

Simulation des Klöppelanschlags – Einfluss der Klöppelgestaltung auf die Beanspruchung und den Klang der Glocke

Andreas Rupp¹, Denis Spiess¹, Michael Plitzner¹

¹ Hochschule Kempten, ECC-ProBell[®], 87435 Kempten, E-Mail: info@ecc-probell.de

Einleitung

Der Anschlag des Klöppels an die Glocke beim Läuten bringt die Glocke zum Erklingen; Lätewinkel, Glockenstubenakustik und Schallläden beeinflussen den Klang der Glocke, wie er außerhalb des Turmes gehört wird. Die Abstimmung des dynamischen Systems von Glocke mit Joch und Klöppel im Zusammenwirken mit dem eingestellten Lätewinkel und der Lätemaschine ist wesentlich für die Intensität des Anschlags. Dabei bestimmt die sich aus den Einstellungen ergebende Anfluggeschwindigkeit mit der wirksamen Masse des Klöppels den Impuls und damit die Anschlagintensität. Die Materialbeanspruchung der Glocke mit sich ergebender begrenzter Lebensdauer und der Schlagverschleiß sowie die Lautstärke resultieren aus dieser Anschlagintensität. Bei geeignet ausgewählten Lätewinkeln und Klöppelmaterialien konnten in den vergangenen Jahren bei vielen Projekten jedoch noch weitere Parameter zur Beeinflussung des Klanges einer Glocke beobachtet werden. Die klangliche Wirkung des Klöppelanschlags wird deutlich durch die Dauer des Anschlags beeinflusst, da sie einen direkten Einfluss auf die in der Glockenstruktur angeregten Schwingungsfrequenzen hat. Dabei gilt: je länger die Anschlagdauer, desto niederfrequenter das Anregungsspektrum. Für eine ausgewogene Anregung der hohen und tiefen Teiltöne einer Glocke ist im Allgemeinen eine gute Anregung der niederfrequenten Töne und eine in Maßen abgeschwächte Anregung der höheren Töne vorteilhaft. Für eine Optimierung des Klangverhaltens einer läutenden Glocke rückt damit die Betrachtung die Anschlagdauer immer mehr in den Fokus.

Im Folgenden wird über Untersuchungen zu den Einflussgrößen auf die Anschlagdauer von Klöppel und Glocke berichtet, ein dafür geschaffenes Simulationsmodell und die Ergebnisse vorgestellt.

Klöppelformen und Glockenklang in der Praxis

Bei vielen Untersuchungen von ProBell an Glocken war die Hauptzielsetzung, die Beanspruchung der Glocke zu bestimmen und oft das Risiko für Schäden auf ein vertretbares Maß herabzusetzen. Durch die Berücksichtigung von kulturhistorischen und denkmalpflegerischen Aspekten konnte immer wieder beobachtet werden, dass sich der Klang der Glocke durch diese Parameter veränderte. Besonders konnte eine Konzentration der Klöppelmasse auf den Ballen durch Verkürzung des Vorschwungs für Sanierungsprojekte genutzt werden, um eine grundtönigere und damit ausgewogenere Klangfaltung zu erreichen.



Abbildung 1: v.l.n.r: Mittelzell alt/neu, Fribourg alt/neu (Jeweils Glocke 1)

Zu deutlichen Klangveränderungen führte dies beispielsweise bei den Glocken der Kathedrale St. Nikolaus in Fribourg (CH) und des Marienmünsters Mittelzell auf der Insel Reichenau (Abb. 1). Die Klangentfaltung dieser Geläute konnte dadurch nachweislich verbessert werden, da sowohl jede Glocke in sich ausgewogener als auch die Glocken im Zusammenspiel einheitlicher erklingen. Die neuen Klöppel besitzen alle einen kürzeren Vorschwung und einen deutlich biegesteiferen Übergang zwischen Klöppelkugel und Vorschwung. Aufgrund der Einzigartigkeit jedes Glocken-Systems und der verschiedenen Randbedingungen unterscheiden sie sich jedoch in ihrer speziellen Form deutlich voneinander. Jeder Klöppel wurde in seinen dynamischen Eigenschaften und mit der Wahl des Lätewinkels für die vorhandenen Lätemaschinen anhand der dynamischen und örtlichen Computer-Modelle so für die einzelne Glocke optimiert.

In den erwähnten Projekten wurde aber darüber hinaus die Klöppelgestaltung dazu genutzt, gezielt einen grundtönigeren Klang zu erreichen, der meist als wohltönender empfunden wurde. Jedoch wird der erreichte neue Klang zum Teil aber auch als zu mulmig oder dumpf beschrieben. Eine zu grundtönige Anregung stellt somit kein Optimum dar, da bei zu geringen Obertönen im Klang der „Glanz“ des Geläuts leidet. Die Gestaltung des Klöppels kann also neben der Einstellung einer passgenauen Dynamik von Glocke und Klöppel für ein geringes Risiko für Schäden auch dazu genutzt werden, den Anschlag für die Ausbildung eines guten Klangs geeignet anzupassen. Hierzu ist die Kenntnis der einzelnen Einflussparameter und deren Auswirkung auf die Anschlagintensität, die Beanspruchung und den Klang systematisch zu erforschen. Dies ist nur mit einer Computer-Simulation möglich, da die Veränderung eines physikalischen Parameters in der Realität sofort die Veränderung einer ganzen Anzahl weiterer Parameter nach

sich zieht und damit eine gezielte Untersuchung, auch bei extrem hohem Aufwand der Herstellung von vielen Klöppeln, keine brauchbaren Ergebnisse liefert.

Physik des Klöppelanschlags

Die Anschlagintensität beschreibt den Impuls, den der Klöppel auf die Glocke ausübt und ist somit direkt proportional zur Anfluggeschwindigkeit und wirksamen Masse des Klöppels. Die für den Impuls relevante Masse entspricht nicht der Klöppelgesamtmasse, da die Klöppelbewegung eine Drehung um die Aufhängung darstellt und die Klöppelform nicht biegesteif ausgeführt ist. Je nach geometrischer Ausführung von Schaft und Vorschwung kommt es zu einer Biegung der Struktur, so dass die im Schaft und Vorschwung enthaltenen Massen nur anteilmäßig in der wirksamen Masse m_{eff} des Klöppels enthalten sind. Die klangliche Wirkung des Klöppelanschlags mit seinem sich aus Masse und Geschwindigkeit ergebenden Impuls wird durch die Dauer des Anschlags beeinflusst. Eine nennenswerte Anregung der niederen Teiltöne benötigt hier eine vergleichsweise hohe Intensität des Anschlags. Hat der Anschlag nur eine sehr kurze Berührungsdauer, so ist der anregende Impuls ebenfalls sehr kurz und das dazugehörige Anregungsspektrum umfasst einen großen Frequenzbereich, bis herauf zu hohen Frequenzen.

Nach Heinrich Hertz [1] sinkt die Berührungsdauer zweier fester elastischer Körper logarithmisch mit der relativen Anfluggeschwindigkeit. Eine Erhöhung der Masse des stoßenden Körpers führt zu einer annähernd linear-proportionalen Zunahme der Berührungsdauer. Die Anfluggeschwindigkeit und die Klöppelmasse werden bei der Auslegung des dynamischen Systems Glocke/Klöppel so eingestellt, dass das Risiko für Schäden aufgrund niedriger Beanspruchungen gezielt begrenzt wird.

Die traditionell von ProBell vorgenommene Klöppelauslegung ergibt sich also vornehmlich aus den Anforderungen des dynamischen Systems bei festgelegten Lätewinkel wegen der Schlagzahl. Dabei ergibt sich eine „übliche“ Anschlagdauer abhängig von Klöppelform und –material, von seiner Masse und der eingestellten Anfluggeschwindigkeit. Diese Vorgehensweise für ein definiertes Risiko für Ermüdungsschädigung ist vielfach erprobt und wird häufig anhand der sich tatsächlich an den Glocken ergebenden Beanspruchungen, die mit einem Dehnungsmesstreifen direkt gegenüber den Anschlagstellen beidseitig gemessen werden können.

Erste Untersuchungen zum Einfluss der Berührungszeit an Glocken führten M. Grützmaker et. al. in den 1960er-Jahren durch. Sie stellten Versuche zum Kontaktverhalten zwischen Klöppel und Glocke hinsichtlich der Abhängigkeit des Klangbildes von Masse, Material, Form und Anschlag des Klöppels durch. Dabei ergab sich ein Zusammenhang der Amplitudenverteilung der Teiltöne mit der Berührungsdauer des Klöppels und sie folgerten: Maßnahmen, die eine Verlängerung der Berührungsdauer zur Folge haben, führen dazu, dass die höheren Teiltöne abgeschwächt und die tieferen verstärkt werden. Grützmaker et. al. verwendeten den Kontaktbereich

zwischen Klöppel und Glocke als Schalter in einem elektrischen Stromkreis und integrierten über die geflossene Ladung. Mögliche durch das Schwingverhalten des Klöppels bedingte Mehrfachberührungen wurden somit nicht berücksichtigt. Die effektive Impulsdauer konnte daraus nicht genau bestimmt werden.

Die messtechnische Erfassung der Anschlagdauer, die maßgeblich den Anschlagimpuls zusammen mit der effektiven Masse des Klöppels bestimmt, erfolgt aus der Klöppelbeschleunigung während eines Anschlags. Aus dem Verlauf der Beschleunigung während des Anschlags kann die maximale Beschleunigung $a_{K,max}$ und die Anschlagdauer t_{Anschlag} gemäß Abb. 2 bestimmt und daraus die Anfluggeschwindigkeit abgeschätzt werden - der Beschleunigungsverlauf ist annähernd Sinus-förmig, so dass gilt:

$$\bar{v}_{\text{Anschlag}} = \frac{a_{K,max}}{\sqrt{2}} \cdot t_{\text{Anschlag}} \quad (1)$$

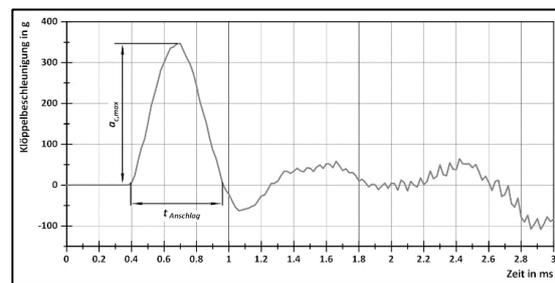


Abbildung 2: Beispiel des Beschleunigungs-Zeit-Verlaufs am Klöppelballen beim Anschlag.

Computer-Simulation

Die Gestaltung des Klöppels kann dazu genutzt werden, den Anschlag nach Intensität, Dauer und Verlauf gezielt zu verändern. Hierzu sind die einzelnen Einflussparameter und deren Auswirkung auf die Anschlagintensität, die Beanspruchung und den Klang systematisch zu erforschen. Dies ist nur mit einer Computer-Simulation möglich. Die Simulation derartiger Kurzzeit-Vorgänge ist sehr aufwendig und zuverlässige Programme sind erst seit wenigen Jahren z.B. im Automobilbau für die Crash-Simulation entwickelt worden. Im ECC-ProBell konnte mit freundlicher Unterstützung der Fa. DYNAMore das FEM-Simulationsprogramm LS-DYNA für diese hochdynamischen Problemstellungen und die komplexen Kontaktverhältnisse zwischen Klöppel und Glocke eingesetzt werden. Hierzu wurde ein Finite-Element Modell von Glocke und Klöppel erarbeitet:

Glocke mit einem Durchmesser an der Schärfe von 800 mm und einem Gewicht von 286 kg.

Der Klöppel wurde als Standardform mit einem Gewicht von ca. 10 kg und einem Ballendurchmesser von 100 mm ausgewählt und dann in den unterschiedlichen Parametern variiert.

Das Gesamtmodell besteht aus 271.000 Tetraeder-Elementen und ist im Kontaktbereich auf die Elementgröße von 1,0 mm

verfeinert (Abb. 3). Die Berechnung eines Anschlags simuliert den Anschlag selbst mit einer Dauer von ca. 0,5 ms bis maximal 100 ms danach. Für die Simulation jedes Anschlags und die sich daraus in Glocke und Klöppel ergebenden Schwingungen für diese 100ms benötigen die schnellen Rechner der Hochschule Kempten ca. 8 Tage.

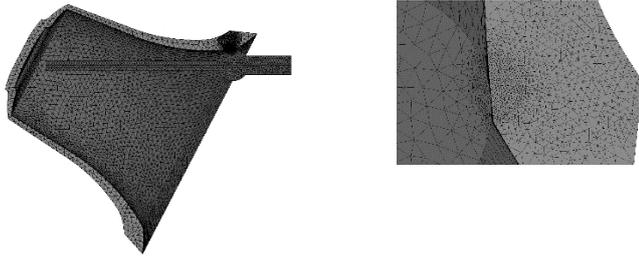


Abbildung 3: Schnitt durch das Simulationsmodell (links), Detailansicht des Kontaktbereichs (rechts).

Zur Untersuchung der wesentlichen Anschlag- und Schwingungsgrößen unter Variation einzelner Einflussgrößen wurden die Zeitreihen der Klöppelbeschleunigung in Ballenmitte zur Ermittlung von Anschlagdauer und Impuls und die Beanspruchung der Glocke ausgewertet. Zur Auswertung wurden dann die maximale Beschleunigung und Dehnung während des Anschlags ausgewertet und die Anschlagdauer aus dem Beschleunigungsverlauf gem. Abb. 2 ermittelt.

Die wesentlichen Parameter, die den Anschlagsverlauf beeinflussen, sind: Die Anfluggeschwindigkeit, die sich aus der Auslegung des dynamischen Systems ergibt, die Klöppelmasse, der geometrische Ballendurchmesser, die Masseverteilung durch Schaftdicke und die Masseverteilung durch die Vorschwungform.

Die sich bei der Variation der genannten Einflussparameter ergebende Verschiebung des Schwerpunktes sowie von Trägheitsmomenten braucht hier nicht berücksichtigt zu werden, da sie durch die Festlegung der Anfluggeschwindigkeit vergleichbar werden.

Als Standardklöppel wurde ein Stahl-Klöppel mit für die ausgewählte Glocke als typisch geltenden Abmaßen und einem Gewicht von 10,2 kg verwendet. Schaft und Vorschwung wurden für die wohl-definierte Variation ihrer Abmaße als zylindrisch vereinfacht, mit einem Schaftdurchmesser von 30 mm und einem Vorschwungdurchmesser von 60 mm. Die Klöppelkugel wurde mit einem Durchmesser von 100 mm modelliert (Abb. 4).

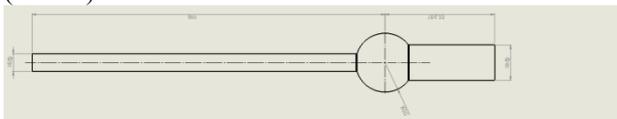


Abbildung 4: Standardklöppel.

Aus diesem Standardklöppel wurden folgende Variationen abgeleitet: 1) Variation der initialen relativen Anfluggeschwindigkeiten von 0,75 m/s, 1,00 m/s und 1,25 m/s. 2) Variation der Gesamtmasse unter Beibehaltung der Geometrie auf 5,12 kg, 10,24 kg, 15,35 kg und 20,47 kg. 3) Variation des Klöppelkugeldurchmessers von 100 mm auf

126 mm (doppeltes Volumen) unter Beibehaltung des Standardgewichtes. 4) Variation der Schaftdicke zu 20 mm, 25 mm, 45 mm und 60 mm. Jede Variation wurde hier zum einen mit der Standard-Dichte berechnet, wodurch sich die Gesamtmasse verändert und zum anderen mit angepasster Dichte, um die Auswirkungen der Schaftvariation bei konstanter Gesamtmasse feststellen zu können. 5) Variation der Vorschwunggeometrie zu 40% und zu 95% des Kugeldurchmessers bei konstantem Standard-Gewicht.

Simulationsergebnisse

Einfluss der Anfluggeschwindigkeit:

Mit zunehmender relativer Anfluggeschwindigkeit des Klöppels zur Glocke steigen die maximale Dehnung der Glocke und die Klöppelbeschleunigung linear an; die Anschlagdauer nimmt hierbei logarithmisch ab. Diese Veränderungen entsprechen den physikalischen Zusammenhängen wie bei H. Hertz beschrieben.

Damit wird deutlich, dass die Anschlagintensität und die daraus resultierende Beanspruchung der Glocke linear zusammenhängen und zuverlässig durch die Auslegung des dynamischen Systems anhand der von ProBell entwickelten Computermodelle ausgelegt wird.

Bei einer Variation der Anfluggeschwindigkeit von $\pm 25\%$ ergibt sich eine Verkürzung bzw. Verlängerung der Anschlagdauer von ca. $\pm 6\%$

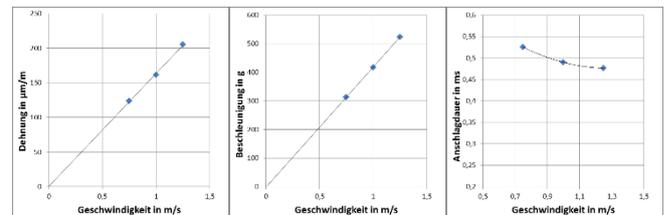


Abbildung 5: Einfluss der Anfluggeschwindigkeit des Standardklöppels auf die maximale Dehnung und Beschleunigung sowie Anschlagdauer.

Einfluss der Klöppelmasse:

Eine durch veränderte Dichte gesteuerte Variation der Klöppel-Gesamtmasse zwischen 5 kg und 20 kg bei konstanter Geometrie des Standardklöppels und konstanter Anfluggeschwindigkeit von 1 m/s führt zu (Abb. 6):

- logarithmischer Zunahme der Glockendehnung als Maß für das Schadensrisiko.
- logarithmische Abnahme Klöppelbeschleunigung als Maß für die Anschlagintensität
- linearer Anstieg der Anschlagdauer, um etwa 17% bei Erhöhung der Masse um Faktor 1,5

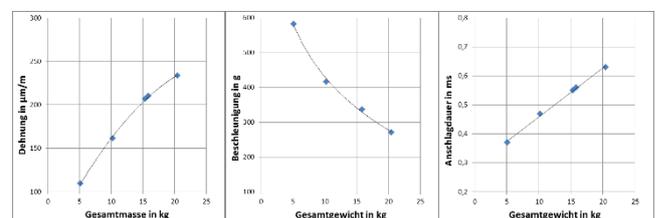


Abbildung 6: Einfluss der Klöppelmasse des Standardklöppels durch Variation der Dichte auf die maximale Dehnung und Beschleunigung sowie Anschlagdauer.

In Abb. 7 ist der Zeitverlauf der sich direkt während und nach dem Anschlag einstellenden Dehnung der Glocke bei Variation des Gesamtgewichts wiedergegeben. Neben dem mit zunehmender Masse deutlichen Anstieg der maximalen Dehnung und der Anschlagdauer fällt insbesondere auf, dass im Signal bei einem Anschlag eines Klöppels mit niedriger Masse deutlich mehr Anteile mit höheren Frequenzen zu erkennen sind.

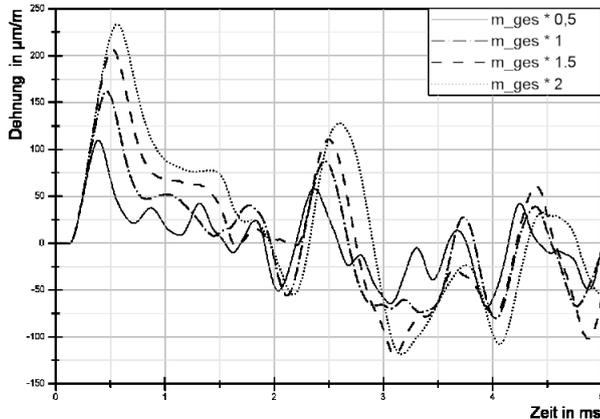


Abbildung 7: Dehnungszeitverlauf bei Anschlägen mit variiert Klöppelmasse.

Einfluss des Schaftes:

Bei Variation der Schaftdicke wird die sich ergebende Gewichtsveränderung durch eine Anpassung der Klöppeldichte kompensiert. Bei reduzierter Dichte und konstantem Gesamtgewicht sind die Auswirkungen der Schaftvariation auf die untersuchten Parameter sehr gering (Abb. 8).

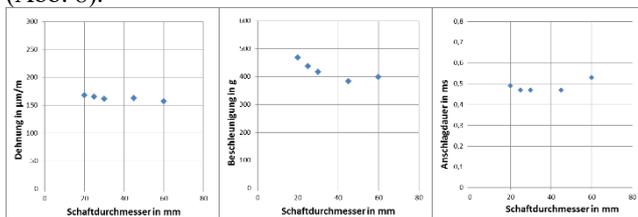


Abbildung 8: Einfluss der variierten Schaftdicke bei gleichbleibendem Klöppelgewicht

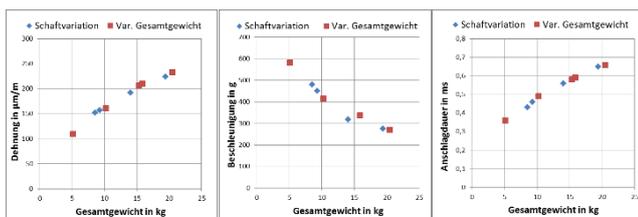


Abbildung 9: Einfluss der variierten Schaftdicke bei gleichbleibender Dichte.

Die Vergrößerung der Schaftdicke führt bei gleichbleibender Dichte (Abb. 9) zu einer Erhöhung des Klöppelgewichts. Die Veränderung der dynamischen Eigenschaften braucht hier nicht berücksichtigt werden, da die Anflugeschwindigkeit in der Simulation konstant gehalten wird. Abb. 9 macht

deutlich, dass sich der variierte Schaftdurchmesser mit wegen der konstanten Dicke zunehmendem Klöppelgewicht, gleich wie eine Masseänderung des gesamten Klöppels wie zuvor durch Variation der Dichte des Klöppels ergibt. Es ergibt sich also insbesondere kein Hinweis auf einen Einfluss der Auslegung des Schaftes auf die Anschlagdauer.

Einfluss des Vorschwungs:

Die Variation des Vorschwungs von einem langen und dünnen bis zu einem sehr dicken und kurzen Vorschwung kann wiederum ohne Berücksichtigung ihres Einflusses auf das dynamische System erfolgen, da eine feste Anflugeschwindigkeit eingestellt ist. Das Gewicht des Klöppels bleibt erhalten, so dass sich einzig und allein die Form des Vorschwungs in den Ergebnissen zeigt (Abb. 10). Der Klöppel mit gedrungenem Vorschwung hat eine etwa 10% höhere Anschlagdauer und führt zu einem grundtönigeren Klang.

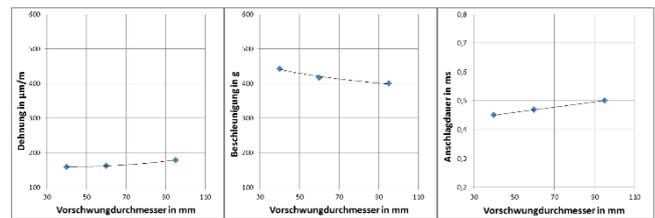


Abbildung 10: Einfluss des Vorschwungs bei gleichem Klöppelgewicht.

Betrachtet man die maximale Dehnung beim Anschlag als Maß für das Schadensrisiko und die Anschlagdauer als Maßzahl für die Grundtönigkeit des Klangs, so lassen sich der Einfluss der Klöppelmasse und der Vorschwungform in Abb. 11 zur Verdeutlichung der sich aus den gewonnenen Erkenntnissen ergebenden gezielten Beeinflussung des Klangs darstellen.

Ein schwerer Klöppel führt zu einer längeren Anschlagdauer bei gleichzeitiger Erhöhung des Schadensrisikos. Eine ähnliche Erhöhung der Anschlagdauer kann auch durch einen gedrungenen Vorschwung erreicht werden, ohne dass das Schadensrisiko so stark ansteigt.

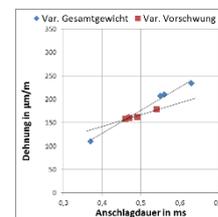


Abbildung 11: Erhöhung des Schadensrisikos über der Erhöhung der Anschlagdauer bei Variation des Klöppelgewichts oder der Vorschwungform.

Literatur

[1] Hertz, H.: Über die Berührung fester elastischer Körper. Journal für die reine und angewandte Mathematik 92, 156-171 (1881)
 [2] Grützmaier, M. et. al.: Untersuchungen an Kirchenglocken. ACOUSTICA Vol. 16 (1965/66)