

Was ist eigentlich ein ProBell-Klöppel?

Grundlegendes zur Auslegung und Berechnung optimierter Klöppel

Andreas Rupp

Hochschule Kempten, ECC-ProBell®

Zusammenfassung

Ein Glockensystem soll mit seinen Komponenten und seinem Aufbau unterschiedliche, zum Teil einander gegenläufige Anforderungen erfüllen. Dabei spielen die Dimensionierung und Formgebung des Klöppels ebenso eine Rolle, wie sämtliche Eigenschaften, die das Läuten einer Glocke im Turm mitbestimmen. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an Glocken durch das ECC-ProBell® der vergangenen Jahre hatten zum Ziel, die physikalischen Zusammenhänge im Hinblick auf Ermüdungsfestigkeit, Schlagverschleiß und Klang ingenieurmäßig zu beschreiben. Hieraus wurden Verfahren und Daten abgeleitet, die es erlauben, eine Glocke mit Klöppel einerseits schonend bei gleichzeitiger hoher musikalischer Qualität zu läuten und andererseits die Anforderungen, die aus dem Bereich baulicher Randbedingungen, Denkmalschutz und Ästhetik kommen, zu erfüllen. Dies führt dazu, dass eine optimale Lösung für jedes Glockensystem speziell erarbeitet werden kann – woraus der „ProBell-Klöppel“ resultiert.

Abstract

With its components and structure, a bell system should meet different, contradictory requirements. The dimensioning and design of the clapper determines all the properties of a ringing bell in the tower. The research and development work on bells of the ECC-ProBell® in recent years had the aim of describing the physical relationships with regard to fatigue strength, impact wear and sound. Engineering methods and data were derived that allow to set up a bell with clapper to ring under appropriate stress conditions and at the same with high musical quality. Conditions of the bell tower, cultural heritage considerations and aesthetics mean that an optimal solution for each bell system must be developed individually, leading to the unique the "ProBell-clapper" for a bell under consideration.

1 Die Glocke aus ingenieurstechnischer Sicht

Das Musikinstrument Glocke besteht aus verschiedenen Komponenten, die in ihrer Gesamtheit das Glockensystem darstellen. Zum Glockensystem gehören im Wesentlichen der Klangkörper Glocke, das Joch mit allen Anbauteilen, der Klöppel, der Glockenstuhl sowie die Läutemaschine mit ihrer Steuerung.

Die Glocke ist:

- ein Musikinstrument,
- ein kulturhistorisches Zeugnis hoher Gießereikunst,
- gemäß Läutekultur mit den Komponenten Klöppel, Joch, Glockenstuhl und Antrieb regional ausgeführt,
- eingepasst in bauliche Gegebenheiten der Glockenstube,
- ein Schwingerreger, meist hoch oben im Turm,
- eine äußerst hart beanspruchte Maschine,
- manchmal vorgeschädigt oder repariert,
- mit ihren konkreten Materialkennwerten wenig bekannt,
- bezüglich ihrer Betriebs-Geschichte meist schlecht dokumentiert,
- ...

Das Beanspruchungsgeschehen und die Schadensentstehung an Glocken wurden in den vergangenen zwei Jahrzehnten eingehend untersucht. So konnten die Ursachen und Zusammenhänge für die Entstehung und Ausbreitung von Ermüdungsschäden und Schlagverschleiß an Glocken umfassend geklärt und einer ingenieurmäßigen Betrachtung zugänglich gemacht werden. Die gezielte Beeinflussung der klanglichen Eigenschaften der läutenden Glocke durch die Optimierung der Eigenschaften der einzelnen Komponenten erlaubt die Verbesserung der musikalischen Qualität des Läutens. Die erarbeiteten Daten, die Berechnungs- und Auslegungsverfahren sowie insbesondere die verallgemeinerten Simulationsmodelle erlauben eine Betrachtung der läutenden Glocke unter den verschiedenen Anforderungen, die jeweils durch die spezifische Auslegung einzelner Komponenten erfüllt werden können:

1. **Bauliche Gegebenheiten:** Joch, Position der Drehachse, Läutewinkel, Klöppel
2. **Turmschwingungsdynamik:** Joch, Position der Drehachse, Läutewinkel, Klöppel
3. **Denkmalschutz:** Joch, Glockenstuhl, Klöppelform, Läutewinkel
4. **ästhetische Anforderungen:** Joch, Klöppelform
5. **Schlagzahl:** Joch, Position der Drehachse, Läutewinkel, Klöppel
6. **Montage:** Ausrichtung und Antrieb für Glocke und Joch
7. **Lautstärke:** Klöppeldimensionierung, Läutewinkel
8. **Lebendigkeit der Schallausbreitung:** Läutewinkel, Klöppeldimensionierung
9. **Klang durch Intonation des Klöppels:** Klöppeldimensionierung
10. **Schlagverschleiß:** Klöppel mit Aufhängung, Läutewinkel
11. **Ermüdungsfestigkeit:** Klöppeldimensionierung, Läutewinkel
12. **Läutebetrieb:** Antrieb, Steuerung und Automatisierung für Glocke und Klöppel

Glocke, Turm und Läutekultur können weitgehend als gegeben betrachtet werden. Betrachtet man dann diese unterschiedlichen Anforderungen und dazu die Komponenten des Systems, die gezielt ausgelegt werden müssen, um die Anforderungen sicher zu erfüllen, so fällt auf, dass der Klöppel bei allen Anforderungen direkt oder mittelbar eine Rolle spielt.

2 Grundlegende Zusammenhänge

Das Material des Klöppels wird so gewählt, dass der Klöppel sich nicht in die Glocke eingrät sondern sich im Bereich des Anschlags anpasst und einen etwa münz-großen Anschlagbereich ausbildet. Dieser darf nicht so groß sein, dass sich klatschende Geräusche ausbilden. Abb. 1 zeigt, dass es bei höherfestem Material zu hohen Beanspruchungen in der Glocke kommt.

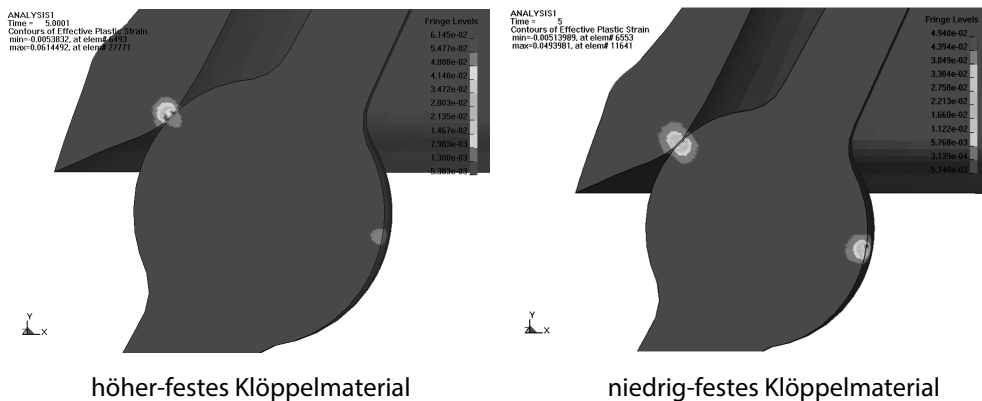


Abb. 1: Einfluss des Klöppelmaterials, plastische Verformung an den Kontaktflächen nach dem 10. Anschlag

Die Länge des Klöppels in Verbindung mit der genauen Form im Bereich der Anschlagstelle sollte derart ausgeführt sein, dass die Flugrichtung des Balls zusammenfällt mit der Normalen der Berührfläche, um während des Kontakts Scherbeanspruchungen möglichst zu minimieren, die zu einem erhöhten Schlagverschleiß führen können. (Abb. 2)



Abb. 2: Schlagverschleiß am Anschlag

Dazu sind die Position der Klöppelaufhängung und deren Ausführung sowie die Ballenform und die Anschlaghöhe aufeinander abzustimmen. Der Anschlagpunkt liegt knapp oberhalb des Übergangs von der Schärfe zur Flanke und in Richtung des größten Querschnitts, um die Glocke ausgewogen anzuregen und gleichzeitig nicht zu hoch zu beanspruchen. (Abb. 3)

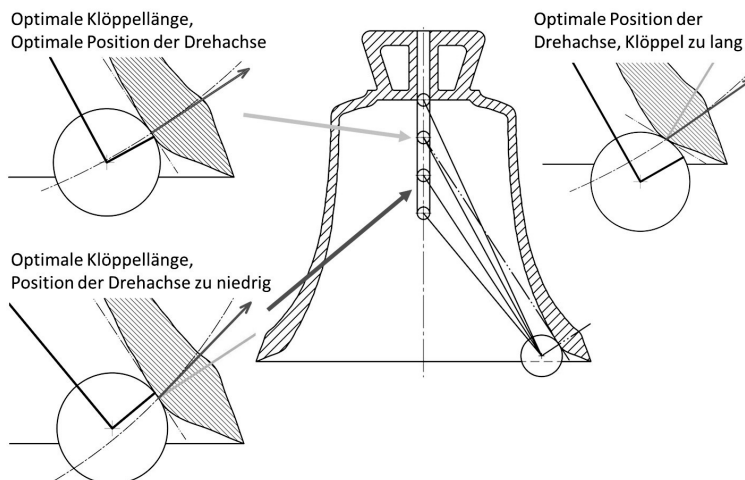


Abb. 3: Richtung des Anschlags und Kontaktflächennormale

Mithilfe der Ausführung der Klöppelaufhängung kann die Beanspruchung der Glocke im Bereich der Anschlagstellen beeinflusst werden. Von besonderer Bedeutung ist, dass die Aufhängung den Klöppel gut in seiner Schwingrichtung führt, um möglichst einen festen Anschlagpunkt zu gewährleisten. Dauernd wechselnde Anschlagbereiche führen zu einer verstärkten elasto-plastischen Beanspruchung der Glocke im Anschlagbereich, die wiederum zu erhöhtem Verschleiß führt.

Mit einer sogenannten Doppelgelenksaufhängung, wie sie vor allem in der Schweiz eingesetzt wird, kann der Klöppel im oberen Schaftbereich durch die quasi momentenfreie Aufhängung des Klöppels durch geringe Beanspruchungen entlastet werden. Zudem kann durch die kugelgelagerte Aufhängung die Dämpfung des Klöppelpendels verringert werden, was den notwendigen Lätewinkel und damit die Anschlagsintensität beeinflusst.

Die Masse des Klöppels und hier insbesondere die Masse des Ballens bestimmen im Zusammenwirken mit der Anfluggeschwindigkeit im Moment des Anschlags die Anschlagsintensität. Diese bestimmt die Lautstärke, den Schlagverschleiß in Verbindung mit Scherbeanspruchungen im Kontakt sowie die Ermüdungsbeanspruchung der Glocke. Der eingestellte Lätewinkel erlaubt ein mehr oder weniger starkes Anschlagen. Abb. 4 zeigt die Auswirkungen von Klöppelgewicht und Lätewinkel auf die rechnerische Ermüdungsschädigung eines 2min-Lätens.

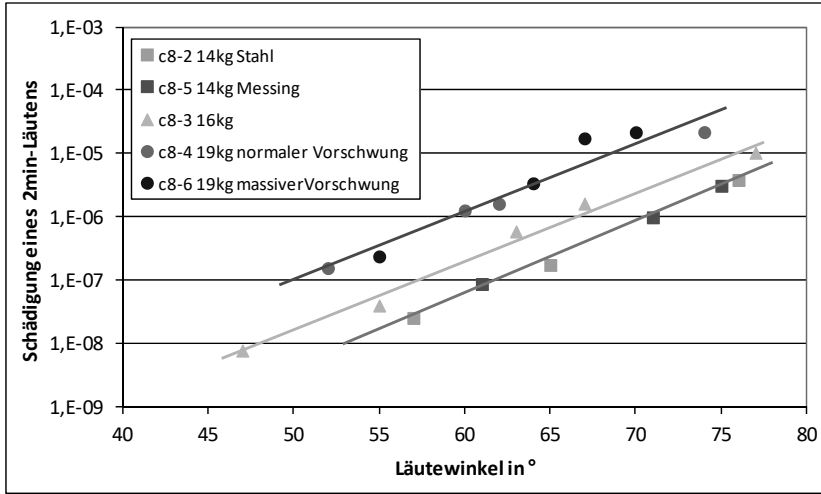
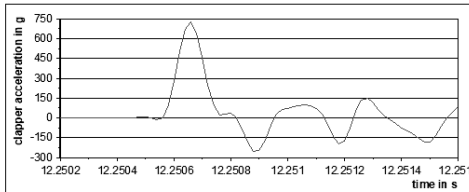


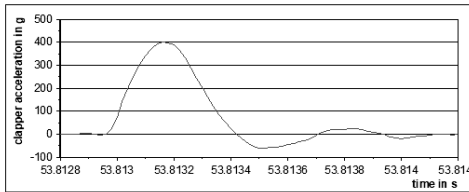
Abb. 4: Rechnerische Schädigung in Abhängigkeit der Klöppelmasse und des Läutewinkels

Das Klöppelgewicht, die Anschlagfläche sowie die Anfluggeschwindigkeit und -richtung bestimmen in Verbindung mit der Steifigkeit des Schlagrings die Dauer des Anschlags und seinen zeitlichen Ablauf. Die Dauer des Kontaktes liegt meist deutlich unter einer Millisekunde. Bei leichten Klöppeln ist sie kürzer als bei schweren Klöppeln.

Glocke: 135 kg
 Klöppel: 6 kg
 Läutewinkel: 60°



Glocke: 1060 kg
 Klöppel: 49 kg
 Läutewinkel: 60°



Glocke: 20130 kg
 Klöppel: 850 kg
 Läutewinkel: 54°

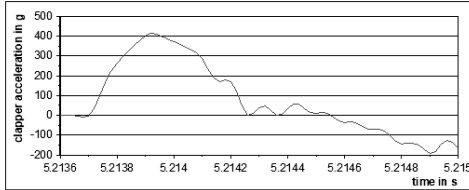


Abb. 5: Dauer und Verlauf des Anschlags für unterschiedlich schwere Klöppel

In Abb. 5 sind beispielhaft die Zeitfolgen der Klöppelbeschleunigungen eines typischen Anschlags eines leichten, mittleren und schweren Klöppels jeweils an geeigneten Glocken gezeigt. Eine kurze Anschlagdauer regt hohe Teiltöne und eine lange niederere Teiltöne verstärkt an. Die Parameter Anfluggeschwindigkeit, Klöppelmasse, Ballendurchmesser, Schaftdicke und Vorschwingform erlauben eine gezielte Beeinflussung von Lebensdauer und Klang. Insbesondere ein Klöppel mit gedrungenem Vorschwing erweist sich als vorteilhaft hinsichtlich hoher Lebensdauer und grundtönigem Klang. Mit Computersimulationen wurden systematische Analysen der Anregung einer Glocke mit unterschiedlichen Klöppeln untersucht und im Hinblick auf Glockenbeanspruchung, Anschlagintensität und die Anschlagdauer als Maß für die Anregung hoher und niedriger Teiltöne gezeigt. (Tab. 1)

Tab 1: Einfluss der Klöppelausführung auf Beanspruchung, Anschlagintensität und Klang

Erhöhung von	Beanspruchung	Anschlagsintensität	Anschlagdauer
Anfluggeschwindigkeit	↑	↑	↓
Klöppelmasse	↑	↓	↑
Kugeldurchmesser	↑	↑	↓
Schaftdicke	▬	▬	▬
Vorschwing	↓	▬	↑

Auch die Installation der Glocke am Joch sowie des Klöppels in der Glocke haben Einfluss auf das Läuteverhalten, die Beanspruchung und die Klangentfaltung der Glocke. Eine Schiefelage der Glocke erfordert beispielsweise einen höheren Lätewinkel, um gleichmäßige Anschlagbedingungen zu erreichen, was zu einer höheren Schädigung führt. (Abb. 6) Ein außermittig in der Glocke installierter Klöppel führt einseitig zu höheren Beanspruchungen, die damit auch ein erhöhtes Risiko für Ermüdungsschäden bedeuten. (Abb. 7)

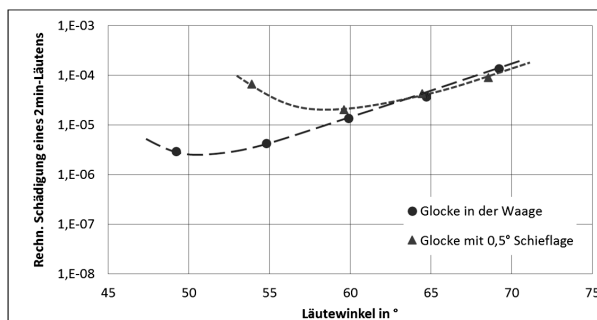


Abb. 6: Auswirkung der Ausrichtung einer Glocke am Joch auf das Risiko von Schäden

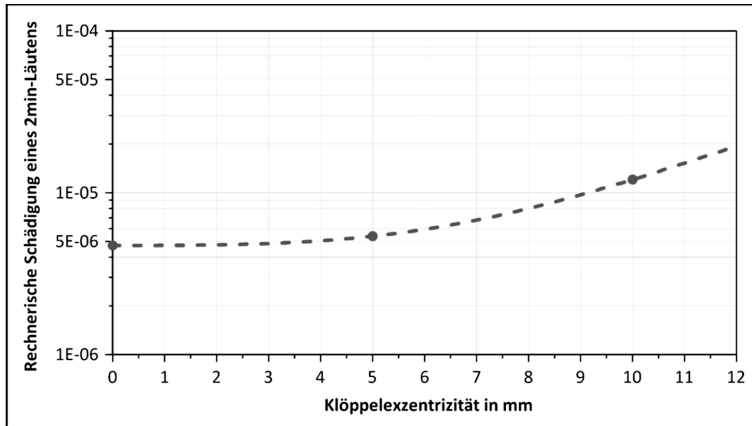


Abb. 7: Einfluss der Klöppelinstallation auf die Schädigung der Glocke

3 Bestimmung der Parameter und Simulation

Für eine derart sensible Auswirkung von Form, Gewicht, Material, Ballenausführung, Länge und Aufhängung sind ausgefeilte und zuverlässige Methoden in Verbindung mit belastbaren Daten erforderlich, um die jeweiligen Auswirkungen einer Parameterfestlegung auf das Läuten vorherzusagen, bestimmen und gezielt einstellen zu können. Hierzu dienen einerseits CAD-Modelle, in denen das Glockensystem detailliert mit allen Komponenten modelliert wird. (Abb. 8) Diese Modelle erlauben die Bestimmung aller physikalischen Größen des schwingenden Systems und insbesondere die Auslegung für gewünschte Läutewinkel und Anschlagintensitäten. Mit Hilfe geeigneter experimenteller Methoden können diese Parameter verifiziert werden.

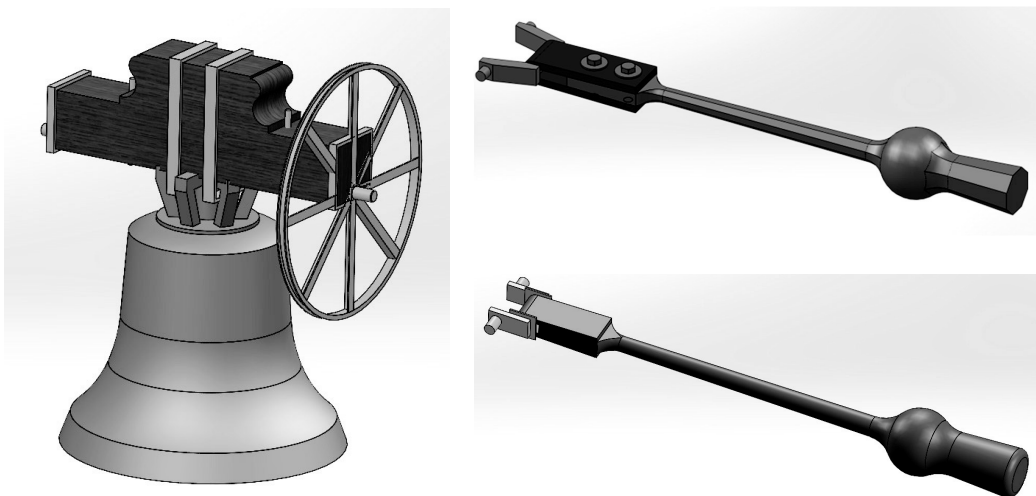


Abb. 8: Detaillierte CAD-Modelle mit allen Komponenten

Mit den zuverlässig bestimmten Parametern des Glockensystems lassen sich Computersimulationen durchführen, die zur Optimierung der Parameter und der Läutebedingungen beitragen. (Abb. 9)

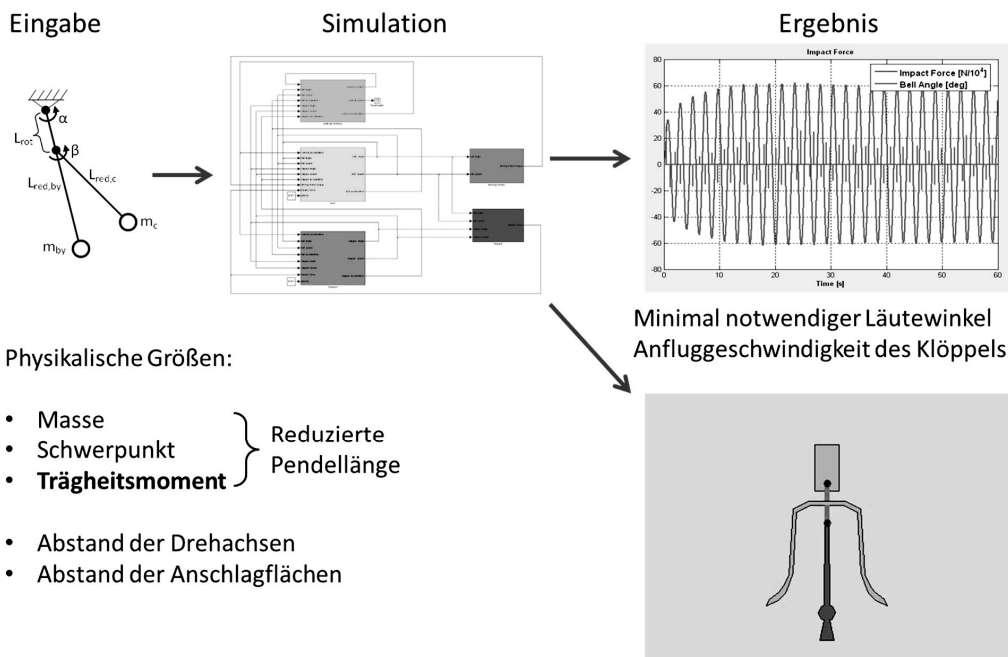


Abb. 9: Simulation des Läutens

4 Bewertung

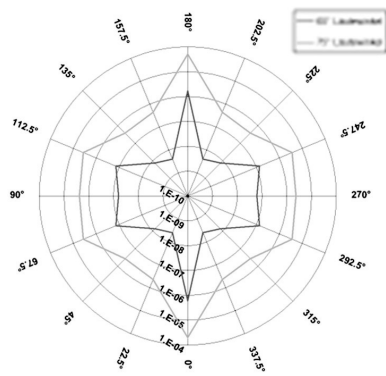
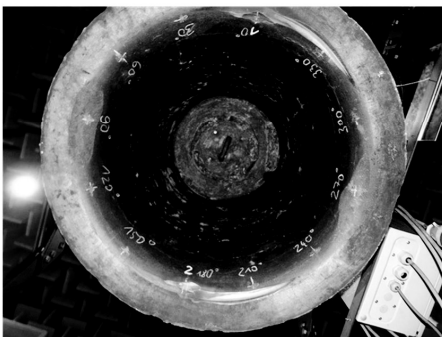
Zur Bewertung eines Glockensystems werden Messungen wesentlicher Größen beim Läuten vorgenommen: der Läutewinkel als Maß für die eingestellten Läutebedingungen, die Beschleunigung am Klöppelballen als Maß für die Belastung der Glocke und die örtlichen Dehnungen gegenüber den Anschlagpunkten als Maß für die Beanspruchungen der Glocke zur Bewertung des Risikos für deren Schädigung. Außerdem nehmen Mikrofone den Klang auf.

Anhand der gemessenen Dehnungen lässt sich das Risiko für Schäden an der Glocke bewerten sowie überprüfen, ob die Beanspruchungen einseitig unverhältnismäßig höher liegen aufgrund asymmetrischer Anschlagsbedingungen. Dabei wird angenommen, dass die Materialqualität im Bereich der hohen Beanspruchungen an den Anschlagstellen übliche Festigkeitswerte aufweist. Hier muss angenommen werden, dass dort auch typische Fehlstellen (wie leichte Gaseinschlüsse oder kleinere Fremdkörpereinschlüsse) vorhanden sind, wie sie in jeder Glocke vorkommen. Dabei wird davon ausgegangen, dass diese am unteren Bereich des Streubandes der Festigkeit liegen, da kein Verfahren bekannt ist, mit dem die örtliche Festigkeit der

gegossenen Bronze genauer bestimmt werden kann. Auftretende Schäden an Glocken bestätigen diese Annahme.

Bei einigen Schweißverfahren, die zur Reparatur gerissener Glocken verwendet werden, insbesondere das autogene Schweißverfahren, ist davon auszugehen, dass die Schweißnaht nicht mehr die Festigkeitswerte aufweist, wie das gegossene Material, da in der Vergangenheit Schweißnähte oft mit Fehlstellen oder Porosität ausgeführt waren. Dies kann klanglich kaum festgestellt werden, da die örtlichen elastischen Eigenschaften die Schäden korrigieren und wegen der sehr lokalen Einflüsse keine signifikanten Auswirkungen auf den Klang feststellbar sind. Dies bedeutet allerdings nicht, dass die Festigkeit in diesem Bereich nicht deutlich herabgesetzt ist, was an wiederholten Schäden reparierter Glocken beobachtet werden kann. Hier bietet sich an, die Erkenntnisse zu nutzen, dass die Beanspruchung an den Anschlagbereichen erheblich höher sind als in den Bereichen zwischen 20° und 40° der Glocke. Schäden in einem sehr frühen Stadium oder reparierte Schäden können daher durch Drehen der Glocke in diese Winkelbereiche verschoben werden. Diese Bereiche sind dann deutlich niedriger beansprucht und Schäden treten kaum mehr auf. (Abb. 10)

- Höchste Beanspruchungen im Bereich der Klöppelanschlagstellen
- Hohe Beanspruchungen zwischen 60° und 90° zu den Anschlagstellen
- Niedrigste Beanspruchungen zwischen 20° und 40° zu den Anschlagstellen



- ➔ Richtiges Drehen von Glocken ist sinnvoll
- ➔ Fehlstellen, Schweißnähte, Ausbrüche, ca. 20°- 40° zum Anschlag positionieren

Abb. 10: Einfluss des Drehens von Glocken

5 Anforderungen für die Gestaltung von Klöppeln

In Abb. 11 sind unterschiedliche Klöppel gezeigt, die für verschiedene Glocken durch das ECC-ProBell® konstruiert und ausgelegt wurden. Gewicht und Massenverteilung wurden jeweils so

gewählt, dass sich für die jeweilige Glocke beim angestrebten Lätewinkel ein schonendes Läuten erreichen ließ. Dabei wurden die baulichen Anforderungen von Glockenstuhl und -stube berücksichtigt. Die Formgebung selbst richtete sich sowohl nach denkmalpflegerischen als auch nach den klanglichen Anforderungen.



Abb. 11: Vom ECC-ProBell® konstruierte Klöppel

Gemeinsam ist diesen sehr unterschiedlich anmutenden Klöppeln, dass sie alle gezielt konstruiert und ausgelegt wurden, um aus verschiedenen Gesichtspunkten vorgegebene, zum Teil sich widersprechende Anforderungen zu erfüllen. Diese unterschiedlichen Anforderungen wurden dabei nicht durch das ECC-ProBell® vorgegeben, sondern stammen von den zuständigen Glockensachverständigen, Fachfirmen, Gemeinden und dem Denkmalschutz. Das ECC-ProBell® trägt mit seinem Know-how, den Ingenieurswerkzeugen und Daten dazu bei, diese sehr unterschiedlichen Anforderungen in bestmöglicher Form zu erfüllen und einen geeigneten Kompromiss zu gestalten. Hierzu dient das in Abb. 12 (im Ausschnitt) gezeigte Dokument, das zu Beginn eines Projektes erstellt wird, in dem die unterschiedlichen Anforderungen zunächst benannt werden, um auf diese bewusste Entscheidung aufmerksam zu machen.