

**BEITRÄGE
ZUR
VIBRO- UND PSYCHOAKUSTIK**

Herausgeber: Helmut Fleischer und Hugo Fastl

Helmut Fleischer

**HÖRVERSUCHE MIT
GLOCKENKLÄNGEN**

HÖRVERSUCHE MIT GLOCKENKLÄNGEN

von

Helmut Fleischer

Institut für Mechanik
Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik
Universität der Bundeswehr München
85577 Neubiberg
Deutschland

Heft 1/07 der Reihe

Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik

Herausgeber: Helmut Fleischer und Hugo Fastl

ISSN 1430-936X

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Fleischer
Institut für Mechanik
Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik
Universität der Bundeswehr München

Prof. Dr.-Ing. habil. Hugo Fastl
Arbeitsgruppe Technische Akustik
Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Technische Universität München

Postanschrift:

LRT 4 UniBwM
85577 Neubiberg
Deutschland

Fleischer, Helmut:
Hörversuche mit Glockenklängen
Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/07
Neubiberg 2007
ISSN 1430-936X

Postanschrift des Verfassers:

Prof. Dr.-Ing. Helmut Fleischer
LRT 4 UniBwM
85577 Neubiberg
Deutschland

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist unzulässig und strafbar. Insbesondere gilt dies für die Übersetzung, den Nachdruck sowie die Speicherung auf Mikrofilm, mit vergleichbaren Verfahren oder in Datenverarbeitungsanlagen.

HÖRVERSUCHE MIT GLOCKENKLÄNGEN

Zusammenfassung

Umfangreiches Material zur Wahrnehmung des Schallsignales einer 37 kg-Kirchenglocke, das in mehreren akustischen Experimenten gesammelt wurde, wird präsentiert. In einer Pilotstudie wurde die Tonhöhe des Glockenklanges mittels eines Sinustones eingestellt, dessen Frequenz als Maß für die empfundene Tonhöhe dient. Die Beurteilungen der Versuchspersonen waren mehrdeutig hinsichtlich der Oktavlage, erwiesen sich jedoch als übereinstimmend mit der Tonkategorie der musikalischen Note C.

Das Ziel der Untersuchungen war es, den spektralen Kern einzugrenzen, der den Klang einer Kirchenglocke bestimmt. Zum Vergleich wurden zwei unabhängige Vorgehensweisen angewandt. Im Rahmen der ersten Methode führte Sattler (2006) in der Arbeitsgruppe von Hugo Fastl (München) in Zusammenarbeit mit unserem Institut für Mechanik eine FFT-Analyse des Glockenschlages durch und identifizierte nicht weniger als 30 abklingende Teiltöne. Durch Erzeugung dieser Töne mittels des Programms Matlab war es möglich, künstliche Klänge mit unterschiedlichem spektralem Gehalt zusammen zu setzen und zu resynthetisieren. Zehn erwachsene Versuchspersonen hatten die Aufgabe, zwei unterschiedliche Aufgaben zu bearbeiten. Im ersten Hörexperiment hatten die Versuchspersonen Paare künstlicher Signale in Bezug auf die Gefälligkeit als der Klang einer Kirchenglocke zu vergleichen. Im zweiten Experiment sollte anhand einer fünfstufigen Skale bewertet werden, in welchem Maße ein künstliches Signal wie eine Glocke klang. Zwölf Teiltöne stellen die vollständige Charakteristik einer Kirchenglocke dar. Jedoch zeigte sich, dass bereits vier geeignete von diesen zwölf Teiltönen für eine befriedigende Bewertung ausreichen. Lenski (2007) hat kürzlich an unserem Institut für Mechanik den Glockenklang mit dem gehörbezogenen Programm VIPER analysiert, das Spektrogramm manipuliert und die reduzierten Signale resynthetisiert. In der ersten Versuchsreihe wurden die Versuchspersonen befragt, ob sie irgendeinen Unterschied zwischen einem manipulierten Schall und dem Referenzschall wahrnahmen. Es stellte sich heraus, dass das Weglassen schwacher Komponenten unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung die physikalische Information reduzierte, ohne einen hörbaren Unterschied hervorzurufen. In der zweiten Reihe hatten die Versuchspersonen zu beurteilen, ob ein manipuliertes Signal wie eine Glocke klang oder nicht. Auf diese Weise gelang es, die relevanten Teiltöne zu identifizieren. Eine hundertprozentige Bewertung wurde mit fünf geeigneten Teiltönen erreicht.

Es zeigte sich, dass die mit diesen beiden unterschiedlichen Methoden ermittelten psychoakustischen Ergebnisse dahingehend übereinstimmen, dass der Prinzipalbereich mit den fünf Teiltönen Suboktave, Prime, Terze, Quinte und Oberoktave den Großteil der Charakteristik des Glockenklanges dominiert. Jedoch kommt nicht all diesen Teiltönen dieselbe Bedeutung zu. Deshalb können ausgewählte Töne dieses Bereiches, die sich nur schwach ausprägen, weggelassen werden, und der Klang wird immer noch mit einer Glocke assoziiert. Die Ergebnisse können Hinweise für die Messung, Berechnung und Optimierung von Glocken sowie für die Synthese künstlicher Glockenklänge geben.

PSYCHOACOUSTIC EXPERIMENTS WITH BELL SOUNDS

Summary

Comprehensive information on the perception of the sound signal of a 37 kg church bell collected via several psychoacoustic experiments is presented. In a pilot study, the pitch of the bell sound was matched by a sine tone, whose frequency serves as a measure for the perceived pitch. The scorings of eight subjects were ambivalent in octave regions, but were found to agree with the tonal category of the musical note C.

The aim of the investigations was to narrow down the spectral core that defines the sound of a church bell. Two independent approaches were performed for comparison. In the first approach, Sattler (2006) of the working group of Hugo Fastl (Munich) in cooperation with our Institute of Mechanics executed an FFT analysis of the bell stroke to identify as many as 30 decaying partial tones. Generating these tones via the software Matlab it was possible to assemble and resynthesize artificial sounds with different spectral content. Ten adult human subjects were engaged to solve two different tasks. In the first auditory experiment, the subjects had to compare pairs of artificial signals with respect to the pleasantness as the sound of a church bell. In the second experiment it was to be assessed to which extent an artificial signal sounded like a bell using a five step scale. The full characteristics of a church bell were depicted in twelve partial tones. Yet, only four apt partial tones among the twelve were found even to be sufficient for achieving a satisfactory rating. Recently, Lenski (2007) analyzed in our Institute of Mechanics the bell sound by the aurally related software VIPER, manipulated the spectrogram and resynthesized the reduced signals. In the first series of experiments the subjects were asked whether they detected any difference between a manipulated sound and the reference. Considering spectral masking, the dropping of weak components was found to reduce the physical information without exciting an audible difference. In the second series, the subjects had to judge whether a manipulated signal sounded like a bell or not. This way, it was possible to identify the relevant partial tones. A 100% rating was obtained by using five appropriate partial tones.

The psychoacoustic results obtained from the two independent approaches were found to coincide in the sense that the principal range with the five partial tones suboctave (hum tone), prime (fundamental), third (tierce), fifth (quint) and upper octave (nominal) dominates the major characteristics of the bell sound. However, not all these partial tone are of the same relevance. Therefore, selected tones of this range, which are only weakly pronounced, can be dropped, and the sound still remains associated with a bell. The results can give hints with respect to the measurement, computation and optimization of bells as well as for the synthesis of arti-ficial bell sounds.

INHALT

VORWORT

1.	EINLEITUNG	1
2.	DIE BETRACHTETE GLOCKE.....	5
2.1.	Allgemeines.....	5
2.2.	Die Teiltöne.....	6
2.3.	Zusammenfassende Bemerkung.....	9
3.	DIE TONHÖHE DES GLOCKENKLANGES	10
3.1.	Aufgabenstellung und Vorarbeiten	10
3.2.	Vorgehen zur psychoakustischen Ermittlung der Tonhöhe	11
3.3.	Auswertung der Tonhöhenvergleiche	12
3.4.	Berechnung der Tonhöhen	14
3.5.	Zusammenfassende Bemerkung.....	15
4.	HÖRVERSUCHE MIT RESYNTHESTISIERTEN KLÄNGEN.....	17
4.1.	Aufgabenstellung	17
4.2.	Detaillierte FFT-Analyse des Glockenklanges	17
4.3.	Auswahl der wesentlichen Teiltöne	20
4.4.	Klänge für die Hörversuche	23
4.4.1.	Synthese der Teiltöne und Generierung der Versuchsklänge	23
4.4.2.	Darbietung der Versuchsklänge	23
4.5.	Paarvergleiche zur Beliebtheit von synthetischen Glockenklängen	24
4.5.1.	Planung des Hörversuchs und Fragestellung	24
4.5.2.	Ergebnisse der Paarvergleiche	25
4.6.	Hörversuche zur Ähnlichkeit eines synthetischen Klanges mit einem Glockenklang.....	26
4.6.1.	Versuchsplanung und Fragestellung	26
4.6.2.	Ergebnisse der Ähnlichkeitsversuche.....	26
4.7.	Gemeinsame Diskussion der Versuchsergebnisse	28
4.8.	Zusammenfassende Bemerkung.....	29
5.	GEHÖRBEZOGENE ANALYSE VON GLOCKENKLÄNGEN.....	31
5.1.	Aufgabenstellung	31
5.2.	Psychoakustische Grundlagen.....	31
5.2.1.	Frequenzgruppen, Tonheit und Bark-Skale	31
5.2.2.	Ruhehörschwelle	32
5.2.3.	Spektrale Verdeckung bzw. Maskierung	33
5.3.	Verarbeitung der Schallsignale in VIPER.....	35
5.4.	Analyse des Glockenklanges.....	35
5.5.	Zusammenfassende Bemerkung.....	37
6.	SPEKTRALE REDUKTION VON GLOCKENKLÄNGEN	39
6.1.	Allgemeines zu den Schallsignalen.....	39
6.2.	Paarvergleiche zur Unterscheidbarkeit.....	40
6.3.	Unterscheidbarkeit bei erhöhter Frequenzlage.....	44

6.4.	Unterscheidbarkeit bei erniedrigter Frequenzlage	46
6.5.	Unterscheidbarkeit bei anderen Versuchsbedingungen	48
6.5.1.	Verwendete Testklänge	48
6.5.2.	Veränderte Dauern und verringerter Pegel.....	49
6.5.3.	Erhöhte Frequenzlage und zusätzliche Störgeräusche	51
6.5.4.	Erniedrigte Frequenzlage und zusätzliche Störgeräusche	52
6.6.	Hörversuche zur Ähnlichkeit eines reduzierten Klanges mit einem Glockenklang.....	53
6.6.1.	Versuchsplanung und Fragestellung	53
6.6.2.	Ergebnisse der Ähnlichkeitsversuche.....	55
6.7.	Zusammenfassende Bemerkung.....	58
7.	ABSCHLIESSENDE DISKUSSION.....	60
	LITERATUR.....	69

VORWORT

Im vorliegenden Band der Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik beschäftigt sich Helmut Fleischer mit einem Klangerzeuger, der schon seit Jahrzehnten Gegenstand der Forschung am Institut für Mechanik der Universität der Bundeswehr ist. Während die 37 kg schwere Moll-Oktav Kirchenglocke bisher im Hinblick auf vibroakustische Fragestellungen untersucht wurde, werden hier psychoakustische Gesichtspunkte diskutiert.

Dies ist einerseits voll und ganz dadurch gerechtfertigt, dass der Sinn und Zweck von Kirchenglocken darin liegt, liturgisch relevante Klänge zu **Gehör** zu bringen. Auch andere wichtige Anwendungsfälle von Glockenklängen wie "Turmuhr" oder "Wetterglocke" heben auf die Hörbarkeit der Klänge ab.

Andererseits geben psychoakustische Urteile über Schalle wesentliche Hinweise auf vibroakustische Verbesserungsmöglichkeiten. Aus der heutigen Akustikentwicklung beispielsweise bei Fahrzeugen oder Haushaltgeräten sind Werkzeuge des "*sound quality design*" und/oder "*sound quality engineering*" nicht mehr wegzudenken. Aus psychoakustischen Beurteilungen können dabei zuverlässige Prognosen erstellt werden, welche vibroakustischen Merkmale zur Erzeugung eines gewünschten Klangbilds notwendig sind, oder welche vibroakustischen Veränderungen zu einer Verbesserung des Klangbilds führen werden.

Die bei profanen Schallerzeugern gängige Vorgehensweise, aus einem "Zielspektrum" die Form eines akustischen Schwingers zu berechnen, wird hier auch für Kirchenglocken ins Auge gefasst. Dabei ist das Wissen, welche der zahlreichen Schwingungsformen für das hörbare Klangbild überhaupt ins Gewicht fallen, von entscheidender Bedeutung.

Anhand der Ergebnisse umfangreicher psychoakustischer Experimente weist Helmut Fleischer nach, dass zur Erzeugung des typischen Klangs einer Kirchenglocke etwa ein halbes Dutzend sorgfältig ausgewählter Teiltöne ausreichend sind. Die von Campanologen seit Jahrhunderten propagierte Bedeutung von Suboktave, Prime, Terze, Quinte und Oberoktave wird durch die psychoakustischen Ergebnisse eindrucksvoll bestätigt. Darüber hinaus zeigt sich, dass die Quinte nur wenig zum typischen Klang von Kirchenglocken beiträgt. Andererseits ist für einen "guten" Klang einer Kirchenglocke die Suboktave unabdingbar. Hier stellt sich angesichts der Dominanz der Suboktave für das Klangbild die Frage, ob die Bezeichnung "Prime" eher irreführend sein könnte. Allerdings ist bekannt, dass bei Schallen, die sowohl spektrale als auch virtuelle Tonhöhen erzeugen, bezüglich deren Tonhöhe häufig Oktavverwechslungen auftreten.

Helmut Fleischer zeigt, dass hinsichtlich der Hörwahrnehmung von Laien mit weniger als einem Dutzend Teiltönen authentische Klänge von Kirchenglocken synthetisiert werden können. Es wäre interessant zu wissen, ob dies auch für Experten (Campanologen) gilt. Noch interessanter wäre aber die "Nagelprobe", aus einem knappen Dutzend von Teiltönen die Form eines Schwingers zu berechnen, und zu überprüfen, ob er - zumindest für Laien - tatsächlich wie eine Kirchenglocke klingt.

München, den 18.6.2007

Hugo Fastl

1. EINLEITUNG

Glocken sind die schwersten und mächtigsten Musikinstrumente, die sich der Mensch je geschaffen hat. Ohne dass sich die Technologie wesentlich geändert hat, werden Glocken heute noch wie vor Hunderten von Jahren im Mantel-Abhebe-Verfahren gegossen. So wird zum Beispiel die Gussform für eine große Kirchenglocke heutzutage noch genau so aus Lehm gefertigt, wie es in Abb. 1 dem Stich aus der *Encyclopédie* von Diderot und d'Alembert aus dem Jahr 1767 zu entnehmen ist.

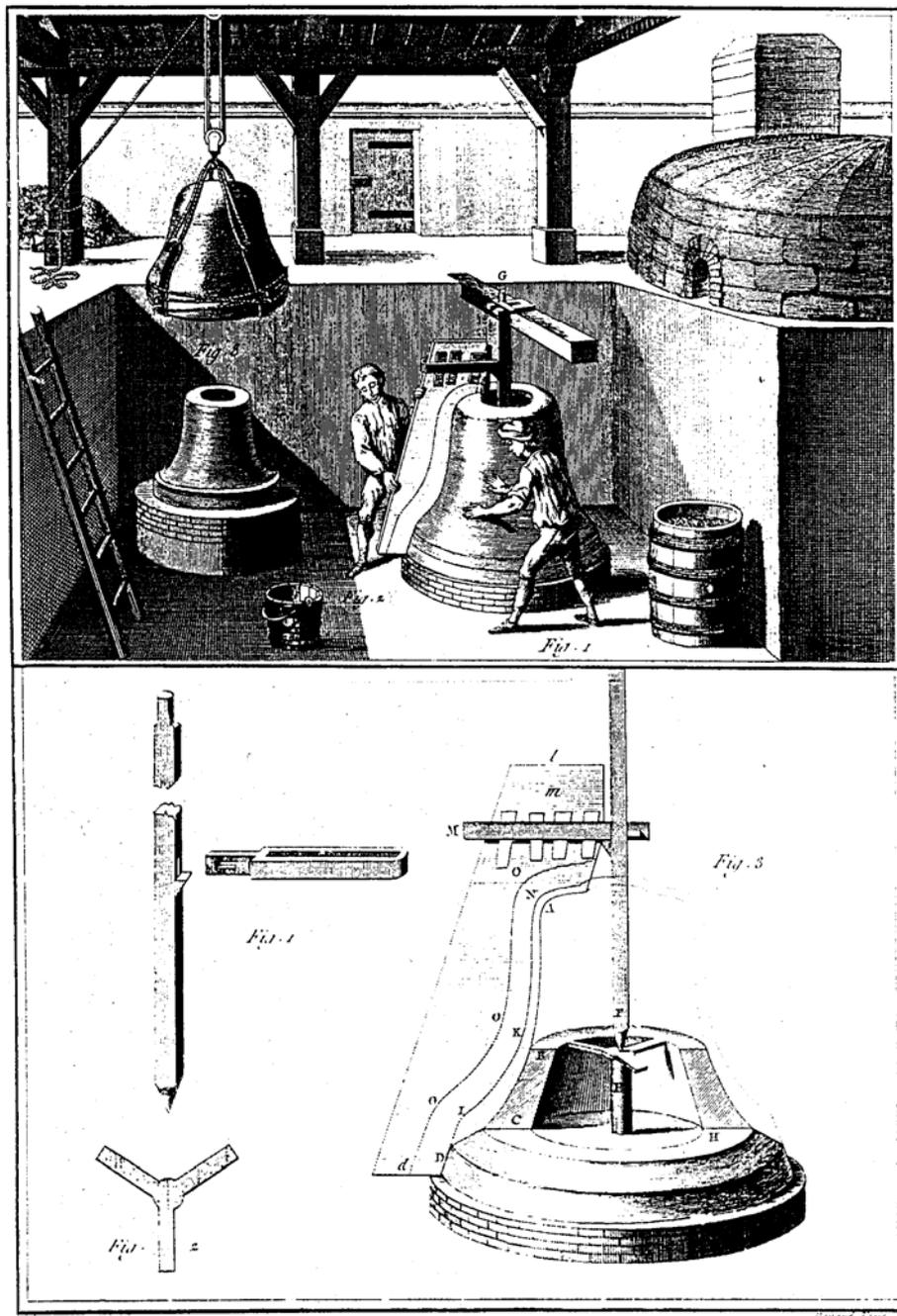


Abb. 1. Herstellung der Gussform für eine große Glocke
(aus der *Encyclopédie* von D. Diderot und J. d'Alembert, 1767).

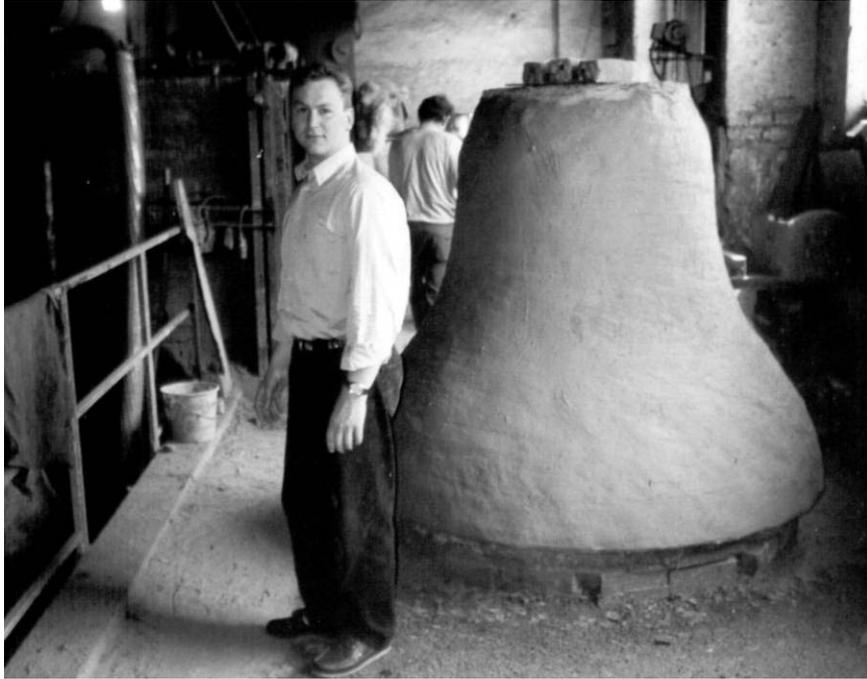
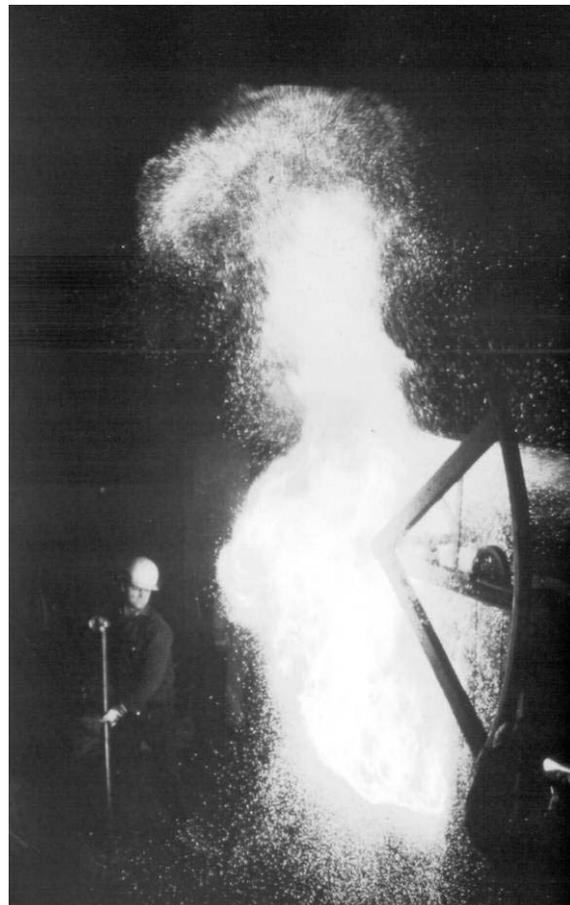


Abb. 2. Mantel für den Guss einer Kirchenglocke.

Der Mantel der Gussform einer Kirchenglocke ist in Abb. 2 zu erkennen. Im Vordergrund steht der Glockengießermeister Rudolf Perner, der Inhaber der Passauer Glockengießerei in Hacklberg. Aus seinem Betrieb stammt die Glocke, auf die sich die Untersuchungen dieses Berichts beziehen.



*Abb. 3. Erhitzen
der Glockenbronze
vor dem Guss.*

Allein schon die altertümlich anmutende Herstellungsmethode in Verbindung mit dem archaischen Gussvorgang, der von Hitze, Feuer und Staub geprägt ist, macht die Glocke zu einem ganz außergewöhnlichen Gegenstand. Die Abb. 3 und 4 zeigen Impressionen von einem Glockenguss in der Gießerei in Hacklberg. Abb. 3 soll einen Eindruck vom Geschehen beim Erhitzen und Mischen der Glockenspeise im Schmelzofen vermitteln.



Abb. 4. Einleiten der flüssigen Glockenbronze in die vergrabenen Gussformen.

Abb. 4 gibt wieder, wie die flüssige Glockenbronze in die im Boden eingelassenen Hohlformen fließt. Nachdem eine Auslassöffnung durchstoßen worden ist, gelangt die Bronze über kleine Kanäle aus dem Schmelzofen zu den Formen. Sie füllt den vorher geformten Hohlraum aus und bildet damit den Glockenkörper. Nach dem Erkalten wird die Gussform zerstört. Es verbleibt die metallene Glocke, die nach der Reinigung meist ohne großes Nacharbeiten aufgehängt und zum Klingen gebracht werden kann.

Obwohl seit vielen Jahrhunderten bekannt ist, wie die Form gestaltet und dimensioniert werden muss, um eine Glocke mit vorhersagbaren Eigenschaften zu erhalten, werden seit einiger Zeit moderne numerische Methoden dazu genutzt, die geometrische Form und Größe der Glocke mit ihrem Klangspektrum zu verknüpfen. Die Glocke ist ein linear arbeitendes Idiophon, bei dem jedem Teilton eine mechanische Teilschwingung direkt zugeordnet ist. Für die numerische Bestimmung der Schwingungsformen und vor allem der zugehörigen Frequenzen bietet sich die Methode der Finiten Elemente (FEM) an. Beispiele sind die FE-Berechnungen von Schoofs et al. (1985, 1987), Schad (1987), Haseler (1993), Heesemann (1995) und Lehr (1999/2000). Jüngst wieder aufgegriffen und auf das konkrete Problem der Glocken der Dresdner Frauenkirche angewandt wurde die Methodik von Bauer und Schmidt (2004).

Mit diesem numerischen Verfahren gelingt es nicht nur, zu einer gegebenen Form die Teiltonfrequenzen der Glocke zu bestimmen. Vielmehr ist es umgekehrt auch möglich, aus einem vorgegebenen Spektrum die Glockenform zu berechnen. Der Rechenaufwand, der bei einer solchen Optimierung betrieben werden muss, wächst mit der Anzahl der Zielgrößen - der Teiltöne bzw. Teilschwin-

gungen - überproportional an. Um diesen Aufwand in einem erträglichen Rahmen zu halten, muss die Anzahl der Frequenzvorgaben auf das unbedingt erforderliche Maß reduziert werden. Voraussetzung dafür ist, dass man weiß, welche Teiltöne den Klang der Glocke überhaupt bestimmen.

Hierüber fundierte Aussagen machen zu können, ist eines der Ziele der im Folgenden beschriebenen Hörexperimente. Die Untersuchungen sind an der Technischen Universität München und am Institut für Mechanik der Universität der Bundeswehr durchgeführt worden. Sie sollen zur Beantwortung der Frage beitragen, wie viele und welche Teiltöne charakteristisch für einen Glockenklang sind. Aus der Beantwortung dieser psychoakustischen Fragestellung ergeben sich weitreichende Konsequenzen für mehrere Anwendungen:

- Sie hat Auswirkungen hinsichtlich der Identifikation von Glocken, indem sie Aussagen darüber zulässt, wie viele und welche Teiltöne zu messen und zu speichern sind, um zielgerichtet den „Fingerabdruck“ eines Glocken-Individuums zu sichern.
- Sie gibt sowohl dem Experimentator wie auch dem FE-Berechner Hinweise darauf, wie viele und welche mechanische Schwingungen des Glockenkörpers er auf jeden Fall untersuchen sollte.
- Bezüglich der Optimierung von Glocken am Computer erlaubt sie abzuschätzen, ob auf 25, 15 oder möglicherweise auch nur fünf Teilfrequenzen hin zu optimieren ist.
- Sie liefert Vorgaben für den Aufwand, der für die Auralisierung des Klanges einer (noch) nicht existenten Glocke sinnvollerweise zu treiben ist.

Der psychoakustische Versuch soll den physikalischen Parametern die richtige Wertigkeit zuweisen. Notgedrungene Restriktionen sollen künftig nicht der Willkür überlassen, sondern durch wohlbegründete Beschränkungen auf das Wesentliche ersetzt werden. Angestrebt wird, dass die verfügbare Mess- oder Rechenleistung zielgerichtet auf das konzentriert werden kann, was für die Funktion der Glocke als Klangerzeuger auch tatsächlich von Bedeutung ist.

2. DIE BETRACHTETE GLOCKE

2.1. Allgemeines

Bereits seit vielen Jahren sind Glocken Gegenstand wissenschaftlicher Studien. Einige Meilensteine solcher Untersuchungen sind von Rossing (1984) zusammen getragen und neu veröffentlicht worden. Am Institut für Mechanik steht die Glocke traditionell immer wieder im Mittelpunkt verschiedenartigster Forschungsprojekte, Studien- und Diplomarbeiten. Erste Resultate von Schwingungs- und Schallmessungen, die sich auf Kirchenglocken beziehen, sind bei Fleischer (1989a und b) dokumentiert. Die Glocken eines Glockenspiels wurden von Fleischer (1996a und b) behandelt. Ein Überblick, insbesondere unter Einschluss neuerer Ergebnisse von Computer-Simulationen, findet sich in Fleischer (1997 und 2000).



Abb. 5. Kirchenglocke, auf die sich die Untersuchungen beziehen.

Als Grundlage für die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen diente die in Passau von der Glockengießerei Perner gegossene Bronzeglocke, die in Abb. 5 wiedergegeben ist. Diese Glocke ist vom weit verbreiteten Moll-Oktav-Typ und hat die Masse 37 kg. Ihre nominale Schlagtonhöhe wird mit C₆ angegeben. Die Glocke besitzt keinen Klöppel. Üblicherweise hängt sie an einer eisernen Kette in einem hölzernen Gestell, wie es z.B. in Abb. 6 zu erkennen ist.



Abb. 6. Kirchenglocke, aufgehängt in einem Glockenstuhl bei einer Messung durch Frau Dipl.-Ing. Petra Lutz.

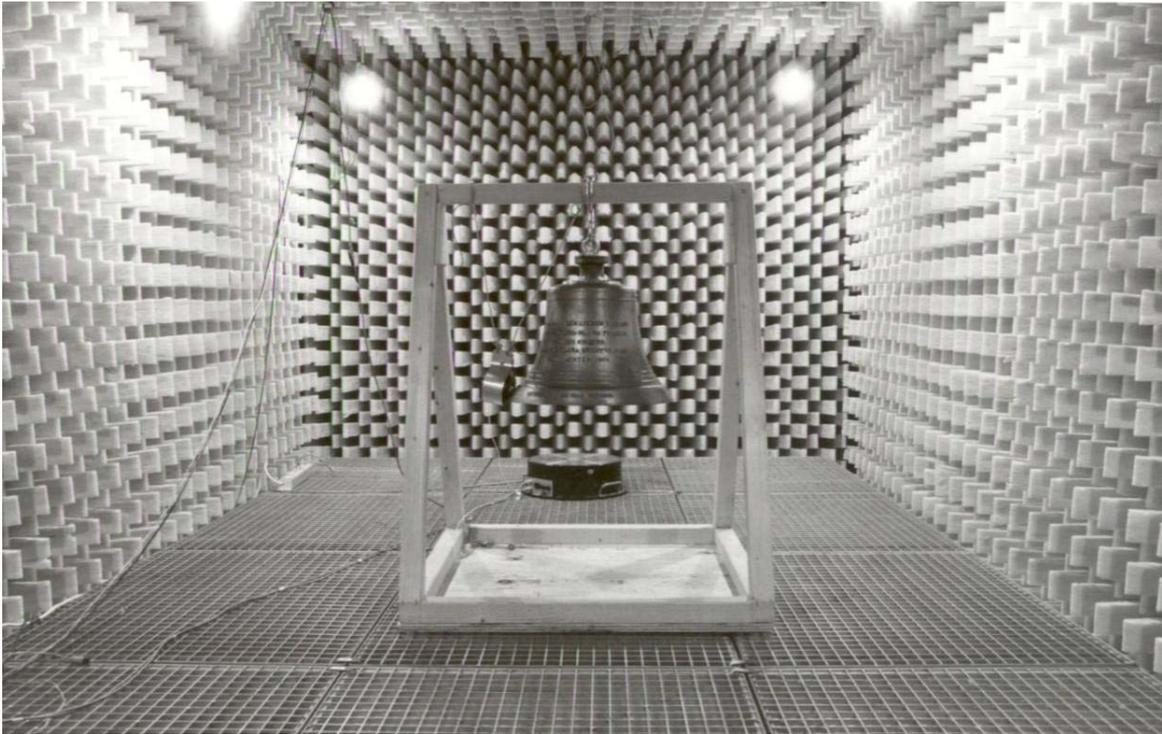


Abb. 7. Die betrachtete Glocke, aufgehängt in einem Glockenstuhl und vorbereitet für eine akustische Messung im reflexionsarmen Raum.

Für viele akustische Messungen, z.B. die Bestimmung der Richtcharakteristik (Fleischer 2000), ist ungestörte Schallausbreitung unabdingbare Voraussetzung. Bestimmte Untersuchungen lassen sich deshalb nur in reflexionsarmer Umgebung durchführen. Abb. 7 zeigt diese Messumgebung.

2.2. Die Teiltöne

Für die psychoakustischen Messungen, die im Folgenden beschrieben sind, wurden besondere Vorkehrungen in Hinsicht auf die Messumgebung nicht für notwendig gehalten. In einem normalen Laborraum (Abb. 8) wurde die Glocke, in ihrem Glockenstuhl hängend, mit einem stählernen 500 g-Hammer von innen am Schlagring angeschlagen. Im rechten Teil von Abb. 8 ist die betrachtete Glocke in dieser Umgebung zu erkennen. Der Anschlag führte zu einem hellen Glockenklang, der mit einem Messmikrofon der Firma Brüel & Kjaer Typ B & K 4165 auf *Digital Audio Tape* aufgenommen wurde.

In den späteren Untersuchungen, so z.B. in Kapitel 4, werden noch detaillierte Angaben zum Schallsignal folgen. Zur vorläufigen Orientierung sollen jedoch an dieser Stelle bereits einige Grundaussagen über die Klangstruktur einer Moll-Oktav-Glocke gemacht werden. Die Analyse des Schallsignals mit einem FFT-Analysator ergibt das „Wasserfalldiagramm“ von Abb. 9. Im Frequenzbereich bis 5 kHz (nach rechts aufgetragen) ist der Schallpegel (nach oben: innerhalb einer Spanne von 40 dB) als Funktion der Zeit (nach vorn: etwas mehr als drei Sekunden) dargestellt. Es sind zahlreiche Teiltöne unterschiedlichen Pegels zu erkennen, die ungleich schnell abklingen. Aus der Sicht der Psychoakustik handelt es sich hierbei um einen „gering harmonischer Klang“ (Terhardt 1998). Es kann erwartet werden, dass die Teiltöne mit großen Pegeln und tiefen Frequenzen eine besondere Rolle spielen. Die ersten fünf „Lauttöner“ sind in Abb. 9 mit römischen Ziffern versehen. Ihre Frequenzen und Pegel können Abb. 10 so entnommen werden, wie sie sich im Schallpegel-Frequenz-Spektrum unmittelbar nach dem Anschlag nachweisen lassen.



Abb. 8. Zwei kleine Kirchenglocken, aufgehängt in einem Glockenstuhl und vorbereitet für eine akustische Messung in einem Laborraum. Die hier betrachtete Glocke hängt rechts.

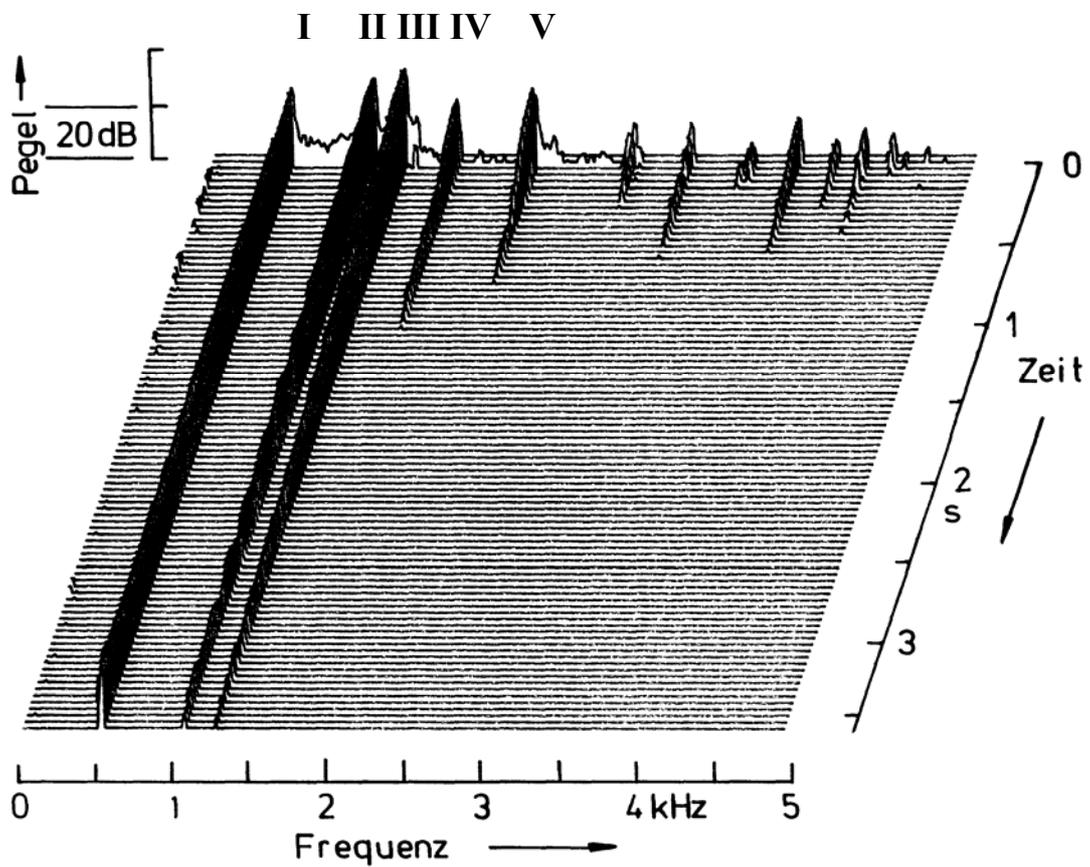


Abb. 9. Schallpegel-Frequenz-Spektrum der betrachteten Glocke bei Anschlag mit einem Hammer in Abhängigkeit von der Zeit.

Abb. 10 zeigt das Teilton-Spektrum zum Zeitpunkt des Anschlags und kurz danach. Man erkennt neben einer Reihe schwächerer Anteile fünf Komponenten mit großem Pegel. Diese sind auch hier durch die römischen Ziffern gekennzeichnet. Im Sprachgebrauch der Campanologen (Schad 1996) gehören diese Teiltöne dem so genannten „Prinzipalbereich“ an.

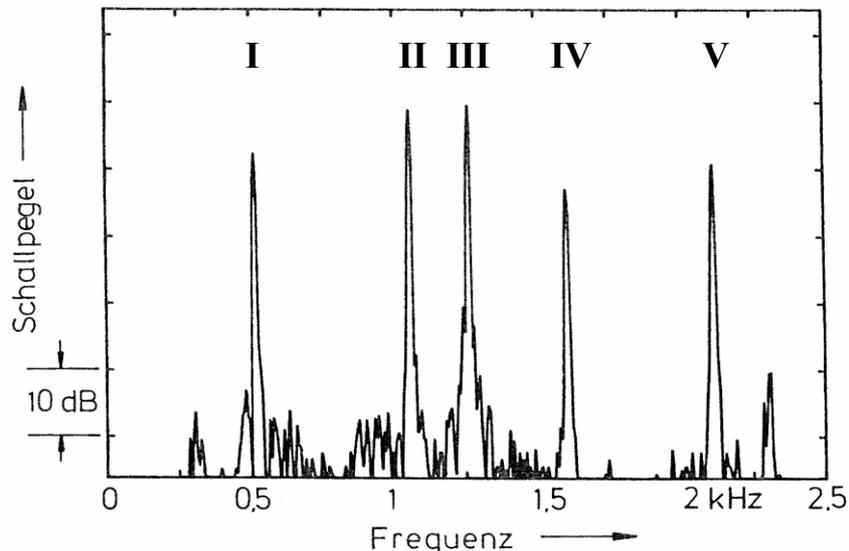


Abb. 10. Schallpegel-Frequenz-Spektrum der betrachteten Glocke unmittelbar nach dem Anschlagen.

Die Teiltöne weisen bei der klassischen Moll-Oktav-Glocke trotz Variationen im Detail eine weitgehend gleichbleibende Struktur auf. Diese kann Tab. I entnommen werden. Dort sind die mit einer Auflösung von 10 Hz gemessenen Frequenzen der entsprechenden Teiltöne angegeben; detaillierte Angaben finden sich in Tab. II von Abschnitt 4.2. Daneben sind die zugehörigen Intervalle vermerkt. Im Gegensatz zu den Gepflogenheiten, wie sie bei anderen musikalischen Klängen gebräuchlich sind, ist als Bezug hier die Frequenz $f_{II} = 1,05$ kHz des zweiten Teiltones gewählt. Damit soll dessen Bezeichnung „Prime“ hervorgehoben werden. Unter Campanologen wird häufig auch die halbe Frequenz der Oberoktave gewählt, bei der üblicherweise die Schlagtonhöhe lokalisiert sein soll. Davon wird hier Abstand genommen, da diese Frequenz im Spektrum nicht direkt vertreten ist.

Tab. I: Teiltöne der betrachteten Glocke im Prinzipalbereich

Teilton Nr.	Frequenz	Verhältnis f/f_{II}	Bezeichnung
I	0,51 kHz	0,49	Suboktave
II	1,05 kHz	1,00	Prime
III	1,26 kHz	1,20	(Moll-)Terze
IV	1,61 kHz	1,52	Quinte
V	2,11 kHz	2,00	Oberoktave

Die rechte Spalte von Tab. I enthält die Bezeichnungen, wie sie in der Campanologie verwendet werden (Schad 1996). Der Vergleich mit den zugehörigen Frequenzverhältnissen macht klar, woher

diese Bezeichnungen rühren; sie leiten sich aus den entsprechenden musikalischen Intervallen ab. Zur besseren Unterscheidung ist es zweckmäßig, die Intervalle ohne Endungs-e, also als Suboktav, Prim, Terz usw. zu schreiben. Der Buchstabe e am Ende signalisiert, dass es sich um die zugehörigen Teiltöne handelt. So steht die Frequenz $f_{IV} = 1,61$ kHz der Quinte näherungsweise im Quint-Intervall 3:2 zur Frequenz $f_{II} = 1,05$ kHz der Prime. Drei der fünf Teiltöne stehen im Abstand von Oktaven. Charakteristisch ist, dass die Terze mit der Prime das Intervall einer kleinen oder Moll-Terz (Frequenzverhältnis 6:5) bildet. Dies ist bei Kirchenglocken häufig der Fall und gibt diesem Typ den Namen „Kleine-Terz-Glocke“ oder auch „Moll-Oktav-Glocke“.

2.3. Zusammenfassende Bemerkung

Eine kleine Kirchenglocke, die sich bereits seit Jahrzehnten im Institut für Mechanik befindet, wurde durch Anschlagen mit einem Hammer zum Tönen gebracht. Es entsteht ein gering harmonischer Klang mit zahlreichen Komponenten unterschiedlichen Pegels, die unterschiedlich schnell abklingen. Das Teiltönspektrum entspricht dem einer klassischen Moll-Oktav-Glocke.

Im Folgenden werden einige Studien beschrieben, mit denen psychoakustische Fragestellungen am Beispiel des Schallsignals dieser Glocke behandelt worden sind. Mehrere Vorgehensweisen wurden angewandt. Es sind dies

- Untersuchungen mit dem Originalklang,
- Untersuchungen mit resynthetisierten Klängen und
- Untersuchungen mittels spektraler Reduktion.

Zunächst soll geklärt werden, welche Tonhöhenempfindung der Glockenklang hervorruft. Anschließend soll dann die Frage beantwortet werden, welche der zahlreichen gemessenen Teiltöne den Glockenklang tatsächlich formen und welche zwar physikalisch nachweisbar, für das Hören aber irrelevant sind.

3. DIE TONHÖHE DES GLOCKENKLANGES

Mit dem Originalklang der Glocke wurden Hörversuche durchgeführt, deren Gegenstand die Musikalische Tonhöhe war. Eine solche Untersuchung ist deshalb notwendig, weil aus dem Teiltonspektrum auf diese Hörempfindung nur sehr indirekt geschlossen werden kann. Das Spektrum eines Glockenklanges ist so komplex, dass die Tonhöhe mit den physikalisch nachweisbaren Teiltönen in einer Weise zusammen hängt, die nicht auf den ersten Blick zu durchschauen ist.

3.1. Aufgabenstellung und Vorarbeiten

Das Schallsignal der Glocke, nach Terhardt (1998) ein „gering harmonischer Klang“, ruft die Empfindung einer oder auch mehrerer Tonhöhen hervor. In Vorversuchen wurden verschiedene Möglichkeiten erprobt, wie Versuchspersonen ihre Wahrnehmung der Tonhöhe ausdrücken konnten. Es waren dies

- 1) das Nachspielen der empfundenen Tonhöhe auf einer Querflöte: eine Person, drei Urteile;
- 2) das Summen eines als gleich hoch empfundenen Tones: drei Personen, fünf Urteile;
- 3) das Nachsingen eines als gleich hoch empfundenen Tones im Falsett: eine Person, ein Urteil und
- 4) das Pfeifen eines als gleich hoch empfundenen Tones: fünf Personen, zehn Urteile.

Nachdem die Glocke angeschlagen worden war, prägte die Versuchsperson sich die Tonhöhe des Glockenklanges ein und beschrieb sie anschließend mit Hilfe des Vergleichsschalles. Dessen Grundfrequenz wurde mit einem FFT-Analysator bei einer Auflösung von 10 Hz gemessen und notiert. Die Grundfrequenz des Vergleichsschalles dient als Maß für die Tonhöhenempfindung.

Zu 1) Das Nachspielen wurde von einer Versuchsperson praktiziert, die Querflöte spielen konnte und die Tonhöhe des Glockenklanges durch Flötenklänge der Grundfrequenzen 520 Hz, 520 Hz und 1060 Hz charakterisierte.

Zu 2) Die Methode des Nachsummens wurde von zwei männlichen Personen und einer jungen Frau praktiziert. Die Männer summten dreimal mit der Grundfrequenz 260 Hz, die Frau einmal mit 260 Hz und einmal mit 510 Hz.

Zu 3) Ein Mann war in der Lage, mit Kopfstimme einen Vergleichsschall der Grundfrequenz 520 Hz nachzusingen, den er als gleich hoch wie den Glockenklang beurteilte.

Zu 4) Das Nachpfeifen ergab stets höhere Grundfrequenzen. Fünf Urteile lauteten auf 1060 Hz \pm 10 Hz, zwei Urteile auf 2140 Hz und drei Urteile auf Grundfrequenzen zwischen 1190 Hz und 1280 Hz.

Letztlich lagen 19 Urteile vor. Nur drei Vergleichsfrequenzen wurden in der Nähe der Terze (Kennziffer III bei 1260 Hz gemäß Tab. I) eingestellt. Vier Vergleichsfrequenzen waren um 520 Hz, sechs um 1060 Hz und zwei um 2140 Hz lokalisiert. Damit liegen sie nahe der Suboktave (Kennziffer I bei 510 Hz gemäß Tab. I), der Prime (Kennziffer II bei 1050 Hz gemäß Tab. I) bzw. der Oberoktave (Kennziffer V bei 2110 Hz gemäß Tab. I). Möglicherweise wollten die Personen die Spektraltonhöhen dieser Teiltöne kennzeichnen.

Viermal wurde jedoch auch 260 Hz eingestellt. Diese Frequenz ist nicht im Glockenspektrum enthalten. Zusammen mit den Vergleichsfrequenzen 520 Hz, 1060 Hz und 2140 Hz steht sie näherungsweise in den Oktavverhältnissen 1 : 2 : 4 : 8. Eventuell wollten die Versuchspersonen eine Tonhöhe beschreiben, die mit derjenigen der Vergleichsfrequenz in Oktavverwandtschaft steht, d.h.

der doppelten, vierfachen usw. Frequenz zugeordnet ist. Dieses Phänomen tritt bei Tonhöhenvergleichen häufig auf. Somit muss offenbleiben, ob die Versuchspersonen mit dem Vergleichsklang die Tonhöhe eines gleichfrequenten Teiltones im Glockenklang, eines oktavverwandten Teiltones im Glockenklang oder möglicherweise eine Virtuelle Tonhöhe (Terhardt 1998) kennzeichnen wollten. Fest steht nur, dass sie in aller Regel die musikalische Note C in den verschiedensten Oktavlagen angaben.

Die Vorversuche haben auch gezeigt, dass die Lage der Vergleichsfrequenzen naturgemäß vom Vergleichsschall abhängt. Es erscheint denkbar, dass für den Tonhöhenvergleich nicht die Grundfrequenz, sondern eine höhere Harmonische des Vergleichsklanges herangezogen wurde. Um dies auszuschließen, wurde in den weiteren Hörexperimenten mit reinen Tönen verglichen. Tonhöhenvergleich mit Sinustönen war dann das Thema einiger Arbeiten, die am Institut für Mechanik angefertigt worden sind. In diesen Studien ist auch die Musikalische Tonhöhe von Glockenklingen untersucht worden. Bereits vor mehr als einem Jahrzehnt hat Schaible (1995) mit dieser Methode die Tonhöhen der Glocken eines ganzen Glockenspiels einstellen lassen. Entsprechende Resultate finden sich in einem umfassenden Bericht (Fleischer 1996a) sowie in einer Kurzfassung (Fleischer 1996b). Zwei Jahre vorher hat Schlagowski (1993) Versuchspersonen die Aufgabe gestellt, die Tonhöhen von Klängen anzugeben, die von Schlaginstrumenten stammen. Es waren dies die Klänge von Pauken, aber auch der Klang der am Institut befindlichen Perner-Glocke. Auf dieses psychoakustische Experiment soll im Folgenden näher eingegangen werden

3.2. Vorgehen zur psychoakustischen Ermittlung der Tonhöhe

In der Studie von Schlagowski (1993) wurden an perkussiven Klängen Tonhöhenbestimmungen im Vergleich mit Sinustönen durchgeführt. Der verwendete Glockenklang kam - wie auch bei den übrigen Untersuchungen an der Perner-Glocke - dadurch zustande, dass die Glocke von innen mit dem stählernen Hammer angeschlagen wurde. In einem Laborraum wurde in 4 m Abstand dieser Klang mit einem B & K-Kondensatormikrofon aufgenommen und auf *Digital Audio Tape* gespeichert.

Keine der teilnehmenden Personen war musikalisch weiter vorgebildet als höchstens für den Hausgebrauch eines Instruments, geschweige denn dass eine über das absolute Gehör verfügt hätte. Der konservierte Klang wurde den Versuchspersonen im reflexionsarmen und schallgedämmten Raum des Instituts diotisch über Kopfhörer Sennheiser HD 424 mit etwa 80 dB (bezogen auf das freie Feld) dargeboten. Die Versuchsperson hörte sich den zehn Sekunden langen Glockenklang an. Nachdem sie sich dessen Tonhöhe eingepägt hatte, hatte sie nun die Aufgabe, diese Tonhöhe auszudrücken. Dies erledigte sie dadurch, dass sie einen ähnlich lauten Vergleichston auf gleiche Tonhöhe einstellte. Sie schaltete vom Glockenklang auf den stationären Sinuston um. Dessen Frequenz konnte sie mit einem Drehknopf, an dem die Skale überklebt war, so lange verändern, bis sie meinte, dass der Sinuston dieselbe Tonhöhe wie der Glockenklang hatte. Dieser Vorgang konnte im Wechsel beliebig oft wiederholt werden. Wenn die Versuchsperson der Überzeugung war, die Tonhöhe getroffen zu haben, gab sie dem Versuchsleiter ein Zeichen. Dieser maß die eingestellte Frequenz mit einem Frequenzzähler und notierte sie. Die Frequenz des Sinustones, der auf diese Weise gefunden wurde, dient als Maß für die Tonhöhe des Glockenklanges.

Im Grundsatz ähnelt dieses Verfahren demjenigen, das im vorherigen Abschnitt als Methode 1 bezeichnet worden ist und das in Abb. 11 zu erkennen ist: Der Mönch läutet die Glocke. Deren Tonhöhe kennzeichnet er durch einen als gleich hoch empfundenen Ton, den er auf einer Panflöte spielt. In der aktuellen Version ist die Panflöte durch einen Sinusgenerator, der im gesamten Hörbereich durchgestimmt werden kann, samt elektroakustischer Übertragungskette ersetzt.



Abb. 11. Prüfung der Tonhöhen von Glocken durch Vergleich mit den Tönen einer Panflöte. Entnommen aus Kramer (1986) nach einem Fresko von 1400.

3.3. Auswertung der Tonhöhenvergleiche

Die Originalergebnisse von Schlagowski (1993) sind einer erneuten Analyse unterzogen worden. Basis sind die Angaben von acht männlichen Versuchspersonen im Alter von 21 bis 48 Jahren, die in vier Durchgängen die Tonhöhe des Glockenklanges zu beurteilen hatten. Demnach liegen $8 \times 4 = 32$ Tonhöhenvergleiche vor, die auf das Einstellen des als gleich hoch empfundenen Sinustones zurückgehen.

Wie die Bezeichnung „gering harmonisch“ ausdrückt, beinhaltet der Klang der Glocke viele Teiltöne, die nicht alle in streng harmonischen Beziehungen zueinander stehen. Demzufolge ist bei Glockenklängen die „Ausgeprägtheit der Tonhöhe“ (engl.: *pitch strength*, Fruhmann 2006, Fastl und Zwicker 2007) nicht sehr hoch. Glockensachverständige sind auf Grund ihrer musikalischen Vorbildung und infolge jahrelanger Erfahrung auf die Beurteilung von Glocken geprägt. Sie sind in der Lage, die ganzheitliche Tonhöhe einer Glocke rasch zu identifizieren und sicher zu quantifizieren. Keine der Versuchspersonen, die an den hier beschriebenen Hörversuchen teilnahmen, brachte diese Voraussetzungen mit. Übereinstimmend beschrieben sie alle die Beurteilung der Tonhöhe als schwierig. Allein wegen deren schwacher Ausgeprägtheit darf es nicht verwundern, wenn die Antworten der Versuchspersonen nicht einheitlich ausfallen.

Erwartungsgemäß zeigte sich dann auch bei diesem Hörexperiment, dass die Versuchspersonen nicht in der Lage sind, ihre Aussagen mit mathematischer Präzision zu reproduzieren. Zudem streuen auch die Angaben der Teilnehmer. Es ist daher angebracht, bei der Auswertung der natürlichen Unschärfe Rechnung zu tragen und die eingestellten Frequenzen zu Klassen zusammen zu fassen.

Wie an anderer Stelle im fünften Kapitel, insbesondere Abschnitt 5.2.1, noch einmal ausführlich besprochen wird, ist das „gehörrichtige“ Äquivalent zur Frequenz in Hertz die Tonheit in Bark. Letztere spiegelt die Breite der Frequenzgruppen (*critical bands*) wider; siehe hierzu Zwicker und

Feldtkeller (1967) oder Fastl und Zwicker (2007). Die Frequenzgruppen kennzeichnen das spektrale Auflösungsvermögen des Gehörs. Ihre Breite ist in Abb. 12 skizziert. Bei tiefen Frequenzlagen sind die Frequenzgruppen 100 Hz breit. Ab etwa 500 Hz werden die Frequenzgruppen absolut immer breiter, behalten aber eine relative Bandbreite von etwa 20% der Mittenfrequenz bei. Der exakte Verlauf (durchgezogene Kurve) lässt sich gut durch die gestrichelt eingezeichneten Geraden annähern.

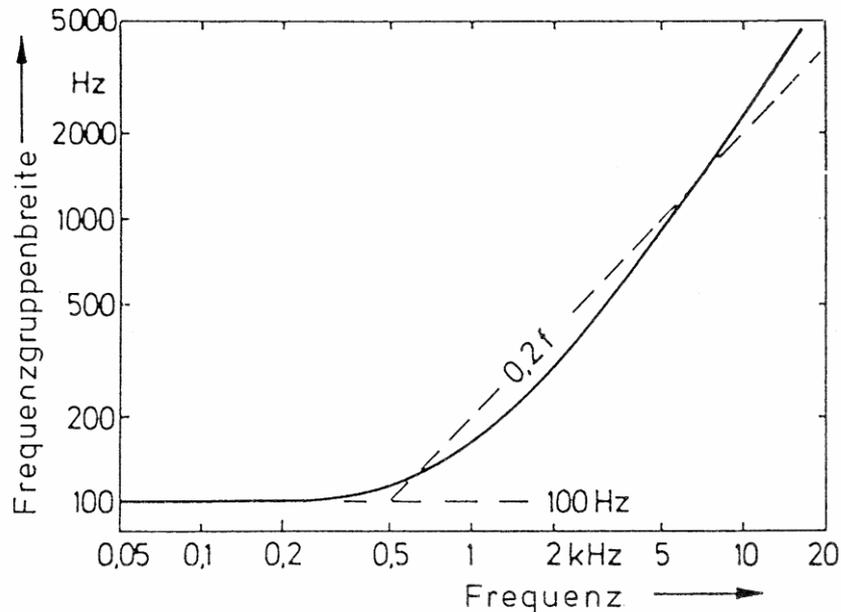


Abb. 12. Breite der Frequenzgruppen als Funktion der Frequenz; durchgezogen: exakt; gestrichelt: Näherung.

Die Breite der Frequenzgruppen wurde bei der Auswertung der psychoakustischen Daten berücksichtigt. In Abb. 13 sind die Ergebnisse der Hörversuche dargestellt. Die Häufigkeit der Nennungen ist über der Frequenz des Vergleichstones aufgetragen, den die Versuchspersonen als gleich hoch einstufen. Zwei Skalen wurden auf der Abszisse verwendet. Die obere bezieht sich auf die Tonheit z in Bark. Die untere Skala zeigt die zugehörige Frequenz f in Hz. Die eingestellten Frequenzwerte wurden innerhalb von Bändern der Breite einer viertel Frequenzgruppe ($\Delta z = 0,25$ Bark) zusammengefasst. Bei Frequenzen oberhalb von etwa 500 Hz sind die Intervalle 5% der Mittenfrequenz breit. Als Vergleich kann dienen, dass ein Halbtonschritt etwa 6% entspricht.

In Abb. 13 ist nach oben die relative Häufigkeit der Urteile der acht Versuchspersonen in vier Durchgängen angetragen. Lägen alle 32 angegebenen Vergleichsfrequenzen innerhalb eines Auswertintervalls, wäre die relative Häufigkeit 1,0. Obwohl eine solche Eindeutigkeit der Aussagen hier keinesfalls zu erwarten ist, prägen sich in der Häufigkeitsverteilung doch zwei deutliche Maxima aus. Ein erstes Maximum mit etwa 0,2 ist um 250 Hz zu beobachten. Der Zentralwert (Median) liegt bei 257 Hz, die Interquartilen bei 252 Hz bzw. 260 Hz. Um etwa 500 Hz gruppiert sich die größte Anzahl von 11 Antworten, was einer relativen Häufigkeit von etwa 0,35 entspricht. Innerhalb des Bereiches von 498 Hz bis 596 Hz liegen insgesamt 17 und damit mehr als die Hälfte der 32 eingestellten Vergleichsfrequenzen. Der Median ist 527 Hz mit den Interquartilen bei 508 Hz und 547 Hz.

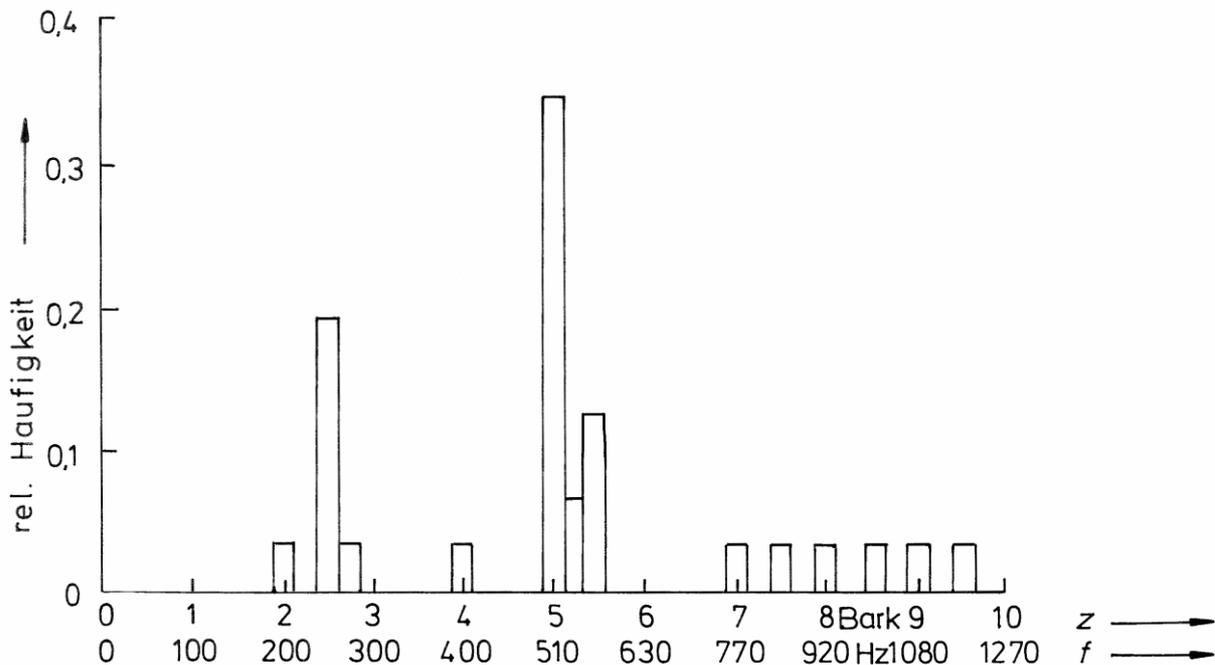


Abb. 13. Relative Häufigkeit, mit der acht Versuchspersonen die Tonhöhe des Glockenklanges mit der eines Sinustones der Frequenz f bzw. der Tonheit z vergleichen.

Hiermit sind zu vergleichen die Frequenzen von Teiltönen, die im Spektrum tatsächlich vorhanden und wie sie beispielsweise in Tab. I aufgelistet sind. Ein Teilton bei 257 Hz findet sich im Glockenspektrum nicht. Die Frequenz 527 Hz liegt nahe derjenigen der Suboktave (510 Hz gemäß Tab. I). Die Frequenz 1080 Hz ist nicht weit von derjenigen der Prime (1050 Hz gemäß Tab. I) entfernt. Es ist denkbar, dass die Probanden diese Teiltöne als tonhöhenbestimmend beurteilten. Eine direkte Zuordnung von Vergleichstonhöhen zu den Tonhöhen physikalisch vorhandener Teiltöne ist somit zum Teil, jedoch nicht in jedem Fall möglich.

Die Ergebnisse lassen sich auch folgendermaßen interpretieren: Wie sich bereits in den Vorversuchen von Abschnitt 3.1. angedeutet hatte, tritt bei Tonhöhenvergleichen sehr häufig Oktavverwechslung auf. Die Vermutung liegt nahe, dass die Versuchspersonen nicht primär auf die Suboktave mit 510 Hz einstellten, sondern die Oktav unterhalb der Prime ($1050/2 \text{ Hz} = 525 \text{ Hz}$) wählten und damit die Tonhöhe der Prime als dominierend kennzeichnen wollten. Eventuell wollten sie auch eine Virtuelle Tonhöhe charakterisieren, die in der Nähe der Prime angesiedelt ist. In noch höherem Maße gilt dies für die Aussagen, die sich eine Oktav unterhalb dieses Bereiches häufen. Bei etwa 250 Hz lässt sich überhaupt keine physikalische Tonkomponente nachweisen. Jedoch stellen zwei Versuchspersonen konsistent Vergleichsfrequenzen um 257 Hz ein. Es könnte vermutet werden, dass sie die Oktav unter der Unteroktav der Prime, also ($1050/4 \text{ Hz} = 262 \text{ Hz}$) wählten und damit ebenfalls die Tonhöhe der Prime charakterisieren wollten. In der Nähe der Prime selbst liegt allerdings nur eine der eingestellten Vergleichsfrequenzen.

3.4. Berechnung der Tonhöhe

Die Diskussion dieser Ergebnisse kann durch eine unterstützende Tonhöhenanalyse erleichtert werden. Daniel (1984) hat ein Basic-Programm geschrieben, mit dem sich die Tonhöhe von Schallsignalen gemäß den Ideen von Terhardt (Terhardt 1972a, 1972b und 1979) berechnen lässt. Als Ein-

gangsdaten dienen Spektren, die mit einem FFT-Analysator hp 3582A ermittelt und über hp-IB in einen Basic-Rechner übertragen werden. Wie in Abb. 14 für den Klang der Perner-Glocke zu ersehen ist, werden daraus Schätzwerte für die „Spektraltonhöhen“ errechnet, auf deren Grundlage „Virtuelle Tönhöhen“ ermittelt werden. In keinem Fall sind die Ergebnisse eindeutig; stets werden mehrere Möglichkeiten angeboten. Um abwägen zu können, welche Bedeutung ihnen zukommt, sind jeweils Gewichte berechnet und angegeben.

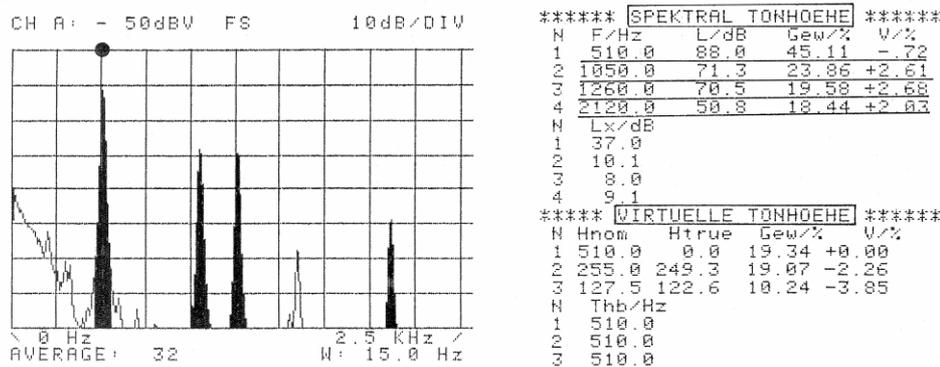


Abb. 14. Berechnung der Tönhöhen für das links angefügte Schallpegel-Frequenz-Spektrum nach Terhardt mit einem Programm von Daniel (1984). Rechts sind Spektraltonhöhen und Virtuelle Tönhöhen samt den zugehörigen Gewichten angegeben.

Die rechnerische Analyse ergibt, dass im Bereich bis 2,5 kHz vier Teiltönen Spektraltonhöhen zugeordnet werden. Im links abgebildeten Diagramm sind die entsprechenden Schallkomponenten schwarz hervorgehoben. Der vierte Teilton – die Quinte – wird offenbar weitgehend verdeckt und spielt für die Tönhöhe keine Rolle. Das größte Gewicht kommt mit 45% der Spektraltonhöhe der Suboktave zu, die links durch einen Punkt gekennzeichnet ist. Mit abnehmenden Gewichten folgen die Spektraltonhöhen der Prime (24%), der Terze (20%) und der Oberoktave (18%). Daraus errechnen sich Virtuelle Tönhöhen bei der Suboktave (19%) sowie bei deren halber Frequenz (19%) und viertel Frequenz (10%).

Somit legt diese Berechnung die Vermutung nahe, dass bei der Perner-Glocke die Prime wichtig ist. Daneben kommt der Suboktave eine große Bedeutung zu. Letztere hat nicht nur die Spektraltonhöhe mit dem größten Gewicht, sondern bei ihr bildet sich auch die Virtuelle Tönhöhe mit dem größten Gewicht aus. Ungeachtet der Unsicherheiten hinsichtlich der Frequenzlage lässt sich jedoch aussagen, dass die Tonkategorie des Glockenklanges der musikalischen Note C entspricht. Ob es sich dabei mehr um ein c''' bzw. C_6 oder eher um ein c'' bzw. C_5 handelt, bleibt allerdings nach wie vor offen.

3.5. Zusammenfassende Bemerkung

In einer orientierenden Studie wurde der Klang der Perner-Glocke in Hinsicht auf seine Tönhöhe untersucht. Ziel war es dabei, ohne Beachtung von Feinheiten zumindest einen groben Eindruck davon zu erhalten, wo der Klang auf einer Tonleiter einzuordnen ist. Im ausführlich beschriebenen Experiment merkten sich acht Versuchspersonen die Tönhöhe, die sie dem Glockenklang zuordneten, und kennzeichneten sie durch die Frequenz eines als gleich hoch empfundenen Sinustones. Die Urteile konzentrieren sich auf den Frequenzbereich der Suboktave. Eine unterstützende Berechnung nach den Vorgaben von Terhardt (zusammengefasst in Terhardt 1998) deutet auf die Suboktave als

wichtigen Teilton hin. Die Suboktave prägt nicht nur die Spektraltonhöhe mit dem höchsten Gewicht aus, sondern in ihrem Frequenzgebiet ist auch die Virtuelle Tonhöhe mit dem höchsten Gewicht lokalisiert. Denkbar wäre jedoch auch, dass die Versuchspersonen eigentlich die Tonhöhe der Prime oder eine Tonhöhe nahe der Prime kennzeichnen wollten. Oktavverwechslungen kommen äußerst häufig vor. Da die Frequenzen der beiden ersten Teiltöne mit 0,49:1 nahezu im Oktavverhältnis stehen, lassen die Untersuchungen keine endgültige Aussage über die absolute Lage der spontan empfundenen Tonhöhe zu. Weitergehende Aussagen mit Prognosen für andere Kirchenglocken verbieten sich auch schon deshalb, weil die betrachtete Glocke relativ klein ist und ihr Spektrum deshalb relativ hoch liegt.

Festhalten lässt sich jedoch, dass die Versuchspersonen bevorzugt Vergleichsfrequenzen einstellen, die nahe der Frequenz der Suboktave bzw. bei der halben Frequenz der Prime liegen. Zwei von ihnen stellen auch Vergleichsfrequenzen bei einem Viertel der Primfrequenz ein. Ungeachtet dieser Mehrdeutigkeiten sind sich die Versuchspersonen einig, dass die Tonkategorie der spontan empfundenen Tonhöhe der musikalischen Note C entspricht. Diese Tonhöhe dürfte im betrachteten Fall mit der ganzheitlichen Tonhöhe übereinstimmen. Uneinig sind sie sich jedoch hinsichtlich der Tonlage. Somit deuten einige Indizien auf eine besondere Rolle der Suboktave im Klang dieser hoch gestimmten Glocke hin. Andere legen den Schluss nahe, dass der Prime – wie es ihre glockenkundliche Bezeichnung nicht anders erwarten lässt - eine hervorgehobene Bedeutung zukommt. Ob einzelne Spektraltonhöhen dominieren und/oder möglicherweise eine oder mehrere ganzheitliche Virtuelle Tonhöhen eine Rolle spielen, lässt sich anhand der vorliegenden Daten allerdings nicht abschließend beurteilen.

Der Begriff „Schlagton“ (siehe z.B. Schad 1996) wurde bei diesen Betrachtungen bewusst vermieden, da er nicht immer mit derselben Bedeutung belegt ist. In manchen Fällen kennzeichnet er die spontan empfundene Tonhöhe eines Glockenklanges, wie sie hier untersucht worden ist. Oftmals ist damit aber auch dasjenige Empfindungsattribut gemeint, welches in der Psychoakustik als „Virtuelle Tonhöhe“ (Terhardt 1998) bezeichnet wird und der Rayleigh'schen Regel zufolge „... regelmäßig eine Oktav tiefer als die Oberoktave gehört ...“ (Schad 1996) werden soll. Bei tief abgestimmten Kirchenglocken ist die spontan empfundene Tonhöhe in aller Regel eine Virtuelle Tonhöhe, so dass sich dann die beiden Bedeutungen des Schlagtones decken. Bei hoch abgestimmten Glocken, wie sie hier und insbesondere von Schaible (1995) und Fleischer (1996a) untersucht worden waren, spielt dem Augenschein nach die Virtuelle Tonhöhe eine untergeordnete Rolle. In aller Regel lassen sich die spontan empfundenen Tonhöhen als Spektraltonhöhen deuten. Die hier vorliegenden Daten reichen nicht aus, den einen vom anderen Effekt sicher zu unterscheiden.

Die Tonhöhe ist ein ganz fundamentales Empfindungsattribut. Bei der Glocke prägt sie sich nicht im selben Maße aus wie beispielsweise bei einer Flöte. Die Hörversuche haben aufs Neue belegt, dass das Gehör trotzdem in der Lage ist, aus dem physikalisch so vielschichtigen Klang der Glocke eine ganzheitliche Tonhöhe zu bilden. Dafür braucht es lediglich Bruchteile von Sekunden. Es überrascht jedes Mal wieder, in welcher erstaunlich kurzer Zeit diese enorme Leistung vollbracht wird.

4. HÖRVERSUCHE MIT RESYNTHETISIERTEN KLÄNGEN

4.1. Aufgabenstellung

Die Kirchenglocke ist ein Idiophon oder Selbstklinger. Mit den Schwingungen ihres Körpers erzeugt sie den Klang und strahlt in auch ab. Sämtlichen Teiltönen sind mechanische Teilschwingungen direkt zugeordnet. Mit modernen Methoden ist es möglich, eine sehr große Zahl von Schwingungsformen und -frequenzen einer Glocke zu ermitteln. So haben Perrin, Charnley und DePont (1980) ein Experiment beschrieben, in dem 134 Schwingungsformen einer 214-kg-Glocke gemessen worden sind. Rechnerisch, z.B. mittels der Methode der Finiten Elemente, lassen sich noch wesentlich mehr Moden bestimmen.

Vor allem im Zusammenhang mit 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, hat Sattler (2006) psychoakustische Versuche durchgeführt. Diese Studienarbeit entstand in Kooperation mit dem Mitherausgeber dieser Reihe, Professor Hugo Fastl von der TU München, dem hiermit herzlich gedankt sei. In seinen Hörexperimenten, die er am Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation durchführte, hat Sattler untersucht, welche Spektralkomponenten des Schallreizes einer Kirchenglocke „klangbildend“ und welche zwar physikalisch nachweisbar, für das Hören jedoch irrelevant sind. Dazu wurde ein synthetischer Klang erzeugt, der den Originalklang einer Glocke nachbildet und der durch Weglassen von Teiltönen beliebig manipuliert werden kann.

4.2. Detaillierte FFT-Analyse des Glockenklanges

Abb. 15. Glocke samt Glockenstuhl. Unten liegt der Hammer, mit dem angeschlagen wurde.



Um den synthetischen Klang dem Originalklang möglichst ähnlich machen zu können, müssen die einzelnen Teiltöne des Glockenklanges samt ihrem zeitlichen Verlauf bekannt sein. Der Originalklang wurde in einem Laborraum an der Universität der Bundeswehr erzeugt. Wie Abb.15 zeigt, hing die Glocke in einem hölzernen Glockenstuhl. Mit dem stählernen Hammer, der im unteren Teil zu sehen ist, wurde die Glocke von innen am Schlagring angeschlagen. Dabei entstand ein „metallischer“ Glockenklang, der wahrscheinlich etwas mehr und etwas stärkere Komponenten bei hohen Frequenzen enthält, als dies beim Anschlag mit einem angepassten Klöppel der Fall wäre. Das Schallsignal wurde im Abstand 4 m mit einem B & K-Kondensatormikrofon auf *Digital Audio Tape* aufgenommen. Zur Kalibrierung wurde zusätzlich ein 94-dB-Pegelton aufgespielt.

Der Klang wurde mit einem Analysator Ono Sokki CF-5210 mittels *Fast Fourier Transformation* (FFT) in seine Teiltöne zerlegt. Deren zeitlicher Verlauf wurde ebenfalls untersucht. Abb. 16 zeigt als Ergebnis ein Wasserfalldiagramm ähnlich demjenigen von Abb. 9. Nach oben ist der Schallpegel, nach rechts die Frequenz und nach vorn die Zeit aufgetragen. Man erkennt eine Reihe von Teiltönen, die praktisch gleichzeitig einsetzen und dann unterschiedlich schnell abklingen. Bei mehreren Teiltönen ist eine periodische Modulation des Pegels zu erkennen.

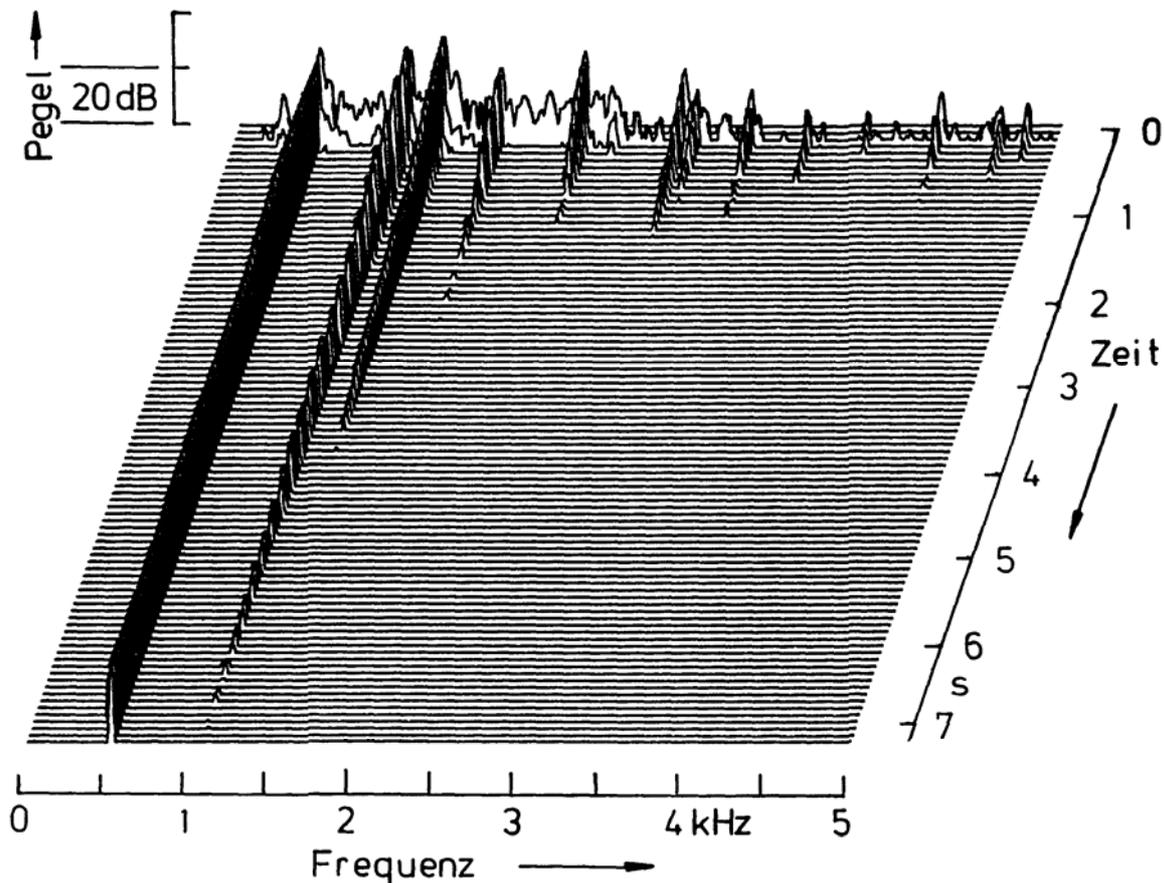


Abb. 16. Die ersten sieben Sekunden des Glockenklanges bei Anschlag mit einem Hammer.

Solche Schwebungen, wie sie beispielsweise beim zweiten Teilton auftreten, haben ihre Ursache im Moden-Splitting (Fleischer 1994, Fleischer und Rotter 1994). Eine Feinanalyse unter Verwendung der Zoom-Funktion macht jeweils zwei Partialtöne sichtbar, deren Frequenzabstand die Frequenz der Schwebung bestimmt. In Abb. 17 hat der Analysator die Prime durch Zoomen dergestalt aufgelöst, dass nicht ein Teilton mit zeitlich oszillierender Amplitude dargestellt wird, sondern ein Paar von eng benachbarten Partialtönen in Erscheinung tritt, deren Frequenzabstand 3,25 Hz beträgt. Ein solches Paar wird im Folgenden stets als ein Teilton aufgefasst.

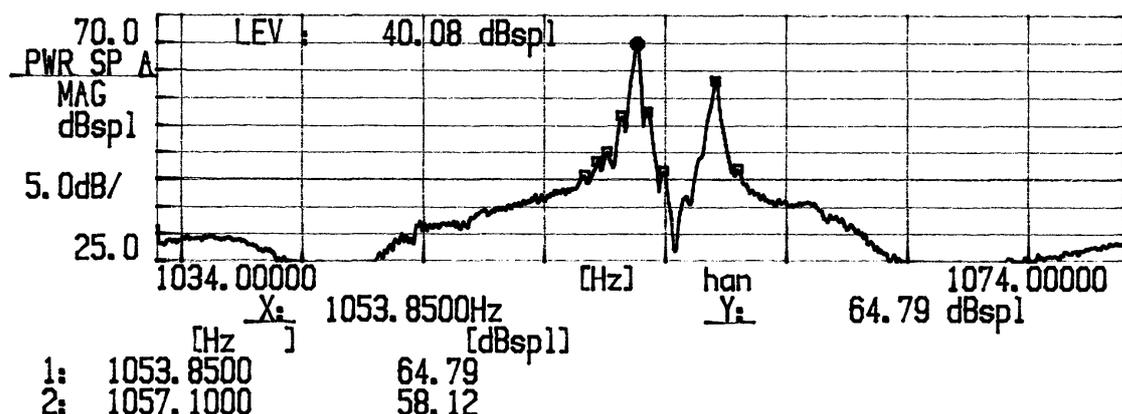


Abb. 17. Zoom-Analyse des Glockenklanges im Frequenzbereich der Prime (Original-Diagramm).

Bei der detaillierten Analyse wurden im Frequenzbereich bis 14 kHz dreißig Teiltöne gefunden, die als physikalisch „nachweisbar“ bezeichnet werden. Für jeden Teilton wurde mit erhöhter Auflösung zunächst die exakte Frequenz f und der zugehörige Anfangspegel L bestimmt. Als nächstes wurde mittels der Funktion „Time Trace“ des Analysators verfolgt, wie rasch der betreffende Teilton abklingt. Wie das Beispiel der Suboktave in Abb. 18 erkennen lässt, fällt der Pegel im Mittel proportional zur Zeit ab. Von Hand wurde linear interpoliert sowie extrapoliert und diejenige Zeit T_{60} entnommen, in welcher der Pegel um 60 dB abgefallen ist. Bei Teiltönen mit Moden-Splitting würde sich dem linearen Abfall eine periodische Modulation des Pegels mit einer Frequenz überlagern, die dem Abstand der Partialtonfrequenzen entspricht.

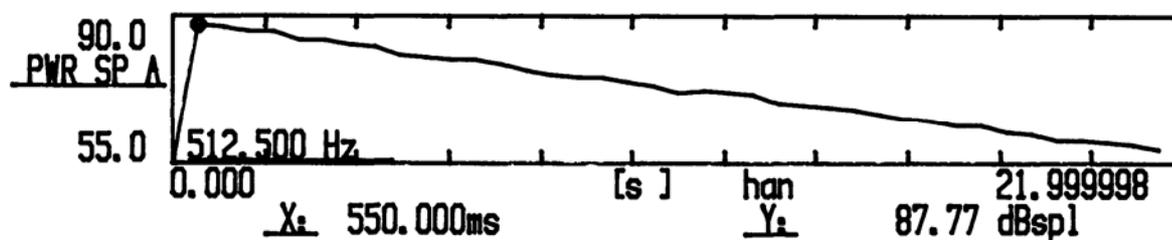


Abb. 18. Pegel der Suboktave als Funktion der Zeit (Original-Diagramm).

Die gemessenen Kennwerte Frequenz f , Anfangspegel L und Nachhallzeit T_{60} sind in Tab. II zusammen gefasst. Die dort aufgelisteten Angaben sind wesentlich genauer und umfangreicher als die Daten von Tab. I in Abschnitt 2.2. Die Abkürzung TT30 in der ersten Spalte steht für die „nachweisbaren“ Teiltöne, die im Farbdruck durch *kursive grüne* Ziffern gekennzeichnet sind. Mit TT15 ist die Untermenge der „wesentlichen“ Teiltöne (*steile blaue* Ziffern) bezeichnet, auf deren Auswahl im Folgenden eingegangen wird.

Tab. II. Kenndaten der nachweisbaren Teiltöne

TT30	TT15	Frequenz Hz	Anfangspegel dB	Nachhallzeit s
1	1	139,90	21,64	60
2	2	239,85	28,19	60
3	3	308,00	26,74	60
4		360,10	28,14	60
5		401,05	23,21	55
6	4	512,25	80,62	41,8
7		614,95	21,45	45
8		670,05	19,62	0,4
9	5	759,75	22,42	0,7
10		842,20	20,11	0,8
11		897,60	20,36	1,0
12	6	1053,85 1057,10	64,79 58,12	9,4
13	7	1260,30 1262,95	67,37 79,00	5,1
14	8	1605,00 1610,05	62,96 50,22	2,7
15		1663,95	28,93	1,0
16		1827,50	28,61	1,1
17	9	2110,95 2116,10	51,42 75,09	1,8
18		2271,15	37,87	0,3
19	10	2714,80 2721,05	52,13 66,13	1,4
20	11	3128,85 3133,25	55,26 66,60	2,3
21		3841,00	54,28	1,9
22	12	4282,30 4289,00	61,84 64,78	1,4
23	13	4560,10	55,37	1,1
24	14	5516,30 5534,15	49,06 48,93	1,9
25		6175,05	45,86	1,5
26		6817,65	46,35	1,7
27		7764,95	19,88	1,1
28	15	9487,85	21,09	1,4
29		12160,75	18,29	0,8
30		13637,15	18,51	0,9

4.3. Auswahl der wesentlichen Teiltöne

Plausibilitätsüberlegungen, Erfahrung aus früheren Untersuchungen und eine unterstützende gehörbezogene Analyse wurden dafür genutzt, die Anzahl der Teiltöne zu halbieren. Hierzu wurde ein am Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation der TU München entwickelter und ausgearbeiteter

Algorithmus verwendet, der auf den Überlegungen von Terhardt (z.B. 1998) beruht. Ausgangspunkt ist eine *Fourier Time Transformation* (FTT), die den Glockenklang in Anlehnung an das Zeit- und Frequenzauflösungsvermögen (vgl. die Frequenzgruppenbreite gemäß Abb. 12) des Gehörs analysiert. Danach werden die Ruhehörschwelle sowie der Verdeckungseffekt (Zwicker und Feldkeller 1967) bzw. das *Spectral Masking* (Fastl und Zwicker 2007) berücksichtigt. Weitere Erläuterungen zu den Grundlagen dieser Vorgehensweise finden sich in Kapitel 5.

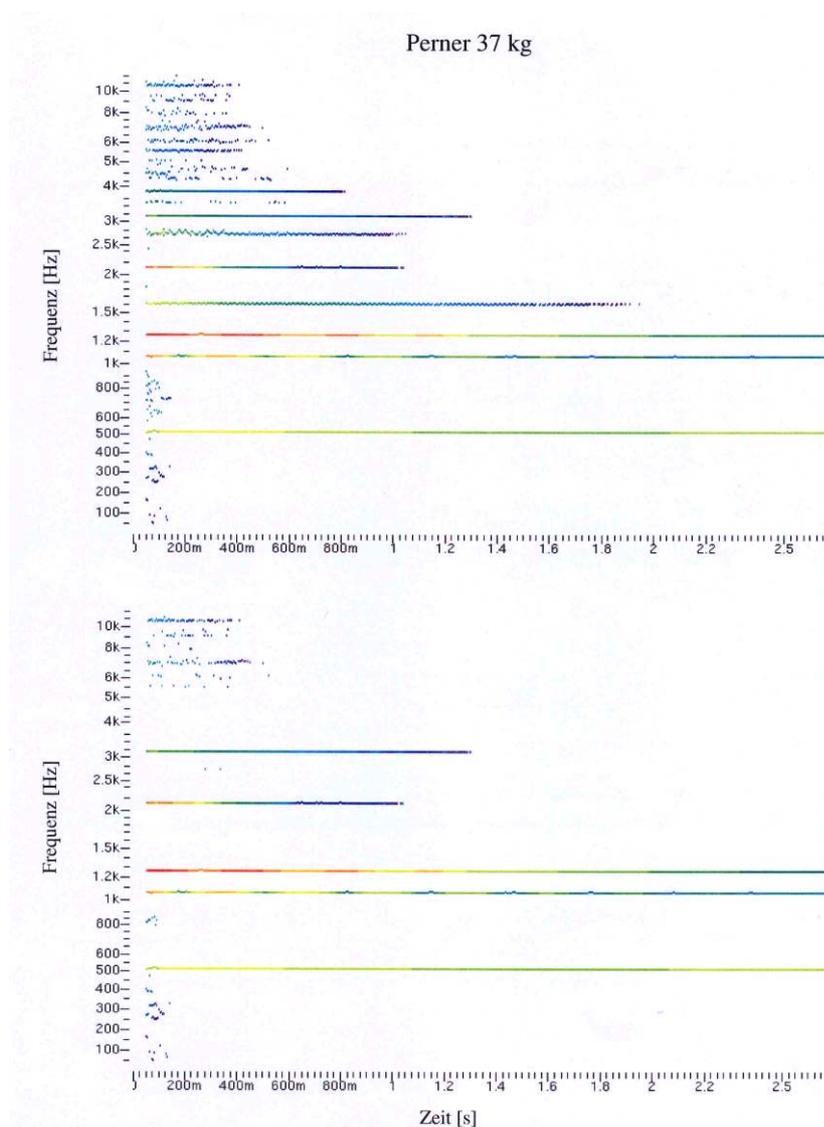


Abb. 19. Teilton-Zeit-Muster nach Valenzuela (1999b) ohne (oben) und mit Berücksichtigung der spektralen Verdeckung bzw. Maskierung (unten).

Abb. 19 zeigt, welche Ergebnisse eine solche gehörbezogene Analyse erbringt. Das Beispiel bezieht sich auf einen anderen Anschlag derselben Glocke. Das Diagramm stammt aus einer früheren Untersuchung von Valenzuela (1999b) und wurde mit dem erwähnten Programmpaket ermittelt, das an der TU München in der Arbeitsgruppe von E. Terhardt entwickelt worden ist. Nach rechts läuft die Zeit (ca. drei Sekunden). Nach oben ist die Frequenz auf der Bark-Skala aufgetragen, die sich an der Frequenzgruppenbreite orientiert. Die Farben kodieren den Pegel. Beim zweiten und dritten Teilton sind deutlich die Schwebungen zu erkennen, die sich bei der Prime und der Terze aus dem Zusammenwirken der Partialtöne ergeben. Das obere Diagramm zeigt das direkte Ergebnis der gehörbezogenen Analyse. Beim unteren Diagramm ist zusätzlich der Effekt der Maskierung berücksichtigt. Im Vergleich zum oberen Diagramm ist die Zahl der Teiltöne verringert.

Die Berücksichtigung der Maskierung hilft dabei, aus den „nachweisbaren“ Teiltönen diejenige Untermenge zu extrahieren, welche für das Hören von Belang sein wird. Von Teiltönen, die sich unterhalb der Ruhehörschwelle befinden, ist anzunehmen, dass sie zwar physikalisch nachgewiesen werden können, für das Hören jedoch keine Rolle spielen. Dasselbe gilt für Teiltöne, die unterhalb der Mithörschwellen liegen, welche die spektrale Verdeckung beschreiben; vgl. hierzu Abschnitt 5.2.3. Nur Teiltöne, die oberhalb dieser Schwellen liegen, werden als „wesentlich“ eingestuft; sie finden sich in Tab. III. Wie die psychoakustischen Versuche später belegen werden, erweist sich die dadurch getroffene Auswahl als gerechtfertigt.

Tab. III. 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	0,7	
6 (12)	1053,8 1057,1	64,8 58,1	9,4	Prime
7 (13)	1260,3 1262,9	67,4 79,0	5,1	Terze
8 (14)	1605,0 1610,0	63,0 50,2	2,7	Quinte
9 (17)	2110,9 2116,1	51,4 75,1	1,8	Oberoktave
10 (19)	2714,8 2721,0	52,1 66,1	1,4	Dezime
11 (20)	3128,8 3133,2	55,3 66,6	2,3	Duodezime
12 (22)	4282,3 4289,0	61,8 64,8	1,4	Doppel- oktave
13 (23)	4560,1	55,4	1,1	
14 (24)	5516,3 5534,1	49,1 49,0	1,9	
15 (28)	9487,8	21,1	1,4	

Damit reduziert sich die Anzahl der Teiltöne von dreißig nachweisbaren (*kursive grüne* Ziffern in Klammern) auf fünfzehn wesentliche Teiltöne (*steile blaue* Ziffern). Letztere lassen von Pegel und Frequenzlage her vermuten, dass sie zur Hörwahrnehmung beitragen können. Diese für das Hören möglicherweise erheblichen Teiltöne sind samt Kenndaten in Tab. III zusammen gestellt. In der Campanologie übliche Bezeichnungen der fünf Teiltöne des Prinzipalbereichs (Schad 1996) sind vermerkt und durch Fettdruck hervorgehoben. Die Bezeichnungen von weiteren drei Teiltönen, die üblicherweise dem Mixturbereich zugeordnet werden, sind in Normaldruck eingefügt. Durch die Halbierung der Anzahl der Teiltöne ist bereits der erste Schritt einer Reduktion vorgenommen, die nicht der Willkür unterliegt, sondern sich auf die Eigenschaften des Gehörs bezieht.

4.4. Klänge für die Hörversuche

4.4.1. Synthese der Teiltöne und Generierung der Versuchsklänge

Auf der Basis dieser Daten wurden mittels des Programmpakets *Matlab* zunächst dreißig verschiedenartige Sinustöne mit exponentiell abklingender Amplitude erzeugt. Durch gezieltes Weglassen von Teiltönen wurden daraus vierzehn unterschiedliche Klänge zusammen gestellt, die Tab. IV auflistet. Diese enthalten unterschiedlich viele der nachweisbaren (*grün und kursiv*) bzw. der wesentlichen (*blau und steil*) Teiltöne.

Tab. IV: Resynthetisierte Klänge

Klang	Enthaltene Teiltöne Nr.														
1	<i>6 ... 30</i>														
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	<i>13 ... 21</i>														
11	<i>13 15 17 19 21</i>														
12	<i>1 ... 30</i>														
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														

Beispielsweise enthält der Klang 12 die Gesamtheit der dreißig nachweisbaren Teiltöne (*grün*). Dagegen umfasst der Klang 1 die Suboktave und alle höheren nachweisbaren Teiltöne; weiter unterhalb liegende Teiltöne sind weggelassen. Sämtliche fünfzehn wesentlichen Teiltöne (*blau*) sind im Klang 13 enthalten; im Unterschied dazu entfallen im Klang 3 alle Teiltöne unterhalb der Suboktave sowie die hochfrequenten wesentlichen Teiltöne Nr. 14 und 17. Bei den übrigen Klängen ist eine jeweils andere Auswahl von Teiltönen getroffen worden.

4.4.2. Darbietung der Versuchsklänge

Mit den in Tab. IV aufgelisteten Klängen, die jeweils drei Sekunden lang waren, wurden psychoakustische Untersuchungen durchgeführt. Versuchspersonen hatten die vierzehn synthetischen Klänge nach zwei unterschiedlichen Kriterien zu beurteilen. Wie von Sattler (2006) beschrieben, wurde der Versuch von einem PC aus gesteuert. Die in WAV-Dateien gespeicherten Klänge wurden von einem *Matlab*-Skript eingelesen und auf einer Soundkarte in digitaler Form ausgegeben. Ein Digital/Analog-Wandler erzeugt daraus ein analoges Signal. Dessen Pegel wurde mit einem Ver-

stärker und einer Eichleitung angepasst. Die Wiedergabe erfolgte diotisch über Kopfhörer Beyer DT 48 und Freifeldentzerrer nach Zwicker und Feldtkeller (1967) mit dem Pegel 80 dB.

Beim Versuch befanden sich die Personen in einer schalldichten Kabine. Den Probanden wurden auf einem Monitor Informationen und Aufforderungen angezeigt. Sie konnten per Tastatur Eingaben tätigen. Diese wurden vom Terminal zum Steuer-PC übertragen, dort aufgezeichnet und ausgewertet.

An den Experimenten nehmen nur Versuchspersonen teil, die normal hören. Dies wurde durch vorherige Messungen der Ruhehörschwellen sichergestellt. Eine maximale Abweichung von 20 dB von der durchschnittlichen Hörschwelle wurde toleriert. Das Alter der zwölf Teilnehmer lag zwischen 23 Jahren und 62 Jahren. Unter ihnen befand sich kein Glocken-Sachverständiger; die Gruppe repräsentiert daher eher den „Mann von der Straße“.

Um die synthetischen Klänge auf ihre Tauglichkeit für Hörversuche zu überprüfen, wurde mit zwei Versuchspersonen ein Vorversuch durchgeführt. Bei diesem Versuch wurde jeder Klang mit einem zufällig ausgewählten anderen Klang verglichen. Mit den 14 Klängen gemäß Tab. IV ergaben sich demzufolge sieben Paarvergleiche. Jede Person führte zweimal vier Versuchsdurchgänge mit jeweils sieben Paarvergleichen durch. Die Auswertung ergab, dass alle Klänge mindestens einmal bevorzugt werden. Daraus wurde gefolgert, dass alle Klänge für die Untersuchungen prinzipiell geeignet waren und in den beiden weiteren Versuchen eingesetzt werden konnten.

4.5. Paarvergleiche zur Beliebtheit von synthetischen Glockenklängen

4.5.1. Planung des Hörversuchs und Fragestellung

Daraufhin hat Sattler (2006) mit den synthetischen Klängen aus Tab. IV Paarvergleiche durchgeführt. Dabei war prinzipiell einmal Klang A mit Klang B und einmal Klang B mit Klang A zu vergleichen. Mit vierzehn Versuchsschallen hätten sich somit $14 \cdot 13 = 182$ Kombinationsmöglichkeiten ergeben. Um die Versuchsdauer zu halbieren, wurde vereinfachend vorausgesetzt, dass bei den Paarvergleichen unabhängig von der Reihenfolge jeweils derselbe Klang bevorzugt wird. Mit der Annahme, dass die Reihenfolge unerheblich ist, konnte die Anzahl der Paarvergleiche auf 91 verringert werden.

Zunächst zwölf Versuchspersonen hatten folgende Aufgabe zu lösen: **„Ihnen werden im folgenden Versuch mehrere Klangpaare dargeboten. Alle Klänge sind synthetisch erzeugt und sollen den Klang einer Kirchenglocke nachbilden. Kurz nach dem 1. Klang wird der 2. Klang dargeboten. Anschließend werden Sie gebeten, ein Votum abzugeben, welcher der beiden Klänge Ihnen besser gefällt.“**

Um beurteilen zu können, ob die Versuchspersonen bei jeder Darbietung eines Paares reproduzierbar antworteten, wurden Wiederholungen vorgesehen. Der Hörversuch umfasste vier Durchgänge mit einer dazwischen liegenden Pause. Bei den Durchgängen 1 und 3 wurde ein AB-Vergleich, bei den Durchgängen 2 und 4 ein BA-Vergleich durchgeführt. Bei näherer Betrachtung der Einzelergebnisse zeigte sich, dass manche Personen beim AB-Vergleich zum Teil geringfügig andere Klänge bevorzugen als beim BA-Vergleich derselben Klänge. Diese Abweichungen von der Hypothese, dass die Reihenfolge das Urteil nicht beeinflusst, waren jedoch so gering, dass sie im Weiteren nicht gesondert betrachtet wurden.

4.5.2. Ergebnisse der Paarvergleiche

Da die Varianzwerte der einzelnen Versuchspersonen nicht gravierend differierten, wurden zunächst die Urteile aller Teilnehmer für die Auswertung dieses Versuchs herangezogen. Bei der Durchsicht der Einzelresultate zeigte sich, dass insbesondere zwei Versuchspersonen die Klänge 1, 2, 3, 5, 9, 11, 12 und 13 im Vergleich zu den übrigen Teilnehmern abweichend bewerteten. Es zeichnete sich eine Gruppenbildung ab. Die Gruppen sind in Abb. 20 erkennbar. Dort sind die Mediane (Zentralwerte) angegeben. Zusätzlich sind die Interquartilbereiche dargestellt, innerhalb derer jeweils 25% der Antworten liegen. Es ist die Anzahl der Bevorzugungen des jeweiligen Klanges gegenüber allen anderen Klängen abzulesen, die ein Maß für die Beliebtheit des Klanges darstellt. Das linke Diagramm gilt für sämtliche Teilnehmer, das rechte für zwei Versuchspersonen (kes und som). Man erkennt teilweise deutliche Abweichungen zwischen den Ergebnissen.

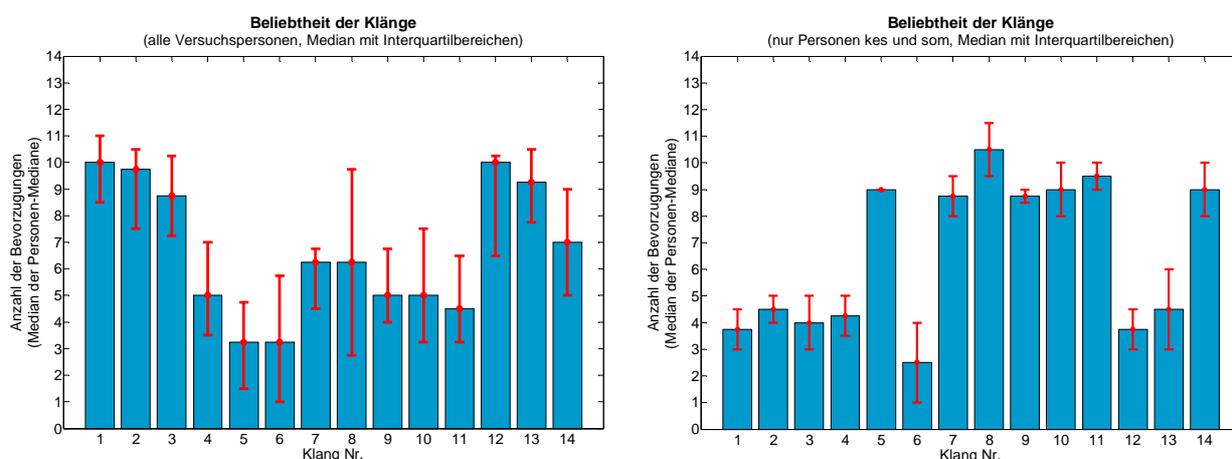


Abb. 20. Ergebnisse der Paarvergleiche zur Beliebtheit der vierzehn Klänge (Mediane samt Interquartilen).
Links: Sämtliche zwölf Versuchspersonen. Rechts: Nur Versuchspersonen kes und som.

Die beiden Personen, auf deren Antworten sich das rechte Diagramm in Abb. 20 bezieht, stammen aus demselben Bundesland eines südlichen Nachbarstaates. Die Interquartilbereiche sind nicht übermäßig groß, was belegt, dass die Beurteilungen der beiden Versuchspersonen in sich konsistent sind. Offenbar prägen sich, abhängig vom Herkunftsland, regionale Unterschiede darüber aus, wie man einen manipulierten Glockenklang beurteilt und welche Vorstellung man mit einem Glockenklang verbindet. Da diese beiden Versuchspersonen gleichbleibend abweichende Antworten auch bei den Hörversuchen zur Ähnlichkeit gaben, die im nächsten Abschnitt 4.6 beschrieben sind, wurden sie in die weitere Auswertung nicht einbezogen. Demzufolge spiegeln die im Folgenden angeführten Bewertungen (Abb. 21 und 22) die Urteile von zehn einheimischen Probanden wider.

Wenn alle Versuchspersonen in jedem Durchgang einen Klang gegenüber allen anderen Klängen bevorzugt hätten, läge der Median beim Wert 13. Dies tritt in keinem Fall ein. Abb. 21 zeigt jedoch trotzdem klare Präferenzen. Die Klänge 1, 2, 12, 13 gefielen den zehn einheimischen Personen deutlich besser als die übrigen Klänge. Mit geringfügigen Einschränkungen gilt dies auch für den Klang 3. Am wenigsten gefielen den Versuchspersonen die Klänge 5 und 6.

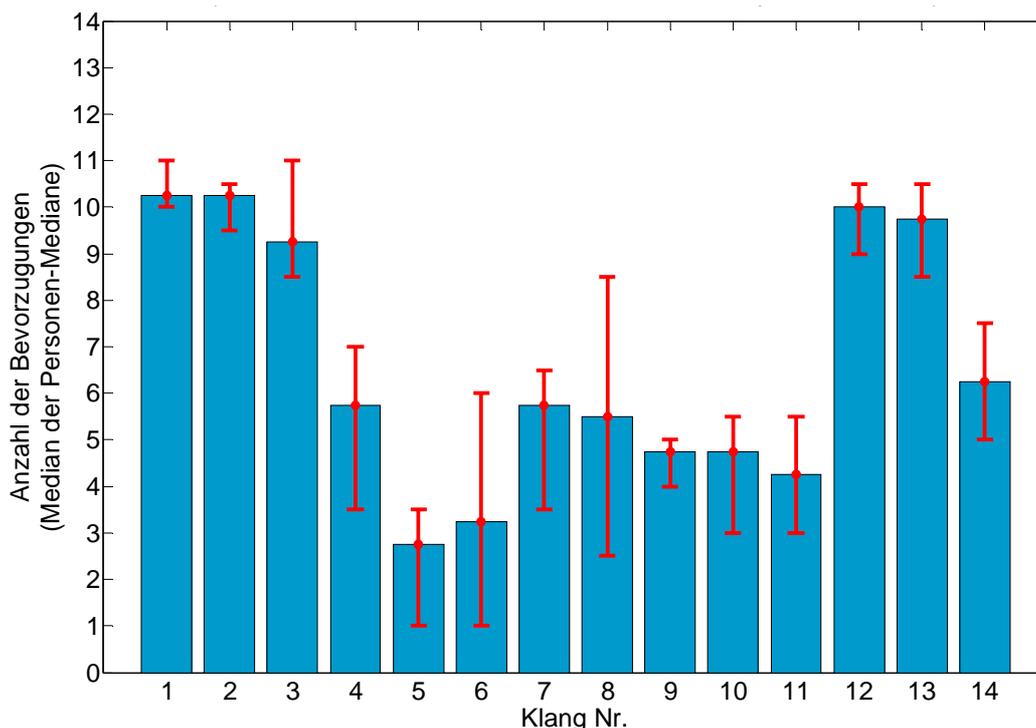


Abb. 21. Ergebnisse der Paarvergleiche zur Beliebtheit der vierzehn Klänge.

Bevor diese Ergebnisse im Einzelnen diskutiert werden, soll noch ein weiterer Hörversuch beschrieben werden, der mit denselben synthetischen Klängen und denselben Versuchspersonen durchgeführt wurde. Wie im folgenden Abschnitt ausgeführt wird, wurden jedoch eine andere Methode und eine andere Fragestellung angewandt.

4.6. Hörversuche zur Ähnlichkeit eines synthetischen Klanges mit einem Glockenklang

4.6.1. Versuchsplanung und Fragestellung

In seiner zweiten Versuchsreihe hat Sattler (2006) untersucht, wie ähnlich Versuchspersonen die synthetischen Klänge zu einem ihnen unbekanntem Glockenklang einschätzen; siehe hierzu auch Fleischer, Fastl und Sattler (2007).

Es wurden dieselben vierzehn Klänge, beschrieben in Tab. IV, wie bei den Paarvergleichen von Abschnitt 4.5 verwendet. Die Versuchspersonen hatten folgende Aufgabe: „**Es werden einzelne Schalle dargeboten. Zwischen den Schallen sind 4 Sekunden Pause. Entscheiden Sie bitte, ob der jeweilige Schall wie der Klang einer Kirchenglocke klingt und tragen Sie Ihre Entscheidung bitte in der Pause in das Protokoll ein. Verwenden Sie dazu bitte folgende Bewertungssymbole:**

Symbol	Bedeutung
++	Der Klang klingt voll und ganz wie ein echter Kirchenglockenklang
+	
o	
-	
--	Der Klang klingt überhaupt nicht wie ein echter Kirchenglockenklang

Um die Versuchspersonen zu konditionieren, wurden vier sehr unterschiedliche Klänge vorgespielt, die nicht in die Auswertung gingen. Danach wurden jeweils in je vier Durchgängen die vierzehn synthetischen Glockenklänge in zufälliger Reihenfolge dargeboten. Nach jeweils acht Klängen ertönt eine kurze Pausenmusik. Damit sollte erreicht werden, dass die Versuchspersonen sich besser auf die zeitliche Abfolge und die Nummerierung auf dem Protokoll einstellen konnten.

Wiederum nahmen zunächst zwölf Versuchspersonen teil. Die Varianzen waren bei den meisten Personen im Bereich von 0,3 bis 0,6, wobei der maximal mögliche Varianzwert bei völlig unterschiedlicher Bewertung in den Durchgängen 5,33 betrug. Die tatsächlichen Werte lagen weit unter diesem Höchstwert, so dass die Bewertungen aller Teilnehmer als brauchbar eingestuft werden konnten. Wie bereits beim vorherigen Versuch zeigte sich, dass die zwei Teilnehmer aus dem benachbarten Land konsistent Urteile abliefern, die deutlich von denen der übrigen Probanden abweichen. Da diese beiden Versuchspersonen gegenüber Glockenklängen eine andere Erwartungshaltung als Einheimische zu haben scheinen, wurden sie - ebenso wie beim vorherigen Experiment - nicht in die Endauswertung mit einbezogen.

4.6.2. Ergebnisse der Ähnlichkeitsversuche

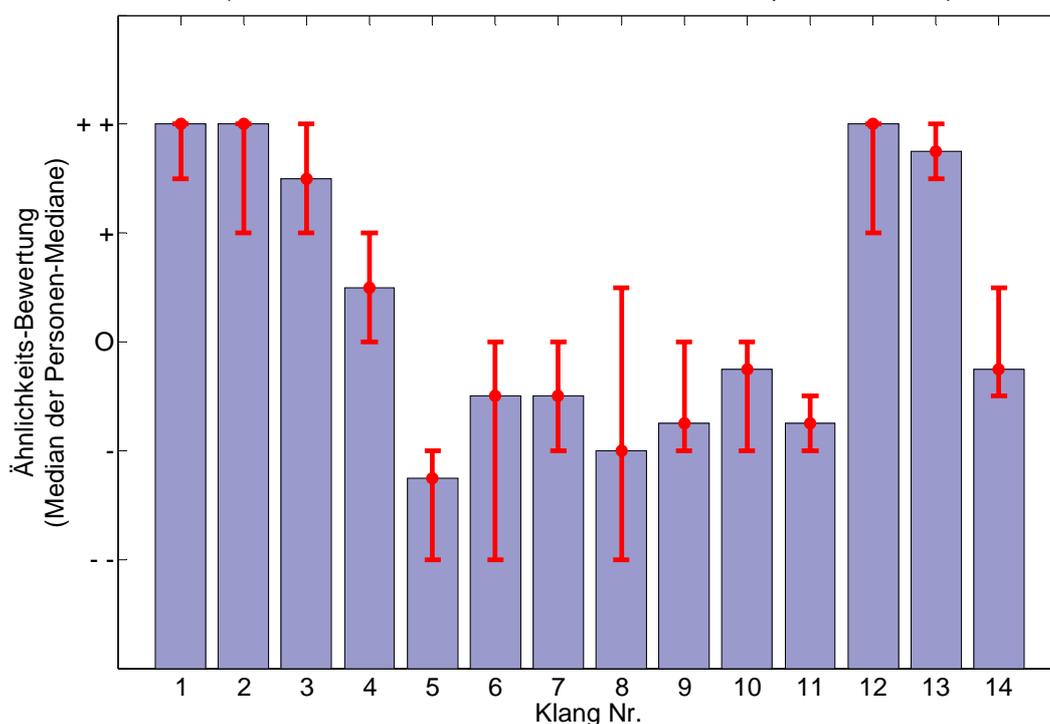


Abb. 22. Ergebnisse der Beurteilungen, wie ähnlich die vierzehn Klänge einem Glockenklang sind.

Die 14 Klänge wurden in vier Durchgängen einzeln nacheinander dargeboten. Die Ergebnisse der Bewertungen der zehn einheimischen Versuchspersonen sind als Mediane samt den Interquartilen Abb. 22 zu entnehmen. Die Versuchspersonen urteilten, dass die Klänge 1, 2 und 12 voll und ganz wie eine Glocke klingen und die Klänge 3 und 13 sich weitgehend wie eine Glocke anhören. Schlecht wurden die Klänge 5 bis 11 und 14 beurteilt. Die Versuchspersonen nahmen sie nicht wie echte Glockenklänge wahr. Am wenigsten hörten sich die Klänge 5 und 8 wie Glockenklänge an.

4.7. Gemeinsame Diskussion der Versuchsergebnisse

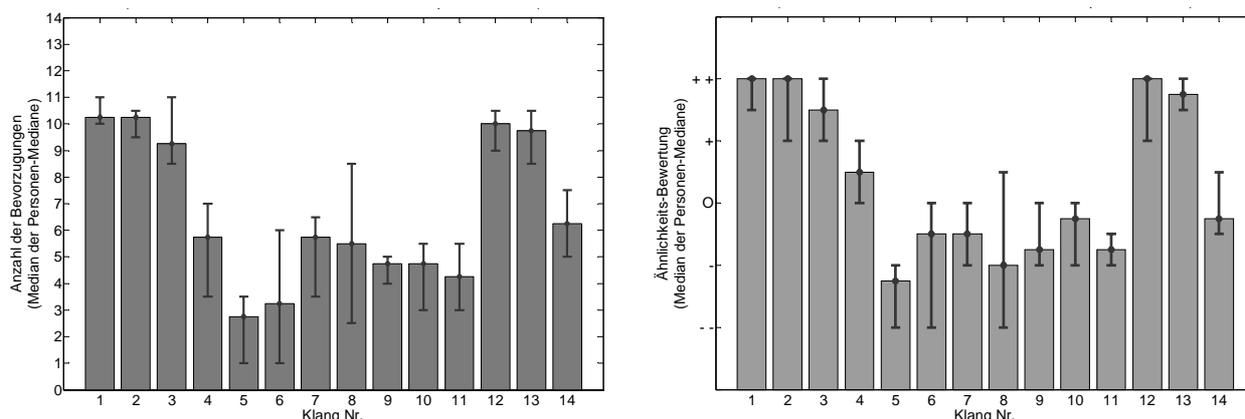


Abb. 23. Ergebnisse der Hörversuche mit den 14 Klängen von Tab. IV.
 Links: Paarvergleiche zur Beliebtheit. Rechts: Ähnlichkeit mit einem Glockenklang.

Zum einfacheren Vergleich sind in Abb. 23 die beiden Balkendiagramme von Abb. 21 und 22 einander gegenüber gestellt. Offensichtlich ergeben die beiden Hörversuche trotz unterschiedlicher Fragestellung ein weitgehend einheitliches Bild:

- In beiden Fällen erhielten die Klänge 1, 2 und 12 die höchsten Bewertungen. Sie entsprechen voll und ganz der Vorstellung von einem Glockenklang und gefielen den Versuchspersonen als Glockenklänge sehr gut.
- Die Klänge 3 und 13 wurden nicht ganz so hoch eingestuft. Sie klingen sehr weitgehend wie eine Glocke und gefielen den Versuchspersonen als Glockenklänge gut.

Die guten Ergebnisse für die Klänge 12 und 13 zeigen, dass keine signifikanten Unterschiede auftreten, wenn ein Klang nicht aus den dreißig nachweisbaren, sondern nur aus der Untermenge der fünfzehn wesentlichen Teiltöne besteht. Den gleich guten Ergebnissen für die Klänge 1 und 2 zufolge spielen die schwachen Teiltöne unterhalb der Suboktave für die Hörbeurteilung keine Rolle. Demnach lässt sich das typische Klangbild einer Kirchenglocke mit zwölf der wesentlichen Teiltöne (Klang 2) erzeugen. Gute Auralisationen gelingen auch noch mit neun der wesentlichen Teiltönen (Klang 3). All diese Klänge enthalten die Teiltöne des Prinzipalbereichs (vgl. Tab. III: **Suboktave, Prime, Terze, Quinte, Oberoktave**) und gegebenenfalls einige weitere Teiltöne des Mixturbereichs (Dezime, Duodezime; Doppeloktave).

- Der Klang 4 erhielt eine mittlere Bewertung.

Für eine befriedigende Auralisation reichen sogar noch weniger Teiltöne des Prinzipalbereichs aus. Klang 4 besteht lediglich aus Suboktave, Terze, Oberoktave und einem Teilton bei etwa 4580 Hz. Prime und Quinte, die sich beide schwach ausprägen, sind weggelassen.

- In beiden Versuchsreihen wurden die Klänge 5 bis 11 und 14 schlecht beurteilt. Die Versuchspersonen nahmen sie nicht wie echte Glockenklänge wahr und fanden an ihnen kein Gefallen.

Sehr wichtig scheint die Suboktave (wesentlicher Teilton Nr. 4 bei 512 Hz) zu sein. Fehlt sie, dann wird der Klang durchweg nicht gut beurteilt. Beispiele hierfür sind die Klänge 5, 7, 8, 9, 10, 11 und 14, die nur entfernt nach Kirchenglocke klingen und den Versuchspersonen auch nicht gefallen. Der

ebenfalls schlecht bewertete Klang 6 enthält zwar die Suboktave, jedoch fehlen ihm weitere wichtige Teiltöne.

- Am wenigsten hörte sich der Klang 5 wie ein Glockenklang an; auch gefiel er den Versuchspersonen nicht.

Dieser Klang umfasst nur wenige Teiltöne. Wie auch praktisch allen - mit der einzigen Ausnahme des Klanges 6 – schlecht beurteilten Klängen fehlt ihm insbesondere die Suboktave. Dieser Teilton scheint von zentraler Bedeutung für den Klang einer Kirchenglocke zu sein.

Festzuhalten bleibt an dieser Stelle, dass sich die Ergebnisse und Interpretationen auf süddeutsche Probanden beziehen. Es ist nicht auszuschließen, dass die Erwartungshaltung von Personen bezüglich eines „typischen Kirchenglockenklanges“ regionale Unterschiede aufweist und von ihrer individuellen Prägung abhängen kann.

4.8. Zusammenfassende Bemerkung

Der Klang der Perner-Glocke wurde mittels FFT analysiert. Die Frequenzen, relativen Amplituden sowie die Abklingkonstanten sämtlicher dreißig nachweisbaren Teiltöne wurden bestimmt. Mit dem Programm *Matlab* wurden synthetische Klänge erzeugt, indem diese Teiltöne durch mathematische Verfahren errechnet und zu komplexen Klängen zusammengefügt wurden. In einem ersten Schritt der Reduktion wurden, angelehnt an eine gehörbezogene Analyse, vorab fünfzehn Spektralkomponenten ausgewählt, die als wesentlich eingestuft wurden. Durch Weglassen weiterer Teiltöne wurden unterschiedliche Klänge gebildet, so dass letztlich vierzehn verschiedene synthetische Versuchsschalle zur Verfügung standen.

Damit hat Sattler (2006) zwei Experimente mit unterschiedlichen Fragestellungen durchgeführt. Zehn einheimische Versuchspersonen hatten die Klänge in Hinsicht auf das subjektive Gefallen und die Ähnlichkeit zum Klang einer echten Kirchenglocke zu bewerten. Sie hatten zunächst ein Votum darüber abzugeben, welcher der beiden Klänge eines Paares ihnen als Glocke besser gefiel. In einem weiteren Versuch hatten sie zu beurteilen, ob ein Einzelschall wie der Klang einer Kirchenglocke klingt. Es zeigte sich, dass die Probanden die Ähnlichkeit der synthetischen Glockenklänge zu einem ihnen unbekanntem echten Glockenklang (Abb. 21) nicht viel anders beurteilen, als wenn sie gefragt werden, wie gut ihnen die künstlichen Klänge als Glockenklänge gefallen (Abb. 22). Die Ergebnisse können somit gemeinsam diskutiert werden (Abb. 23).

Es ist nun bekannt, wie gut die synthetischen Glockenklänge gefallen und welche Teiltöne sie enthalten müssen, damit die Klänge ähnlich wie bei einer echten Kirchenglocke klingen. Beide Versuchsreihen haben übereinstimmend ergeben, dass für das typische Klangbild einer Kirchenglocke von dreißig nachweisbaren Teiltönen (Klang 12 sowie mit Einschränkungen Klang 1) für die Resynthese höchstens die fünfzehn wesentlichen Teiltöne (Klang 13) von Bedeutung sind. Das charakteristische Klangbild einer Glocke lässt sich auch sehr gut mit zwölf der wesentlichen Teiltöne (Klang 2) erzeugen.

Sehr gute Auralisationen gelingen auch noch mit den in Tab. V zusammen gestellten wesentlichen Teiltönen (Klang 3). Da nach bisheriger Kenntnis der Teilton Nr. 5 keine Rolle zu spielen scheint, ist er weggelassen. Somit kann festgehalten werden, dass alle sehr gut beurteilten Klänge die acht Komponenten enthalten, die in Tab. V aufgeführt sind. Es zeigt sich, dass dies die Teiltöne des Prinzipalbereichs (**Suboktave, Prime, Terze, Quinte, Oberoktave**) und gegebenenfalls einige weitere Teiltöne des Mixturbereichs (Dezime, Duodezime; Doppeloktave) sind. Sehr wichtig scheint die Suboktave zu sein. Fehlt sie, dann wird der Klang durchweg schlecht beurteilt. Die Teil-

Tab. V. Kenndaten der Teiltöne des Prinzipalbereichs (*fett gedruckt*) und des Mixturbereichs

Nr.	f/Hz	L/dB	T_{60}/s	Bezeichnung
4 (6)	512,2	80,6	41,8	Suboktave
6 (12)	1053,8 1057,1	64,8 58,1	9,4	Prime
7 (13)	1260,3 1262,9	67,4 79,0	5,1	Terze
8 (14)	1605,0 1610,0	63,0 50,2	2,7	Quinte
9 (17)	2110,9 2116,1	51,4 75,1	1,8	Oberoktave
10 (19)	2714,8 2721,0	52,1 66,1	1,4	Dezime
11 (20)	3128,8 3133,2	55,3 66,6	2,3	Duodezime
12 (22)	4282,3 4289,0	61,8 64,8	1,4	Doppeloktave

tonanzahl könnte noch weiter verringert werden, indem Teiltöne, die nur gering oberhalb der Mithörschwelle liegen, entfernt werden. Für eine befriedigende Auralisation reichen unter Umständen sogar noch weniger Teiltöne aus. So besteht Klang 4 aus den drei Teiltönen des Prinzipalbereichs Suboktave, Terze, Oberoktave und einem Teilton bei etwa 4580 Hz. Die Prime und Quinte, die sich schwach ausprägen, sind weggelassen. Wichtig scheint den Versuchspersonen zu sein, dass die für Kirchenglocken typischen Schwebungen vorhanden sind.

5. GEHÖRBEZOGENE ANALYSE VON GLOCKENKLÄNGEN

5.1. Aufgabenstellung

Im Rahmen einer größeren Studie mit Musikinstrumentenklängen hat Franziska Lenski (2007) unter Anderem untersucht, welche Teiltöne eine Kirchenglocke charakterisieren. Dabei ist sie anders als Sattler (2006) vorgegangen, der den Klang erst FFT-analysiert, darauf aufbauend die Teiltöne einzeln synthetisiert und damit unterschiedliche Klänge zusammen gestellt hat. Vielmehr hat sie den Glockenklang mit dem gehörbezogenen Analyseverfahren *VIPER* in seine Komponenten zerlegt und Gebrauch von den vielfältigen Möglichkeiten des Editierens gemacht, die dieses Programm-paket bietet. Die gehörbezogene Analyse ist für die Aufgabenstellung von so weitreichender Bedeutung, dass ihre Grundgedanken in einem eigenen Kapitel erläutert werden sollen. Bevor auf die Hörexperimente eingegangen wird, werden deshalb kurz die psychoakustischen Grundlagen und deren Realisierung in dem kommerziellen Programm dargestellt.

5.2. Psychoakustische Grundlagen

In der gebotenen Kürze werden diejenigen Grundzüge der Signalverarbeitung im Gehör zusammengestellt, welche für die hierbei verwendete Analyse von Bedeutung sind. Die Darstellung lehnt sich eng an das psychoakustische Standardwerk von Fastl und Zwicker (2007) an, das wiederum auf dem Klassiker „Das Ohr als Nachrichtenempfänger“ von Zwicker und Feldtkeller (1967) aufbaut.

5.2.1. Frequenzgruppen, Tonheit und Bark-Skale

Zahlreiche Hörversuche (z.B. Untersuchungen zur Lautstärke oder zur Bestimmung von Mithörschwellen) liefern Hinweise auf das spektrale Auflösungsvermögen des Gehörs. Dabei zeigt sich als zentrale Erkenntnis, dass das Gehör den Frequenzbereich in die sog. Frequenzgruppen einteilt. Man kann sich die Frequenzgruppen als Filter veranschaulichen, die im Gehör realisiert sind. Aus ganz unterschiedlichen Versuchsreihen hat sich die Kenntnis der Breite der Frequenzgruppen gefestigt, wie sie bereits in Abb. 12 dargestellt worden ist. Häufig verwendet man die Näherung, die dort durch die zwei gestrichelten Geraden gegeben ist: Bis zu Frequenzen von etwa 500 Hz sind die Frequenzgruppen 100 Hz breit. Darüber beträgt die Frequenzgruppenbreite 20% der Mittenfrequenz. Der Begriff Mittenfrequenz rührt von der Vorstellung einer technischen Filterbank her. Deren Filter haben, ähnlich wie bei einer FFT-Analyse, bis 500 Hz eine konstante *a b s o l u t e* Bandbreite. Bei höheren Frequenzen sind die Filter jedoch von konstanter *r e l a t i v e r* Bandbreite und damit etwa vergleichbar einer Analyse mit Terzfiltern. In dieser Hinsicht ist eine FFT-Analyse, wie sie Sattler (2006) verwendet hat, bei Frequenzen oberhalb von 500 Hz nicht gehörgerecht. Eine gehörbezogene Analyse muss die Frequenzgruppen berücksichtigen.

Reiht man die Frequenzgruppen lückenlos aneinander, so erhält man die Frequenzgruppenskale, die bereits dazu verwendet worden ist, die Tonhöhenvergleiche von Kapitel 3 auszuwerten. Zu Ehren des Akustikers von Barkhausen wird als Einheit „Bark“ verwendet. Diese Bark-Skale führt auf die Tonheit *z* als gehörrichtige Transformation der physikalischen Frequenzskale und ist in der Psychoakustik von fundamentaler Bedeutung. Sie spiegelt sich auch im Innenohr wider: Trägt man die Tonheit entlang der abgewickelten Basilarmembran so auf, dass 0 Bark am Helicotrema und 24 Bark am ovalen Fenster liegen, so ergibt sich eine direkte, äquidistante Zuordnung (Zwicker und Feldt-

keller 1967). Die Bark-Skala teilt die Basilarmembran in gleich große Abschnitte. Sie ist gehöradäquat und damit das naturgegebene Pendant zur physikalischen Frequenzskala.

5.2.2. Ruhehörschwelle

Ein elementares Ergebnis psychoakustischer Untersuchungen ist in Abb. 24 dargestellt. Es ist die „Hörschwelle“ des normal hörenden Menschen in ruhiger Umgebung. Sie gibt denjenigen Schallpegel wieder, der notwendig ist, damit ein als „Sonde“ verwendeter Sinuston wahrnehmbar wird. Dieser Grenzwert kann beispielsweise nach der Methode des pendelnden Einregels mit Hilfe eines Békésy-Audiometers bestimmt werden. Die Ruhehörschwelle hängt stark von der Frequenz ab. Bei 20 Hz liegt sie bei etwa 70 dB, kann zwischen 2 kHz und 5 kHz aber auch auf Pegelwerte um 0 dB oder sogar darunter absinken. Bei hohen Frequenzen nimmt sie wieder große Werte an. In diesem Bereich hängt die Hörschwelle vom Lebensalter dergestalt ab, dass die Hörfähigkeit umso mehr nachlässt, je älter man wird.

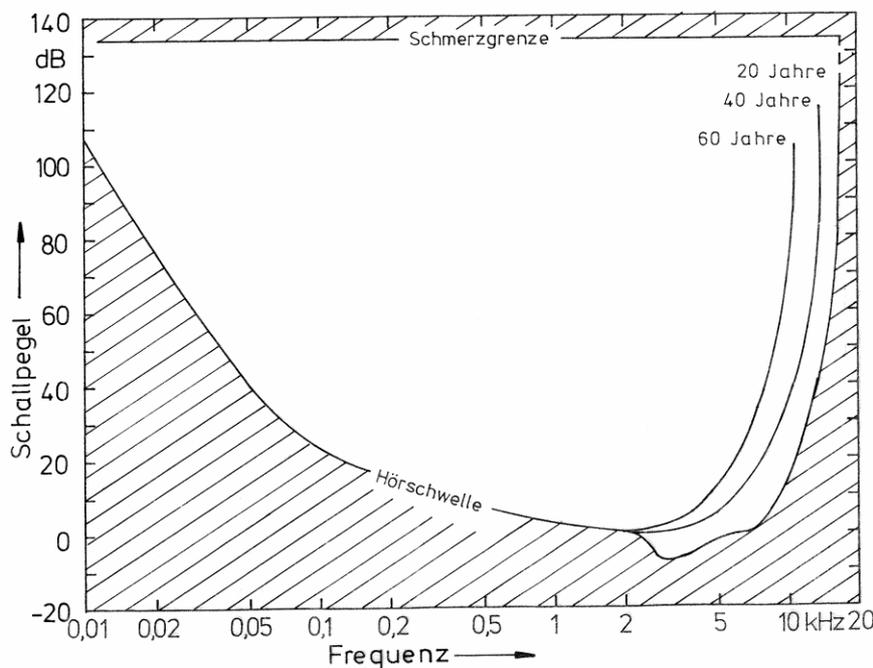


Abb. 24. Ruhehörschwelle als Funktion der Frequenz für unterschiedliche Lebensalter; die Hörfläche ist nach unten durch die Hörschwelle und nach oben durch die Schmerzgrenze eingegrenzt.

Neben der Hörschwelle in Abb. 24 als weitere Grenzkurve die „Schmerzgrenze“ eingezeichnet. Diese wird aus begrifflichen Gründen nicht im Detail vermessen, sondern mit Pegeln zwischen 120 dB und 140 dB abgeschätzt. Nur der Bereich zwischen der Hörschwelle und der Schmerzgrenze, die so genannte „Hörfläche“, wird vom menschlichen Gehör genutzt. Bei den Hörversuchen mit den Glockenklängen wurde die Schmerzgrenze nie erreicht, jedoch könnte sie in unmittelbarer Nähe einer läutenden Glocke auch überschritten werden.

Ein Ton, charakterisiert durch seine Frequenz und seinen Pegel, wird üblicherweise durch die Spitze einer Linie repräsentiert. Liegt die Spitze im schraffierten Gebiet unterhalb der Hörschwelle, ist der Ton auch bei vollkommener Stille nicht hörbar und damit für das Gehör unwirksam. Für das Hören – und damit auch für eine gehörbezogene Analyse – sind demzufolge ausschließlich diejenigen Spektralkomponenten eines Schallsignals von Belang, die zwischen Hörschwelle und Schmerzgrenze, d.h. innerhalb der Hörfläche, liegen. Nur diese Spektralanteile können wahrgenommen wer-

den und verursachen keinen Schmerz. Im Sinne einer gehöradäquaten Informationsreduktion sind insbesondere sämtliche Schallkomponenten, die unterhalb der Hörschwelle liegen, irrelevant. Obwohl physikalisch vorhanden, tragen sie in keiner Weise zur Hörwahrnehmung bei.

5.2.3. Spektrale Verdeckung bzw. Maskierung

Bereits die Betrachtung der Ruhehörschwelle hat gezeigt, dass physikalisch gemessene Frequenzen und Pegel von Spektralkomponenten eines Schallsignals für sich allein zunächst keine Aussagekraft haben. Die messtechnische Nachweisbarkeit einer Schallkomponente besagt noch nichts darüber, ob sie auch wahrgenommen wird und tatsächlich zur Hörempfindung beiträgt. Dies kann prinzipiell auch für Schallkomponenten gelten, die innerhalb der Hörfläche lokalisiert sind. Den Schlüssel zur gehöradäquaten Beurteilung der Rolle, die den Komponenten eines Schallsignals zukommt, liefert das „Mithörschwellen-Muster“. Es beschreibt den Effekt der „Verdeckung“ bzw. „Maskierung“ (im Englischen als *Masking* bezeichnet), der aus dem täglichen Leben bekannt ist: Durch einen lauten „Maskierer“ - z.B. ein vorbei fliegendes Flugzeug - können leisere „Testschalle“ - z.B. Sprache - unhörbar werden. In der Psychoakustik werden als Testschalle in aller Regel Sinustöne verwendet, die wie eine Sonde die spektrale Umgebung des Maskierers abtasten. Als Maskierer sind in Hinsicht auf Glockenklänge andere Sinustöne sowie Schmalbandrauschen von Interesse. Bei Schallsignalen großer Dauer ist die „spektrale Maskierung“ (englisch: *Spectral Masking*) von entscheidender Bedeutung, die durch das Mithörschwellen-Frequenz-Muster gekennzeichnet wird. Da der hier betrachtete Glockenklang zwar einen perkussiven Anfang hat, dann jedoch relativ lang andauert, wird die zeitliche Maskierung (Fastl 1982) im vorliegenden Zusammenhang nicht betrachtet.

Als Repräsentant eines schmalbandigen Maskierers wird frequenzgruppenbreites Rauschen der Mittenfrequenz f_m betrachtet. Dessen Stärke ist durch den Gesamtpegel charakterisiert, der im Beispiel 60 dB beträgt. Als psychoakustischer Messwert ist in Abb. 25 der Pegel des eben wahrnehmbaren Testtones über seiner Frequenz aufgetragen. Die gestrichelte Kurve repräsentiert die bereits von Abb. 24 her bekannte Ruhehörschwelle.

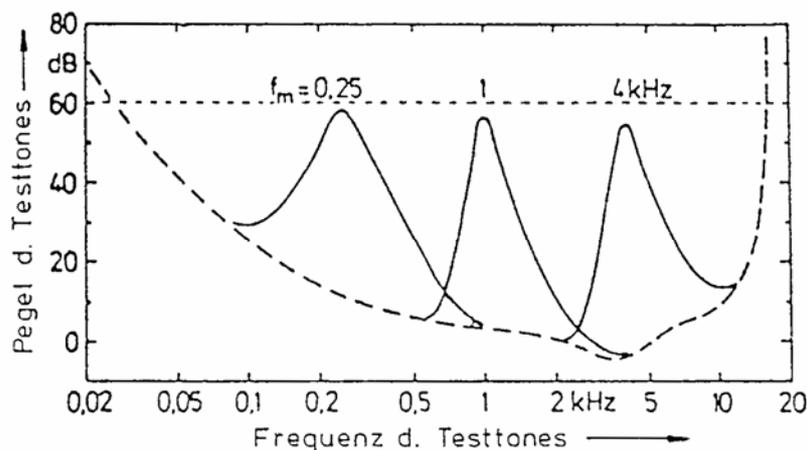


Abb. 25. Mithörschwellen von Testtönen, verdeckt durch Frequenzgruppenrauschen des Pegels 60 dB mit der Mittenfrequenz f_m , nach Fastl und Zwicker (2007).

Abb. 25 zeigt drei Beispiele für Mithörschwellen von frequenzgruppenbreitem Schmalbandrauschen. Dessen Frequenzlage ist durch die Mittenfrequenz f_m gekennzeichnet, die hier 250 Hz, 1 kHz sowie 4 kHz beträgt. Der Pegel des Maskierers ist in allen Fällen 60 dB. Die durchgezogenen Kurven geben denjenigen Pegel wieder, der zum Hören des Testtones bei Vorhandensein des Maskierers mindestens notwendig ist. Man erkennt zwei Effekte:

- Zum einen verliert das Maximum der Mithörschwellen zu großen Frequenzwerten hin etwas an Höhe, obwohl der Schallpegel des Maskierers immer gleich ist. Hierin spiegelt sich das so genannte „Verdeckungsmaß“ wider, das von der Frequenzlage abhängt und einige Dezibel beträgt.
- Zum anderen ändert sich zu tiefen Frequenzen hin die Gestalt der Mithörschwellen. Dies hat mit der Breite der Frequenzgruppen zu tun; vgl. Abschnitt 3.3 und insbesondere Abb. 12. Die Mithörschwellen werden weitgehend deckungsgleich, sobald man sie über der Tonheit z (Bark-Skale) aufträgt.

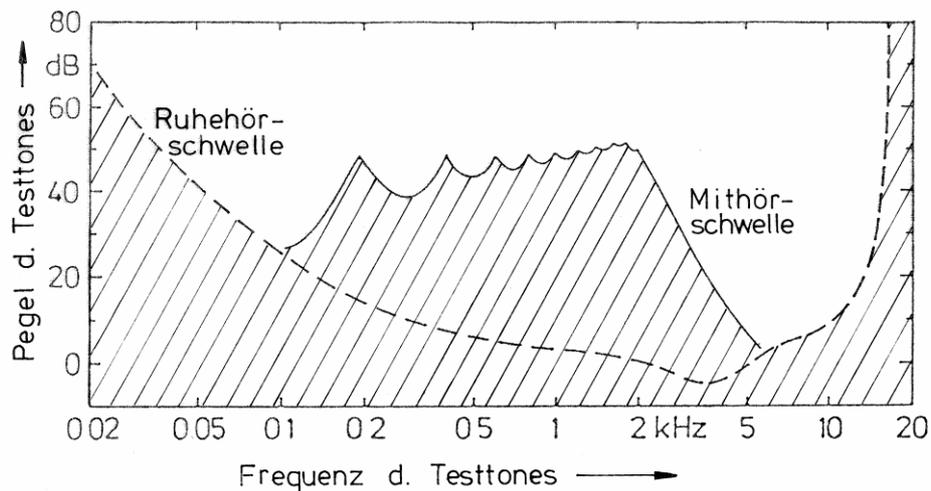


Abb. 26. Mithörschwelle von Testtönen, verdeckt durch einen harmonischen Klang aus zehn Teiltönen der Frequenzen 200 Hz, 400 Hz usw. mit den Teiltonpegeln 60 dB.

Welche Auswirkungen die spektrale Maskierung bei komplexeren Signalen haben kann, ist in Abb. 26 am Beispiel eines harmonischen Klanges der Grundfrequenz und des Frequenzabstandes 200 Hz illustriert. Jeder der zehn Teiltöne hat den Pegel 60 dB. Dieser „Maskierer“ hebt die Ruhehörschwelle (gestrichelt in Abb. 26) an. Nicht nur Töne unterhalb der Ruhehörschwelle, sondern auch zwischen Ruhehörschwelle und Mithörschwelle werden verdeckt. Somit bleiben alle Töne im schraffierten Bereich unhörbar, der einen ganz erheblichen Teil der Hörfläche einnimmt.

Aus weiteren Experimenten ist bekannt, dass die Form der Mithörschwelle vom Pegel abhängt. Zwar ist die „untere Flanke“ der Mithörschwelle vom Pegel nahezu unabhängig und steigt stets mit etwa 27 dB pro Bark an. An der „oberen Flanke“ zeigt sich jedoch eine ausgeprägte Pegelabhängigkeit: Während bei kleinen Pegeln die Mithörschwelle auf der Frequenzgruppenskala nahezu symmetrisch ist, wird die obere Flanke mit wachsendem Pegel immer flacher. Man bezeichnet diese Erscheinung als „nichtlineare Auffächerung“ der oberen Flanke. Diese nimmt unter Umständen beträchtliche Ausmaße an. So kann die Verdeckungswirkung bei hohen Frequenzen um bis zu 5 dB zunehmen, wenn der Pegel des verdeckenden Schalles um nur 1 dB angehoben wird. Dieser Effekt ist in der Analyse-Software nachgebildet, wie sie Valenzuela (1998, 1999a und b) verwendet hat. Die nichtlineare Auffächerung ist – entgegen der Bezeichnung *Nonlinear Masking* – jedoch nicht im Programm *VIPER* (*VIPER 2000*) berücksichtigt, das im Folgenden Verwendung findet.

5.3. Verarbeitung der Schallsignale im Programm *VIPER*

Im Weiteren sind Untersuchungen mit dem genannten Programmsystem beschrieben. Dieses beruht auf den bereits mehrfach zitierten Erkenntnissen nach Zwicker und Feldtkeller (1987) sowie Fastl und Zwicker (2007). In Hinsicht auf die Verarbeitung musikalischer Klänge basiert es auf den Überlegungen, die Terhardt in seinem Buch (1998) zusammen gefasst hat. Die Firma Cortex Instruments GmbH, Regensburg, hat dieses Programmpaket unter dem Namen *VIPER* (*VI*sual *PER*ception of *audio signals*) in den Handel gebracht. Lenski (2007) hat es im Rahmen ihrer Diplomarbeit am Institut für Mechanik dazu genutzt, den Glockenklang zu analysieren, zu reduzieren und zu re-synthetisieren.

Dazu wurde der *VIPER* PerceptualXplorer in Versionen von 1.1 bis 2.12 mit dem Manual zur Version 1.11 (*VIPER* 2000) verwendet. In einem Zeitschriftenartikel hat Lemme (2000) knapp und anschaulich dargelegt, welche Intention mit der Vorgehensweise verfolgt wird. Der erste Schritt besteht in einer Analyse, die mit der Fourier-Zeit-Transformation nach Terhardt (1985) vergleichbar ist. Das Ergebnis wird als „Auditorisches Spektrogramm“ (*Auditory SP*ectrogram, ASP) bezeichnet. Bis zu 600 Frequenzkanäle sind verfügbar und die Zeitauflösung reicht bis zu 1 ms.

An die gehöradäquate Frequenzanalyse schließt sich die Extraktion von „Frequenzkonturen“ (*Frequency Contours*) an, die der von Valenzuela (1998, 1999a) beschriebenen Konturierung entspricht. Es entsteht ein Diagramm, das mit dem Teilton-Zeit-Muster vergleichbar ist. Die Ergebnisse werden dargestellt, wie es Abb. 27 zeigt: Die Zeit läuft nach rechts. Die Ordinate ist mit der Tonheit sowie mit der zugehörigen Frequenz geteilt. Der Pegel ist in Farben kodiert; je heller, desto größer ist der Pegel.

5.4. Analyse des Glockenklanges

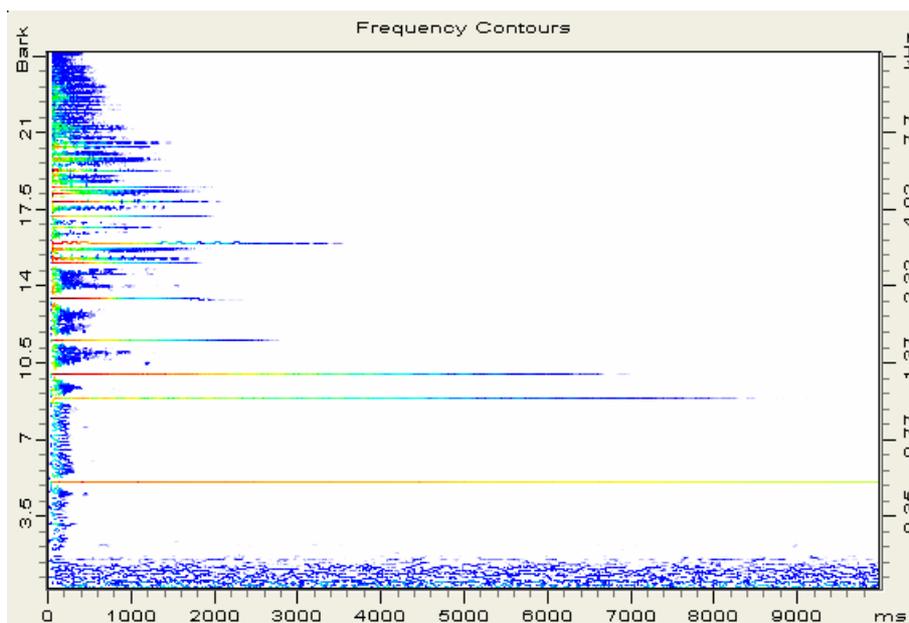


Abb. 27. Frequenzkonturen des Klanges der Perner-Glocke ohne Berücksichtigung der Maskierung nach Lenski (2007), ermittelt mit *VIPER*.

Lenski (2007) hat denselben Glockenklang wie Sattler (2006) analysiert; vgl. Kapitel 4. In Abb. 27 sind in der Darstellung *Frequency Contours* die ersten zehn Sekunden nach dem Anschlagen der Glocke dargestellt. Nach rechts ist die Zeit t in Millisekunden, nach oben sind links die Tonheit z in Bark und rechts die Frequenz f in Kilohertz aufgetragen. Die Farben stehen für verschiedene Pegel. Es sind zahlreiche Signalanteile mit sehr geringem Pegel zu erkennen, die blau eingefärbt sind. So zeigt sich am unteren Rand, d.h. bei tiefen Frequenzen, ein regelloses Rauschband, das von Lüftungsgeräuschen im Laborraum herrührt.

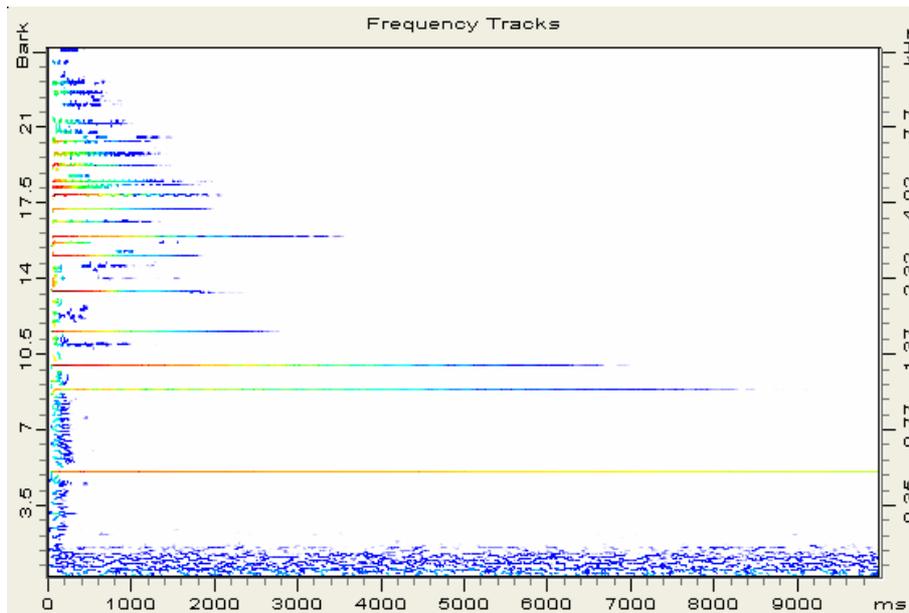


Abb. 28. Frequenzspuren des Kluges der Perner-Glocke ohne Berücksichtigung der Maskierung nach Lenski (2007), ermittelt mit VIPER.

Eine Möglichkeit der Weiterverarbeitung besteht darin, mit der Funktion *Frequency Tracks* Teiltöne von längerer Dauer aufzufinden und von kurzzeitigen, perkussiven Schallanteilen zu trennen. Unterschiede zwischen den Frequenzkonturen in Abb. 27 und den Frequenzspuren in Abb. 28 zeigen sich vor allem beim Anschlag und unmittelbar danach. Ein Ergebnis der später präsentierten Paarvergleiche ist, dass die Versuchspersonen in 30% der Fälle ein Unterschied erkannten, wenn sie Klänge dargeboten bekamen und zu vergleichen hatten, die aus den Frequenzkonturen bzw. den Frequenzspuren resynthetisiert waren. Offenbar wurden so viele der kurzzeitigen Schallanteile, die den Anschlag wesentlich bestimmen, durch die Funktion *Frequency Tracks* weggenommen, dass in einigen Fällen ein Unterschied erkennbar war.

Modifizierte Frequenzkonturen desselben Glockenkluges sind in Abb. 29 wiedergegeben. Im Gegensatz zum ursprünglichen Analyseergebnis von Abb. 27 ist nun die Funktion *Nonlinear Masking* aktiviert. Der Vergleich mit den beiden vorhergehenden Diagrammen zeigt, dass die meisten der Signalanteile mit geringem Pegel ausgeblendet werden, da sie unterhalb der Schwelle bleiben. Dies gilt auch für die tieffrequenten Umgebungsgeräusche. Das Bild wirkt dadurch „bereinigt“, dass einige der schwachen Teiltöne infolge der Maskierung verdeckt werden und demzufolge auch nicht mehr visualisiert sind. Als Ergebnis der Hörversuche sei vorweg genommen, dass lediglich in 10% der Fälle ein Unterschied detektiert wurde, wenn Versuchspersonen die resynthetisierten Klänge von Fig. 27 und Fig. 29 miteinander zu vergleichen hatten. Daraus kann geschlossen werden, dass in Abb. 29 gegenüber Abb. 27 nur solche Information weggelassen ist, die für das Hören tatsächlich unerheblich ist.

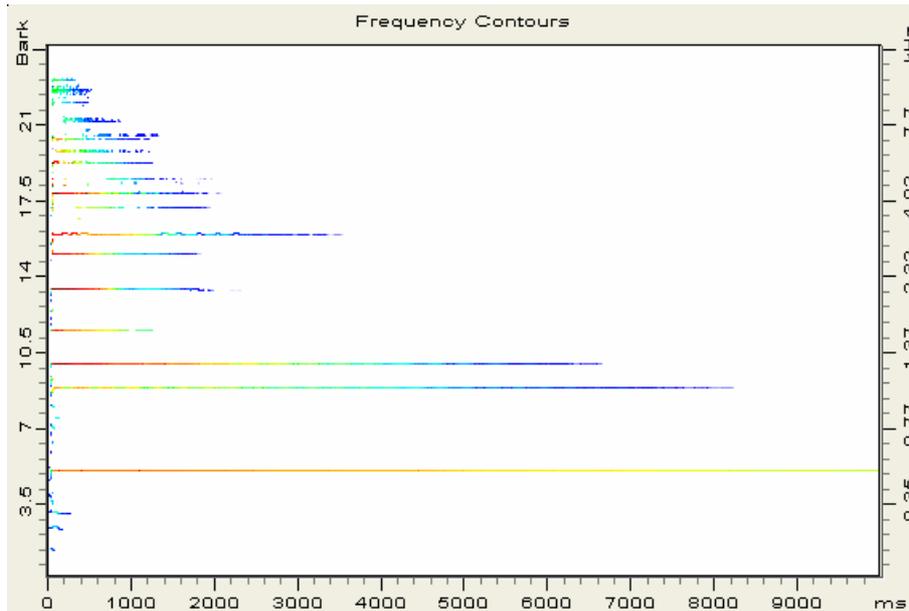


Abb. 29. Frequenzkonturen des Klanges der Perner-Glocke mit Berücksichtigung der Maskierung nach Lenski (2007), ermittelt mit VIPER.

5.5. Zusammenfassende Bemerkung

Einige Eigenschaften des Gehörs, die in umfassenden psychoakustischen Versuchsreihen (Zwicker und Feldtkeller 1967, Fastl und Zwicker 2007) untersucht worden waren, erweisen sich für die Signalanalyse als äußerst wichtig. Sie sollten in einem gehörbezogenen Verfahren unbedingt berücksichtigt werden. Es sind dies vor allem

- das spektrale Auflösungsvermögen des Gehörs, wie es durch die Bark-Skale beschrieben wird und
- der Maskierungseffekt, der bestimmte Spektralanteile unwirksam werden lässt. Diese Anteile wären zwar physikalisch vorhanden, messtechnisch auch nachweisbar, für das Hören jedoch irrelevant.

Beide Effekte werden von rein physikalisch motivierten Analyseverfahren naturgemäß nicht erfasst. Es existieren jedoch Methoden, die Eigenschaften des Gehörs in dieser Hinsicht so weit nachzubilden, dass ein Schallsignal in ähnlicher Weise wie beim Hören spektral aufgelöst und überdies irrelevante von relevanter Information getrennt werden kann. Auf einem solchen Verfahren basiert die Analyse, deren Ergebnis in Abb. 19 präsentiert worden war.

Eine andere Software wird unter dem Namen *VIPER* kommerziell vertrieben. Trotz gewisser Unzulänglichkeiten stellt sie ein vielseitiges Werkzeug dar, mit dem sich der Glockenklang gründlich analysieren und darüber hinaus manipulieren lässt. In diesem Zusammenhang sei auf das Folgende hingewiesen:

- Im Programm ist die Möglichkeit vorgesehen, zunächst das Auditorische Spektrogramm zu bestimmen. Die Maxima werden gefunden und dargestellt, was zu den Frequenzkonturen (Abb. 27) führt und die Teiltöne sowie perkussive Anteile sichtbar macht. Durch Verfolgung und Darstellung länger anhaltender Frequenzspuren (Abb. 28) lassen sich Töne von Anteilen kurzer Dauer trennen.
- Die Funktion *Nonlinear Masking* unterdrückt schwache Schallanteile, die infolge der Maskierung verdeckt werden und unhörbar sind (Abb. 29). Letztlich soll nur noch diejenige Informa-

tion erhalten bleiben und dargestellt werden, die für das Hören tatsächlich erheblich ist. Somit ist eine gehörbezogenen Analyse in unterschiedlichen Abstufungen möglich.

- Es bestehen weitreichende Möglichkeiten des Editierens, mit deren Hilfe es beispielsweise gelingt, Frequenzen und Amplituden von Teiltönen zu verändern.
- Die Rolle der einzelnen Teiltöne auf die Hörwahrnehmung lässt sich dadurch untersuchen, dass modifizierte Signale resynthetisiert und mit anderen verglichen werden können.

Ohne Zweifel stellt die Vorgehensweise, bei der Analyse die Eigenschaften des Gehörs zu berücksichtigen, bereits einen ersten Schritt in Richtung einer zielführenden Informationsreduktion dar. Dies hat schon Sattler (2006) gezeigt, als er aus den dreißig nachweisbaren Komponenten diejenigen fünfzehn Teiltöne extrahiert hat, die für die Hörwahrnehmung wesentlich sind. Im vorliegenden Zusammenhang ist besonders wichtig, dass das verwendete Programm vielfältige Möglichkeiten zur Verfügung stellt, das Analysematerial weitergehend zu manipulieren. Lenski (2007) hat dies dazu genutzt, die physikalische Information Schritt für Schritt zu reduzieren und die Auswirkungen auf das Hören experimentell zu untersuchen.

6. SPEKTRALE REDUKTION VON GLOCKENKLÄNGEN

Durch Resynthese mit *VIPER* entstanden Klänge mit unterschiedlichem Teiltongehalt, die in psychoakustischen Experimenten von Versuchspersonen unter mehreren Gesichtspunkten zu bewerten waren. Auf diese Weise hat Lenski (2007) untersucht, welche Bestandteile des Glockenklanges für die Hörempfindung tatsächlich von Belang sind. Für die Hörversuche standen zehn Personen im Alter zwischen 20 und 61 Jahren zur Verfügung. Verschiedene Fragestellungen wurden bearbeitet, auf die im Folgenden einzeln eingegangen wird.

6.1. Allgemeines zu den Schallsignalen

Bei den Versuchen wurden resynthetisierte *VIPER*-Signale verwendet. Ausgangsmaterial der Resynthese waren die originalen Frequenzkonturen (z.B. Abb. 27), die Frequenzkonturen mit Maskierung (z.B. Abb. 29), die Frequenzspuren (z.B. Abb. 28) sowie daraus abgeleitete Spektrogramme. Die entsprechenden WAV-Dateien wurden mit der Software *iTunes* der Firma Apple diotisch über Kopfhörer Sennheiser HD 437 dargeboten. Der Wiedergabepegel war 80 dB (bezogen auf das freie Schallfeld). Im Rahmen eines Vorversuchs wurde die Darbietung in einem Laborraum und im schallgedämmten, reflexionsarmen Raum des Instituts für Mechanik erprobt. Die Hörversuche erbrachten keine signifikant unterschiedlichen Ergebnisse. Daraufhin wurden die Experimente nur noch in normaler Laborumgebung durchgeführt.



Abb. 30. Editierte Paarung der Klänge 01-04 in Adobe Audition nach Lenski (2007).

Für die Versuche wurden die WAV-Dateien mit dem Programm *Adobe Audition* editiert. Die Klänge wurden auf drei Sekunden Dauer verkürzt, für die Paarvergleiche zu Paaren zusammen gestellt und in die gewünschte Reihenfolge gebracht. Die Pause zwischen den Klängen betrug eine Sekunde. Abb. 30 zeigt ein Beispiel. Die Versuchsperson hatte über die Tastatur eines Rechners jedes Paar abzurufen. Sie konnte die Wiedergabe so oft wiederholen, bis sie sich ihres Urteils sicher war. Ihr

Urteil trug sie per Hand in ein Formular ein. Bei weiteren Versuchen (Abschnitt 6.6) wurden Einzelschalle verwendet, deren Reihenfolge randomisiert war.

6.2. Paarvergleiche zur Unterscheidbarkeit

Tab. VI: Klänge des ersten Hörversuchs bei normaler Frequenzlage

Klang Nr.	Bezeichnung	Art der Manipulation
01	FC	Aus den <i>Frequency Contours</i> (20 Hz bis 16000 Hz) des Originalklanges resynthetisiert
02	FCm	FC mit zusätzlich aktiviertem <i>Nonlinear Spectral Masking</i>
03	FCm 20-7000 Hz	FCm nur im Bereich von 20 Hz bis 7000 Hz resynthetisiert
04	FCm 500-3400 Hz	FCm nur im Bereich von 500 Hz bis 3400 Hz resynthetisiert
05	FCmd	Nur tonale Konturen ab ca. 45 dB resynthetisiert
06	FCmd Prinzipalbereich	Suboktave, Prime, Terze, Quinte und Oberoktave resynthetisiert
07	FCmd 500-6000 Hz	FCmd nur im Bereich von 500 Hz bis 6000 Hz resynthetisiert
08	FCmd 20-6000 Hz	FCmd nur im Bereich von 20 Hz bis 6000 Hz resynthetisiert
09	FCmd 500-5000 Hz	FCmd nur im Bereich von 500 Hz bis 5000 Hz resynthetisiert
10	FCmd 400-5000 Hz	FCmd nur im Bereich von 400 Hz bis 5000 Hz resynthetisiert
11	FCmd ohne Suboktave	Elimination der Suboktave
12	FCmd ohne Prime	Elimination der Prime
13	FCmd ohne Terze	Elimination der Terze
14	FCmd ohne Quinte	Elimination der Quinte
15	FCmd ohne Oberoktave	Elimination der Oberoktave
16	FT all Tracks	Aus den <i>Frequency Tracks</i> (20 Hz bis 16000 Hz) des Originalklanges resynthetisiert
17	FT 20-7000 Hz	FT nur im Bereich von 20 Hz bis 7000 Hz resynthetisiert
18	FT Subokt./Oberokt.	Vertauschung der Kontur der Suboktave mit derjenigen der Oberoktave
19	Originalklang	Keine Manipulation oder Resynthese des Klanges mit <i>VIPER</i>

Im ersten Hörversuch hat Lenski (2007) die Testklänge von Tab. VII verwendet. Sie hat Paare von Klängen miteinander vergleichen lassen. Als Referenz diente dabei immer der Klang Nr. 01, d.h. der aus den vollständigen Frequenzkonturen (*Frequency Contours*; vgl. Abb. 27) resynthetisierte Klang. Die verwendeten neunzehn Paarungen sind in Tab. VI zusammen gestellt. Die Reihenfolge Testschall-Referenzschall war in den einzelnen Paaren unterschiedlich.

Im ersten Versuch hatten die Probanden die Frage zu beantworten: **Ist ein Unterschied zwischen den zwei Glockenklängen des Paares wahrnehmbar?** Beobachtete Unterschiede konnten sie zusätzlich verbal beschreiben.

Tab. VII: Paarungen des ersten Hörversuchs bei normaler Frequenzlage

Paarung Klänge Nr.	01-04	01-02	01-09	12-01	01-01	01-13	01-10
Nummer des Paares	#01	#02	#03	#04	#05	#06	#07

Paarung Klänge Nr.	14-01	01-16	01-15	19-01	01-17	11-01	01-03
Nummer des Paares	#08	#09	#10	#11	#12	#13	#14

Paarung Klänge Nr.	01-08	07-01	01-06	01-05	01-18
Nummer des Paares	#15	#16	#17	#18	#19

Die Ergebnisse (eine Auswahl findet sich in Abb. 31) lassen sich folgendermaßen beschreiben:

- Im Paar #11 waren der Referenzklang Nr. 01 und der unbearbeitete Originalklang Nr. 19 zu vergleichen. Der Unterschied war in 60% der Fälle wahrnehmbar. Höchstwahrscheinlich durch die Resynthese wurde der Klang gegenüber dem Original soweit geändert, dass die Versuchspersonen in mehr als der Hälfte aller Fälle Unterschiede wahrnehmen konnten. Aus diesem Grund erwies es sich als zweckmäßig, bei den weiteren Experimenten nicht den Originalklang, sondern den resynthetisierten Klang Nr. 01 (vgl. z.B. Abb. 27) als Referenz zu verwenden.
- Wurde der Referenzklang Nr. 01 mit sich selbst verglichen (Paar #05), glaubten die Versuchspersonen in 20% aller Fälle einen Unterschied zu erkennen. Eine vollständig sichere Unterscheidbarkeit von hörbaren und unhörbaren Manipulationen war demnach unter den vorliegenden Bedingungen nicht zu erwarten.
- Wie bereits in Abschnitt 5.4 erwähnt, wurde im Paar #02 zwischen dem Referenzklang Nr. 01 und dem infolge von Maskierung reduzierten Testklang Nr. 02 (vgl. Abb. 29 und 33) ein Unterschied in lediglich 10% aller Fälle wahrgenommen. Die große Ähnlichkeit der beiden Klänge, die dabei erkennbar wird, lässt darauf schließen, dass das *Spectral Masking* tatsächlich ausschließlich solche Schallkomponenten eliminiert, welche für die Hörempfindung irrelevant sind.

- Die gegenüber *Frequency Contours* (Referenzklang Nr. 01) weitergehende Informationsreduktion *Frequency Tracks* (Testklang Nr. 16; vgl. Abb. 28 und 34) eliminiert offenbar in geringem Maße auch Schallanteile, die zu einer Hörwahrnehmung führen können. Beim Paar #09 war in 30% aller Fälle ein Unterschied wahrzunehmen.

Wahrnehmung eines Unterschiedes im Paarvergleich

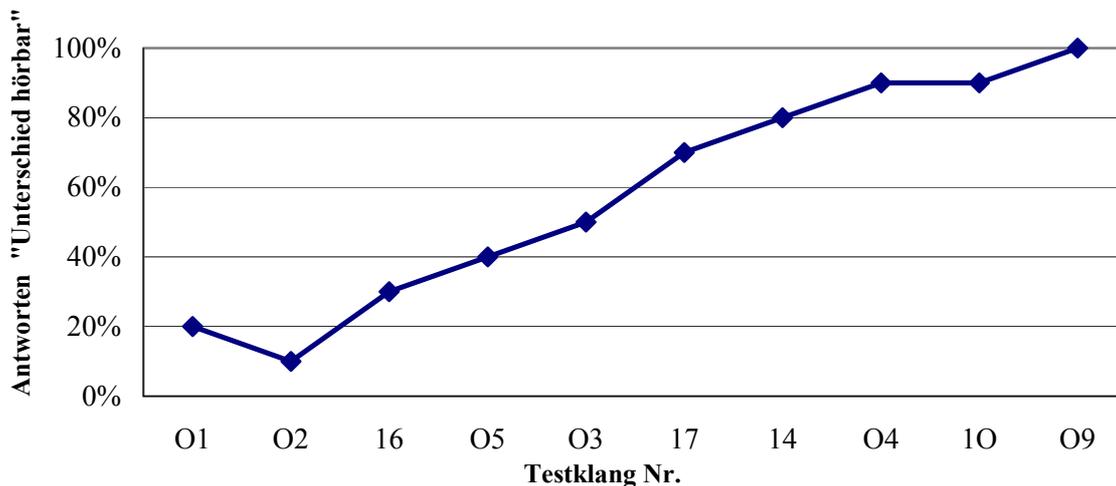


Abb. 31. Relative Häufigkeit der Beurteilungen, ob bei normaler Frequenzlage zwischen den Klängen des Paares beim Vergleich mit dem Referenzklang Nr. 01 ein Unterschied wahrnehmbar ist.

- Bei zwei weiteren Paaren wurden Unterschiede in höchstens der Hälfte der Fälle erkannt. Es sind dies Paar #18 (Referenz Nr. 01 und Testklang Nr. 05; Erkennungsrate 40%; vgl. Abb. 35) und Paar #14 (Referenz und Testklang Nr. 03; Unterscheidungsrate 50%). Ein Blick in Tab. VI zeigt, dass im ersten Fall alle schwachen tonalen Komponenten weggelassen wurden. Im zweiten Fall war das Band der resynthetisierten Frequenzen auf 7 kHz beschnitten. Offenbar beeinflussen beide Modifikationen den Höreindruck so wenig, dass sie nicht allzu häufig erkannt werden.
- Bei allen anderen Paaren waren Unterschiede in mindestens 70% aller Fälle, häufig sogar in jedem Fall erkennbar. Insbesondere zeigte sich, dass die Elimination von einzelnen Tönen des Prinzipalbereichs (Testklänge Nr. 11 bis 15) immer zu 100% wahrgenommen wurde. Lediglich beim Paar #08 mit dem Testklang Nr. 14 hörten die Probanden in 20% aller Fälle keinen Unterschied. Von allen Tönen im Prinzipalbereich scheint bei der hier untersuchten Glocke die Quinte am wenigsten Bedeutung zu haben.

Zum leichteren Vergleich sind die Spektrogramme für die drei Klänge, die in weniger als der Hälfte aller Fälle vom Referenzklang Nr. 01 (Abb. 32) unterschieden werden konnten, samt dem Referenzklang auf derselben Seite zusammen gestellt. Alle enthalten offenbar den spektralen Kern, der den betrachteten Klang weitestgehend definiert. Die Unterscheidungsraten im Vergleich zum Referenzklang Nr. 01 liegen zwischen 10% (Abb. 33) und 40% (Abb. 35).

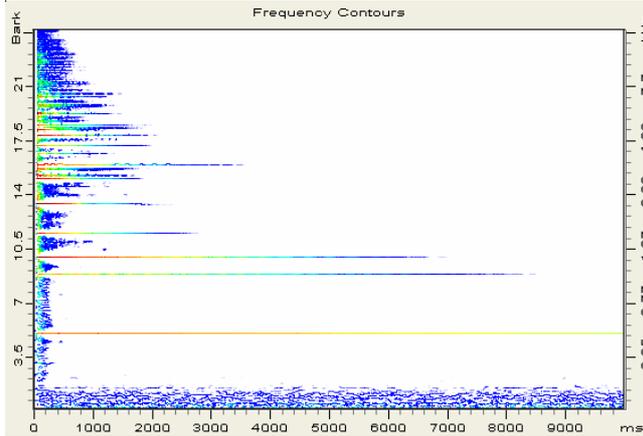


Abb. 32. Referenzklang Nr. 01 (FC), resynthetisiert aus den Frequency Contours (20 Hz bis 16 kHz) des Originalklangs.

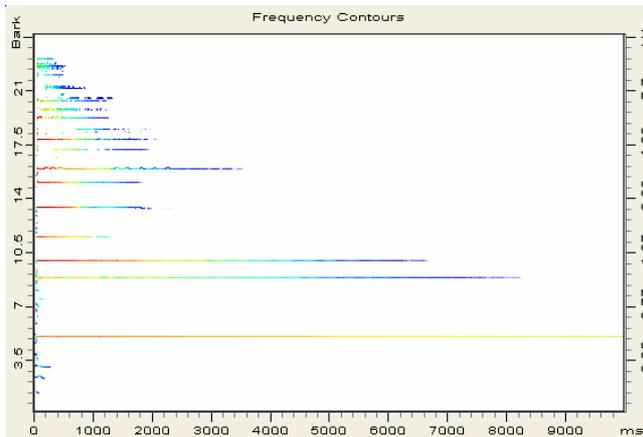


Abb. 33. Testklang Nr. 02 (FCm), resynthetisiert aus den Frequency Contours (20 Hz bis 16 kHz) mit Nonlinear Spectral Masking; Unterscheidungsrate 10%.

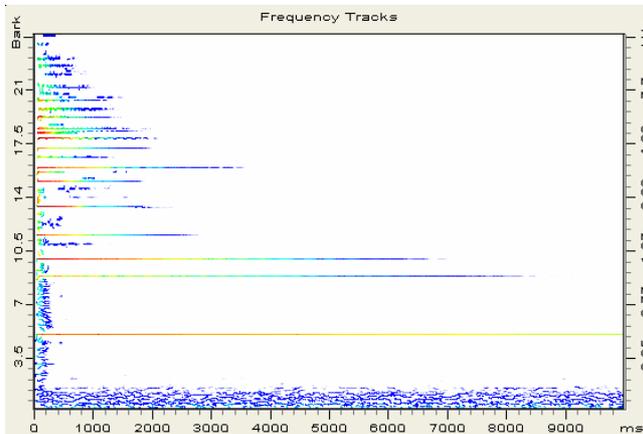


Abb. 34. Testklang Nr. 16 (FT all Tracks), resynthetisiert aus allen Frequency Tracks (20 Hz bis 16 kHz); Unterscheidungsrate 30%.

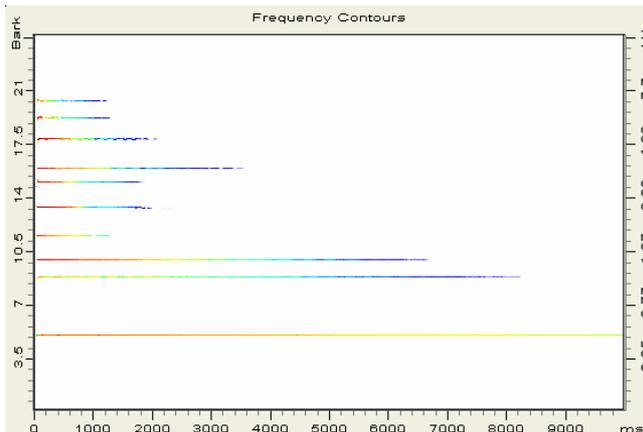


Abb. 35. Testklang Nr. 05 (FCmd), resynthetisiert aus den tonalen Komponenten oberhalb von 45 dB der Frequency Contours (20 Hz bis 16 kHz) mit Nonlinear Spectral Masking; Unterscheidungsrate 40%.

6.3. Unterscheidbarkeit bei erhöhter Frequenzlage

Um zu überprüfen, inwiefern sich die gewonnenen Erkenntnisse auf andere Frequenzlagen übertragen lassen, wurden Hörversuche zunächst mit Klängen durchgeführt, die zu höheren Frequenzen hin verschoben worden waren. Dies war dadurch erreicht worden, dass bereits mehr oder weniger manipulierten Glockenklänge gemäß Tab. VI mit der Software *Adobe Audition* transponiert wurden. Mittels der Option „*Double Speed*“ wurden die Klänge doppelt so schnell ausgelesen und damit hinsichtlich der Frequenzen um den Faktor zwei, d.h. um eine Oktav erhöht. Das transponierte Schallsignal wurde abschließend resynthetisiert. Die Dauern von Klang bzw. Pause wurden wie im ersten Versuch auf drei bzw. eine Sekunde eingestellt.

Tab. VIII: Paarungen des zweiten Hörversuchs bei erhöhter Frequenzlage (Kennzeichnung h)

Paarung Klänge Nr. (Bezeichnung gem. Tab. VI)	Unterschied hörbar In normaler Lage	Neue Bezeichnung des nach oben transponierten Paares
01 – 01 (FC)	20%	h01
01 - 02 (FCm)	10%	h03
01 – 16 (FT all Tracks)	30%	h05
01 – 05 (FCmd)	40%	h07
01 – 03 (FCm 20-7000 Hz)	50%	h09
01 – 17 (FT 20-7000 Hz)	70%	h08
01 – 14 (FCmd ohne Quinte)	80%	h06
01 – 10 (FCmd 400-5000 Hz)	90%	h04
01 – 04 (FCm 500-3400 Hz)	90%	h10
01 – 06 (FCmd Prinzipalber.)	100%	h02

Sofern ausschließlich von transponierten Klängen die Rede ist, wird im Folgenden der Zusatz H vor die Bezeichnungen der einzelnen Klänge gestellt. Als Referenz bei den Paarvergleichen diene immer der aus den *Frequency Contours* zwischen 20 Hz und 16000 Hz resynthetisierte und anschließend transponierte Originalklang. Dies ist im hier beschriebenen Versuch der nach oben transponierte Klang Nr. H01. Die Testklänge, mit denen er zu vergleichen war, wurden aufbauend auf den Resultaten des ersten Hörversuchs ausgewählt. Sie sollten die ganze Spanne überstreichen, die sich bei normaler Frequenzlage zwischen geringer und vollständiger Unterscheidbarkeit ergeben hatte. Sehr stark „verstümmelte“ Klänge, die sich beim ersten Durchgang bereits eindeutig vom Vergleichsklang unterschieden, blieben bei diesem Versuch außer Betracht. Tab. VIII zeigt die Paare. In der zweiten Spalte ist die Unterscheidbarkeit vermerkt, wie sie der erste Hörversuch für die nor-

male Frequenzlage (Abschnitt 6.2) ergeben hatte. Die neue Bezeichnung des Paares ist in der dritten Spalte angegeben, wobei das kleine h für *high* steht.

Die Ergebnisse für die Frage: „Ist ein Unterschied zwischen den zwei Glockenklängen des Paares wahrnehmbar?“ sind in Abb. 36 zusammen gestellt (blau) und mit den Resultaten für normale Frequenzlage (rot) verglichen. Es zeigte sich eine ähnliche Tendenz. Jedoch wurden Manipulationen des Teiltonspektrums in der höheren Frequenzlage seltener wahrgenommen als bei normaler Lage. Dass dabei keine 0%- bzw. 100%-Aussagen zu erwarten sind, zeigt sich beispielsweise darin, dass beim Paar h01 der Referenzklang mit sich selbst verglichen wurde und trotzdem eine Versuchsperson einen Unterschied wahrzunehmen meinte. Der Übergang zwischen geringer und deutlicher Unterscheidbarkeit verläuft sprunghaft. Die Klänge in den ersten sechs Paaren wurden in 10% bis 20% der Fälle, also äußerst selten, als unterschiedlich beurteilt. Dagegen waren die Unterschiede in den Klängen der letzten vier Paare in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle (70% bis 80%) erkennbar.

Wahrnehmung eines Unterschiedes im Paarvergleich: Normale Frequenzlage/erhöhte Frequenzlage

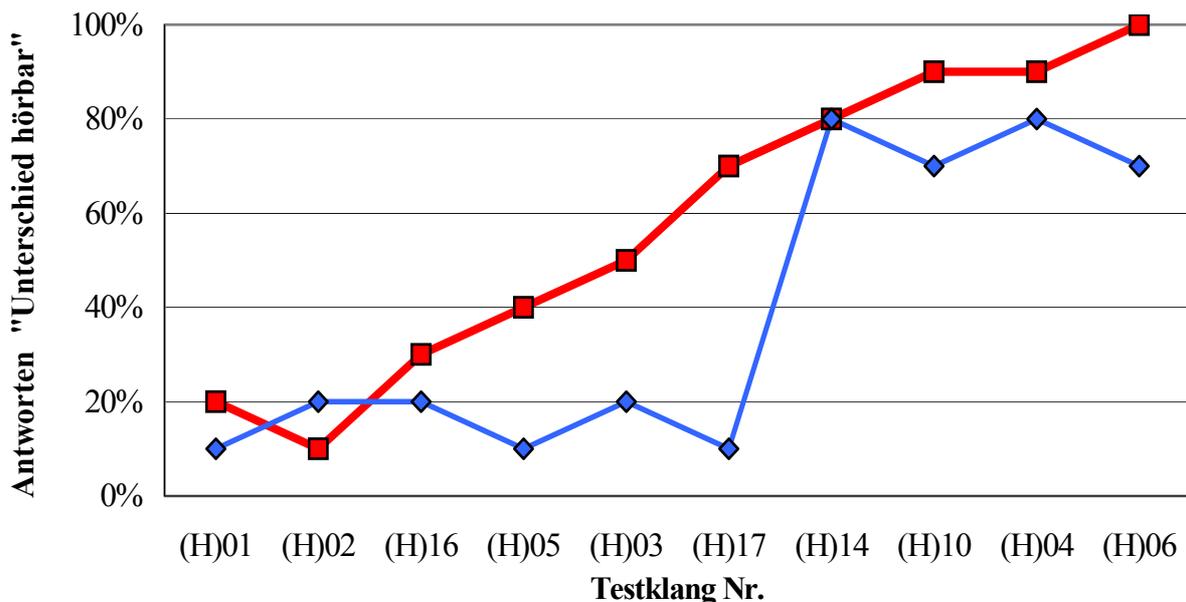


Abb. 36. Relative Häufigkeit der Beurteilungen, ob zwischen den Klängen des Paares ein Unterschied zum Referenzklang H01 wahrnehmbar ist.

Rote Quadrate: normale Frequenzlage; blaue Rauten: erhöhte Frequenzlage.

Der Grund liegt darin, dass bei den Paaren mit den transponierten Testklängen Nr. H02 (FCm), Nr. H16 (FT all Tracks), Nr. H05 (FCmd), Nr. H03 (FCm 20-7000 Hz) und Nr. H17 (FT 20-7000 Hz) die wesentlichen Manipulationen sich im hochfrequenten Bereich oberhalb von $2 \cdot 7 \text{ kHz} = 14 \text{ kHz}$ abspielen. Offenbar waren die meisten Versuchspersonen nicht in der Lage, bei derart hohen Frequenzen Unterschiede zu detektieren. Wie bereits erwähnt, wurde beim Paar h01 zu Testzwecken der Referenzklang Nr. H01 (FC) mit sich selbst verglichen worden. Da auch hier eine Person Unterschied erkannt zu haben glaubte, kann in Hinsicht auf die anderen Ergebnisse zwischen 10% und 20% ausgesagt werden, dass die hier vorliegenden Manipulationen bei sehr hohen Frequenzen nicht hörbar werden. Dies entspricht der Erwartung.

War dagegen - wie im transponierten Paar h06 - aus dem Testklang Nr. H14 die Quinte entfernt, die bei nunmehr 3218 Hz lag, dann war dies im selben Maße wie in der normalen Frequenzlage wahrnehmbar. Beim Paar h04 dürfte ein Unterschied deshalb hörbar geworden sein, weil im transponierten Testklang Nr. H10 Anteile oberhalb von $2 \cdot 5 \text{ kHz} = 10 \text{ kHz}$ weggelassen waren. Dies galt ebenso für das Paar h10; im transponierten Testklang Nr. H04 waren Anteile oberhalb von $2 \cdot 3,4 \text{ kHz} = 6,8 \text{ kHz}$ entfernt. In noch höherem Maße traf dies für das Paar h02 zu. Der Testklang H06 bestand hier lediglich aus den Teiltönen des Prinzipalbereichs, d.h. aus Suboktave, Prime, Terze, Quinte und Oberoktave. Diese füllten im transponierten Signal den Bereich von 1024 Hz bis 4030 Hz. Es war offenbar leicht zu detektieren, wenn die darüber liegenden Anteile weggelassen wurden.

Insgesamt zeigt dieser Hörversuch, dass eine Verschiebung des Teiltönspektrums zu hohen Frequenzen hin in aller Regel zur Folge hat, dass das Gehör etwas „toleranter“ gegenüber dem Weglassen von Teiltönen wird. Offenbar liegt das originale Klangspektrum der untersuchten Glocke in derjenigen Frequenzlage, in der das Gehör besonders leistungsfähig ist. Bekanntlich steigt die Ruhehörschwelle zu hohen Frequenzen stark an, was sich mit zunehmendem Lebensalter einer Person noch verstärkt. Wird das Spektrum eine Oktav nach oben transponiert, können Merkmale, die vorher zur Unterscheidung genutzt wurden, unhörbar werden. Bei einer sehr hoch gestimmten Glocke kommt den höheren Teiltönen demnach keine so große Bedeutung mehr zu, wie bei der hier untersuchten Glocke in normaler Frequenzlage.

6.4. Unterscheidbarkeit bei erniedrigter Frequenzlage

In einem analogen Experiment sollte untersucht werden, inwiefern sich die bisher vorliegenden Resultate auf tiefere Frequenzlagen übertragen lassen. Dazu wurden Klängen verwendet, die mit Hilfe der Software *Adobe Audition* nach unten transponiert worden waren. Mit der Option „*Slow Down*“ wurden die mehr oder weniger manipulierten Klänge halb so schnell ausgelesen und damit hinsichtlich der Frequenzen um den Faktor zwei, d.h. um eine Oktav nach unten verschoben. Die Zeitdauer verdoppelt sich dabei. Klang- und Pausendauer wurde nachträglich den Verhältnissen im ersten Hörversuch angepasst. Die Paarungen entsprechen denen des Versuchs, der im vorhergehenden Abschnitt beschrieben ist. In Tab. VIII ist in der letzten Spalte bei der Kennzeichnung der Paare lediglich ein l (für *low*) an die Stelle von h (für *high*) zu setzen.

Sobald von den nach unten transponierten Einzelklängen die Rede ist, wird im Folgenden ein großes L vor die Bezeichnungen des jeweiligen Klanges gestellt. Als Referenz diente immer der aus den *Frequency Contours* von 20 Hz bis 16000 Hz resynthetisierte und dann transponierte Klang Nr. L01. Die Testklänge, mit denen er zu vergleichen war, sind durch Transponieren aus den manipulierten und resynthetisierten Klängen entstanden, die in den Paarungen der ersten Spalte von Tab. VIII genannt sind. In Abb. 37 zeigen die **grünen** Symbole die Ergebnisse für die nach unten transponierten Signale bei der Beantwortung der Frage: „**Ist ein Unterschied zwischen den zwei Glockenklängen des Paares wahrnehmbar?**“. Zum Vergleich sind **rot** diejenigen für die normale Frequenzlage eingezeichnet.

In einigen wenigen Fällen (Klänge Nr. L02, L03 und L04) waren Unterschiede bei der tieferen Frequenzlage um 10% bis höchstens 20% besser wahrzunehmen als in der normalen Frequenzlage. Die drei zugehörigen Testschalle sind dadurch entstanden, dass bei normaler Frequenzlage die spektrale Maskierung berücksichtigt worden ist. Das Gehör benutzt bei tiefen Frequenzlagen jedoch eine andere Frequenzauflösung als bei mittleren Frequenzlagen; siehe hierzu z.B. die Frequenzgruppenbreite gemäß Abb. 12. Höchstwahrscheinlich entspricht eine bloße Halbierung sämtlicher Frequenzen im bereits reduzierten Signal nicht dem, was hinsichtlich der Verdeckung beim Hören in tiefen Frequenzlagen vorgeht. In mehreren Fällen zeigte sich das Gehör in der tiefen Frequenzlage jedoch „toleranter“ gegenüber Modifikationen der Klänge. Deutlich seltener wurden Unterschiede detek-

tiert, wenn mit dem Referenzschall Nr. L01 die Klänge Nr. L16, L14 und L06 verglichen wurden. Überhaupt nicht erkannt wurde die Reduktion von den *Frequency Contours* (Klang Nr. L01) auf die *Frequency Tracks* (Klang Nr. L16). Auch wenn daraus noch die - hier schwach ausgeprägte - Quinte entfernt wurde (Klang Nr. L14), führte dies nur in der Hälfte aller Fälle zu einem wahrnehmbaren Unterschied. Etwas häufiger als zur Hälfte erkannten die Versuchspersonen, wenn nur die fünf Teiltöne des Prinzipalbereichs, also Suboktave, Prime, Terze, Quinte und Oberoktave mit dem Referenzklang zu vergleichen waren. In der mittleren Frequenzlage hatten noch ausnahmslos sämtliche Versuchspersonen einen Unterschied bemerkt.

Wahrnehmung eines Unterschiedes im Paarvergleich: Normale Frequenzlage/erniedrigte Frequenzlage

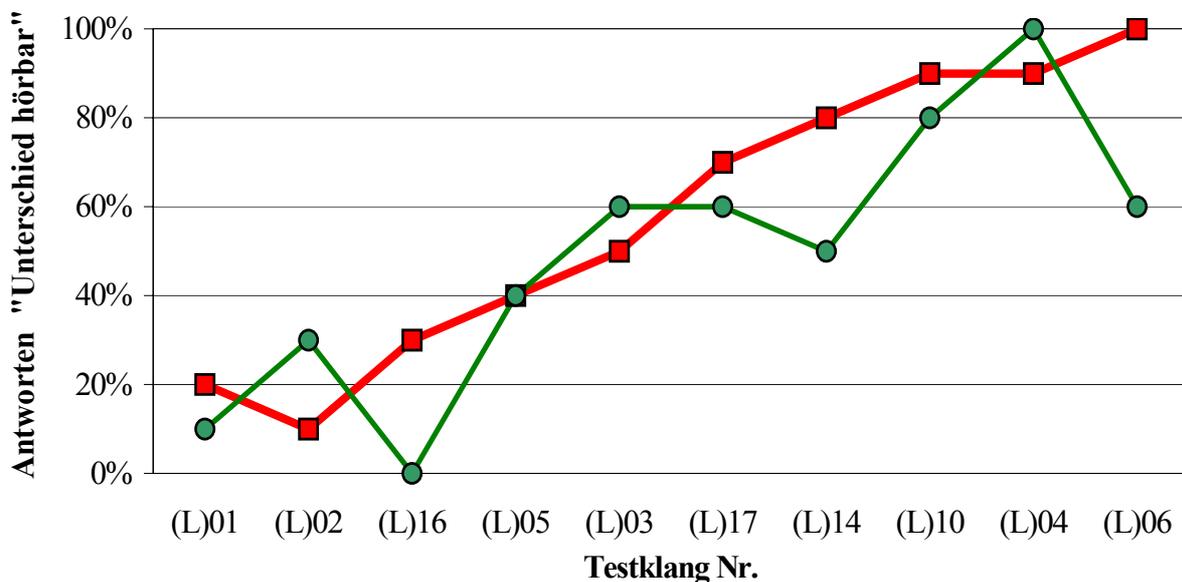


Abb. 37. Relative Häufigkeit der Beurteilungen, ob zwischen den Klängen des Paares ein Unterschied zum Referenzklang T01 wahrnehmbar ist.
Rote Quadrate: normale Frequenzlage; grüne Kreise: erniedrigte Frequenzlage.

Dieser Hörversuch zeigt, dass eine Verschiebung des Teiltönspektrums zu tiefen Frequenzen hin in einigen Fällen Manipulationen deutlicher hörbar macht. Häufiger bewirkt diese Verschiebung jedoch, dass das Gehör toleranter gegenüber dem Weglassen wird. Es bestätigt sich der globale Eindruck des vorherigen Versuchs: Offenbar liegt das originale Spektrum der Glocke in einer Frequenzlage, in der das Gehör besonders viel zu leisten vermag und deshalb besonders „kritisch“ urteilt. Bekanntlich steigt die Ruhehörschwelle nicht nur zu hohen, sondern vor allem auch zu tiefen Frequenzen hin an. Wird das Spektrum eine Oktav nach unten transponiert, wirkt zudem möglicherweise die Verdeckung in einem weiteren Bereich. Dadurch können Merkmale, die bei mittleren Frequenzlagen zur Unterscheidung genutzt wurden, wirkungslos gemacht werden. Der hier beschriebene Versuch deutet darauf hin, dass bei einer tief gestimmten Glocke hohen Teiltönen eventuell nicht ganz die Bedeutung zukommt, die sie in mittlerer Frequenzlage haben. Jedoch sollten die Ergebnisse der schlichten Verdoppelung bzw. Halbierung der Frequenzen nicht überbewertet werden. Es ist denkbar, dass eine andere Vorgehensweise (zuerst transponieren, anschließend analysieren und erst dann das Spektrum manipulieren) zu anderen Aussagen geführt hätte.

6.5. Unterscheidbarkeit bei anderen Versuchsbedingungen

Um zu überprüfen, inwieweit die bisher gefundenen Ergebnisse von den gewählten Versuchsbedingungen abhängen, hat Lenski (2007) einige ergänzende Untersuchungen durchgeführt. Dafür hat sie drei Testklänge ausgesucht, für die im ersten Hörversuch mittlere bis hohe Erkennungsraten beobachtet worden waren. Wiederum war die Frage zu beantworten: „**Ist ein Unterschied zwischen den zwei Glockenklängen des Paares wahrnehmbar?**“

6.5.1. Verwendete Testklänge

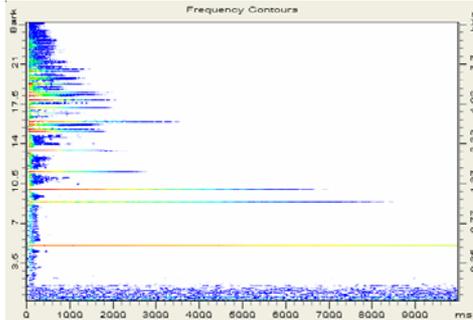


Abb. 38. Referenzklang Nr. 01 (FC).

- Wie in den bisherigen Versuchen wurde als Referenz der Klang Nr. 01 (FC) gemäß Abb. 38 verwendet, der aus sämtlichen *Frequency Contours* zwischen 20 Hz und 16 kHz besteht.

In den orientierenden Untersuchungen wurden damit folgende Klänge verglichen:

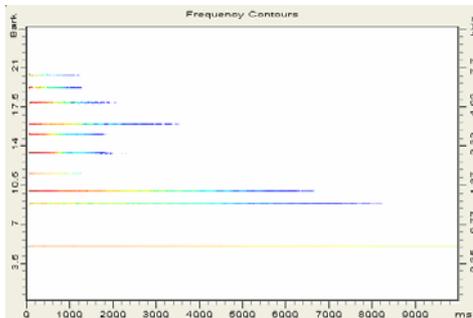


Abb. 39. Klang Nr. 05 (FCmd).

- Klang Nr. 05 (FCmd) gemäß Abb. 39, resynthetisiert aus den *Frequency Contours* unter Berücksichtigung der Maskierung, wobei sämtliche tonalen Komponenten mit Pegeln oberhalb von 45 dB verwendet wurden.

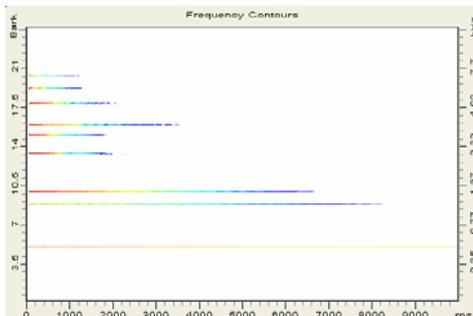


Abb. 40. Klang Nr. 14 (FCmd ohne Quinte).

- Klang Nr. 14 (FCmd ohne Quinte). Wie Klang Nr. 05 besteht er aus den *Frequency Contours* unter Berücksichtigung der Maskierung. Es wurden die tonalen Komponenten oberhalb von 45 dB resynthetisiert; wobei die Quinte weggelassen wurde. Abb. 40 zeigt das Spektrogramm.

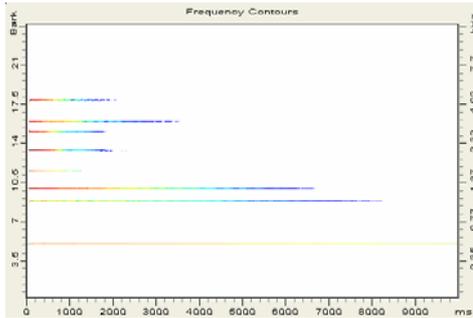


Abb. 41. Klang Nr. 10 (FCmd 400 – 5000 Hz).

- Klang Nr. 10 (FCmd 400 – 5000 Hz). Dieser besteht, wie Abb. 41 zeigt, aus den *Frequency Contours* unter Berücksichtigung der Maskierung oberhalb von 45 dB und enthält lediglich Teiltöne zwischen 400 Hz und 5 kHz. Insbesondere die höherfrequente Teiltöne sind entfernt worden.

6.5.2. Veränderte Dauern und verringerter Pegel

Diese Klänge wurden resynthetisiert und zu Paaren zusammengestellt. Die Dauer der Versuchsschalle sowie der Pausen wurde dabei variiert. Darüber hinaus wurde neben dem Pegel 80 dB, wie er bisher für die Darbietung immer gewählt worden war, auch ein um 20 dB verringerter Wiederabgabepiegel erprobt. Zehn Versuchspersonen hatten anzugeben, ob sie einen Unterschied wahrnahmen und hatten zusätzlich den Schwierigkeitsgrad ihrer Entscheidung auf einer Skale von 1 (sehr leicht), 2 (eher leicht) über 3 eher schwer) bis 4 (sehr schwer) zu charakterisieren. Die Mediane dieser Aussagen bewegen sich in aller Regel zwischen 1,5 und 2,5. Erwartungsgemäß empfanden die Probanden ihre Entscheidung dann als einfacher (kleine Zahlenwerte), wenn ein deutlicher Unterschied auftrat. Sie stuften den Schwierigkeitsgrad als höher ein (große Zahlenwerte), wenn nur geringe Unterschiede wahrzunehmen waren. Der Schwierigkeitsgrad kann in manchen Fällen die Interpretation der Resultate erleichtern, wird im Folgenden jedoch nicht weiter behandelt.

Nr. 01 (FC) versus Nr. 05 (FCmd)

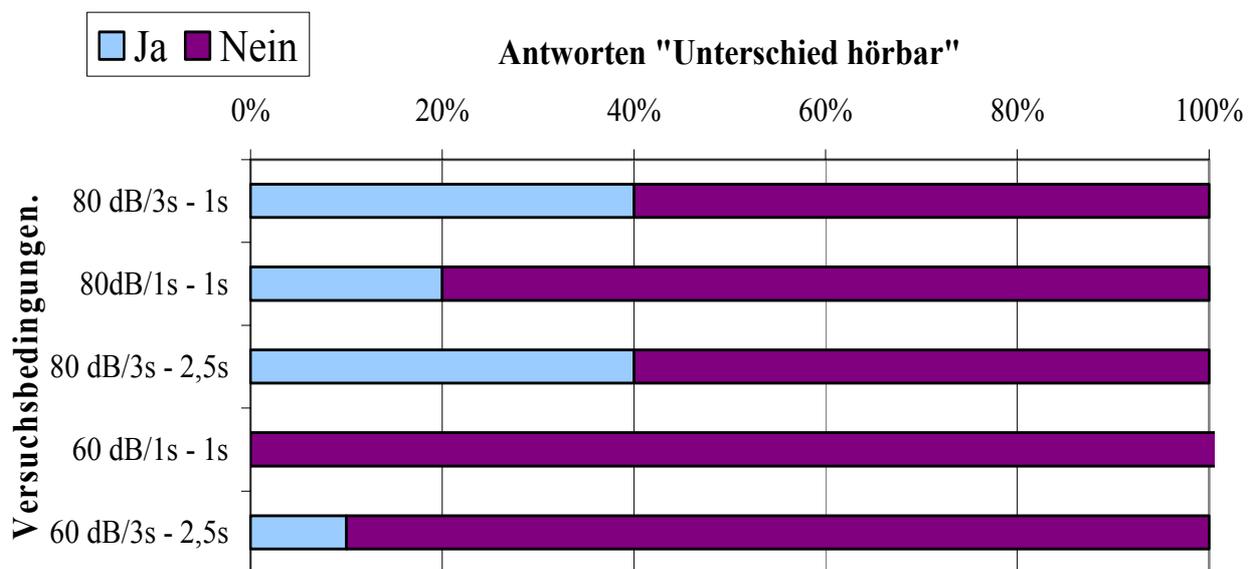


Abb. 42. Relative Häufigkeit der Beurteilungen, ob zwischen den Klängen Nr. 01 und Nr. 05 im Paarvergleich ein Unterschied wahrnehmbar ist. Die jeweiligen Versuchsbedingungen sind angegeben.

Die Unterscheidbarkeit ist für die einzelnen Paare getrennt dargestellt. Abb. 42 bezieht sich auf den Vergleich des Referenzklanges (Abb. 38) mit dem Klang Nr. 05 (Abb. 39), der aus den tonalen Konturen ab ca. 45 dB bestand und bei dem Bestandteile mit geringerem Pegel vor der Resynthese weggelassen wurden. Der in Abschnitt 6.2 geschilderte Versuch hat bereits ergeben, dass beim Wiedergabepegel 80 dB und den längeren Klangdauern in 40% aller Fälle ein Unterschied zum Referenzklang erkannt wurde. Dies gilt auch für die geringfügig geänderten Dauern des weiterführenden Versuchs. War der Klang nur eine Sekunde lang, dann wurde ein Unterschied in höchstens noch 20% der Fälle erkannt. Wurde der Pegel um 20 dB abgesenkt, hatte dies zur Folge, dass ein Unterschied nur noch in 10% oder überhaupt nicht mehr wahrzunehmen war. Die Verringerung des Pegels bewirkt, dass das Gehör toleranter gegenüber den physikalischen Unterschieden zwischen den beiden Klängen wird. Diese sind ungeachtet der Versuchsbedingungen in stets weniger als der Hälfte der Fälle hörbar.

Nr. 01 (FC) versus Nr. 14 (FCmd ohne Quinte)

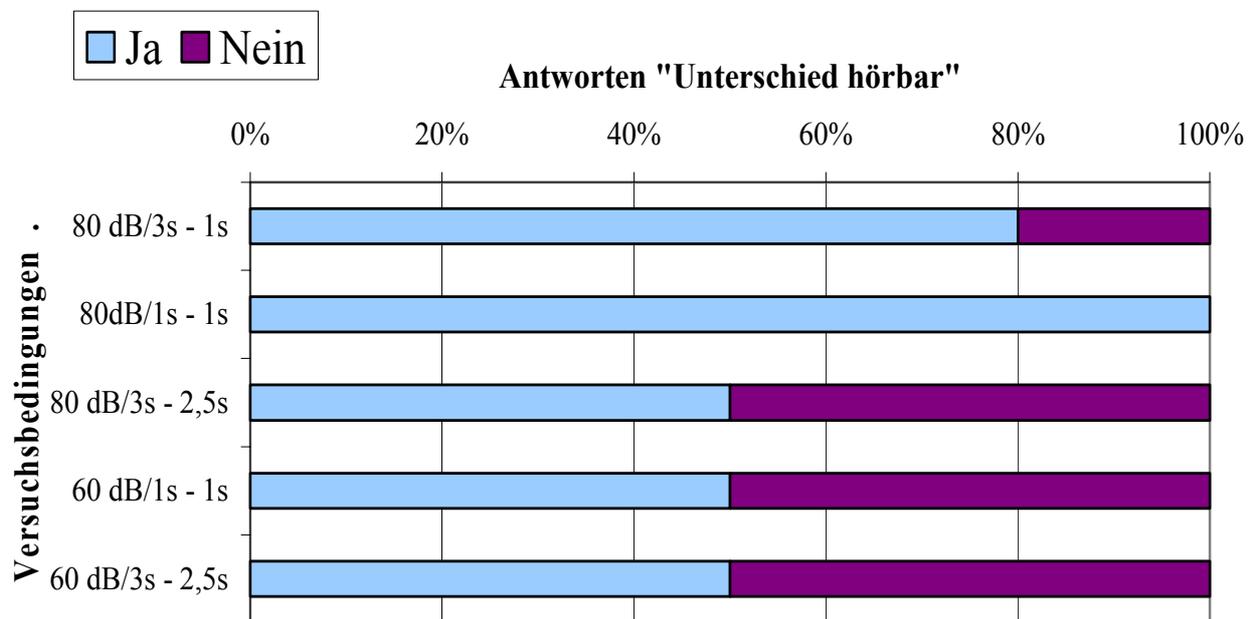


Abb. 43. Relative Häufigkeit der Beurteilungen, ob zwischen den Klängen Nr. 01 und Nr. 14 im Paarvergleich ein Unterschied wahrnehmbar ist. Die jeweiligen Versuchsbedingungen sind angegeben.

In Abb. 43 ist der Vergleich des Referenzklanges Nr. 01 (Abb. 38) mit dem Klang Nr. 14 (Abb. 40) behandelt. In diesem Testklang waren – ebenso wie im vorher besprochenen Klang Nr. 05 - die schwachen Komponenten unterhalb von 45 dB unterdrückt. Darüber hinaus fehlte die Quinte. Bei Wiedergabe mit dem Pegel 80 dB war ein Unterschied in 80% bis 100% der Fälle hörbar, sofern die Pause kurz war. Verlängerte man die Pause auf 2,5 s, dann war der Unterschied nur noch jedes zweite Mal zu erkennen. Wurde der Pegel um 20 dB herabgesetzt, dann hatte dies ebenfalls eine Verringerung der Erkennungsrate zur Folge. Unabhängig davon, ob die Pausen kürzer oder länger waren, wurde ein Unterschied bei leiserer Wiedergabe nur noch in der Hälfte der Fälle detektiert.

Abb. 44 nimmt Bezug auf den Vergleich zwischen dem Referenzklang Nr. 01 (Abb. 38) und dem Klang Nr. 10 (Abb. 41), dessen Frequenzband auf den Bereich zwischen 400 Hz und 5000 Hz beschnitten war. Diese Manipulation wurde in der Mehrzahl der Fälle erkannt. Es zeigte sich die schwache Tendenz, dass die Erkennungsrate etwas abnimmt, wenn die Pause zwischen den Klängen verlängert und wenn der Wiedergabepegel verringert wurde. Der Unterschied war letztlich in mindestens 80% aller Fälle erkennbar.

Nr. 01 (FC) versus Nr. 10 (FCmd 400-5000 Hz)

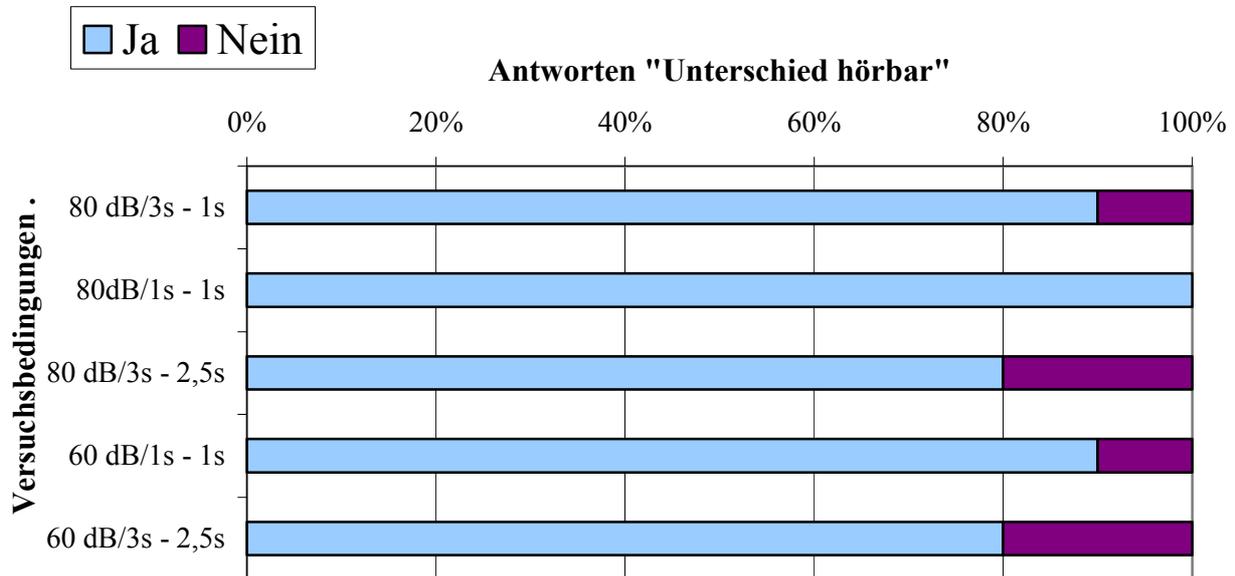


Abb. 44. Relative Häufigkeit der Beurteilungen, ob zwischen den Klängen Nr. 01 und Nr. 10 im Paarvergleich ein Unterschied wahrnehmbar ist. Die jeweiligen Versuchsbedingungen sind angegeben.

Die Ergebnisse dieser Hörversuche lassen sich wie folgt interpretieren: In der Tendenz bewirkt eine längere Pause zwischen den Klängen eines Paares, dass Unterschiede nicht mehr so leicht erkennbar sind. Wird das Paar mit einem geringeren Pegel wiedergegeben, sinkt die Erkennungsrate im Allgemeinen ebenfalls. Offenbar dominiert nicht etwa die Abnahme des Maskierungseffekts, wie sie bei Verringerung des Pegels zu erwarten wäre. In höherem Maße scheint sich auszuwirken, dass bei kleinerem Pegel schwache Komponenten unter die Ruhehörschwelle absinken und für die Unterscheidung nicht mehr nutzbar sind. In Hinsicht auf die gewählten Versuchsparameter Pegel, Pausen- und Klangdauer lässt sich bisher bereits aussagen, dass Lenski (2007) damit eine Art *worst case* erfasst hat. Werden die Schalle leiser oder sind durch längere Pausen getrennt, dann urteilen die Versuchspersonen nicht mehr ganz so kritisch, wie sie dies in den vorherigen Experimenten getan haben.

6.5.3. Erhöhte Frequenzlage und zusätzliche Störgeräusche

Die Erkennung von Unterschieden bei erhöhter und erniedrigter Frequenzlage hat Lenski (2007) in einer weiteren Versuchsreihe studiert. Anders als bei den Experimenten der Abschnitte 6.3 und 6.4 wurden simultan Störgeräusche dargeboten. Zu den Klängen wurde ein Sinuston von 800 Hz bzw. ein Weißes Rauschen zugefügt, deren Pegel allerdings nicht näher spezifiziert sind. Als Referenz wurde stets der Klang Nr. 01 (FC) verwendet, der aus sämtlichen *Frequency Contours* besteht. Als Testklänge dienten wiederum

- Klang Nr. 05 (FCmd) aus den *Frequency Contours* unter Berücksichtigung der Maskierung und ohne Komponenten unterhalb von 45 dB; für normale Frequenzlage vgl. Abb. 39.
- Klang Nr. 14 (FCmd ohne Quinte), bestehend aus denselben Teiltönen wie Klang Nr. 05, jedoch ohne die Quinte; für normale Frequenzlage vgl. Abb. 40.

- Klang Nr. 10 (FCmd 400 – 5000 Hz). Wie Klang Nr. 05 umfasst er die *Frequency Contours* unter Berücksichtigung der Maskierung. In der ursprünglichen Frequenzlage enthält er jedoch nur Komponenten oberhalb von 45 dB zwischen 400 Hz und 5 kHz; für normale Frequenzlage vgl. Abb. 41.

Die Dateien wurden schneller bzw. langsamer ausgelesen und die Klänge dadurch nach oben bzw. nach unten transponiert.

Wie in Abschnitt 6.3 wird der Klang, der doppelt so schnell ausgelesen und dadurch eine Oktav nach oben transponiert wird, durch ein H vor der entsprechenden Ziffer gekennzeichnet. Beim Vergleich des Referenzklanges Nr. H01 mit dem Klang Nr. H05 waren Unterschiede höchstens in 10% aller Fälle, meist jedoch überhaupt nicht wahrnehmbar. Somit wurden die Ergebnisse von Abschnitt 6.3 bestätigt. Wenn unter günstigen Bedingungen (kein Störgeräusch, hoher Pegel, kurze Pause, langes Signal) so gut wie keine Unterschiede wahrnehmbar sind, dann wird dies unter ungünstigen Bedingungen erst recht der Fall sein.

Sobald aus diesem Testklang die Quinte entfernt wird, entsteht Klang Nr. H14. Im Vergleich mit dem Referenzklang Nr. H01 waren in 80% aller Fälle Unterschiede wahrnehmbar, sofern die oben genannten günstigen Voraussetzungen vorlagen. Wurde die Dauer des Klanges verkürzt und/oder die der Pause verlängert, sank die Erkennungsrate. War die Pause lang und der Pegel gering, wurde das Fehlen der Quinte nicht mehr wahrgenommen. Erwartungsgemäß traf dies auch zu, wenn ein Rauschen zugesetzt wurde.

Im nicht-transponierten Signal ist der Frequenzbereich so beschnitten worden, dass der Klang Nr. H10 nach der Frequenzverdoppelung nur noch Komponenten oberhalb von 45 dB zwischen 800 Hz und 10 kHz enthielt. Im Paarvergleich wurde der Unterschied nach der Frequenzerhöhung unter günstigen Bedingungen in 70% aller Fälle erkannt. Eine Vergrößerung der Pausendauer wirkte sich nicht wesentlich aus. Alle anderen „Verschlechterungen“ der Versuchsbedingungen hatten jedoch geringere Erkennungsraten zur Folge. So lag die Erkennbarkeit für leise Darbietung (60 dB) und kurzen Dauern (1s/1s) bei 50%. Wurde Weißes Rauschen hinzugefügt, sank diese Rate auf 20%.

Wie bereits in Abb. 36 zu erkennen war, hat die Frequenzverdopplung unter „optimalen“ Versuchsbedingungen praktisch immer dazu geführt hat, dass Manipulationen am Klangspektrum weniger häufig auffallen, als dies in normaler Frequenzlage der Fall ist. Der hier besprochene Hörversuch mit der Verdoppelung der Frequenzen hat gezeigt, dass die Erkennbarkeit noch weiter abnehmen kann. Damit ist dann zu rechnen, wenn der Pegel verringert wird, die Pause zwischen den Klängen länger wird, das Signal kürzer wird oder ein Störgeräusch hinzukommt.

6.5.4. Erniedrigte Frequenzlage und zusätzliche Störgeräusche

Durch langsames Auslesen der Dateien wurden die zu Anfang von Abschnitt 6.5.3. beschriebenen Klänge um ein Oktavintervall nach unten transponiert. Wie in Abschnitt 6.4. wird zur leichteren Unterscheidung vor die kennzeichnende Ziffer ein L gesetzt. Als Störgeräusche wurden zusätzlich zu den Klängen ein 800 Hz-Sinuston sowie das Weiße Rauschen dargeboten.

Beim Vergleich des Referenzklanges Nr. L01 mit dem Klang Nr. L05 war gemäß Abb. 37 ein Unterschied in 40% aller Fälle wahrnehmbar. Die erneuten Versuche haben dieses frühere Ergebnis bestätigt. Wurden die Bedingungen dadurch erschwert, dass der Pegel von 80 dB auf 60 dB verringert wurde, das Signal nur noch 1 s lang dargeboten wurde, die Pause auf 2,5 s verlängert und möglicherweise noch ein Störgeräusch überlagert wurde, war nur noch ganz selten (zu 10% bis 20%) ein Unterschied wahrnehmbar. Bei leiser Darbietung und großer Pause verschwanden hörbare Differenzen gänzlich, so dass die beiden Klänge in keinem Fall mehr unterschieden werden konnten.

Klang Nr. L14 entstand dadurch, dass aus dem transponierten Testklang die Quinte entfernt wurde. Im Vergleich mit dem Referenzklang Nr. L01 waren in 10% bis 50% aller Fälle Unterschiede wahrnehmbar, sofern die Wiedergabe unter günstigen Voraussetzungen erfolgte. Aus nicht mehr nachvollziehbaren Gründen haben zwei ähnliche Versuche mit 80 dB und 1 s Pause diese große Schwankungsbreite ergeben. Wurde der Pegel verringert, die Pause verlängert oder ein Störgeräusch hinzugefügt, ging die Erkennungsrate bis auf 20% zurück.

Im Klang Nr. L10 war der Frequenzgehalt im noch nicht transponierten Signal auf den Bereich von 400 Hz bis 5000 Hz beschränkt. Nach der Halbierung der Frequenzen bedeutete dies, dass nun nur noch Komponenten zwischen 200 Hz und 2500 Hz enthalten waren. Im Vergleich mit dem vollständigen Klang war in 80% bis 100% aller Fälle eine Unterscheidung möglich. Erst bei leiser Darbietung und in Gegenwart von Störgeräuschen sank die Erkennungsrate auf 60% bis 70%.

Insgesamt ergaben die Experimente mit halbiertem Frequenz ein uneinheitliches Bild. In einigen Fällen zeigte sich die Tendenz, dass das Gehör bei leiserer Darbietung weniger tolerant agiert und Unterschiede erkannte, die bei lauterer Darbietung nicht wahrgenommen wurden. Dies kann damit erklärt werden, dass sich die spektrale Maskierung umso weniger auswirkt, je geringer der Pegel ist. Die gleichzeitige Darbietung von Störgeräuschen hat jedoch in praktisch jedem Fall dazu geführt, dass physikalisch vorhandene Unterschiede verdeckt und unhörbar gemacht worden sind.

In den Resultaten der Abschnitte 6.5.3. und 6.5.4. ist im Vergleich zu den vorherigen Untersuchungen der folgende globale Trend erkennbar: „Günstige“ Versuchsbedingungen liegen offenbar bei hohem Pegel, kurzer Pause, langem Signal und Darbietung ohne Störgeräusch vor. Die Erkennungsrate sind dann am höchsten. Weniger günstige Wiedergabebedingungen führen in aller Regel dazu, dass physikalische Unterschiede nicht mehr so häufig erkannt werden. Die in den Abschnitten 6.2 bis 6.4 dargelegten Resultate gelten sozusagen unter „Laborbedingungen“. Nähert man sich den Verhältnissen an, die beim Hören im täglichen Leben vorliegen, sind tendenziell geringere Erkennungsrate zu erwarten. Eine leisere Wiedergabe und längere Abstände zwischen zu vergleichenden Klängen (Abschnitt 6.5.2) machen das Ohr toleranter gegenüber physikalischen Unterschieden. Am wenigsten wirken sich physikalische Unterschiede auf die Hörwahrnehmung aus, wenn Störgeräusche wie ein Sinuston oder Rauschen zugesetzt werden. Offenbar stellen die Ergebnisse der Untersuchungen in den Abschnitten 6.2 (normale Frequenzlage), 6.3 (erhöhte Frequenzlage) und 6.4 (erniedrigte Frequenzlage) eine Art „worst case“ dar, in dem das Gehör Manipulationen am wenigsten toleriert.

6.6. Hörversuche zur Ähnlichkeit eines reduzierten Klanges mit einem Glockenklang

6.6.1. Versuchsplanung und Fragestellung

Als Ergebnis der bisher in diesem Kapitel besprochenen Versuche liegt inzwischen fest, welche Manipulationen am Referenzklang hörbar werden können, wenn die Versuchsbedingungen entsprechend gut sind. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen hat Lenski (2007) eine andersartige Fragestellung behandelt: Wie viele und welche Teiltöne sind notwendig, um einen Klang zu erzeugen, den die Versuchspersonen mit einer Glocke assoziieren?

Tab. IX: Klänge des Hörversuchs zur Ähnlichkeit mit einem Glockenklang

Klang Nr.	Bezeichnung	Art der Manipulation
<i>1</i>	FC	Aus den <i>Frequency Contours</i> (20 Hz bis 16000 Hz) des Originalklanges resynthetisiert
<i>2</i>	FCmd ohne Prime	neun Teiltöne
<i>3</i>	FCmd ohne Terze	neun Teiltöne
<i>4</i>	FCmd ohne Quinte	neun Teiltöne
<i>5</i>	FCmd ohne Oberoktave	neun Teiltöne
<i>6</i>	Prinzipalbereich	Suboktave, Prime, Terze, Quinte und Oberoktave
<i>7</i>	Prime bis Oberoktave	Prime, Terze, Quinte und Oberoktave
<i>8</i>	Suboktave bis Quinte	Suboktave, Prime, Terze und Quinte
<i>9</i>	Suboktave und Prime	zwei Teiltöne des Prinzipalbereichs
<i>10</i>	Suboktave und Terze	zwei Teiltöne des Prinzipalbereichs
<i>11</i>	Suboktave und Quinte	zwei Teiltöne des Prinzipalbereichs
<i>12</i>	Suboktave	ein Teilton des Prinzipalbereichs
<i>13</i>	Prime	ein Teilton des Prinzipalbereichs
<i>14</i>	Terze	ein Teilton des Prinzipalbereichs
<i>15</i>	Quinte	ein Teilton des Prinzipalbereichs
<i>16</i>	Oberoktave	ein Teilton des Prinzipalbereichs

Dazu dienten die in Tab. IX aufgelisteten Testschalle, die mit steigender Ordnungszahl immer weiter reduziert sind. Um Verwechslungen mit den Klängen zu vermeiden, die bei den Paarvergleichen verwendet wurden, sind die hier verwendeten Nummern für die Klänge kursiv, fett und blau gekennzeichnet. Der Klang Nr. ***1*** entspricht dem Referenzklang Nr. 01 des ersten Hörversuchs; vgl. Tab. VI. Die weiteren Klänge enthalten neun Teiltöne (Klänge Nr. ***2*** bis ***5***). Die Zahl der Teiltöne wird sukzessiv verringert, bis schließlich nur noch einen Teilton verbleibt (Klänge Nr. ***12*** bis ***16***).

Die sechzehn Klänge von Tab. IX wurden in zufälliger Reihenfolge dargeboten. Die Probanden hatten sich die einzelnen Klänge anzuhören und die Frage zu beantworten, **ob der dargebotene Klang eine Glocke darstellt oder nicht**. Im Gegensatz zu ähnlichen Untersuchungen von Sattler (2006 und Abschnitt 4.6) waren keine abgestuften Urteile möglich. Vielmehr waren als Antworten nur Ja oder Nein zugelassen. Bei Verneinung wurde darum gebeten, eine verbale Beschreibung des Klangeindrucks zu geben.

6.6.2. Ergebnisse der Ähnlichkeitsversuche

Abb. 45 gibt die Ergebnisse wieder. Dass der Referenzklang Nr. **1** hundertprozentig wie eine Glocke klingt, sollte nicht überraschen. Wurde ein Klang aus allen tonalen Konturen ab ca. 45 dB resynthetisiert und enthielt er die Suboktave, dann konnte einer der Teiltöne des Prinzipalbereichs weggelassen werden, ohne dass der Klang seinen Glockencharakter verlor. Beispiele sind die Klänge Nr. **2** bis **4**. Lediglich das Eliminieren der Oberoktave (Klang Nr. **5**) führte dazu, dass in 10%

Als Glocke wahrnehmbar?

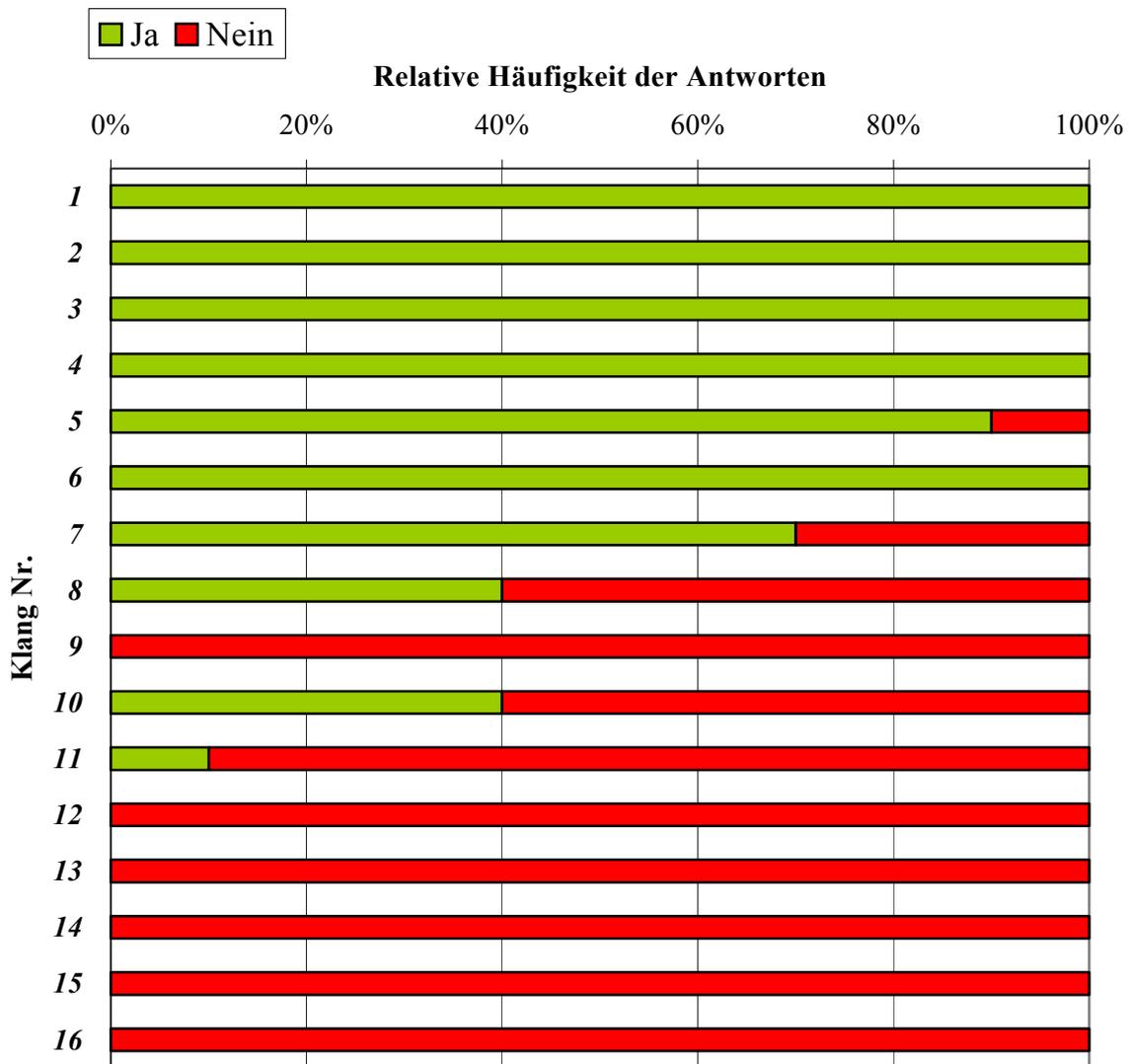


Abb. 45. Relative Häufigkeit der Beurteilungen, ob die 16 Klänge wie eine Glocke klingen.

aller Fälle der Klang nicht als Glockenklang eingestuft wurde. Ähnlich wie bei den Untersuchungen von Sattler (vgl. beispielsweise Abschnitt 4.7) bewies der Prinzipalbereich seine hervorgehobene Rolle: Bereits seine fünf Teiltöne (Klang Nr. **6** bestehend aus Suboktave, Prime, Terze, Quinte und Oberoktave) reichten aus, um dem Klang Glockencharakter zu verleihen. Eine weitere Reduktion auf vier Teiltöne (Klänge Nr. **7** und **8**) hatte unter Anderem zur Folge, dass der Klang als „weicher“ empfunden, in etwa der Hälfte der Fälle aber immer noch als Klang einer Glocke wahrgenommen wurde.

Eine weitere Reduktion führte dann dazu, dass der Klang praktisch nicht mehr mit einer Glocke assoziiert wurde. Die Klänge Nr. **9** bis **11** enthielten nur noch zwei Teiltöne des Prinzipalbereichs. Lediglich Suboktave und Quinte (Klang Nr. **11**) sowie etwas häufiger Suboktave und Terze (Klang Nr. **10**) wurden in einigen Fällen mit dem Klang einer Glocke gleichgesetzt. Sobald nur noch ein Teilton verblieb, war eindeutig keinerlei Ähnlichkeit mit einem Glockenklang mehr auszumachen.

Ein detaillierter Vergleich der Urteile von zwei Versuchspersonen zeigte Unterschiede hinsichtlich der „Toleranz“, die offenbar mit der Erfahrung der Person in Hinsicht auf Glockenklänge zusammenhängen. Die positiven Urteile stimmten überein bei den Klängen Nr. **1** bis **7**. Im Übergangsbereich bei den Klängen Nr. **8** und **10** (Suboktave mit einem weiteren Teilton) assoziierte die weniger geübte Person den Klang mit dem einer Glocke. Für den mit Glocken besser vertrauten Probanden hörte sich solch ein Klang dagegen nicht nach Glocke, sondern eher wie eine Glasharmonika oder wie ein Vibraphon an. Bei der Ablehnung der Klänge Nr. **9** und **11** bis **16** waren sich beide Versuchspersonen dann allerdings wieder einig.

Tab. X: Klänge des zweiten Hörversuchs, die zu mehr als 40% als Glockenklänge wahrgenommen wurden

Klang Nr.	Bezeichnung	Art der Manipulation	Prozentuale Häufigkeit
1	FC	Aus den <i>Frequency Contours</i> (20 Hz bis 16000 Hz) des Originalklanges resynthetisiert	100%
2	FCmd ohne Prime	9 Teiltöne	100%
3	FCmd ohne Terze	9 Teiltöne	100%
4	FCmd ohne Quinte	9 Teiltöne	100%
5	FCmd ohne Oberoktave	9 Teiltöne	90%
6	Prinzipalbereich	5 Teiltöne: Suboktave, Prime, Terze, Quinte und Oberoktave	100%
7	Prime bis Oberoktave	4 Teiltöne: Prime, Terze, Quinte und Oberoktave; Suboktave fehlt	70%
8	Suboktave bis Quinte	4 Teiltöne: Suboktave, Prime, Terze und Quinte	40%
10	Suboktave und Terze	2 Teiltöne des Prinzipalbereichs	40%

Einen Klang zu erzeugen, der einer Kirchenglocke zugeordnet wird, gelingt offenbar mit den sechs im Folgenden zusammengestellten Signalen. Dargestellt sind in den Abb. 46 bis 51 die Spektrogramme der Klänge Nr. **1** bis **6**, die gemäß Tab. X praktisch hundertprozentig als Glockenklänge eingestuft wurden. Ihnen allen ist gemeinsam, dass sie mindestens vier der fünf Teiltöne des Prinzipalbereichs (Suboktave, Prime, Terze, Quinte und Oberoktave) enthalten.

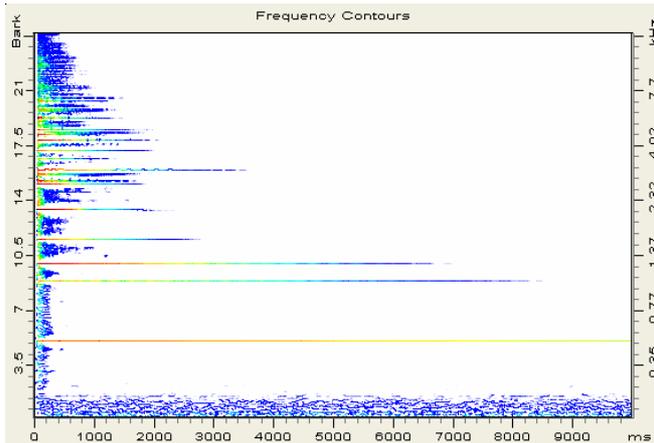


Abb. 46. Klang Nr. 1: Aus sämtlichen Teiltönen der Frequency Contours resynthetisierter Klang.

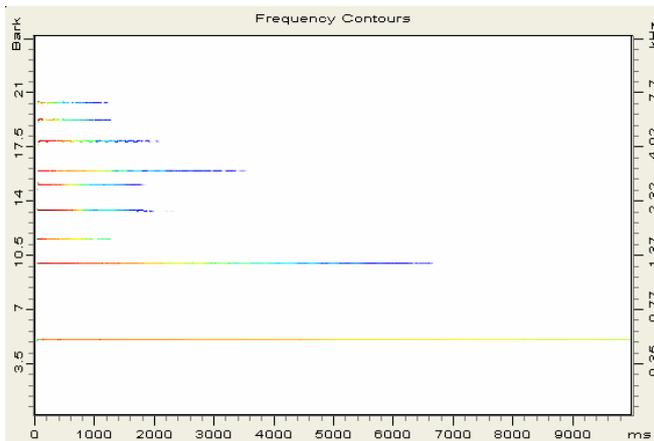


Abb. 47. Klang Nr. 2: Aus den Frequency Contours mit Nonlinear Spectral Masking resynthetisierter Klang; enthält nur tonale Konturen ab 45 dB ohne die Prime.

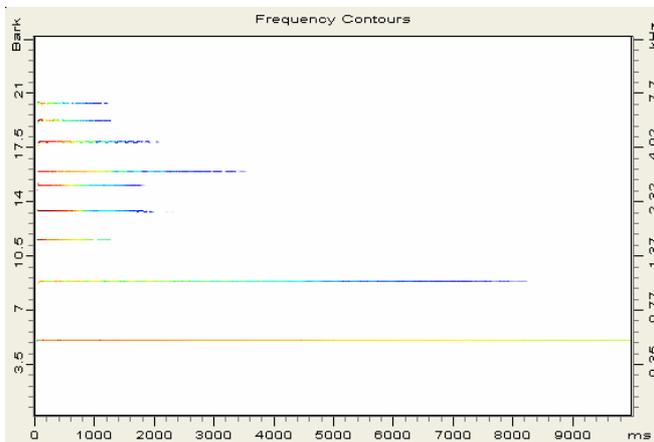


Abb. 48. Klang Nr. 3: Aus den Frequency Contours mit Nonlinear Spectral Masking resynthetisierter Klang; enthält nur tonale Konturen ab 45 dB ohne die Terze.

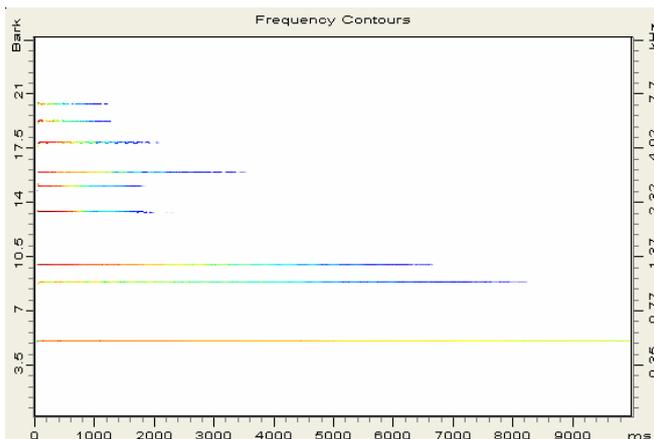


Abb. 49. Klang Nr. 4: Aus den Frequency Contours mit Nonlinear Spectral Masking resynthetisierter Klang; enthält nur tonale Konturen ab ca. 45 dB ohne die Quinte.

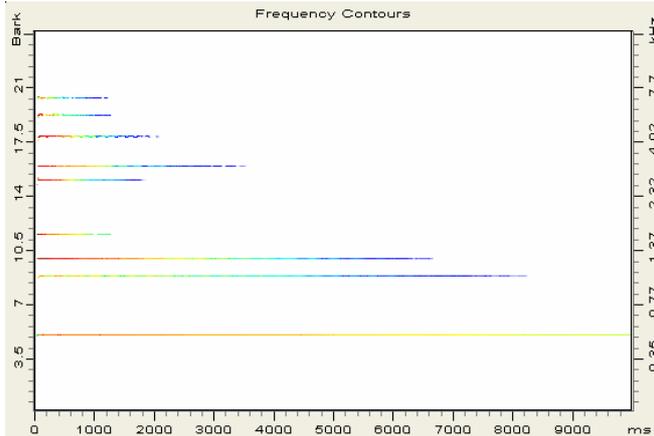


Abb. 50. Klang Nr. 5: Aus den Frequency Contours mit Nonlinear Spectral Masking resynthetisierter Klang; enthält nur tonale Konturen ab 45 dB ohne die Oberoktave.

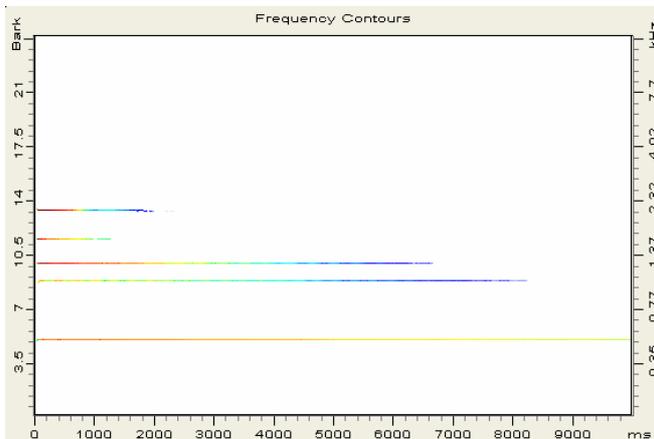


Abb. 51. Klang Nr. 6: Aus den Frequency Contours mit Nonlinear Spectral Masking resynthetisierter Klang; enthält nur die tonalen Konturen des Prinzipalbereichs ab 45 dB.

6.7. Zusammenfassende Bemerkung

Ausgehend von einer gehörgerechten Analyse des Originalklanges hat Lenski (2007) in Hörversuchen zwei prinzipiell unterschiedliche Fragestellungen behandelt. Die erste bestand darin, einen resynthetisierten Referenzklang mit Klängen zu vergleichen, die vor der Resynthese manipuliert worden waren. Zehn Versuchspersonen hatten zu beurteilen, ob sie im A-B-Vergleich irgendeinen Unterschied hören konnten oder nicht. Nimmt man die 40%-Grenze als Kriterium, so zeigt sich, wie weit der Klang reduziert werden darf, ohne dass in der Hälfte aller Fälle oder noch häufiger ein Unterschied wahrnehmbar ist. Der erste Hörversuch hat dafür die Paarung der Klänge Nr. 01 und Nr. 05 ergeben, wie sie Abb. 52 entnommen werden kann.

Die Gegenüberstellung visualisiert das hohe Ausmaß der Reduktion. Ein gewichtiger Schritt besteht darin, die Funktion *Nonlinear Spectral Masking* zu aktivieren und damit Komponenten zu eliminieren, die als Folge der Verdeckung unhörbar werden. Da auf diese Weise die schwachen Schallanteile verschwinden, wirkt visuell das Spektrogramm wesentlich übersichtlicher. Frequenzkomponenten unterhalb von 45 dB sind unterdrückt, so dass in diesem Stadium noch 10 Teiltöne vorliegen. Dies hat einen ähnlichen Effekt, wie wenn man bei 7 kHz eine obere Frequenzgrenze schafft. Die Unterdrückung unwichtiger Details und die Beschränkung auf das Wesentliche sind offenkundig.

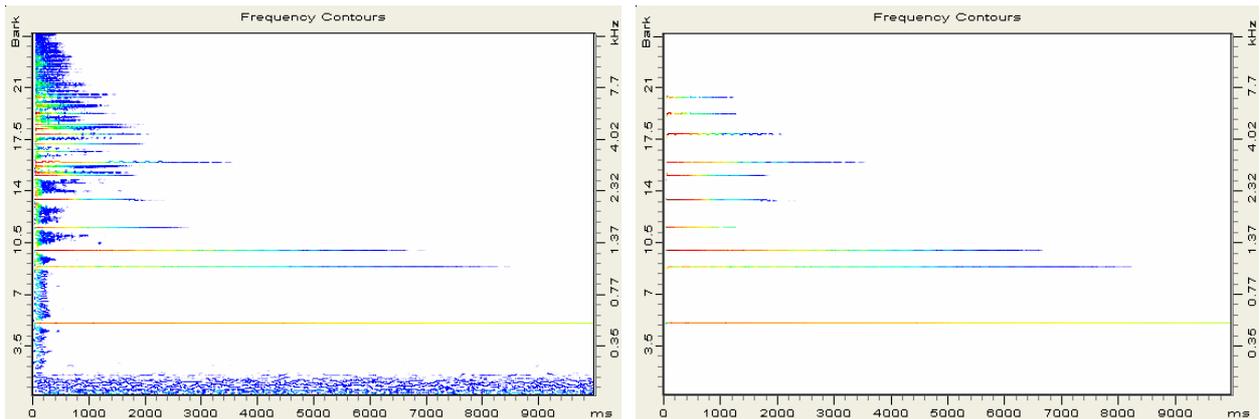


Abb. 52. Klänge, die in höchstens 40% aller Fälle voneinander unterschieden werden können.
 Links: Referenzklang, aus sämtlichen Frequency Contours des Originalklanges resynthetisiert.
 Rechts: Mit zusätzlichem Nonlinear Spectral Masking nur Komponenten oberhalb von 45 dB resynthetisiert.

In einer anderen Versuchsreihe hat Lenski (2007) den Probanden Einzelschalle dargeboten und sie danach befragt, ob ihrer Meinung nach der dargebotene Klang eine Glocke darstellt oder nicht. Naturgemäß ist zu erwarten, dass das Schallsignal wesentlich weiter reduziert werden kann als bei der vorher gestellten Frage, ob ein irgendwie gearteter Unterschied wahrzunehmen ist. Abb. 53 gibt den Referenzschall (Klang Nr. 1) und dem Klang Nr. 6 wieder, der noch eben vollständig mit einer Glocke in Verbindung gebracht wird. Dieser umfasst den Prinzipalbereich (Schad 1996). Trotz der drastischen Reduzierung auf lediglich fünf Frequenzkomponenten wird dieser Klang immer noch zu 100% mit dem einer Glocke assoziiert. Der Prinzipalbereich scheint in der Tat denjenigen Kern des Spektrums darzustellen, welcher dem Glockenklang seinen Charakter gibt. Werden weitere Teiltöne weggelassen, entfernt sich das Klangbild von dem einer Glocke in zunehmendem Maße.

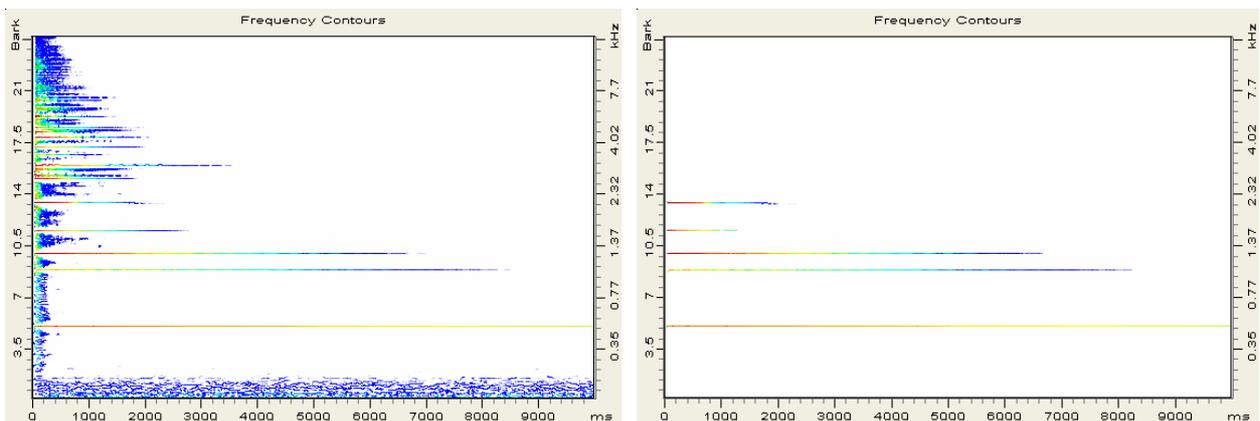


Abb. 53. Klänge, die in 100% aller Fälle als Glockenklänge beurteilt werden.
 Links: Referenzklang, aus sämtlichen Frequency Contours des Originalklanges resynthetisiert.
 Rechts: Mit zusätzlichem Nonlinear Spectral Masking nur die Teiltöne des Prinzipalbereichs resynthetisiert.

Insbesondere Abb. 53 macht deutlich, wie weitgehend physikalisch vorhandene Information eliminiert werden kann, ohne dass das Charakteristische des Glockenklanges verloren geht. Der visuelle Vergleich zeigt die enorme Reduktion und Konzentration auf das Wesentliche, nämlich auf die Teiltöne Suboktave, Prime, Terze, Quinte und Oberoktave des Prinzipalbereichs. Dies ist der spektrale Kern, der den Untersuchungen von Lenski (2007) zufolge einen Klang zu einem Glockenklang macht.

7. ABSCHLIESSENDE DISKUSSION

Nachdem die Glocke am Institut für Mechanik schon seit langem Gegenstand vibroakustischer Untersuchungen ist, sind in diesem Bericht nun die Ergebnisse einiger psychoakustischer Experimente zusammen gestellt. Es handelt sich dabei um eine ältere Pilotuntersuchung zur musikalischen Tonhöhe und um zwei neue, größtenteils noch unveröffentlichte Studien zur Klärung der Frage, welche Komponenten im Schallsignal den typischen Klang einer Glocke bestimmen.

Die Untersuchungen beziehen sich auf den Klang einer kleinen Kirchenglocke vom Moll-Oktav-Typ, die aus Passau stammt und sich auf Dauer im Institut für Mechanik befindet. Diese 37 kg-Glocke hing in einem hölzernen Gestell und wurde am Schlagring von innen mit einem Stahlhammer angeschlagen. Der Klang wurde in einigen Meter Entfernung auf *Digital Audio Tape* aufgenommen und war Ausgangspunkt der beschriebenen Untersuchungen. Es ist anzunehmen, dass ein etwas andersartiges Schallsignal entsteht, wenn dieselbe Glocke in einem Glockenstuhl hängt, pendelt und mit einem angepassten Klöppel angeschlagen wird. Insbesondere bezüglich der Pegel der Teiltöne können Differenzen zu einer in realer Umgebung betriebenen Glocke auftreten. Dies dürfte die hier vorgelegten Ergebnisse jedoch nicht wertlos machen, da die Pegel und die Phasen bei der Ausbreitung des Schalles ohnehin in unterschiedlichem Maße verändert werden. Gründe dafür sind die winkelabhängige Richtcharakteristik und Dämpfungseinflüsse. Bekanntlich ist die Frequenz einer Schallkomponente die wahre „Invariante“, da sie als einziger Parameter während der gesamten Lebensdauer des Glockenklanges unverändert bleibt. In Hinsicht auf die Frequenzen der Teiltöne und die zugehörigen Schwingungen sind die dargestellten Ergebnisse demnach für eine Kirchenglocke der angegebenen Größe und Tonlage repräsentativ.

Die hier beschriebenen Hörversuche und Berechnungen zur Tonhöhe haben aufgezeigt, wie wenig eindeutig „der Frau oder dem Mann von der Straße“ die Beurteilung dieses Empfindungsattributs beim gering harmonischen Klang der Glocke gelingt. Die Versuchspersonen, allesamt ohne tiefer gehende musikalische Ausbildung, hatten die empfundene Tonhöhe durch die Frequenz eines gleich hohen Sinustones zu kennzeichnen. Die Antworten streuen in gewissem Maße. Festhalten lässt sich jedoch, dass die Versuchspersonen bevorzugt Vergleichsfrequenzen einstellen, die nahe der Frequenz der Suboktave bzw. der halben Frequenz der Prime liegen.

Ungeachtet aller Mehrdeutigkeiten sind sich die Versuchspersonen in ihrer Mehrzahl einig, dass die Tonkategorie der spontan empfundenen Tonhöhe der musikalischen Note C entspricht. Uneinig sind sie sich lediglich in Bezug auf die Tonlage. Einige Hinweise deuten auf eine besondere Rolle der Suboktave im Klang dieser hoch gestimmten Glocke hin. Andere Indizien legen den Schluss nahe, dass der Prime – wie es ihre glockenkundliche Bezeichnung nahelegt - eine hervorgehobene Bedeutung zukommt. Ob dabei die Spektraltonhöhen dominieren und/oder möglicherweise Virtuelle Tonhöhen eine Rolle spielen, die aus den Tonhöhen der höherfrequenten Teiltöne gebildet werden, lässt sich mit den vorliegenden Daten allerdings nicht abschließend beurteilen.

Bei Experimenten und Berechnungen zu den Schwingungen der Glocke stellt sich regelmäßig die Frage, wie viele Teilschwingungen/Teilfrequenzen sinnvollerweise betrachtet werden sollen. Da die Glocke ein Musikinstrument ist, kann die Antwort auf diese Frage nur vom Menschen kommen, der den Glockenklang mit seinem Gehörsinn aufnimmt und zu Empfindungen verarbeitet. Es wurde deshalb die Aufgabe formuliert, in psychoakustischen Experimenten zu klären, welche Teiltöne den Klang einer Glocke charakterisieren. In zwei getrennten Studien wurden dazu unterschiedliche Verfahren ausgewählt und angewandt.

Lenski (2007) hat das kommerzielle Programm *VIPER* eingesetzt. Sie hat den Glockenklang zunächst einer gehörgerechten Analyse unterzogen. Der analysierte und anschließend vollständig resynthetisierte Klang wurde bei der ersten Serie von Hörversuchen mit zehn Probanden als Referenz benutzt. Damit verglichen wurden Klänge, deren Teiltenspektrum in unterschiedlichem Maße reduziert worden waren. Im A-B-Vergleich hatten die Versuchspersonen zu beurteilen, ob sie irgendeinen Unterschied hören konnten oder nicht. Dabei zeigt sich, welche physikalisch vorhandenen Komponenten sich für die Hörempfindung überhaupt auswirken.

Als Maßstab kann beispielsweise gewählt werden, dass eine Manipulation des Spektrums in weniger als der Hälfte aller Fälle wahrnehmbar ist. Die Untersuchung hat aufgezeigt, wie eine zielführende Reduktion gelingt. Als vorteilhaft erweist es sich, die Funktion *Nonlinear Spectral Masking* zu verwenden, die den psychoakustischen Effekt der spektralen Verdeckung nachbildet. Wenn die Maskierung berücksichtigt und weiterhin alle Schallkomponenten unterhalb von 45 dB weggelassen werden, verbleiben neben den fünf Teiltönen des Prinzipalbereichs noch fünf weitere Komponenten, also insgesamt zehn Teiltöne. Der daraus resynthetisierte Klang kann in 60% aller Fälle vom resynthetisierten Originalklang nicht unterschieden werden. Die Beschränkung auf das Wesentliche durch Unterdrückung irrelevanter Details ist offenkundig: Dieser Untersuchung zufolge ist der Großteil der Information über den Klang der Kirchenglocke in den zehn genannten Teiltönen enthalten. Zusätzliche Studien bei erhöhter oder erniedrigter Frequenzlage sowie veränderten Versuchsbedingungen bestätigen dieses Ergebnis im Grundsatz.

Eine etwas „mildere“ Beurteilung hat Lenski (2007) ihren Versuchspersonen abverlangt, als sie Einzelschalle dargeboten und danach gefragt hat, ob diese den Klang eine Glocke darstellen oder nicht. Bei dieser Fragestellung engt sich der relevante Kern des Spektrums weiter ein und es zeigt sich die herausgehobene Rolle, welche der Prinzipalbereich spielt. Dessen fünf Teiltöne (Suboktave, Prime, Terze, Quinte und Oberoktave) ergeben einen synthetischen Klang, der in allen Fällen als derjenige einer Glocke wahrgenommen wird.

Eine etwas andere Vorgehensweise hat Sattler (2006) angewandt. Er hat den Glockenklang mittels Schneller Fourier-Transformation analysiert und zunächst dreißig Komponenten gefunden. Auf der Basis dieser Daten hat er mit dem Programm *Matlab* dreißig Sinustöne mit exponentiell abklingenden Amplituden erzeugt. Deren Zahl hat er durch psychoakustische Überlegungen hinsichtlich Ruhehörschwelle und Mithörschwellen im ersten Schritt halbiert und dann sukzessive weiter verringert. So entstanden vierzehn Versuchsklänge. Damit hatten seine zehn einheimischen Versuchspersonen zwei unterschiedliche Aufgaben zu bearbeiten.

Die erste Versuchsreihe bestand aus Paarvergleichen. Die Versuchspersonen hatten zu beurteilen, welcher der beiden Klänge ihnen besser gefiel. In der zweiten Versuchsreihe wurden die Klänge einzeln dargeboten und die Versuchspersonen hatten anzugeben, ob sie den Klang wie denjenigen einer Kirchenglocke empfanden. Den Grad der Ähnlichkeit mit einem ihnen unbekanntem Glockenklang hatten sie auf einer fünfstufigen Skale zu bewerten. Vorweggeschickt sei, dass sich die Ergebnisse und Interpretationen auf Probanden aus dem süddeutschen Raum beziehen. Es ist nicht auszuschließen, dass die Erwartungshaltung von Personen bezüglich eines „typischen Kirchenglockenklangs“ regionale Unterschiede aufweist und von ihrer individuellen Prägung abhängen kann.

Für diesen Personenkreis ergaben beide Versuchsreihen weitgehend konsistente Resultate. Es zeigte sich, dass für das typische Klangbild einer Kirchenglocke von den nachweisbaren Teiltönen für die Resynthese höchstens diejenigen fünfzehn Teiltöne von Bedeutung sind, welche die gehörbezogene Vorauswahl ergeben hat. Das typische Klangbild einer Glocke lässt sich aber mit zwölf dieser Teiltöne erzeugen.

Gute Auralisationen gelingen sogar noch mit acht Teiltönen. All die Klänge, die überdurchschnittlich beurteilt worden, enthalten Teiltöne des Prinzipalbereichs (Suboktave, Prime, Terze, Quinte, Oberoktave und Duodezime), was sich mit den Beobachtungen von Lenski (2007) deckt. Für eine befriedigende Auralisation reichen sogar nur vier geeignete Teiltöne aus. So besteht ein Klang, der als überdurchschnittlich eingestuft wurde, nur aus Suboktave, Terze, Oberoktave und einem hochfrequenten Teilton. Die Prime und Quinte, die sich schwach ausprägen, sind weggelassen.

Obwohl die Studien von Sattler (2006) und Lenski (2007) völlig voneinander unabhängig waren, haben sie doch im Grundsatz Übereinstimmung in vielfacher Hinsicht gebracht. Die folgenden gemeinsamen Erkenntnisse lassen sich festzuhalten:

- Damit zwischen dem resynthetisierten Originalklang und einem reduzierten Klang so gut wie kein Unterschied erkannt wird, muss er etwa fünfzehn Teiltöne enthalten, die im Spektrum des Klanges besonders stark hervortreten.
- Zwölf Teiltöne, die oberhalb der Mithörschwellen liegen, reichen dafür aus, dass ein synthetischer Glockenklang als sehr gut bewertet wird.
- Für eine gute bis sehr gute Bewertung genügen die acht Teiltöne, die in Tab. XI zusammen gestellt sind, wobei im Vergleich zu den zwölf Teiltönen die oberen drei Teiltöne sowie ein schwacher tieffrequenter Teilton weggelassen worden sind. Es verbleiben die Teiltöne des Prinzipalbereichs (**Suboktave, Prime, Terze, Quinte, Oberoktave**) und gegebenenfalls einige weitere Teiltöne des Mixturbereichs (Dezime, Duodezime; Doppeloktave).

Tab. XI. Kenndaten der Teiltöne des Prinzipalbereichs (**fett gedruckt**) und des Mixturbereichs

f/Hz	L/dB	T_{60}/s	Bezeichnung
512	81	42	Suboktave
1054 1057	65 58	9,4	Prime
1260 1263	67 79	5,1	Terze
1605 1610	63 50	2,7	Quinte
2111 2116	51 75	1,8	Oberoktave
2715 2721	52 66	1,4	Dezime
3129 3133	55 67	2,3	Duodezime
4282 4289	62 65	1,4	Doppeloktave

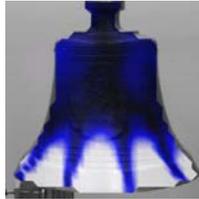
- Die Teiltonanzahl lässt sich ohne gravierenden Qualitätsverlust noch weiter verringern, indem Teiltöne, die nur gering oberhalb der Mithörschwelle liegen, entfernt werden. Teiltöne des Prinzipalbereichs (fett gedruckt in Tab. XI) sind dabei von besonderer Bedeutung. Am wenigsten signifikant ist die Quinte, die sich bei der untersuchten Glocke nur schwach ausprägt. Fehlt die Suboktave, dann wird der Klang durchweg schlecht beurteilt.
- Es gelingt, einen synthetischen Klang mit noch zufrieden stellender Bewertung aus nur vier Teiltönen herzustellen, sofern diese Teiltöne signifikant sind und weit genug über die Mithörschwellen herausragen.

Beispielsweise die Laser-Doppler-Vibrometrie macht es möglich, eine große Zahl von mechanischen Schwingungen experimentell zu bestimmen. Tab. XII zeigt das Ergebnis einer Messung, bei der die Glocke mit einem Pseudo-Rauschen angeregt und in Richtung des Laser-Strahls die Schwingungsgeschwindigkeit gemessen worden war. Helle Areale stehen für Schwingungsbäuche, dunkle für Schwingungsknoten. Die Schwingungsformen sind nach Maßgabe der Anzahl m der Knotenmeridiane (nach rechts in Tab. XII) und der Anzahl n sowie der Lage der Knotenkreise auf der Mantellinie (nach unten) sortiert. Im Bereich bis 5 kHz konnten auf diese Weise mindestens fünfzehn Schwingungsmuster mit den zugehörigen Frequenzen ermittelt werden. Häufig wurde dabei auch Moden-Splitting nachgewiesen, das zu Schwebungen führt. Anhand der Frequenzen ist es möglich, die Schwingungen des Glockenkörpers den Teiltönen des Glockenklanges zuzuordnen.

Wie die hier beschriebenen Experimente gezeigt haben, kommt in Hinsicht auf den Klang nicht allen dieser gemessenen Teilschwingungen die gleiche Bedeutung zu. Einige sind mehr, andere weniger wichtig für die Hörempfindung, die der Glockenklang hervorruft. In Tab. XIII sind die ursprünglich fünfzehn Schwingungsformen auf diejenigen reduziert, die für den Glockenklang am wichtigsten sind. Von größter auraler Bedeutung sind die Schwingungsformen, welche die in Tab. XI aufgelisteten Teiltöne hervorrufen. Die Moden von Tab. XIII sind die Ursache für die Teiltöne des Prinzipalbereichs (fett gedruckt) sowie für einige weitere Teiltöne aus dem Mixturbereich. Diese acht Teilschwingungen sind ursächlich für einen Klang, der nach Sattler (2006) praktisch voll und ganz als Glockenklang identifiziert wird. Auch den Untersuchungen von Lenski (2007) zufolge dürfte der Klang, der daraus entsteht, hundertprozentig als derjenige einer Glocke eingestuft werden.

Bereits die Verkleinerung der Fläche, die beim Vergleich der beiden „Periodensysteme“ trotz vergrößerter Wiedergabe der Schwingungsbilder in Tab. XIII erkennbar wird, fällt ins Auge. Sie macht den Vorteil anschaulich, den die zielführende Beschränkung der verfügbaren Information auf das Wesentliche mit sich gebracht hat. So zeigt sich beispielsweise, dass ausschließlich Biegeschwingungen eine Rolle spielen. Davon wiederum sind nur diejenigen mit höchstens einem Knotenkreis von primärer Bedeutung. Da die Motivation für diese Auswahl in den Hörversuchen lag, war jegliche Willkür ausgeschlossen. Die wohlbegründete Fokussierung auf das wirklich Wichtige macht Experimente und Berechnungen erst wirtschaftlich.

Tab. XII. Nachweisbare Schwingungsformen und -frequenzen der untersuchten Glocke im Frequenzbereich bis 5 kHz

$m =$	2	3	4	5	6
$n =$					
0	 512 Hz Subokt.				
1 oben		 1263 Hz Terze	 2116 Hz Ober- oktave	 3129 Hz Duo- dezime	 4289 Hz Doppel- oktave
1 Mitte	 1057 Hz Prime				
1 unten		 1610 Hz Quinte	 2721 Hz Dezime		
2 unten	 2811 Hz				
2		 2805 Hz	 3494 Hz		
2 oben	 4803 Hz				
3	 4652 Hz	 4464 Hz			

Tab. XIII. Relevante Schwingungsformen und -frequenzen der untersuchten Glocke;
glockenkundliche Bezeichnungen des Prinzipalbereichs (**fett**) und Mixturbereichs (*normal*) sind angegeben

$m =$	2	3	4	5	6
$n =$					
0					
1 oben	512 Hz Suboktave				
1 Mitte		1263 Hz Terze	2116 Hz Oberoktave	3129 Hz Duodezime	4289 Hz Doppeloktave
1 unten	1057 Hz Prime				
		1610 Hz Quinte	2721 Hz Dezime		

Zum Abschluss sind in Abb. 54 die Frequenzkonturen der fünf Teiltöne des Prinzipalbereichs angegeben. In den Untersuchungen von Lenski (2007) wird ein daraus resynthetisierter Klang von allen Versuchspersonen als Glockenklang beurteilt. Eingefügt sind die Bilder der Schwingungen, welche diese Teiltöne generieren.

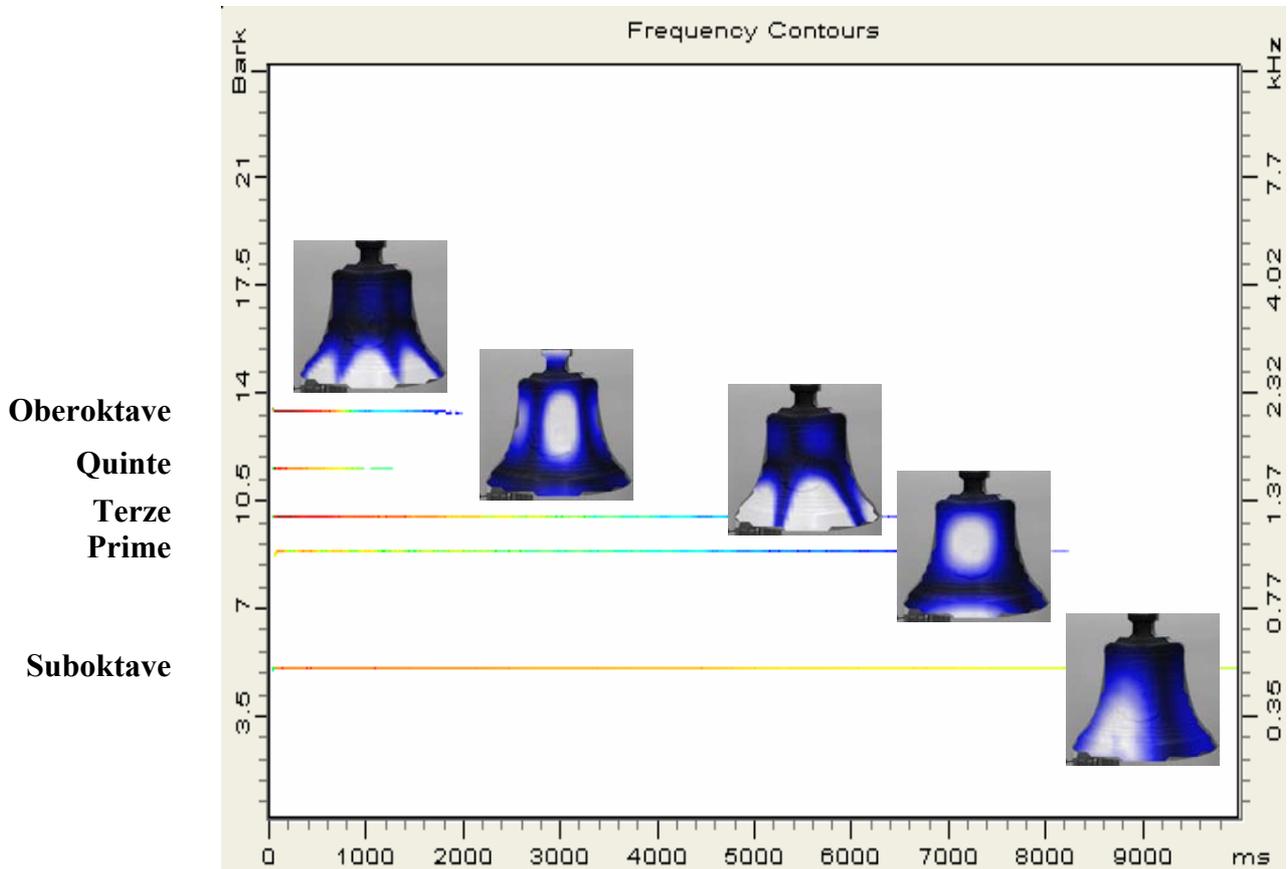


Abb. 54. Frequency Contours der Teiltöne des Prinzipalbereiches. Diese ergeben einen Klang, der in 100% aller Fälle als Glockenklang eingestuft wird.

Die direkte Gegenüberstellung von mechanischem Schwingungsmuster und akustischer Spektral­komponente macht einige Beobachtungen plausibel, die zwar beschrieben, bisher aber nicht erklärt worden sind. Von allen Teiltönen des Prinzipalbereichs scheint die Quinte am wenigsten Bedeutung zu haben. Sattler (2006) hat dies mit einem Klang nachgewiesen, der aus vier Teiltönen ohne die Quinte bestand und hinsichtlich seiner Ähnlichkeit mit einem Glockenklang immer noch als zufrieden stellend beurteilt worden war. Ein Zweiklang ohne die Quinte, bestehend aus Suboktave und Terze, wurden bei Lenski (2007) immer noch in 40% aller Fälle wie ein Glockenklang eingestuft. Ein Zweiklang aus Suboktave und Quinte wurde dagegen deutlich schlechter bewertet.

Im Spektrogramm prägt sich die Quinte am schwächsten aus. Ein Blick auf die zugehörige Schwingungsform lehrt, dass der Knotenkreis sehr tief liegt und nicht weit vom Schlagring entfernt ist, an dem der Klöppel bzw. der Hammer auf den Glockenkörper trifft. Nahe einem Knoten kann nur in geringem Maße angeregt werden. Dies zeigt den Grund dafür auf, warum die entsprechende Teil­schwingung und damit der zugehörige Teilton von so geringer Amplitude sind. Daher ist die Quinte nur von untergeordneter Bedeutung.

Es ist auch dann von Vorteil, die die Zuordnung von Schwingungsform und Teilton zu kennen, wenn die Schädigung einer Glocke betrachtet wird. Knoten bzw. Bäuche der Schwingung – und

damit die Stellen hoher Beanspruchung des Glockenkörpers - sind auf dem Umfang um $360^0/(2m)$ gegeneinander versetzt. Die beiden Teiltöne Suboktave und Quinte, die mit großer Amplitude ange regt werden, gehen auf Schwingungen mit $m = 2$ Knotenmeridianen zurück. Demnach ist der Winkelversatz $360^0/(2m) = 90^0$. Häufig versucht man, die Beanspruchung einer Glocke dadurch zu minimieren, dass man die Glocke verdreht, so dass der Klöppel an anderen Orten auf den Schlagring trifft. Eine Verschiebung des Anschlagortes auf dem Umfang um 90^0 wird aber die Lage der Bäuche und Knoten der beiden tiefsten Teiltöne nicht ändern. Eine Drehung der Glocke im Glockenstuhl um $360^0/(2 \cdot 5) = 36^0$ würde dagegen bewirken, dass zwar die Schwingung der Duodezime ($m = 5$ Knotenmeridiane) ihre Lage beibehält, jedoch alle Teilschwingungen des Prinzipalbereichs (zwei, drei bzw. vier Knotenmeridiane) eine geänderte Winkellage einnehmen.

Abschließend sei noch auf die wesentliche Rolle hingewiesen, die das unterschiedliche Abklingen der einzelnen Teiltöne spielt. Lenski (2007) hat versuchsweise die Abklingkurven von Suboktave und Oberoktave vertauscht und das Spektrum sonst unverändert belassen. Der dadurch entstandene Klang war so andersartig, dass er zu 100% vom Referenzklang unterschieden wurde. Wichtig für den Klangeindruck sind demnach nicht nur die Frequenzen, sondern auch die Abklingzeiten der Teiltöne eines Glockenklanges. Dass sie auch deshalb Beachtung verdienen, weil Änderungen im Abklingverhalten ein Indiz für Schädigungen des Glockenkörpers darstellen, unterstreicht ihre Bedeutung.

In den hier beschriebenen psychoakustischen Experimenten wurde der Frage nachgegangen, welche Teiltöne charakteristisch für einen Glockenklang sind. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse geben nicht nur Hinweise auf die Synthese von künstlichen Klängen, die wie Glocken klingen sollen. Sie bilden auch die Grundlage für eine zielgerichtete Auswahl der mechanischen Schwingungen, die sinnvollerweise betrachtet werden sollten. Als Ergebnis der Hörversuche ist nun klar, auf welchen Kern bei einer Messung - und ebenso natürlich bei einer Rechnung - der Aufwand reduziert werden kann, der wirklich aussagekräftig ist. Sinn einer jeder zielführenden Untersuchung soll es ja schließlich immer sein, das „*must have*“ vollständig zu erfassen und das „*nice to have*“ sicher davon zu unterscheiden.



Abb. 55. Neu gegossene Glocke, die in der Gießerei in Passau auf den Transport zu ihrem Glockenturm wartet.

Der Autor dankt Herrn Glockengießermeister Rudolf Perner für zahlreiche anregende Gespräche zum Thema Glocke sowie für die Überlassung der Kirchenglocke, die sich seit vielen Jahren im Institut für Mechanik befindet und immer wieder der Gegenstand verschiedenartiger wissenschaftlicher Untersuchungen war. Dem Mitherausgeber dieser Reihe, Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Hugo Fastl, gebührt Dank für seine Initiative und seinen Einsatz bei der Behandlung der Glocke unter dem Aspekt der Sound Quality. Frau Dipl.-Phys. Sieglinde Iosif und Frau Dipl.-Ing. Karin Danneberg sei ebenfalls herzlich gedankt. Frau Iosif hat seit Bestehen der Reihe viele wertvolle Hinweise bei der Korrektur der Manuskripte geliefert. Frau Danneberg hat ihre IT-Kenntnisse bei der Bedienung der Programme Matlab und VIPER eingesetzt und sich um die Fertigstellung des vorliegenden Bandes gekümmert.

LITERATUR

- Bauer, J., Schmidt, L., Einfluss der Glockenzier auf den Klang von Kirchenglocken. CFA/DAGA '04 in Straßburg 2004, Paris 2004, 91 - 92.
- Daniel, G., Programm zur Berechnung der musikalischen Tonhöhe. Studienarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 1984.
- Fastl, H., Beschreibung dynamischer Hörempfindungen anhand von Mithörschwellen-Mustern. Hochschulverlag, Freiburg 1982.
- Fastl, H., Zwicker, E., Psychoacoustics. Facts and models. 3. Aufl. Springer-Verlag, Berlin etc. 2007.
- Fleischer, H., Die Glocke. Teil I: Mechanische und akustische Experimente. Forschungsbericht 02/89 aus dem Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 1989a.
- Fleischer, H., Die Glocke. Teil II: Elastokinetische und psychoakustische Berechnungen. Forschungsbericht 03/89 aus dem Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 1989b.
- Fleischer, H., Spinning Modes. Forschungs- und Seminarberichte aus dem Gebiet Technische Mechanik und Flächentragwerke 1/94. Hrsg. F.A. Emmerling und A.H. Heinen, UniBw München, Neubiberg 1994.
- Fleischer, H., Schwingung und Tonhöhe von Glockenspielglocken. Forschungs- und Seminarberichte aus dem Gebiet Technische Mechanik und Flächentragwerke 1/96. Hrsg. F.A. Emmerling und A.H. Heinen, UniBw München, Neubiberg 1996a.
- Fleischer, H., Glockenspielglocken: Schwingung und Tonhöhe. In: Fortschritte der Akustik (DAGA '96), Hrsg. T. Portele und W. Hess. DEGA, Oldenburg 1996b, 318 - 319.
- Fleischer, H., Glockenschwingungen. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/97. Hrsg. H. Fleischer und H. Fastl. Universität der Bundeswehr München, Neubiberg 1997.
- Fleischer, H., Schwingung und Schall von Glocken. In: Fortschritte der Akustik (DAGA 2000). DEGA, Oldenburg 2000, 38 - 47.
- Fleischer, H., Fastl, H., Sattler, M., Wann klingt ein Glockenklang nach Kirchenglocke? In: Fortschritte der Akustik (DAGA 2007), DEGA, Berlin 2007.
- Fleischer, H., Rotter, R., Das Phänomen der Spinning Modes. In: Fortschritte der Akustik (DAGA '94), DPG-GmbH, Bad Honnef 1994, 553 - 556.
- Fruhmann, M., Ein Modell zur Wahrnehmung der Ausgeprägtheit der Tonhöhe. Dissertation TU München, 2006.
- Haseler, T., Die Glocke. FEM-Berechnungen der Schwingungen von Rotationskörpern. Studienarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 1993.
- Heesemann, M., Lambertus, R., FEM-Berechnungen an Glocken. Studienarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 1995.
- Kramer, K., (Bearb.), Glocken in Geschichte und Gegenwart: Beitr. zur Glockenkunde. Beratungsausschuß für d. Dt. Glockenwesen. Karlsruhe, Badenia-Verlag 1986.

- Lehr, A., Entwurf und Optimierung beliebiger Glockenrippen auf dem Computer mit Hilfe finiter Elemente. In: Beiträge zur Glockenkunde 11. - 12. Band 1999/2000. Bearb. von Kurt Kramer. Badenia-Verlag, Karlsruhe 2000, 313 - 323.
- Lemme, H., Hörbares sichtbar machen. *Elektronik* 22 (2000), 150 – 155.
- Lenski, Franziska, Psychoakustische Untersuchungen an Schallsignalen von Musikinstrumenten. Diplomarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 2007.
- Perrin, R., Charnley, T., DePont, J., Normal modes of the modern English church bell. *J. Sound and Vibration* 90 (1980), 29 - 49.
- Rossing, T.D. (Hrsg.), *Acoustics of bells*. Van Nostrand Reinhold, New York 1984.
- Sattler, M., Auralisation einer Kirchenglocke. Studienarbeit an der TU München, Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, AG Technische Akustik, München 2006.
- Schad, C.-R., Form-Klang-Rechnungen an Glocken. *Acustica* 64 (1987), 272 - 275.
- Schad, C.-R., *Wörterbuch der Glockenkunde*. Hallwag Verlag, Stuttgart 1996.
- Schaible, A., Tonhöhe von Glockenspielglocken. Diplomarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 1995.
- Schlagowski, C., Tonhöhe von Pauken- und Glockenklängen. Studienarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 1993.
- Schoofs, B., van Asperen, F., Maas, P., Lehr, A., Theorie der Versuchsplanung und Optimierung der Konstruktion im Entwurf einer Große-Terz-Glocke. *CAMP '85, C 4.2.*, 1985.
- Schoofs, B., van Asperen, F., Maas, P., Lehr, A., A carillon with major third bells I. Computation of bell profiles using structural optimization. *Music Perception* 4 Nr. 3; Frühjahr 1987, 245 - 254.
- Terhardt, E., Zur Tonhöhenwahrnehmung von Klängen. Teil I: Psychoakustische Grundlagen. *Acustica* 26 (1972a), 173 - 186.
- Terhardt, E., Zur Tonhöhenwahrnehmung von Klängen. Teil II: Ein Funktionsschema. *Acustica* 26 (1972b), 187 - 199.
- Terhardt, E., Calculating virtual pitch. *Hearing Research* 1 (1979), 155 - 182.
- Terhardt, E., *Akustische Kommunikation*. Springer, Berlin 1998.
- Valenzuela, Miriam Noemi, Untersuchungen und Berechnungsverfahren zur Klangqualität von Klaviertönen. Herbert Utz Verlag Wissenschaft, München 1998.
- Valenzuela, Miriam Noemi, Zur Rolle des Gehörs bei akustischen Untersuchungen an Musikinstrumenten. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/99. Hrsg. H. Fleischer und H. Fastl. Universität der Bundeswehr München, Neubiberg 1999a.
- Valenzuela, Miriam Noemi, persönliche Kommunikation an der Universität der Bundeswehr München, Neubiberg 1999b.
- VIPER PerceptualXplorer* Version 1.11. Manual, NCI, Regensburg 2000.
- Zwicker, E., Feldtkeller, R., *Das Ohr als Nachrichtenempfänger*. 2. Aufl. Hirzel Verlag, Stuttgart 1967.

In der Reihe

Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik (ISSN 1430-936X)

sind bisher erschienen:

- Heft 1/96 Fleischer, H. und Zwicker, T., DEAD SPOTS. Zum Schwingungsverhalten elektrischer Gitarren und Baßgitarren.
- Heft 1/97 Fleischer, H., Glockenschwingungen.
- Heft 1/98 Fleischer, H., Schwingungen akustischer Gitarren.
- Heft 1/99 Valenzuela, M.N., Zur Rolle des Gehörs bei akustischen Untersuchungen an Musikinstrumenten.
- Heft 2/99 Fleischer, H., Dead Spots of Electric Basses. I. Structural Vibrations (in Englisch).
- Heft 1/00 Fleischer, H., Dead Spots of Electric Basses. II. Diagnosis (in Englisch).
- Heft 2/00 Varsányi, A., Zur Akustik des javanischen *gong ageng*.
- Heft 3/00 Krump, G., Der akustische Nachton. Beschreibung und Funktionsschema.
- Heft 1/01 Fleischer, H., Schwingungsuntersuchungen an Gongs.
- Heft 2/01 Fleischer, H., Schwingungsuntersuchungen an elektrischen Gitarren.
- Heft 1/02 Fleischer, H., Nichtlinearität bei Gongs: Analyse des Schallsignals.
- Heft 2/02 Fleischer, H., Gehörbezogene Analyse von Gongklängen.
- Heft 1/03 Fleischer, H., Schwingungs- und Schalluntersuchungen an der indischen Tabla.
- Heft 1/04 Fleischer, H., Schwingung und Schall eines Hackbretts.
- Heft 1/05 Fleischer, H., Vibroakustische Untersuchungen an Paukenfellen.
- Heft 1/06 Fleischer, H., Korpussschwingungen einer Elektrogitarre.

Anfragen richten Sie bitte an

Helmut Fleischer
LRT 4 UniBwM
D-85577 Neubiberg

oder

helmut.fleischer@unibw.de

ISSN 1430-936X

Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik