# Akustische Qualitätssicherung bei Reparaturen von Glocken

Michael Plitzner[1], Andreas Rupp[2]

[1] *Hochschule Kempten, ECC-ProBell, 87435 Kempten, E-Mail: michael.plitzner@hs-kempten.de*
[2] *Hochschule Kempten, ECC-ProBell, 87435 Kempten, E-Mail: andreas.rupp@hs-kempten.de*

## Zusammenfassung

Aufgrund der hohen Beanspruchungen, denen Kirchenglocken beim Läuten ausgesetzt sind, entstehen nicht selten Ermüdungsrisse im Klangkörper von Glocken, die durch Schweißen repariert werden müssen. Das Schweißen von Glocken ist jedoch mit zahlreichen Unsicherheiten behaftet, so dass sich bereits nach wenigen Jahren erneut Risse ausbilden können. Die bisher eingesetzten Methoden zur Qualitätssicherung reparierter Glocken beschränken sich im Wesentlichen auf eine Sichtprüfung bezüglich der Oberfläche und einer Klangprüfung mit besonderem Fokus auf das Abklingverhalten.

Eine deutlich weitreichendere Analyse bietet die akustische Bewertung des Schwingverhaltens von Glocken mit der Methode des musikalischen Fingerabdrucks. Diese nutzt die Zwillingstonbildung rotationssymmetrischer Körper aus, um Fehlstellen im Klangkörper von Glocken anhand von Klangaufnahmen zu ermitteln. Abhängig von der Lage, Ausprägung und Art vorhandener Fehlstellen können so charakteristische Abweichungen vom typischen Schwingverhalten von Glocken festgestellt werden, die eine Identifikation der verursachenden Fehlstelle ermöglicht. Auf diese Weise können die für Schweißreparaturen üblichen Klangveränderungen aufgrund abweichender Materialeigenschaften oder fehlerhafter Materialbindungen an Modellen simuliert und mit dem Schwingverhalten reparierter Glocken verglichen werden.

Die für die Bewertung erforderlichen Klangaufnahmen können mit geringem Aufwand erfasst werden, so dass dies Verfahren ein kostengünstiges Monitoring von Glocken ermöglicht. Nach Reparaturen kann so der Zustand der Glocken zuverlässig überwacht werden.

## 1. Schäden an Glocken

Das Läuten von Glocken ist mit hohen Belastungen für den aus Bronze gegossenen Klangkörper verbunden. Jährlich müssen zahlreiche Glocken vom Turm genommen werden, um Ermüdungsrisse durch Schweißen zu reparieren. Der Aufwand 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. (Abb. 1) 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. Systematische Untersuchungen zur Beanspruchung läutender Glocken wurden jedoch erst ab den 1990er Jahren durchgeführt. [1]

**Abbildung 1:** Ermüdungsriss in einer Glocke aus dem Jahre 1583, erkennbar gemacht durch Farbeindringprüfung

Die zentrale Ursache für Risse im Klangkörper von Glocken ist Materialermüdung, die durch den Klöppelanschlag hervorgerufen wird. Eine wirksame Schonung von Glocken ist daher durch eine Optimierung der Läutebedingungen und Anschlagskonditionen des Klöppels zu erreichen.

## 2. Methoden der Risserkennung

Ermüdungsrisse breiten sich im Allgemeinen im Bereich der höchsten Beanspruchungen, bei der Glocke an den Anschlagstellen des Klöppels, aus. In diesem Bereich, dem Schlagring der Glocke, werden eine Vielzahl der Teiltöne der Glocke zum Schwingen angeregt, so dass sich durch die Ausbreitung eines Risses der Klang der Glocke ändert. Tatsächlich werden die meisten Risse gehörsmäßig festgestellt, wenn sich der Glockenklang signifikant verschlechtert hat.

Ermüdungsschäden an Glocken bilden sich jedoch im Allgemeinen langsam heraus, so dass sich die daraus resultierenden Klangveränderungen auch nur langsam ausprägen. Das menschliche Gehör ist nur bedingt in der Lage, solche langsamen Änderungen im Klang einer Glocke zu erkennen, da die Klangerzeugung bei Glocken in Mitteleuropa in pendelnder Bewegung erfolgt, so dass der Gehöreindruck durch die akustischen Effekte, die bei bewegten Geräuschquellen auftreten, beeinflusst ist. Daher werden Risse in den häufigsten Fällen erst dann festgestellt, wenn die Rissausbreitung so stark fortgeschritten ist, dass sie mit dem normalen Auge an der Glockenoberfläche erkennbar sind. In einem solchen Fall ist jedoch der Klang der Glocke nur noch durch einen Neuguss oder eine Reparatur durch Schweißen wiederherzustellen.

Zur zuverlässigen Erkennung und Ermittlung der Ausdehnung von Rissen kommen derzeit in der praktischen

Anwendung die Farbeindringprüfung (Abb. 1) und vereinzelt die Röntgenprüfung zum Einsatz. Beide Verfahren eignen sich jedoch nur bei bereits sichtbaren Rissen zur Ermittlung der Ausdehnung und möglicher Verzweigungen, für eine präventive Untersuchung sind beide Verfahren zu aufwendig bzw. ungeeignet. Andere Verfahren wie die Ultraschallprüfung oder das Wirbelstromverfahren eignen sich für Glockenbronze nicht.

Für schwingfähige Bauteile bietet sich das akustische Resonanzverfahren an [2], das über das Schwingverhalten auf die Material- und Formqualität des untersuchten Bauteils schließt. Grundlage dieses Verfahrens ist der Vergleich des Schwingverhaltens des Bauteils mit dem eines Referenzteils. Für Unikate, wie Glocken, ist dieses Verfahren nur bedingt einsetzbar, da keine Referenzteile zur Verfügung stehen. Eine zuverlässige und frühzeitige Risserkennung anhand von Schwingungsanalysen wäre daher nur möglich, wenn Risse typische Veränderungen im Schwingverhalten von Glocken hervorrufen, die sich von anderen Variationen im Schwingverhalten eindeutig unterscheiden ließen.

## 3. Spezifisches Schwingverhalten von Glocken

Das Schwingverhalten von Glocken kann über den hörbaren Klang analysiert und beurteilt werden. Wesentlich sind dafür sieben Eigenformen, die den Klang der Glocke eindeutig beschreiben und das Schwingverhalten des gesamten Klangkörpers abbilden. (Abb. 2) Dazu gehören:

- Die Prinzipaltöne Unterton, Prime, Terz, Quinte und Oktave. Sie sind Voraussetzung, um den Klang einer Glocke zu identifizieren, und daher bei der Bewertung des Schwingverhaltens der Glocke obligat. [3]
- Die Duodezime und die Doppeloktave. Der Schlagton einer Glocke beschreibt deren Tonhöhe, die das menschliche Gehör im Moment des Anschlags wahrnimmt. Er wird aus der Obertonreihe, bestehend aus der Oktave und diesen beiden Tönen, im menschlichen Gehirn gebildet, da er physikalisch nicht vorhanden ist. Der Schlagton hat zur Beschreibung der Tonhöhe der Glocke entscheidende Bedeutung, so dass diese Teiltöne ebenfalls zu berücksichtigen sind. [4]

Die Bewertung weiterer Teiltöne ist im Allgemeinen nicht erforderlich da die Eigenformen der aufgeführten Teiltöne alle für den Glockenklang relevanten Bereiche der schwingenden Glockenstruktur berücksichtigen.

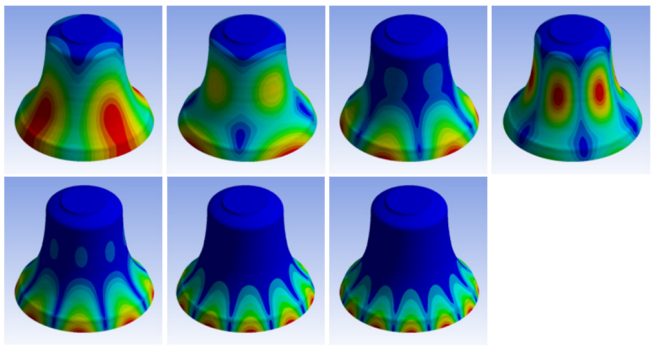

**Abbildung 2:** Die wichtigsten Eigenformen einer Glocke (Tonbezeichnungen: Unterton, Prime, Terz, Quinte, Oktave, Duodezime, Doppeloktave v.l.n.r.)

Eine Besonderheit im Schwingverhalten von rotationssymmetrischen Strukturen ist das Modensplitting bzw. das doppelte Auftreten der Eigenformen. Gemäß der Theorie freier Schwingungen existieren für alle Schwingungsmuster mit radialen Knotenlinien stets doppelte Eigenwerte und daher zwei Schwingungsformen bei jeder Eigenform. Bei vollkommener Symmetrie der Struktur besitzen sie die gleiche Eigenfrequenz und in radialer Sicht keine feste Ausrichtung an der Struktur. [5]

Alle in Abb. 2 dargestellten Eigenformen der Glocke besitzen radiale Knotenlinien und treten daher jeweils paarweise auf. Bedingt durch das Herstellungsverfahren und die Eigenschaften der Glockenbronze sowie aufgrund der äußeren Gestaltung ist in der Realität eine ideale Rotationssymmetrie bei Glocken quasi nicht vorhanden, so dass mit geeigneten Mess- und Auswerteverfahren bei den meisten Teiltönen ein Modensplitting und damit eine Zwillingstonbildung feststellbar ist.

Die doppelt auftretenden Schwingformen richten sich dann am Ort der größten Abweichung der Struktur aus, so dass jeweils eine der beiden Schwingformen dort ihren Schwingungsbauch besitzt, während die andere dort ihren Knotenmeridian aufweist. Für den Verdrehwinkel $\alpha_{splitting,i}$ zwischen beiden Schwingformen einer Eigenform i gilt (mit m = Anzahl der Knotenmeridiane der Eigenform i):

$$\alpha_{splitting,i} = \frac{360°}{2m} \tag{1}$$

In Abb. 3 ist die Verdrehung der Schwingformen in der Draufsicht exemplarisch an Eigenformen zweier Teiltöne dargestellt. Für den Unterton mit vier Knotenmeridianen ergibt sich ein Verdrehwinkel $\alpha_{splitting,Unterton} = 45°$, für die Terz mit sechs Knotenmeridianen $\alpha_{splitting,Terz} = 30°$.

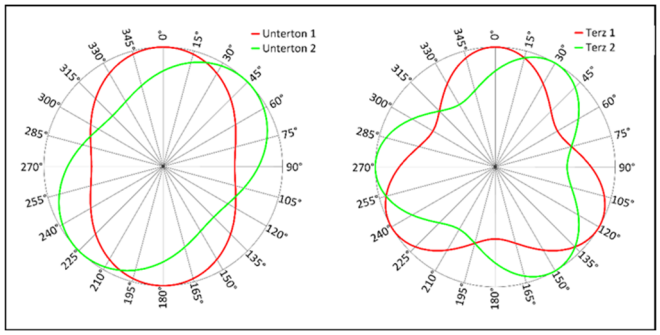


**Abbildung 3:** Modensplitting bei Unterton und Terz

Aufgrund der definierten Lage der Knotenmeridiane wird je nach Position der Anregung ein unterschiedliches Schwingverhalten der Glocke hervorgerufen. Bei Anregung an der Position des durch die Asymmetrie der Glocke festgelegten Schwingungsbauchs einer der Schwingformen kommt nur diese zum Schwingen, da hier die andere Partialschwingform ihren Schwingungsknoten besitzt. Im Idealfall ist dann nur eine Eigenfrequenz feststellbar. Bei Anregung zwischen den Knotenmeridianen beider Schwingformen schwingen beide ein, so dass auch beide Eigenfrequenzen ermittelt werden können. Akustisch äußert sich das bei geringen Abweichungen als Schwebung, bei größeren Abweichungen als Dissonanz.

## 4. Der musikalische Fingerabdruck

Jede Glocke besitzt einen einmaligen Klang, der sich durch die Frequenzen und Frequenzspaltungen der Teiltöne beschreiben lässt. Diese Eigenschaften werden als musikalischer Fingerabdruck einer Glocke bezeichnet. [6] Durch das Läuten werden Veränderungen in der Struktur der Glocke hervorgerufen, die sich durch Schäden wie Verschleiß oder Ermüdungsrisse äußern. Diese Veränderungen bewirken Abweichungen vom ursprünglichen Schwingverhalten und damit eine Änderung des musikalischen Fingerabdrucks der Glocke.

Sowohl Glockenzier und fertigungsbedingte Ungänzen als auch Schäden wie Verschleiß und Ermüdung stellen Fehlstellen dar, die Abweichungen von der Rotationssymmetrie hervorrufen. Diese Abweichungen bewirken jedoch nur Änderungen auf das Schwingverhalten jener Teiltöne, deren Schwingformen im Bereich der Fehlstellen keine Schwingungsknoten aufweisen. Somit lassen sich die verursachenden Fehlstellen aufgrund der ermittelten Frequenzspaltungen lokalisieren. Um den Einfluss der Lage und Ausprägung der unterschiedlichen Fehlstellen auf das Schwingverhalten, insbesondere das Modensplitting, plausibel beurteilen zu können, werden die Frequenzspaltungen der relevanten Teiltöne einer Glocke in einem Diagramm dargestellt. (Abb. 4)

Die Teiltöne der Glocke sind nach Kategorien angeordnet, die farblich unterlegt dargestellt werden. Die rote Kategorie umfasst die Teiltöne Unterton (UT), Terz (TR), Oktave (OK), Duodezime (DD) und Doppeloktave (DO), deren Schwingungsbauch sich am Schlagring befindet und die entweder keinen Knotenkreis oder einen Knotenkreis in der oberen Flanke aufweisen. Die gelbe Kategorie repräsentiert die Prime (PR), die einen Knotenkreis in der unteren Flanke besitzt und die grüne Kategorie die Quinte (QU), deren Knotenkreis sich im Bereich des Schlagrings befindet. Für jeden dieser Teiltöne ist auf einer Speiche des Netzdiagramms (Abb. 4) in axialer Richtung die Differenz zwischen den beiden Partialeigenfrequenzen $f_1$ und $f_2$ dargestellt. Die Abweichung a zwischen beiden Frequenzen wird dabei ermittelt durch:

$$a = \frac{1200}{\log 2} \cdot \log\left(\frac{f_1}{f_2}\right) \quad [\text{Cent}] \quad (2)$$

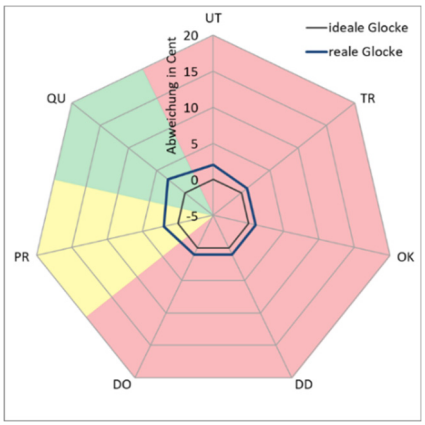


**Abbildung 4:** Darstellung des Modensplittings einer Glocke

Zur Orientierung wird im Diagramm eine schwarze Linie für eine ideale Glocke ohne Frequenzspaltungen dargestellt.

## 5. Schwingverhalten bei Schäden

Ermüdungsrisse verlaufen in Glocken üblicherweise in vertikaler Richtung, da die Hauptspannungsrichtung der Glocke in Umfangsrichtung verläuft. Am häufigsten werden Ermüdungsrisse im Bereich der Anschlagstellen des Klöppels am Schlagring beobachtet. Mit zunehmender Rissausbreitung werden daher Frequenzspaltungen überwiegend bei den Teiltönen der roten Kategorie festgestellt, deren Eigenformen im Bereich des Schlagrings ihre Maxima besitzen. Am Schwingverhalten einer Versuchsglocke, in die analog zum typischen Rissverlauf ein Schnitt am Schlagring eingebracht wurde, ist erkennbar, dass die Frequenzspaltungen weitgehend kongruent zur ansteigenden Risstiefe zunehmen. (Abb. 5)

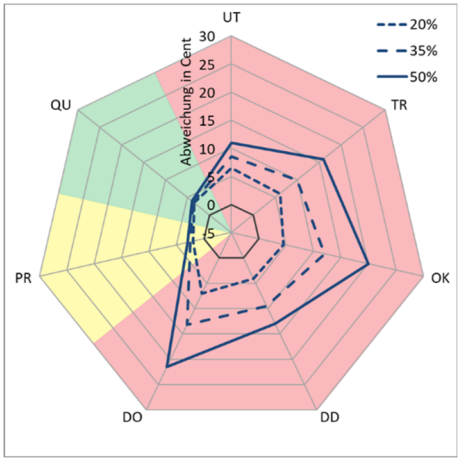


**Abbildung 5:** Modensplittings einer Glocke mit vertikalem Schnitt im Bereich des Schlagrings in Abhängigkeit der Schnitttiefe bzgl. der Schlagringstärke

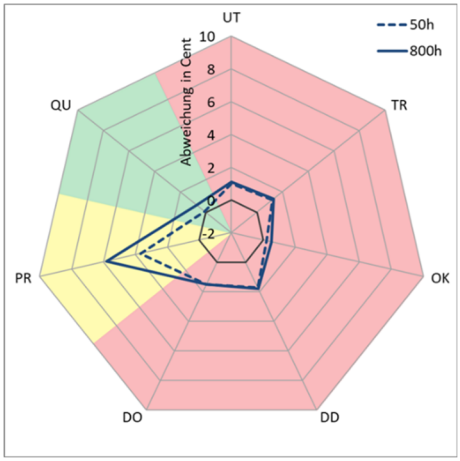


**Abbildung 6:** Modensplittings einer Glocke mit zunehmendem Verschleiß am Schlagring im Dauerläuteversuch

An historischen Glocken kann häufig starker Verschleiß im Bereich der Anschlagstellen des Klöppels am Schlagring festgestellt werden. Durch den Materialabtrag nimmt die Steifigkeit des Schlagrings lokal ab, so dass die Rotationssymmetrie der Glocke gestört ist. Davon wird im

Wesentlichen nur das Schwingverhalten der Prime (und gelegentlich des Untertons) beeinflusst, bei der mit zunehmendem Verschleiß auch die Frequenzspaltungen anwachsen, während an den übrigen Teiltönen keine bzw. nur geringfügige Veränderungen festzustellen sind. (Abb. 6)

Ausgehend von den beiden dargestellten, typischen Fehlstellen ist ein direkter Zusammenhang zwischen der Art der Fehlstelle in Bezug auf Lage und Ausdehnung und der Veränderungen im Schwingverhalten durch die resultierenden Frequenzspaltungen feststellbar. Die Identifikation von Ermüdungsrissen auf Basis von Frequenzspaltungen wird dabei zusätzlich durch die überwiegend streng vertikale Ausrichtung der Risse begünstigt. Alle Eigenformen, die im Rissbereich ein Maximum besitzen, unabhängig von der Anzahl ihrer Knotenmeridiane, weisen ähnlich hohe Frequenzspaltungen auf. Bei Fehlstellen mit tendenziell horizontaler Ausprägung nehmen jedoch die Frequenzspaltungen bei den betroffenen Eigenformen mit zunehmender Anzahl der Knotenmeridiane ab.

## 6. Verfahren der akustischen Qualitätskontrolle

Voraussetzung für die Ermittlung des musikalischen Fingerabdrucks sind Klangaufzeichnungen von Glocken, die im nicht-schwingenden Zustand anzufertigen sind. Ein kalibriertes Mikrofon bzw. Aufnahmegerät ist dazu nicht erforderlich, da der Schallpegel bei der Auswertung unberücksichtigt bleibt. Daher sind handelsübliche Aufnahmegeräte und insbesondere Smartphones geeignet, solche Aufnahmen erstellen zu können.

Für die Klangaufzeichnungen ist die Glocke so anzuregen, dass alle Schwingformen zur Anregung gebracht werden. Nach dem Anschlagen der Glocke mit dem Klöppel auf beiden Seiten ist die Glocke auch über den Umfang anzuschlagen. Idealerweise erfolgt dies mindestens siebenmal in gleichmäßigen Abständen über den Umfang eines Quadranten. (Abb. 7)

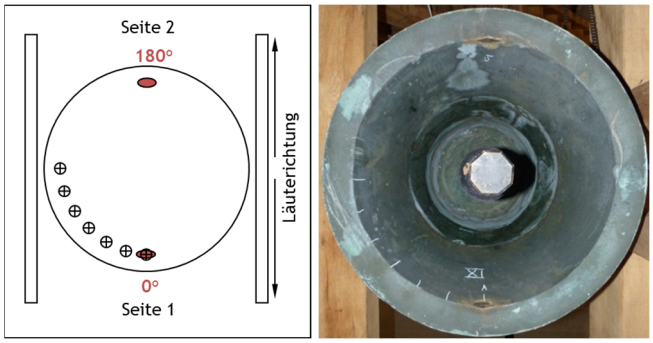


**Abbildung 7:** Schema für das Anschlagen einer Glocke (links), Markierungen am Schlagring einer Glocke (rechts)

Der musikalische Fingerabdruck ermöglicht mit der ersten Klangaufnahme eine Bewertung des Zustands der Glocke, da das Schwingverhalten auf die üblichen Klangmuster, die durch Materialungänzen, Glockenzier, Verschleiß oder Risse hervorgerufen werden, überprüft werden kann. Im Hinblick auf beginnende Schäden, Anrisse im Gefüge oder Imperfektionen an Schweißstellen können jedoch Tonspaltungen in einem nicht-signifikanten Umfang von $a \leq 5$ Cent auftreten, so dass sich diese nicht zuverlässig zu den üblichen Klangmustern zuordnen lassen. Im üblichen Läutebetrieb, bei anhaltend hohen Belastungen durch den Klöppelanschlag, wird jedoch eine Ausbreitung eines Anrisses oder vorhandenen Schadens erfolgen, was zu einer fortwährenden Änderung des Schwingverhaltens führt. Durch wiederholte Klangaufnahmen der Glocke können somit auch nicht-signifikante Tonspaltungen zuverlässig bewertet werden.

## 7. Ausblick

Das vorgestellte Verfahren zur kostengünstigen Überwachung von Glocken ist nicht nur zur Qualitätssicherung reparierter Glocken geeignet, sondern lässt sich auch zur Zustandsbestimmung intakter Glocken auf dem Kirchturm verwenden. Mithilfe eines niederschwelligen Zugangs zum Verfahren des musikalischen Fingerabdrucks sollen Kirchgemeinden, Glockensachverständige, Glockenfachfirmen und interessierte Menschen angesprochen werden, um Klangaufnahmen Ihrer Glocken anzufertigen. In einem Online-Glockenatlas werden die Ergebnisse veröffentlicht, um einer breiten Öffentlichkeit Informationen über die Glocken eines Kirchturmes und deren jeweiligen Zustand zur Verfügung zu stellen. [7]

Werden durch dieses Vorgehen Ermüdungsrisse an Glocken identifiziert, die noch nicht zu hörbaren Veränderungen im Klangverhalten geführt haben, so können in diesem frühen Rissstadium aufwendige Reparaturmaßnahmen dadurch vermieden werden, dass durch gezieltes Drehen der betroffenen Glocke und die Einstellung schonenderer Läutebedingungen die Läutebelastungen derart verringert werden, dass ein weiteres Risswachstum gestoppt bzw. stark verlangsamt wird und somit ein Weiterbetrieb der Glocke möglich ist.

## Literatur

[1] Rupp, A., Flade, D.: Bestimmung von Einflussgrößen auf die Lebensdauer von Glocken, LBF-Bericht Nr. 8382, Darmstadt, 1999

[2] Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, Richtlinie US 6 - Akustische Resonanzverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung, Berlin, 2009

[3] Fleischer, H.: Hörversuche mit Glockenklängen, in: Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/07, Neubiberg, 2007

[4] Bruhn, G.: Über die Hörbarkeit von Glockenschlagtönen, Regensburg, 1980

[5] Fleischer, H.: Spinning Modes, in: Forschungs- und Seminarberichte aus dem Gebiet Technische Mechanik und Flächentragwerke, Neubiberg, 1994

[6] Plitzner, M.: Der musikalische Fingerabdruck von Glocken als Mittel zur Schadensfrüherkennung, Schriftenreihe der Hochschule Kempten, Bd. 2, Göttingen, 2015

[7] Homepage ECC-ProBell, URL: http://www.ecc-probell.de/