

Wann klingt ein Glockenklang nach Kirchenglocke?

Helmut Fleischer¹, Hugo Fastl² und Martin Sattler²

¹ Institut für Mechanik, UniBw München, 85577 Neubiberg. E-Mail helmut.fleischer@unibw.de

² AG Technische Akustik, Mensch-Maschine-Kommunikation, TU München, E-Mail fastl@mmk.ei.tum.de

Einleitung

Die Glocke ist ein Idiophon, bei dem sämtlichen Teiltönen mechanische Teilschwingungen direkt zugeordnet sind. Moderne Methoden erlauben es, Schwingungsformen und -frequenzen einer Glocke in großer Zahl zu messen. So wurden in [1] 134 Moden einer 214-kg-Glocke identifiziert. Rechnerisch, z.B. mit der Methode der Finiten Elemente, lassen sich noch wesentlich mehr Moden bestimmen. Vor allem bei Optimierungsaufgaben stellt sich die Frage, welcher Aufwand dem Problem angemessen ist. Um einen Eindruck davon zu bekommen, wie viele und welche Teilschwingungen Bedeutung für den Klang der Glocke haben, wurden psychoakustische Experimente durchgeführt. Es wurde untersucht, welche Spektralkomponenten des Schallreizes „klangbildend“ und welche zwar physikalisch nachweisbar, für das typische Klangbild einer Kirchenglocke jedoch irrelevant sind.

Untersuchte Glocke



Abb. 1: Kirchenglocke, auf die sich die Untersuchungen beziehen.

Als Objekt diente die in Südostbayern gegossene Bronzeglocke (37 kg; Moll-Oktav, Schlagton C₆), die in Abb. 1 abgebildet ist. Näheres zu den mechanischen Schwingungen und zum Schallsignal dieser Glocke findet sich in [2].

FFT-Analyse des Glockenklangs

In einem Laborraum wurde die Glocke am Schlagring mit einem Hammer angeschlagen, was zu einem „metallischen“ Glockenklang führte. Dieser wurde im Abstand 4 m mit einem Messmikrofon auf DAT aufgenommen und anschließend mit dem FFT-Analysator in Teiltöne zerlegt. Abb. 2 zeigt eine Grobanalyse. Nach oben ist der Schallpegel, nach rechts die Frequenz und nach vorn die Zeit aufgetragen. Schwebungen, wie sie bei einigen Teiltönen zu beobachten sind, haben ihre Ursache im Moden-Splitting [2]. Die Zoom-Funktion macht jeweils zwei Partialtöne sichtbar, deren Abstand sich in der Schwebungsfrequenz widerspiegelt. Ein solches Paar wird im Folgenden als ein Teilton aufgefasst.

Bei der Feinanalyse wurden im Bereich bis 14 kHz dreißig Teiltöne gefunden, die als physikalisch „nachweisbar“ bezeichnet und durch grüne kursive Nummern gekennzeichnet werden. Für jeden dieser Teiltöne wurden die Kennwerte Fre-

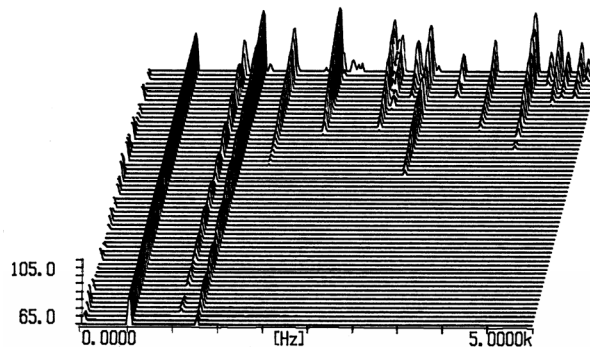


Abb. 2: Die ersten drei Sekunden des Glockenklangs.

quenz f , Anfangspegel L und Nachhallzeit T_{60} bestimmt. Plausibilitätsüberlegungen und eine unterstützende gehörbezogene Analyse halbieren die Anzahl auf fünfzehn Teiltöne, die von Pegel und Frequenzlage her vermuten lassen, dass sie zur Hörwahrnehmung beitragen können. Diese für das Hören möglicherweise „wesentlichen“ Teiltöne tragen blaue Nummern und sind samt Kenndaten in Tab. I zusammen gestellt. In der Glockenkunde übliche Bezeichnungen von Teiltönen des Prinzipal-/Mixturbereichs [3] sind vermerkt.

Tab. I: Kenndaten der wesentlichen Teiltöne

Nr.	f /Hz	L /dB	T_{60} /s	Bezeichnung
1 (1)	139.9	21.6	60	
2 (2)	239.8	28.2	60	
3 (3)	308.0	26.7	60	
4 (6)	512.2	80.6	41,8	Suboktave
5 (9)	759.7	22.4	0,6	
6 (12)	1053.8	64.8	9,4	Prime
7 (13)	1260.3	67.4	5,1	Terze
8 (14)	1605.0	63.0	2,7	Quinte
9 (17)	2110.9	51.4	1,8	Oberoktave
10 (19)	2714.8	52.1	1,4	Dezime
11 (20)	3128.8	55.3	2,3	Duodezime
12 (22)	4282.3	61.8	1,4	Doppeloktave
13 (23)	4289.0	64.8		
14 (24)	4560.1	55.4	1,1	
15 (28)	5516.3	49.1	1,9	
	5534.1	48.9		
	9487.8	21.1	1,3	

Additive Resynthese von Klängen

Auf der Basis dieser Daten wurden mit dem Programm Matlab dreißig Sinustöne mit exponentiell abklingender Amplitude erzeugt. Daraus wurden die vierzehn Klänge zusammen gestellt, die Tab. II auflistet. Diese enthalten

unterschiedlich viele der nachweisbaren Teiltöne (*grüne kursive Nummern*) bzw. der wesentlichen Teiltöne gemäß Tab. I (*blau*). So umfasst Klang 12 alle dreißig nachweisbaren Teiltöne, während Klang 1 nur die höheren unter Einschluss der Suboktave, nicht jedoch die tieffrequenten enthält. Sämtliche fünfzehn wesentlichen Teiltöne gemäß Tab. I sind in Klang 13 enthalten; im Unterschied dazu sind in Klang 2 die Teiltöne unterhalb der Suboktave weggelassen.

Tab. II: Resynthetisierte Klänge

Klang	Enthaltene Teiltöne Nr.																			
1	6 ... 30																			
2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15								
3	4	5	6	7	8	9	10	11	12											
4				4				7			9				13					
5	1			3			5			7			9							
6				4				6			8			10			12			14
7				3			5			7			9			11			13	
8			2				6					10				14				
9				3						7					11			15		
10	13 ... 21																			
11	13 15 17 19 21																			
12	1 ... 30 (sämtliche)																			
13	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15					
14						6	7	8	9	10	11	12	13							

Hörversuche zur Ähnlichkeit mit einem Glockenklang

Mit den vierzehn Klängen gemäß Tab. II bearbeiteten die VPn folgende Aufgabe: „Es werden Einzelschalle dargeboten, zwischen denen 4 s Pause sind. Entscheiden Sie, ob der jeweilige Schall wie der Klang einer Kirchenglocke klingt und tragen Sie Ihre Entscheidung ein. Verwenden Sie folgende Bewertung: ‚Trifft überhaupt nicht zu (- -)‘ über (-), (o), (+) bis ‚Trifft voll und ganz zu (+ +)‘.“ Nachdem zwei VPn, die aus einem Nachbarland stammen, in sämtlichen Versuchen konsistent abweichende Antworten gaben, wurden sie in die weitere Auswertung nicht einbezogen. Somit gelten die angegebenen Bewertungen für zehn einheimische VPn.

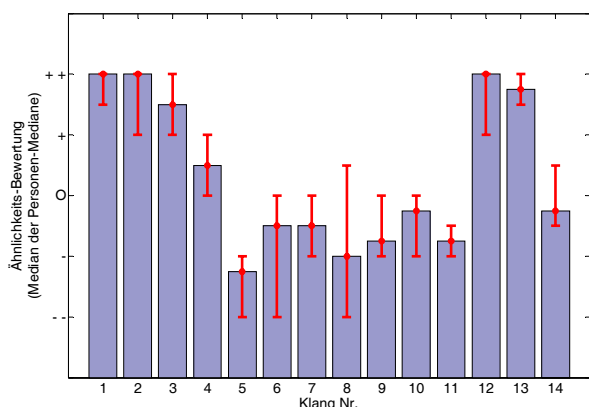


Abb. 3: Urteile, wie ähnlich die Klänge einem Glockenklang sind.

Die Klänge wurden einzeln nacheinander dargeboten. Die Bewertungen von vier Durchgängen sind als Mediane samt Interquartilen Abb. 3 zu entnehmen. Die VPn urteilen, dass sich die Klänge 5 und 8 am wenigsten wie Kirchenglocken anhören. Dagegen klingen die Klänge 1, 2 und 12 voll und ganz und der Klang 13 (alle dunkel unterlegt in Tab. II) weitgehend wie die einer Kirchenglocke. Die Beurteilungen der Klänge 12 und 13 belegen, dass keine signifikanten Unterschiede auftreten, wenn ein Klang nicht aus den dreißig

nachweisbaren, sondern nur aus den fünfzehn wesentlichen Teiltönen besteht, die in Tab. I aufgelistet sind. Den Ergebnissen für die Klänge 1 und 2 zufolge spielen sämtliche Teiltöne unterhalb der Suboktave für die Hörbeurteilung keine Rolle. Neben den ganz tieffrequenten sind in Klang 3 (hell unterlegt in Tab. II), der auch noch als gut bewertet wird, die höherfrequenten Teiltöne Nr. 13 bis 15 weggelassen.

Abschließende Bewertung

Der Klang einer kleinen Kirchenglocke (Moll-Oktav, Schlagton C₆) wurde FFT-analysiert. Frequenzen, Amplituden und Abklingkonstanten von dreißig nachweisbaren Teiltönen wurden bestimmt. Anhand einer weitergehenden Analyse wurden daraus fünfzehn Spektralkomponenten ausgewählt, die als wesentlich eingestuft wurden. Anschließend wurden diese Teiltöne durch mathematische Verfahren synthetisiert und zu künstlichen Klängen zusammengefügt, die zwischen vier und dreißig unterschiedliche Teiltöne enthielten.

In einem psychoakustischen Experiment wurde untersucht, welche Teiltöne ein synthetischer Klang enthalten muss, damit er ähnlich wie der Klang einer echten Kirchenglocke beurteilt wird. Die VPn hatten vierzehn Klänge in dieser Hinsicht auf einer fünfstufigen Skale zu bewerten. Die Erwartungshaltung bezüglich eines „typischen Kirchenglockenklangs“ erweist sich in aller Regel als konsistent, kann jedoch regionale Unterschiede aufweisen.

Für das volle Klangbild einer Kirchenglocke sind von dreißig nachweisbaren Teiltönen (Klang 12, mit Einschränkungen Klang 1) für die Resynthese höchstens fünfzehn wesentliche Teiltöne (Klang 13 mit allen Teiltönen gemäß Tab. I) von Bedeutung. Das typische Klangbild lässt sich auch mit zwölf der wesentlichen Teiltöne (Klang 2) erzeugen. Gute Auralisationen gelingen noch mit den neun in Tab. I unterlegten Teiltönen (Klang 3). All diese Klänge schließen den Prinzipalbereich (Suboktave bis Oberoktave [2,3]) ein. Für eine befriedigende Auralisation reichen sogar vier der Teiltöne aus. So besteht Klang 4 nur aus Suboktave, Terze, Oberoktave und einem Teilton des Mixturbereichs [3] bei 4560 Hz. Die Prime und Quinte, die sich nur schwach ausprägen, sind weggelassen. Fehlt dagegen die Suboktave (Teilton Nr. 4), wird ein Klang durchweg schlecht beurteilt.

Festzuhalten bleibt: Wenn ein synthetischer Glockenklang die zwölf wesentlichen Teiltöne ab der Suboktave enthält, wird er sehr gut bewertet. Für eine gute bis sehr gute Bewertung genügen neun Teiltöne, wobei von den zwölf wesentlichen Teiltönen die oberen drei weggelassen werden können. Möglicherweise lässt sich die Anzahl noch weiter verringern, indem Teiltöne, die nur gering oberhalb der Mithörschwelle liegen, entfernt werden. Dies sollte in weiteren Experimenten untersucht werden. Ein synthetischer Klang mit noch zufriedener Stellung Bewertung kann aus lediglich vier Teiltönen bestehen, falls diese Teiltöne im Spektrum des Klangs besonders stark hervortreten. Hilfreich ist dabei, wenn die für Kirchenglocken typischen Schwebungen vorhanden sind.

Literatur

- [1] Perrin, R., Charnley, T.: DePont, J., Normal modes of the modern English church bell. J. Sound and Vibration 90 (1980), 29-49
- [2] Fleischer, H.: Glockenschwingungen. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/97, Neuberg 1997
- [3] Schad, C-R.: Wörterbuch der Glockenkunde. Hallwag, Bern 1996