte für den Glockenklang sind die Frequenzlagen der Teiltöne, die Frequenz der Schwebung, der maximale Pegel in Dezibel (dB), die Anklingzeit (die Zeit, zwischen Anregung und Erreichen des jeweiligen Maximalpegels) und die Abklinghalbzeit (der Zeitraum, in dem der Pegel eines Teiltones um 6 dB abnimmt). Die Abklinghalbzeit ist ein Maß für die Klangdauer jedes Teiltons.

Tabelle 1 gibt in Zusammenfassung eine Übersicht über diese Kennwerte. Diese Übersicht ist der „Musikalische Fingerabdruck“ einer Glocke.

Kennwert	Suboktave	Prime	Terz	Oktave	Duodezime
Nominal	$f^2 + 3$				
Maximalpegel (dB)	109,0	110,5	110,9	102,2	99,6
Anklingzeit (s)	0,19	0,12	0,10	0,19	0,10
Abklinghalbzeit (s)	3,17	1,06	0,76	0,67	0,37
F1 (Hz)	353,5	691,1	852,5	1436,3	2132,3
F2 (Hz)	354,9	702,6	853,2	1438,1	2134,2
Δ F (Hz)	1,3	11,5	0,7	1,8	1,9
Ton (Bez. 435 Hz)	f' + 7 (8)	f^2 + 0 (5)	gis^2 + 10 (11)	f^3 + 11	c^4 + 8 (9)

Tabelle 1: Glocke Hanna, erster Guss, musikalischer Fingerabdruck

4 Schwingungssimulation am Glockenmodell

Die Geometrie des CAD–Modells wurde von der Glockengießerei Bachert zur Verfügung gestellt und von Herrn Prof. Rolf Steinbuch modifiziert. Für die Materialeigenschaften wurden die Daten von Bronze zugeordnet. Bei der Betrachtung der Eigenfrequenzen und Eigenformen werden Randbedingungen ignoriert, das Modell befindet sich idealisiert, dämpfungsfrei gelagert im schwerelosen Raum.

4.1 Eigenformen und Eigenfrequenzen

Zunächst werden die Eigenformen und Eigenfrequenzen für das unverzierte Modell ermittelt und anschließend als Vergleichsnormal benutzt. In Abb. 10 sind zu vier Glockenteiltönen die Eigenformen zu sehen. Die Amplituden der Auslenkung sind stark übertrieben dargestellt.

Abb. 9: CAD-Modell

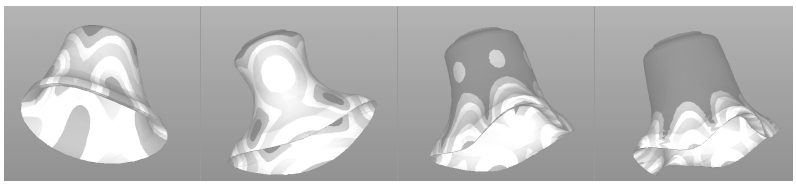


Abb. 10: Eigenformen der Suboktave, Prime, Terz, Oktave (v.l.)

Bereiche mit hoher Schwingungsamplitude werden als Schwingungsbäuche bezeichnet. Zwischen den Schwingungsbäuchen liegen Bereiche mit niedriger Schwingungsamplitude, die Schwingungsknoten. Diese Schwingungsknoten verbinden sich im schwingenden System Glocke zu sogenannten Knotenringen und Knotenmeridianen.

Die Eigenform der Suboktave hat keinen Knotenring. Die vier Schwingungsbäuche mit ihren zwei Knotenmeridianen prägen sich von der Schärfe bis zum Glockenhals aus. Der Knotenring der Prime liegt etwas oberhalb des Schlagringes. Deutlich erkennbar sind die Schwingungsbäuche im Bereich des Halses. Die Schwingungsbäuche der Terz und Oktave prägen sich besonders im Bereich des Schlagringes aus. (Vergl. auch [SchadFrik93])

Zu den Eigenformen werden die Werte der Eigenfrequenzen berechnet.

Kennwerte	Suboktave	Prime	Terz	Oktave	Duodezime
Sollton (Bez. 435 Hz)	e	e^1	g^1	e^2	b^2
Sollfrequenz (Hz)	162,9	325,9	387,5	651,8	976,5
Modellfrequenz (Hz)	158,1	318,6	377,0	627,1	931,7
Modellton (Bez. 435 Hz)	e -8,4	e^1 -6,2	g^1 -7,6	e^2-10,7	b^2 -13,0

Tabelle 2: Sollwerte und simulierte Eigenfrequenzen ausgewählter Teiltöne (ohne Zier)

Die Frequenzen der Schwingformen werden in der Simulation um durchschnittlich 8/16 Halbtöne zu tief berechnet. Die Intervallverhältnisse sind stimmig. Das Schwingungsverhalten des Modells ist somit auf das Schwingungsverhalten einer realen Glocke übertragbar.

4.2 Variation der Glockenzier

Hauptbestandteile der Glockenzier der Glocken der Frauenkirche Dresden ist ein Zierring etwas oberhalb des Schlagringes und zwei gegenüberliegende Zierplatten im Bereich der Glockenflanke. Die reale Glockenzier mit ihren figürlichen Darstellungen und unterschiedlichen Materialdicken ist mit allen Details zu komplex für die Simulation. Deshalb wird eine abstrakte Zier aufgetragen, die sich in ihrer wirksamen Fläche und Dicke variieren lässt.

4.3 Variation des Zierringes

Der Zierring wirkt sich auf die Teiltöne aus, deren Schwingungsformen sich im Bereich des Schlagringes ausprägen. Dazu zählen die Terz, die Oktave, die Duodezime und die Doppeloktave. Gegenüber dem unverzierten Modell verursachte Frequenzabweichungen der Teiltöne korrelieren mit dem Maß der Ringdicke.

Ist der Zierring unterbrochen, können je nach Ort und Zahl der Unterbrechungen Frequenzaufspreizungen unterschiedlicher Teiltöne verursacht werden und zu Schwebungen führen. Auf die Prime hat der Zierring keinen signifikanten Einfluss.

4.4 Variation der Zierplatten

Auf die Frequenzlagen der Teiltöne haben die Zierplatten keinen wesentlichen Einfluss. Allerdings kann durch sie wie im Fall der Glocken für die Frauenkirche Dresden eine deutliche Aufspreizung des Prime-Paares verursacht werden. Suboktave, Terz, Oktave und Duodezime sind werden von den Zierplatten kaum beeinflusst.

Die Untersuchung ergab, dass die Aufspreizung der Prime unmittelbar mit der Dicke und der wirksamen Fläche der Zierplatten zusammenhängt.

4.5 Zusammenfassung

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Teiltonfrequenz ist abhängig von wirksamer Fläche und Dicke der Glockenzier.
- Die Teiltonschwebung ist abhängig von wirksamer Fläche und Dicke der Glockenzier.
- Der Einfluss der Glockenzier wurde mit Hilfe der Simulation an einem Modell geklärt.
- Die Ergebnisse der Simulation am Modell sind auf die reale Glocke übertragbar.

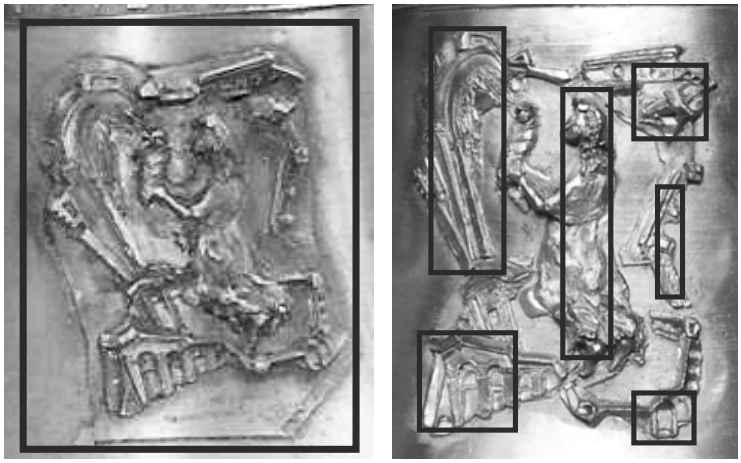


Abb. 11: Wirksame Fläche und Dicke im Vergleich: Glocke Hanna des ersten (links) und des zweiten Gusses (rechts)

Die Verzierungen wurden für den zweiten Guss deutlich dünner als für den ersten gestaltet. Lagen die Halbrelieffiguren der Platten beim ersten Guss noch auf einer ca. 1 cm dicken Grundplatte, so waren sie beim zweiten Guss direkt auf die Glockenrippe aufgetragen. In den Zierring wurden zusätzlich Unterbrechungen von ca. 5 mm Breite eingebracht. Diese Veränderungen, die empirisch vorgenommen wurden, hatten den Erfolg, dass die Glocken des zweiten Gusses die Klangprüfung durch den Glockensachverständigen bestehen konnten.

5 Ausblick

Für jede Glocke kann ein musikalischer Fingerabdruck erstellt werden. Die Bestimmung und Archivierung der Glockendaten ermöglicht, einen Glockenlebenslauf zu erstellen. Schäden, wie z.B. Spannungsrisse, können frühzeitig durch Vergleich der gespeicherten mit den aktuellen Kennwerten und ihren Abweichungen erkannt werden.

Die Innenharmonie einer Glocke lässt sich mit Hilfe der Simulation vorhersagen. Geometrievariationen werden am Modell untersucht, aufwändige Probegüsse werden vermieden. Geplante Klangkorrekturen werden vor der Ausführung am Modell getestet. Auf aufwändige Glockenzier muss auch in Zukunft nicht verzichtet werden. Allerdings muss die Art der Umsetzung sorgfältig geprüft werden. Der Einsatz moderner Simulationswerkzeuge kann helfen, im Traditionshandwerk Fehlgüsse zu vermeiden.

6 Quellenangaben

[Bauer2003] J. Bauer: Ursachen des Missklangs von Glocken. Diplomarbeit, Fachhochschule Heidelberg, Fachbereich Informatik, Studiengang Elektrotechnik und md-pro GmbH Karlsruhe, Heidelberg 2003.

[MZ2003] „Mitteldeutsche Zeitung“. In: „Phänomenaler Missklang“. Halle 25.02.2003, http://www.mz-web.de/artikel?id=1046178894782

[SchadFrik93] C.-R. Schad, G. Frik: Klangfiguren einer Glocke. Acustica 78, 1 (1993) 46-54