Jazz-Glocke: Sound Design, Strukturoptimierung und Guss

Magdalena Scholz[1], Felix Thomann[1], Lennart Moheit[1], Thomas Greß[2], Wolfram Volk[2], Steffen Marburg[1]

[1] *Lehrstuhl für Akustik mobiler Systeme, 85748 Garching b. München, Deutschland, Email: magdalena.scholz@tum.de*

[2] *Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, 85748 Garching b. München, Deutschland, Email: thomas.gress@utg.de*

Einleitung

Bei der Entwicklung neuer Produkte ist Sound Design inzwischen in vielen Fällen ein fester Bestandteil des Prozesses. Zum einen gilt es in manchen Fällen, einen bekannten Klang so in seinem Charakter zu verändern, dass das Produkt möglichst positiv wahrgenommen wird. In anderen Fällen geht es darum, einen neuen Klang für ein neuartiges Produkt zu kreieren. Während dieses Prozesses gilt es jedoch nicht nur den Klang eines Modells zu entwickeln, sondern auch den Einfluss des Fertigungsprozesses auf das letztendliche Klangbild zu berücksichtigen. Getroffene Annahmen bei der Erstellung des Modells und die Fertigung tragen entscheidend dazu bei, wie groß die Abweichung zwischen dem gestalteten Klang des Modells und dem finalen Klang des Produktes ausfällt.
Am Beispiel einer Glocke wird der Gestaltungsprozess durchlaufen. Die Erstellung des Modells mit der entsprechenden Parametrisierung, die Strukturoptimierung auf den gestalteten Zielklang sowie der Guss und die nachfolgende Bewertung bilden hierbei die einzelnen Teilschritte.
Ein Glockenklang ist aus mehreren Frequenzen zusammegesetzt, von denen nach Schoofs et al. die ersten fünf akustisch relevant sind ([1], S.2; [2], S.73). In einem gewissen Rahmen ist es möglich nach dem Guss eine Glocke zu stimmen [4] und somit Abweichungen zu dem gewünschten Klang zu korrigieren.
Der traditionelle Glockenguss [3] ist ein jahrhundertealtes Kunsthandwerk, in welchem meist die gewünschten Teilfrequenzen hinreichend genau getroffen wurden. Dennoch können durch das Stimmen meist die Abweichungen hinsichtlich des Klanges ausgeglichen werden und nur selten müssen Glocken wieder eingeschmolzen und neu gegossen werden
Der Glockenguss wird noch heute nach traditionellem Verfahren durchgeführt. Jedoch ist die Optimierung des Gussprozesses durch Verbesserung der Gießsysteme, sowie der Formen und Formstoffe forschungsrelevant [5].
Eine Veränderung des Klangs der in Mitteleuropa weit verbreiteten Moll-Terz-Glocken hin zu Dur-Terz Glocken erreichten A. Schoofs, F. van Asperen, P. Maas und A. Lehr durch Strukturoptimierung [6]. In einer anderen Studie haben N. McLachlan, B. Keramati Nigjeh und A. Hasell Glocken mit Obertönen einer harmonischen Reihe optimiert [7]. H. Fleischer ([8], [9]) untersuchte Moll-Terz-Glocken mit physikalischen Messungen und Computersimulationen hinsichtlich ihres Schwingungsverhaltens. Zudem führte er psychoakustische Studien hinsichtlich der Tonhöhe von Klängen durch, um zu ermitteln, welcher spektrale Kern den Klang von Kirchenglocken ausmacht. Doch neben den enthaltenen Frequenzen sind auch die Abklingraten der Teiltöne und der Frequenz-Durchmesser-Wert klangliche Einflüsse. Diese bezog P. Roozen-Kroon, unterstützt von D. van Campen, A. Houtsma und A. Schoofs, in einem mehrstufigen Prozess zur Optimierung einer Dur-Terz-Glocke ein. Außerdem entwickelten P. Roozen-Kroon, A. Schoofs und D. van Campen eine schnelle Methode basierend auf Design of Experiment und Regressionstechniken zur numerischen Strukturoptimierung von Glocken [10]. In [11] wurde eine Verfahrensweise vorgestellt, die Frequenzverhältnisse und akustische Dämpfungswerte als Zielwerte im Optimierungsprozess nutzt. Diese wurde angewandt um eine Dur-Terz-Glocke mit den akustischen Dämpfungswerten einer Moll-Terz-Glocke zu erstellen.
Im Gegensatz zu diesen theoretischen Forschungsarbeiten realisierten Wissenschaftler [1] [12] mit Hilfe eines erfahrenen Glockengießers ein Glockenspiel aus 47 Dur-Terz-Glocken, deren Profile sie zuvor strukturoptimiert hatten.

Methodik

Vor der Festlegung des Zielklanges und der Erstellung des Modells werden die Rahmenbedingungen ermittelt. Diese sind durch die gegebenen Guss- und Transportmöglichkeiten vorgegeben. Um die Glocke noch mit zwei Personen transportieren zu können, muss ihre Masse laut [13] weniger als 50 kg betragen. Zudem dürfen ihre Maße eine Höhe von $h_{max} = 50\,\mathrm{cm}$ und einen Durchmesser von $\emptyset_{max} = 40\,\mathrm{cm}$ durch die technischen Möglichkeiten bedingt nicht überschreiten. Ebenfalls für den Guss vorgegeben ist, dass die Zinnbronze CuSn6 verwendet wird und steigender und fallender Guss als Optionen in Betracht gezogen werden. Durch die maximalen Abmessungen ist wegen des Frequenz-Durchmesser-Wertes ($fd = 200\,\mathrm{Hz} \cdot \mathrm{m}$) eine niedrigste Frequenz von 500 Hz gegeben.
Unter Beachtung dieser Voraussetzungen wird ein A9 Akkord als Zielklang gewählt, welcher die für Cool Jazz typische Akkordfolge enthält. Die enthaltenen Frequenzen sind gemeinsam mit den Verhältnissen dieser zur Fundamentalen und der entsprechenden musikalischen Note in Tabelle 1 aufgelistet.

Um ein gutes Modell zur Optimierung auf diesen Klang zu erstellen, werden zunächst die Schwingungen einer traditionellen Moll-Terz-Glocke betrachtet (vgl. Abbildung 1), um abzuschätzen an welchen Stellen sich die entsprechenden Teiltöne ausbilden. Zudem werden die Frequenzverhältnisse dieses Akkords mit denen einer Moll-Terz-

Tabelle 1: Die Bestandteile des gewünschten A9 Akkords.

Partialtöne	f_{ideal} / Hz	Verhältnis	Note
Fundamentale	880,0	1	a“
Prime	1760,0	2	a““
Terz	2217,4	2,5198	cis““
Quinte	2637,0	2,9966	e““
Septime	3135,6	3,5632	g““
None	3951,0	4,4898	h““

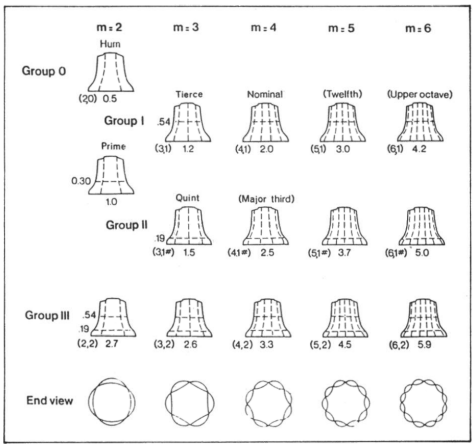

Abbildung 1: Glockenschwingungsformen und Zuordnung der jeweiligen Teiltöne einer Terz-Glocke [9]

Glocke und einer Dur-Terz-Glocke verglichen.

- Moll-Terz-Glocke: 1 : 2 : 2,4 : 3 : 4
- Dur-Terz-Glocke: 1 : 2 : 2,5 : 3 : 4
- A9 Akkord: 1 : 2 : 2,52 : 2,99 : 3,56 : 4,49

Auf Grund der geringeren Differenz zur Dur-Terz-Glocke wird die Form einer solchen als Ausgangspunkt für die Modellerstellung und Optimierung gewählt. Das Modell wird in COMSOL® erstellt. Die Parametrisierung dessen wird angelehnt an die Glockenschwingungsformen einer Terz-Glocke (Abbildung 1) erstellt. Über verschiedene Höhen und Radien kann die Form und somit der Klang verändert werden. Zur Optimierung wird unter Nutzung von LiveLink™ zu MatLab ein naturanaloger Optimierungsalgorithmus erstellt. Die hierfür genutzte Zielfunktion ist ausgelegt die Abweichungen der simulierten zu den gewünschten Frequenzverhältnissen zu minimieren.

Glockenguss

Anhand des optimierten Modells werden die Gussformen für die Glocke erarbeitet. Hierbei besteht jeweils der Formhohlraum aus dem Negativ dieses Modells und dem Gießsystem. Letzteres setzt sich aus dem Anschnitt, dem Laufsystem, dem Filtersystem, dem Eingusstrichter und dem Speiser zusammen. Bei der Erstellung der Formen ist zudem die Art des Gusses entscheidend.
Fallender und steigender Guss haben unterschiedliche Vor- und Nachteile. Fallender Guss ermöglicht die Einsparung des Kreislaufmaterials durch ein verkürztes Gießsystem. Die schnelle Formfüllung erlaubt es zudem, dass mit minimaler Gießtemperatur gegossen wird. Bei steigendem Guss füllt sich die Form hingegen weitestgehend laminar. Dies bedingt, dass Verunreinigungen aufsteigen und Formschädiungen unwahrscheinlicher werden.
Außerdem muss für qualitativ gute Formen bei der Gestaltung beachtet werden, dass sie gießgerecht, erstarrungsgerecht, formgerecht, bearbeitungs-, sowie beanspruchungsgerecht und auch putz- und prüfgerecht sind ([14], [15]).
Mittels der Software MagmaSoft®5 wird der Guss simuliert und das Gießsystem optimiert. Das Programm nutzt zur Berechnung der Modelle die Finite-Differenzen-Methode. Bei dieser wird das jeweilige Modell mittels einer endlichen Anzahl an rechteckig angeordneten Gitterpunkten diskretisiert und die zu lösende Differentialgleichung über ein System an Differentialgleichungen approximiert. Die Vorgänge der Formfüllung und Erstarrung lassen sich mittels Angabe von Materialparametern, Wärmeübergängen und Prozessrandbedingung berechnen ([16]).
Mittels dieser Simulationen werden zwei Systeme als gleichermaßen geeignet, jedoch mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen, ermittelt. Deshalb werden je zwei Formen, die additiv gefertigt werden, pro Gießsystem genutzt. Bei den geeigneten Gießsystemen ist bei der Hohlform die Glockenaufhängung jeweils oben in der Gussform positioniert. Es wird sowohl ein fallender Guss, als auch ein steigender Guss als passend ermittelt.
Die so gegossenen Glocken sind in Abbildung 2 dargestellt. Hiervon werden die sich während des Gusses an den Formteilungen ausgebildeten Grate entfernt, das Gießsystem abgetrennt und sie werden zur Reinigung der Oberfläche sandgestrahlt. Bei den Glocken S2 und F2 (siehe Abbildung 2) wird ansonsten keine Bearbeitung vorgenommen. Die Glocken S1 und F1 (siehe Abbildung 2) werden geschliffen und angelassen, was zu einer Verfärbung der Oberfläche führt. Außerdem werden bei allen vier Glocken die Aufhängungen mit einem Lochdurchmesser von 10 mm gebohrt.

Abbildung 2: Die gegossenen Glocken: a) steigend S1, b) fallend F1, c) steigend S2, d) fallend F2

Bei den Glocken F1 und S2 treten Gussfehler auf. Bei F1 ist ein Hohlraum an der unteren Flanke entstanden, der auf einen Formbruch zurückzuführen ist. Die Glocke S2 weist eine glatte und symmetrische Kerbe an der unteren Flanke auf, welche durch einen Gaseinschluss hervorgerufen ist.

Messungen

Um die gegossenen Glocken zu bewerten und den Unterschied zwischen dem Modell und diesen zu ermitteln, werden sowohl geometrische, als auch akustische Messungen durchgeführt.

Geometrische Messung

Mittels des optischen Koordinatenmesssystems ATOS II 400 und der zugehörigen Software werden die Oberflächen aller vier Glocken vermessen. Mittels verschiedener Techniken kann die ermittelte Oberfläche einer jeden Glocke über das Modell gelegt werden und somit die entsprechende Abweichung von letzterem bestimmt werden.
Insgesamt zeigen sich bei allen vier Glocken nur geringe Unterschiede zum Modell. In Abbildung 3 sind die Differenzen zwischen gegossener Glocke und Modell für die beiden fallend gegossenen F1 und F2 dargestellt. Bei diesen beiden sind die Abweichungen größer als bei den steigend gegossenen S1 und S2. Alle vier zeigen fast ausschließlich positive Differenzen zum Modell, welche im Flankenbereich der Glocken S1 und S2 weniger als 0,5% der Glockengröße ausmachen.

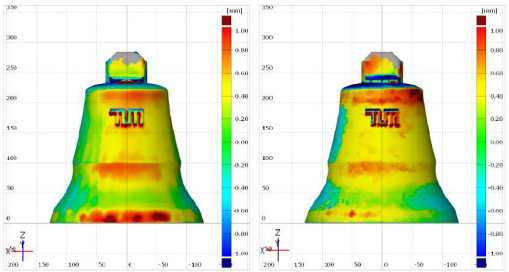

Abbildung 3: Abweichung der optisch vermessenen Oberfläche der Glocken vom CAD-Modell (links: F1, rechts: F2)

Akustische Messungen

Die akustischen Messungen werden im reflexionsarmen Raum des Lehrstuhls für Audio-Signalverarbeitung an der Technischen Universität München durchgeführt. Hierin werden jeweils die zwei Glocken F2 und S2 frei schwingend aufgehängt und von einem Impulshammer angeregt. Auf beiden wird je ein Beschleunigungsaufnehmer mit Wachs befestigt, sowie der Schall mittels Mikrophon aufgenommen.
Abbildung 4 zeigt die mit dem Beschleunigungsaufnehmer und dem Mikrophon gemessenen Spektren einer Glocke.
Hierbei zeigen sich als Frequenzen der Partialtöne 895 Hz, 1857 Hz, 2264 Hz, 2803 Hz, 3202 Hz und 4004 Hz.

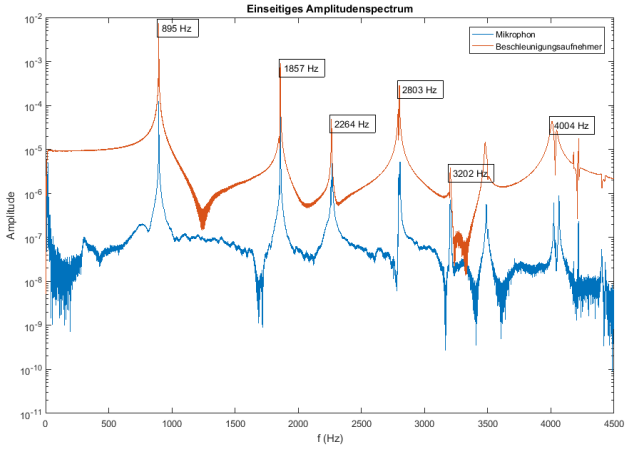

Abbildung 4: Spektren der Glocke F2 aufgenommen mittels Beschleunigungsaufnehmer (rot) und Mikrophon (blau), hier einheitenlos dargestellt

Die Frequenzverhältnisse dieser Glocke sind also 1 : 2,07 : 2,53 : 3,13 : 3,58 : 4,47. Verglichen mit den Frequenzverhältnissen des A9 Akkords (1 : 2 : 2,52 : 2,99 : 3,56 : 4,49) fällt auf, dass die Verhältnisse nur geringe Abweichungen aufweisen. Der größte Unterschied ist bei der Quinte zu verzeichnen.

Fazit

Abschließend ist festzustellen, dass die gegossenen Glocken sich nur geringfügig vom Modell unterscheiden. Dies gilt sowohl für die Geometrie, als auch für die Frequenzverhältnisse des gemessenen Klanges. Die Grundfrequenz, wie auch die anderen Teiltöne, weichen jedoch deutlich von den gewünschten ab, da bereits geringe geometrische Abweichungen einen starken Einfluss hierauf haben. Im subjektiven Höreindruck zeigt sich jedoch auch, dass die Obertöne schnell abklingen und somit der A9 Akkord nur schwer hörbar wird.
Bei dem Prozess von der Wahl eines Zielklanges hin zur Vermessung der gegossenen Glocken haben sich mehrere Herausforderungen gezeigt. Die Wahl des Zielklanges kann bei dem gewählten Verfahren nicht beliebig gewählt werden. Außerdem hat die Parametrisierung des Modells einen großen Einfluss auf die Möglichkeit diesen zu erreichen. Wie einige der zu Beginn erwähnten Studien zur Optimierung von Glocken zeigen, gibt es verschiedene Möglichkeiten die Zielfunktion zu gestalten. Und da der Guss ein stochastischer Prozess ist, lässt sich das Endergebnis nur bedingt vorher berechnen.
Außerdem ergeben sich mehrere mögliche weitere Schritte. So können nach einer Auralisierung der Glocke psychoakustische Parameter in die Optimierung einbezogen werden. Außerdem kann eie flexiblere Parametrisierung oder freie Topologieoptimierung eine freiere Wahl des Zielklanges erlauben. Zudem sind lautere Obertöne eine weitere Gestaltungsoption. Damit zusammenhängend kann die Nutzung anderer Dämpfungsmodelle zu besseren Ergebnissen führen.

Dank

Vielen Dank an Prof. Dr.-Ing. Seeber und Herrn Kolotzek dafür, dass sie uns den reflexionsarmen Raum zur Verfügung gestellt und bei den Messungen unterstützt haben.

Literatur

[1] Schoofs, A., Van Asperen, F., Maas, P., & Lehr, A. (1987). I. computation of bell profiles using structural optimization. Music Perception: An Interdisciplinary Journal, 4(3), 245-254.

[2] Roozen-Kroon, P. J. M. (1992). Structural optimization of bells. Technical University of Eindhoven, Dissertation.

[3] Wenk L. (2015). Das traditionelle Lehmformverfahren zum Herstellen von Läuteglocken, Giesserei. Nr. 09/2015. Seiten 110–119.

[4] Hofmann, M. (2014). Die Apoldaer Glockengießerei: Alte und neue Geheimnisse, 1. Auflage. Weimar: Wartburg-Verl.

[5] Frauenhofer Institut für Fertigungstechnik und angewandte Materialforschung. Gießereitechnologie: Von der Idee zum Produkt. Abgerufen von https://www.ifam.fraunhofer.de/content/dam/ifam/de/documents/Formgebung_Funktionswerkstoffe/Giesserei-Technologie/Giessereitechnologie_fraunhofer_ifam.pdf

[6] Schoofs, B., van Asperen, F., Maas, P., & Lehr, A. (1985). Experimental design theory and structural optimization design for a major-third church bell. CAMP'85, 100, 2.

[7] McLachlan, N., Nigjeh, B. K., & Hasell, A. (2003). The design of bells with harmonic overtones. The Journal of the Acoustical Society of America, 114(1), 505-511.

[8] Fleischer, H. (1997). Glockenschwingungen. Ser. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik. Neubiberg: Inst. für Mechanik Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik Univ. der Bundeswehr München, Vol. 1.

[9] Fleischer, H. (2007). Hörversuche mit Glockenklängen. Ser. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik. Neubiberg: Inst. für Mechanik, Vol. 1.

[10] Kroon, P. J. M., Schoofs, A. J. G., van Campen, D. H., Brebbia, C. A., & Hernandez, S. (1989). Fast numerical shape optimization of bells using design of experiment and regression techniques. In Computer aided optimum design of structures: proceedings of the 1st international conference, Southampton, UK, June 1989 ez (pp. 115-124). Springer.

[11] van HOUTEN, M. H., Schoofs, A. J. G., & van CAMPEN, D. H. (1997). Structural and acoustic optimization of bells. In Proceedings of the 2nd world congress of structural and multidisciplinary optimization: May 26-30, 1997, Zakopane, Poland. Vol. 2. Wydawnictwo Ekoinzynieria.

[12] Lehr, A. (1987). III. From Theory to Practice. Music Perception: An Interdisciplinary Journal, 4(3), 267-280. doi:10.2307/40285370

[13] Standard, D. I. N. (1987). 33411: Körperkräfte des Menschen. Maximale statische Aktionskräfte–Teil, 4.

[14] Fritz, A. H. & Schulze, G. (2008). Fertigungstechnik, 8. Auflage, Ser. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

[15] Draugelates, U. (1983). Handbuch der Fertigungstechnik. Bd. 1: Urformen. G. Spur und Th. Stöferle (Hrsg.). Carl Hanser Verlag, München, Wien 1981. XX, 1024 Seiten, 971 Abb., 138 Tab., Geb., Einzelbandpreis DM 478,–, Subskriptionspreis (bei Abnahme des Gesamtwerkes): DM 398,–. Materials and Corrosion, 34(9), 493-494.

[16] Martin, H. (2011). Numerische Strömungssimulation in der Hydrodynamik: Grundlagen und Methoden. Springer-Verlag.