

Schutz und Erhalt von Glocken : Prinzipien für eine Optimierung von Glockenanlagen

Autor(en): **Rupp, Andreas / Plitzner, Michael**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Campanae Helveticae : organe de la Guilde des Carillonneurs et Campanologues Suisses = Organ der Gilde der Carilloneure und Campanologen der Schweiz**

Band (Jahr): **21 (2017)**

PDF erstellt am: **17.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-817103>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

SCHUTZ UND ERHALT VON GLOCKEN – PRINZIPIEN FÜR EINE OPTIMIERUNG VON GLOCKENANLAGEN

Zusammenfassung

Das Beanspruchungsgeschehen und die Schadensentstehung an Glocken wurden in den vergangenen zwei Jahrzehnten in national und europäisch geförderten Forschungsvorhaben umfassend untersucht. Die Ursachen und Zusammenhänge für die Entstehung und Ausbreitung von Ermüdungsschäden und Schlagverschleiss an Glocken konnten umfassend geklärt und einer ingenieurmässigen Betrachtung zugänglich gemacht werden. Die abgeleiteten Auslegungsverfahren erlauben eine rechnerische Bestimmung des Risikos für Ermüdungsschäden an Glocken sowie die gezielte Beeinflussung der klanglichen Eigenschaften der läutenden Glocke. Die Läutebedingungen lassen sich damit für die unterschiedlichen Anforderungen gezielt optimieren – sei es aus denkmalpflegerischer Sicht zur Minimierung des Schadensrisikos, sei es aus musikalischer Sicht zur Verbesserung der Klangentfaltung oder Lautstärke.

Über die ingenieurmässige Optimierung des Glockensystems hinaus beeinflussen auch äussere Bedingungen die Läutebelastungen und die Klangentfaltung der Glocke. Die Läutemaschine als Energielieferant des Systems sowie die Montagebedingungen des Klöppels besitzen erheblichen Einfluss auf ein schonendes Läuten der Glocke und einen gleichmässigen Anschlag des Klöppels beim Läuten.

Der musikalische Fingerabdruck von Glocken ist ein auf Klangmessungen basierendes Analyseverfahren, mit dem der Zustand von Glocken ermittelt werden kann. Mithilfe von Frequenzanalysen wird festgestellt, ob und in welchem Umfang Schäden im Klangkörper von Glocken vorliegen. Der musikalische Fingerabdruck stellt damit die Grundlage für ein individuell angepasstes Sanierungskonzept dar, insbesondere zur Festlegung der zukünftigen Läutebelastungen sowie der zukünftigen Anschlagspo-

sition des Klöppels. Das Verfahren ermöglicht auch eine effiziente und kostengünstige Methode, um insbesondere historisch wertvolle, vorgeschädigte oder sehr grosse Glocken überwachen zu können,

um Ermüdungsschäden so frühzeitig zu ermitteln, dass mit den vorhandenen Optimierungsmethoden das Wachstum von Rissen stark verlangsamt oder gestoppt werden kann.

Beanspruchung, Schlagverschleiss und Klang

Als im Juli 2008 das EU-Förderprojekt «Maintenance and protection of bells» seinen offiziellen Abschluss fand, bestand der einheitliche Wunsch aller am Projekt beteiligten Glockengiessereien, darunter die Schweizer Glockengiesserei H. Rüetschi AG, die begonnenen Forschungsarbeiten [1] weiterzuführen und die entwickelten Verfahren auf den Glockentürmen zur Anwendung zu bringen. Wesentliche Ergebnisse dieser Arbeiten waren zum einen die Computersimulationsprogramme, die auf Basis der Läutparameter sowie der geometrischen und dynamischen Eigenschaften von Glockensystemen eine zuverlässige Bestimmung der Anschlagintensität des Klöppels an der Glocke und der daraus resultierenden Materialbeanspruchung im Hinblick auf Ermüdung und Verschleiss ermöglichen. Zum anderen lagen aus den vielfältigen Versuchen und Messkampagnen umfangreiche Materialdaten zum Schlagverschleiss

und zur Ermüdungsfestigkeit vor, die den systematischen Erkenntnissen zu den beeinflussenden Parametern zugrunde liegen und diese wissenschaftlich absichern. Auch im Hinblick auf die Bewertung der klanglichen Eigenschaften läutender Glocken konnten die beeinflussenden Parameter und Bewertungsmaßstäbe systematisch erarbeitet werden. Mit diesen Ingenieurswerkzeugen und den dazugehörigen Daten lassen sich vorhandene Glockensysteme beurteilen und gegebenenfalls durch neue Komponenten oder Läutparameter optimieren. Häufig lassen sich zu hohe Beanspruchungen, ein erhöhter Schlagverschleiss oder eingeschränkte Klangqualität durch die Entwicklung eines besser angepassten Klöppels ausräumen. Von besonderer Bedeutung ist dabei, dass sich ein geeigneter Klöppel aus der Gewichtung der unterschiedlichen Anforderungen ergibt und keine Standardlösung möglich ist. So wird z.B. ein Klöppel,

der für eine vorgeschädigte oder geschweisste Glocke optimal ausgelegt ist, anders konstruiert sein als für eine neugegossene Glocke. Ebenso führen die Anforderungen

an klangliche Eigenschaften oder denkmalpflegerische Aspekte zu unterschiedlichen Klöppelformen und -dimensionen.

Parameter zur Schonung von Glocken

Das Läuten von Glocken ist mit hohen Belastungen für den aus Bronze gegossenen Klangkörper verbunden. Jährlich werden zahlreiche Glocken vom Turm genommen, um Ermüdungsrisse durch Schweissen zu reparieren. Der Aufwand dafür ist enorm und nicht selten werden durch den Schaden und die notwendigen Schweissarbeiten wertvolle Inschriften oder Ornamente historischer Glocken unwiederbringlich zerstört.

Die häufigsten Schäden an Glocken sind starker Verschleiss an den Anschlagstellen sowie Risse im Klangkörper der Glocke. Aufgrund der fehlenden Kenntnis über die Materialermüdung biegewechselbeanspruchter Bauteile galt daher bis ins 20. Jahrhundert der Verschleiss als wichtigstes Merkmal für die Beanspruchung der Glocke, so dass Glocken zur längeren Haltbarkeit bereits seit mehreren Jahrhunderten gedreht werden, um den Materialabtrag über den gesamten Glockenumfang zu verteilen. Erst mit den

Untersuchungen des Fraunhofer-Instituts in Darmstadt (LBF) in den 1990er Jahren wurde begonnen, die Beanspruchungsmechanismen läutender Glocken systematisch zu untersuchen. [2]

Demnach ist die zentrale Ursache für Risse im Klangkörper von Glocken die Materialermüdung, die durch den ständig wiederkehrenden Klöppelanschlag hervorgerufen wird. Für eine wirksame Lebensdauerverlängerung von Glocken sind daher die Beanspruchungen, die beim Läuten in der Glocke wirken, durch Optimierung der Läutebedingungen und Anschlagskonditionen möglichst gering zu halten. Um aber nicht, wie so oft bereits in der Vergangenheit geschehen, in einen blinden Aktionismus zu verfallen und pauschal schwere Klöppel und hohe Läutewinkel als Ursache für Schäden festzumachen, bedarf es einer differenzierten Auseinandersetzung mit den für das Beanspruchungsgeschehen läutender Glocken relevanten Mechanismen.

Dazu gehören einerseits die präzise dynamische Analyse von Glockensystemen und andererseits die fundierte Beurteilung der für das Läuerverhalten relevanten Rand-

bedingungen wie beispielsweise die verwendeten Materialien, die Anschlagbedingungen sowie die Einstellungen an der Läuertestuerung.

Dynamik von Glockensystemen

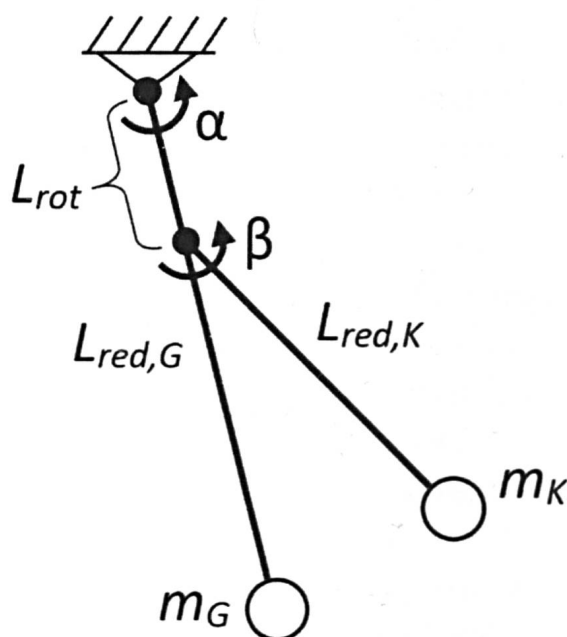


Abb. 1: Das Doppelpendelsystem einer Glocke

Die läutende Glocke lässt sich durch ein Doppelpendelsystem beschreiben. (Abb. 1) Während das Glockenpendel, bestehend aus Glocke und Joch, im Allgemeinen durch eine Läuemaschine angetrieben wird und auf einen vorgegebenen Läuertwinkel einschwingt, pendelt der Klöppel, begrenzt durch die Glockenwandung, frei in der Glocke, jedoch angetrieben aufgrund ihrer Bewegung. Damit es zu einer ausgewogenen Klöppelbewegung beim vorgegebenen Läuertwinkel des Glockenpendels kommt, die zu einem regelmässigen Anschlagen des Klöppels mit wohl definierter Intensität führt, muss der Klöppel individuell an das Glockenpendel angepasst sein.

Die wesentlichen Parameter, die die Dynamik des Systems beschreiben, sind die reduzierten Längen $L_{red,i}$ und die Massen m_i beider Pendel sowie der Lätewinkel α . Der Abstand der Drehachsen L_{rot} und der Öffnungswinkel der Glocke β sind weitgehend bedingt durch die Geometrie der Glocke und liegen in einem engen Streuband. Für die untersuchten Glockensysteme konnte ein Verhältnis der reduzierten Längen im Bereich von $L_{red,K}/L_{red,G} = 0,7 \dots 1,0$ festgestellt werden (Abb. 2). Dabei gilt: je niedriger das Verhältnis $L_{red,K}/L_{red,G}$ ausfällt, desto höher ist die Glocke zu läuten, damit es zu einem gleichmässigen Klöppelanschlag kommt.

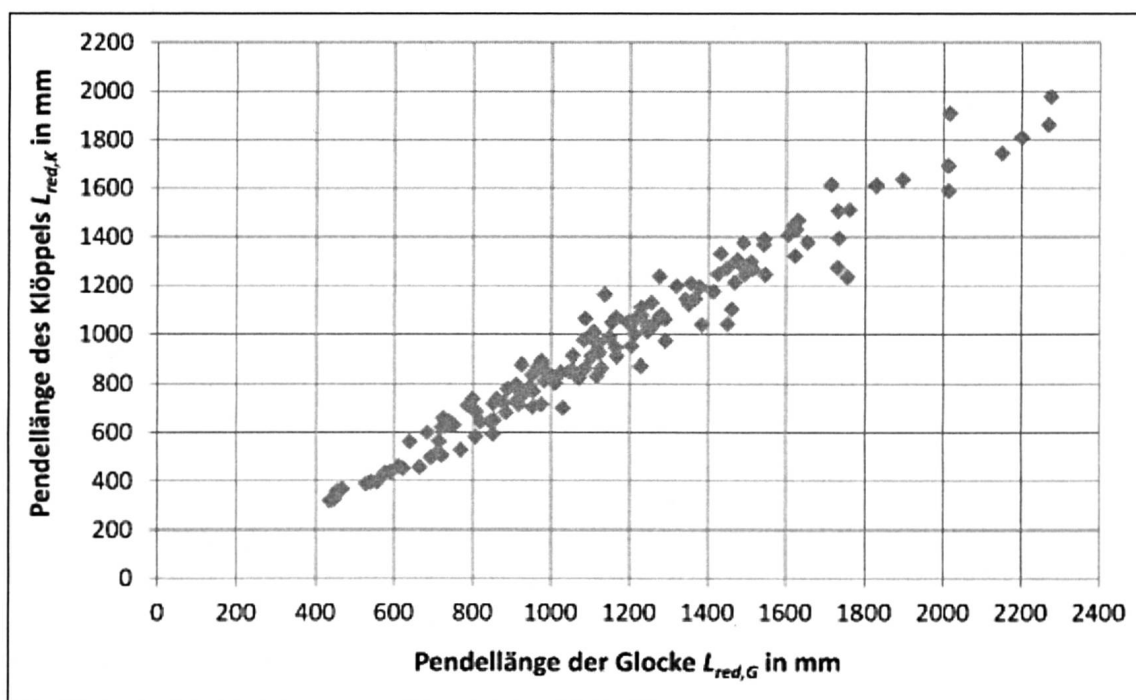


Abb. 2: Verhältnis der reduzierten Längen von Glocken- und Klöppelpendel von etwa 150 untersuchten Glockensystemen

Um diese schwingungstechnisch erforderlichen Zusammenhänge zu erfüllen, wurden tendenziell über viele Jahrzehnte Klöppel mit einem langen Vorschwung entworfen, die eine verhältnismässig grosse Pendellänge besitzen und bereits bei moderaten Lätewinkeln zu einem gleichmässigen Anschlag führen. Eine gelungene und rasche Intonation von Glocken war mit solchen Klöppeln nahezu immer gesichert.

Einfluss des Jochmaterials auf die Dynamik

Der Umbau von Glockensystemen mit Holzjochen auf Joche aus Stahl bringt schwingungstechnisch einen ähnlichen Effekt wie der Einsatz von Klöppeln mit langem Vorschwung. Stahljoche haben in den meisten Fällen eine geringere Masse und Massenträgheit als Holzjoche und bewirken (in Abhängigkeit der Drehachse) daher eine Verringerung der Pendellänge der Glocke.

Sowohl ein langer Klöppelvorschwung als auch ein leichtes Joch führen dazu, dass das Verhältnis der Pendellängen $L_{red,K}/L_{red,G}$ ansteigt, was bei einem konstanten Lätewinkel eine Erhöhung der Anfluggeschwindigkeit des Klöppels bewirkt. Mit zunehmender Anfluggeschwindigkeit steigt jedoch die Anschlagintensität des Klöppels, was mit erhöhten Beanspruchungen in der Glocke verbunden ist. Darüber hinaus bewirkt eine Erhöhung der Anfluggeschwindigkeit eine kürzere Anschlagdauer, die tendenziell mit einer obertönigen Klangentfaltung der Glocke einhergeht.

Die häufig anzutreffende Beurteilung, dass folglich Stahljoche zu einer obertönigen Klangentfaltung bei Glocken führen, ist daher eine zu stark vereinfachende

Diagnose für eine komplexe Thematik. Die vielfach vorgetragene Begründung, die hörbaren Veränderungen nach einem Umbau einer Glocke oder eines Geläutes auf Befestigung am Holzjoch seien so signifikant, dass selbst Laien von der Sinnhaftigkeit der Massnahme einfach zu überzeugen sind, kann dabei wenig weiterhelfen, da eine solche Sanierung immer mit Veränderungen am dynamischen System und nahezu ausnahmslos mit einem neu installierten Klöppel einhergehen.

Tatsächlich gibt es echten Bedarf für wissenschaftliche Untersuchungen, wie sich Stahljoche auf den Klang sowie die Betriebssicherheit läutender Glocken auswirken. Das vorhandene Wissen über das Schwing- und Dämpfungsverhalten von Stahljochen ist mehr als dürftig und allgemeine Kriterien für die Überprüfung der Betriebssicherheit liegen nicht vor. In Fällen, in denen historische Stahljoche erhalten werden sollen, weil sie auch aus denkmalpflegerischen Aspekten erhaltenswert sind, wird ihr Zustand mit grossem werkstoffwissenschaftlichen Aufwand untersucht. Die Ergebnisse können jedoch nur selten auf andere Joche übertragen werden, da

die Jochbauarten sich zu sehr unterscheiden und immer Einzellö-

sungen vorliegen.

Anschlagsintensität als Bewertungsmaßstab für das Schadensrisiko

Die Schonung von Glocken für eine lange Lebensdauer gehört zu den wichtigsten Argumenten für die Sanierung von Glockenanlagen. Vielerorts wird unter diesem Vorwand der Umbau von Stahl- auf Holzjoch sowie die Ausstattung des Geläutes mit neuen Klöppeln und Läutemaschinen begründet. Mit welchem Umfang jedoch die Sanierungsarbeiten tatsächlich zu einer Schonung der Glocke beitragen, bleibt dabei meist im Unklaren.

Zuverlässig und belastbar kann ein solcher Nachweis nur

mithilfe von Messungen an der läutenden Glocke erbracht werden, eine Bewertung über den Klang oder die reine Beobachtung der läutenden Glocke und des Anschlagverhaltens des Klöppels ist hingegen nicht ausreichend für eine Beurteilung des Schadensrisikos. Um dies zu ermitteln, werden bei einer Glockenmessung zum einen die Belastungen erfasst, die vom Klöppel auf die Glocke einwirken, und zum anderen die Beanspruchungen gemessen, die tatsächlich in der Glocke wirksam sind.

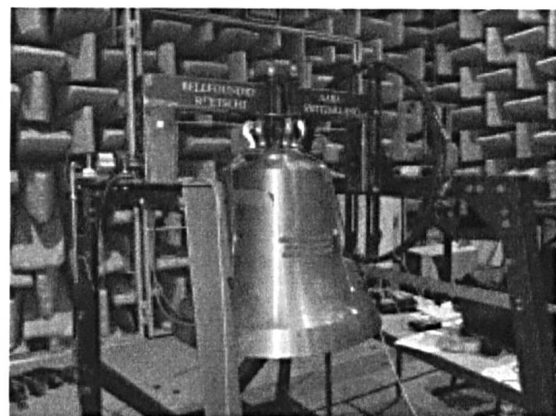
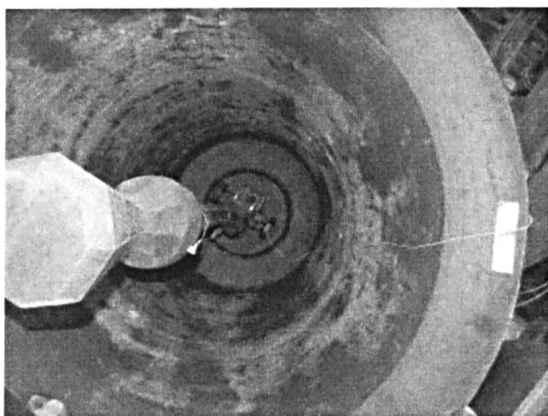


Abb. 3: Klöppel mit Beschleunigungssensor (links) und Glocke mit DMS (rechts)

Die Belastungen werden über einen Beschleunigungssensor ermittelt, der am Klöppel befestigt wird und die Wucht des Klöppels

beim Anschlag erfasst. (Abb. 3) Diese Messung liefert Informationen über die Impulskraft, die auf die Glocke wirkt, sowie über die

Regelmässigkeit des beidseitigen Klöppelanschlags, was wiederum Rückschlüsse auf die Klöppelinstallation und die Einstellungen an der Läutemaschine zulässt. Darüber hinaus kann mithilfe der Beschleunigungsmessung auch die Verweildauer des Klöppels an der Glocke ausgewertet werden, die für die Klangentfaltung der Glocke von Bedeutung ist.

Die aus der Kraft des Klöppelanschlags resultierende Beanspruchung der Glocke wird mit Dehnungsmessstreifen (DMS) gemessen, die jeweils gegenüber den Anschlagstellen aussen auf der Oberfläche der Glocke appliziert sind. (Abb. 3) Sie erfassen die tatsächlichen Verformungen des Glockenmaterials und stellen damit die Grundlage für die Bewertung

des Schadensrisikos dar. Dieses leitet sich aus der Beanspruchbarkeit der Glockenbronze ab, die vom Fraunhofer-Institut LBF in den 1990er Jahren experimentell ermittelt wurde.

Mit den Forschungsarbeiten des ECC-ProBell, die mit dem EU-Projekt 2005 an der Hochschule Kempten begannen, wurden die Zusammenhänge zwischen den wirkenden Belastungen und den tatsächlich gemessenen Beanspruchungen bei unterschiedlichen Läutebedingungen und variierenden Glockensystemen systematisch untersucht, um die relevanten Läuteparameter zu ermitteln, die das Beanspruchungsgeschehen an der Glocke beeinflussen. (Abb. 4)



Abb. 4: Läutemessung an einer Glocke mit verkörpftem Joch im Schalllabor

Als entscheidende Parameter wurden unter anderem der Läu-
 tewinkel, die Klöppelmasse, die
 Massenverteilung am Klöppel, die
 Anschlagposition des Klöppels an
 der Glocke sowie das dynamische
 Verhältnis zwischen Glocken- und
 Klöppel pendel identifiziert. Aus
 diesen Parametern wurde als Be-
 wertungsmaßstab die einheitslose
 Grösse Anschlagintensität J ent-
 wickelt, mit der das Schadensrisi-
 ko für Glocken beurteilt werden
 kann, die darüber hinaus aber
 auch Auskunft über die Klanganre-
 gung und die Lautstärke der Glo-
 cke gibt. Die Anschlagintensität
 ergibt sich aus der Kombination
 der Läu-teparameter, die gemäss
 ihres Einflusses auf die Beanspru-
 chung der Glocke unterschiedlich
 gewichtet zusammengefasst
 werden. Die daraus entwickelten
 Computermodelle ermöglichen
 es nun, dass das Läu-teverhalten
 der Glocke aus der Kombination
 der Läu-teparameter simuliert und
 die theoretische Anschlaginten-
 sität J_{sim} berechnet werden kann.
 Somit lässt sich auch ohne Mes-

sung die Anschlagintensität ab-
 schätzen, um für vorhandene oder
 neue Glockensysteme schonende
 Läu-tebedingungen festzulegen
 und eine optimierte Klöppelaus-
 legung durchführen zu können.
 Aufgrund der Wechselwirkung
 zwischen Beanspruchung und ab-
 gestrahlter Schallenergie ist auch
 eine Abschätzung der zukünftigen
 Klanganregung und Lautstärke
 möglich. Auf diese Weise können
 auch Glockengiesser und Installa-
 tionsfirmen, die das entsprechen-
 de Knowhow besitzen und zur
 Anwendung bringen, schonende
 Läu-tebedingungen berechnen und
 die dafür notwendigen Sanierungs-
 massnahmen umsetzen.

Eine zuverlässige Bewertung
 der tatsächlichen Glockenbelas-
 tungen kann jedoch nach wie vor
 nur mithilfe der beschriebenen
 experimentellen Bestimmung der
 Anschlagintensität J_{exp} erfolgen,
 wie sie durch das ECC-ProBell seit
 2009 an über 150 Glocken, davon
 ca. 50 in der Schweiz, vorgenom-
 men wurde.

Zur Beurteilung der Anschlagintensität wurde ein vierstufiges Be-
 wertungssystem eingeführt, um das Risiko für Ermüdungsschäden und
 die Klanganregung beurteilen zu können:

$J_{exp} < 2$: sehr niedriges Risiko für Ermüdungsschäden, leise
 bis sehr leise Klanganregung;

- $2 < J_{exp} < 3$: niedriges Risiko für Ermüdungsschäden, mässig laute bis laute Klanganregung;
 $3 < J_{exp} < 4$: mittleres Risiko für Ermüdungsschäden, laute bis sehr laute Klanganregung;
 $J_{exp} > 4$: hohes Risiko für Ermüdungsschäden, sehr laute und machtvolle Klanganregung.

Eine Voraussage, zu welchem Zeitpunkt Ermüdungsrisse konkret entstehen bzw. wie hoch die verbleibende Restläutedauer einer Glocke ist, kann jedoch allein aus der Anschlagsintensität nicht unmittelbar abgeleitet werden, da in den meisten Fällen die Zusammensetzung des Materials, der Zustand der Glocke sowie die bereits ertragenen Belastungen nicht bekannt sind. Die Bewertung orientiert sich an Glocken, die in üblicher Gussqualität aus Glockenbronze gegossen wurden. Glocken mit ausgewiesenen Fehlstellen, wie sichtbare Lunker, fortgeschrittener Verschleiss oder Schweissstellen, sind daher konservativer zu bewerten, Glocken mit vermindertem Zinnanteil oder höheren Bleianteilen können hingegen progressiver bewertet werden.

Für die Bewertung der Klanganregung und der Lautstärke der Glocke über die Anschlagsintensität ist zu beachten, dass das menschliche Gehör tiefe Frequenzen bei gleichem Schall-

druck leiser wahrnimmt als höhere Frequenzen. Grosse Glocken (etwa ab Schlagton h°) benötigen daher erfahrungsgemäss eine mittlere Anschlagsintensität von $J_{exp} > 3$, um eine gute Klanganregung auch der tiefen Töne zu erreichen. Bei kleineren Glocken sollten Anschlagsintensitäten von $J_{exp} < 2$ vermieden werden, weil dann die Klanganregung nur als leise und schwach wahrgenommen wird und solche Glocken im Zusammenklang eines Geläutes nicht oder nur schwach hörbar sind. Ausnahmen stellen jedoch vorgeschädigte und besonders erhaltenswerte Glocken dar, die mit einer sehr niedrigen Anschlagsintensität geläutet werden, um eine möglichst lange Restlebensdauer zu gewährleisten.

Bei Glocken, die mit mittlerer Anschlagsintensität geläutet werden, um eine entsprechende Klanganregung zu erreichen, sollte das steigende Risiko für Schäden in der Läuteordnung berücksichtigt werden, so dass grosse Glocken daher den besonderen Ereignissen

vorbehalten bleiben sollten. Hohe Anschlagintensitäten von $J_{exp} > 4$ sollten jedoch immer vermieden werden.

Einfluss der Läutebedingungen auf die Lebensdauer

Die für die Glockenbeanspruchungen wichtigsten Einflussparameter sind ohne Zweifel die dynamische Abstimmung zwischen Glocken- und Klöppelpendel, die Klöppelmasse und deren Massenverteilung sowie der Läu-
 tewinkel. In der Praxis wurden jedoch bei Glockensystemen, die unter Berücksichtigung der oben-
 genannten Parameter eine günstige

Ausrichtung des Systems vermuten liessen, dennoch hohe Glockenbeanspruchungen vorgefunden. Als Hauptursachen für solch hohe Beanspruchungen konnten im Wesentlichen ungünstige Einstellungen an der Läu-
 temaschine und eine nicht präzise Installation des Klöppels in der Glocke identifiziert werden.

Einfluss der Läuemaschine

Die Läuemaschine ist der Energielieferant der Glocke. Sie ist verantwortlich für ein schonendes Einläuten und ein behutsames Ab-

bremsen der Glocke und soll im konstanten Betrieb nur möglichst geringe Winkelvariationen für ein stabiles Läuten zulassen.

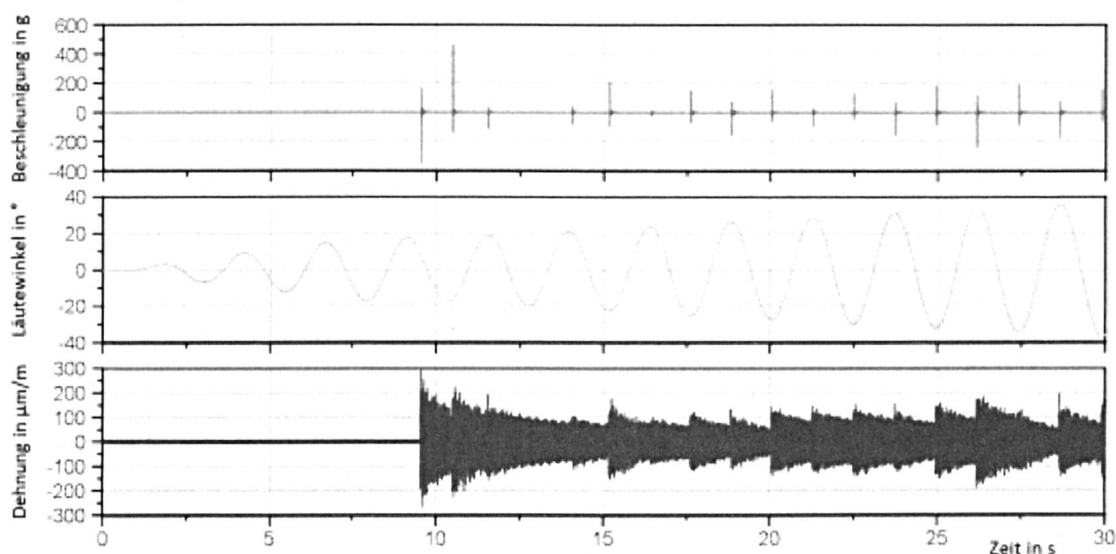


Abb. 5: Prellschläge beim Einläuten: Anschlagintensität und Beanspruchung der Glocke

Insbesondere beim Einläute- und Bremsvorgang können jedoch nicht selten Prellschläge festgestellt werden, bei denen der Klöppel mit hoher Anfluggeschwindigkeit die Glocke anschlägt.

In Abb. 5 sind die bei solchen Prellschlägen aufgezeichneten Messdaten dargestellt. Während sich die Glocke im Einläutevorgang befindet, schlägt der Klöppel in der Abwärtsbewegung der Glocke an, was zu einer sehr hohen Anschlagsintensität des Klöppels führt. Im vorliegenden Fall sind die dabei gemessenen Beanspruchungen der Glocke um ca. 50% höher als beim konstanten Läuten, so dass die schädigende Wirkung von etwa fünf solchen Anschlägen

Einfluss der Klöppelinstallation

Sowohl das Klangverhalten als auch die Beanspruchung von Glocken beim Läuten werden durch die Präzision der Klöppelinstallation erheblich beeinflusst. Vielfach kann beobachtet werden, dass Klöppel nicht exakt mittig in der Glocke installiert sind. Die Ursachen dafür sind im Wesentlichen eine nicht zentrierte Mittelbohrung in der Glocke, eine nicht lotrechte Aufhängung der Glocke,

genauso hoch ist wie das eines konstanten Läutens über 2 Minuten, was bei üblicher Läutedauer zu einer stark verkürzten Lebensdauer führen kann.

Bei der Auswahl, der Installation und der Wartung von Läutemaschinen ist daher auf das Vermeiden von Prellschlägen nicht nur aus klanglicher Sicht zu achten, sondern auch zur Schonung der Glocke. Insbesondere das Einhalten eines möglichst konstanten Läutewinkels mit einer Variation von weniger als $\pm 1^\circ$ führt tendenziell zu einem gleichmässigeren Läuten. Nach den bisherigen Erfahrungen sind dazu winkelgesteuerte Läuteantriebe besser geeignet als zeitgesteuerte.

unpräzise Montagearbeit und fehlende Justierbarkeit des Klöppels. Die Folgen einer nicht zentrierten Klöppelinstallation sind entweder ein unregelmässiger Klangeindruck oder ein zu hoch eingestellter Läutewinkel, um die Unregelmässigkeit durch grössere Energiezufuhr auszugleichen. Beides führt zu einer Erhöhung der Beanspruchungen der Glocke beim Läuten.

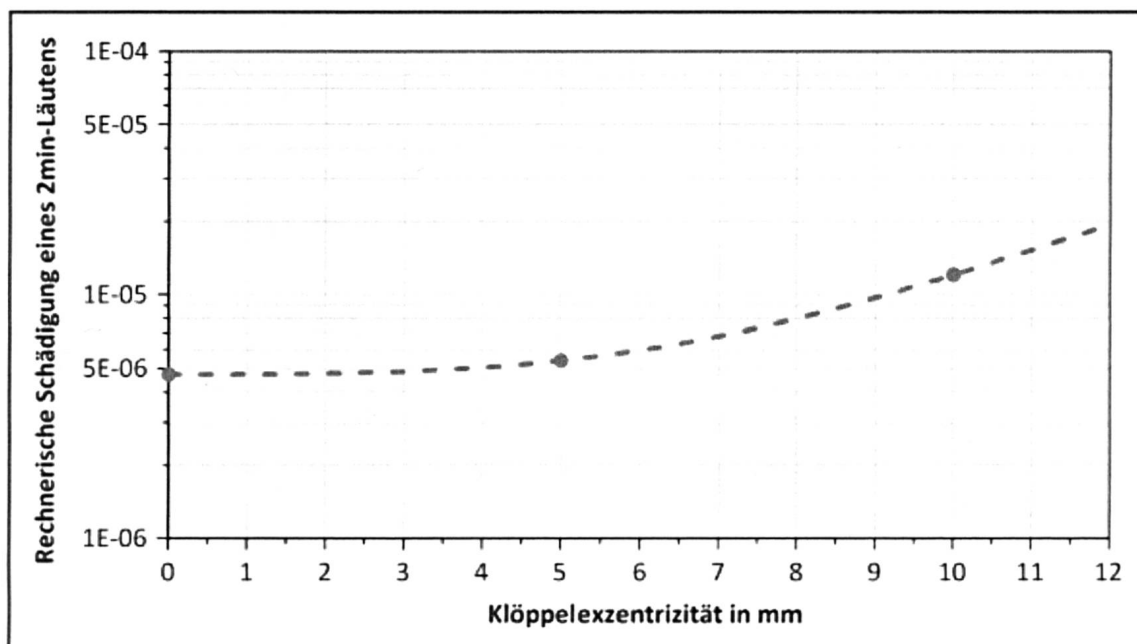


Abb. 6: Einfluss der Exzentrizität des Klöppels auf die Schädigung einer Glocke ($\varnothing \approx 1\text{m}$)

Anhand von Laborversuchen an einer Versuchsglocke mit einem Durchmesser von etwa 1 m konnte der Einfluss der Exzentrizität des Klöppels auf die Beanspruchung der Glocke beim Läuten ermittelt werden (Abb. 6). Mit zunehmender Exzentrizität des Klöppels steigt die Schädigung an, so dass bei einer Exzentrizität von 9 mm eine Verdoppelung und bei 12 mm bereits eine Vervierfachung der Schädigungen an der Glocke feststellbar ist. In Bezug auf die zu erwartende Lebensdauer der Glocke entspräche dies einer Abnahme auf die Hälfte bzw. auf ein Viertel gegenüber der zu erwartenden Lebensdauer einer Glocke mit zentriert installiertem Klöppel.

In etwa 40% aller Glocken, die durch das ECC-ProBell untersucht wurden, hängen die Klöppel in Läuterichtung mit mehr als 5 mm exzentrisch in der Glocke. Dabei ist die Situation in der Schweiz jedoch günstiger als in Deutschland, da in der Schweiz auch bei modernen Glocken mit Mittelbohrung im Allgemeinen justierbare Klöppelaufhängungen zum Einsatz kommen, die eine Ausrichtung des Klöppels auch bei einer exzentrisch gebohrten Mittelbohrung ermöglichen.

Deutlich schlechter ist die Situation bei historischen Glocken, bei denen der Klöppel direkt in die eingegossene Klöppelöse eingehängt ist. In über 80% der un-

tersuchten Glockenanlagen hängt hier der Klöppel dezentriert in der Glocke und dabei nicht selten mit mehr als 10 mm Exzentrizität. Zumeist paart sich in diesen Fällen zur Klöppelexzentrizität aufgrund der fehlenden Ausrichtbarkeit der Schwungrichtung des Klöppels auf die Glockenschwingrichtung noch eine eiernde Flugbewegung des Klöppels, die zu einem deutlich erhöhten Materialabtrag an den An-

schlagstellen führt, da der Klöppel beim Anschlagen seitlich über den Schlagring der Glocke rutscht.

Eine justierbare Klöppelaufhängung ist daher für ein schonendes Läuten eine notwendige Voraussetzung, auf die nicht verzichtet werden sollte. Die Überprüfung der Klöppelposition in der Glocke sollte zudem zum Standardumfang der jährlichen Glockenwartung gehören.

Der musikalische Fingerabdruck von Glocken

Eine nachhaltige Optimierung der Läutebedingungen muss sich immer am Zustand der vorhandenen Glocken orientieren. Dazu ist es nicht ausreichend, den Materialabtrag am Schlagring als Massgabe für den Glockenzustand heranzuziehen. Vielmehr ist zu überprüfen, ob eine Glocke bereits Vorschädigungen besitzt und ob sich bereits Ermüdungsrisse, die noch nicht an der Oberfläche sichtbar sind, in der Glocke ausbreiten.

Das Analyseprinzip, das als musikalischer Fingerabdruck der Glocke beschrieben wird, bietet die Möglichkeit, anhand von Klangaufnahmen das Schwingverhalten von Glocken zu untersuchen, auf

dessen Basis eine Bewertung des Glockenzustands möglich ist. Die Grundlage dieses Analyseprinzips liegt darin, dass sich Unregelmäßigkeiten im Klangkörper einer Glocke auf das ihr eigene Schwingverhalten auswirken. [3]

Zur Beschreibung des charakteristischen Schwingverhaltens einer Glocke werden die wichtigsten Teiltöne der Glocke (Unterton, Prime, Terz, Quinte, Oktave, Duodezime und Doppeloktave) herangezogen. Häufig können bei einzelnen oder mehreren dieser Teiltöne Schwebungen im Abklingverhalten festgestellt werden, die auf Tonspaltungen hinweisen. (Abb. 7)

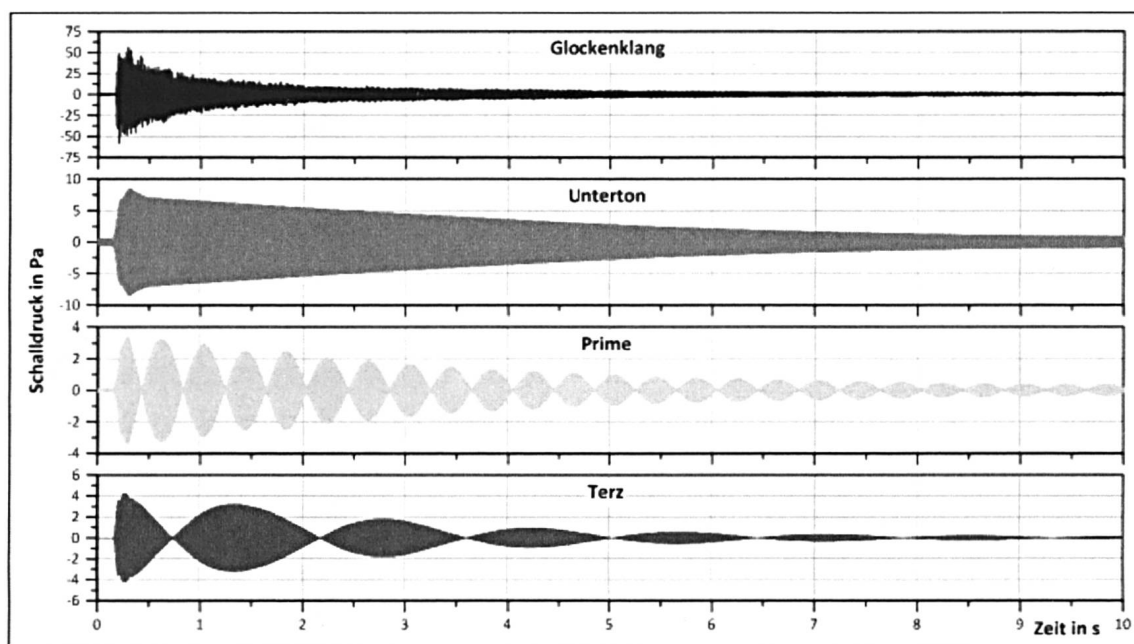


Abb. 7: Abklingverhalten einer Glocke sowie ausgewählter Teiltöne (gefiltert)

Diese treten immer dann auf, wenn der Klangkörper der Glocke kein idealer rotationssymmetrischer Körper ist, sondern durch Fehlstellen wie Verschleiss, Porosität, Lunker, aber auch durch Inschriften und Ornamente oder durch Risse hinsichtlich seines Schwingverhaltens beeinflusst wird. Je nach Art und Ausprägung der Fehlstelle(n) ändert sich das Schwingverhalten der Teiltöne nach bestimmten Mustern. So konnte mit Hilfe von Simulationen und anhand konkreter Messungen an Glocken nachgewiesen werden, dass Fehlstellen im Bereich des Schlagrings, die sich in vertikaler Lage befinden, wie beispielsweise Risse oder Schweissnähte, Tonspaltungen insbesondere bei Un-

terton, Terz, Oktave, Duodezime und Doppeloktave hervorrufen, an den übrigen Teiltönen sich jedoch nicht oder nur schwach auswirken. Fehlstellen in horizontaler Lage wie Verschleiss oder Auftragschweissungen führen jedoch insbesondere zu Tonspaltungen an der Prime und gelegentlich beim Unterton. Die durchgeführten Analysen und Simulationen haben weiterhin erkennen lassen, dass mit zunehmender Ausprägung des Schadens auch die Tonspaltungen zunehmen. Da eine Zunahme des Verschleisses nur äusserst langsam geschieht, das Wachstum von Rissen jedoch vergleichsweise schnell, können insbesondere Ermüdungsschäden durch wiederholte Klangmessungen und darauf aufbauende

Schwingungsanalysen zuverlässig nachgewiesen und bereits frühzeitig identifiziert werden.

Ein grosser Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass einfache Klangaufnahmen der ruhenden Glocke ausreichen, um das Schwingverhalten analysieren zu können. Da das Prinzip des musikalischen Fingerabdrucks auf detaillierten Frequenzanalysen basiert, ist der Einsatz von kalibrierten Messmikrofonen nicht erforderlich. Bei entsprechender Schulung können Fachfirmen und Glockenexperten die Klangaufnahmen eigenständig durchführen, die für die Analyse und den Abgleich mit den vorhandenen Referenzda-

ten notwendig sind.

Für eine zuverlässige Überwachung von historischen und besonders gefährdeten Glocken wäre eine Klanganalyse im Turnus der jährlichen Wartung ausreichend. Damit könnten Schäden so frühzeitig festgestellt werden, dass die Klangveränderungen noch nicht vom menschlichen Gehör wahrnehmbar sind, so dass durch eine Veränderung der Läutebedingungen sowie eine Drehung der Glocke das Risswachstum gestoppt werden kann und ein Weiterbetrieb der Glocke möglich ist. Weniger gefährdete Glocken könnten in einem längerfristigen Turnus überwacht werden.

Anwendung der vorhandenen Verfahren bei Glockenreparaturen

Schweissarbeiten an Glocken sind mit einem hohen Risiko für die weitere Lebensdauer von Glocken verbunden. Um Spannungsrisse zu vermeiden, die durch das Einbringen des flüssigen Schweissgutes auf die Schweissstelle verursacht werden können, muss die Glocke auf über 400 °C erhitzt und nach der Reparatur langsam abgekühlt werden. Dabei können jedoch andere Schäden zutage treten, die vorher keinen Einfluss auf die Haltbarkeit der Glocke hatten. Weiterhin besitzt das Schweissgut

nicht die gleichen Festigkeitseigenschaften wie das Originalmaterial, insbesondere in den Übergangsbereichen zwischen Schweissgut und ursprünglichem Glockenmaterial. Beim autogenen Schweissverfahren kann zudem häufig hohe Porosität im Schweissgut mit vielen Gaseinschlüssen beobachtet werden.

Das ECC-ProBell wurde wiederholt mit Schäden an geschweissten Glocken konfrontiert, die bereits wenige Jahre nach der Reparatur meist im Bereich der

Schweisstelle auftraten. Bei den meisten dieser Fälle bestand die Ursache unter anderem darin, dass die Glocke nach der Reparatur unter den gleichen Bedingungen weitergeläutet wurde wie zuvor. Die Überbeanspruchung der Glocke, die bereits zum ersten Schaden geführt hatte, blieb somit auch nach der Reparatur bestehen, so dass aufgrund der reduzierten Beanspruchbarkeit des geschweissten Materials ein erneuter Schaden unausweichlich war. Daher sollte

eine Reparaturmassnahme immer mit einer detaillierten Analyse der Schadensursachen begleitet werden, die in konkreten Vorgaben für den Weiterbetrieb der reparierten Glocke mündet. Insbesondere ist zu prüfen, ob eine Schweisreparatur überhaupt zwingend erforderlich ist oder ob alternative Reparaturverfahren zum Einsatz kommen können, insbesondere dann, wenn keine Ermüdungsschäden im Klangkörper der Glocke vorhanden sind.

Die ehemalige Dachreiterglocke des Klosters Maulbronn

Im Falle der Sanierung der ehemaligen Dachreiterglocke des Klosters Maulbronn (Abb. 8) wurde eine solche Analyse in Auftrag gegeben, um die Notwendigkeit einer Schweissung zu prüfen. Die Glocke aus dem 13. Jahrhundert mit dem Schlagton f'' wies bereits

einen sehr starken Materialabtrag über weite Teile des Schlagrings auf, der zum Teil über 15% der Schlagringdicke betrug. Zudem fehlte der Glocke ein Kronenhenkel, und das Hängeisen des Klöppels war bereits entfernt worden.

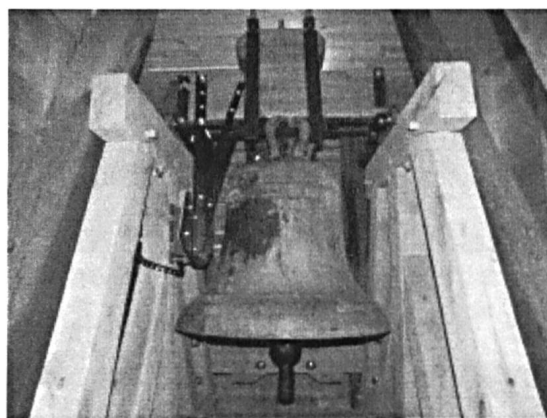
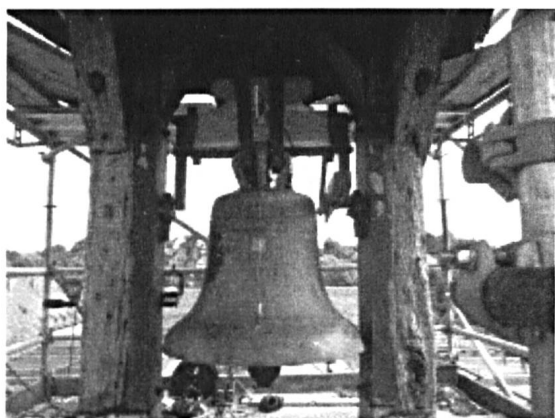


Abb. 8: Ehemalige Dachreiterglocke Maulbronn

Mit Hilfe des musikalischen Fingerabdrucks wurde der Zustand der Glocke untersucht und festgestellt, dass signifikante Tonspaltungen nur an der Oktave und an der Prime auftreten, die als Hinweis auf fortgeschrittenen Materialabtrag am Schlagring, jedoch nicht auf einen bereits vorhandenen ausgeprägten Ermüdungsriss gelten.

Aufgrund der ausreichenden Dimensionierung der noch vorhandenen 5 Kronenhenkel war eine Reparaturschweissung ebenfalls nicht zwingend erforderlich und die Löcher für die Klöppelaufhängung waren bereits in der Glockenhaube vorhanden.

Zur weiteren Schonung und für eine bessere Klangentfaltung wurde die Glocke an ein gerades Holzjoch gehängt und ein Klöppel für die Glocke konstruiert, der speziell auf den stark verschlissenen Schlagring angepasst ist und eine sehr niedrige Anschlagsintensität gewährleistet. Weiterhin wurde die Glocke um ca. 30° gedreht, um die künftigen Läutebelastungen

in einen bis dahin nur gering beanspruchten Bereich einzuleiten, der zudem noch über eine grössere Schlagringdicke verfügte.

Durch die Sanierung wurde eine Anschlagsintensität von $J_{exp} = 1,8$ erreicht, die aufgrund verbesserter Läutebedingungen dennoch zu einer deutlich verbesserten Klangentfaltung der Glocke geführt hat. Der Zustand der Glocke blieb konstant, was durch die wiederholte Klangmessung und den daraus abgeleiteten musikalischen Fingerabdruck festgestellt werden konnte, der keine nennenswerten Veränderungen im Klangbild aufweist.

Der Einsatz des musikalischen Fingerabdrucks sowie die Anwendung der gegenwärtig vorhandenen Erkenntnisse zum schonenden Läuten von Glocken konnten bei dieser Glocke einen kostenintensiven Eingriff durch Schweissarbeiten verhindern, die nach wie vor mit einem hohen Risiko für Folgeschäden verbunden sind.

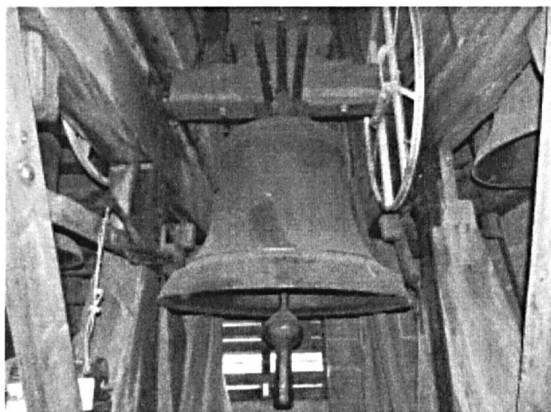
Glocke mit wiederholtem Riss

Die f'-Glocke der Michaelskirche in Entringen aus dem Jahre 1494 wurde bereits dreimal geschweisst, als im Frühjahr 2016 ein erneuter Riss im Bereich der

Anschlagstelle des Klöppels festgestellt wurde. Während die erste Schweissung nur der Sanierung des Schlagrings sowie der Krone und der Klöppelöse diente, musste

beim zweiten und dritten Mal innerhalb von 6 Jahren zweimal die gleiche Position durch Schweissen repariert werden, die nun wiederum Ausgangspunkt eines erneuten Risses darstellt. (Abb. 9)

Nach Messung und Analyse



der dynamischen Eigenschaften und der Beanspruchungen an der Glocke beim Läuten wurde eine Anschlagintensität von $J_{exp} = 4,1$ ermittelt, die im Wesentlichen aus einer ungünstigen Massenverteilung am Klöppel resultierte.

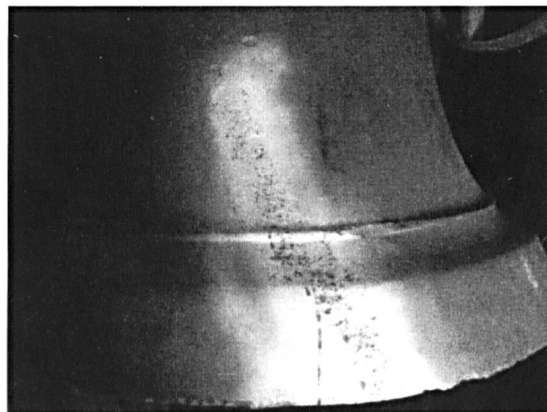


Abb. 9: f'-Glocke der Michaelskirche in Entringen mit erneutem Riss in Schweissung

Dieser Klöppel, der nach der ersten Glockensanierung installiert worden war und als Hauptverursacher für den Schaden anzusehen ist, wurde weder nach der ersten noch nach der zweiten Rissreparatur ausgetauscht, so dass aufgrund der Schwächung der Glocke durch die Schweissnaht ein dritter Schaden unausweichlich war. Zudem wurde das bereits im Jahre 2002 herausgegebene VDG-Merkblatt zur Verbesserung der Lebensdauer von Glocken [4] ignoriert, in dem auf den Wert einer definierten Drehung der Glocke zur Verlängerung der Lebensdauer und zur Verteilung der Läutebelastungen über den Umfang der Glocke hin-

gewiesen wird.

Dieser Fall zeigt exemplarisch auf, dass im Bereich des Glockenwesens immer noch viel zu häufig anerkannte und wissenschaftlich untersuchte Erkenntnisse nicht berücksichtigt werden bzw. zur Anwendung kommen. Die einseitige Fixierung auf die musikalische Qualität der Glocken birgt die Gefahr in sich, dass die konkrete technische Umsetzung aus dem Blickfeld gerät und der Stand der Technik nicht zur Anwendung kommt.

Dass eine Sanierung zur Schonung von Glocken keine Einschränkung der Klangqualität, sondern eine Klangverbesserung

mit sich bringt, zeigen unter anderem die abgeschlossenen Geläutesanierungen in der Kathedrale von Fribourg, im Berner Münster,

in der Kathedrale von Solothurn sowie im Mittelzeller Münster auf der Insel Reichenau.

Ausblick

Eine nachhaltige Optimierung des Klangverhaltens bei gleichzeitiger Schonung von Glocken kann nur gelingen, wenn die für jedes Glockensystem einzigartigen dynamischen und geometrischen Eigenschaften sowie die äusseren Läuteparameter und verwendeten Materialeigenschaften berücksichtigt werden. Die im Europäischen Kompetenzzentrum für Glocken ECC-ProBell entwickelten Methoden, Computer-Simulationen und systematischen Datenbanken berücksichtigen die einzigartige Läutesituation einer jeden Glocke und ermöglichen dadurch eine Läuteoptimierung für die unterschiedlichsten Anforderungen im Hinblick auf Schadensrisiken, Denkmalschutz, vorliegende Reparaturen und klangliche Eigenschaften.

Aufgrund der Vielzahl an

Anforderungen kann es keine standardisierten Lösungen geben, vielmehr besteht das Ziel der nach wie vor andauernden Forschungen darin, das Anschlagverhalten des Klöppels und seine Wirkung auf den Klang noch umfassender zu verstehen, um so die Klöppel-auslegung im Sinne der Klangoptimierung weiter zu verbessern. Dazu bedarf es jedoch auch einer präzisen Beschreibung des von den Glockenexperten erwarteten Klangbildes von Glocken.

Ein besonderes Augenmerk wird zukünftig auch auf der Verbreitung der Methodik des entwickelten musikalischen Fingerabdrucks liegen, die eine kontinuierliche Überwachung des Zustands von Glocken ermöglicht und so wesentlich zum Erhalt des wertvollen Kulturgutes Glocke beiträgt.

Prof. Dr. Andreas Rupp & Dr. Michael Plitzner
Hochschule Kempten, ECC-ProBell®

Literatur

- [1] RUPP, A, FAJDIGA, M, ATZORI, B. et.al.: *Technical reports of the European Research Project COOP-CT-2005: Maintenance and protection of bells*, Unveröffentlichte Abschlussberichte, Kempten, 2008.
- [2] RUPP, A und FLADE, D.: *Bestimmung von Einflussgrößen auf die Lebensdauer von Glocken*, LBF-Bericht Nr. 8382, Darmstadt, 1999.
- [3] PLITZNER, M.: *Der musikalische Fingerabdruck von Glocken als Mittel zur Schadensfrüherkennung*, Schriftenreihe der Hochschule Kempten, Bd. 2, Göttingen 2015.
- [4] VDG-Merkblatt A600E, *Verbesserung der Lebensdauer von Glocken*, 2002.

PROTECTION ET CONSERVATION DES CLOCHES :
DES PRINCIPES D'UNE OPTIMISATION DES INSTALLATIONS
CAMPANAIRES (RÉSUMÉ)

Les événements sollicitant les cloches et l'émergence de dommages ont été étudiés, au cours des deux dernières décennies, sous tous leurs aspects, dans le cadre de projets de recherche financés sur les plans national et européen. Ainsi, les causes et le contexte liés à l'émergence et à la prolifération des dommages dûs à la fatigue des cloches et à l'usure par l'impact du battant ont pu être largement clarifiés et rendus ainsi accessibles à la considération des ingénieurs.

Les méthodes de conception de cloches qui en découlent permettent de calculer le risque de dommages causés par la fatigue des cloches et d'influencer, de façon ciblée, les caractéristiques sonores de la cloche qui sonne.

Les conditions affectant la sonnerie peuvent ainsi être optimisées de façon ciblée pour différentes raisons - que ce soit pour les besoins de la préservation du patrimoine de biens culturels, afin de minimiser le risque de dommages, ou d'un point de vue musical pour améliorer le développement du volume sonore. Au-delà

de l'optimisation de l'ingénierie du système campanaire, des conditions externes affectent aussi les contraintes exercées sur la cloche pendant la sonnerie et le développement du son de la cloche. Le moteur d'entraînement, en tant que fournisseur d'énergie cinétique du système, et le système de suspension du battant favorisent considérablement une sonnerie douce et une course régulière du battant.

L'empreinte musicale est une méthode d'analyse basée sur des mesures acoustiques qui permet de déterminer l'état des cloches. En utilisant l'analyse fréquentielle, on peut constater si et dans quelle mesure des dommages existent dans le corps sonore d'une cloche. L'empreinte musicale, de cette sorte, devient la base d'un plan d'assainissement individualisé pour une cloche, en particulier pour déterminer les futures charges admissibles et les points d'impact du battant. Ce procédé est également une méthode efficace et économique pour surveiller des cloches anciennes ayant une grande

valeur historique, des cloches déjà endommagées ou de très grandes cloches. Il permet de détecter, suffisamment tôt, les dommages dûs à la fatigue, pour que la croissance des fissures puisse être ralentie ou arrêtée à l'aide des méthodes d'optimisation existantes.

Prof. Dr. Andreas Rupp & Dr. Michael Plitzner
(Traduction A.F.)