

# Psychoakustische Aspekte der Reparatur von Gongschalen einer Turmuhr

Hugo Fastl<sup>1</sup>, Maximilian Schmidhuber<sup>1,2</sup>, Florian Völk<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> AG Technische Akustik, MMK, Technische Universität München, <sup>2</sup> jetzt: BSH Hausgeräte GmbH, Traunreut, <sup>3</sup> jetzt: Bioanaloge Informationsverarbeitung, IMETUM, Technische Universität München, Garching  
E-Mail: fastl@mmk.ei.tum.de

## Einleitung

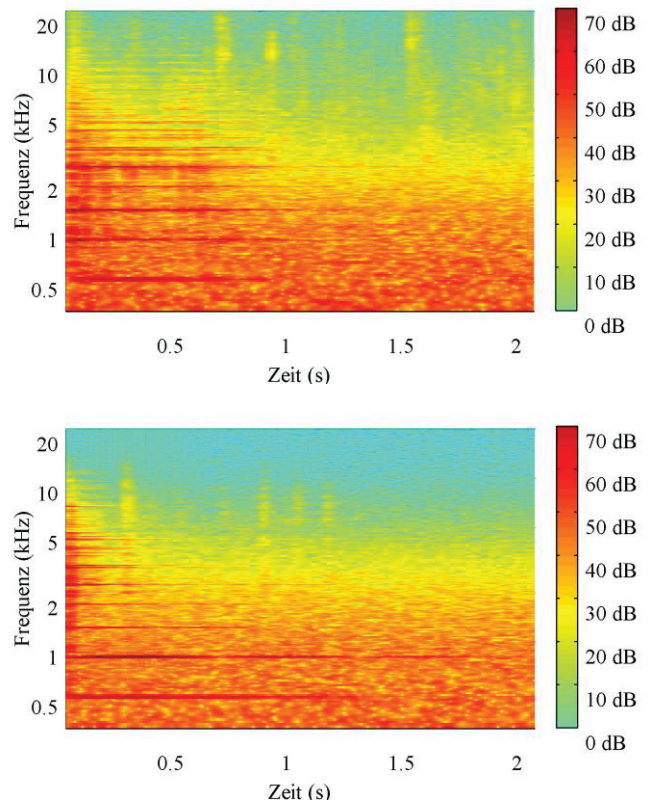
Bei der Turmuhr der Technischen Universität München werden wie üblich die Viertelstunden durch höhere sowie die ganzen Stunden durch tiefere "Glockenklänge" angezeigt. Allerdings kommen anstelle von glockenförmigen Klangkörpern Gongschalen zum Einsatz. Durch einen Defekt im Läutwerk erzeugte die Turmuhr "schepperige" Klänge. Als Ursache konnte festgestellt werden, dass der Klöppel nach dem Anschlag auf die Gongschale zurückfiel und darauf liegen blieb; manchmal kam es sogar zu Mehrfachanschlägen. Dieser Defekt wurde von der Fachfirma Perner aus Passau behoben.

Vor und nach der Reparatur wurden die Turmuhrklänge aufgezeichnet und in psychoakustischen Experimenten hinsichtlich der Klangqualität beurteilt. Wie zu erwarten, wurden die Turmuhrklänge nach der Reparatur als wesentlich besser eingeschätzt. Darüber hinaus sollte erforscht werden, ob der als „unschön“ empfundene Klang vor allem auf die dämpfende Wirkung des liegenbleibenden Klöppels zurückzuführen ist, oder ob auch spektrale Veränderungen eine wesentliche Rolle spielen. Deshalb wurde mittels synthetisierter Turmuhrklänge der Einfluss von Spektralverteilung bzw. Abklingzeit der Teiltöne auf das Qualitätsurteil systematisch studiert. Im vorliegenden Beitrag werden die Ergebnisse vorgestellt und Besonderheiten in den Urteilen musikalisch geschulter Versuchspersonen diskutiert.

## Aufzeichnung und messtechnische Analyse der Turmuhrklänge

Die Turmuhrklänge der tieferen (Stunden-)Gongschale wurden vor und nach der Reparatur auf dem Flachdach eines Gebäudes der Technischen Universität München in etwa 20 m Entfernung von den Gongschalen mit einem Kondensatormessmikrofon mit Kugelcharakteristik digital mit 44.1 kHz Abtastrate und 24 Bit Wortbreite aufgezeichnet. Da der Turm der Technischen Universität München an einer vielbefahrenen Straße steht, konnten aufgrund von Störgeräuschen nur die tiefen (Stunden-)Klänge verwendet werden.

Abbildung 1 zeigt die Spektrogramme der Aufnahmen des Gongschalensklangs vor (oben) und nach der Reparatur (unten). Analyse-Parameter: 92.8 ms Fensterbreite, 1 ms Zeitauflösung.



**Abbildung 1:** Spektrogramm eines Turmuhrklanges vor (oben) bzw. nach (unten) der Reparatur (Fensterbreite 92.8 ms, Zeitauflösung 1 ms).

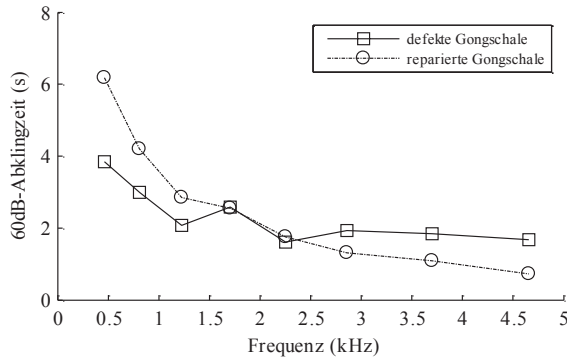
Deutlich sind die geringharmonischen Teiltöne (Terhardt 1998) zu erkennen. In Tabelle 1 sind deren Frequenzen und campanalogische Bezeichnungen (Schad 1996) aufgelistet.

**Tabelle 1:** Frequenzen  $f$  der geringharmonischen Anteile und deren campanalogische Bezeichnung.

	$f$ (Hz)	Bezeichnung
1	462	Unteroktave
2	809	Prime
3	1224	Quinte
4	1707	Oberoktave
5	2254	Undezime
6	2859	
7	3701	
8	4657	

Es fällt auf, dass die bei Klängen von Kirchenglocken ganz wesentliche Terze (vgl. z.B. Fleischer et al. 2007) bei den Klängen der Gongschalen fehlt.

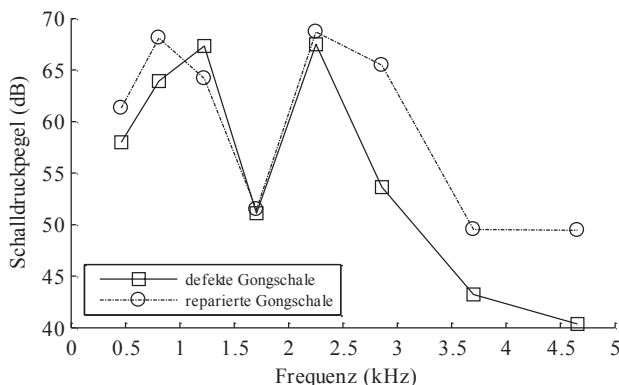
Abbildung 2 zeigt die 60 dB-Abklingzeiten der einzelnen Teiltöne der Gongschale vor und nach der Reparatur.



**Abbildung 2:** 60 dB-Abklingzeiten der einzelnen Teiltöne der Gongschale vor (Quadrat) bzw. nach (Kreis) der Reparatur.

Nach der Reparatur (Kreise) weisen die tiefen Teiltöne eine längere, die hohen Teiltöne jedoch eine kürzere Abklingzeit auf. Dies beruht vermutlich einerseits auf der Bedämpfung durch den aufliegenden Klöppel und andererseits auf dem mehrmaligen Anschlagen. Die Schwingungsmoden der Oberoktave (1707 Hz) und Undezime (2254 Hz) werden offensichtlich durch den defekten Klöppel kaum beeinflusst. Insgesamt fällt auf, dass die 60 dB-Abklingzeit der Unteroktave der reparierten Gongschale mit 6.2 s deutlich unter der Abklingzeit einer Kirchenglocke von etwa 40 s liegt (Fleischer et al. 2007).

Abbildung 3 zeigt die Maximalpegel der einzelnen Teiltöne vor und nach der Reparatur.



**Abbildung 3:** Maximalpegel der einzelnen Teiltöne der Gongschale vor (Quadrat) bzw. nach (Kreis) der Reparatur.

Mit Ausnahme des dritten Teiltöns (Quinte) liegen die Maximalpegel nach der Reparatur höher oder bleiben bei Oberoktave und Undezime (wie schon bei den Abklingzeiten) nahezu gleich.

Da Glocken in der Regel nicht perfekt symmetrisch aufgebaut sind, tritt meistens "Moden-Splitting" auf, d.h. zwei

gleichartige Moden, deren Knotendurchmesser gegeneinander versetzt sind, mit leicht unterschiedlichen Frequenzen. Wenn beide Moden etwa gleich angeregt werden, folgen daraus umlaufende (spinning) Modes, die beim Zuhörer Schwebungen mit der Differenz der beiden Frequenzen hervorrufen. Da das für Glocken typische Klangbild von „spinning modes“ (Fleischer und Rotter 1994) dominiert wird, wurden die Langzeitspektren der Gongschale detailliert untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt.

**Tabelle 2:** Frequenzen  $f$  und Pegeldifferenzen  $\Delta L$  der auftretenden Maxima im Bereich der 8 Teiltöne nach Mittelung der Langzeitspektren über alle Aufnahmen der defekten bzw. reparierten Gongschale.

Teilton	defekt		repariert	
	$f$ (Hz)	$\Delta L$ (dB)	$f$ (Hz)	$\Delta L$ (dB)
1	463		462	
2	814		812	
3	1230		1229	
	1225	3.27	1227	4.77
4	1709		1708	
	1707	0.65	1706	0.2
5	2252		2251	
6	2857		2857	
	2861	0.69	2852	8.42
7	3701		3696	
	3704	3.26	3703	2.55
8	4656		4649	
	4659	2.74	4654	0.02

Sofern „spinning modes“ auftreten sind in Tabelle 2 sowohl die Frequenzen als auch die Pegeldifferenzen der dicht benachbarten Komponenten angegeben.

Unter Berücksichtigung der in Tabelle 2 aufgelisteten Frequenzen und Pegeldifferenzen wurden Schallsynthesen der Glockenklänge erstellt. Die zugehörigen Abklingfunktionen wurden folgendermaßen realisiert: Nach einem konstanten Klang von 100 ms Dauer (Anschlag) erfolgte ein exponentielles Abklingen gemäß

$$y(t) = \exp(-t \log 1000 / T_{60}). \quad (1)$$

### Psychoakustische Beurteilung der synthetisierten Turmuhrklänge

An den Hörversuchen nahmen 17 normalhörende (Hörverlust maximal 10 dB) Versuchspersonen im Alter zwischen 21 und 28 Jahren (Median 24 Jahre) teil. Die (synthetisierten) Turmuhrklänge wurden in einer schallgedämmten Messzelle diotisch über elektrodynamische Kopfhörer (Beyer DT 48) mit Freifeldentzerrer nach Fastl und Zwicker (2007, S. 7) im Originalpegel dargeboten. Als direktes Skalierungsverfahren wurde die Versuchsmethode „random access“ (Fastl 2002) gewählt.

Für die Synthesen der Turmuhrklänge wurden hinsichtlich der Spektralverteilung die Werte aus Tabelle 2 und hinsichtlich der Abklingzeiten die Werte aus Abbildung 2 eingesetzt. Folgende Kürzel werden verwendet:

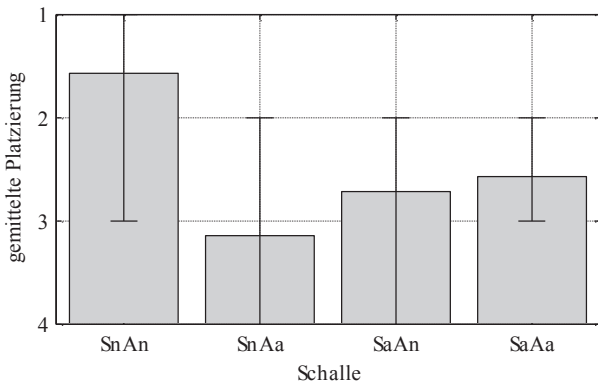
Sa (Spektralverteilung alt) für die Spektren der defekten Gongschale gemäß Tabelle 2

Sn (Spektralverteilung neu) für die Spektren der reparierten Gongschale gemäß Tabelle 2

Aa (Abklingzeit alt) für die Abklingzeiten der defekten Gongschale gemäß Abbildung 2

An (Abklingzeit neu) für die Abklingzeiten der reparierten Gongschale gemäß Abbildung 2

Abbildung 4 ermöglicht einen Überblick über die Bewertungen der verschiedenen synthetisierten Turmuhrklänge.



**Abbildung 4:** Gemittelte Platzierungen der Schalle SnAn (Spektralanteile und Abklingzeiten neu), SnAa (Spektralanteile neu, Abklingzeiten alt), SaAn (Spektralanteile alt, Abklingzeiten neu) und SaAa (Spektralanteile und Abklingzeiten alt) sowie die jeweiligen individuellen Schwankungen.

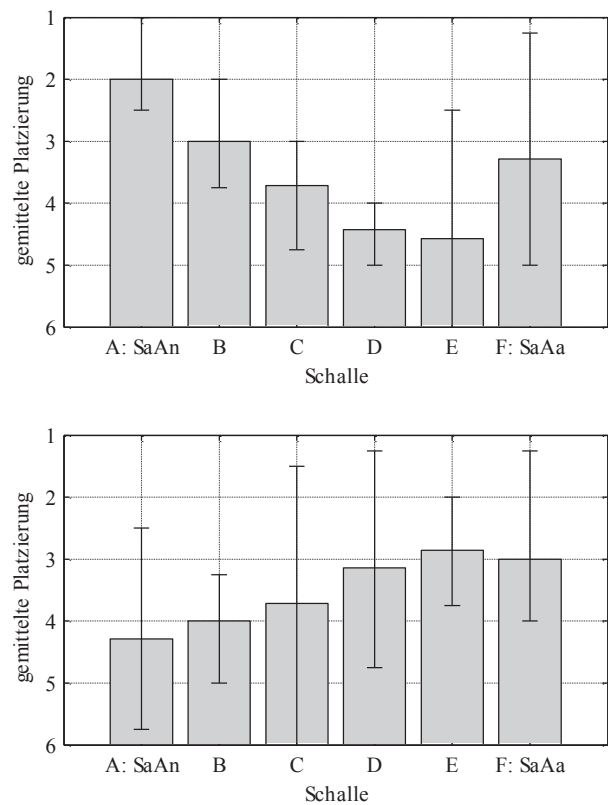
Die in Abbildung 4 dargestellten Daten zeigen, dass - wie zu erwarten - das Klangbild der reparierten Gongschale (SnAn) im Vergleich zur defekten Gongschale (SaAa) bevorzugt wird. Besonders ungünstig auf das Klangbild wirkt sich die Kombination von neuer Spektralverteilung und alter Abklingzeit (SnAa) aus. Aber auch die Kombination alte Spektralverteilung mit neuer Abklingzeit (SaAn) wird noch etwas schlechter beurteilt als die Kombination SaAa der defekten Gongschale. Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass „künstliche“ Kombinationen von Spektralverteilung und Abklingzeit in der Regel schlechter bewertet werden als die originalen Turmuhrklänge – sogar bei defekter Gongschale!

Um detailliertere Hinweise zum Einfluss der Abklingzeit auf die Klangbeurteilung zu erhalten, wurden die Abklingzeiten folgendermaßen variiert:

$$T(f) = T_n(f) - k[T_n(f) - T_a(f)] \quad (2)$$

Dabei bezeichnet  $T_n$  die 60 dB-Abklingzeiten der reparierten,  $T_a$  die 60 dB-Abklingzeiten der defekten Gongschale. Für den Faktor  $k$  wurden die Werte  $\{0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0\}$  verwendet. Mit dem Wert  $k = 0$  erhält man somit die neuen, mit  $k = 1.0$  die alten Abklingzeiten. Für die übrigen Werte liegen die Abklingzeiten dazwischen. Die beiden Eckschalle werden mit SnAn und SnAa abgekürzt.

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe sind in Abbildung 5 getrennt für Musiker und Nichtmusiker dargestellt.



**Abbildung 5:** Gemittelte Platzierungen für synthetisierte Turmuhrklänge mit Spektralverteilungen der defekten Gongschale und verschiedenen Abklingzeiten. Beurteilung durch Musiker (oben) bzw. Nichtmusiker (unten).

Die Musiker (Versuchspersonen die singen oder ein Instrument spielen) bevorzugen im Gegensatz zu den Nichtmusikern eindeutig Schall A mit den Abklingzeiten der reparierten Gongschale. Bei den Nichtmusikern erhält dieser Klang die schlechteste Bewertung. Schall F (Originalklang SaAa) erhält von Musikern als auch von Nichtmusikern eine ähnliche Bewertung.

Die Zwischenwerte der Schalle B bis E werden durch Musiker und Nichtmusiker gegenläufig beurteilt: Wenn sich die Abklingzeit des synthetisierten Turmuhrklangs mehr und mehr der Abklingzeit der defekten Gongschale annähert, nimmt für die Musiker die Klangqualität ab, für die Nichtmusiker jedoch zu!

Die in Abbildung 5 mit dargestellten Schwankungen weisen darauf hin, dass synthetisierte Turmuhrklänge, deren Abklingzeiten „zwischen“ der Abklingzeit der reparierten bzw. defekten Gongschale liegen (Schall C, D) von Musikern recht einheitlich beurteilt werden, während Nichtmusiker diese Schalle sehr unterschiedlich bewerten.

Da für alle Schalle die Spektralverteilungen der defekten Glockenschale (Sa) verwendet wurden deutet die Bewertung der Nichtmusiker darauf hin, dass sie die Turmuhrklänge umso besser bewerten, je mehr sie sich dem Originalklang der defekten Gongschale (SaAa) annähern.

Im Gegensatz dazu beeinflussen die Abklingzeiten der reparierten Gongschale (An) die Beurteilung der Turmuhrklänge durch Musiker positiv.

Allerdings wird auch von den Musikern der Originalklang der defekten Gongschale (SaAa) wieder positiver bewertet. Dies liegt vermutlich daran, dass – trotz mangelhafter Klangqualität – der originale Klang der defekten Gongschale „authentischer“ klingt.

### **Zusammenfassung**

Als Ursache für die „schepperigen“ Klänge der Turmuhr der TU München konnte ein Defekt im Läutewerk ermittelt werden: Der Klöppel blieb auf der Gongschale liegen oder führte mehrere Anschläge aus. Für die mangelhafte Klangqualität der Turmuhrklänge ist offenbar nicht nur die Bedämpfung durch den Klöppel und damit die Veränderung der Abklingzeiten der geringharmonischen komplexen Töne verantwortlich. Auch die durch den Defekt im Läutewerk verursachten Änderungen in der Spektralverteilung der Turmuhrklänge spielen eine Rolle.

Werden bei konstanter Spektralverteilung die Abklingzeiten systematisch variiert, orientieren sich Nichtmusiker am originalen Klangbild: je weiter sich die Abklingzeiten der synthetisierten Schalle von den originalen Abklingzeiten entfernen, desto negativer wird das Klangbild beurteilt. Im Gegensatz dazu scheinen Musiker neuen Klangbildern gegenüber aufgeschlossener und quittieren die Abklingzeiten der reparierten Gongschale – trotz Spektralverteilung der defekten Gongschale – mit einer besseren Bewertung des Klangbilds.

### **Danksagung**

Die Autoren danken Herrn Dr.-Ing. Daniel Menzel für tatkräftige Unterstützung bei den Aufnahmen der defekten Gongschalen sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Fleischer für wertvolle Diskussionsbeiträge.

### **Literatur**

- [1] Fastl H.: Psychoacoustics and Sound Quality. Fortschritte der Akustik, DAGA '02, 765–766 (Deutsche Gesellschaft für Akustik e. V., Oldenburg, 2002)
- [2] Fastl H., E. Zwicker: Psychoacoustics. Facts and Models. 3. Auflage (Springer, Berlin, New York 2007)
- [3] Fleischer, H., Rotter, R.: Das Phänomen der Spinning Modes. Fortschritte der Akustik, DAGA '94, 737–740 (DGP Bad Honnef, 1994)
- [4] Fleischer H., H. Fastl, M. Sattler: Wann klingt eine Kirchenglocke nach Kirchenglocke? Fortschritte der Akustik, DAGA 2007, 241–242 (Deutsche Gesellschaft für Akustik e. V., Berlin, 2007)
- [5] Schad C.-R.: Wörterbuch der Glockenkunde (Hallwag Verlag, Bern, Stuttgart, 1996)
- [6] Terhardt E.: Akustische Kommunikation (Springer, Berlin, New York 1998)