ECC-ProBell®

Europäisches Kompetenzzentrum für Glocken

Hochschule Kempten
University of Applied Sciences

Untersuchung und Optimierung der Glocken aus Herzogenbuchsee

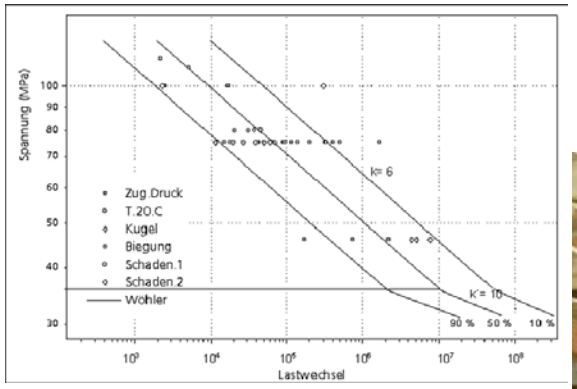
01. September 2020

Der Inhalt darf nur mit unserer schriftlichen Genehmigung verwendet, weitergegeben, veröffentlicht oder in sonstiger Weise verwertet werden. Alle Rechte vorbehalten.

ECC-ProBell® – Historie

1996 – 1998: VDG-Forschungsprojekt „Drehen von Glocken“
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF Darmstadt

2005 – 2008: EU-Projekt „Maintenance and protection of bells“
Hochschule Kempten



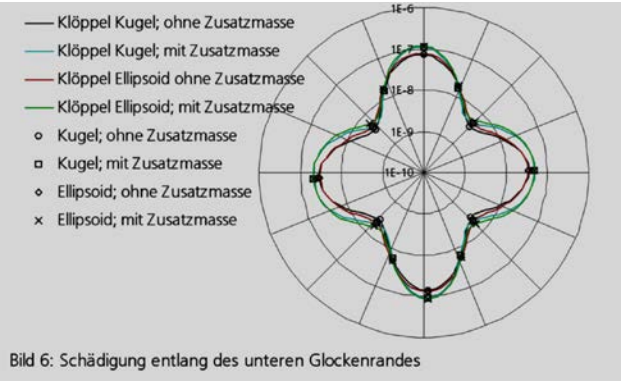
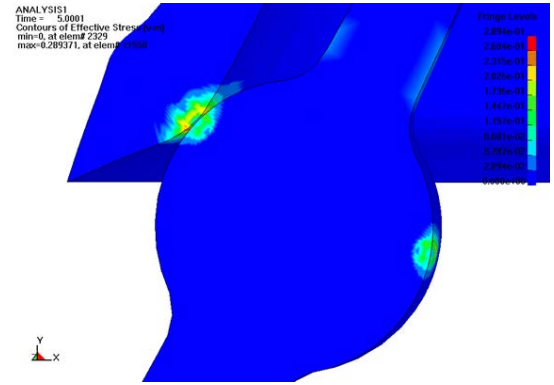
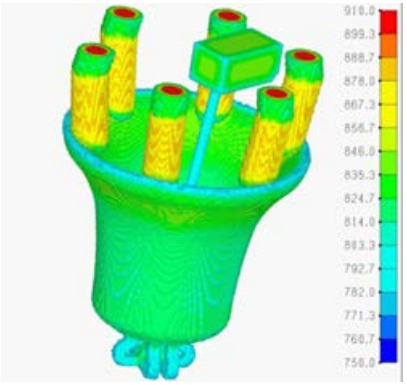


Bild 6: Schädigung entlang des unteren Glockenrandes





ECC-ProBell® – Historie II

seit 2009: Europäisches Kompetenzzentrum für Glocken ECC-ProBell®
Institut an der Hochschule Kempten

Erhalt und Förderung des Glockenläutens als einmaliges, musikalisches Denkmal und Kulturgut europäischer Geschichte.

- Läuteoptimierung zur Verminderung der Belastungen bei hoher Klangqualität
- Monitoring kulturhistorisch bedeutender Glocken (musikalischer Fingerabdruck)
- Aktuelle Forschungsfelder:
  - Optimierung von Glocken aus Ersatzwerkstoffen
  - Alternative Reparaturverfahren
  - Optimierung der Klangentfaltung (Wohlklang / Lautstärke)
  - Analyse anderer Läutetraditionen
    (Hochläuten, Gleichklangläuten, Change ringing, Überschlagläuten)

©ECC-ProBell® 09/2020

Referenzen

- **Über 300 untersuchte Kirchenglocken auf mehr als 70 Türmen in 5 europäischen Ländern**
- Geläute-Sanierungen in bedeutenden Kirchen:
  - Deutschland: Kölner Dom, Münchener Frauenkirche, Freiburger Münster
  - Schweiz: Berner Münster, Kathedrale Fribourg, Kathedrale Solothurn
- Belastungsanalysen bedeutender Glocken:
  - Campanone, Petersdom Rom
  - Savoyarde, Paris Sacre Coeur
  - Gloriosa, Erfurt

©ECC-ProBell® 09/2020

Ermüdungsrisse berühmter Glocken

„Maria Gloriosa“ in Erfurt
Gewicht: 11500kg
gegossen 1497

„Jubiläumsglocke“ in München
Gewicht: 6300kg
gegossen 1958

©ECC-ProBell® 09/2020

Weitere Schäden an Glocken

„Schwörglocke“ in Ulm
Gewicht: 2840kg
gegossen 14. Jh.

Häufig:
Verschleiß und Ausbrüche am Schlagring historischer Glocken

©ECC-ProBell® 09/2020

Zerstörungsfreie Prüfung an Glocken

- Farb-Eindringprüfung
- Ultraschallprüfung
- Röntgenverfahren
- Akustische Resonanzprüfung

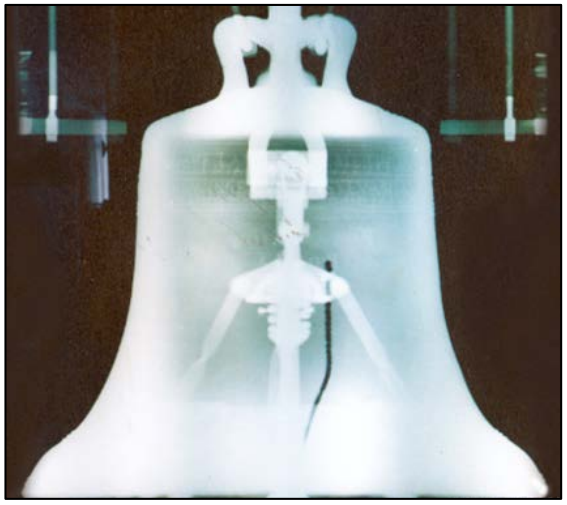
Frühe Erkennung von Ermüdungsrissen:

➔ Aufwand und Kosten

➔ Empfindlichkeit bei entstehenden Schäden

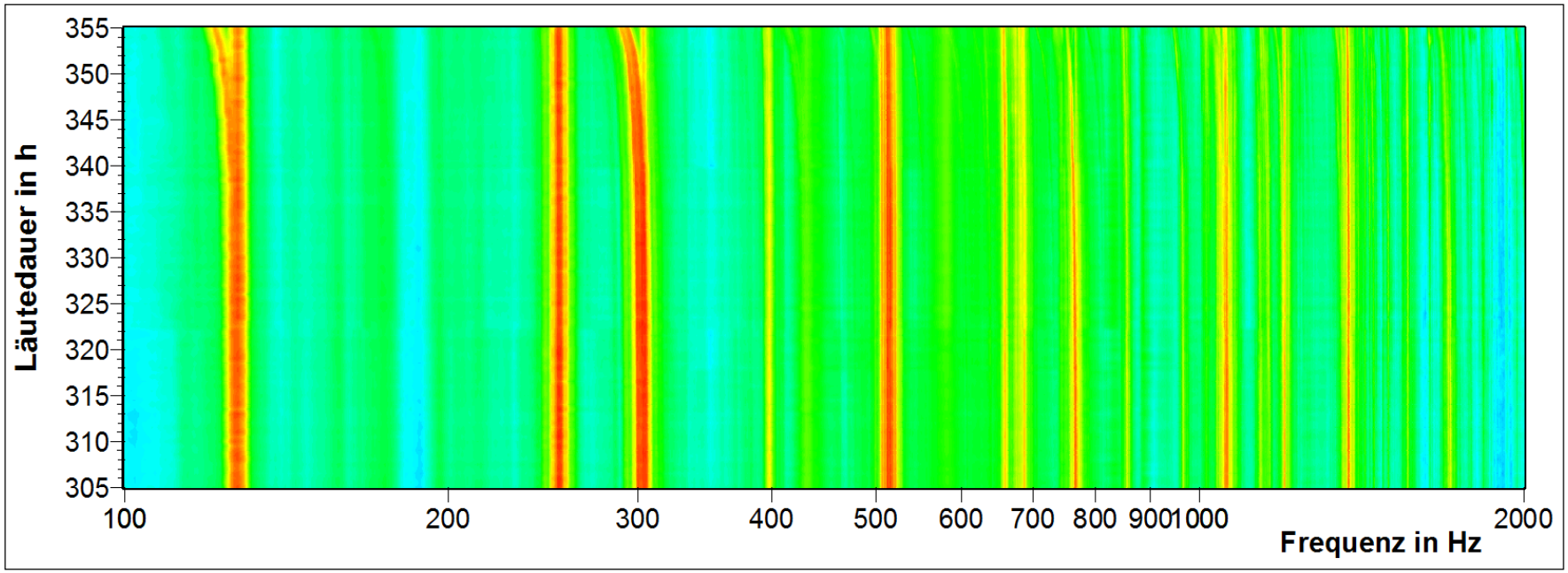
➔ fehlende Referenz gut/schlecht

➔ Zuverlässigkeit



©ECC-ProBell® 09/2020

Klangveränderungen durch Risse



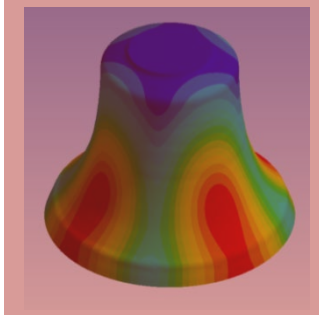
- Tonspaltungen
- Frequenzverschiebungen
- Zunahme der Dämpfung

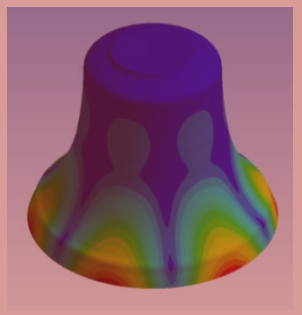
©ECC-ProBell® 09/2020

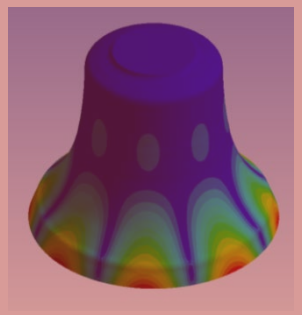
Die wichtigsten Eigenformen der Glocke

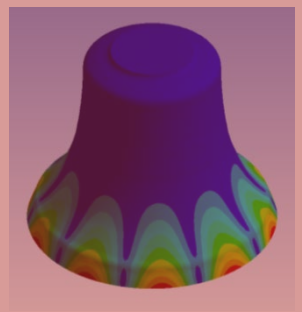
Zunahme Knotenmeridiane

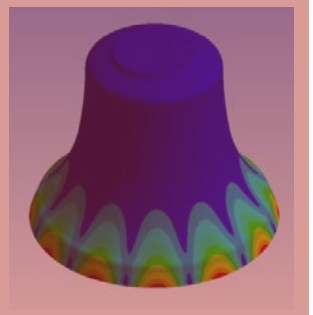
Zunahme Knotenkreise

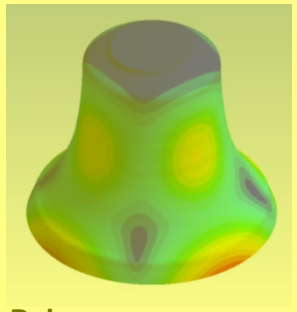

Unterton

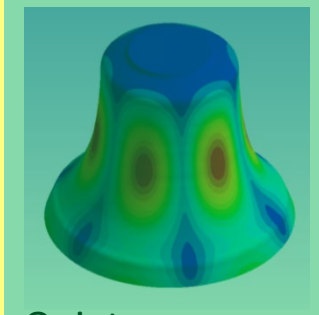

Terz

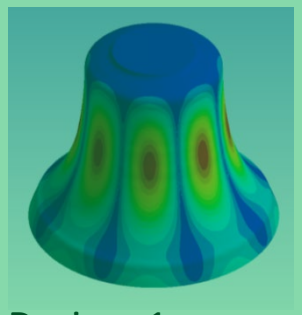

Oktave

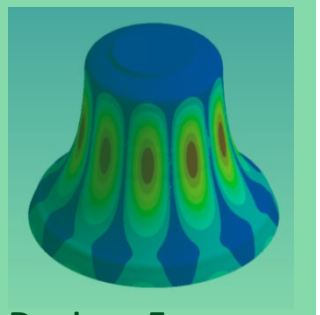

Duodezime

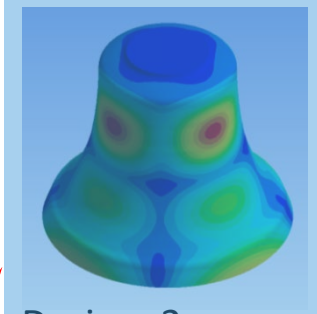

Doppeloktave

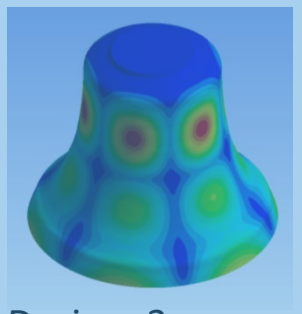

Prime

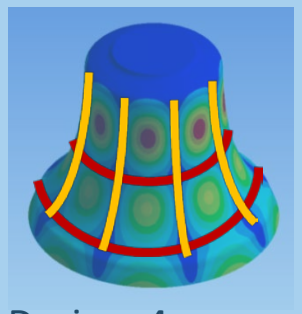

Quinte


Dezime 1


Dezime 5


Dezime 2


Dezime 3


Dezime 4

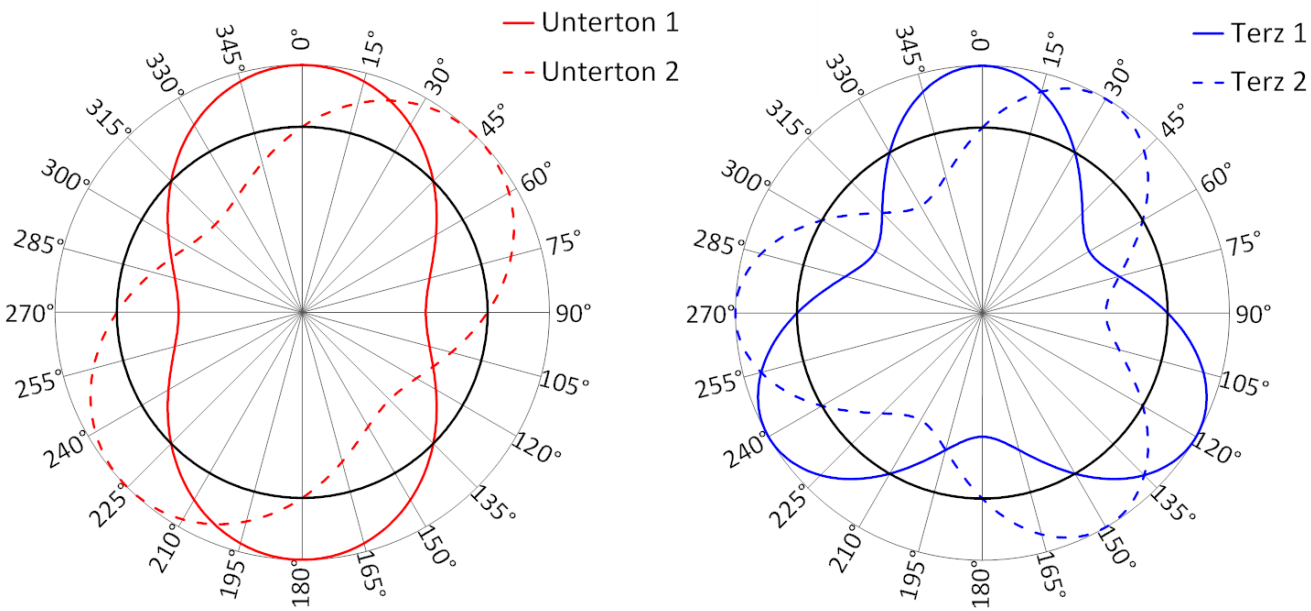
Knotenkreise

Knotenmeridiane

©ECC-ProBell® 09/2020

Modensplitting

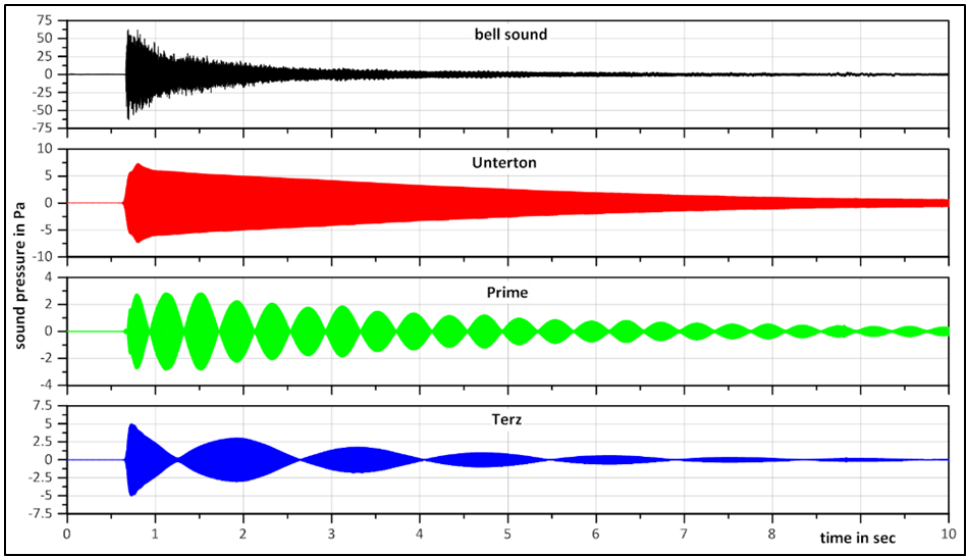
Doppeltes Auftreten der Eigenformen an rotationssymmetrischen Strukturen



- Bei idealer Rotationssymmetrie: keine feste Ausrichtung der Knotenmeridiane
- Bei Abweichungen und Fehlstellen: feste Ausrichtung und Frequenzspaltungen

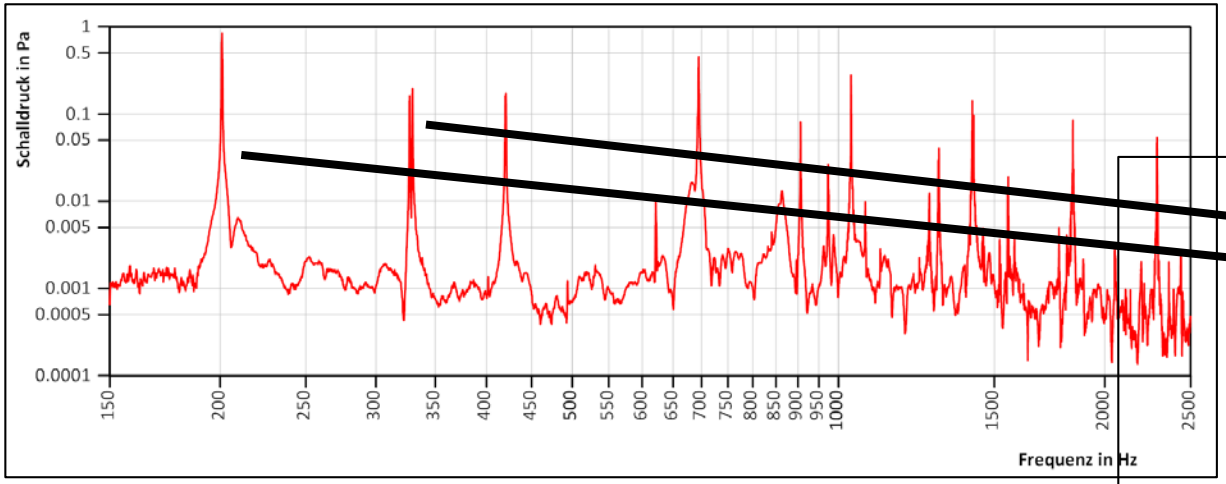
©ECC-ProBell® 09/2020

Klangmessungen



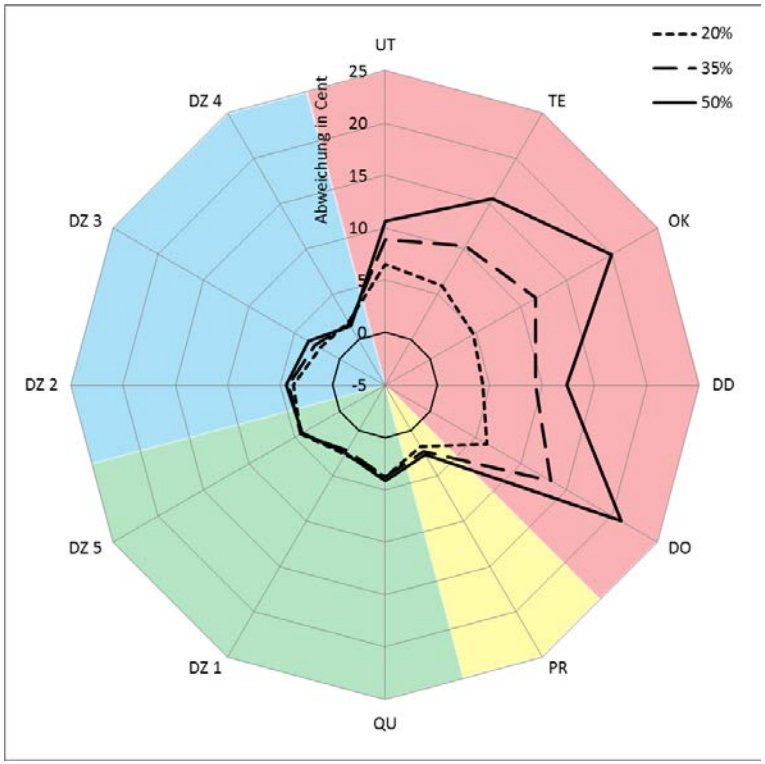
Modensplitting führt zu Frequenzspaltungen

- als Schwebungen hörbar
- Im Abklingverlauf feststellbar



©ECC-ProBell® 09/2020

Glocke mit Vertikalschnitt



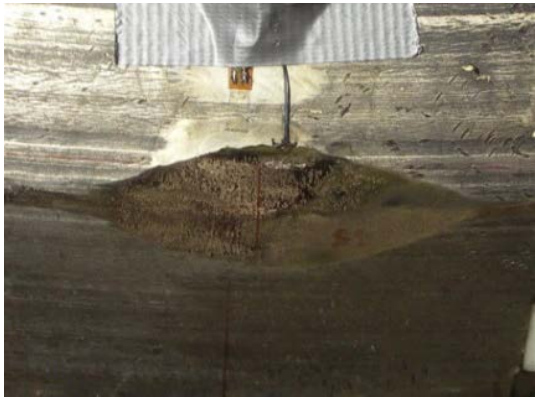
- Zunahme des Modensplittings bei Teiltönen der roten Kategorie
- Zunahme des Modensplittings kongruent zur Schnittfläche

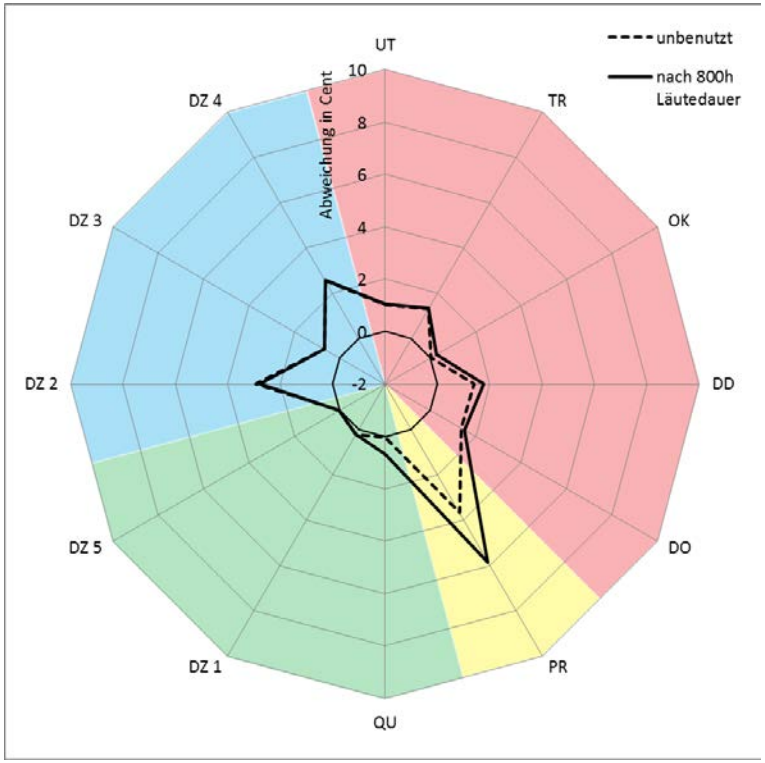
©ECC-ProBell® 09/2020

Glocke mit zunehmendem Verschleiß

50h Läutedauer

800h Läutedauer



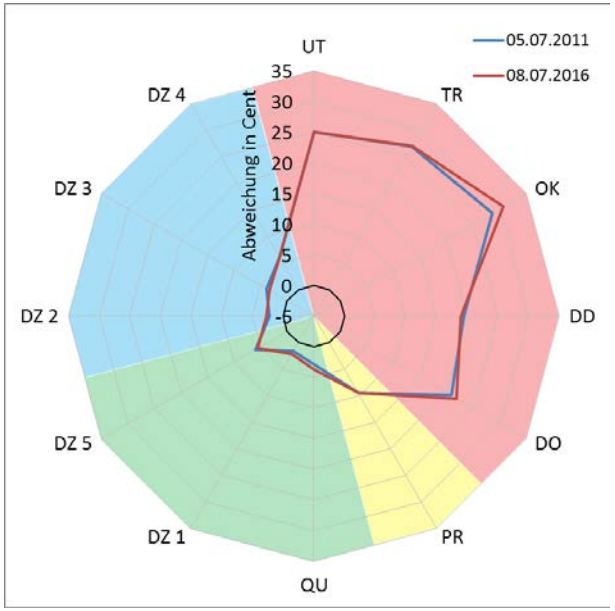


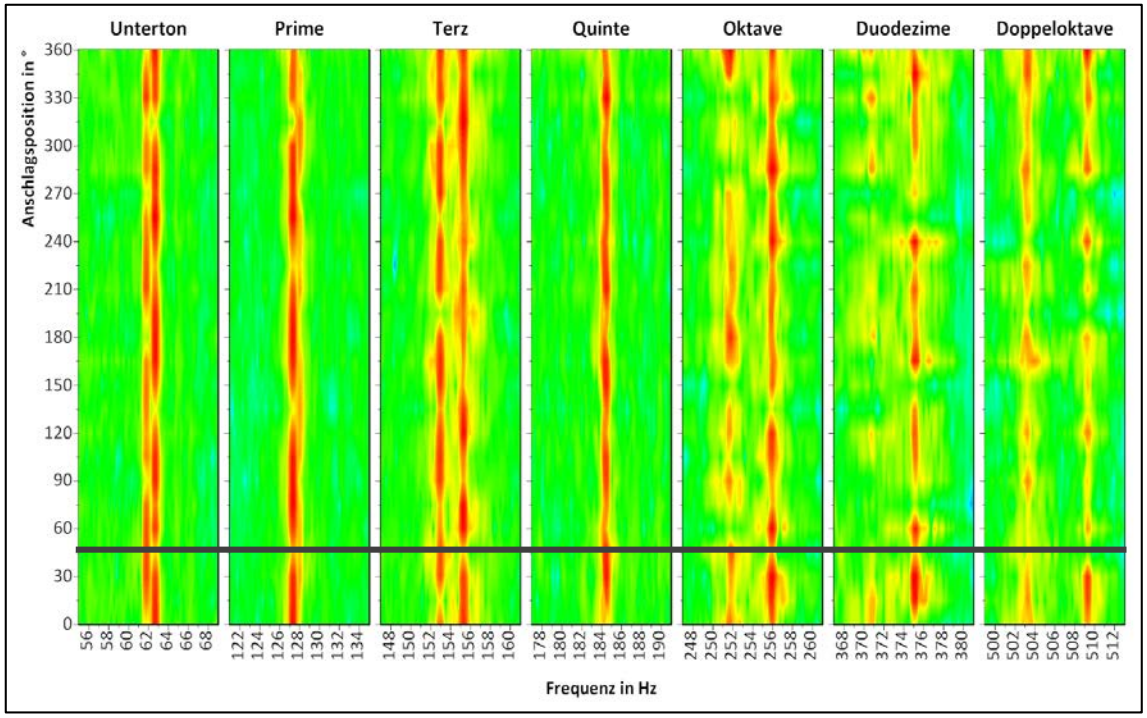
- Zunahme des Modensplittings hauptsächlich an der Prime (PR)
- Sehr langsame Zunahme des Modensplittings

©ECC-ProBell® 09/2020

Glocke mit geschweißtem Ermüdungsriss

Petersglocke, Kölner Dom
c°- Glocke mit ca. 22000kg
gegossen 1923
geschweißt 1956

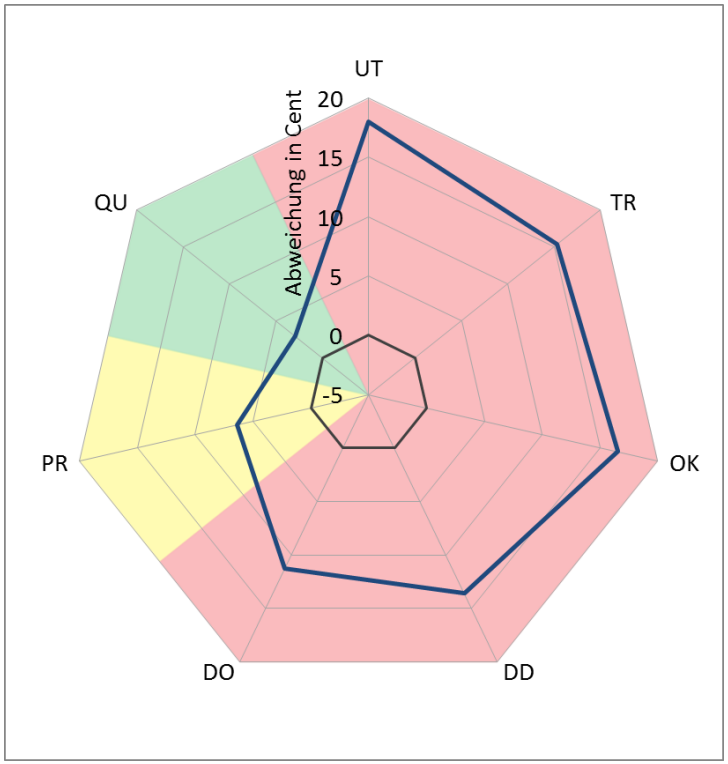




©ECC-ProBell® 09/2020

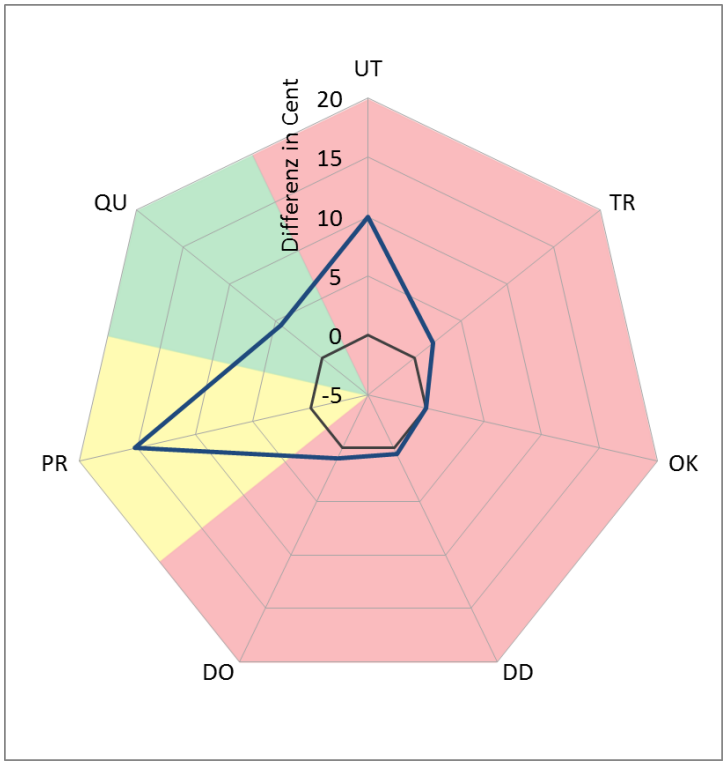
Typische Klangveränderungen

- Glocke mit Riss



➔ **Signifikante Tonspaltungen <u>aller</u> Teiltöne der roten Kategorie**

- Glocke mit Verschleiß

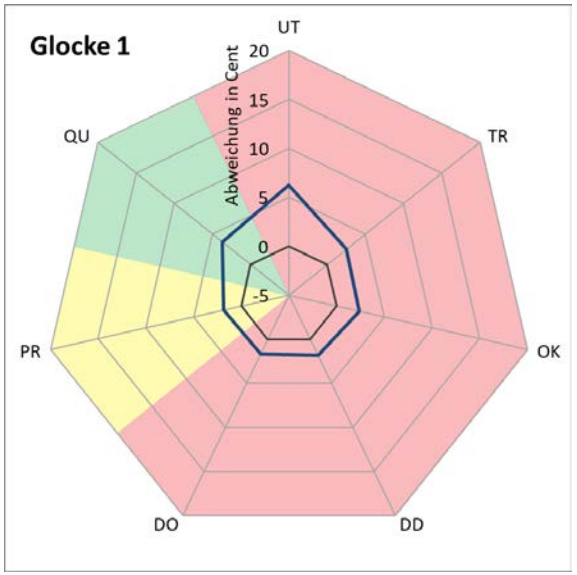


➔ **Signifikante Tonspaltungen des Untertons und/oder der Prime**

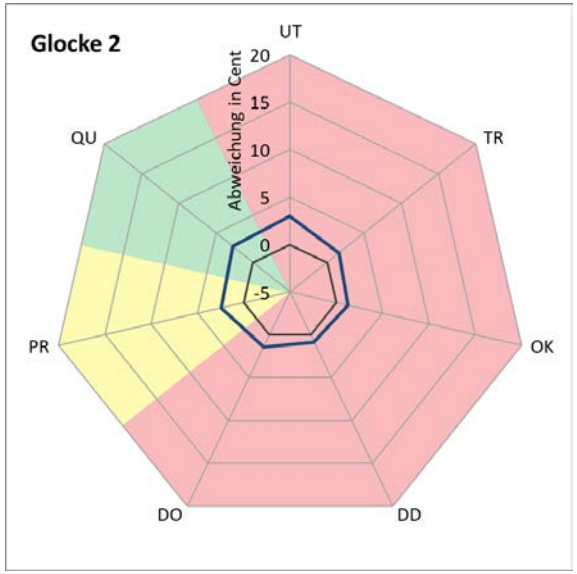
©ECC-ProBell® 09/2020

Musikalischer Fingerabdruck der Glocken 1 & 2

Glocke 1	Ton a‘ = 435Hz	Abweichung in $^{1}/_{16}$-HTS	Tonspaltung in Cent
Unterton (UT)	d°	-10,4	6,2
Prime (PR)	d'	-3,8	1,8
Terz (TR)	f'	-0,7	2,5
Quinte (QU)	a'	-12,0	3,7
Oktave (OK)	d''	-3,2	2,4
Duodezime (DD)	a''	-5,2	1,8
Doppeloktave (DO)	d'''	1,8	1,6



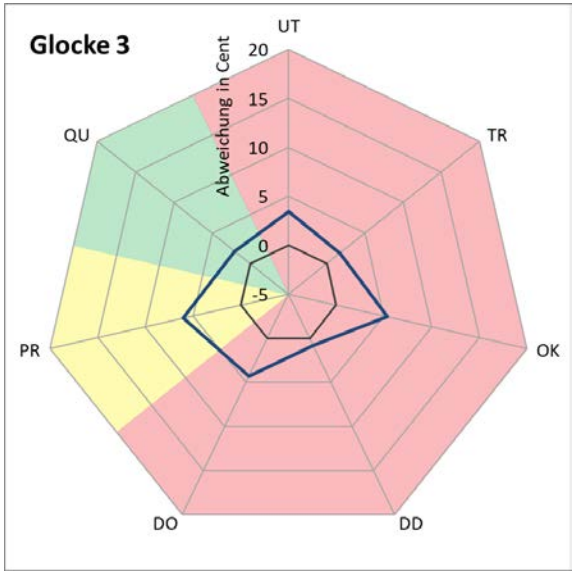
Glocke 2	Ton a‘ = 435Hz	Abweichung in $^{1}/_{16}$-HTS	Tonspaltung in Cent
Unterton (UT)	f°	-0,9	3,0
Prime (PR)	fis'	-5,5	2,4
Terz (TR)	a'	-5,2	1,6
Quinte (QU)	c''	-4,6	2,7
Oktave (OK)	fis''	-9,1	1,2
Duodezime (DD)	cis'''	-11,4	0,8
Doppeloktave (DO)	fis'''	-4,8	1,4



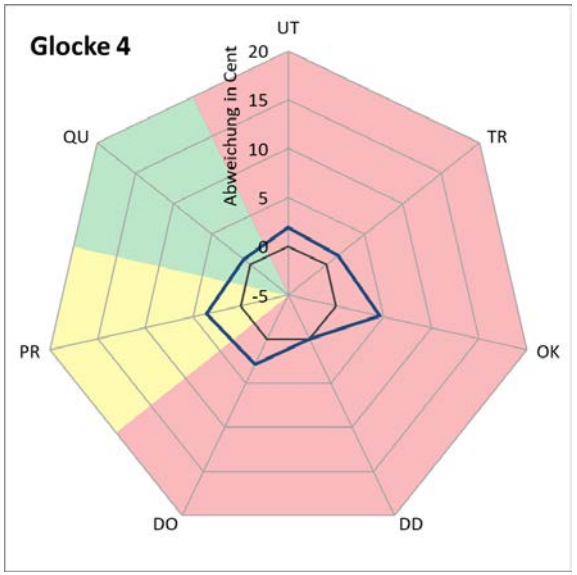
©ECC-ProBell® 09/2020

Musikalischer Fingerabdruck der Glocken 3 & 4

Glocke 3	Ton a‘ = 435Hz	Abweichung in $^{1}/_{16}$-HTS	Tonspaltung in Cent
Unterton (UT)	as°	-5,3	3,4
Prime (PR)	a'	-2,6	6,0
Terz (TR)	c''	-5,7	1,7
Quinte (QU)	es''	-7,9	2,0
Oktave (OK)	a''	-8,1	5,3
Duodezime (DD)	e'''	-9,3	0,8
Doppeloktave (DO)	a'''	-2,1	4,3



Glocke 4	Ton a‘ = 435Hz	Abweichung in $^{1}/_{16}$-HTS	Tonspaltung in Cent
Unterton (UT)	des'	-7,3	1,9
Prime (PR)	d''	-1,9	3,6
Terz (TR)	f''	-6,4	1,5
Quinte (QU)	as''	-9,0	0,9
Oktave (OK)	d'''	-8,0	4,6
Duodezime (DD)	a'''	-8,7	0,0
Doppeloktave (DO)	d''''	-0,3	2,8



©ECC-ProBell® 09/2020

Ergebnis I: Musikalischer Fingerabdruck

1. Tonspaltungen

- Bei allen untersuchten Teiltönen treten Tonspaltungen auf, die überwiegend nicht signifikant ($\Delta f < 5$Cent) ausfallen.
- Signifikante Tonspaltungen treten nur auf bei:
  - Unterton von Glocke 1
  - Prime von Glocke 3

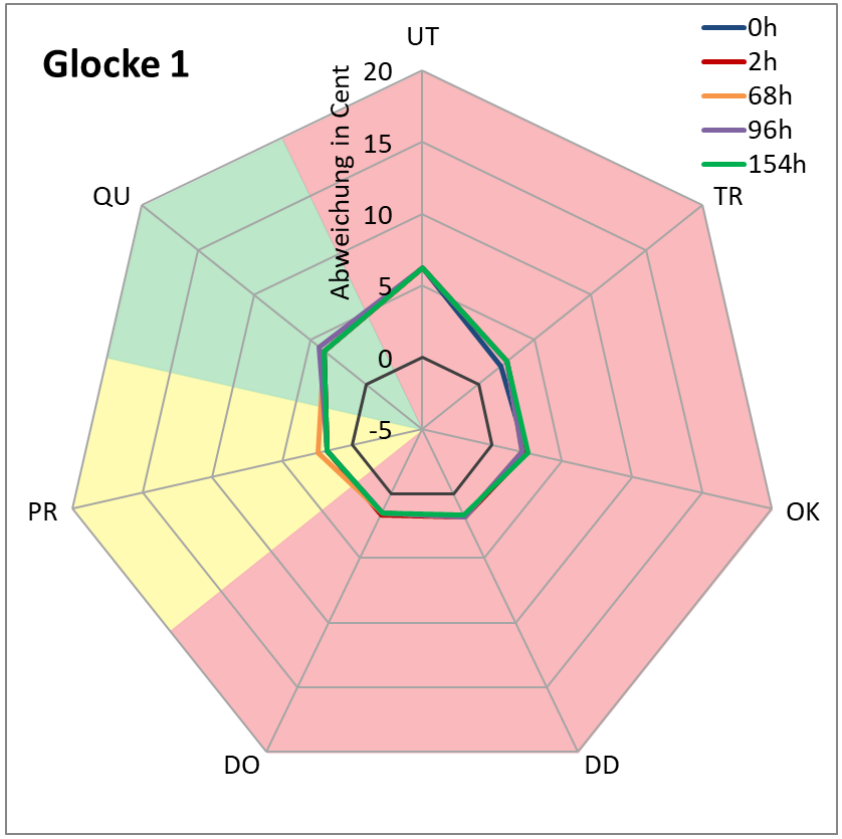
➔ **Tonspaltungen von Unterton und Prime sind keine Indikatoren für einen Riss in der Glocke**

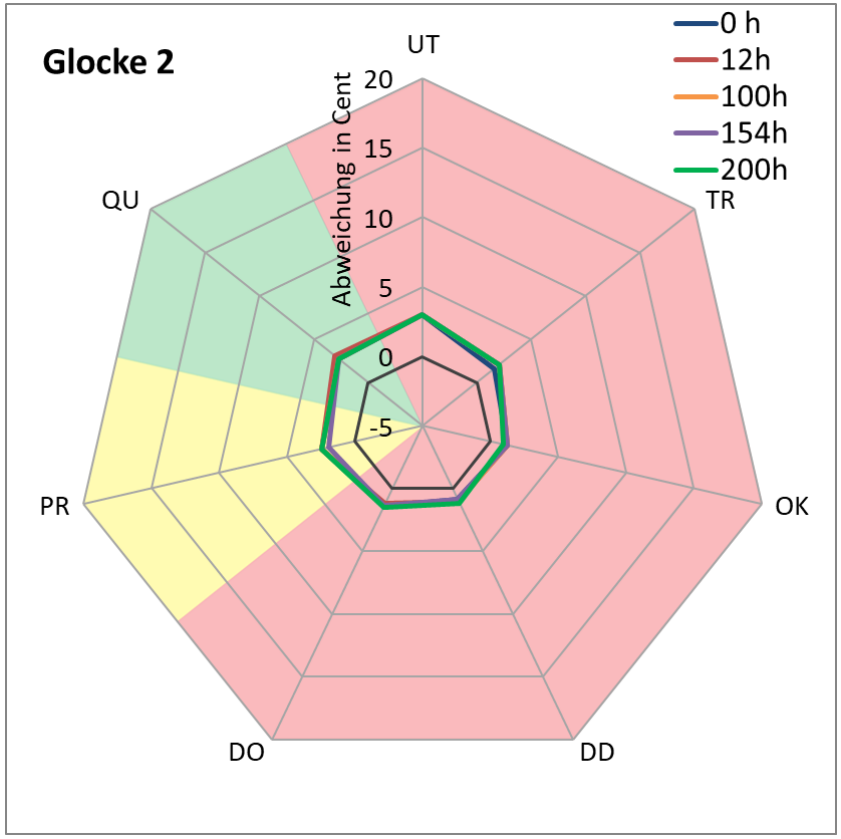
2. Besonderheiten im Klang der Glocken

- Unterton und Quinte sind bei allen Glocken zu tief (jeweils ca. ein Halbton). Je kleiner die Glocke ist, um so weiter sinken diese beiden Teiltöne gegenüber der Glockenstimmung ab.
- Die Tonspaltungen der Glocken 3 und 4 ähneln sich sehr. Möglicherweise resultieren die beobachteten Tonspaltungen aus dem Form- und Gießprozess.

©ECC-ProBell® 09/2020

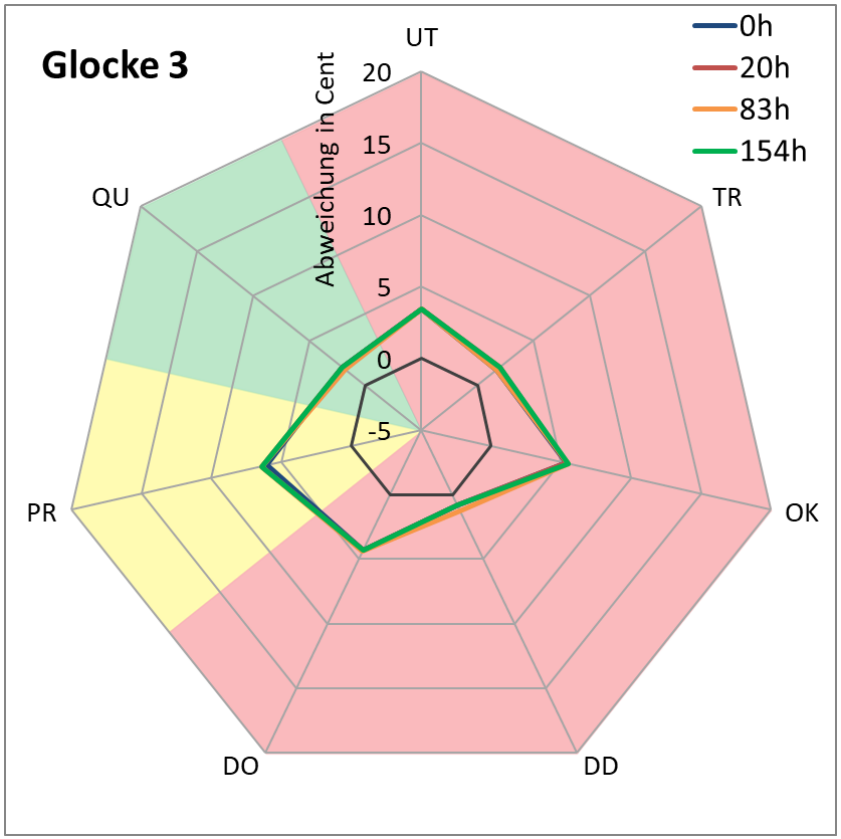
Musikalischer Fingerabdruck beim Dauerläuten

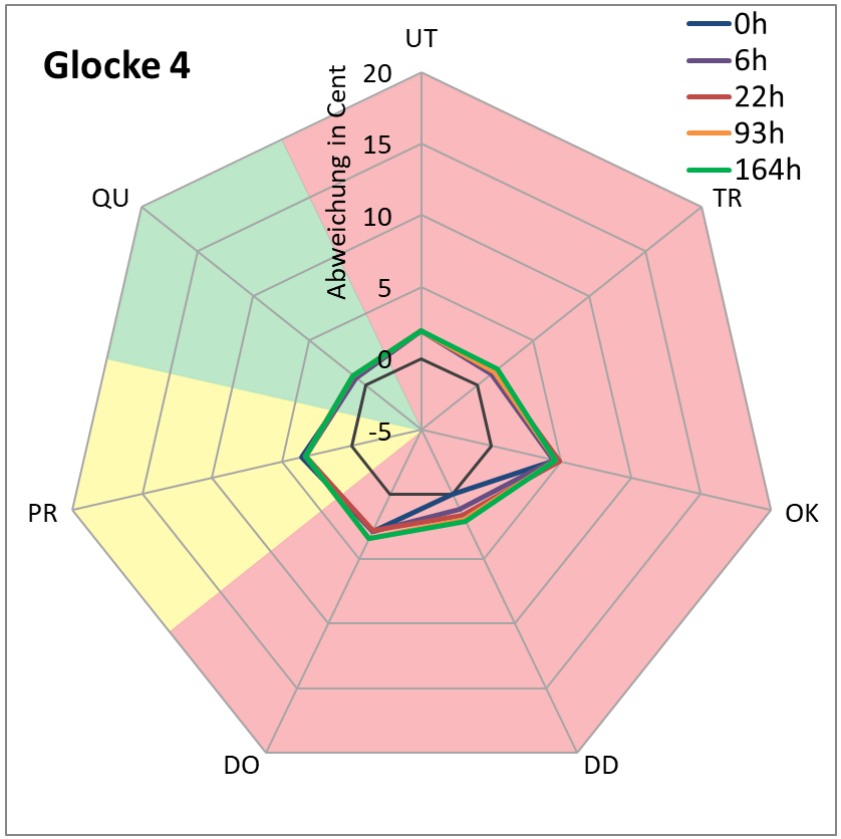




©ECC-ProBell® 09/2020

Musikalischer Fingerabdruck beim Dauerläuten





©ECC-ProBell® 09/2020

Ergebnis II: Musikalischer Fingerabdruck

Das Dauerläuten erfolgte unter erhöhter Beanspruchung der Glocken gegenüber dem normalen Kirchturmläuten, um einen möglichen Rissausbreitungsprozess bei vorhandenen Rissen zu beschleunigen.

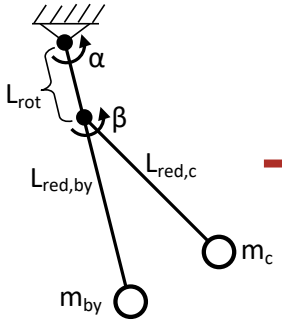
Beim Dauerläuten aller 4 Glocken treten keine signifikanten und systematischen Veränderungen der untersuchten Teiltöne auf.

- ➔ Keine Veränderungen des Schwingverhaltens der Glocken
- ➔ Mit hoher Wahrscheinlichkeit sind derzeit keine Anrisse in den Glocken vorhanden.
- ➔ <u>Eine Weiterverwendung der Glocken wird empfohlen.</u>

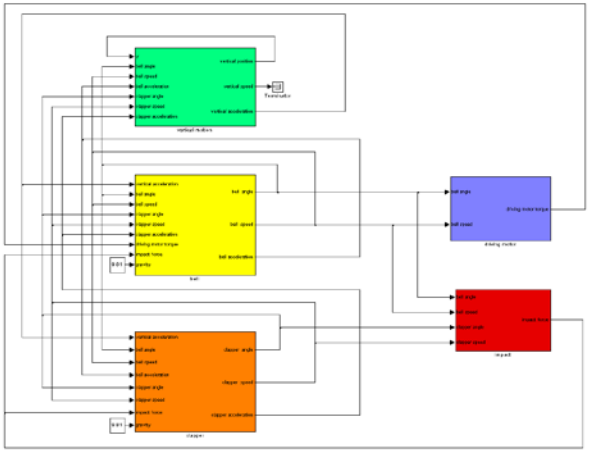
©ECC-ProBell® 09/2020

Simulation des dynamischen Systems

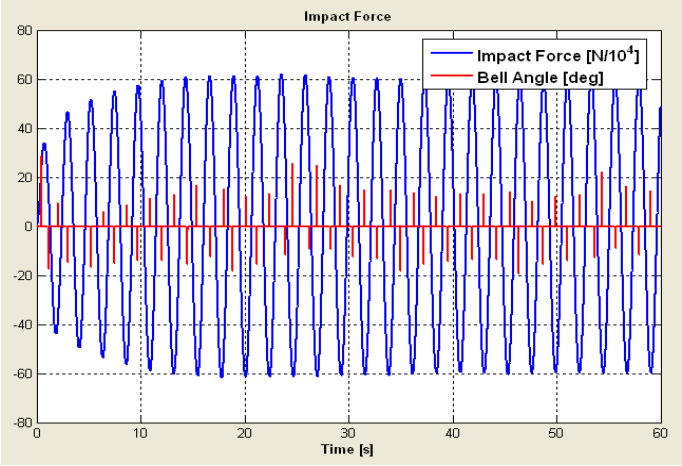
Eingabe



Simulation



Ergebnis



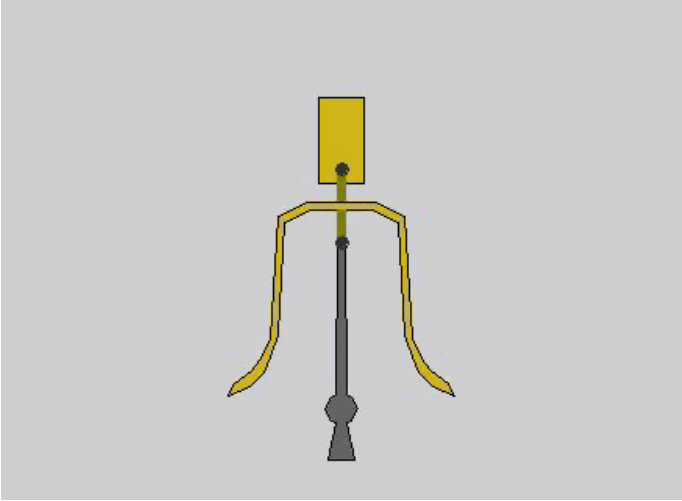
Minimal notwendiger Läutewinkel
Anfluggeschwindigkeit des Klöppels

Physikalische Größen:

- Masse
- Schwerpunkt
- Trägheitsmoment

} Reduzierte Pendellänge

- Abstand der Drehachsen
- Abstand der Anschlagflächen



©ECC-ProBell® 09/2020

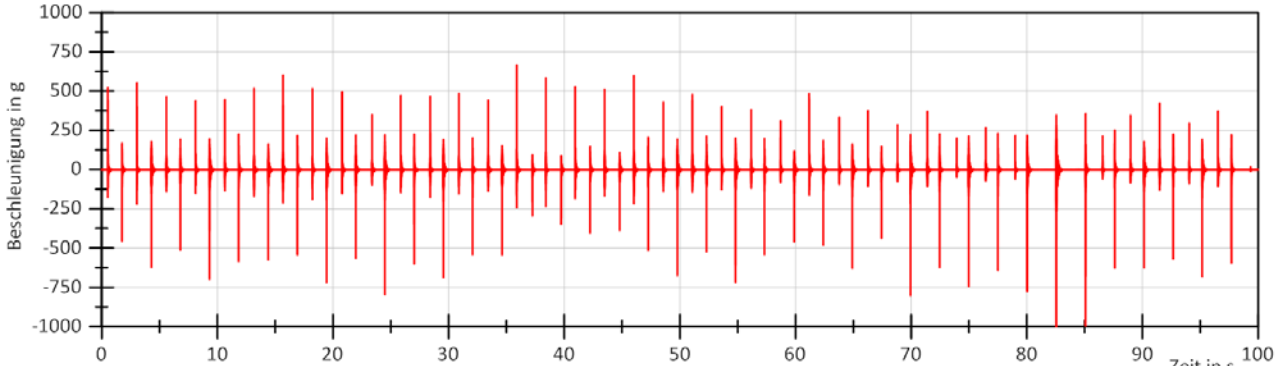
Messung der Beanspruchungen beim Läuten

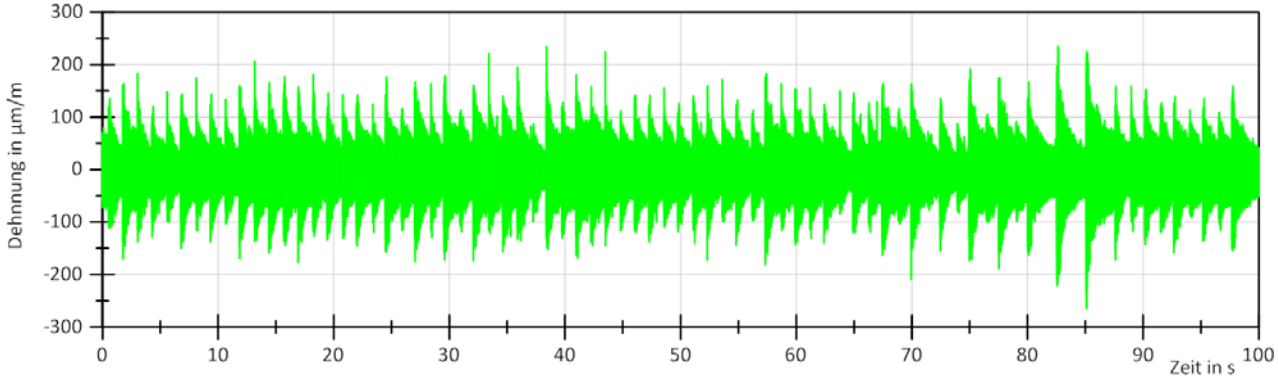
Dehnungsmessstreifen

Beschleunigungssensor

Winkelsensor

Mikrofon

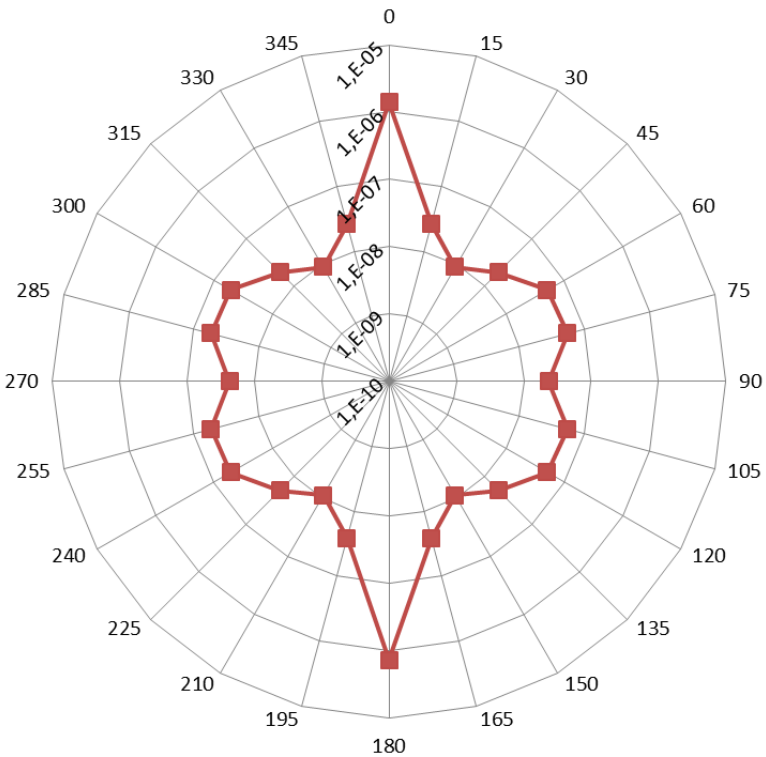




©ECC-ProBell® 09/2020

Beanspruchungen über den Glockenumfang

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

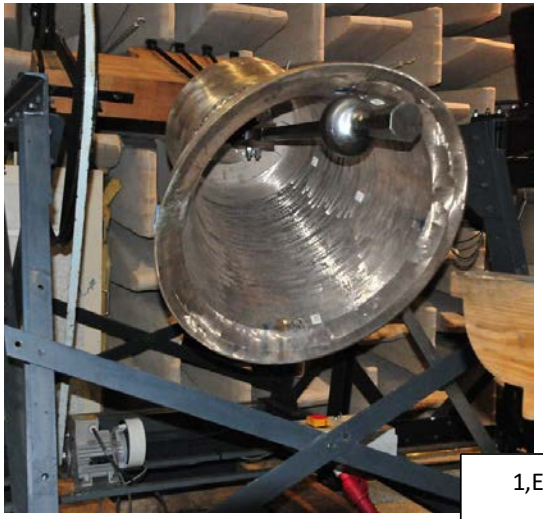


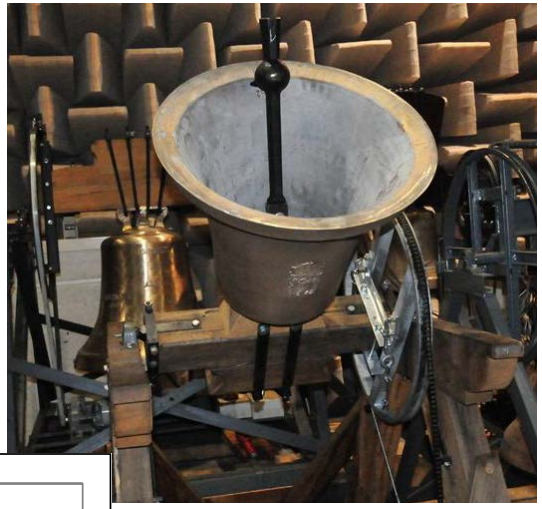
➔ Richtiges Drehen von Glocken ist sinnvoll

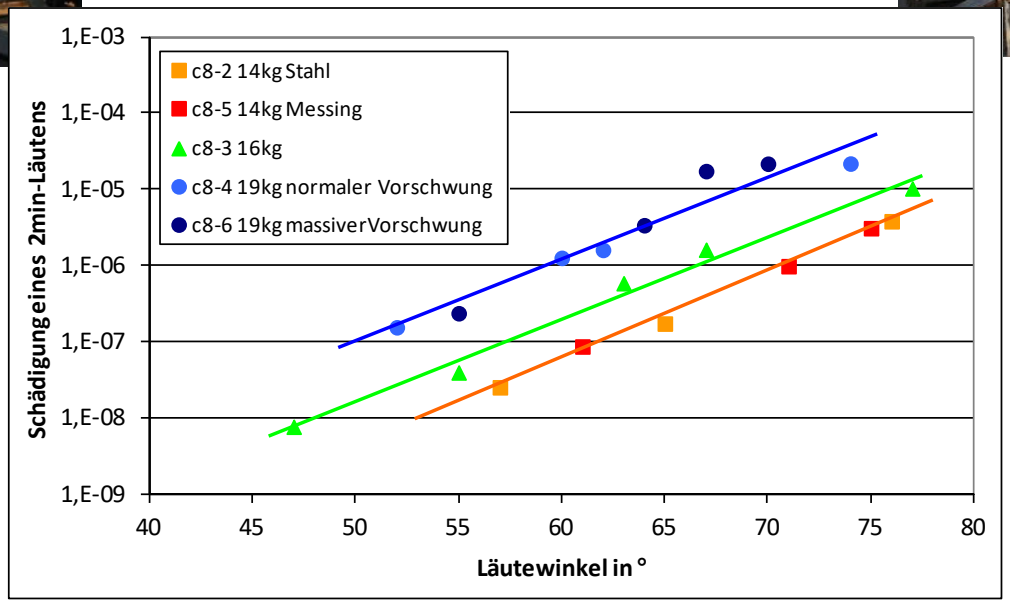
➔ Fehlstellen, Schweißnähte, Ausbrüche, ca. 20°- 40° zum Anschlag positionieren

©ECC-ProBell® 09/2020

Rechnerische Schädigung beim Läuten



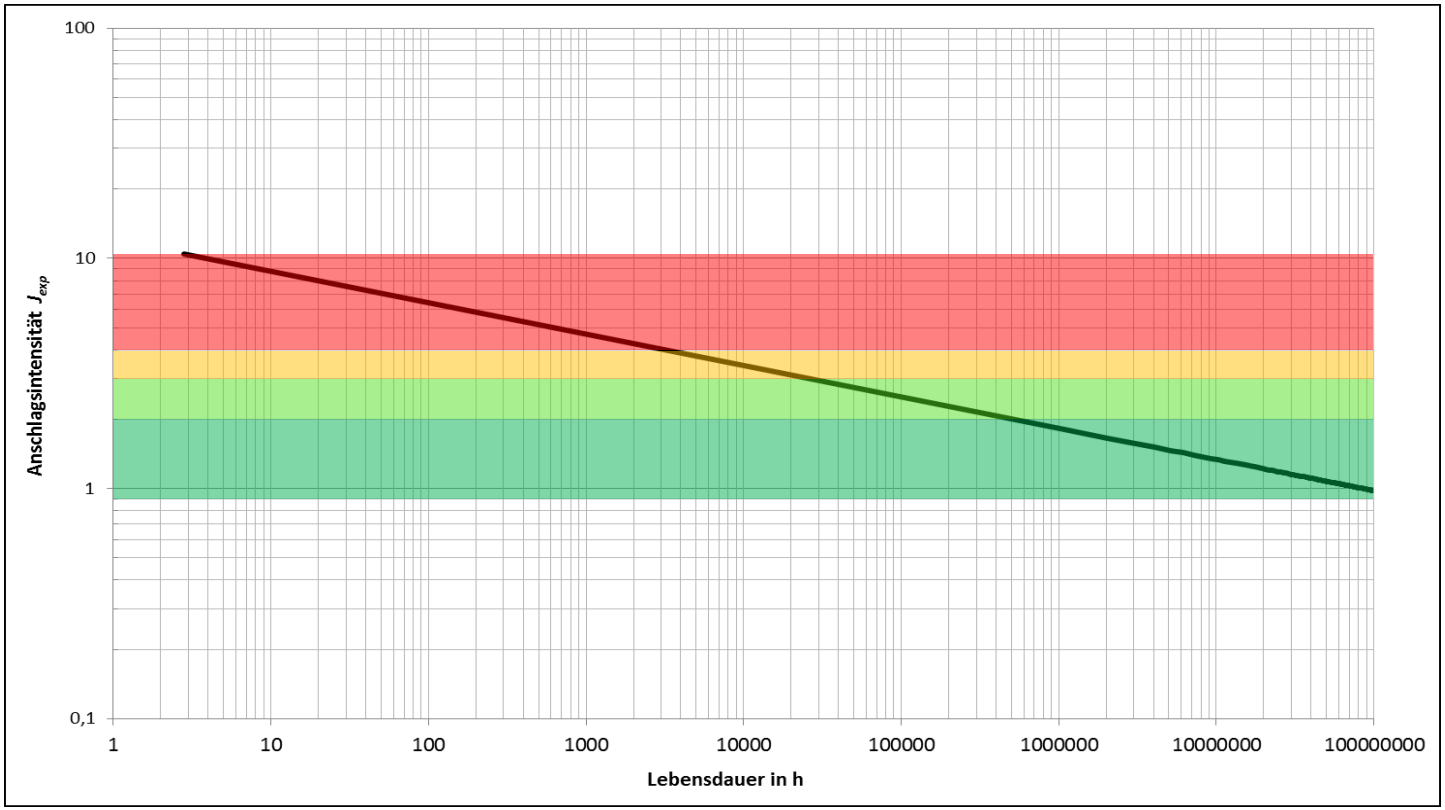




➔ Die Schädigung steigt mit zunehmender Klöppelmasse und zunehmendem Läutewinkel an

©ECC-ProBell® 09/2020

Anschlagsintensität ↔ Schadensrisiko



$J_{exp} < 2$:	sehr niedriges Risiko für Schäden	überwiegend schwache Klangentfaltung
$2 < J_{exp} < 3$:	niedriges Risiko für Schäden	gute bis sehr gute Klangentfaltung
$3 < J_{exp} < 4$:	mittleres Risiko für Schäden	überwiegend sehr gute Klangentfaltung
$J_{exp} > 4$:	hohes Risiko für Schäden	sehr mächtige und laute Klangentfaltung

©ECC-ProBell® 09/2020

Glocken Herzogenbuchsee

©ECC-ProBell® 09/2020

Dynamische Eigenschaften Herzogenbuchsee

Glocke	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4
Masse Glocke in kg	1825	839	476	198
Schlagringdicke in mm	113	85	73	55
Rippenschwere	Leicht	Leicht	Leicht	Leicht
Masse Klöppel in kg	77	45	27	12
Klöppelmasse / Glockenmasse	4,2%	5,4%	5,7%	6,1%
Ballen-Ø / Schlagringdicke	1,46	1,71	1,67	1,67
$L_{red,K}/L_{red,GJ}$	0,87	0,85	0,88	0,91
$L_{rot}/L_{red,GJ}$	0,28	0,27	0,30	0,30

- Alle Klöppel sind relativ schwer
- Alle Klöppelballen sind verhältnismäßig klein (außer bei Glocke 2)
- Alle Klöppel sind sehr agil im Verhältnis zum dynamischen Verhalten der Glocke

©ECC-ProBell® 09/2020

Läutebedingungen Glocke 1

Glocke 1

Läutewinkel	63°
Anschlagsintensität J_{exp}	3,5
Klöppelbeschl. in g Seite 1	606
Klöppelbeschl. in g Seite 2	455
Anschlagzahl in 1/min	49,6

©ECC-ProBell® 09/2020

Läutebedingungen Glocke 2 & Glocke 3

Glocke 2

Läutewinkel	54°	58°	63°	68°
Anschlagsintensität J_{exp}	4,3	4,3	4,8	5,9
Klöppelbeschl. in g Seite 1	269	273	314	372
Klöppelbeschl. in g Seite 2	183	221	264	328
Anschlagzahl in 1/min	55,6	55,2	54,5	53,8

Glocke 3

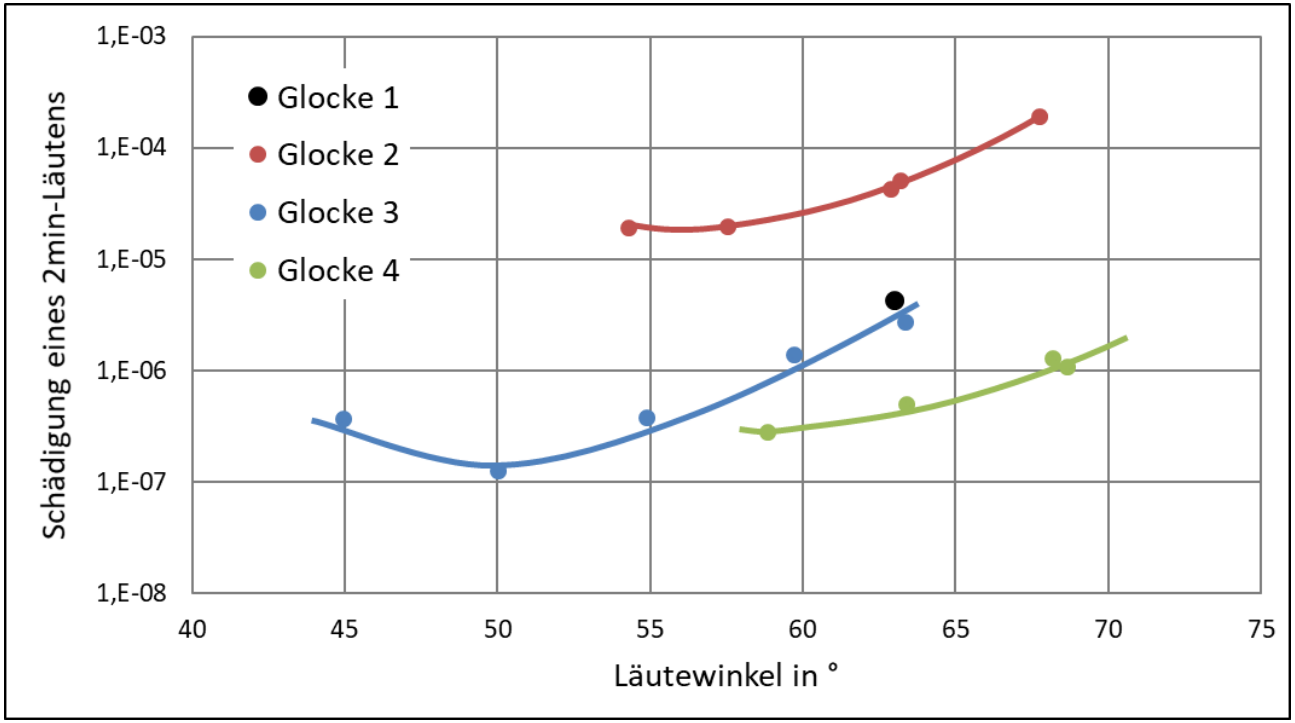
Läutewinkel	45°	50°	55°	60°	63°
Anschlagsintensität J_{exp}	2,5	2,2	2,5	3,0	3,3
Klöppelbeschl. in g Seite 1	333	328	381	461	497
Klöppelbeschl. in g Seite 2	218	285	350	388	411
Anschlagzahl in 1/min	63,1	62,5	61,8	61,1	60,6

©ECC-ProBell® 09/2020

Läutebedingungen Glocke 4

Glocke 4

Läutewinkel	59°	63°	69°
Anschlagsintensität J_{exp}	2,4	2,6	2,9
Klöppelbeschl. in g Seite 1	297	287	325
Klöppelbeschl. in g Seite 2	324	363	420
Anschlagzahl in 1/min	69,0	68,3	67,3



©ECC-ProBell® 09/2020

Zusammenfassung zu Glocken 1 - 4

- Mithilfe des musikalischen Fingerabdrucks konnten in allen Glocken während des Dauerläutens keine sich ausbreitenden Schäden festgestellt werden. **Alle 4 Glocken sind intakt und können weiterhin verwendet werden.**

- Da Gusseisen spröde bricht, müssten durch die Beanspruchung im Dauerläuten sichtbare Risse entstanden sein. Da keine sichtbaren Risse festgestellt werden konnten, **können die Gusseisen-Joche weiterhin verwendet werden**.

- Das Stahljoch von Glocke 3 wurde sandgestrahlt und mit der Magnetpulverprüfung im Bereich der hochbeanspruchten Stellen auf Risse geprüft. Es konnten keine Risse festgestellt werden. **Das Stahljoch kann daher weiterhin verwendet werden**.

- Alle Klöppel besitzen ungünstige dynamische Eigenschaften und eine ungünstige Massenverteilung. **Alle 4 Klöppel sollten daher durch neue Klöppel ersetzt werden, die für ein schonendes Läuten optimiert sind.**

©ECC-ProBell® 09/2020

Empfehlungen zu Glocken 1 - 4

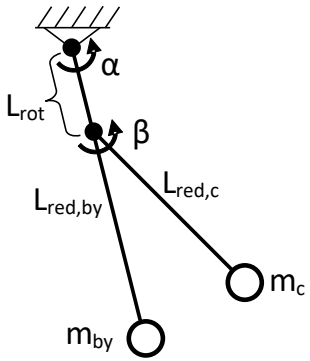
- Die Glocken können weiter im Betrieb bleiben. Eine Überwachung mit dem musikalischen Fingerabdruck wird empfohlen (alle 2 Jahre)
- Nach bisherigen Untersuchungen können die Joche im Betrieb bleiben. **Bei den 3 Gusseisenjochen sind die Achsen zu tauschen.**
- Die Klöppel sollten durch optimierte Klöppel ersetzt werden, die zu einer Verringerung der Beanspruchungen führen. Insbesondere bei Glocke 2 ist eine stärkere Schonung der Glocke erforderlich.
- Glocke 1 sollte um 30° gedreht werden, damit hochbeanspruchte Bereiche des Schlagrings in Zonen mit niedrigen Beanspruchungen gedreht werden.
- Ein Drehen der Glocken 2 - 4 ist ratsam. Idealerweise sollten sich dabei die neuen Anschlagstellen ca. 20°- 40° von den gegenwärtigen Anschlagstellen entfernt befinden.

©ECC-ProBell® 09/2020

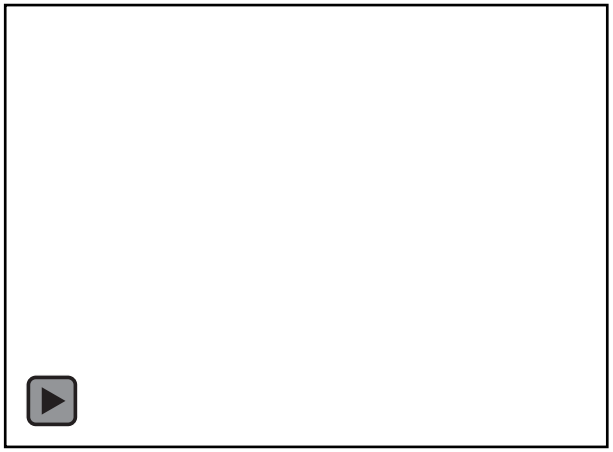
Prinzipien der Klöppelauslegung

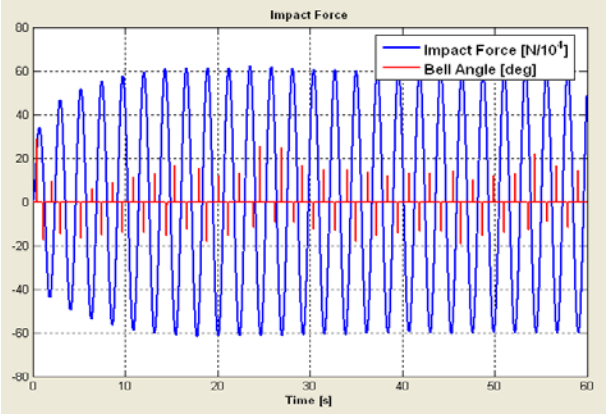
Analyse

Simulation



Ergebnis





Konstruktion

➔ Individuelle Abstimmung des Klöppels an die Läutebedingungen

©ECC-ProBell® 09/2020

Sanierung Geläute Münster Mittelzell Insel Reichenau

Glocke 1, Hosanna

gegossen: 1986

Schlagton: c‘

Gewicht: 2350kg

Schlagringdicke: 102

Klöppel	Alt	2015
Masse in kg	106	63
Ballen - Ø in mm	230	190
Läutewinkel in °	68	53
Anschlags-intensität J_{exp}	5,8	2,8
Klang		

©ECC-ProBell® 09/2020

Sanierung Geläute St. Johannis, Lüneburg

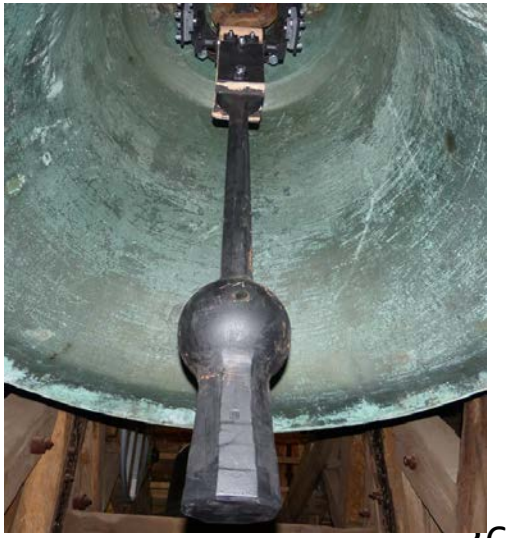
Glocke 3, Sonntagsglocke

gegossen: 1718

Schlagton: cis‘

Gewicht: 2700kg

Klöppel	Alt	2010
Masse in kg	73	84
Läutewinkel in °	69	58
Anschlags-intensität J_{exp}	3,5	2,5



©ECC-ProBell® 09/2020

Sanierung Geläute Thuner Schloßkirche

Glocke 2 „Susanna“

gegossen 1516

Schlagton: cis‘

Gewicht: 3800kg

Klöppel	Alt	2014
Masse in kg	160	93
Läutewinkel in °	54	59
Anschlagsintensität J_{exp}	4,4	3,4
Klang		

Geläute:

Vorher:

Nachher:

©ECC-ProBell® 09/2020

Klöppeloptimierung Pummerin, Wien

gegossen: 1951

Schlagton: c°

Gewicht: 20130kg

Zinnanteil: ca. 18,6%

Klöppel	Alt	2011
Masse in kg	886	730
Ø Ballen in mm	360	370
Läutewinkel in °	54	52
Anschlags-intensität J_{exp}	5,8	4,1

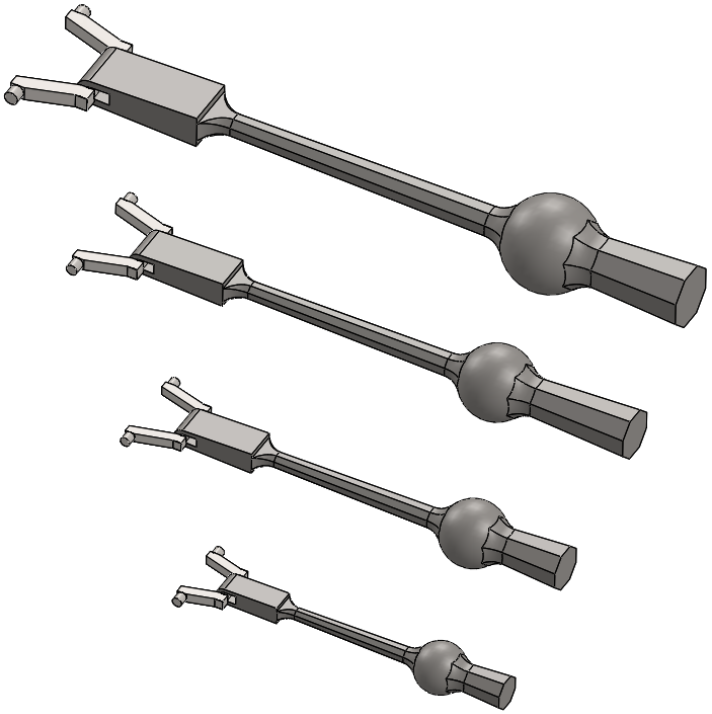
©ECC-ProBell® 09/2020

Optimierung der Klöppel für Herzogenbuchsee

Priorität der Klöppelauslegung:

1. Optimierung der Klöppel zur **Schonung der Glocken**, um keine Rissbildung unentdeckter Anrisse zu begünstigen

2. Verbesserung der klanglichen Eigenschaften der Glocken, um eine ausgewogenere Klangentfaltung zwischen den hohen und tiefen Teiltönen einer jeden Glocke zu erreichen.



©ECC-ProBell® 09/2020

Optimierung der Klöppel für Herzogenbuchsee

Glocke	1 - alt	1 - neu	2 - alt	2 - neu	3 - alt	3 - neu	4 - alt	4 - neu
Masse Klöppel/Glocke	4,2%	4,1%	5,4%	4,7%	5,8%	5,1%	6,1%	5,6%
Ballen-Ø / Schlagring	1,46	1,73	1,71	1,79	1,67	1,85	1,67	1,91

Wesentliche Veränderungen der neuen Klöppel:

1. Verringerung der Gesamtmasse der Klöppel zur Reduktion der Beanspruchungen.

2. Vergrößerung des Klöppelballens (der wirksamen Anschlagsmasse) zur Verbesserung der Klangentfaltung

3. Optimierte Anpassung der dynamischen Eigenschaften zwischen Klöppel und Glocke für eine geringere Anfluggeschwindigkeit des Klöppels. Dadurch wird gleichzeitig die Beanspruchung gesenkt und die Klangentfaltung verbessert.

©ECC-ProBell® 09/2020

ECC-ProBell®

Europäisches Kompetenzzentrum für Glocken

Hochschule Kempten
University of Applied Sciences

Europäisches Kompetenzzentrum für Glocken ECC-ProBell®

Prof. Dr.-Ing. Andreas Rupp
Dr.-Ing. Dipl.-Theol. Michael Plitzner

Hochschule Kempten
Bahnhofstr. 61
87435 Kempten

Tel. 0831-2523-372
Fax 0831-2523-365

info@ecc-probell.de
www.ecc-probell.de