

Die Glocken von Hundertbücheln

Rainer, 27.06.2016



Solange die Glocken der Heimat läuten, solange ist die Welt in Ordnung. Doch wieso, weshalb und warum werden sie geläutet? Wie klingen sie, was unterscheidet sie von Trompeten und Hörnern? Und von anderen Glocken? Solche Fragen und noch mehr beschäftigen seit Jahrhunderten die Campanologen.

Auf dieses Gebiet der Campanologie wagte ich mich im Frühjahr 2016 mit meiner

Studentengruppe. Wir untersuchten eine Glocke der St. Konrad Kirche in München Haar und die große Glocke aus Hundertbücheln (Mövile) in Siebenbürgen.

Inhalt

Geschichtliche Infos.....	2
Welche Bedeutung haben die Kirchenburgen heute noch und wie können sie genutzt und erhalten werden?.....	3
Welche Funktionen hatten Glocken?	4
Was für Probleme können auftreten?	4
Was macht die Hundertbüchler Glocke einzig? Eine Untersuchung im Rahmen der technischen Akustik.	5
Physikalischer Hintergrund (Lineare Dynamik)	6
Weiteres Hintergrundwissen.....	6
Aktive und passive Messung	6
Die große Hundertbüchler Glocke.....	7
Aufnahme	7
Untersuchung	7
Fourier-Synthese – Die synthetisch generierte Große Hundertbüchler Glocke beim Ausklingen..	9
Bezeichnung der Töne	9
FAZIT	10
Wie sieht es bei der Glocke von St. Konrad aus München Haar aus?.....	10
Grundlagen zum Glockenklang:	10

Die liturgische Bedeutung:	11
Funktionsweise der Glocke in der Kirche:	11
Kirche St. Konrad in Haar – CAD Modell.....	12
Spektralanalyse des Tons	14
Glocke St. Konrad	17
Große Glocke Hundertbücheln.....	18
FEM-Analyse an der Glocke St. Konrad, Haar	21
Anhang - Frequenztafel	29
Anhang – Schematischer Schnitt.....	31
Anhang – Fotos aus Hundertbücheln.....	31

Geschichtliche Infos

Ca 1180 wurde die Hundertbüchler Gemarkung durch deutsche Siedler erstbesiedelt.

Ca. 1225 wurde mit dem Bau einer Kirche im romanischen Stil mit einem Glockenturm an derer Westseite begonnen.

1411 Die kleine Glocke wurde erstanden. Sie trägt die Inschrift: "Michael, ora pro nobis ad dominium, 1411" (Michael, bitte für uns zu Gott, 1411).

1496 Zusätzlich zur kleinen und großen Glocke wurde die mittlere Glocke erstanden. Sie trägt die Inschrift: " O rex gloriae, veni com pace! Egidius sankt Michaeli 1496" (O König der Herrlichkeit, komm mit deinem Frieden! Egidius dem Heiligen Michael).

1654 In Hundertbücheln brach die Pest aus.

1658 Ein tatarisch-moldauisch-walachisches Heer überfiel Siebenbürgen. Auch Hundertbücheln wurde belagert, die Burg hielt der Belagerung stand, das bezeugen die noch am alten Gerüst hängenden Glocken. Ein seltener Fall in Siebenbürgen! Die Gemeinde aber brannte nieder.

1709 Die Pest kehrte nach Hundertbücheln zurück.

1816 und 1817 Missernten und Heuschrecken plagten die Hundertbüchler.

1830 Die Cholera wütete in Hundertbücheln.

1840 Der Altar wurde übermalt, dahinter das "Glaser" erstellt und am Gestühl wurden die Malereien mit "schlechter Leinölfarbe überschmiert".

Welche Bedeutung haben die Kirchenburgen heute noch und wie können sie genutzt und erhalten werden?

Zu diesem Thema läßt sich sicherlich ein ganzer Roman schreiben. Ein Wandersmann wird feststellen, daß es nichts Schöneres gebe, als über einen Hügel zu schreiten und in der Ferne den Turm einer Kirchenburg zu erblicken. Aber nicht jeder sieht die Welt mit den Augen eines Wandersmannes. So gibt es wie immer viele verschiedene Ansichten.



Wenn es um das Kulturgut der Kirchenburgen geht, muß man feststellen, daß in den meisten Dörfern Siebenbürgens die jetzigen Dorfbewohner wenig mit den sächsischen Kirchen anfangen können. Zumindest so wenig, daß sie sich nicht aktiv um deren Erhalt einsetzen.

Wobei hier etwas differenziert werden muß: die alteingesessenen Rumänen und Zigeuner kennen durchaus noch das funktionierende sächsische Gemeindeleben. Sie vermissen teils seit der Auswanderung der Sachsen das Läuten der Glocken, welches ihnen ein Zeitgeber war und Anhaltspunkte im tägl. Arbeitsablauf bot. Die später Hinzugezogenen, die meist keine Landwirtschaft mehr betrieben, kennen die Kirchen nur als ungenutzte und verschlossene Gebäude.



[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/40/Hundertbuecheln_Glocken_2.jpg]

Um die Kirchenburgen für Touristen und Dorfbewohner ein wenig attraktiver zu machen, genügen manchmal schon kleine Maßnahmen wie eine gewisse Grundordnung und Reinhaltung, ohne die Innenräume zu polieren. Es macht einen

besseren Eindruck, zumindest den der Sorge um das Kulturerbe, wenn zum Beispiel herabgefallene Bauteile oder Teile der Orgeln, Altäre usw. nicht verstreut und damit zum Mitnehmen einladend herumliegen, sondern in beschrifteten Kästen oder Regalen gesammelt werden, die dann als Kleinst-Lapidarien in der Kirche stehen und als Anreiz für Spenden dienen können. Auch die Wiederinbetriebnahme von Turmuhren und Glocken setzen ein positives Zeichen von Leben und Pflege, im Übrigen auch für die dörfliche Bevölkerung.

Wenn man davon ausgeht, daß eine Kirche ein gewisses „Eigenleben“ beherbergt und eine Aura ausstrahlt, dann hat daran auch ihre funktionierende Glocke einen Anteil. Sie zeigt, daß die Kirche „lebt“. Dies haben auch die Schäßburger erkannt, die im Jahre 2009 in der Bergkirche eine neue Glocke installiert haben. Sie wurde gemeinsam von der HOG Schäßburg und der Kirchengemeinde finanziert.

Welche Funktionen hatten Glocken?

Von einem Kirchturm her bietet sich dem Besucher nicht nur ein wunderbarer Überblick über das gesamte Dorf oder einen großen Teil der Stadt.



Wenn die Wetterlage es ermöglicht, kann er auch einen großen Teil der betreffenden Siedlung in der umgebenden Landschaft bewundern.

Fast immer haben auch die Kirchenglocken ihren Platz auf den Kirchtürmen gefunden. Von hier aus sind sie in der ganzen Ortschaft und oft auch noch im entfernten weiten Umfeld zu hören.

Ihr Klang ruft die Menschen zum Gottesdienst oder zum Gebet. Wurde die Glocke nicht geläutet, sondern geschlagen, das heißt, ihr Klöppel in zeitlich kurzen Abständen von Hand mit dem Rand der Glocke in Berührung gebracht, dann bedeutete das eine Warnung vor drohender Gefahr, beim Nahen von Feinden oder wenn ein Feuer ausbrach. Im ersten Fall wurden die Bewohner gerufen, sich in den Schutz der Kirchenburg zu begeben und die Verteidigung einzuleiten; im Falle eines Brandes wurden sie gerufen, mit einem entsprechenden Werkzeug oder Gerät zur Bekämpfung desselben zu eilen.

Jede andere Verwendung entzog die Glocke ihrer Bestimmung und war nur zulässig, wenn es dazu von einer kirchlichen Körperschaft eine Ermächtigung gab.

Das Läuten der Glocke war im Lauf der Jahrzehnte zu einem Zeichen der Identität der Bewohner einer bestimmten Ortschaft geworden. Ihr spezifischer Klang war unverwechselbar, weil er spezifisch für den Ort war, an dem die Glocken benutzt wurden.

[<https://www.ceeol.com/search/article-detail?id=181183>]

Was für Probleme können auftreten?

Lesen Sie die Ansprache von Stadtpfarrer Hans Bruno Fröhlich anlässlich der Inbetriebnahme der neuen Glocke in Schäßburg:

„Denn Probleme mit dem Geläut haben wir schon seit geraumer Zeit. Ich erinnere mich, dass schon am Anfang meiner Dienstzeit (ich bin seit 13 Jahren Pfarrer in Schäßburg) ein Problem immer wieder auftrat: Der Klöppel der mittleren Glocke brach mehrere Male ab und musste immer wieder angeschweißt werden. Ein neuer Klöppel aus unadäquatem

Material verschlechterte das Ganze nur, sodass unsere im Jahr 1929 (von Fritz Kauntz in Hermannstadt) gegossene mittlere Glocke innere Sprünge bekam und nicht mehr geläutet werden konnte.

Dann wurden wir auch noch mit einem anderen Problem konfrontiert: Durch Materialübermüdung (Achse, Lager) geriet die große Glocke in eine leichte Schiefelage, sodass sie nicht mehr durch freies Schwingen geläutet werden konnte. Eine nicht zufriedenstellende provisorische Maßnahme wurde im Jahr 2006 ergriffen: Eine elektronische Vorrichtung setzte bloß den Klöppel in Bewegung. Den bekannten und berühmten (von Michael Albert besungenen) Klang der Bergglocke nicht mehr im Original hören zu können, war sehr schmerzhaft, ist doch die Bergglocke ein Schäßburger Identifikationsmerkmal, welches seinesgleichen sucht. ...“

[Schäßburger Nachrichten]

Was macht die Hundertbüchler Glocke einzig? Eine Untersuchung im Rahmen der technischen Akustik.



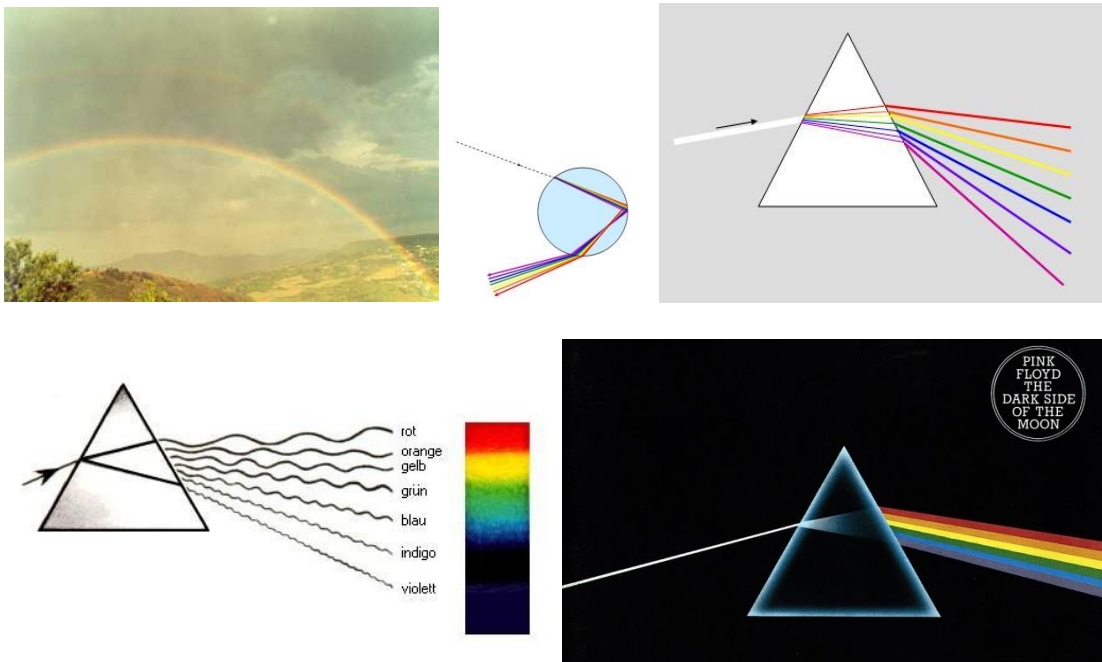
Abb: Im Glockenturm hängen drei vorreformatorische Glocken. Die große Glocke stammt aus der Zeit um 1400, die mittlere von 1496, die kleinste Glocke von 1411.

Was sie einzigartig macht? Ihr Klang ☺. Ihre uralte Aufhängung! Daß sich im Turm ein Uhu eingestet hatte. Und daß sie für die besten Dorfbewohner läuten durfte!!!

Nun gut, auf der Suche nach „harten Fakten“ hatte wir andere Merkmale zu finden. So untersuchten wir den Klang der Glocken. Am 16.5.2016 läuteten wir zum Pfingstmontag die Glocken auf verschiedene Art und Weisen: Wir läuteten sie mit dem nagelneuen Seil, per Hand oder bloß durch Anstoßen des Klöppels. Jede für sich, einmal oder mehrmals nacheinander angestoßen und auch alle zusammen. Ein Heidenspaß für Christen!

Physikalischer Hintergrund (Lineare Dynamik)

Physikalische Eigenschaften wie die farbliche Zusammensetzung des Lichtes oder die Zusammensetzung eines Tones aus verschiedenen Schwingungen können im Frequenzbereich transparent und übersichtlich dargestellt werden:



Eine Fast-Fourier Analyse des digitalen, des diskreten „Signals“ bringt Aufschlüsse darüber, aus welchen Bestandteilen der Ton besteht, aus welchen Grundschwingungen sich das Meßsignal zusammen setzt. Interessant ist, daß sich die Klangfarbe nicht ändert, wenn diese Gundschwingungen phasenversetzt sind. Es kommt nur darauf an, welche Schwingungen zusammenkommen und welchen Anteil an der Gesamtamplitude (in dB) jede hat, also wie laut jede einzelne ist.

Weiteres Hintergrundwissen

Aktive und passive Messung

Die Eigenfrequenzen einer Glocke können sowohl aktiv, als auch passiv bestimmt werden. Bei der aktiven Messung wird die Glocke mit einer Stimmgabel oder mit dem Tastkopf eines Tonfrequenzgenerators angeregt. Die Frequenz wird dann so lange verändert, bis Resonanz auftritt und so ein Teilton gefunden ist. Beim passiven Verfahren wird die ruhende Glocke angeschlagen und ihr Klang aufgezeichnet. Die Aufnahme wird dann einer Spektralanalyse unterzogen, die das Spektrum des Klangs

liefert, in dem die Teiltöne als Peaks erkennbar sind. Die Messwerte aus aktiver und passiver Messung unterscheiden sich geringfügig, weil die Glocke bei aktiver Messung ungedämpft schwingt, bei passiver aber gedämpft.

[https://de.wikipedia.org/wiki/Klang_%28Glocke%29]

Zum Klang einer Glocke: https://de.wikipedia.org/wiki/Klang_%28Glocke%29

Dopplereffekt:

http://www.kirchenglocken.de/Kirchenglocken_de/Willkommen/Tontechnik/tontechnik.html

Angregung der Glocke auf Glockenturm: https://www.htw-dresden.de/fileadmin/userfiles/biw_arch/bauing/baumech/Slavik/a5.pdf

Die große Hundertbüchler Glocke

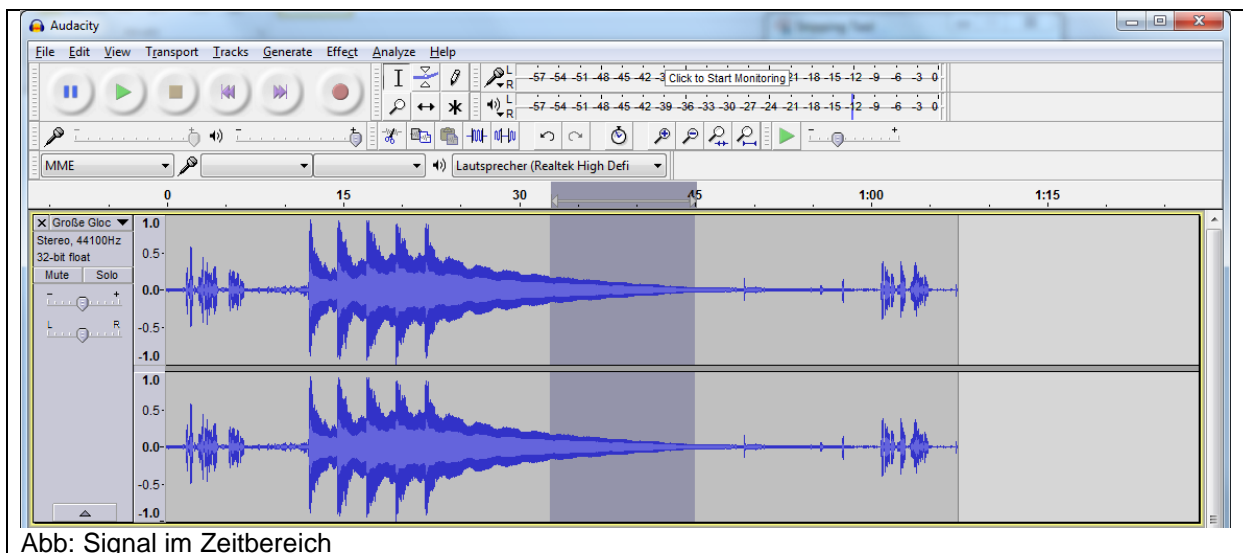
Aufnahme

Die Aufnahme erfolgte mit einem iPhone 5 mit 67kBit/s.

Zunächst wird die Tonaufnahme „Große Glocke Bewegt 2.m4a“ mit dem Helios Audio Konverter von *m4a* nach *wav* konvertiert. Dann wird die Stereo-Aufnahme auf eine Mono-Aufnahme reduziert.

Untersuchung

In Audacity eingelezen ergibt sich folgender Plot im Zeitbereich:



Man erkennt, daß die Glocke fünf mal angeschlagen wurde. Aus dem Ausklingensignal wird ein Teil herausgeschnitten (Sekunde 32,5 bis 45) und einer FFT-Analyse unterzogen. Es ergibt sich folgendes Bild:

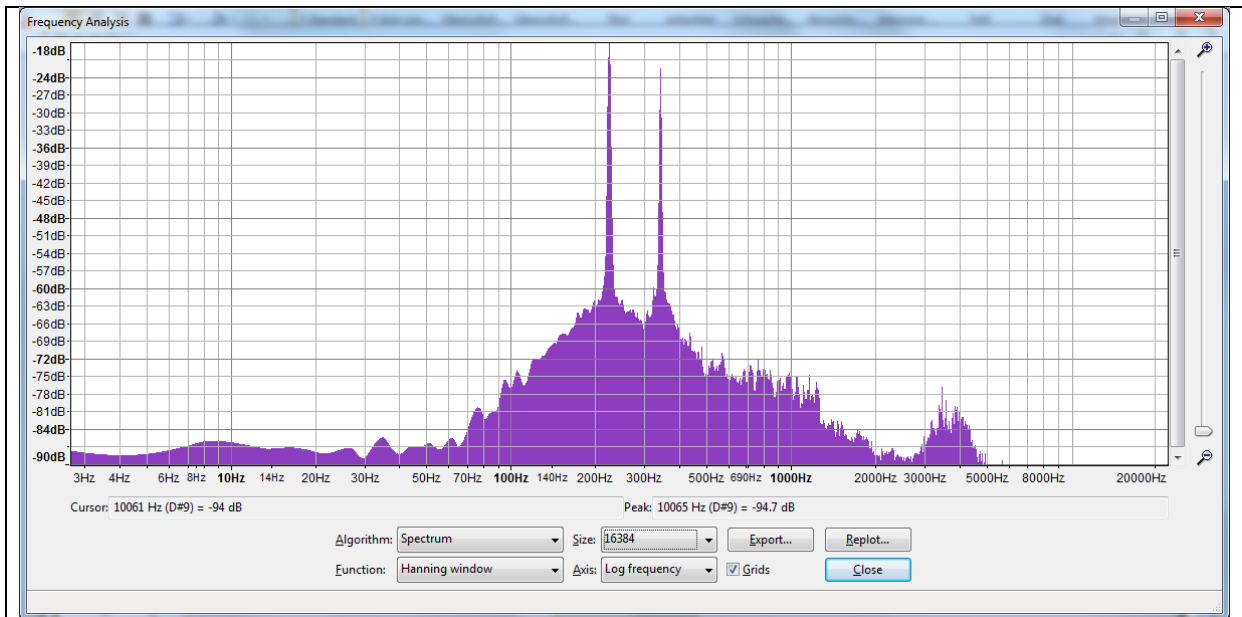


Abb: Signal im Frequenzbereich

Es ist eindeutig zu erkennen, daß sich der Glockenton aus zwei Haupt-Schwingungen zusammensetzt. Aus der Ersten, die 224 mal pro Sekunde schwingt und deren Anteil 18dB ist und der Anderen, die 340Hz aufweist und mit 20,9dB beteiligt ist.

Diese zwei Haupt-Töne werden in der Musik mit A und F bezeichnet

- A3, 224Hz -18dB
- F4, 340Hz -20,9dB

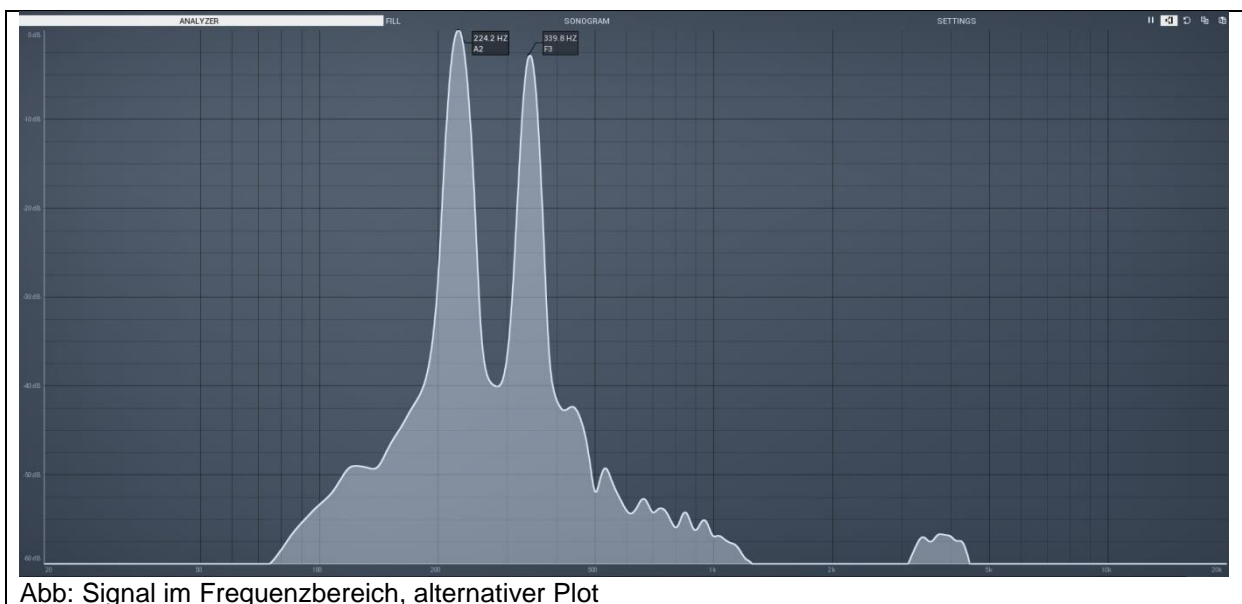


Abb: Signal im Frequenzbereich, alternativer Plot

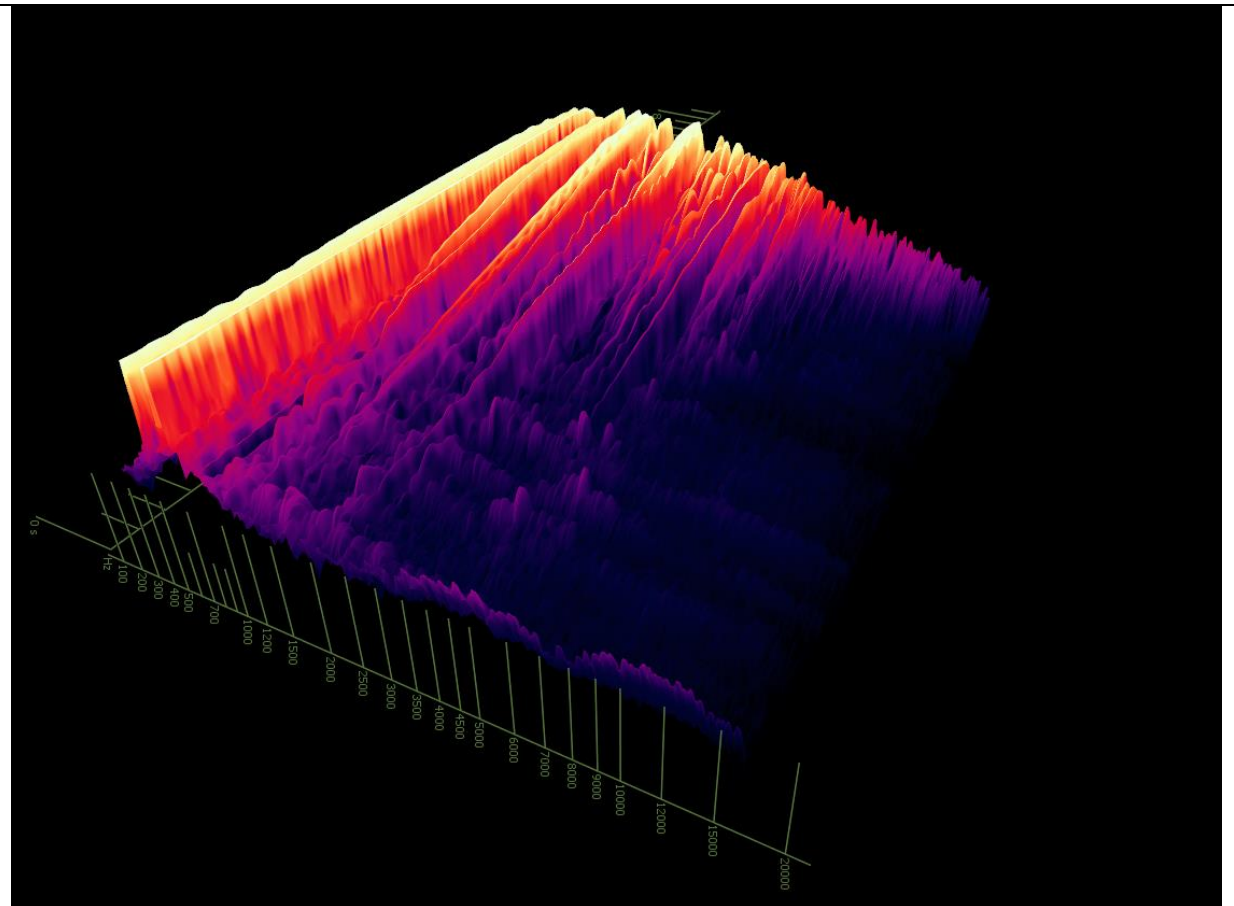


Abb: Beteiligte Schwingungen – nur die zwei Grundschwingungen A und F bleiben beim Ausklingen erhalten

Fourier-Synthese – Die synthetisch generierte Große Hundertbüchler Glocke beim Ausklingen

Mit dieser Kenntnis kann der Glockenschlag nun künstlich erzeugt werden. Mittels Fourier-Synthese wird das Ausklingverhalten simuliert, indem in Audacity mittels Sinusgenerator die Töne A und F generiert und addiert (superponiert) werden. Ein Abklingen lässt den Ton noch ein bisschen realistischer erklingen.

Vergleichen Sie selbst:

- Große Hundertbüchler Glocke: Ganzer Schlag, Original: [Große Glocke - Ganz \(ein schlag Mono\).wav](#)
- Große Hundertbüchler Glocke: Ausklingen, Original: [Original Große Glocke Ausschwingverhalten.mp3](#)
- Große Hundertbüchler Glocke: Ausklingen, Simulation: [Simulation Große Glocke Ausschwingverhalten.mp3](#)

Bezeichnung der Töne

In Audacity werden sie nach internationaler wissenschaftlicher Bezeichnung A3 und F4 genannt, bei Cubase/M-Analyser nach der MIDI Notation A2 und F3.

Der Kammerton A mit 440Hz wird bei Audacity als A4 identifiziert und bei Cubase als A3. Hierzu sagt Wikipedia: Der Kammerton ist der gemeinsame Ton, auf den die Instrumente einer Musikgruppe eingestimmt werden.

„Kammer-“ bezieht sich auf die fürstlichen Privatgemächer, in denen früher musiziert wurde. Daher gibt es historisch betrachtet einen Gegensatz zwischen „Kammerton“ und „Kirchenton“ (auch Orgelton oder „Chorton“ genannt), wobei letzterer bis zu einem ganzen Ton tiefer oder höher war.

Der seit 1939 in vielen Ländern gültige Standard-Kammerton oder Normalstimmton ist festgelegt auf $a_1 = 440$ Hz. In deutschen und österreichischen Sinfonieorchestern ist jedoch eine Einstimmung auf $a_1 = 443$ Hz üblich, in der Schweiz auf $a_1 = 442$ Hz.

Statt der Tonbezeichnung a_1 („eingestrichenes“ a, auch als a' notiert) werden auch die internationale wissenschaftliche Bezeichnung A4 oder bei MIDI-Programmierung A3 verwendet.

[<https://de.wikipedia.org/wiki/Kammerton>]

FAZIT

Die große Glocke hat zwei dominante Grundschwingungen. Es sind das A und das F.

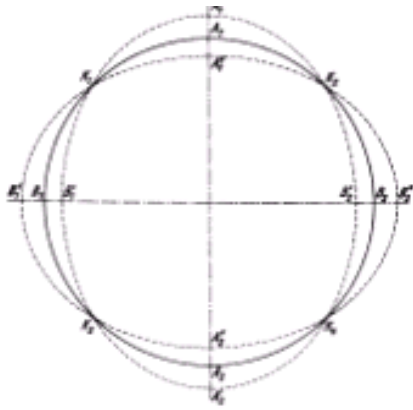
Mich wundert es nicht, immerhin hat sie ja auch zwei Kirchtürme! Ist es Zufall, daß der Plot des Frequenzspektrums die Kirche mit ihren zwei Türmen auf den hundert Bücheln zeigt???

Wie sieht es bei der Glocke von St. Konrad aus München Haar aus?

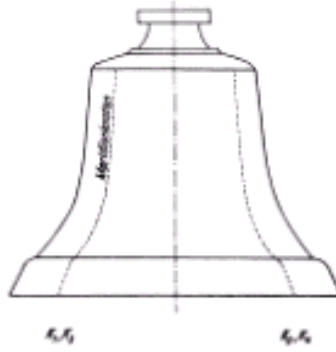
Bei der Glocke aus St. Konrad wurde nicht nur der Ton aufgenommen, sondern auch die Geometrie vermessen. Wir untersuchten fortan auch das Schwingverhalten des Körpers und zeigten, daß man auch durch Berechnung der sog. Eigenmoden (Eigenvektoren, Grundschwingformen) voraussagen kann, wie die Glocke schwingen klingen wird.

Grundlagen zum Glockenklang:

- Bei einer Glocke werden die Töne durch Biegeschwingung des elastischen Glockenkörpers erzeugt
- Diese Schwingung kann aufgeteilt werden in eine Umfangsbiegeschwingung (a) und eine Kreisbiegeschwingung (b)



a) Umfangsbiegeschwingung



b) Längsbiegeschwingung

- Die Knotenpunkte der Umfangsbiegeschwingungen werden Meridiane m und der Längsbiegeschwingung Kreise r genannt
- Durch Kombination von m Meridiane und r Kreise ergibt sich eine große Menge von Schwingungsformen, von denen jede eine bestimmte Eigenfrequenz besitzt und so genau einen Teiltön hervorruft
- Durch die besondere Form der Glocke stehen viele dieser Teiltöne in einem musikalisch harmonischen Verhältnis zueinander und erzeugen so den spezifischen Klang einer Glocke

Die liturgische Bedeutung:

- Liturgie kommt vom griechischen *leiturgia* und bedeutet „öffentlicher Dienst“; Sie beschreibt die offizielle Form des christlichen Gottesdienstes
- Die Glocke stellt durch ihr Geläute eine direkte Verbindung zwischen Himmel und Erde her und soll in erster Linie die Gläubigen zum Beten versammeln
- Man unterscheidet hierbei folgende liturgische Bedeutungen:
 - Messen- und Vespergeläute: Aufruf zum Beten
 - Sturmglöcke: Aufruf zum Helfen
 - Totenglocke: Aufruf zum Abschiednehmen
 - Oster- und Weihnachtsgeläute: Aufruf zur Freude
 - Engelgruß: Aufruf zur Erinnerung

Funktionsweise der Glocke in der Kirche:

- Bei den katholischen Kirchen gibt es meistens drei Glocken: eine große Hauptglocke und zwei Nebenglocken (mittelgroß und klein)
- Jede Glocke stellt eine Musiknote dar, trägt einen eigenen Namen und wird beim Einsetzen in den Glockenturm gesegnet

Messen- und Vespergeläute:

- Jede Glocke führt einzeln einen einfachen und kurzen Schlag aus
- Einmal 30, 15 und 5 Minuten bevor die Messe oder Vesper anfängt

Sturmglöcke:

- Wird verwendet, um die Menschen vor Unfällen und Bränden zu alarmieren, deshalb wird sie u.a. auch Alarm- oder Feuerglocke genannt
- Früher auch als Warnung bei Kriegsausbruch
- Hat für gewöhnlich einen unharmonisch wirkenden Klang ohne ausgeprägten Schlagton

Totenglocke:

- verschiedene, dumpfe und traurige Töne hintereinander
- Die Glocken läuten nicht zusammen, sondern jede Glocke läutet nacheinander

Engelgruß:

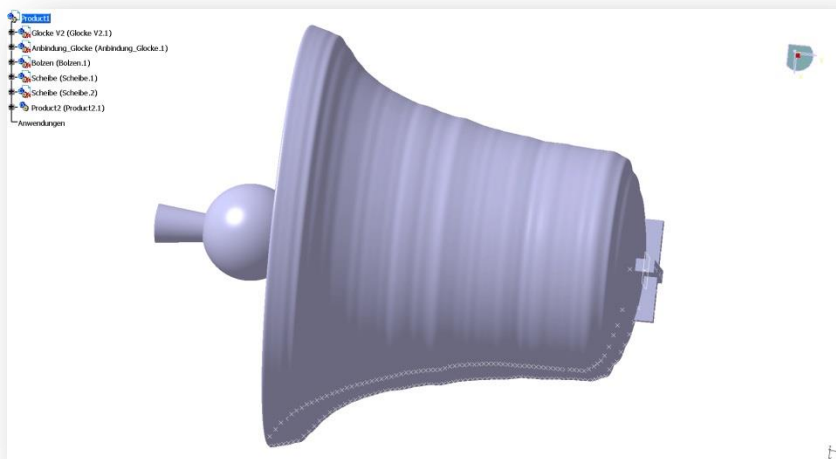
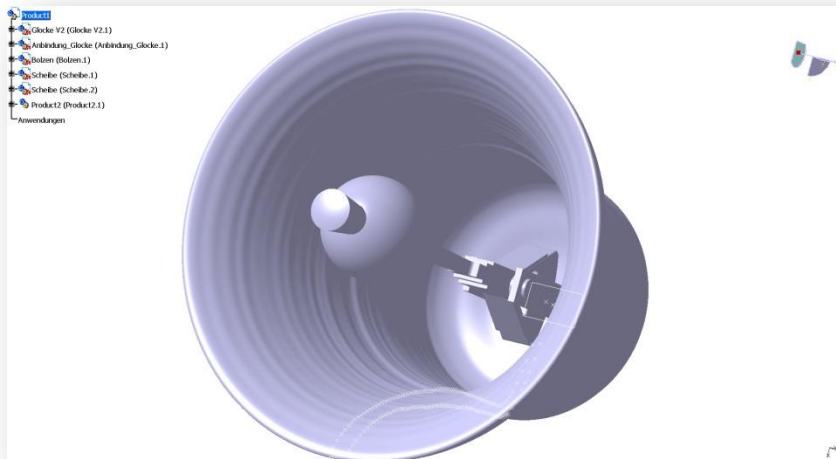
- Alle Glocken läuten gleichzeitig
- Drei Mal drei Schläge mit jeweils einer kurzen Pause dazwischen und dann nochmal zwölf einzelne Schläge (Ein Schlag für jeden Apostel)
- Drei Mal pro Tag wird der Engelgruß ausgeführt (morgens, mittags und abends), um an die Erscheinung des Engels Gabriel an die Jungfrau Maria zu erinnern

Kirche St. Konrad in Haar – CAD Modell





- Vorgehensweise/Geometriebestimmung Glocke:
 - Bosch Abstand- Lasermesser (Positionierung zu ungenau)
 - Anpassung/Zuschnitt eines Kartons an Glocke(innen u. außen)
 - Abmessung x, y – Koordinaten (Abstandsmessung zur Vertikalachse)
- Vorgehensweise/Geometriebestimmung Klöppel u. Anbindung:
 - Mittels Gliedermaßstab und Bandmaß
 - Umfänge und Längenmaße der einzelnen Komponenten
- Erstellung von Bauteilskizzen
- Koordinaten in CAD übertragen: (Catia V5 mittels Makro GSD_PointSplineLoftFromExcel.xls)
 - Makro erstellt 2D-Spline (Linie) in Catia
 - Volumenkörper mittels Rotation
 - Obere Anbindung (Glocke/Träger) modelliert
- Modellierung des Klöppels u. Anbindungen
 - Skizzen und Volumenkörper
 - Unterbaugruppen
 - Gesamtzeichnung
- Erstellung einer STEP-Datei für FEM-Analysen



Spektralanalyse des Tons

- **Aufnahme einer realen Kirchenglocke**
- **Zuschnitt des Signals und Analyse mit**
 - Matlab R2015b – (FFT*)
 - Audacity 1.2.1 – Interner Analyzer (FFT*)
 - Cubase 8.5 Pro / Manalyzer (FFT*)
 - Izotope – RX5 (Sonagramm)
- **Simulation des Signals**
 - Sinusgeneratoren mit Amplituden mit Audacity

- Sinusgeneratoren mit Amplituden inkl. deren Verlauf mit Cubase
- Darstellung und Vergleich der Signale (Real vs. Simulation)

*FFT: Fast Fourier Transformation



- **Gerät/Aufnahmeparameter:**
 - Zoom H2n Mobile Recorder mit Windschutz
 - Aufnahme mit 24bit/44.1khz als .wav-datei in Stereo
 - Vorverstärker auf „aus“ mit Limiter, um digitales Verzerrern (sogenanntes Clipping) zu vermeiden
 - Aufnahmeabstände
 - zur Glocke ca. 2m
 - zur Turmwand ca. 30cm
- Abstand zur Wand wg. Reflexion und dadurch Anhebung der Amplituden der tiefen Frequenzen. Dafür aber Problem der Auslöschung von reflektierten und nicht reflektierten Wellen, „Interferenz“.

Vorbereitung des Signals in einem Audioprogramm

- **Zuschnitt**
 - Einlesen
 - Definieren eines relevanten Zeitintervalls (Lila-Markierung)

Vorraussetzung hierfür:

- Keine Störgeräusche (Kinder, Vögel,..)
- Keine Signalüberlagerung mit vorangegangenem Glockenschlag
- Keine digitale Übersteuerung (Clipping)
- Ausreichende Ausschwinglänge
- Schnitt des Zeitintervalls und einfügen von Fade-In/Outs*
- **Export**
 - Mono-Export
(Zusammenfügen der L/R-Kanäle zu einem)
 - Speichern als .Wav-Datei 16bit/44.1khz

*Fade-In/Out: Sehr kurze automatische Pegelzu und -abnahme am Anfangs und Endschnitt zur Vermeidung von Knackgeräuschen

Gesamtaufnahme, relevanter Bereich Lila Markiert



Fertig geschnittenes Signal



Analyse der Datei mit Matlab R2015b

- FFT-Analyse des gesamten Glockenschlags ohne Zeitintervalle

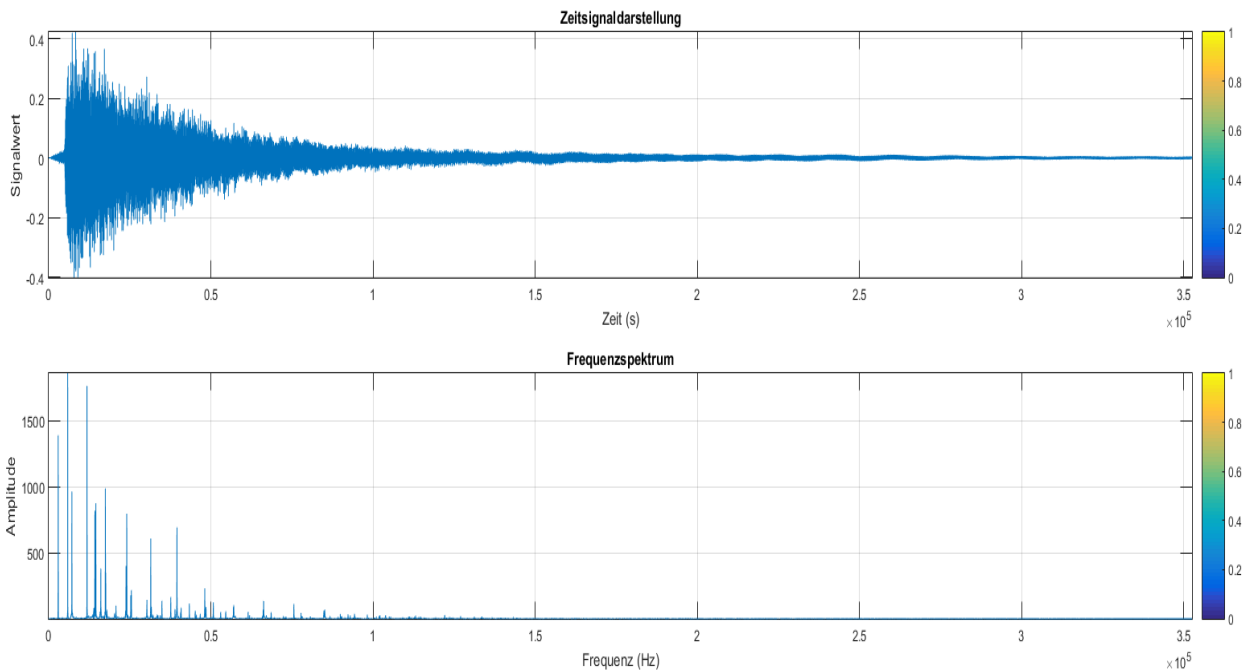
- Glocke der Kirche St. Konrad
- Glocke der Kirche Hundertbücheln als Vergleich

```

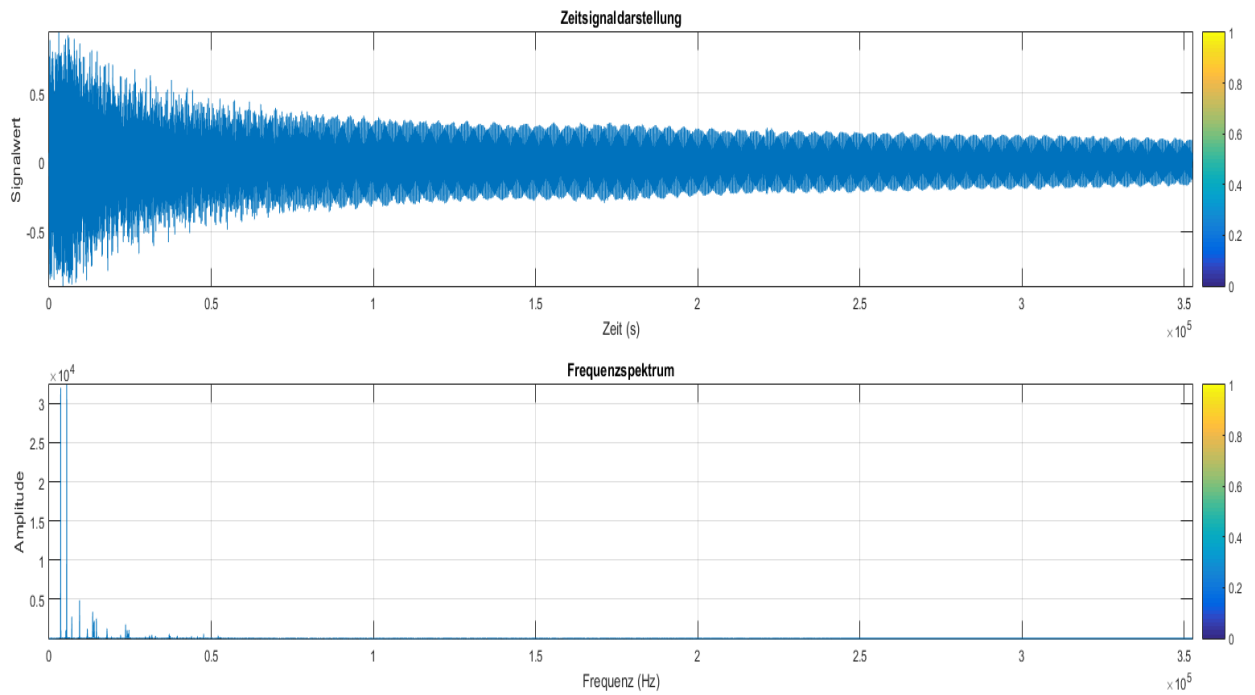
Editor - H:\Projektarbeit (Glocke)\Glockenschlaganalyse.m
Glockenschlaganalyse.m
1
2 %wav Audiodatei einlesen
3 signal = audioread('Glockenschlag.wav');
4
5 %Länge des Signals
6 N = length(signal);
7 fs = 705100; % 44.100 samples per second
8 fnyquist = fs/2; %Nyquist frequency
9
10 %Audiodatei plotten
11 bin_vals = [0 : N-1];
12 fax_Hz = bin_vals*fs/N;
13 N_2 = ceil(N/2);
14 subplot(3,1,1)
15 plot(fax_Hz(1:N_2), signal(1:N_2))
16 xlabel('Zeit (s)')
17 ylabel('Signalwert');
18 title('Zeitsignaldarstellung');
19 axis tight
20 grid on;
21
22 %Frequenzspektrum in Hertz
23 X_mags = abs(fft(signal));
24 bin_vals = [0 : N-1];
25 fax_Hz = bin_vals*fs/N;
26 N_2 = ceil(N/2);
27 subplot(3,1,2)
28 plot(fax_Hz(1:N_2), X_mags(1:N_2))
29 xlabel('Frequenz (Hz)')
30 ylabel('Amplitude');
31 title('Frequenzspektrum');
32 axis tight
33 grid on;
34
35 %Frequenzspektrum in Hertz/dB
36 X_mags = abs(fft(signal));
37 bin_vals = [0 : N-1];
38 fax_Hz = bin_vals*fs/N;
39 N_2 = ceil(N/2);
40 subplot(3,1,3)
41 plot(fax_Hz(1:N_2), 10*log10(X_mags(1:N_2)))
42 xlabel('Frequenz (Hz)')
43 ylabel('Signal (dB)');
44 title('Frequenzspektrum');
45 axis tight
46 grid on;
47
48

```

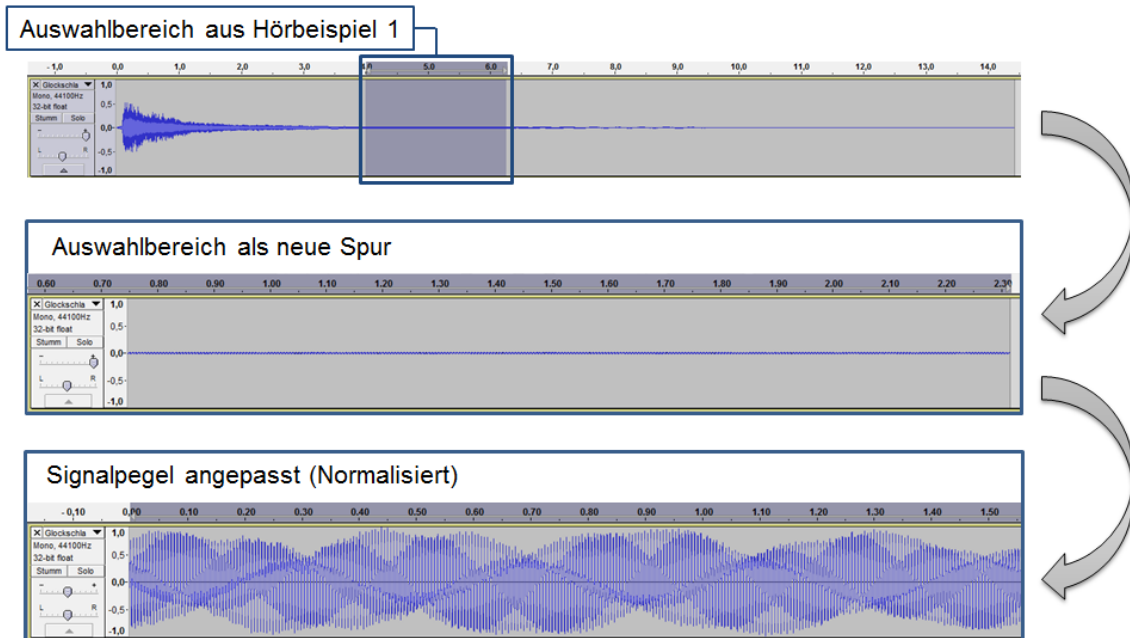
Glocke St. Konrad



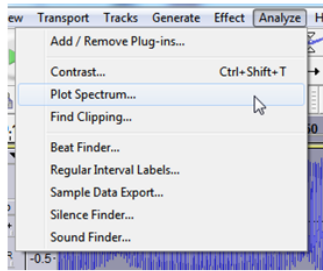
Große Glocke Hundertbücheln



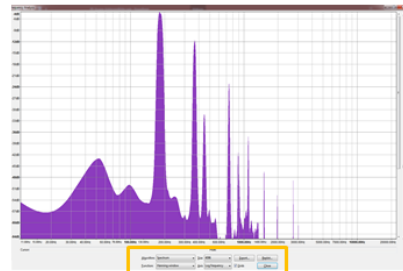
Vorbereitung zur Spektralanalyse mit Audacity 2.1.2



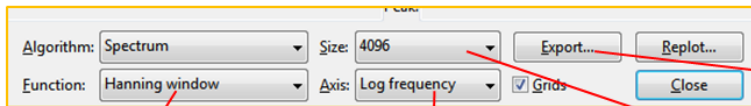
Erstellung des Spektrums



Analyse starten



Einstellungen für ein aussagekräftiges Ergebnis



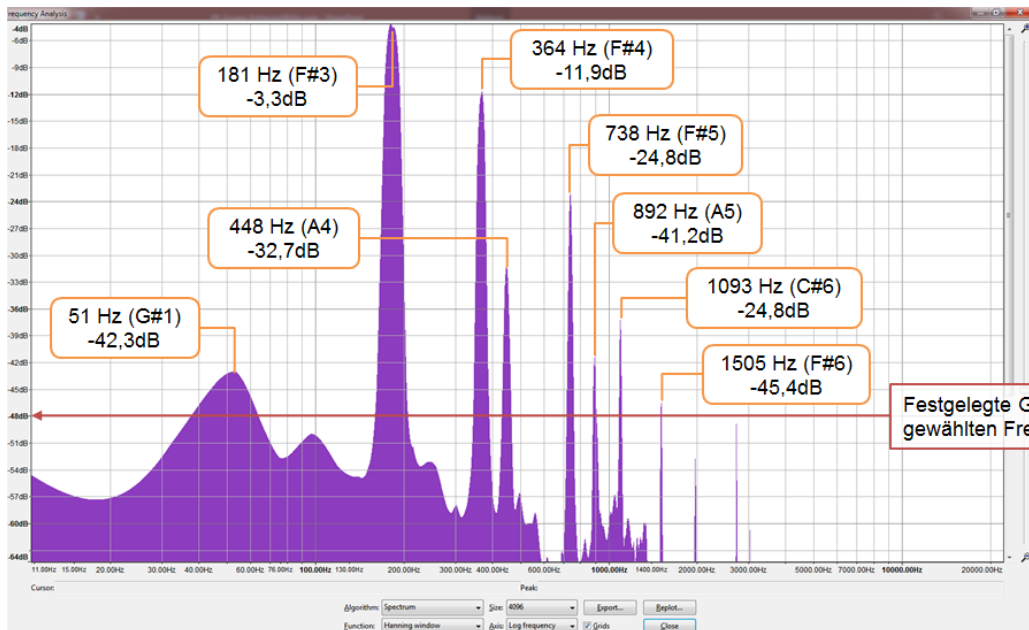
Fensterfunktion

Aufteilung der X-Achse

Einstellung der Samplegröße
-> je größer, je Feiner

Möglichkeit für Datenexport

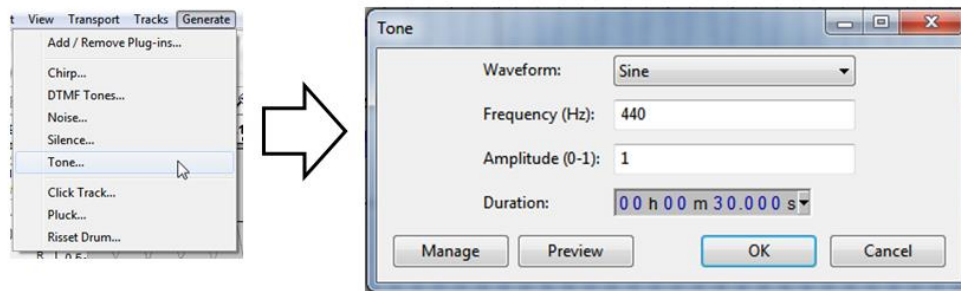
Analyseergebnis mit Audacity 2.1.2



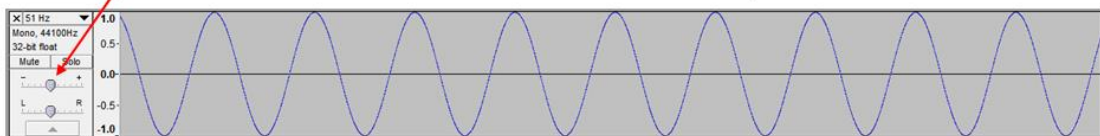
Festgelegte Grenze der gewählten Frequenzen

Künstliche Tonerzeugung mit Audacity 1.2.1

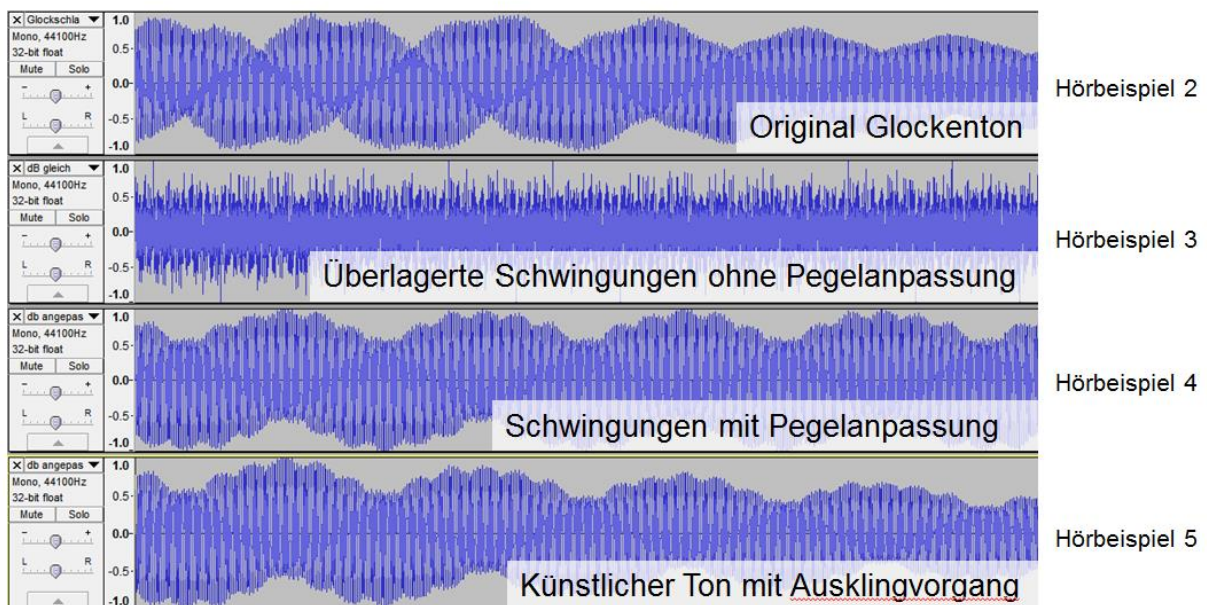
Erzeugen von Tonspuren mit den einzelnen Sinusschwingungen



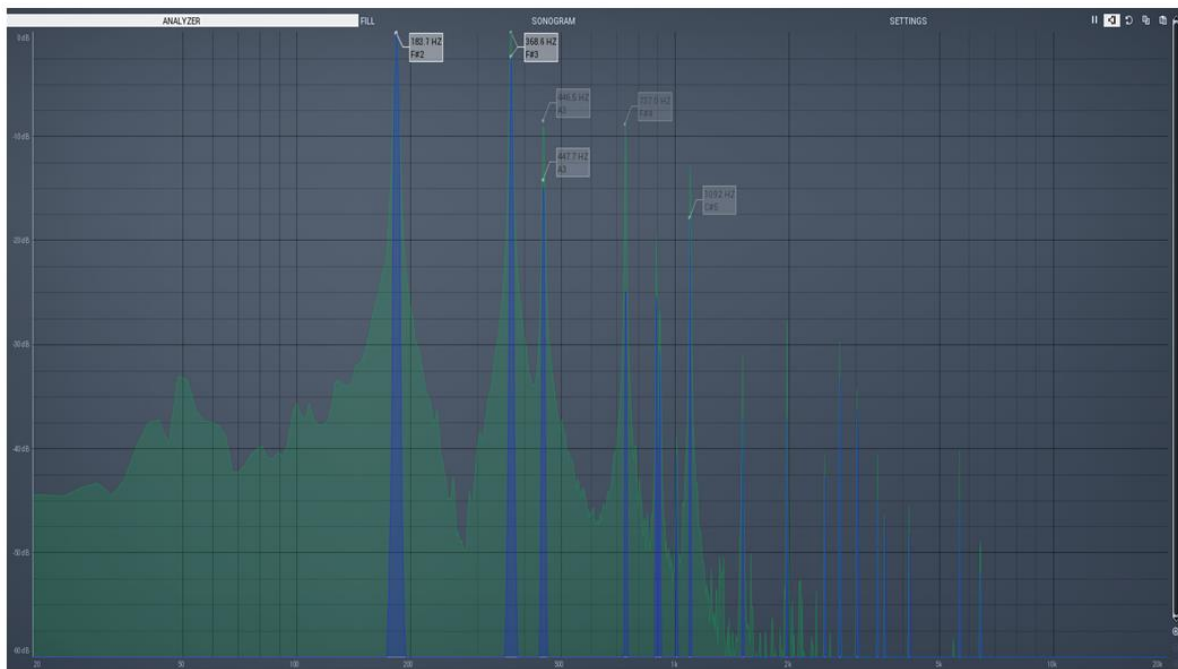
Anpassen der Amplituden über den Pegelregler!



Ergebnisse im Vergleich



Vergleich Spektrum Original (Grün) / Simulation (Blau)



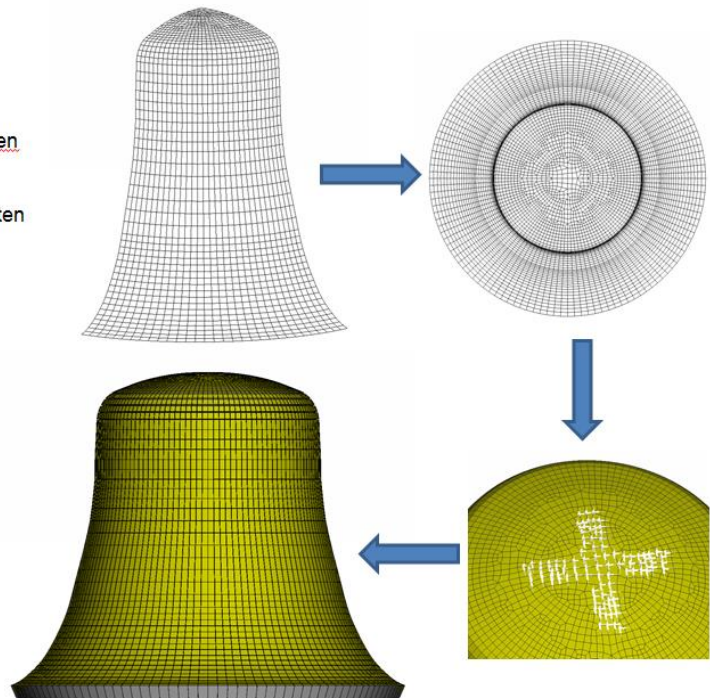
FEM-Analyse an der Glocke St. Konrad, Haar

Eigenmoden

- Es wurden drei verschiedene Modelle erstellt:
 - Schalen, konst. Dicke
 - Schalen mit Nodal Thickness
 - Hexaelemente

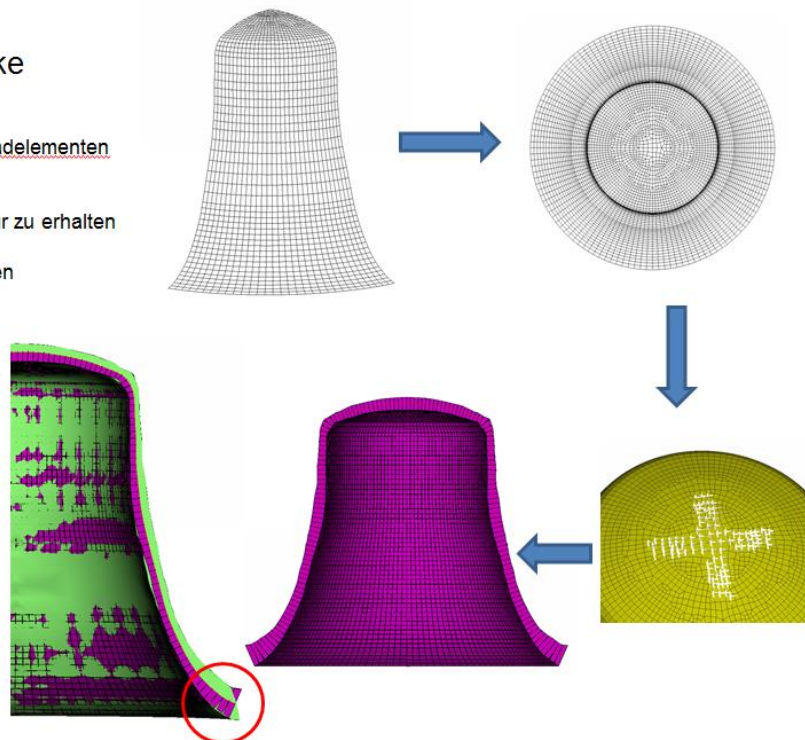
Schalen konstanter Dicke

- Mittenfläche der viertel Glocke mit Quadelementen vernetzt
- Zweimal spiegeln, um komplette Kontur zu erhalten
- Aufhängung als Raumfest angenommen
- Konstante Dicke von 50mm



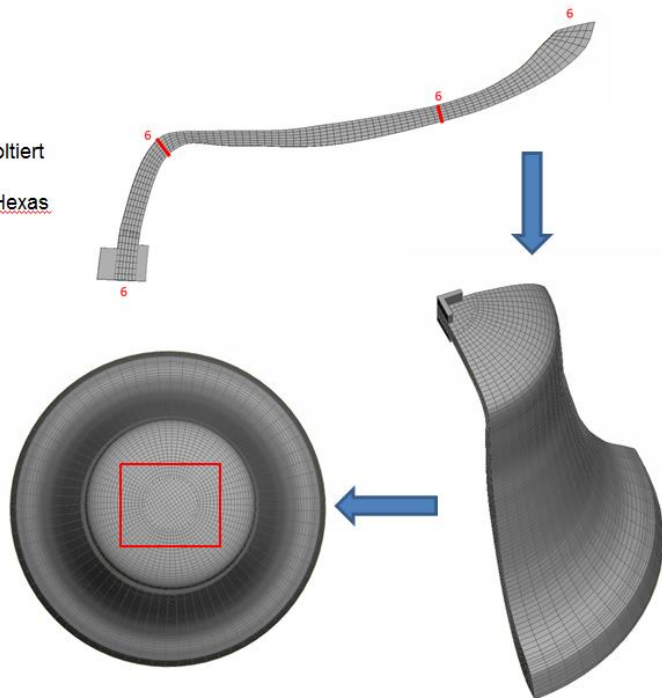
Schalen angepasster Dicke (Nodal Thickness)

- Mittenfläche der viertel Glocke mit Quadelementen vernetzt
- Zweimal spiegeln, um komplette Kontur zu erhalten
- Aufhängung als Raumfest angenommen
- Dicke an Modell angepasst
- Konturabweichung im unteren Bereich



Vernetzung mit ANSA

- 2D-Kontur mit Schalenelementen gleichmäßig vernetzt
- Schalen 90° um die z-Achse zu Hexaedern revoltiert
- Rosette ersetzt durch aus Schalen extrudierte Hexas



Materialdaten:

	E-Modul [N/mm ²]	Dichte [kg/m ³]	Poisson- zahl
Zinn (20%)	50000	5,77	0,068
Bronze (80%)	125000	8,92	0,272
Unsere Legierung	110000	8,27	0,34

Berechnung und Animation

- Anpassen der Template `.dat`-Datei
- Berechnen mit `Optistruct (Nastran)`
- Darstellung der 50 Eigenmoden mit Hilfe des Animators

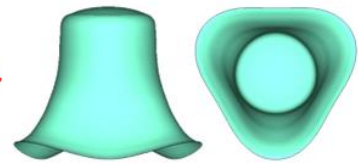
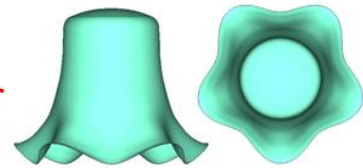
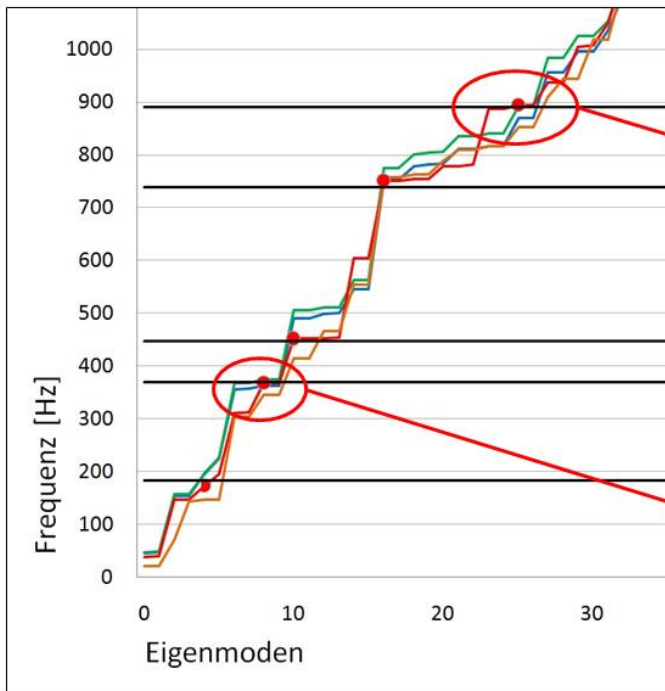
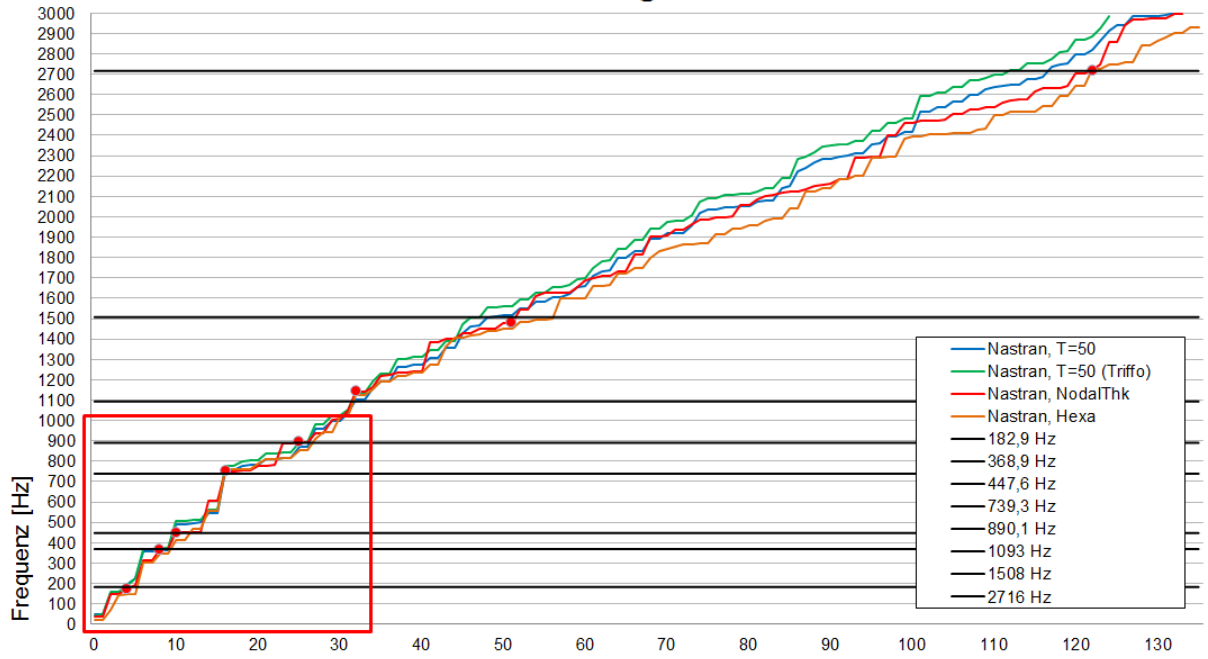
Subcase	Mode	Frequency	$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m} = \frac{1}{2\pi} \omega$	Eigenvalue	Generalized Stiffness	Generalized Mass
1	1	2,00E+07	1,58E+10	1,58E+10	1,58E+10	1,00E+06
1	2	2,06E+07	1,68E+10	1,68E+10	1,68E+10	1,00E+06
1	3	7,12E+07	2,00E+11	2,00E+11	2,00E+11	1,00E+06
1	4	1,44E+08	8,17E+11	8,17E+11	8,17E+11	1,00E+06
1	5	1,46E+08	8,45E+11	8,45E+11	8,45E+11	1,00E+06
1	6	1,46E+08	8,45E+11	8,45E+11	8,45E+11	1,00E+06
1	7	3,03E+08	3,63E+12	3,63E+12	3,63E+12	1,00E+06
1	8	3,03E+08	3,63E+12	3,63E+12	3,63E+12	1,00E+06
1	9	3,45E+08	4,69E+12	4,69E+12	4,69E+12	1,00E+06
1	10	3,45E+08	4,69E+12	4,69E+12	4,69E+12	1,00E+06
1	11	4,13E+08	6,75E+12	6,75E+12	6,75E+12	1,00E+06
1	12	4,14E+08	6,75E+12	6,75E+12	6,75E+12	1,00E+06
1	13	4,65E+08	8,55E+12	8,55E+12	8,55E+12	1,00E+06
1	14	4,65E+08	8,55E+12	8,55E+12	8,55E+12	1,00E+06
1	15	5,54E+08	1,21E+13	1,21E+13	1,21E+13	1,00E+06
1	16	5,54E+08	1,21E+13	1,21E+13	1,21E+13	1,00E+06
1	17	7,58E+08	2,27E+13	2,27E+13	2,27E+13	1,00E+06
1	18	7,58E+08	2,27E+13	2,27E+13	2,27E+13	1,00E+06
1	19	7,63E+08	2,30E+13	2,30E+13	2,30E+13	1,00E+06
1	20	7,63E+08	2,30E+13	2,30E+13	2,30E+13	1,00E+06
1	21	7,88E+08	2,45E+13	2,45E+13	2,45E+13	1,00E+06
1	22	8,09E+08	2,58E+13	2,58E+13	2,58E+13	1,00E+06
1	23	8,09E+08	2,58E+13	2,58E+13	2,58E+13	1,00E+06
1	24	8,15E+08	2,62E+13	2,62E+13	2,62E+13	1,00E+06
1	25	8,15E+08	2,62E+13	2,62E+13	2,62E+13	1,00E+06

```

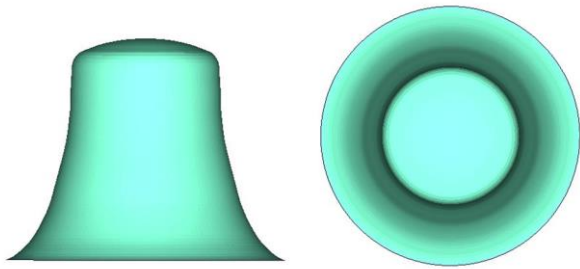
$
$
$
=====
$ NASTRAN EXECUTIVE CONTROL DE
C K $
$
=====
$
ID schamel, Eigenzustand
SOL 103
TIME 99999
DIAG 8
$
CEND
$
$
=====
$ CASE CONTROL DECK
$
=====
$
$
TITLE = Glocke
SUBTITLE = St. Konrad / MJC
$
ECHO = NONE
METHOD (STRUCTURE) = 100
$
SPC = 1
$
DISP (PLOT) = ALL
$
=====
BEGIN BULK
$
PARAM, POST, -1
PARAM, AUTOSPC, YES
PARAM, MAXRATIO, 1.E8
PARAM, GRDPNT, 0
PARAM, KRCOT, 100.
$
FIGR, 100, , , 50
$
INCLUDE 'Glocke_v2.nas'
$
ENDDATA

```

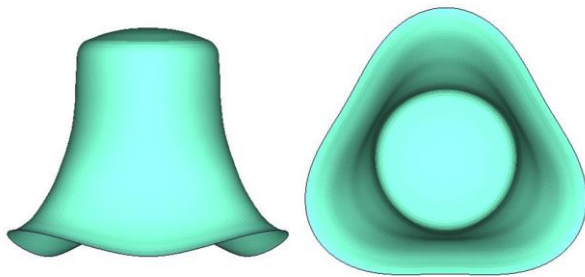
Wertevergleich



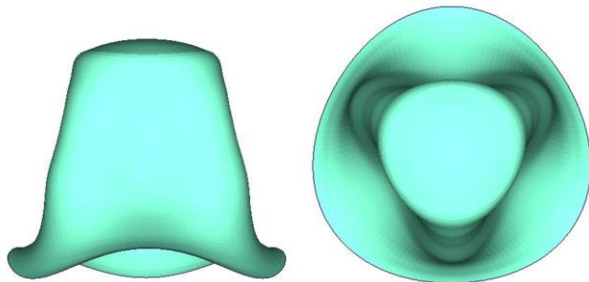
Mode 5, Frequenz 172 Hz (Messwert: 183 Hz)



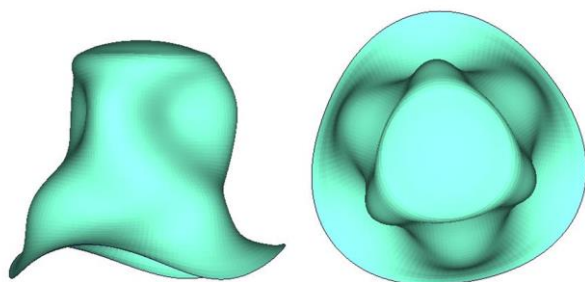
Mode 9, Frequenz 386 Hz (Messwert 367 Hz)



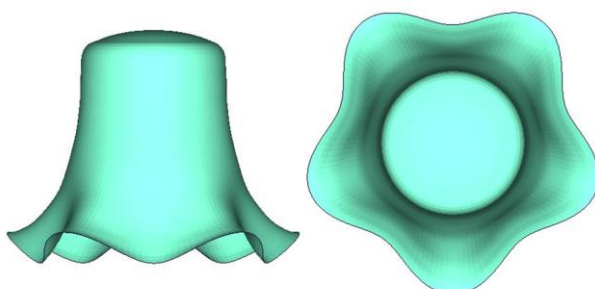
Mode 12, Frequenz 452 Hz (Messwert 448 Hz)



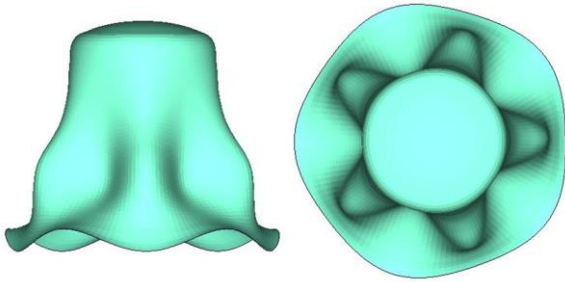
Mode 18, Frequenz 751 Hz (Messwert 739 Hz)



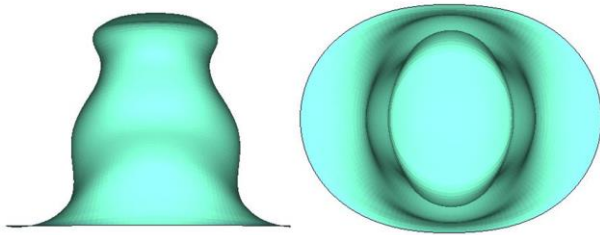
Mode 26, Frequenz 894 Hz (Messwert 890 Hz)



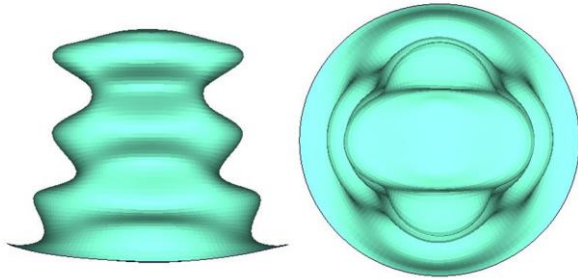
Mode 34, Frequenz 1143 Hz (Messwert 1093 Hz)

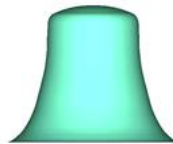
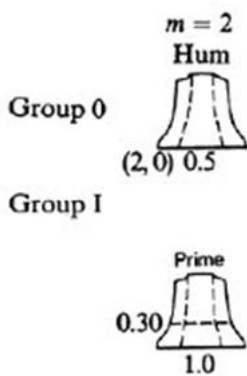
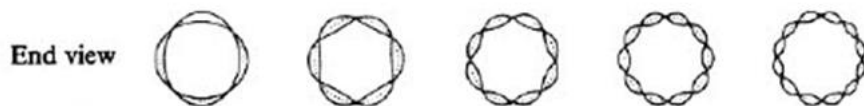
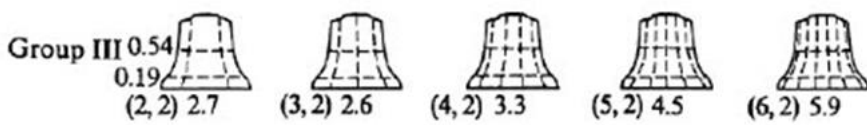
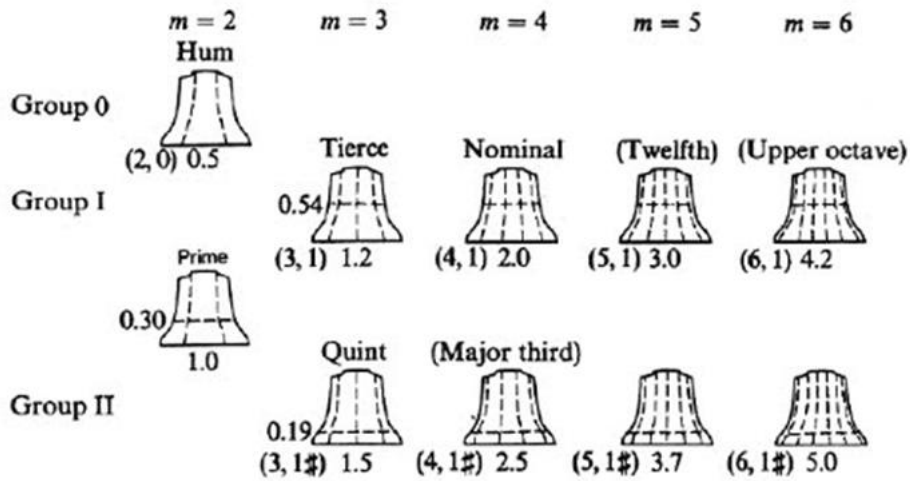


Mode 52, Frequenz 1480 Hz (Messwert 1508 Hz)



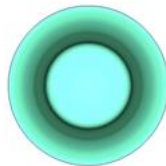
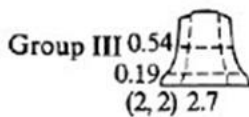
Mode 123, Frequenz 2719 Hz (Messwert 2716 Hz)





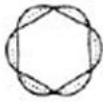
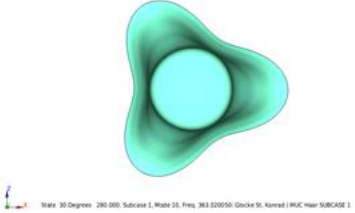
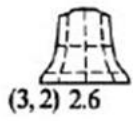
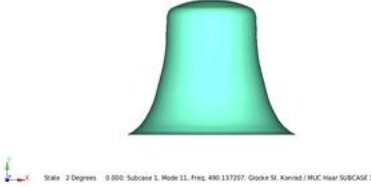
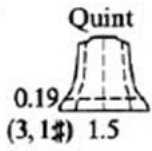
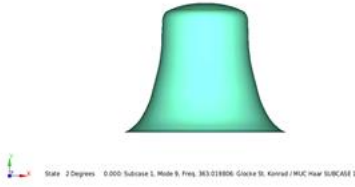
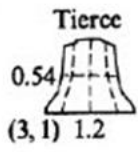
Group II

Size: 2 Degrees © 2000 Subarea 1, Mode 1, Freq. 156.271759 Clarke St. Kennel / MJC Near SUBCASE 1

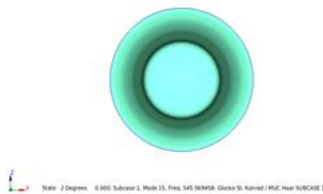
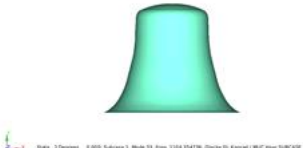
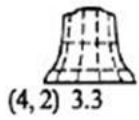
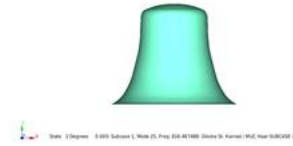
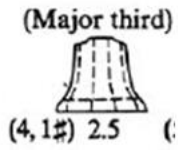
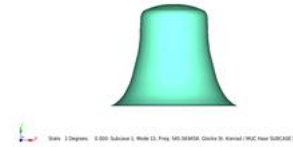
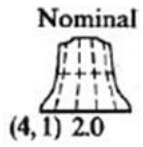


Size: 2 Degrees © 2000 Subarea 1, Mode 4, Freq. 153.527710 Clarke St. Kennel / MJC Near SUBCASE 1

$m = 3$



$m = 4$



Anhang - Frequenztabelle

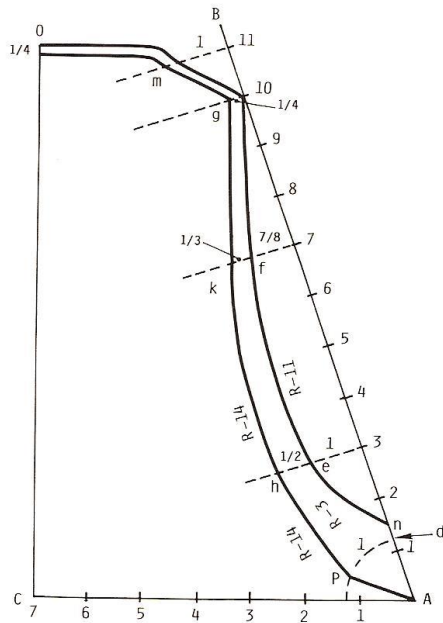
Frequenztabelle der Klaviertöne

Nummer der Klavier-Taste	Deutsche Notation	Englische Notation	Frequenz in Hz
88	c'''' Letzter Ton	C8 Höchster Ton	4186,01
87	h''''	B7	3951,07
86	ais''''/b''''	A#7/Bb7	3729,31
85	a''''	A7	3520,00
84	gis''''/as''''	G#7/Ab7	3322,44
83	g''''	G7	3135,96
82	fis''''/ges''''	F#7/Gb7	2959,96
81	f''''	F7	2793,83
80	e''''	E7	2637,02
79	dis''''/es''''	D#7/Eb7	2489,02
78	d''''	D7	2349,32
77	cis''''/des''''	C#7/Db7	2217,46
76	c''''	C7	2093,00
75	h'''	B6	1975,53
74	ais'''/b'''	A#6/Bb6	1864,66
73	a'''	A6	1760,00
72	gis'''/as'''	G#6/Ab6	1661,22
71	g'''	G6	1567,98
70	fis'''/ges'''	F#6/Gb6	1479,98
69	f'''	F6	1396,91
68	e'''	E6	1318,51
67	dis'''/es'''	D#6/Eb6	1244,51
66	d'''	D6	1174,66
65	cis'''/des'''	C#6/Db6	1108,73
64	c'''	C6 (high C)	1046,50
63	h''	B5	987,767
62	ais''/b''	A#5/Bb5	932,328
61	a''	A5	880,000
60	gis''/as''	G#5/Ab5	830,609
59	g''	G5	783,991
58	fis''/ges''	F#5/Gb5	739,989
57	f''	F5	698,456
56	e''	E5	659,255
55	dis''/es''	D#5/Eb5	622,254
54	d''	D5	587,330
53	cis''/des''	C#5/Db5	554,365
52	c''	C5	523,251
51	h'	B4	493,883
50	ais'/b'	A#4/Bb4	466,164

49	a' Kammerton	A4 concert pitch	440,000
48	gis'/as'	G#4/Ab4	415,305
47	g'	G4	391,995
46	fis'/ges'	F#4/Gb4	369,994
45	f'	F4	349,228
44	e'	E4	329,628
43	dis'/es'	D#4/Eb4	311,127
42	d'	D4	293,665
41	cis'/des'	C#4/Db4	277,183
40	c' (Schloss-c)	C4 (middle C)	261,626
39	h	B3	246,942
38	ais/b	A#3/Bb3	233,082
37	a	A3	220,000
36	gis/as	G#3/Ab3	207,652
35	g	G3	195,998
34	fis/ges	F#3/Gb3	184,997
33	f	F3	174,614
32	e	E3	164,814
31	dis/es	D#3/Eb3	155,563
30	d	D3	146,832
29	cis/des	C#3/Db3	138,591
28	c	C3	130,813
27	H	B2	123,471
26	Ais/B	A#2/Bb2	116,541
25	A	A2	110,000
24	Gis/As	G#2/Ab2	103,826
23	G	G2	97,9989
22	Fis/Ges	F#2/Gb2	92,4986
21	F	F2	87,3071
20	E	E2	82,4069
19	Dis/Es	D#2/Eb2	77,7817
18	D	D2	73,4162
17	Cis/Des	C#2/Db2	69,2957
16	C	C2 (low C)	65,4064
15	,H	B1	61,7354
14	,Ais/,B	A#1/Bb1 ~60 Hz	58,2705
13	,A	A1	55,0000
12	,Gis/,As	G#1/Ab1	51,9130
11	,G	G1 ~50 Hz	48,9995
10	,Fis/,Ges	F#1/Gb1	46,2493
9	,F	F1	43,6536
8	,E	E1	41,2035
7	,Dis/,Es	D#1/Eb1	38,8909
6	,D	D1	36,7081
5	,Cis/,Des	C#1/Db1	34,6479

4	,C	C1	32,7032
3	„H	B0	30,8677
2	„Ais/„B	A#0/Bb0	29,1353
1	„A Erster Ton	A0 Tiefster Ton	27,5000

Anhang – Schematischer Schnitt



Anhang – Fotos aus Hundertbücheln









