

Numerische Analysen zum Einfluss von Dekor und Reliefs auf das Schwingungsverhalten von Kirchenglocken

Diplomarbeit Alexander Siebert

Motivation

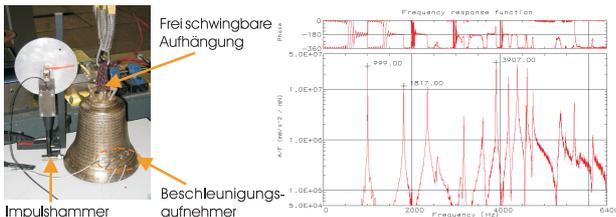
- Fehlguss von sechs Glocken für die Dresdener Frauenkirche; sie bestanden, vermutlich aufgrund aufwendiger Verzierungen, die Klangprüfung nicht
- Zwei Drittel aller Glocken müssen durch Abschleifen korrigiert oder sogar neu gegossen werden

Vorgehen

- Zur Überprüfung, ob die numerischen Ergebnisse auf reale Strukturen übertragbar sind, werden experimentelle Untersuchungen an einer Glocke durchgeführt und mit den numerischen Ergebnissen dieser Struktur verglichen
- Numerische Untersuchungen des Einflusses verschiedener Verzierungsvarianten eines rotations-symmetrischen Grundmodells auf den Klang
- Numerische Untersuchung des Einflusses einer "ovalen" Glockenform auf den Klang

Experimentelle Modalanalyse

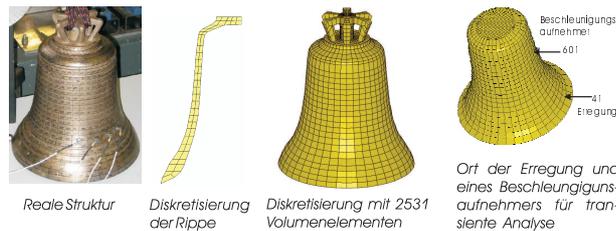
- Bestimmung der Eigenfrequenzen, Eigenschwingungsformen und Dämpfungen aufgrund des Übertragungsverhaltens der Struktur



Versuchsaufbau experimentelle Modalanalyse

Übertragungsfunktion. Die Resonanzfrequenzen sind Teilöne (Diagramm aus I-DEAS 11)

Numerische Untersuchung



- Numerische Untersuchungen mit FEM-Code LS-DYNA
- Berechnung der Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen
- Transiente Analyse bei Impulserregung

Vergleich der experimentellen mit numerischen Ergebnissen

- Eigenfrequenzen

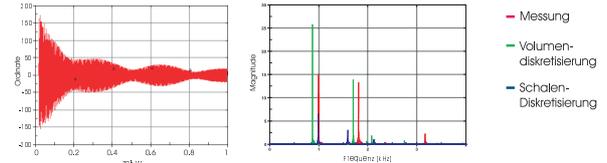
Teilton	Experimentelle Modalanalyse Frequenz [Hz]	Berechnung mit Volumenelementen Frequenz [Hz]	Abweichung zum Experiment [%]	Berechnung mit Schalenelementen Frequenz [Hz]	Abweichung zum Experiment [%]
Unteroktave	999	968 / 972	3,1 / 2,7	996 / 999	0,3 / 0,0
Prime	1814 / 1817	1818 / 1825	0,2 / 0,4	1781 / 1787	1,8 / 1,7
Terz	2351	2303 / 2306	2,0 / 1,9	2371 / 2374	0,9 / 1,0
Quinte	3176	3089 / 3097	2,7 / 2,5	3128 / 3134	1,5 / 1,3
Oberoktave	3907	3820 / 3823	2,2 / 2,1	4005 / 4009	2,5 / 2,6

Berechnete und gemessene Eigenfrequenzen der ersten fünf Teilöne

- Eigenschwingungsformen qualitativ



- Transiente Analyse

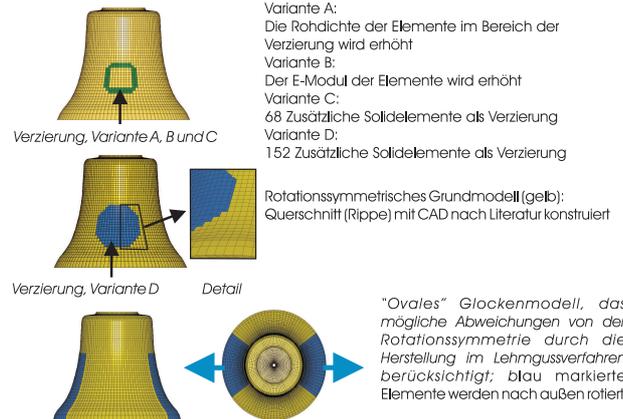


Gemessenes Beschleunigungs-Zeitdiagramm, Knoten 601

Vergleich Frequenzspektrale an Knoten 601 (Spektrale aus Beschleunigungs-Zeitverlauf mittels Fast-Fourier-Transformation)

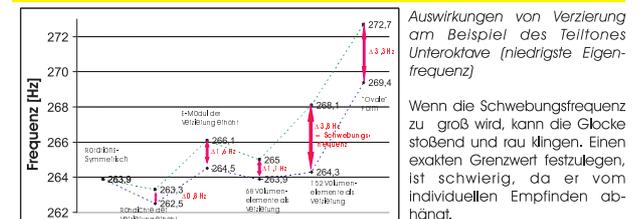
Numerische Untersuchung zum Einfluss von Verzierungen

- Berechnet werden die Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen



"Ovale" Glockenmodell, das mögliche Abweichungen von der Rotationssymmetrie durch die Herstellung im Lehmgußverfahren berücksichtigt; blau markierte Elemente werden nach außen rotiert

Ergebnisse



Auswirkungen von Verzierung am Beispiel des Teiltones Unteroktave (niedrigste Eigenfrequenz)

Wenn die Schwebungsfrequenz zu groß wird, kann die Glocke stoßend und rau klingen. Einen exakten Grenzwert festzulegen, ist schwierig, da er vom individuellen Empfinden abhängt.

- Eigenfrequenzen
 - max. Abweichung zwischen Berechnung und Experiment 3,1 %
- Eigenschwingungsformen
 - qualitativ gute Übereinstimmung
- Transiente Analyse
 - annähernde Übereinstimmung der ersten beiden Eigenfrequenzen
- ➔ **Berechnungsergebnisse auf reale Strukturen übertragbar**
- "Ovale" Form
 - Einfluss auf Frequenzverhältnisse (Innenharmonie)
 - Einfluss auf Größe der Schwebungsfrequenz
- Verzierung
 - Beeinflusst Schwebungsfrequenz durch Größe ihrer Fläche und Dicke; erhöhte Steifigkeit durch Verzierung wirkt sich stärker aus als zusätzliche Masse