



Vorwort

Sehr gerne haben wir vom Europäischen Kompetenzzentrum für Kirchenglocken ECC-ProBell[®] zusammen mit dem Beratungsausschuss für das Deutsche Glockenwesen zum 2. Glockensymposium eingeladen, um über den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik rund um das Thema Glocken zu berichten und zu diskutieren.

Mit der Frage nach dem Einfluss des Drehens von Glocken auf die Lebensdauer begann im Jahre 1996 die systematische Forschung an Glocken im Hinblick auf ihre Schädigung. Ein erstes Projekt im Auftrag des Verbandes der Deutschen Gießereifachleute VDG am Fraunhofer Institut LBF beantwortete einige Fragen, zeigte aber zugleich eine ganze Anzahl ungeklärter Zusammenhänge und Phänomene auf. Die im Jahre 2005 an der Hochschule Kempten mit Förderung der Europäischen Union aufgenommenen Forschungsarbeiten hatten zum Ziel, den Schutz und die Wartung von Glocken sowie Phänomene rund um das Thema der Schädigung mit modernen Ingenieurswerkzeugen zu untersuchen. Als Ergebnis konnten auf unserem 1. Symposium im Mai 2009 die Methoden und Verfahren vorgestellt werden, mit denen das Schadensrisiko läutender Glocken bestimmt werden kann. Mithilfe der darauf aufbauenden Computer-Modelle kann ein schonendes Läuten bei hoher Klangqualität simuliert und berechnet werden.

Die erarbeiteten Erkenntnisse wurden seither an über 200 Glocken im In- und Ausland zur Anwendung gebracht, darunter bedeutende Glocken und Geläute u.a. des Kölner Doms, der Frauenkirche München, des Freiburger und Berner Münsters, des Petersdoms in Rom und der Weltkulturerbestätten auf der Insel Reichenau.

Zur Ermittlung des Zustands einer Glocke wurde der musikalische Fingerabdruck von Glocken in der 2015 abgeschlossenen Dissertation von Dr. M. Plitzner entwickelt, um anhand von Klangmessungen Risse so frühzeitig zu erkennen, bevor es zu hörbaren Klangveränderungen kommt. Dieses Verfahren eignet sich dazu, insbesondere historisch wertvolle sowie vorgeschädigte und große Glocken kostengünstig überwachen zu können. Laufende Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf eine gezielte Einstellung der Klangqualität von Glocken beim Läuten sowie auf die Untersuchung und Optimierung von Glocken aus Ersatzmaterialien.

Die Arbeiten des ECC-ProBell[®] waren stets sehr eng an den praktischen Anforderungen des Glocken-Alltags ausgerichtet. Die angewandten Methoden und die erzielten Arbeitsergebnisse wurden mit einer großen Anzahl von unterschiedlichen Fachleuten diskutiert und verbessert. Das Programm des 2. Glockensymposiums wurde daher um weitere Themen rund um Glocken erweitert. Es freut uns sehr, dass namhafte Experten über Fragen zur Klangbildung und Klangwirkung, über denkmalpflegerische Aspekte, baulastische Anforderungen oder das Glockenläuten als Kultursymbol berichten. Die Vorstellung konkreter Projekte zur Schonung, Klangverbesserung und Lärminderung läutender Glocken, zum Umgang mit Glocken aus Ersatzmaterialien und zur Möglichkeit der Überwachung kulturhistorisch bedeutsamer Glocken mit modernen Medien repräsentieren den aktuellen Stand der Forschungen und sollen zum Austausch und zur Diskussion über den zeitgemäßen Umgang mit Glocken einladen.

Prof. Dr.-Ing. Andreas Rupp

Leiter des ECC-ProBell[®]



Das Europäische Kompetenzzentrum für Glocken – Verfahren zur Beurteilung von Glocken

Andreas Rupp, Michael Plitzner

Hochschule Kempten, ECC-ProBell®

Zusammenfassung

Das Beanspruchungsgeschehen und die Schadensentstehung an Glocken wurden in den vergangenen zwei Jahrzehnten in national und europäisch geförderten Forschungsvorhaben umfassend 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 abgeleiteten Auslegungsverfahren erlauben eine rechnerische Bestimmung des Risikos für Ermüdungsschäden an Glocken und für einen verstärkten Verschleiß an den Klöppelanschlagstellen 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 die Verbesserung der Klangfaltung oder Lautstärke.

1. Die Glocke aus ingenieurmäßiger 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, der Klöppel, der Glockenstuhl sowie die Läutemaschine mit ihrer Steuerung.

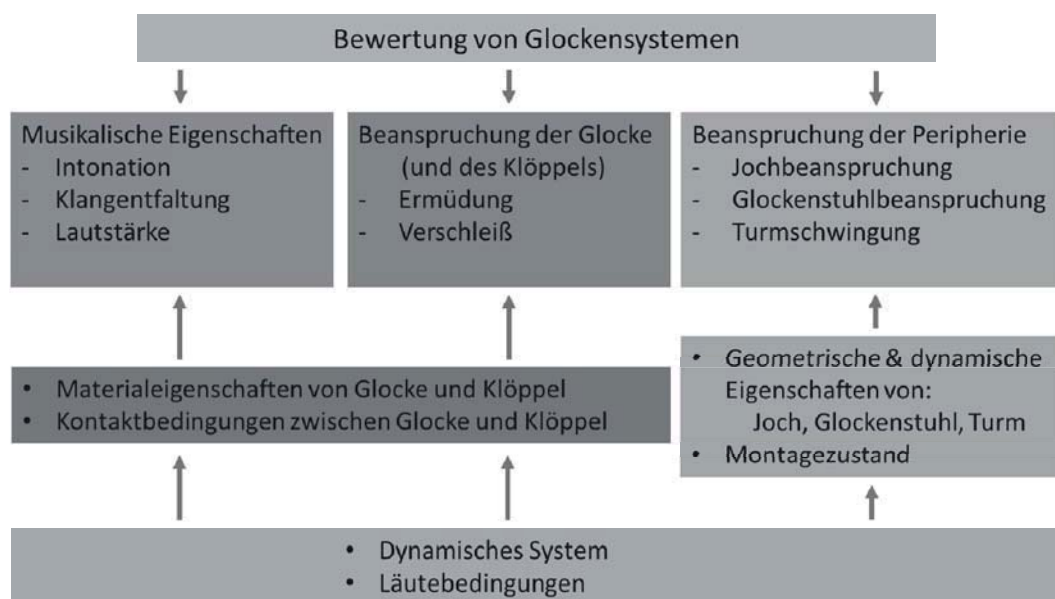


Abbildung 1: Die Bewertung von Glockensystemen



Durch den Klöppelanschlag werden Glocken sehr hart beansprucht, so dass im Laufe der Zeit an Glocken Ermüdungsrisse auftreten können – sowohl historische Glocken wie die Gloriosa in Erfurt (gegossen 1497) oder die Clinsa in Merseburg (gegossen um 1180) als auch moderne Glocken wie die Millenniumsglocke in Hamburg (gegossen 1999) zählen dazu. Die Ursachen dafür sind teilweise auf Gussfehler zurückzuführen, überwiegend jedoch auf die hohen Beanspruchungen beim Läuten der Glocke. Der Klöppelanschlag erzeugt hohe lokale Beanspruchungen, die sich durch das Tönen der Glocke im gesamten Glockenkörper ausbreiten und dort, wo sie auf Materialinhomogenitäten treffen, zu Schäden führen. Neben dem Risiko für Ermüdungsrisse ist häufig ein hoher Schlagverschleiß an den Anschlagstellen der Glocken zu beobachten, der ebenfalls durch den harten Anschlag des Klöppels aber auch durch das Material des Klöppels oder die Anschlagskonditionen des Klöppels bestimmt wird (Abb. 2).

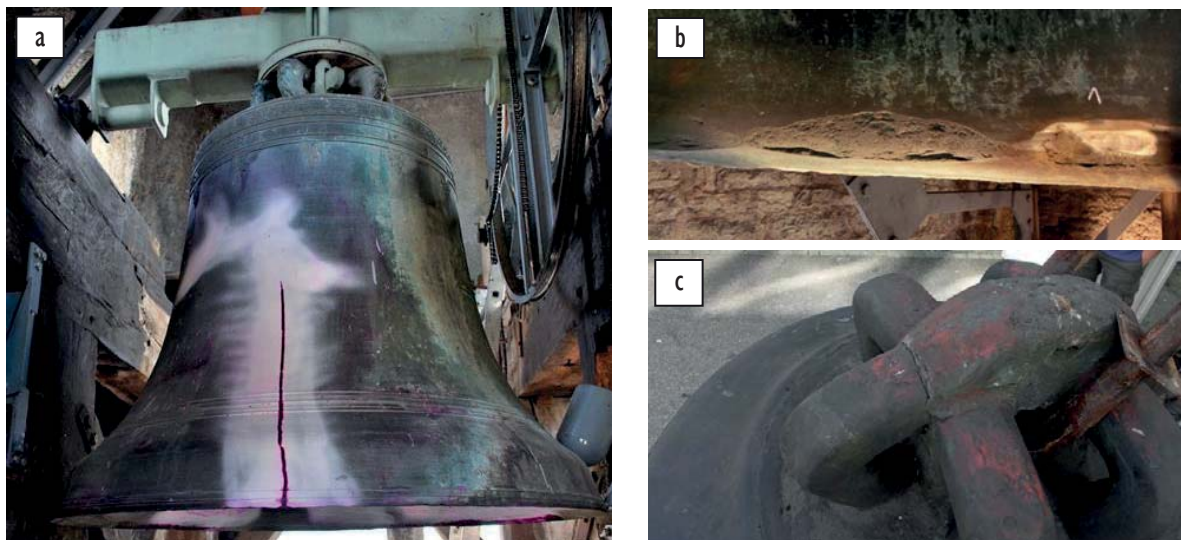


Abbildung 2: Schäden an Glocken: a) Ermüdungsriss; b) Schlagverschleiß; c) Fertigungsfehler

Immer wieder kommt es zu Schäden an Glocken, die mit hohem Aufwand und unter Verlust von wertvollen, kulturhistorischen Details etc. repariert werden, um anschließend die Glocken nur weiter unter den Bedingungen zu läuten wie zuvor, mit dem Ergebnis, dass nach kurzer Zeit erneut Schäden beobachtet werden. Gleichzeitig ist festzuhalten, dass für eine gute Intonation einer Glocke, die ihr volles musikalisches Potenzial erklingen lässt, ein Anschlag mit recht hoher Intensität erforderlich ist. Ein dauerhaftes Läuten der Glocke bei hoher musikalischer Qualität ist daher immer eine Gratwanderung hinsichtlich der Intensität des Anschlags und der Läuteparameter. Ein systematisches Verständnis der Parameter, die die Beanspruchungen einer Glocke bestimmen, und Ingenieurswerkzeuge zu ihrer Beurteilung und Vorhersage sind unbedingt erforderlich, um ein Läuten bei geringem Risiko für Schäden und hoher musikalischer Qualität einzustellen.

Die Arbeiten in den durchgeführten Forschungsprojekten konzentrierten sich daher auf die Erforschung von systematischen Erkenntnissen zu den Ursachen von Schäden sowie auf die Erarbeitung der Berechnungs-, Analyse- und Bewertungsverfahren für eine ingenieurmäßige Einstellung geeigneter Läutebedingungen.



2. Schlagverschleiß an Glocken

Der an den Kontaktflächen zwischen Glocke und Klöppel auftretende Schlagverschleiß ist gekennzeichnet durch die Verschleißmechanismen Adhäsion, Abrasion und Oberflächenzerrüttung. Zusätzlich bewirkt die Kaltverfestigung in den Anschlagstellen lokal eine Versprödung der Oberflächen. Das Ausmaß des Verschleißes an Glocken ist abhängig vom Material des Klöppels (und der Glocke), den geometrischen Kontaktbedingungen, wie der Position der Kontaktflächen am Glockenkörper, der Anschlagrichtung des Klöppels und der Klöppelführung sowie der Intensität des Klöppelanschlags.

Den Einfluss des Klöppelmaterials auf die elasto-plastischen Verformungen an Glocke und Klöppel zeigen FEM-Simulationen, die durch Dauerversuche an Glocken und Materialproben bestätigt wurden. [1] Bei Klöppeln aus niedrigfestem Stahl ($R_{p,0,2} < 350\text{MPa}$) ist die verbleibende plastische Verformung an der Glocke nach dem Anschlag deutlich niedriger als bei höherfestem Stahl ($R_{p,0,2} > 350\text{MPa}$) (Abb. 3). Die Verwendung von Materialien mit sehr niedriger Festigkeit, kann die plastische Verformung an der Glockenoberfläche sogar nahezu vollständig verhindern, führt jedoch dazu, dass sich diese Materialien selbst sehr rasch verformen bzw. verschleifen und die Anschlagflächen am Klöppel in kurzer Zeit sehr groß werden. Dadurch kommt es zu einem klatschenden Geräusch beim Anschlagen des Klöppels, was die Klangqualität der Glocke vermindert und beeinträchtigt.

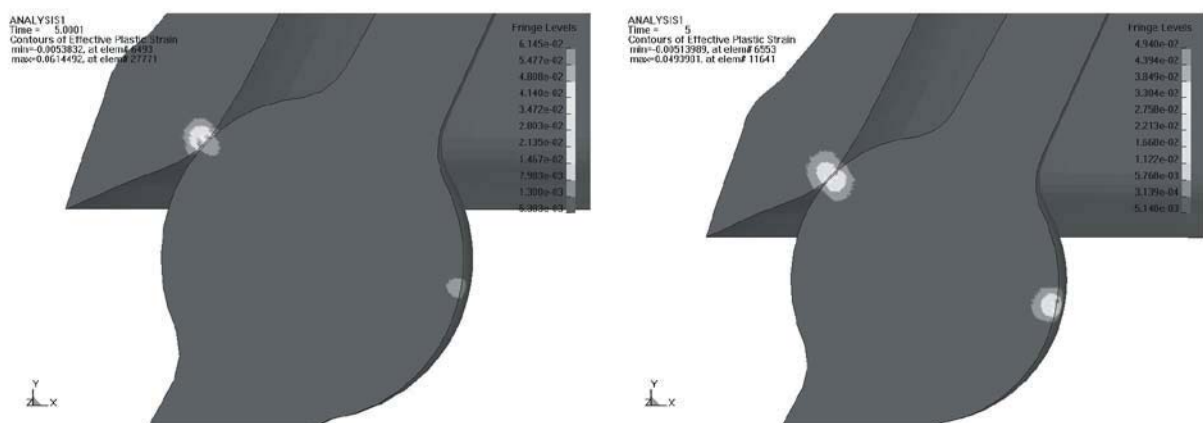


Abbildung 3: Plastische Verformung an den Kontaktflächen nach dem 10. Anschlag, links: höher-festes Material, rechts: niedrig-festes Material

An Glocken mit erhöhtem Verschleiß ist oft zu beobachten, dass einerseits der Klöppel seitlich schlecht geführt wird oder andererseits der Klöppel mit seiner Länge nicht optimal an die Glocke angepasst ist. Die Ursachen für den vermehrten Verschleiß liegen in Reibvorgängen, die während des Anschlags auf der Glockenoberfläche stattfinden. Durch die fehlende seitliche Führung rutscht der Klöppel bei jedem nicht-zentralen Stoß über die Glockenoberfläche, durch einen zu lang ausgeführten Klöppel ist die Stoßrichtung nicht senkrecht auf die Oberfläche, wodurch zusätzliche Reibung beim Kontakt auftritt (Abb. 4). Der wiederholte Anschlag auf ein und dieselbe Stelle bewirkt eine lokale Verfestigung der Bronze, was eine geringere Zerrüttung der Oberfläche nach sich zieht.

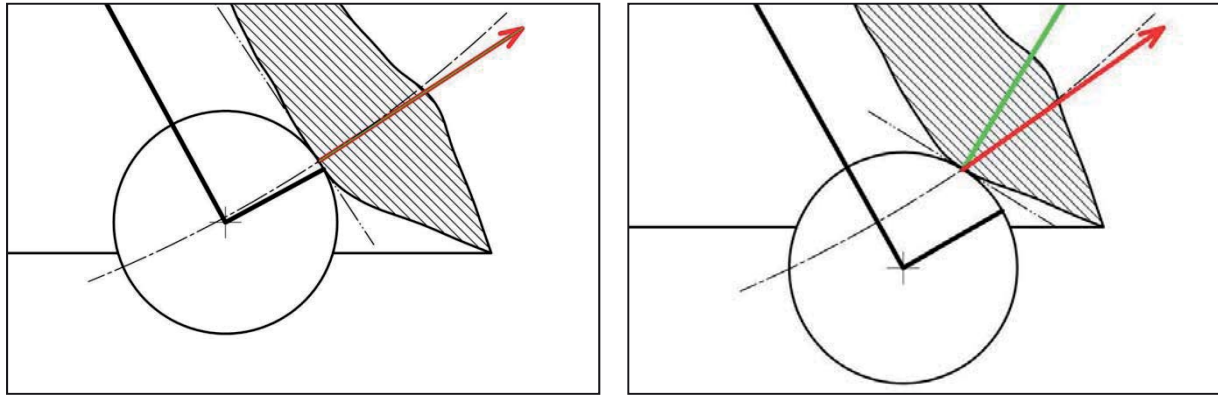


Abbildung 4: Variation der Klöppelanschlagrichtung (Stoßrichtung Pfeil, Flächennormale grau), links: Klöppellänge optimal; rechts: Klöppel zu lang

3. Materialermüdung und Anschlagsintensität als Bewertungsmaßstab für das Schadensrisiko

Glocken werden beim Läuten mit ihrem Joch im vorhandenen Glockenstuhl durch eine Läutemaschine angetrieben, so dass der eingehängte Klöppel anschlägt und sie zum Klingen bringt. Die dynamischen Systeme sind so ausgelegt, dass der Klöppel nach dem Einläuten mit möglichst gleichbleibender Intensität die Glocke so anschlägt, dass ihre Töne ausgewogen angeregt werden, dass aber gleichzeitig das Risiko für Schäden gering ist. Das Maß für Schäden sind die örtlichen Beanspruchungen in den unterschiedlichen Bereichen der Glocke. Diese Beanspruchungen lassen sich mit sogenannten Dehnungsmesstreifen (DMS) örtlich messen und den in Versuchen bestimmbaren Beanspruchbarkeiten von Glockenbronze [2] zur Bewertung gegenüberstellen. Für ein gegebenes Glockensystem lässt sich damit zuverlässig das Risiko für Ermüdungsschäden abschätzen.

Um bei zu hohem Risiko geeignete Gegenmaßnahmen gezielt treffen zu können, ist die Kenntnis der Parameter sowie ihrer Auswirkung erforderlich, die zu den hohen Beanspruchungen führen. Abb. 5 zeigt die Messtechnik zur Erfassung von Glockenbeanspruchung und Belastung.



Abbildung 5: Klöppel mit Beschleunigungssensor (links) und Glocke mit DMS (rechts)

Die Belastungen werden über einen Beschleunigungssensor ermittelt, der am Klöppel befestigt wird und die Intensität des Anschlags erfasst. (Abb. 5 links) 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. 5 rechts) Sie erfassen die tatsächlichen örtlichen Verformungen des Glockenmaterials und stellen damit die Grundlage für die Bewertung des Schadensrisikos dar. In Abb. 6 sind die Zeitverläufe der gemessenen Klöppelbeschleunigung und der örtlichen Dehnung während einer Läutedauer von 100s wiedergegeben. Deutlich wird am oberen Beschleunigungssignal, dass die nach oben ausschlagende Beschleunigung an der Anschlagstelle 1 im Mittel kleiner ist als auf der gegenüberliegenden Seite – die Glocke wurde also hier nicht symmetrisch angeschlagen, vermutlich wegen einer asymmetrischen Ausrichtung des Klöppels. Darüber hinaus ist jeder Anschlag des Klöppels während dieser Läutedauer anders als der vorhergehende, was damit erklärt werden kann, dass der anfliegende Klöppel die Glocke am Schlagring in einer zufälligen Schwingphase mit einer Bewegung gegen oder mit dem Klöppel trifft – der Anschlag fällt daher mal stärker und mal schwächer aus. Demgemäß ergeben sich auch die Beanspruchungen als Folge des jeweiligen Anschlags in unterschiedlicher Höhe. Hieraus resultiert, dass eine Bewertung von Läuteparametern immer nur anhand statistischer Größen erfolgen kann, da ansonsten der zufällige Anschlag eine Aussage verfälschen kann. In Untersuchungen wurde festgestellt, dass ein 2min-Läuten eine ausreichende Zuverlässigkeit für die Bewertung von Parametern bietet.

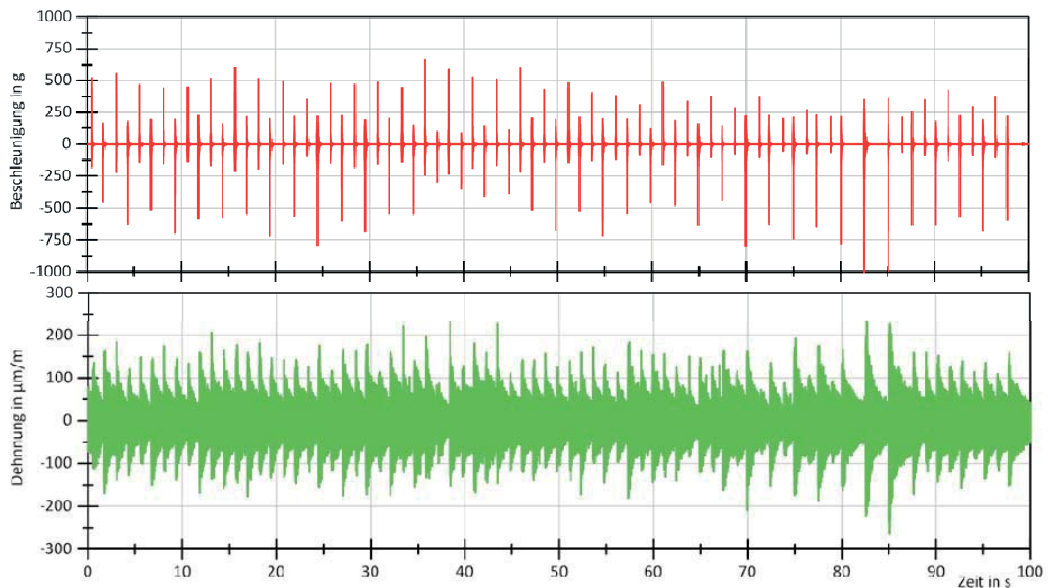


Abbildung 6: Zeitverlauf von Klöppelbeschleunigung und Dehnung am Anschlag

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.



Abbildung 7: Läutemessung an einer Glocke mit verkröpftem Joch im Schalllabor



Als entscheidende Parameter wurden unter anderem das Klöppelmaterial, der Lätewinkel, die Klöppelmasse, die Massenverteilung am Klöppel, die Anschlagposition des Klöppels an der Glocke sowie das dynamische Verhältnis zwischen Glocken- und Klöppelpendel, die Aufhängung des Klöppels, die Zentrierung von Glocke und Klöppel sowie die Lätemaschine identifiziert. Aus diesen Parametern wurde als Bewertungsmaßstab die einheitslose Größe Anschlagintensität J entwickelt, mit der das Schadensrisiko für Glocken beurteilt werden kann, die darüber hinaus aber auch Auskunft über die Klanganregung und die Lautstärke der Glocke gibt. Die Anschlagintensität ergibt sich aus der Kombination der Läueteparameter, die gemäß ihres Einflusses auf die Beanspruchung der Glocke unterschiedlich gewichtet zusammengefasst werden. Die daraus entwickelten Computermodelle ermöglichen es nun, dass das Läuteverhalten der Glocke aus der Kombination der Läueteparameter simuliert und die theoretische Anschlagintensität J_{sim} berechnet werden kann. Somit lässt sich auch ohne Messung die Anschlagintensität abschätzen, um für vorhandene oder neue Glockensysteme schonende Läutebedingungen festzulegen und eine optimierte KlöppelAuslegung durchführen zu können. Aufgrund der Wechselwirkung zwischen Beanspruchung und abgestrahlter Schallenergie ist auch eine Abschätzung der zukünftigen Klanganregung und Lautstärke möglich. Auf diese Weise können auch Glockengießer und Installationsfirmen, die das entsprechende Knowhow besitzen und zur Anwendung bringen, schonende Läutebedingungen berechnen und die dafür notwendigen Sanierungsmaßnahmen umsetzen.

Eine zuverlässige Bewertung der tatsächlichen Glockenbelastungen 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 200 Glocken vorgenommen wurde.

Zur Beurteilung der Anschlagintensität wurde ein vierstufiges Bewertungssystem eingeführt, um das Risiko für Ermüdungsschäden und die Klanganregung beurteilen zu können: (Abb. 8)

$J_{exp} < 2$:	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.

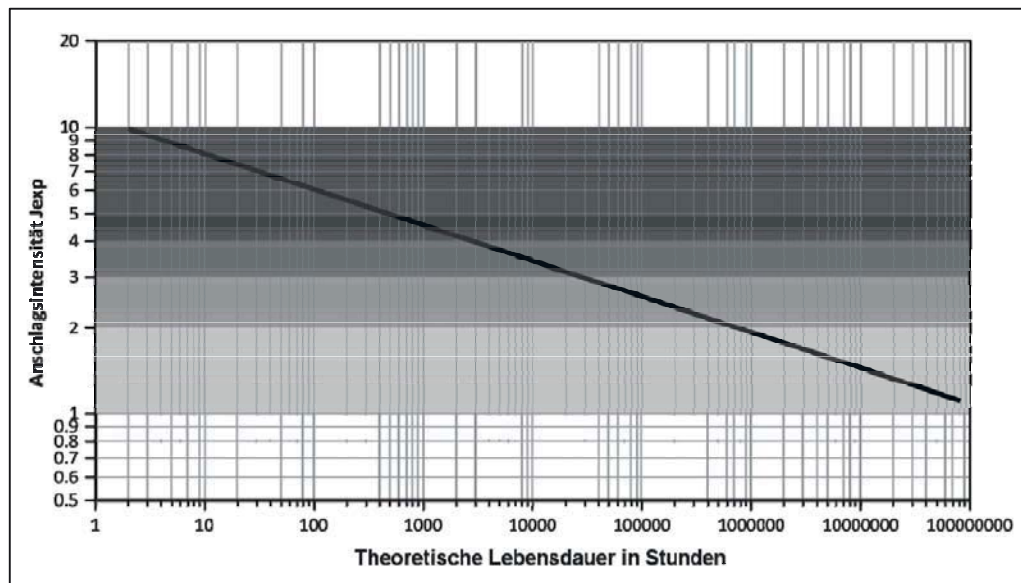


Abbildung 8: Zusammenhang der Anschlagintensität mit der abgeschätzten Lebensdauer einer Glocke als Basis zur Bewertung des Risikos für Ermüdungsschäden

Eine Voraussage, zu welchem Zeitpunkt Ermüdungsriss konkret entstehen bzw. wie hoch die verbleibende Restläutedauer einer Glocke ist, kann jedoch allein aus der Anschlagintensität 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 Anschlagintensität ist zu beachten, dass das menschliche Gehör tiefe Frequenzen bei gleichem Schalldruck leiser wahrnimmt als höhere Frequenzen. Große Glocken (etwa ab Schlagton h°) benötigen daher erfahrungsgemäß eine mittlere Anschlagintensität von $J_{exp} \geq 3$, um eine gute Klanganregung auch der tiefen Töne zu erreichen. Bei kleineren Glocken sollten Anschlagintensitäten von $J_{exp} < 2$ vermieden werden, weil dann die Klanganregung nur als leise und schwach wahrgenommen wird und diese Glocken dann im Zusammenklang eines Geläutes nicht oder nur schwach hörbar sind. Ausnahmen stellen jedoch vorgeschädigte und besonders erhaltenswerte Glocken dar, die mit einer sehr niedrigen Anschlagintensität geläutet werden sollten, um eine möglichst lange Restlebensdauer zu gewährleisten.

Bei Glocken, die mit mittlerer Anschlagintensität geläutet werden, um eine entsprechende Klanganregung zu erreichen, sollte das steigende Risiko für Schäden in der Läuteordnung berücksichtigt werden, so dass große Glocken den besonderen Ereignissen vorbehalten bleiben sollten. Hohe Anschlagintensitäten von $J_{exp} > 4$ sollten jedoch immer vermieden werden.