

**BEITRÄGE
ZUR
VIBRO- UND PSYCHOAKUSTIK**

Herausgeber: Helmut Fleischer und Hugo Fastl

Helmut Fleischer

**GEHÖRBEZOGENE ANALYSE
VON GONGKLÄNGEN**

GEHÖRBEZOGENE ANALYSE VON GONGKLÄNGEN

von

Helmut Fleischer

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

Heft 2/02 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
Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Technische Universität München

Postanschrift:

LRT 4 UniBwM
85577 Neubiberg
Deutschland

Fleischer, Helmut:
Gehörbezogene Analyse von Gongklängen
Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 2/02
Neubiberg 2002
ISSN 1430-936X

Postanschrift des Verfassers:

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

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.

GEHÖRBEZOGENE ANALYSE VON GONGKLÄNGEN

Zusammenfassung

Die Schallsignale von sieben Burma-Gongs, zwei Java-Gongs und zwei Flachgongs (Tamtams) werden untersucht. Eingangs werden die Gongs durch ihre wichtigsten geometrischen Kennwerte und Grundfrequenzen gekennzeichnet. Die psychoakustischen Grundlagen, auf denen die Analyse aufbaut, wie z.B. Frequenzgruppen und spektrale Maskierung, werden zusammengestellt. Ernst Terhardts Verfahren der Fourier-Zeit-Transformation (FTT), Konturierung und Repräsentation eines Schallsignals als Teilton-Zeit-Muster ist in zwei unterschiedlichen Programmsystemen umgesetzt. Mit Hilfe der ersten Version, die von Terhardts Forschungsgruppe geschaffen wurde, hat Miriam Valenzuela am Institut für Mechanik fünf Burma-Gongs untersucht. Die spektrale Maskierung ist mit einbezogen und ermöglicht eine weitgehende Reduzierung der Teiltöne. Eine zweite Version, VIPER genannt, ist kommerziell erhältlich von der Firma Cortex in Regensburg. Mit diesem Programm hat Tom Roida am Institut für Mechanik Auditorische Spektrogramme und Frequenzkontur-Diagramme für alle Burma-Gongs, die Java-Gongs und die Flachgongs ermittelt. Unter der Voraussetzung, dass die Analyseparameter geeignet gewählt sind, werden die Gongklänge visuell auf eine Weise dargestellt, die eng mit der Hörempfindung verknüpft ist („Sehen, was man hört, hören, was man sieht“). Die gehörgerechte Analyse hebt die Teiltöne und Amplitudenschwankungen (Schwebungen) hervor, welche die Hörempfindung bestimmen. Dieses Vorgehen erleichtert, unterstützt und rechtfertigt somit die Interpretation der Ergebnisse physikalischer Untersuchungen.

AURALLY RELATED ANALYSIS OF GONG SOUNDS

Summary

The acoustic signals of seven Burma gongs, two Java gongs and two shallow gongs (tamtams) are studied. At the beginning, the gongs are characterized by their main geometric parameters and fundamental frequencies. The psychoacoustic foundations, on which the analysis is based, e.g. critical bands and spectral masking, are assembled. Ernst Terhardt's approach of Fourier Time Transformation (FTT), contouring and representing an acoustic signal as a part tone-time-pattern is executed in two different program systems. Using the first version, which was created by Terhardt's research group, Miriam Valenzuela has investigated five Burma gongs at the Institute of Mechanics. Spectral masking is included and allows for an extensive reduction of the number of part tones. A second version, named VIPER, is commercially available from the Cortex company, Regensburg. By means of this program, Tom Roida has determined Auditory Spectrograms and frequency contour plots of the sounds of all Burma gongs, the Java gongs and the shallow gongs at the Institute of Mechanics. Provided that the analysis parameters are suitably chosen, the gong sounds are visually represented in a way closely related to the aural sensation (“see what you hear, hear what you see”). The aurally adequate analysis emphasizes the part-tones and amplitude fluctuations (beats) which determine the aural sensation. Thus, this approach facilitates, supports and justifies the interpretation of the results of physical investigations.

INHALT

VORWORT

1.	EINLEITUNG	1
2.	UNTERSUCHUNGSOBJEKTE	3
2.1.	Kleiner Burma-Gong Nr. I	4
2.2.	Kleiner Burma-Gong Nr. II	4
2.3.	Mittlerer Burma-Gong Nr. III	5
2.4.	Mittlerer Burma-Gong Nr. IV	6
2.5.	Großer Burma-Gong Nr. V	6
2.6.	Großer Burma-Gong Nr. VI	7
2.7.	Großer Burma-Gong Nr. VII	8
2.8.	Große Java-Gongs Nr. VIII und IX	8
2.9.	Flachgongs Nr. X und XI	10
2.10.	Zusammenfassende Bemerkung	12
3.	PSYCHOAKUSTISCHE GRUNDLAGEN	14
3.1.	Frequenzgruppen	14
3.2.	Ruhehörschwelle	15
3.3.	Spektrale Maskierung	16
3.3.1.	Mithörschwellen von Schmalbandrauschen	16
3.3.2.	Mithörschwellen von Sinustönen	18
3.4.	Zusammenfassende Bemerkung	18
4.	GEHÖRBEZOGENE ANALYSE NACH TERHARDT	20
4.1.	Das Teilton-Zeit-Muster	20
4.1.1.	Teilton-Zeit-Muster des Burma-Gongs Nr. I	20
4.1.2.	Teilton-Zeit-Muster des Burma-Gongs Nr. III	23
4.1.3.	Teilton-Zeit-Muster des Burma-Gongs Nr. VI	25
4.2.	Berücksichtigung weiterer psychoakustischer Effekte	27
4.2.1.	Mithörschwellen	28
4.2.2.	Modulationsschwellen	30
4.3.	Bearbeitete Teilton-Zeit-Muster	30
4.3.1.	Burma-Gong Nr. I	31
4.3.2.	Burma-Gong Nr. III	32
4.3.3.	Burma-Gong Nr. VI	32
4.3.4.	Burma-Gongs Nr. V und VII	33
4.4.	Zusammenfassende Bemerkung	35
5.	GEHÖRBEZOGENE ANALYSE MIT VIPER	36
5.1.	Verarbeitung von Schallsignalen im Programm	36
5.2.	Anwendungen in Hinsicht auf Gongklänge	38

5.3. Untersuchungen an Gongklängen	38
5.3.1. Burma-Gongs	39
5.3.2. Java-Gongs	40
5.3.3. Flachgongs	42
5.4. Zusammenfassende Bemerkung.....	43
6. ABSCHLIESSENDE DISKUSSION.....	45
LITERATUR.....	47

ANHANG

Anhang 1: Analysen des Burma-Gongs Nr. I nach Valenzuela (1998 b)	A 1
Anhang 2: Analysen des Burma-Gongs Nr. III nach Valenzuela (1998 b)	A 2
Anhang 3: Analysen des Burma-Gongs Nr. V nach Valenzuela (1998 b)	A 3
Anhang 4: Analysen des Burma-Gongs Nr. VI nach Valenzuela (1998 b)	A 4
Anhang 5: Analysen des Burma-Gongs Nr. VII nach Valenzuela (1998 b)	A 5
Anhang 6: VIPER-Analysen des Burma-Gongs Nr. I nach Roida (2002)	A 6
Anhang 7: VIPER-Analysen des Burma-Gongs Nr. II nach Roida (2002)	A 7
Anhang 8: VIPER-Analysen des Burma-Gongs Nr. III nach Roida (2002)	A 8
Anhang 9: VIPER-Analysen des Burma-Gongs Nr. IV nach Roida (2002)	A 9
Anhang 10: VIPER-Analysen des Burma-Gongs Nr. V nach Roida (2002)	A 10
Anhang 11: VIPER-Analysen des Burma-Gongs Nr. VI nach Roida (2002)	A 11
Anhang 12: VIPER-Analysen des Burma-Gongs Nr. VII nach Roida (2002)	A 12
Anhang 13: VIPER-Analysen des Java-Gongs Nr. VIII (<i>gong suwukan</i>) nach Roida (2002)	A 13
Anhang 14: VIPER-Analysen des Java-Gongs Nr. IX (<i>gong ageng</i>) nach Roida (2002)	A 14
Anhang 15: VIPER-Analysen des Flachgongs Nr. X (<i>fengluo</i>) nach Roida (2002)	A 15
Anhang 16: VIPER-Analysen des Flachgongs Nr. XI (Paiste) nach Roida (2002)	A 16
Anhang 17: Zuordnung der Farben zu Pegelwerten nach Roida (2002)	A 17
Anhang 18: Gong Nr. X bei unterschiedlich starkem Anschlag nach Roida (2002)	A 17

VORWORT

Mit dem vorliegenden Band „Gehörbezogene Analyse von Gongklängen“ beschreitet Helmut Fleischer einen Weg, der dem Konzept der Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik optimal entspricht: In Band 1/01 hat er die Schwingungsmuster von Gongs dargestellt – eine typische Arbeit zur Vibroakustik. In Band 1/02 hat er dann die von Gongs abgestrahlten Schallsignale behandelt, die als Schallreize die Eingangsgrößen für psychoakustische Betrachtungen liefern. Der vorliegende Band 2/02 zeigt nun folgerichtig die Bedeutung der von Gongs erzeugten Schallreize für die Hörwahrnehmung auf. Solche Betrachtungen sollten aus meiner Sicht wesentlich häufiger als derzeit üblich der krönende Abschluss akustischer Untersuchungen sein, da letztendlich der Musiker oder Zuhörer mit seinem *G e h ö r* über die Qualität eines Musikinstrumentes entscheidet (N.B. Auch beim Kauf eines Pkws oder eines Haushaltsgerätes spielt das Klangbild eine wesentliche Rolle; der Kunde beurteilt das Produkt mit seinem Gehör, nicht mit einem noch so ausgeklügelten Messgerät!).

Souverän weist Helmut Fleischer nach, dass viele der mühsam gesuchten und gefundenen Schwingungsformen und Nichtlinearitäten von Gongs mit ihren zugehörigen Spektralanteilen im Schallsignal nichts zur Hörwahrnehmung beitragen! Der „Trick“ der gewaltigen Datenreduktion besteht darin, dass eine gehöradäquate Frequenzskale verwendet wird und Maskierungseffekte einzelner Teiltöne untereinander berücksichtigt werden. Fortgeschrittene psychoakustisch basierte Messverfahren spiegeln den Höreindruck meist zutreffend wider: Je nach Tonlage und Frequenzabstand werden der 0-2-Ton und der erste Oberton als *e i n e* (musikalisch erwünschte) schwankende Tonhöhe oder aber als zwei benachbarte, getrennte Teiltöne wahrgenommen.

Die Farbabbildungen am Ende des Bandes machen deutlich, dass etwa ein halbes Dutzend Teiltöne zur Charakterisierung von Gongs im Bereich der Psychoakustik und Musik ausreicht. Äußerst wünschenswert wären nun Hörversuche mit re-synthetisierten Klängen, die Aufschluss darüber bringen würden, ob so wenige Teiltöne zur Darstellung des musikalischen Klanges eines Gongs tatsächlich genügen, oder ob zusätzliche Merkmale des Schallreizes benötigt werden, um einen musikalisch „echten“ Gong-Klang zu Gehör zu bringen.

München, im September 2002

Hugo Fastl

1. EINLEITUNG

Zweck eines Musikinstruments ist es, gezielt musikalisch nutzbaren Schall zu erzeugen. Akustische Instrumente verwenden für die Erzeugung und Abstrahlung mechanische Schwingungen. Nach Maßgabe der physikalischen Prinzipien, die dazu genutzt werden, lassen sich die Instrumente in Familien zusammenfassen. Zur Instrumentenfamilie der Idiophone (Hornbostel und Sachs 1914) gehören die Gongs, die im Folgenden behandelt werden. Bei Idiophonen (Selbstklinger) ist es ein und derselbe Körper, der durch seine Schwingung das musikalische Signal hervorruft und in Schall umsetzt.

Bei Aufschlagsidiophonen werden durch Anschlagen – bei Gongs mit einem Schlegel - freie Schwingungen des Instrumentenkörpers hervorgerufen. Die Frequenzen dieser Schwingungen sind in aller Regel unharmonisch, d.h. sie bilden keine harmonischen Intervalle. Zunächst entsteht beim Anschlagen kein Klang, sondern ein Geräusch. Beispiele sind Becken oder Flachgongs (Tamtams). Soll das Anschlaggeräusch die Wahrnehmung einer Tonhöhe hervorgerufen, sind mehrere Maßnahmen möglich:

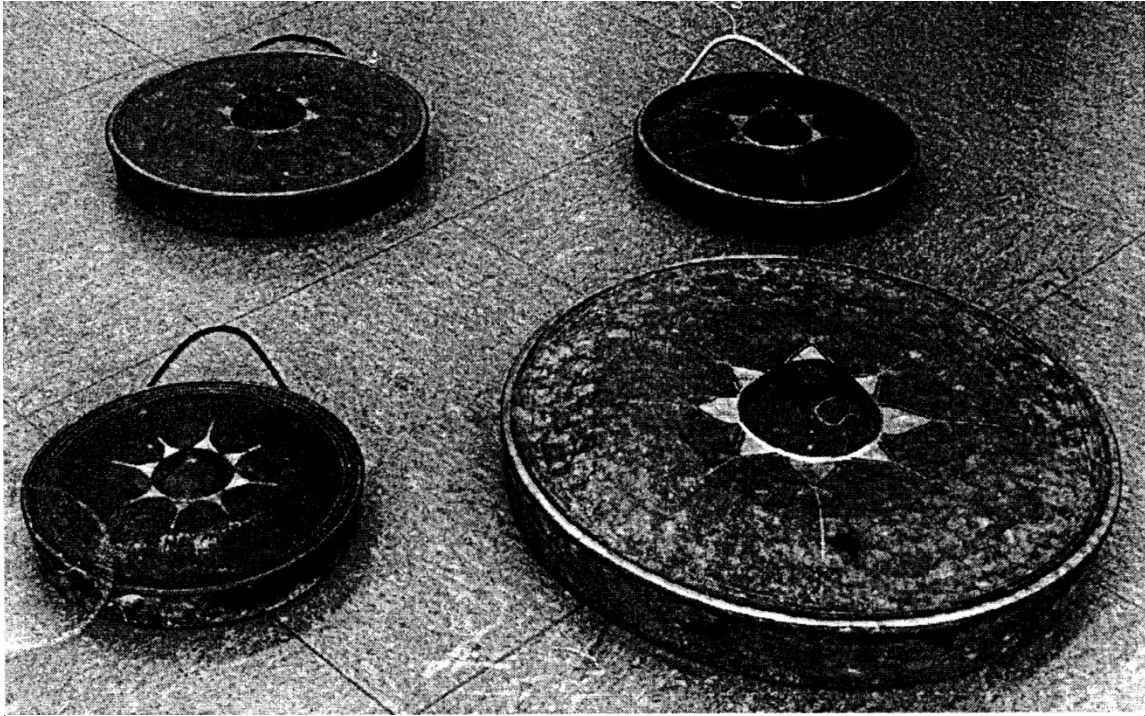
Zum einen kann die Amplitude des Grundtones gegenüber denen der übrigen Töne hervorgehoben werden. Beim Gong geschieht dies dadurch, dass am Schlagbuckel angeschlagen wird, der sich in der Mitte des Gongs befindet. Auf diese Weise werden erster Linie die axial-symmetrischen Schwingungsformen angeregt. Diejenigen Moden, die in der Mitte des Gongs Knoten aufweisen, treten nur schwach in Erscheinung. Raman (1927) formuliert dies folgendermaßen: „Die Anschlagstelle des Hammers wird ... so gewählt, daß der tiefste Ton mit weit größerer Stärke als irgendeiner der Obertöne erregt wird, und der akustische Effekt wird auf diese Weise weitgehend von der unangenehmen Klangwirkung unharmonischer Partialtöne befreit.“ Dies wird dadurch unterstützt, dass der Schlegel von geeigneter Masse sowie Härte ist und der Anschlag geschickt geführt wird.

Wie Raman (1927) schreibt, finden sich „andere Mittel ...“, um den tiefsten Ton des schwingungsfähigen Gebildes besonders hervortreten zu lassen, ... im Orient bei gewissen speziellen Formen des Gongs. Bei einer Art Gong trägt die elastische, im übrigen ebene Platte einen hervorspringenden halbkugelförmigen Buckel in der Mitte; bei einer anderen ist die Dicke der Platte ungleichmäßig.“ Nach derzeitigem Stand des Wissens (Fleischer 2001, 2002 b) dient die spezielle Form des asiatischen Buckelgongs, die Raman damit beschreibt, in erster Linie dazu, dem von der zweiten axialsymmetrischen Schwingung hervorgerufenen Ton eine Frequenz zu geben, die $e t w a$ doppelt so groß wie diejenige des Grundtones ist. Dabei handelt es sich um einen linearen Effekt.

Darüber hinaus wird auch ein nichtlinearer Effekt genutzt. Dieser wurde an Hand des Schallsignals, das asiatische Buckelgongs erzeugen, von Fleischer (2002 a) ausführlich studiert. Offenbar ist die Rückstellkraft des Gongs bei Druck anders als bei Zug mit der Folge, dass nichtlineare Verzerrungsprodukte entstehen. Darin unterscheidet sich dieses „Großsignalverhalten“, wie es im Spielbetrieb zum Tragen kommt, signifikant vom „Kleinsignalverhalten“, wie es bei der Schwingungsanalyse bisher untersucht worden war. Die wesentliche Auswirkung ist, dass sich ein Oberton ausbildet, der $g e n a u$ die doppelte Frequenz des Grundtons besitzt. Dies verstärkt zum einen die Wahrnehmung einer eindeutigen Tonhöhe. Zum anderen wirkt dieser Oberton mit dem benachbarten Ton, der von der zweiten axial-symmetrischen Schwingung herrührt, zusammen. Beim Hören verschmelzen die beiden Töne verschmelzen und erzeugen eine Schwebung, die für das Klangbild eines Buckelgongs charakteristisch ist.

Für die Untersuchungen kann im Institut für Mechanik dauerhaft auf mehrere Burma-Gongs zurückgegriffen werden, die dankenswerterweise die Firma Kolberg Percussion, Uhing, zur

Verfügung gestellt hat. Einige dieser Buckelgongs sind in Fig. 1 zu erkennen. Die bisher bereits vorgelegten Studien (Fleischer 2001 und 2002 b) hatten das Kleinsignalverhalten auf der Ebene mechanischer Schwingungen zum Thema. Das Großsignalverhalten (Fleischer 2002 a) wurde durch physikalische Analyse des Schallsignals gründlich untersucht.



*Fig. 1. Einige der untersuchten Buckelgongs
(links oben: Nr. IV, rechts oben: Nr. III, links unten: Nr. I, rechts unten: Nr. VI).*

Bei einem Teil der im Folgenden beschriebenen Studien wurden auch Schallsignale von Buckelgongs aus Java sowie von Flachgongs (Tamtams) untersucht, die aus dem Bestand von Dr. András Varsányi, Huglfing und Stadtmuseum München, stammen. Damit soll zum einen geprüft werden, inwiefern sich die Erkenntnisse, die bei Burma-Gongs gewonnen wurden, auf Buckelgongs verwandter, im Detail aber andersartiger Bauart übertragen lassen. Zum anderen sollen durch Vergleich mit Tamtams die Unterschiede herausgearbeitet werden, die aus der stark gekrümmten bzw. der weitgehend ebenen Geometrie von Buckel- bzw. Flachgongs für das Hören resultieren.

Der vorliegende Bericht hat zum Ziel, diejenigen Komponenten des Schallsignals zu extrahieren, die für die Hörwahrnehmung von Bedeutung sind. Dazu kommen Analyseverfahren zur Anwendung, die sich an den Eigenschaften des menschlichen Gehörs orientieren. Dieses Vorgehen ist als notwendige Ergänzung von physikalischen Experimente zu sehen, in denen bereits das lineare Schwingungsverhalten sowie der Nichtlinearität untersucht worden sind. Mit Hilfe der Erkenntnisse, die daraus resultieren, sollen einige der Lücken geschlossen werden, die hinsichtlich der Interpretation der Schwingung und des Schallsignals von Gongs derzeit noch bestehen. So soll die gehörbezogene Analyse die physikalischen Untersuchungen ergänzen, ihnen das richtige Gewicht beimessen und dazu beitragen, das Verständnis der Klangerzeugung zu erweitern und zu vertiefen.

2. UNTERSUCHUNGSOBJEKTE

Zur mechanischen Schwingung und zum akustischen Signal von Gongs liegen bereits eigene Untersuchungen vor; vgl. Fleischer (2001, 2002 a und b). Als Versuchsobjekte standen dafür hauptsächlich asiatische Buckelgongs zur Verfügung. Interessieren Geschichte und Herkunft von Gongs, empfiehlt sich die Lektüre des Buches von Varsányi (2000 a).

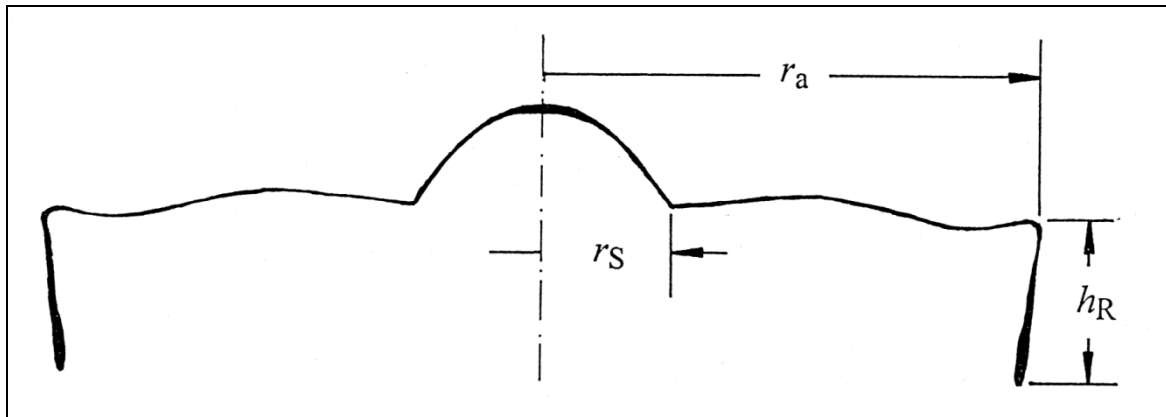


Fig. 2. Schnitt durch den Burma-Gong Nr. VI; die charakteristischen Abmessungen sind bezeichnet.

Der Zusammenstellung in Tab. I sind einige Angaben über die sieben Buckelgongs zu entnehmen, auf die sich die Betrachtungen in erster Linie beziehen. Diese stammen aus Burma.

Tab. I. Charakteristische Daten der Burma-Gongs, an denen Untersuchungen durchgeführt wurden

Nummer	Außenradius r_a	Radius r_s des Schlagbuckels	Höhe h_R des Randes	Frequenz f_{0-1} des Grundtones
I	16,5 cm	4,0 cm	5,0 cm	166 Hz
II	16,5 cm	÷	÷	219 Hz
III	18,5 cm	4,5 cm	5,2 cm	154 Hz
IV	20,5 cm	4,8 cm	5,8 cm	136 Hz
V	26,5 cm	6,0 cm	7,0 cm	101 Hz
VI	27,7 cm	7,0 cm	9,0 cm	104 Hz
VII	30,5 cm	7,0 cm	8,0 cm	93 Hz

Exemplare mit Außenradien bis 18 cm werden im Folgenden als klein, Gongs mit Außenradien von mehr als 25 cm als groß bezeichnet. Die dazwischen liegenden Instrumente sind der mittleren Größenklasse zugeordnet. In der Tabelle ist für jeden Gong die Frequenz f_{0-1} des Tones vermerkt, der von der ersten axialsymmetrischen Schwingungsmode (0 Knotendurchmesser, 1 Knotenkreis) herrührt. Die angegebenen Werte sind als Anhalt zu verstehen; nach Maßgabe der Messmethode und der Frequenzauflösung können sie in gewissem Ausmaß differieren. Ähnliches gilt für die geometrischen Angaben, deren Bedeutung Fig. 2 entnommen werden kann. Da keiner der Gongs absolut rotationsymmetrisch gearbeitet ist, stellen die angegebenen Abmessungen lediglich mittlere Werte dar.

2.1. Kleiner Burma-Gong Nr. I

Fig. 3 gibt den kleinsten Gong Nr. I, aufgehängt an der dafür vorgesehenen Schnur, samt dem zugehörigen Original-Schlegel wieder. Er hat die Masse 1,3 kg. Die zentrale Kalotte (siehe auch Fig. 2) stellt den Schlagbuckel dar, an dem der Gong mit dem Schlegel angeschlagen wird. Der umgebördelte Rand (siehe ebenfalls Fig. 2) ist aus dieser Perspektive nicht zu erkennen. Im Folgenden wird der Bereich zwischen Schlagbuckel und Rand als Platte bezeichnet. Bei allen betrachteten Burma-Gongs ist die Frontfläche dadurch verziert, dass der dunkle Belag bis auf die metallisch glänzende Bronze abgekratzt ist. Im Bild erkennt man einen achtzackigen Stern um den Schlagbuckel und vier konzentrische Kreise am Rand.

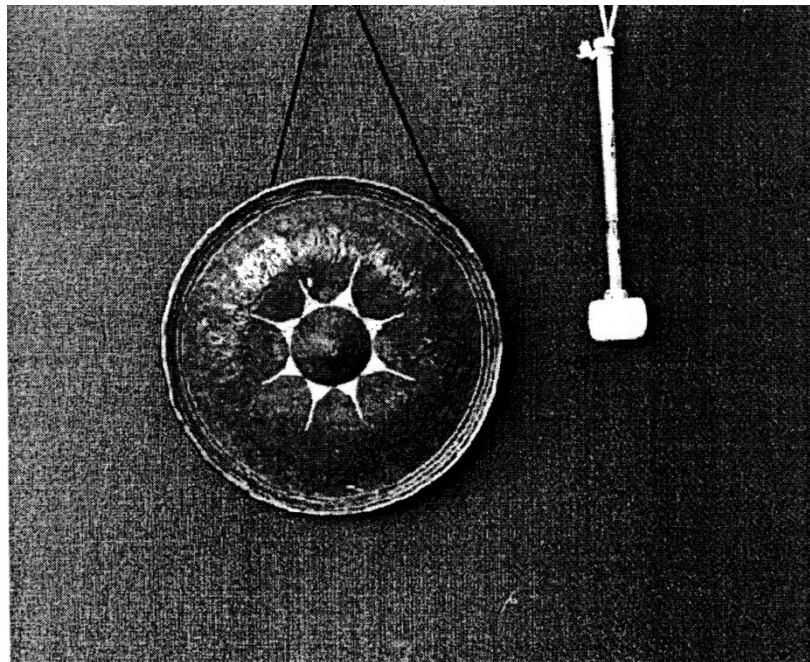


Fig. 3. Frontansicht des Buckelgongs Nr. I mit zugehörigem Schlegel.

2.2. Kleiner Burma-Gong Nr. II

Der Gong Nr. II; der in Fig. 4 dargestellt ist, befindet sich inzwischen nicht mehr im Institut für Mechanik. Äußerlich weist er große Ähnlichkeit mit dem Gong Nr. I auf. Obwohl er praktisch den gleichen Außenradius hat, ist er wesentlich höher abgestimmt, so dass sein tiefster Teilton eine Frequenz von etwa 219 Hz aufweist. Damit weicht er von dem in Tab. I erkennbaren Zusammenhang ab, dass die Frequenz umso kleiner wird, je größer der Außenradius ist.

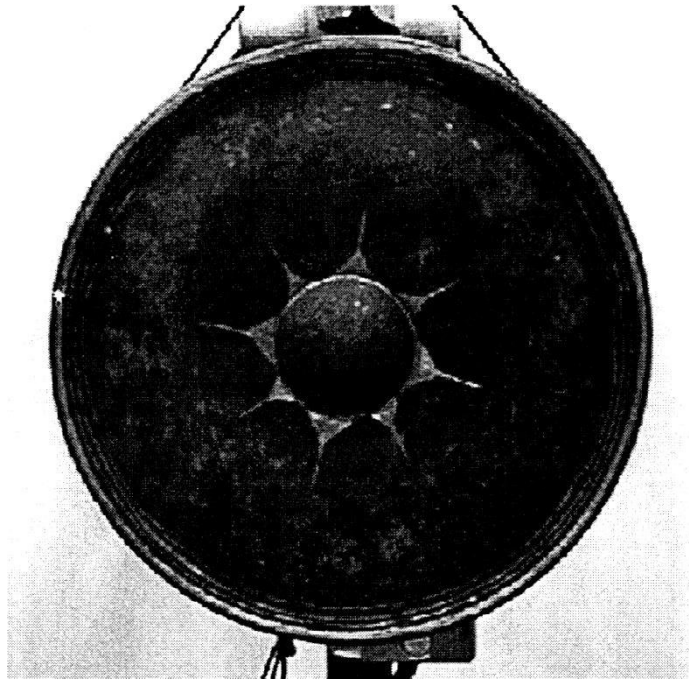


Fig. 4. Frontansicht des Buckelgongs Nr. II.

2.3. Mittlerer Burma-Gong Nr. III

In Fig. 5 ist der Gong Nr. III im selben Maßstab wie Gong Nr. I in Fig. 3 abgebildet. Dieses Exemplar ist etwas größer als die beiden bisher betrachteten; seine Masse beträgt etwa 2,2 kg. Der tiefste Teilton hat etwa die Frequenz 154 Hz. Der Schlegel kommt aus Burma.

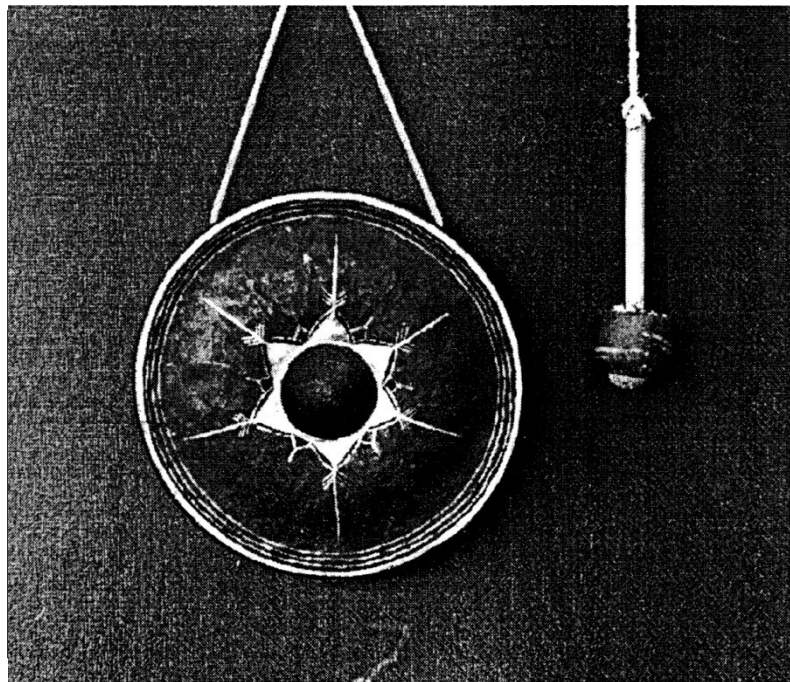


Fig. 5. Frontansicht des Buckelgongs Nr. III mit zugehörigem Schlegel.

2.4. Mittlerer Burma-Gong Nr. IV

Die Fotografie in Fig. 6 zeigt den Gong Nr. IV. Der Schlegel stammt von der Firma Kolberg und wurde hinsichtlich seiner Masse und Härte speziell für dieses Instrument ausgewählt. Wie bereits ein visueller Vergleich mit den Fig. 3 und 5 belegt, ist dieser Gong wiederum etwas größer als die bisher betrachteten; seine Masse beträgt circa 3,1 kg. Der Grundton besitzt ungefähr die Frequenz 136 Hz.

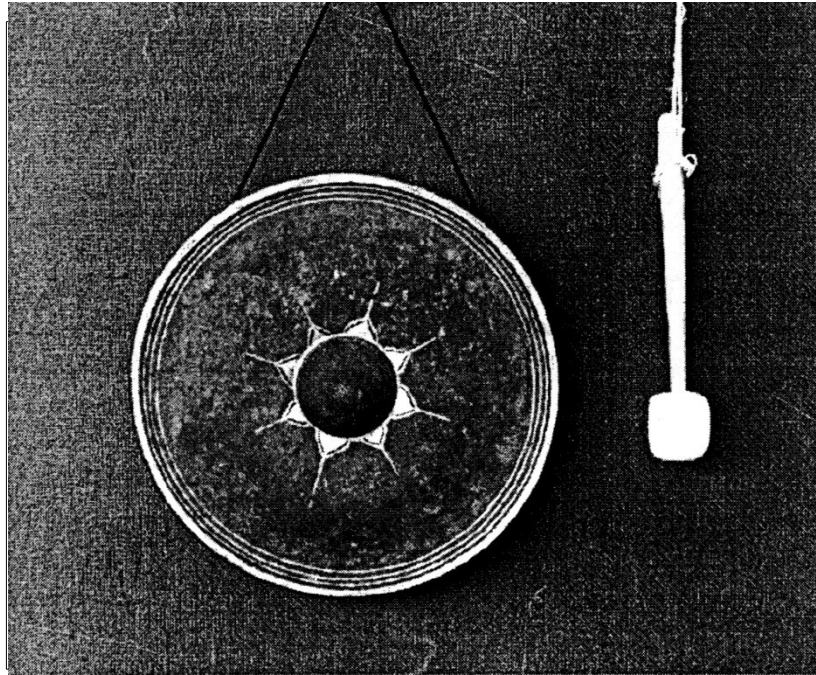


Fig. 6. Frontansicht des Buckelgongs Nr. IV mit zugehörigem Schlegel.

2.5. Großer Burma-Gong Nr. V

In Fig. 7 ist der Gong Nr. V abgebildet, dessen tiefster Teilton etwa die Frequenz 101 Hz hat. Er wurde mit einem ähnlichen, allerdings etwas größeren und schwereren Schlegel wie demjenigen angeschlagen, der in Fig. 6 zu erkennen ist. Die Verzierung um den Schlagbuckel weist eine etwas aufwendigere Ornamentik als die der bisher betrachteten Gongs auf.

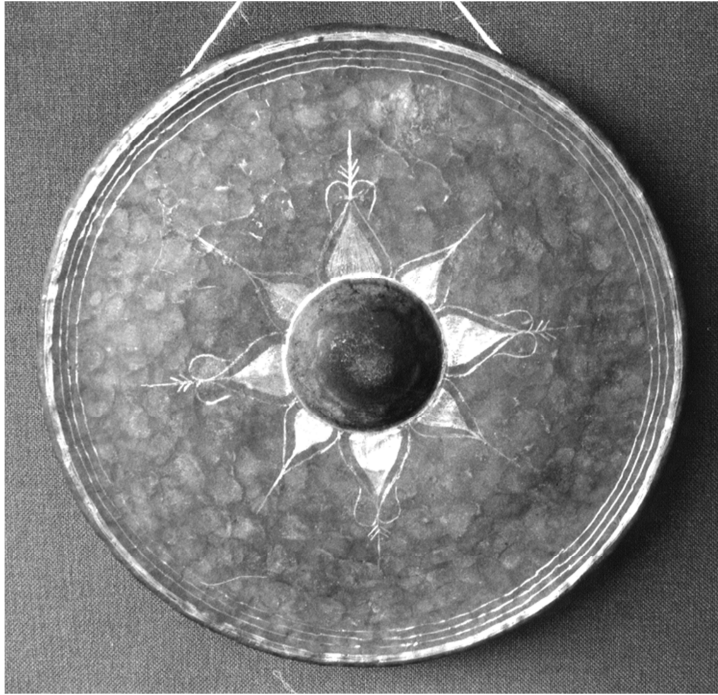


Fig. 7. Frontansicht des Buckelgongs Nr. V.

2.6. Großer Burma-Gong Nr. VI

Die Fotografie in Fig. 8 zeigt den Gong Nr. VI, dessen Masse 7,5 kg beträgt. Die Frequenz des ersten Teiltones ist 104 Hz. Er scheint von anderer Herkunft als die übrigen Burma-Gongs zu sein. Als einziges Exemplar weist er nicht die vier konzentrischen Rand-Ringe auf, sondern ist im äußeren Bereich der Platte mit einem rankenartigen Muster verziert.

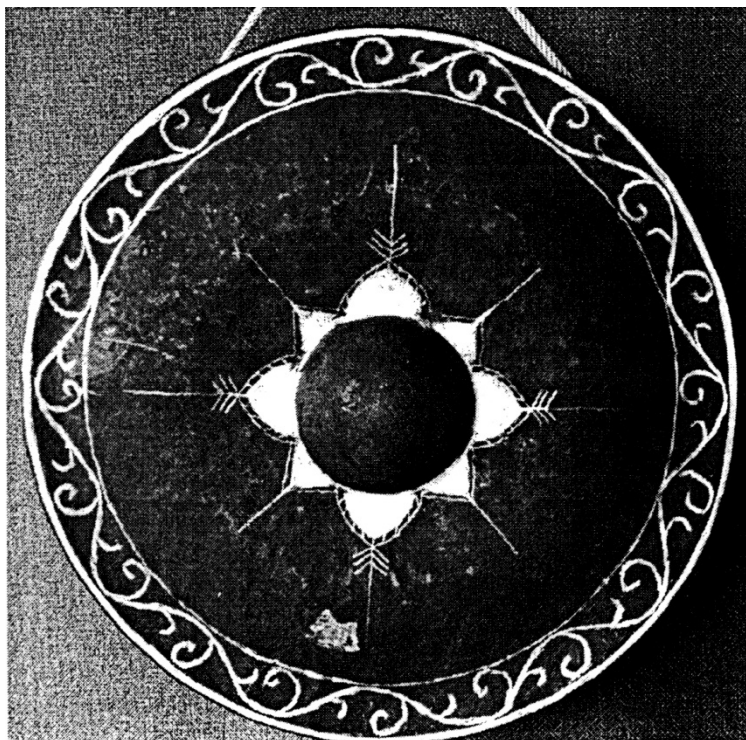


Fig. 8. Frontansicht des Buckelgongs Nr. VI.

2.7. Großer Burma-Gong Nr. VII

Der größte (Außenradius mehr als 30 cm) und schwerste (Masse 9,5 kg) der untersuchten Burma-Gongs ist in Fig. 9 abgebildet. Der tiefste Teilton hat etwa die Frequenz 93 Hz. Der zugehörige Schlegel stammt ebenfalls aus Burma.

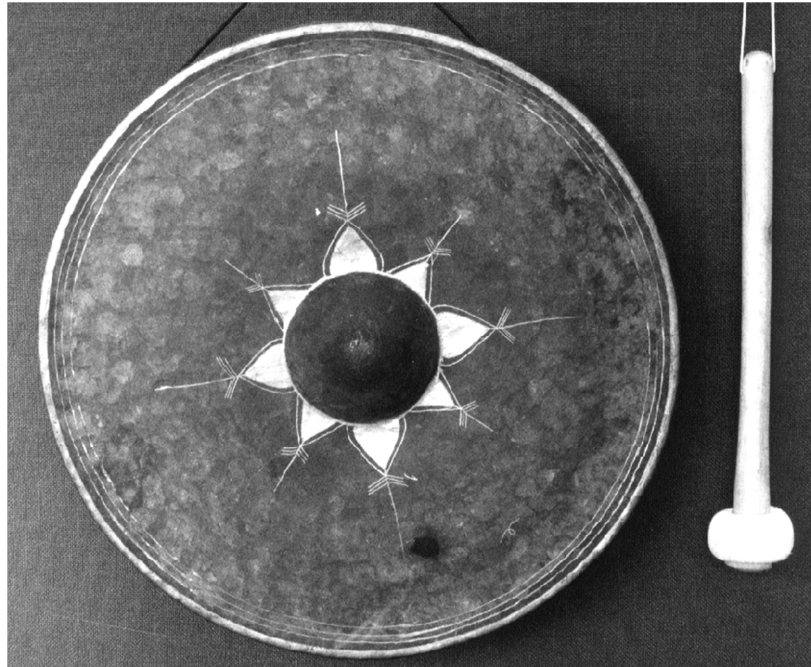


Fig. 9. Frontansicht des Buckelgongs Nr. VII mit zugehörigem Schlegel.

2.8. Große Java-Gongs Nr. VIII und IX

Im Privatbesitz von Dr. András Varsányi befinden sich zahlreiche Gongs, von denen vier kurzzeitig für Untersuchungen zur Verfügung standen. Einige Angaben zu zwei javanischen Buckelgongs finden sich in Tab. II.

Tab. II. Charakteristische Daten von zwei Java-Gongs, an denen Untersuchungen durchgeführt wurden

Nummer	Außenradius r_a	Masse	Frequenz f_{0-1} des Grundtones
VIII	30 cm	12,1 kg	83 Hz
IX	51 cm	44,5 kg	47 Hz

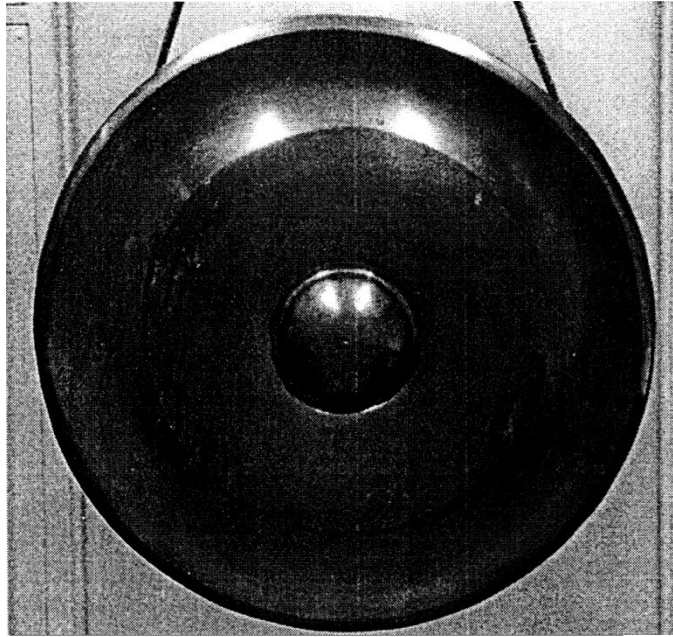


Fig. 10. Frontansicht des Buckelgongs Nr. VIII (gong suwukan).

Der Gong Nr. VIII (gong suwukan slendro 2, AV.88 gemäß Varsányi 2000 a und b) stammt aus Mitteljava. Er hat etwa den gleichen Außendurchmesser wie der Burma-Gong Nr. VII, jedoch ist sein Rand mit $h_R = 15$ cm sehr hoch. Der Java-Gong ist um 2,6 kg schwerer als dieser Burma-Gong; die Frequenz seines 0-1-Tones ist um 10 Hz tiefer. Fig. 10 zeigt seine Ansicht von vorne. Obwohl die Oberfläche hier glatt und ohne Einritzungen ist, erkennt man eine gewisse Verwandtschaft mit den bisher betrachteten Burma-Gongs. Fig. 11 sind das Schnittbild sowie einige Daten zur Geometrie zu entnehmen. Der Vergleich mit Fig. 2 lässt Unterschiede in der Kontur, aber auch eine weitgehende prinzipielle Ähnlichkeit erkennen.

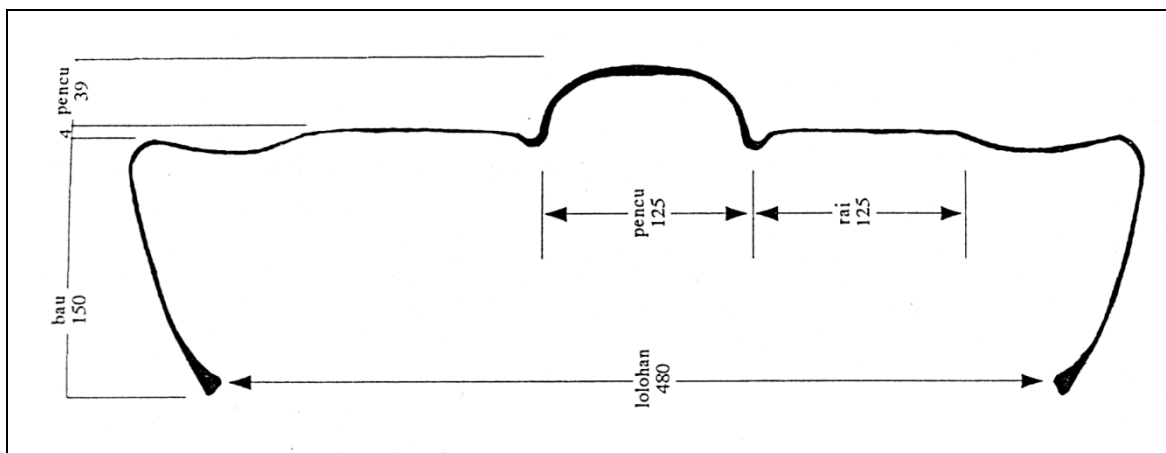


Fig. 11. Schnitt durch den Java-Gong Nr. VIII nach Varsányi (2000 a; Abb. 280); die charakteristischen Abmessungen sind angegeben und bezeichnet.

Der Java-Gong Nr. IX (gong ageng, AV.94 gemäß Varsányi 2000 a und b) ist mit mehr als einem Meter Durchmesser das größte und mit mehr als 44 kg auch das schwerste der unter-

suchten Instrumente. Die Frequenz seines 0-1-Tones liegt bei 47 Hz. In der Fotografie von Fig. 12 ist die Vorderansicht des Gongs, der in einem Gestell hängt, dargestellt. In der Schnittzeichnung von Fig. 13 sind einige weitere Angaben zur Geometrie vermerkt.

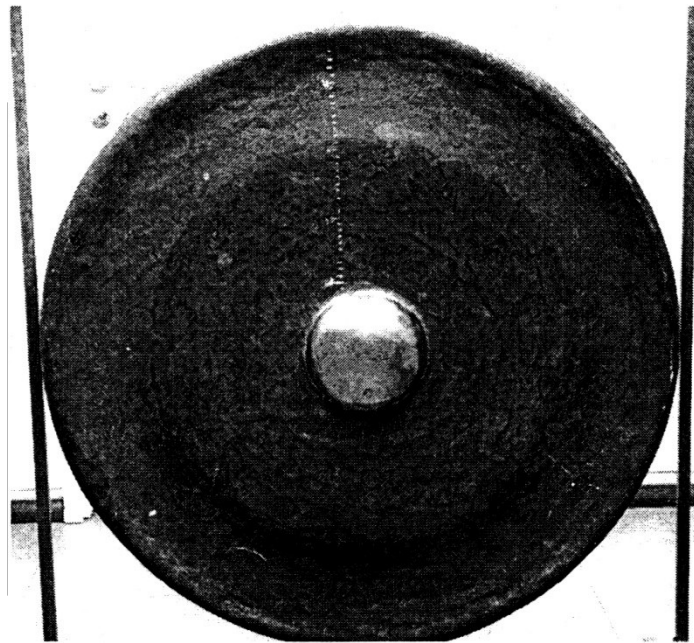


Fig. 12. Frontansicht des Buckelgongs Nr. IX (gong ageng).

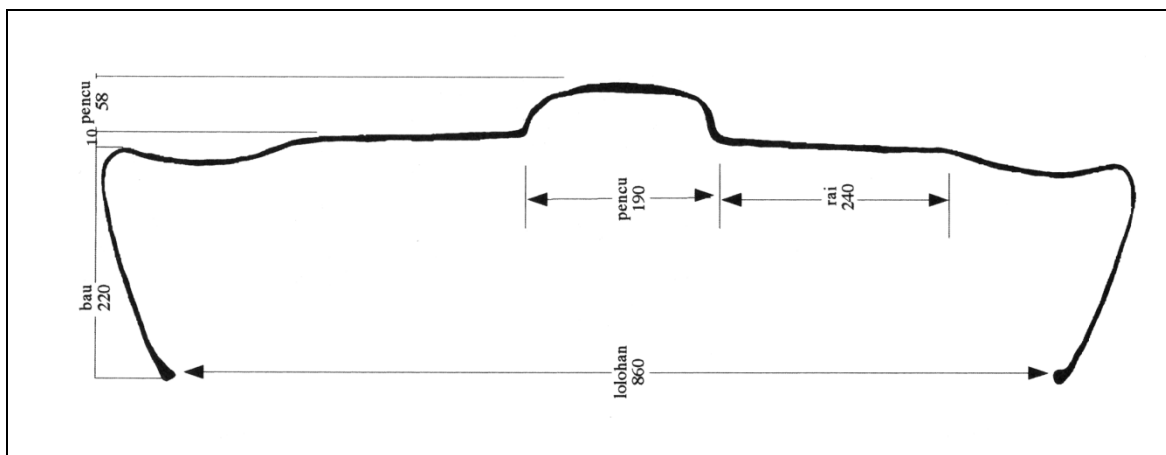


Fig. 13. Schnitt durch den Java-Gong Nr. IX nach Varsányi (2000 a; Abb. 279); die charakteristischen Abmessungen sind in mm angegeben und bezeichnet.

2.9. Flachgongs Nr. X und XI

In Ergänzung der Studien an den Buckelgongs wurden auch zwei Flachgongs aus dem Bestand von Dr. András Varsányi untersucht. Dieser ganz andersartige Typ von Gong wird auch als Tamtam bezeichnet. Er unterscheidet sich von den Buckelgongs z.B. dadurch, dass dem Schallsignal keine Tonhöhe zuzuordnen ist. Ein Flachgong wird außerhalb der Mitte angeschlagen und erzeugt einen donnerblechartigen, allmählich an- und langsam wieder abschwelldenden Schall. Einige Angaben zu zwei Instrumenten sind in Tab. III zusammengestellt.

Tab. III. Charakteristische Daten von zwei Flachgongs, an denen Untersuchungen durchgeführt wurden

Nummer	Außenradius r_a	Masse	Bezeichnung
X	27,5 cm	2,6 kg	<i>fengluo</i>
XI	38 cm	6 kg	Tamtam (Paiste)

Der Flachgong Nr. X (*fengluo*, AV.87 gemäß Varsányi 2000 b) stammt aus China. Er ist schwach konvex gewölbt; der Rand ist so gut wie nicht umgebogen. Wie Fig. 14 zeigt, mutet das Instrument wie ein Becken ohne zentrale Kuppe an, das an einer Schnur aufgehängt ist. Die Löcher für die Befestigungsschnur sind nahe dem Rand in die Platte gebohrt.

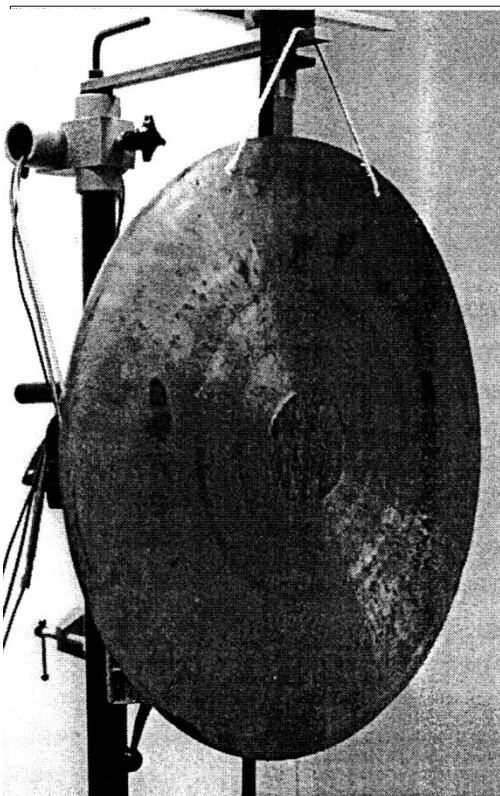


Fig. 14. Frontansicht des Flachgongs Nr. X (*fengluo*).

Ein weiterer Flachgong stammt im Gegensatz zu allen anderen untersuchten Instrumenten aus europäischer Produktion. Der Gong Nr. XI (AV.72 gemäß Varsányi 2000 b) ist ein Orchester-Tamtam der Firma Paiste. Fig. 15 ist zu entnehmen, dass es an einer Schnur hängt, die durch zwei Löcher im Rand geführt ist. Ebenso wie der Gong Nr. X weist dieses Instrument keinen zentralen Buckel auf. Die Platte ist flach und nur im zentralen Bereich etwas erhöht. Der Rand ist höher als beim Gong Nr. X, jedoch deutlich weniger ausgebildet als bei einem Buckelgong.

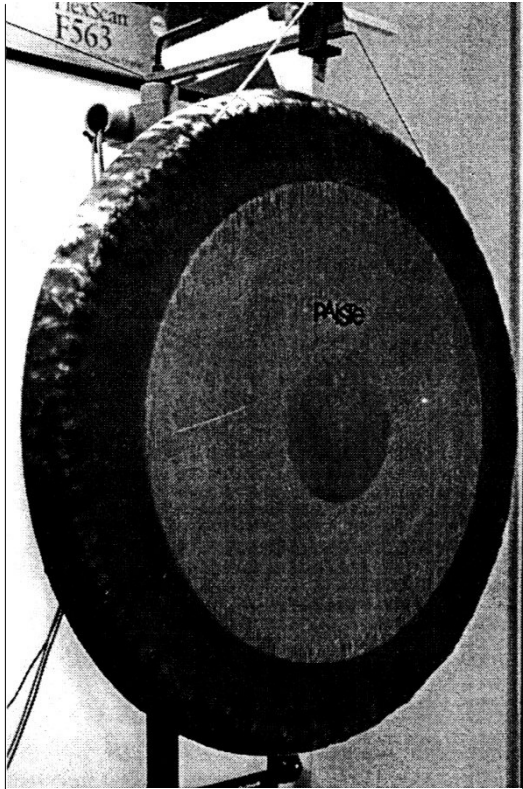


Fig. 15. Frontansicht des Flachgongs Nr. XI (Paiste).

2.10. Zusammenfassende Bemerkung

Das Ensemble der untersuchten Gongs umfasst insgesamt elf Exemplare. Zwei davon sind Flachgongs bzw. Tamtams, die nur aufgeführt sind, um Unterschiede zur anderen Klasse von Instrumenten aufzeigen zu können. Diese Klasse, die im Brennpunkt des Interesses steht, sind die Buckelgongs. Zwei davon stammen aus Java, sieben aus Burma. Aus der Gruppe der burmesischen Buckelgongs stehen sechs Exemplare für neue Messungen derzeit noch zur Verfügung.

Jeder Gong stellt ein Unikat dar. Nur auf den ersten Blick erscheint er axialsymmetrisch. Beim Nachmessen zeigen sich teilweise deutliche Abweichungen von der Drehsymmetrie, die im Verlaufe des langwierigen manuellen Bearbeitungsprozesses (Varsányi 2000 a) entstehen. Die geometrischen Angaben in diesem Kapitel sind demnach nur als Anhaltswerte aufzufassen. Die Erfahrung lehrt, dass Messungen an anderen Stellen der Kontur und unter anderen Winkeln abweichende Zahlenwerte ergeben können.

Fleischer (2001, 2002 a) hat bereits darauf hingewiesen, dass ebenso die Angabe der Frequenz mit einer prinzipiellen Unsicherheit behaftet ist. Diese hängt mit der Art der Messung zusammen. Die Frequenzwerte von Tab. I stammen aus einer Analyse des Schallsignals (Fleischer 2002 a). Die mit der Diskreten Fourier-Transformation (DFT) einhergehende Diskretisierung „rastert“ die Frequenzauflösung. Naturgemäß lassen sich Teiltonfrequenzen lediglich mit einer Genauigkeit angeben, wie sie durch das jeweilige Frequenzraster vorgegeben ist. Dies gilt ebenso für die Fast Fourier Transformation (FFT), die eine dem Computer angepasste Version der DFT ist und die bei den physikalisch motivierten Untersuchungen Anwendung fand.

Wird – wie bei der experimentellen Ermittlung der Eigenmoden (Fleischer 2001) – nicht mit freien, sondern mit erzwungenen Schwingungen gearbeitet, ist darüber hinaus mit weiteren

Abweichungen zu rechnen. Um die Kraft zu messen, mit der ein elektrodynamischer Schwingerreger den Gong anregt, wurde ein piezoelektrischer Kraftaufnehmer verwendet. Eine systematische Beeinflussung rührte daher, dass derjenige Teil der Masse des Kraftaufnehmers, der sich zwischen dem Piezoelement des Kraftaufnehmers und dem Gong befand, das Messobjekt „belastete“. In Folge dieser Zusatzmasse wurden die Schwingungsfrequenzen des Gongs abgesenkt. Erwartungsgemäß prägte sich diese Absenkung am deutlichsten bei rotations-symmetrischen Schwingungsformen und bei leichten Gongs aus, was bereits ein Vergleich der Tab. I dieses Berichts mit Tab. I bei Fleischer (2001) zeigt.

Eine ähnliche Beeinflussung ist dann zu erwarten, wenn die mechanische Schwingung des Gongs nicht berührungslos mit einem Laserstrahl, sondern mit einem piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmer gemessen wurde. Dieser war bei einigen Schwingungsmessungen auf den Gong aufgeklebt und „belastete“ durch seine zusätzliche, wenn auch geringe Masse das Messobjekt. Auch hieraus resultierten in der Tendenz etwas tiefere Frequenzen.

Bei den Experimenten, die diesem Kapitel ebenso wie den Kapiteln 4 und 5 zugrunde liegen, wurden die Gongs mit einem geeigneten Schlegel zum Schwingen gebracht. Es wurde ausschließlich der Schalldruck, berührungslos aufgenommen mit einem Kondensatormikrofon, gemessen und analysiert. Sämtliche hier angegebenen Frequenzen beziehen sich somit einheitlich auf freie Schwingungen, die der „unbelastete“ Gong nach dem Anschlagen ausführte.

Insbesondere mit den sieben burmesischen Buckelgongs liegt nun eine Gruppe von verwandten Instrumenten vor, die hinsichtlich des Durchmessers, der Masse und der Grundfrequenz eine weite Spanne umfasst. Ähnlich geformt sind die Java-Gongs, von völlig anderer Bauart dagegen die Flachgongs. In Ergänzung der „Kleinsignal“-Schwingungsmessungen (Fleischer 2001) und der rein physikalisch motivierten Schallanalysen (Fleischer 2002 a) wurde an diesen Gongs eine Reihe weiterer Untersuchungen durchgeführt. Die Schallsignale wurden einer Analyse unterworfen, die sich im Gegensatz zu den bisher angewandten Verfahren an die Eigenschaften des menschlichen Gehörs anlehnt.

3. PSYCHOAKUSTISCHE GRUNDLAGEN

Bevor die Klänge der Gongs einer gehörbezogenen Analyse unterzogen werden, sollen kurz diejenigen Grundzüge der Signalverarbeitung im Gehör zusammengestellt werden, die für die vorliegende Aufgabenstellung von Bedeutung sind. Die Darstellung lehnt sich eng an das psychoakustische Standardwerk von Zwicker und Fastl (1999) an, das wiederum auf dem Klassiker „Das Ohr als Nachrichtenempfänger“ von Zwicker und Feldtkeller (1967) aufbaut.

3.1. Frequenzgruppen

Zahlreiche Hörversuche (z.B. Untersuchungen zur Lautstärke oder zur Bestimmung von Mithörschwellen; vgl. Abschnitt 3.3) liefern Hinweise auf das spektrale Auflösungsvermögen des Gehörs. Dabei zeigt sich als ganz zentrale Erkenntnis, dass das Gehör den Frequenzbereich in die sog. Frequenzgruppen (*critical bands*) 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 (*critical bandwidth*) gefestigt, wie sie Fig. 16 als durchgezogene Kurve zu entnehmen ist. Leicht zu merken ist die Näherung

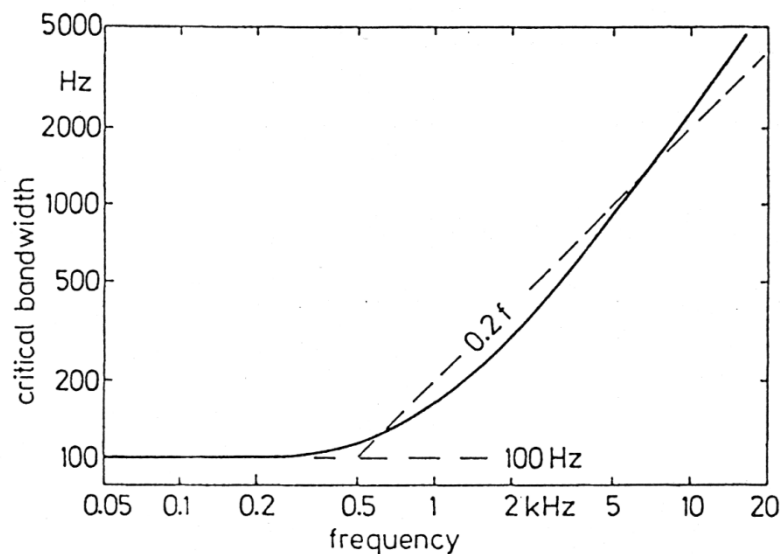


Fig. 16. Frequenzgruppenbreite (*critical bandwidth*) als Funktion der Frequenz (*frequency*) nach Zwicker und Fastl (1999).

durch die zwei gestrichelten Geraden: 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 Filterbank her. Deren Filter haben bis 500 Hz eine konstante absolute Bandbreite (ähnlich wie bei einer FFT-Analyse), bei höheren Frequenzen jedoch eine konstante relative Bandbreite (vergleichbar einer Analyse mit Terzfiltern). In dieser Hinsicht ist eine FFT-Analyse, wie sie beispielsweise von Fleischer (2002 a) zur Untersuchung nichtlinearer Effekte verwendet wurde, nicht gehöradäquat. Eine gehörbezogene Analyse muss die Frequenzgruppen berücksichtigen.

Reiht man die Frequenzgruppen lückenlos aneinander, so erhält man die Frequenzgruppenskala (*critical band rate scale*). Zu Ehren des Akustikers von Barkhausen wird als Einheit „Bark“ verwendet. Diese Bark-Skala führt auf die Tonheit z als gehörrichtige Transformation der physikalischen Frequenzskala 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. Die Bark-Skala teilt die Basilarmembran in gleich große Abschnitte. Sie ist demnach gehöradäquat und damit das naturgegebene Pendant zur physikalischen Frequenzskala.

3.2. Ruhehörschwelle

Ein ganz elementares Ergebnis psychoakustischer Untersuchungen ist in Fig. 17 dargestellt. Es ist die „Hörschwelle“ (*threshold in quiet*) des normalhörenden Menschen in ruhiger Umgebung. Sie gibt denjenigen Schallpegel (*level of test tone*) wieder, der notwendig ist, damit ein als „Sonde“ verwendeter Sinuston wahrnehmbar wird. Dieser Grenzwert kann beispielsweise nach der Methode des pendelnden Einregelns mit Hilfe eines Békésy-Audiometers bestimmt werden. Man erkennt, dass die Ruhehörschwelle stark von der Frequenz (*frequency of test tone*) abhängt. 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. Im diesem Bereich hängt die Hörschwelle vom Lebensalter (*age*) dergestalt ab, dass die Hörfähigkeit nachlässt, je älter man wird.

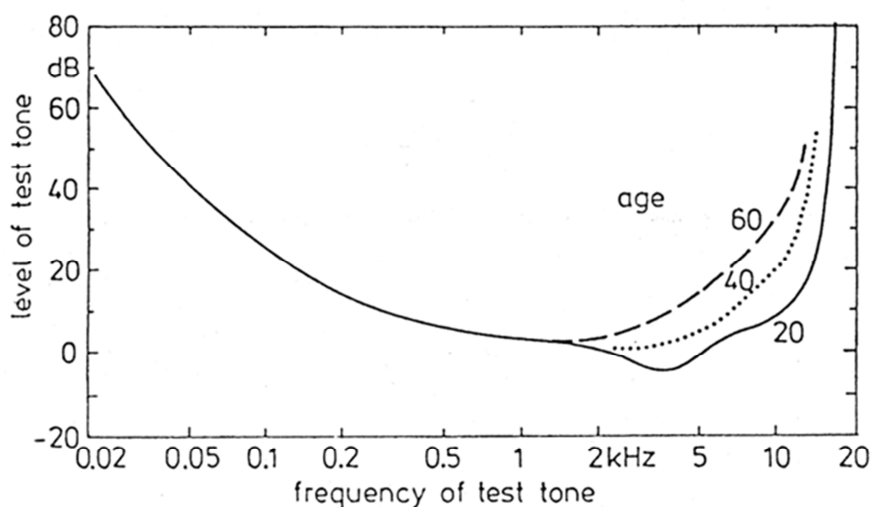


Fig. 17. Ruhehörschwelle als Funktion der Frequenz für unterschiedliche Lebensalter nach Zwicker und Fastl (1999).

Die „Hörfläche“ ist nach oben begrenzt durch die „Schmerzgrenze“, die hier nicht eingezeichnet ist. 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, also die Hörfläche, wird vom menschlichen Gehör genutzt.

Ein Ton (*test tone*), charakterisiert durch seine Frequenz und seinen Pegel, wird durch einen Punkt bzw. durch die Spitze einer Linie repräsentiert. Liegt der Punkt oberhalb der Schmerzgrenze, besteht die Gefahr, dass Schmerzempfindungen auftreten. Unterhalb der Hörschwelle ist er 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 relevant, die dazwischen, d.h. innerhalb der Hörfläche, liegen. Da nur diese Spektralanteile wahrgenommen werden können, sind im Sinne einer gehöradäquaten Informationsreduktion insbesondere sämtliche Schallkomponenten, die unterhalb der Hörschwelle liegen, irrelevant. Obwohl physikalisch vorhanden, tragen sie in keiner Weise zur Hörwahrnehmung bei.

3.3. Spektrale Maskierung

Physikalisch gemessene Frequenzen und Pegel von Spektralkomponenten eines Schallsignals besagen demnach für sich allein zunächst noch nichts. Bereits die Betrachtung der Ruheschwelle hat gezeigt, dass die messtechnische Nachweisbarkeit einer Schallkomponente noch nicht bedeutet, dass sie auch wahrgenommen wird und tatsächlich zur Hörempfindung beiträgt. Den Schlüssel zur gehöradäquaten Beurteilung der Rolle, die den Komponenten eines Schallsignals zukommt, liefert das „Mithörschwellen-Muster“. Es beschreibt den Effekt der „Verdeckung“ oder „Maskierung“ (englisch „*masking*“) der aus dem täglichen Leben bekannt ist: Durch einen lauten „Maskierer“ (z.B. ein vorbeifahrendes Auto) können leisere „Testschalle“ (z.B. Sprache) unhörbar werden. In der Psychoakustik werden als Testschalle in aller Regel Sinustöne verwendet, die als Sonde die spektrale Umgebung des Maskierers abtasten. Als Maskierer sind in Hinsicht auf Gongklänge andere Sinustöne sowie Breit- und Schmalbandrauschen von Interesse. Bei Schallsignalen großer Dauer ist die „spektrale Maskierung“ von entscheidender Bedeutung, die durch das Mithörschwellen-Frequenz-Muster gekennzeichnet wird. Ist der Schall weniger als etwa 500 ms lang, spielt auch die „zeitliche Maskierung“ (Mithörschwellen-Frequenz-Zeit-Muster) eine Rolle. Da die hier betrachteten Gongklänge relativ lange andauern, soll die zeitliche Maskierung im Sinne einer Konzentration auf das Wesentliche nicht behandelt werden; Näheres hierzu findet sich bei Fastl (1982).

3.3.1. Mithörschwellen von Schmalbandrauschen

Als Repräsentant eines schmalbandigen geräuschhaften Maskierers wird frequenzgruppenbreites Rauschen der Mittenfrequenz (*centre frequency*) f_c betrachtet. Dessen Stärke wird durch den Pegel L_{CB} charakterisiert. Als psychoakustischer Messwert ist in Fig. 18 der Pegel

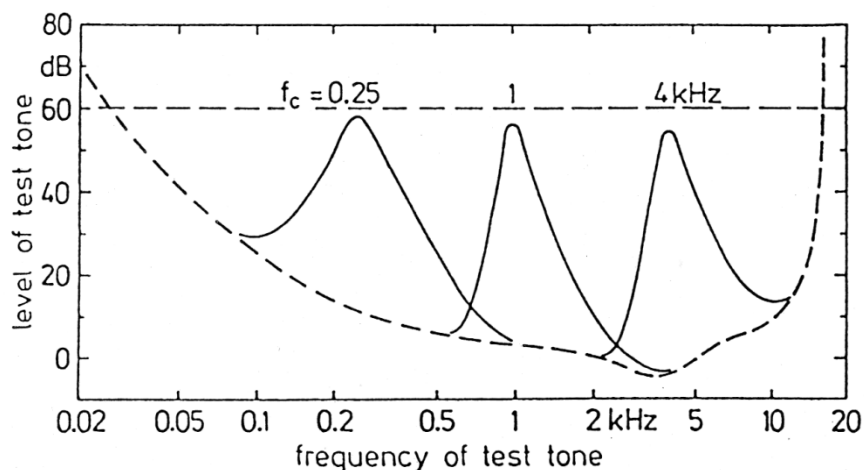


Fig. 18. Mithörschwellen von Testtönen, verdeckt durch Frequenzgruppenrauschen des Pegels 60 dB mit der Mittenfrequenz f_c , nach Zwicker und Fastl (1999).

des eben wahrnehmbaren Testtones (*level of test tone*) über seiner Frequenz (*frequency of test tone*) aufgetragen. Die gestrichelte Kurve repräsentiert die bereits von Fig. 17 her bekannte Ruhehörschwelle.

Fig. 18 zeigt drei Beispiele für Mithörschwellen (*masked thresholds*) von frequenzgruppenbreitem Schmalbandrauschen, dessen Frequenzlage durch die Mittenfrequenz f_c gekennzeichnet ist. Der Pegel beträgt in allen Fällen $L_{CB} = 60$ dB. Es ist derjenige Pegel des Test-Sinus-tones aufgezeichnet, der zum Hören des Testtones bei Vorhandensein des Maskierers mindestens notwendig ist. Man erkennt zwei Effekte:

- Zum einen verliert das Maximum der Mithörschwellen zu hohen Frequenzen 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 3.1. Die Mithörschwellen werden weitgehend deckungsgleich, sobald man sie über der Tonheit (Bark-Skala) aufträgt.

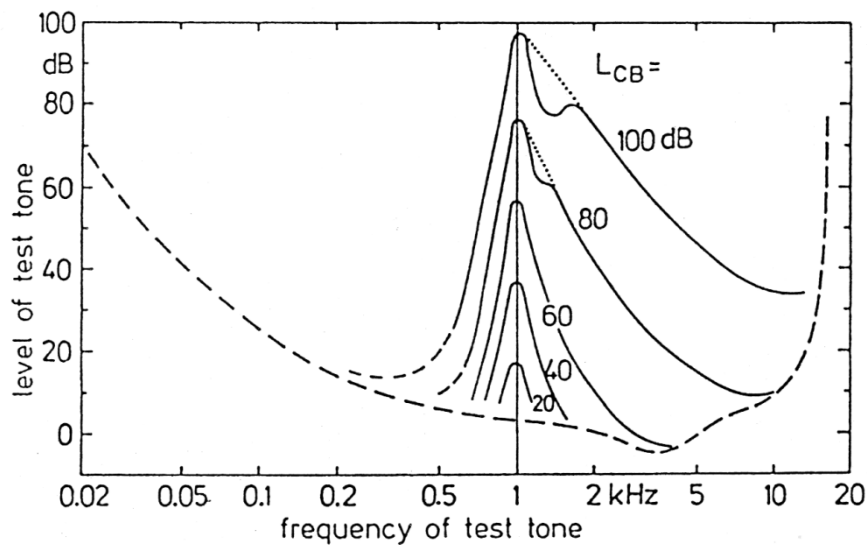


Fig. 19. Mithörschwelle von Testtönen, verdeckt durch 1 kHz-Frequenzgruppenrauschen des Pegels L_{CB} , nach Zwicker und Fastl (1999).

Wie die Mithörschwelle von Schmalbandrauschen vom Pegel abhängt, kann Fig. 19 entnommen werden. Das Diagramm zeigt Messergebnisse für ein Rauschen der gleichbleibenden Mittenfrequenz $f_c = 1$ kHz, das eine Frequenzgruppe breit ist und dessen Pegel L_{CB} unterschiedliche Werte annimmt. Im „Kern“ liegt die Mithörschwelle etwa 3 dB unterhalb von L_{CB} , was dem Verdeckungsmaß bei dieser Frequenz entspricht. Die „untere Flanke“ der Mithörschwelle ist vom Pegel nahezu unabhängig und steigt stets mit etwa 27 dB pro Bark an. Eine ausgeprägte Pegelabhängigkeit zeigt sich an der „oberen Flanke“: Während beim Pegel $L_{CB} = 40$ dB die Mithörschwelle auf der logarithmischen Frequenzskala nahezu symmetrisch ist, wird die obere Flanke mit wachsendem Pegel immer flacher. Man bezeichnet diesen Effekt als „nichtlineare Auffächerung“ der oberen Flanke. Er kann beträchtliche Ausmaße annehmen. So kann die Verdeckungswirkung bei hohen Frequenzen um bis zu 5 dB zunehmen, wenn der Pegel L_{CB} um nur 1 dB angehoben wird.

3.3.2. Mithörschwellen von Sinustönen

Als weiteres Beispiel für sehr schmalbandige Schallsignale bieten sich Sinustöne an. Im betrachteten Anwendungsfall entsprechen sie den Teiltönen des Gongklangs. Bei der Verdeckung von Sinustönen durch Sinustöne treten Interaktionen (z.B. Schwebungen, Summen- und Differenztöne) auf, die mit dem eigentlichen Maskierungseffekt nichts zu tun haben. Aufgrund solcher Interaktionen sind die Mithörschwellen von Sinustönen nicht so einfach zu bestimmen als diejenigen von geräuschhaften Maskierern.

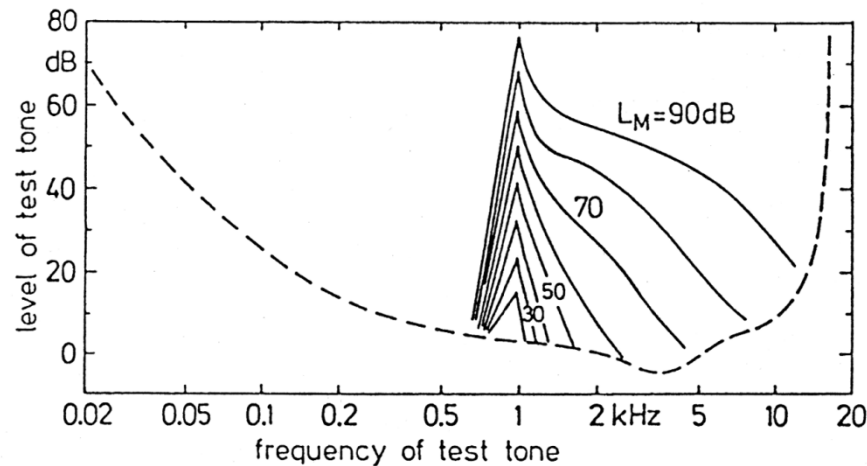


Fig. 20. Mithörschwelle von Testtönen, verdeckt durch einen 1 kHz-Sinuston des Pegels L_M , nach Zwicker und Fastl (1999).

In ihrer Gestalt sind die Mithörschwellen von Sinustönen als Maskierern denjenigen sehr ähnlich, bei denen der Maskierer ein Schmalbandrauschen ist. Die untere Flanke ist offenbar nicht davon abhängig, ob der Maskierer tonhaft oder geräuschhaft ist. Unterschiede zeigen sich in der absoluten Höhe und im Bereich der oberen Flanke. Dies lässt sich mit einem Vergleich der Fig. 19 und 20 belegen. So ähnelt die Mithörschwelle des Sinus-Maskierers (Fig. 20) des Pegels 90 dB im Kern und in der näheren Umgebung derjenigen eines Schmalbandrauschens (Fig. 19) mit dem Pegel 80 dB. Bei höheren Frequenzen des Testtones entspricht sie jedoch eher der Mithörschwelle eines Schmalbandrauschens mit dem Pegel 100 dB. Es bleibt also eine gewisse Ähnlichkeit der Verdeckungswirkung von tonhaften und geräuschhaften Maskierern festzuhalten. Zu hohen Frequenzen hin wirkt die maskierende Wirkung eines Sinustones jedoch weiter als diejenige eines Frequenzgruppenrauschens, das denselben Pegel aufweist.

3.4. Zusammenfassende Bemerkung

Einige Eigenschaften des Gehörs, die in umfangreichen psychoakustischen Versuchsreihen (Zwicker und Feldtkeller 1967, Zwicker und Fastl 1999) untersucht worden sind, erweisen sich für die Signalanalyse als so wichtig, dass sie in einem gehörbezogenen Verfahren unbedingt berücksichtigt werden sollten. Es sind dies vor allem

- das spektrale Auflösungsvermögen des Gehörs, wie es durch die Bark-Skala 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 Möglichkeiten, die Eigenschaften des Gehörs in dieser Hinsicht so weit nachzubilden, dass ein Schallsignal in ähnlicher Weise wie im Gehör spektral aufgelöst und überdies irrelevante von relevanter Information getrennt werden kann. Zwei solcher Verfahren sollen in den folgenden Kapiteln behandelt und entsprechende Ergebnisse dargestellt werden.

4. GEHÖRBEZOGENE ANALYSE NACH TERHARDT

In Erweiterung der physikalischen Untersuchungen, wie sie z.B. Fleischer (2001 a, 2002 a) beschrieben hat, wurden die Gongklänge zusätzlich einer gehöradäquaten Analyse unterzogen. Zuvor war jeder Gong im reflexionsarmen Raum des Instituts für Mechanik in eine Halterung gehängt und mit dem jeweiligen Schlegel am Schlagbuckel angeschlagen worden. Das auf diese Weise hervorgerufene Schallsignal war im Abstand von drei Metern mittels eines $\frac{1}{2}$ “-Mikrofons Brüel & Kjaer 4165 aufgenommen, mit Brüel & Kjaer-Standard-Ausrüstung verstärkt und samt einem 94 dB-Referenzton auf DAT aufgezeichnet worden. Die objektiven Untersuchungen wurden ergänzt durch weitere Analysen, bei denen diejenigen Eigenschaften des Gehörs, welche im vorigen Kapitel dargestellt sind, möglichst weitgehend nachgebildet werden sollten.

4.1. Das Teilton-Zeit-Muster

In Fortführung und Erweiterung ihrer Dissertation an der TU München (1998 a) hat Miriam Noemi Valenzuela am Institut für Mechanik Klänge von Musikinstrumenten, insbesondere solche mit unharmonischen Spektren, gezielt mit gehörsbezogenen Verfahren analysiert (Valenzuela 1998 b). Die Vorgehensweise und einige Ergebnisse sind im Heft 1/99 dieser Reihe beschrieben und dargestellt (Valenzuela 1999). Das Verfahren basiert auf Arbeiten von Ernst Terhardt und seiner Münchener Gruppe. Für einen Überblick hierzu siehe z.B. Terhardt (1998); weitere Literaturhinweise hat Valenzuela (1998 a, 1999) zusammengestellt.

Im ersten Schritt wird das „Teilton-Zeit-Muster“ bestimmt. Dazu dient die „Fourier-Zeit-Transformation“ oder „*Fourier Time Transformation*“ (FTT, Terhardt 1985), die es ermöglicht, die Analyse-Bandbreite an die Frequenzauflösung des menschlichen Gehörs anzupassen. Von grundlegender Bedeutung ist hierbei die Frequenzgruppe; vgl. Abschnitt 3.1. Sie ist dadurch charakterisiert, dass das Gehör anders reagiert, wenn die Spektralanteile eines Schallsignals innerhalb einer Frequenzgruppe liegen, als wenn sich diese über eine Frequenzgruppe hinaus erstrecken. In Fig. 16 war dargestellt worden, wie die Breite der Frequenzgruppe von der Mittenfrequenz abhängt. Der dort eingezeichneten Näherung zufolge ist die Frequenzgruppe unterhalb von 500 Hz etwa 100 Hz breit; darüber beträgt die Frequenzgruppenbreite näherungsweise 20% der Mittenfrequenz. Reiht man im Hörbereich des menschlichen Gehörs 24 Frequenzgruppen aneinander, so entsteht auf der Frequenzachse eine neue, gehöradäquate Skala. Die zugehörige Größe wird als Tonheit bezeichnet und mit der Einheit Bark versehen.

Valenzuela (1999) wählte für ihre Untersuchungen an Gongs die Analysebandbreite 0,1 Bark; die Analysefrequenzen liegen im Abstand 0,03 Bark. In einem anschließenden Rechenvorgang werden die informationstragenden Merkmale des Schallsignals in äquidistanten Auswertintervallen im Abstand von 2,5 ms dadurch extrahiert, dass die Maxima des zeitlich geglätteten Leistungsspektrums detektiert und durch Sinustöne dargestellt werden. So wird die gehörsrelevante Information eines Schallsignals im Teilton-Zeit-Muster somit durch Töne dargestellt, deren Frequenzen und Amplituden sich im Verlauf der Zeit ändern können.

4.1.1. Teilton-Zeit-Muster des Burma-Gongs Nr. I

Fig. 21 gibt als erstes Beispiel das Teilton-Zeit-Muster für den kleinen Gongs Nr. I wieder. Zur leichteren Interpretation sind in Tab. IV Ergebnisse von hochauflösenden FFT-Analysen des Schallsignals zusammengestellt, die sich auch in Tab. VIII bei Fleischer (2002 a) finden.

Zusätzlich zeigt Fig. 22 als Spektrum mit Tabelle das Ergebnis einer FFT-Analyse mit geringerer Auflösung, aber größerer Bandbreite. Aufgrund der unterschiedlichen Frequenzauflösung sind geringfügige Differenzen möglich.

Im Teilton-Zeit-Muster (Fig. 21) ist die Frequenz nach oben, die Zeit nach rechts aufgetragen. Der Pegel ist in Grauwerten kodiert. Eine farbige Repräsentation, die eine wesentlich bessere Zuordnung der Pegelwerte erlaubt, findet sich aus drucktechnischen Gründen nicht an dieser Stelle, sondern im Anhang (Anhang 1 oben). Als durchgehende dunkle Line – d.h. mit großem Pegel – zeichnet sich der 0-1-Grundton bei 166 Hz ab. Mit schwankender, sehr schwacher Amplitude folgt darauf bei etwa 265 Hz der 1-1-Ton, dem zwei gesplittete Partialschwingungen zugrunde liegen. Der 0-2-Ton (324 Hz) wird nicht vom Oberton des 0-1-Tones (332 Hz) separiert. Diese beiden Töne wirken zu einer „Schwebung“ zusammen, die sich in Fig. 21 als ein Ton bei etwa 328 Hz darstellt, dessen Amplitude mit etwa 8 Hz moduliert ist. Nach oben, d.h. zu höheren Frequenzen hin, schließt sich noch eine ganze Reihe weiterer Teiltöne an.

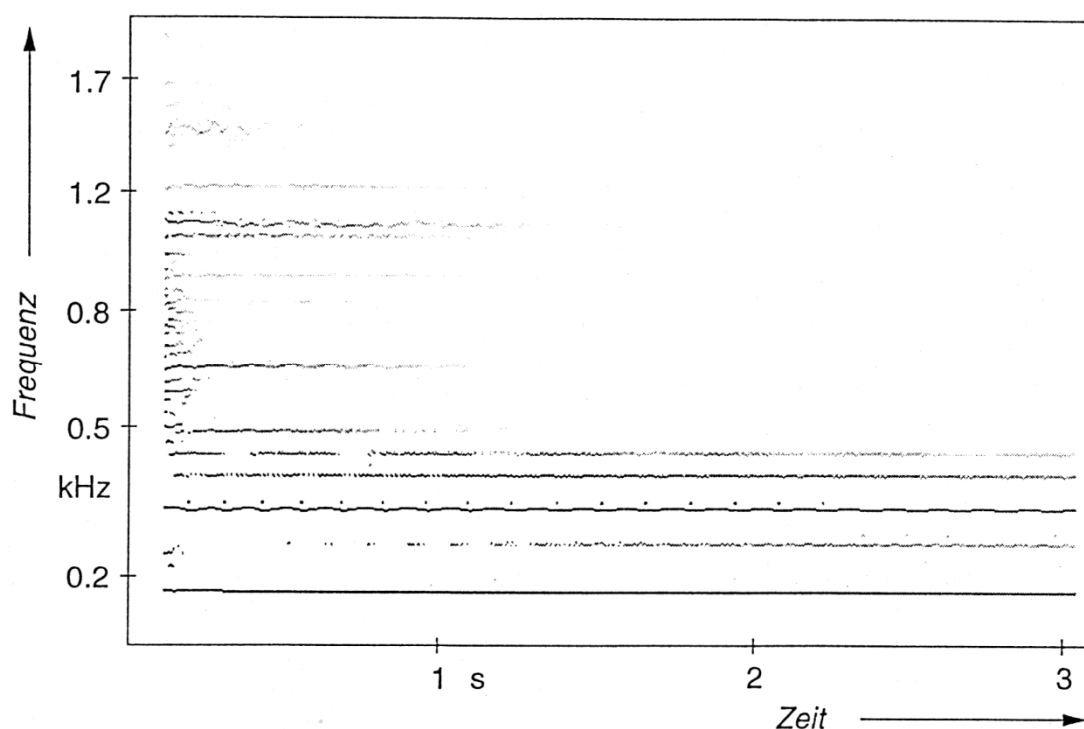


Fig. 21. Teilton-Zeit-Muster des Klanges des kleinen Burma-Gongs Nr. I nach Valenzuela (1999). Die Schwärzung ist ein Maß für den Pegel.

Diese Vorgehensweise, die zu der Repräsentation von Fig. 21 führt, steht in offenkundigem Gegensatz zur physikalisch-mathematisch motivierten *Fast Fourier Transformation*, wie sie Fleischer (2002 a) für die Suche nach nichtlinearen Verzerrungsprodukten im Schallsignal von Gongs angewandt hat und wie sie sich in Fig. 22 manifestiert. Die Intention des Vorgehens nach Terhardt (1985) ist es, die Eigenschaften des menschlichen Gehörs nachzubilden. Dies beinhaltet, dass im Teilton-Zeit-Muster nicht nur das Auflösungsvermögen des Gehörs hinsichtlich der Zeit, sondern insbesondere hinsichtlich der Frequenz (vgl. Abschnitt 3.1) berücksichtigt ist. Der Preis dafür ist naturgemäß, dass unter Umständen einzelne Teiltöne nicht mehr getrennt aufgelöst und den mechanischen Schwingungen zugeordnet werden können. Sämtliche Töne, die innerhalb der Analysebandbreite (hier beispielsweise 0,1 Bark) liegen, werden vielmehr zusammengefasst. Die Analyse ergibt dann nicht mehrere stationäre Sinustöne konstanter Amplituden und Frequenzen, sondern ein Schallsignal, dessen Amplitude und Frequenz über der Zeit variiert. Diese Schwebung entspricht der Hörwahrnehmung.

Tab. IV. Ergebnisse von Schalldruckmessungen am kleinen Burma-Gong Nr. I. Fett gedruckte Komponenten lassen sich Schwingungen zuordnen, die durch die Anzahl m der Knotendurchmesser und n der Knotenkreise gekennzeichnet sind. Normaldruck charakterisiert den quadratischen Oberton des 0-1-Grundtones

Mode <i>m-n</i>	Frequenz / Hz
0-1	165,937
1-1	÷
0-2	323,750
Oberton	331,562
1-2	392,812 / 409,437
2-1	441,250

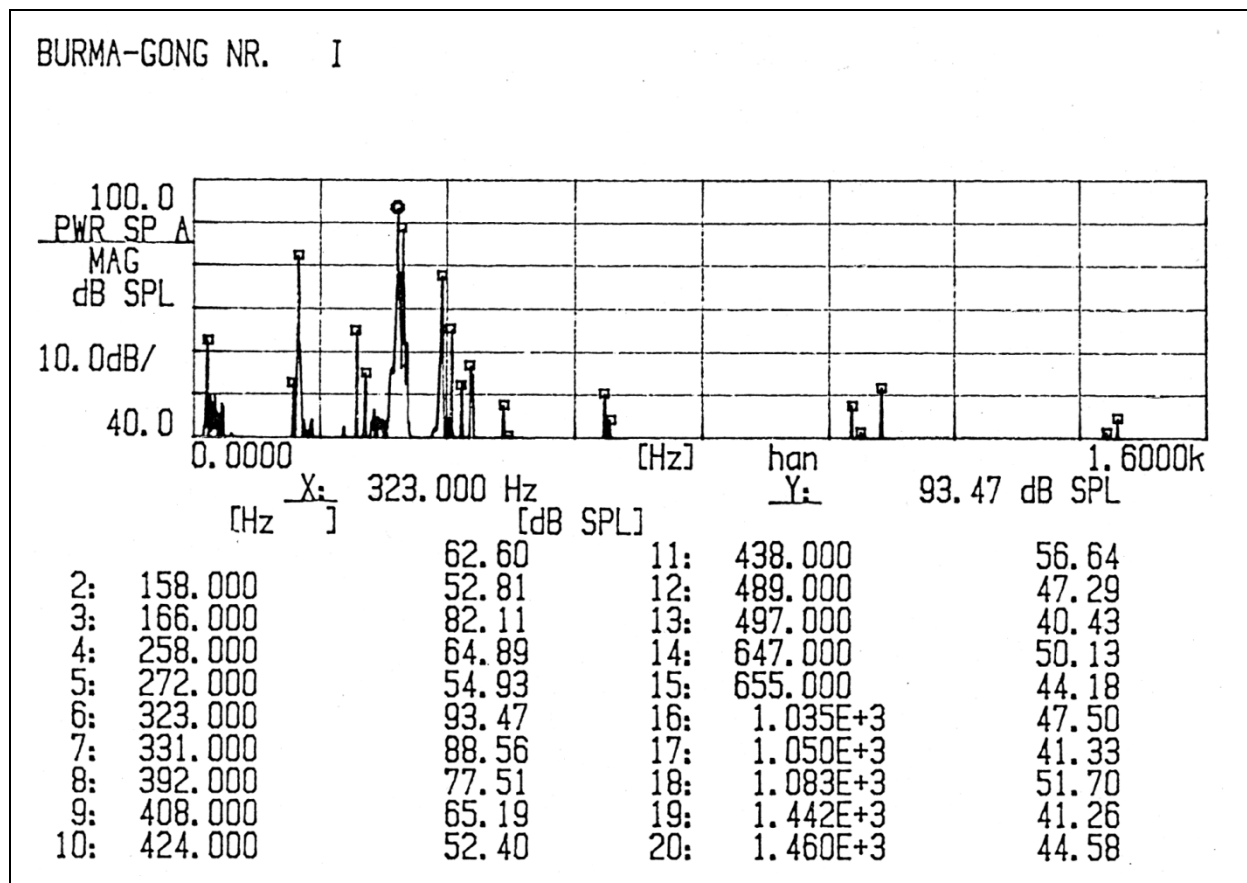


Fig. 22. FFT-Frequenz-Spektrum des Klanges des kleinen Burma-Gongs Nr. I.

Psychoakustische Aspekte hatten bei den bisherigen Untersuchungen an Gongs noch keine Rolle gespielt. Im Hinblick auf die Funktion eines Gongs als Musikinstrument besteht jedoch die dringende Notwendigkeit, die vorliegenden Ergebnisse der „objektiven“ Analysen durch nachgeschaltete „subjektive“ Untersuchungen zu interpretieren. Insbesondere Erscheinungen,

die mit der mehr oder weniger willkürlich gewählten Frequenzauflösung zusammenhängen, sind hinsichtlich ihrer Relevanz für das Hören zu bewerten. Zwar könnte dies mittels psychoakustischer Experimentalreihen erfolgen, lässt sich aber schneller und einfacher instrumentell durch die gehörbezogene Analyse bewerkstelligen. Wenn dabei - wie aus Fig. 21 zu ersehen war - zwei Töne ähnlicher Frequenzen nicht getrennt, sondern als ein Ton mit schwankender Amplitude dargestellt werden, dann ist dies nicht das Ergebnis einer wie auch immer gewählten Analysebandbreite. Vielmehr ist es ein Beleg dafür, dass Teiltöne so eng benachbart sind, dass das Gehör sie gemeinsam verarbeitet und eine Schwebung wahrnimmt.

4.1.2. Teilton-Zeit-Muster des Burma-Gongs Nr. III

Fig. 23 zeigt als weiteres Beispiel das Teilton-Zeit-Muster des mittleren Gongs Nr. III. Die Ergebnisse hochauflösender FFT-Analysen sind in Tab. V zusammengestellt; siehe auch Tab. X bei Fleischer (2002 a). Ergänzend ist in Fig. 24 eine FFT-Analyse des Schallsignals mit geringerer Frequenzauflösung und größerer Frequenzbandbreite hinzugefügt. Diskrepanzen der Frequenzangaben gehen auf die unterschiedliche Auflösung zurück. Die durchgehende dunkle Linie in Fig. 23 kennzeichnet den 0-1-Grundton bei 154 Hz. Mit schwankender, relativ schwacher Amplitude folgt darauf bei etwa 260 Hz ein Ton, dem zwei Partialschwingungen vom 1-1-Typ zugrunde liegen. Der Oberton des 0-1-Tones (309 Hz) wird hier vom 0-2-Ton (333 Hz) separiert. Nach oben schließt sich noch eine ganze Reihe weiterer Teiltöne an. Eine farbige Darstellung desselben Sachverhalts ist dem Anhang 2 (oben) zu entnehmen.

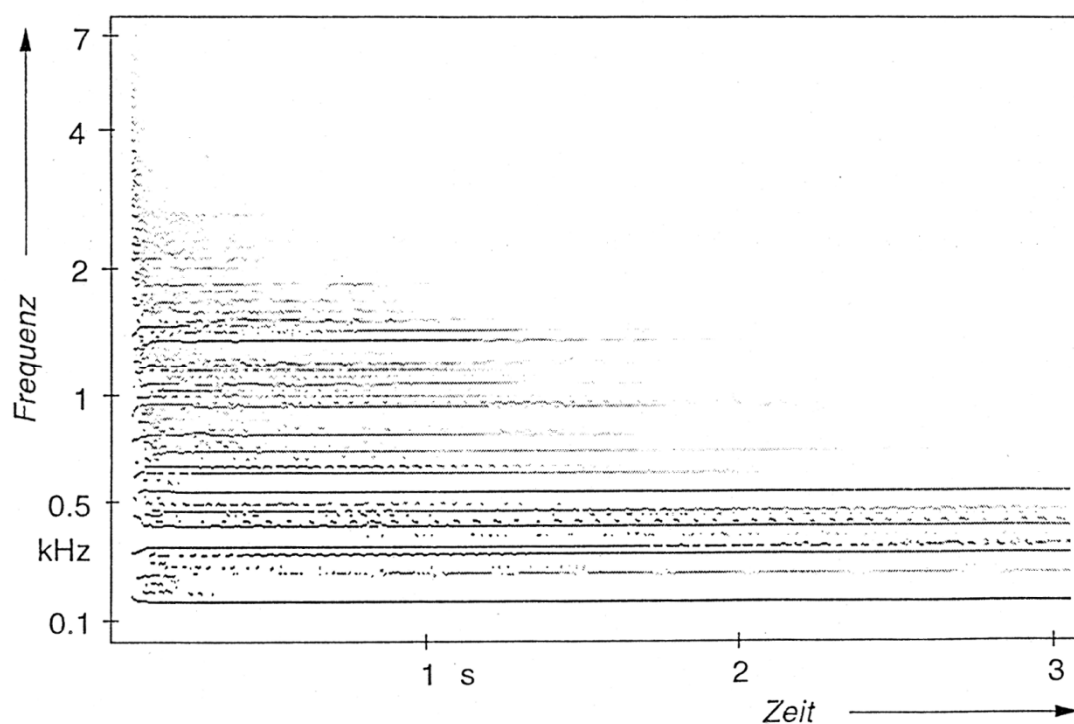


Fig. 23. Teilton-Zeit-Muster des Klanges des mittleren Burma-Gongs Nr. III nach Valenzuela (1999).
Die Schwärzung ist ein Maß für den Pegel.

Dieser Gong ist eines der seltenen Beispiele dafür, dass der 0-2-Ton und der Oberton des 0-1-Tones nicht nur bei der *Fast Fourier Transformation*, sondern ebenso auch im Teilton-Zeit-Muster getrennt aufgelöst werden. Bei beiden Analysen ergibt sich nicht als Schwebung e i n

Ton, dessen Amplitude und Frequenz über der Zeit variieren, sondern z w e i stationäre Töne. Dies entspricht dem Höreindruck.

Tab. V. Ergebnisse von Schalldruckmessungen am mittleren Burma-Gong Nr. III. Fett gedruckte Komponenten lassen sich Schwingungen zuordnen, die durch die Anzahl m der Knotendurchmesser und n der Knotenkreise gekennzeichnet sind. Normaldruck charakterisiert den quadratischen Oberton des 0-1-Grundtones

Mode <i>m-n</i>	Frequenz / Hz
0-1	154,375
1-1	250,250 / 266,250
Oberton	308,750
0-2	333,125
1-2	372,500 / 404,687
2-1	420,625 / 445,625

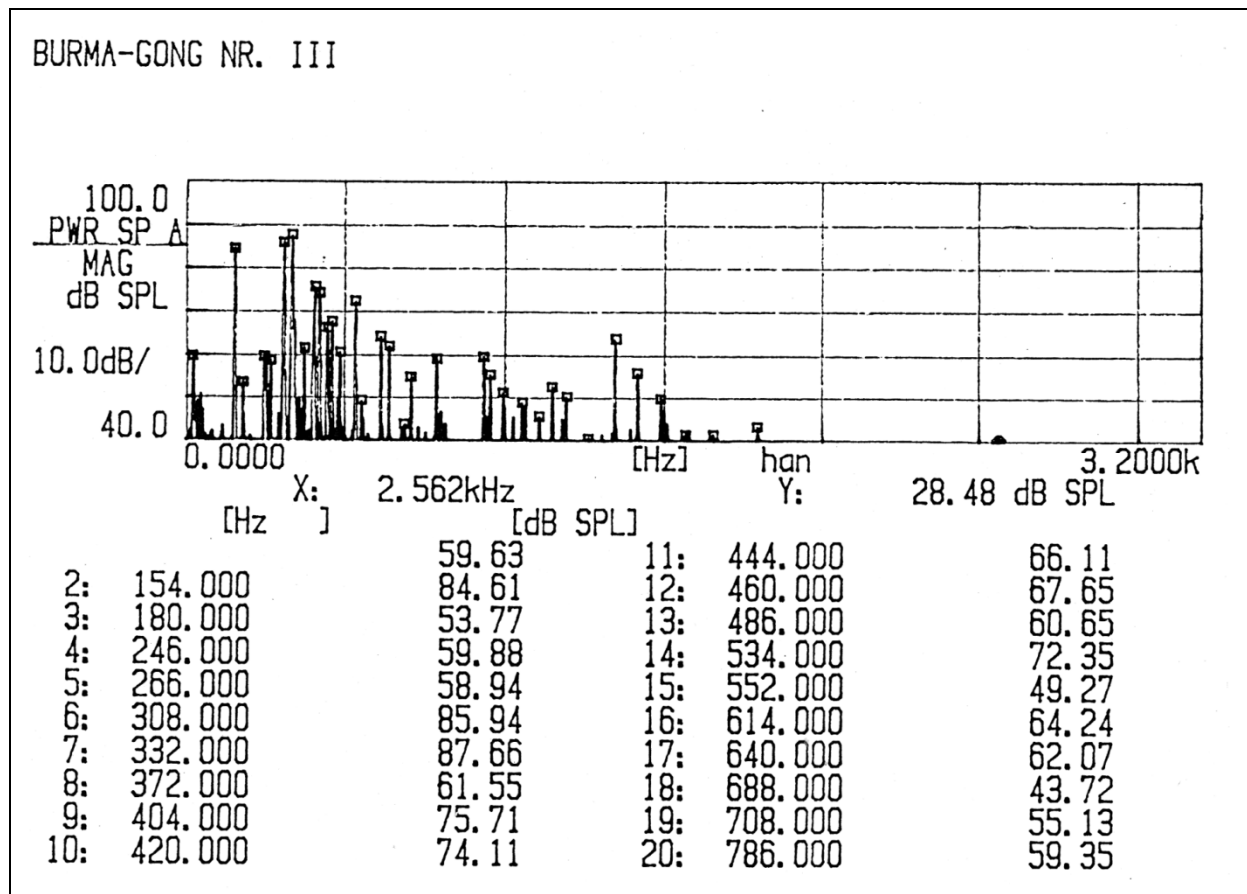


Fig. 24. FFT-Frequenz-Spektrum des Klanges des mittleren Burma-Gongs Nr. III.

4.1.3. Teilton-Zeit-Muster des Burma-Gongs Nr. VI

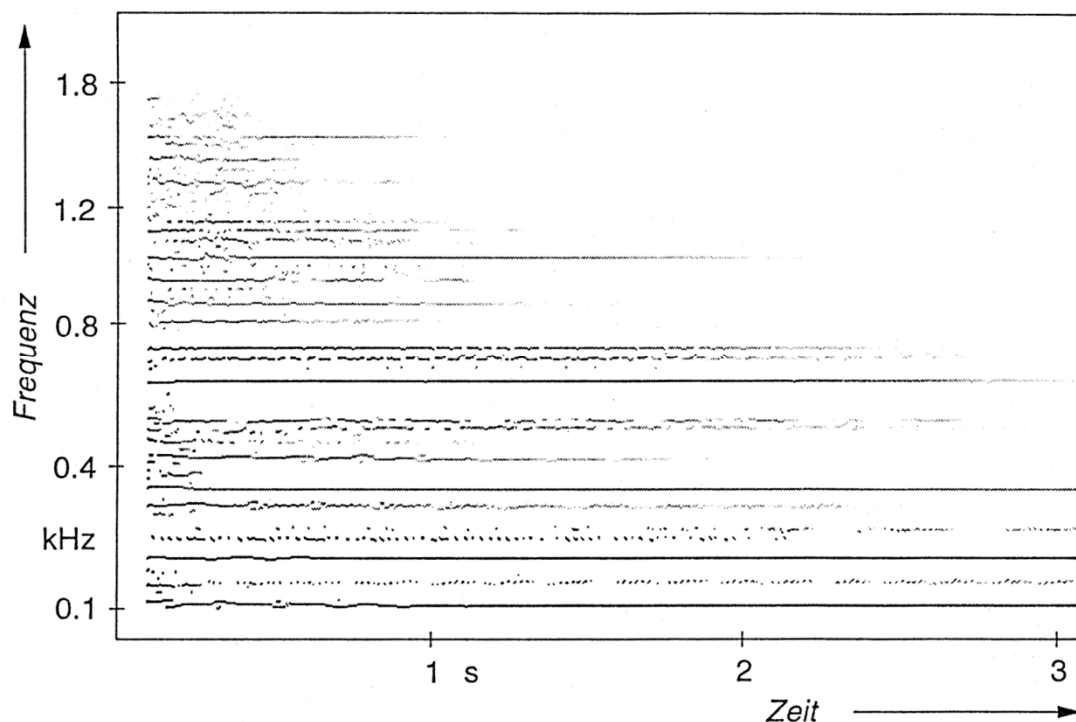


Fig. 25. Teilton-Zeit-Muster des Klanges des großen Burma-Gongs Nr. VI nach Valenzuela (1999). Die Schwärzung ist ein Maß für den Pegel.

Schlägt man den großen Gong Nr. VI an, so nimmt man dagegen wiederum eine ausgeprägte Schwebung wahr. Dies spiegelt sich auch im Teilton-Zeit-Muster von Fig. 25 wider. Die Ur-

Tab. VI. Ergebnisse von Schalldruckmessungen am großen Burma-Gong Nr. VI. Fett gedruckte Komponenten lassen sich Schwingungen zuordnen, die durch die Anzahl m der Knotendurchmesser und n der Knotenkreise gekennzeichnet sind. Normaldruck charakterisiert den quadratischen Oberton des 0-1-Grundtones

Mode <i>m-n</i>	Frequenz / Hz
0-1	104,062
1-1	152,812 / 159,062
Oberton	207,812
0-2	211,875
2-1	233,750 / 256,875
1-2	245,312 / 265,000

sache ist inzwischen bekannt (Fleischer 2002 a): Der 0-1-Ton (104 Hz) erzeugt in Folge einer quadratischen Nichtlinearität einen „sekundären“ Oberton der doppelten Frequenz. Dieser interferiert mit dem „primären“ Ton, der von der 0-2-Schwingung herrührt. Im Gegensatz zum Höreindruck würde eine FFT-Analyse entsprechend hoher Auflösung zwei getrennte Töne konstanter Amplitude ergeben. Deren Frequenzen 208 Hz bzw. 212 Hz sind in Tab. VI (vgl. auch Tab. XIII bei Fleischer 2002 a) aufgeführt oder können Fig. 26 entnommen werden.

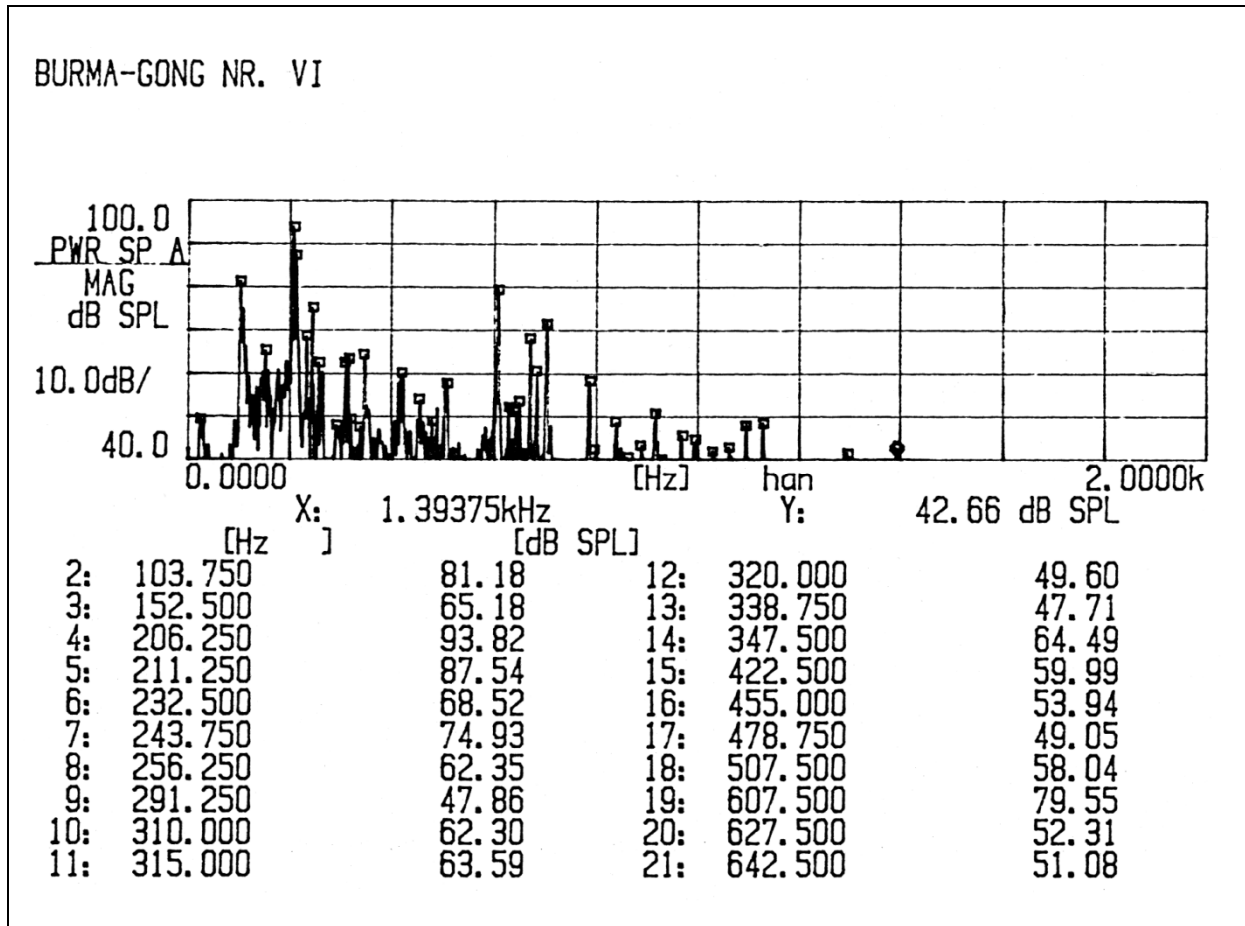


Fig. 26. FFT-Frequenz-Spektrum des Klanges des großen Burma-Gongs Nr. VI.

Zweifellos war die Separierung aller Einzelkomponenten grundlegend für die Untersuchungen von Fleischer (2002 a); sie entspricht jedoch keineswegs immer der Hörwahrnehmung. So verschmelzen beim Hören die zwei Töne der Frequenzen 208 Hz und 212 Hz miteinander; man nimmt die Schwebung eines Tones bei etwa 210 Hz mit einer Schwebungsfrequenz von etwas mehr als 4 Hz wahr. Bedauerlicherweise ist die entsprechende Pegelschwankung in der Grauwert-Kodierung von Fig. 25 kaum zu erkennen. Sie wird jedoch deutlicher, wenn der Pegel wie im Anhang 4 (oben) in Farben kodiert ist. Am besten ist sie zu erkennen, wenn ein Schnitt durch das Teilton-Zeit-Muster bei der Mittenfrequenz des schwebenden Tones gelegt wird, was auf Fig. 27 führt. Im dargestellten Zeitfenster der Länge 3 s erkennt man Pegelschwankungen mit ca. 13 Maxima, was einer Schwebungsfrequenz von etwas mehr als 4 Hz entspricht. Im Gegensatz zu der - physikalisch gleichwertigen - Repräsentation durch zwei Teiltöne konstanter Frequenz wird diese Darstellung dem Höreindruck gerecht.

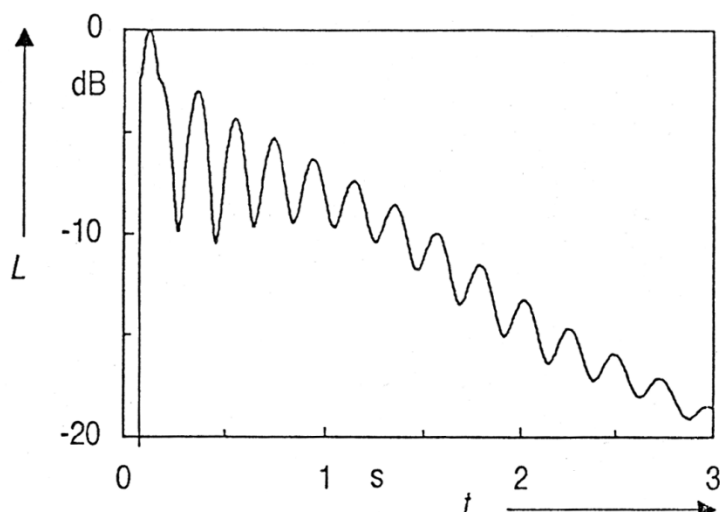


Fig. 27. Schnitt durch das Teilton-Zeit-Muster des Klanges des großen Burma-Gongs Nr. VI bei etwa 210 Hz nach Valenzuela (1999). Es ist der Pegel L über der Zeit t aufgetragen.

Als ganz wesentlicher Vorteil der gehörbezogenen Kurzzeit-Spektralanalyse nach Terhardt (1985) ist festzuhalten, dass sie das Auflösungsvermögen des Gehörs im gesamten Frequenzbereich richtig nachbildet. Sie stellt sicher, dass bei geeigneter Wahl der Parameter nur diejenigen Spektralkomponenten als getrennte Teiltöne repräsentiert werden, welche auch vom Gehör separiert werden können. Dies ist die notwendige Voraussetzung dafür, weitergehende psychoakustische Effekte, wie beispielsweise die spektrale Maskierung, richtig zu erfassen.

Auf einige Eigenschaften des Teilton-Zeit-Musters sei ergänzend hingewiesen. Die damit erzielte Repräsentation eines Schallsignals kann jederzeit rückgängig gemacht werden. Als Ergebnis der Resynthese steht dann wieder eine Zeitfunktion zur Verfügung. Durch Hörvergleich mit dem Original kann überprüft werden, ob tatsächlich die gesamte hörrelevante Information im Teilton-Zeit-Muster enthalten ist. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, gezielte Änderungen im Teilton-Zeit-Muster vorzunehmen. Durch Resynthese kann dann das modifizierte Teilton-Zeit-Muster hörbar gemacht werden, wodurch sich der Einfluss dieser Änderung auf die Hörwahrnehmung untersuchen lässt. Damit lässt sich der Stellenwert einzelner Spektralkomponenten in Hinsicht auf die Qualität eines Gongklanges studieren, ohne dass am Gong physikalische Modifikationen, beispielsweise durch Verändern der Kontur mittels Hämmern, vorgenommen werden müssten.

Die Teilton-Zeit-Muster, die Valenzuela (1998 b) bestimmt hat, sind im Anhang 1 (oben) bis 5 (oben) zusammengestellt. Sie beziehen sich auf die in Tab. I aufgeführten Instrumente mit Ausnahme der Gongs Nr. II und Nr. IV. Eine Diskussion der Diagramme, die über den bisherigen Umfang hinausgeht, soll an dieser Stelle entfallen. Vielmehr wird im nächsten Abschnitt behandelt, wie die im Teilton-Zeit-Muster enthaltene Information, sinnvoll reduziert werden kann.

4.2. Berücksichtigung weiterer psychoakustischer Effekte

Nach Terhardt (1998) sind die Schallsignale von Gongs als geringharmonische Klänge mit zusätzlichen Komponenten einzuordnen. Sie sind die Folge von freien Schwingungen des Gongkörpers, die durch den Anschlag mit dem Schlegel hervorgerufen werden. Zusätzlich zu den tonalen enthalten sie deshalb immer perkussive Anteile. Ein Problem bei der rein physikalischen Behandlung resultiert daraus, dass der Anschlag naturgemäß eine sehr große Zahl

freier Schwingungen und zugeordneter Teiltöne hervorruft. Die Vermutung ist begründet, dass nicht die gesamte physikalische Information für das Hören tatsächlich relevant ist. Eine sinnvolle Reduktion der Information auf das wirklich Wichtige ist auf mehreren Wegen denkbar. Ein möglicher Zugang wäre, auf die „goldenen Ohren“ eines erfahrenen Musikers zu vertrauen. Weniger abhängig vom Urteil einer Person, jedoch mit großem Aufwand verbunden, wäre es, Hörversuche mit Testpersonen durchzuführen. Einen zeitsparenden Ausweg bietet die gehörbezogene Analyse. Da ihr die Idee zu Grunde liegt, die Ergebnisse zahlloser Hörexperimente instrumentell nachzubilden, macht sie es möglich, die Willkür auf nachvollziehbare Weise eindämmen. Die Reduzierung fokussiert den Blick auf das Wesentliche. Auf akustischer Ebene sind dies im vorliegenden Fall die gehörrelevanten Teiltöne, auf mechanischer Ebene die zugehörigen linearen - und gegebenenfalls nichtlinearen - Schwingungen.

Die im vorigen Abschnitt beschriebene Fourier-Zeit-Transformation mit nachfolgender Konturierung stellt das geeignete Mittel dar, diejenigen Komponenten des Schallsignals zu extrahieren, die Information tragen können. Das Teilton-Zeit-Muster, das man damit erhält, ist gehörgerecht. In aller Regel enthält es aber noch Anteile, die für das Hören keine Rolle spielen. Als Beispiel seien schwache Teiltöne genannt, wie sie etwa die 1-1-Mode hervorruft. Diese spielen samt möglicher Amplitudenschwankungen, die vom Moden-Splitting der zugehörigen antimetrischen Schwingungen (Fleischer 2001) herrühren können, für die Hörwahrnehmung keine Rolle. Im nächsten Schritt gilt es, solche irrelevanten Anteile zu erkennen und zu eliminieren. Den Schlüssel dazu stellen die Mithörschwellen dar.

4.2.1. Mithörschwellen

Wie bereits in Abschnitt 3.3 dargelegt, kann ein lauterer Schallsignal die Hörbarkeit eines leiseren, im Spektrum benachbarten Signals beeinträchtigen. Der lautere Schallreiz verdeckt bzw. maskiert den leiseren. Im Klang eines Gongs sind anfänglich sehr viele Spektralkomponenten gleichzeitig vorhanden. Dies wird zu einer gegenseitigen Verdeckung führen mit der Folge, dass der eine oder andere Teilton infolge der maskierenden Wirkung der übrigen Spektralkomponenten nicht mehr wahrgenommen wird. Der betreffende Teilton wäre dann, obwohl physikalisch vorhanden, oberhalb der Ruhehörschwelle liegend und mit geeigneten Methoden nachweisbar, nicht informationstragend und somit für das Hören irrelevant.

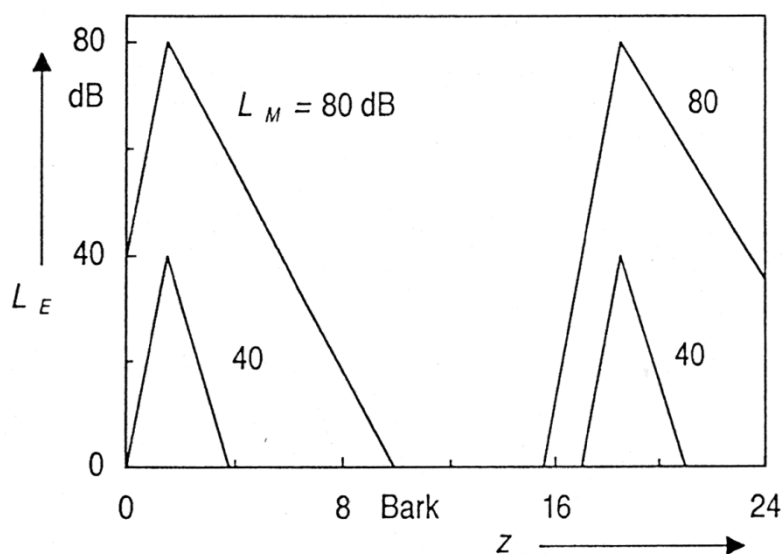


Fig. 28. Erregungspegel L_E als Funktion der Tonheit z von Schmalbandrauschens der Mittenfrequenz f_M und des Schallpegels L_M in vereinfachter Darstellung; vgl. Valenzuela (1999).

Wie im vorigen Kapitel ausgeführt worden ist, kann der Maskierungseffekt dadurch untersucht werden, dass man in Hörversuchen die Mithörschwellen von Testpersonen bestimmt. Dieses psychoakustische Experiment ähnelt der Bestimmung der Ruhehörschwelle (Abschnitt 3.2) mit dem wesentlichen Unterschied, dass bei der Messung keine Ruhe herrscht, sondern der Maskierer dargeboten wird. Wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, wird dessen spektrale Umgebung mit einem in der Frequenz variablen Sinuston als „Sonde“ abgetastet. Es wird dann derjenige Pegel des Test-Sinustones aufgezeichnet, der zum Hören des Testtones bei Vorhandensein des Maskierers notwendig ist. Aus den in Abschnitt 3.3 eingeführten Mithörschwellen lässt sich auf die „Erregung“ schließen, die ein Schallsignal im Innenohr hervorruft.

Im vorliegenden Fall treten schmalbandige Maskierer auf, die sowohl geräuschhafter wie auch tonhafter Natur sein können. Die psychoakustischen Messergebnisse führen auf die Vorstellung, dass die Erregung spektral nicht ebenso eng wie das physikalische Schallsignal begrenzt ist, sondern vielmehr auch die Umgebung beeinflusst. Fig. 28 zeigt schematisch die Erregungsverteilung $L_E(z)$ eines Schmalbandrauschens. Ergebnisse von Mithörschwellenmessungen, wie sie beispielsweise Fig. 18 und 19 entnommen werden können, sind hier als Dreiecke vereinfacht. Fig. 28 zeigt, dass die untere Flanke der Erregungsverteilung für den Pegel $L_M = 40$ dB des Maskierers dieselbe ist wie für $L_M = 80$ dB. Die obere Flanke verläuft für große Pegel L_M jedoch flacher als für kleine Pegel, worin sich die „nichtlineare Auffächerung“ der Mithörschwellen von Fig. 19 widerspiegelt. Demnach wirkt die Erregung zu hohen Frequenzen umso weiter, je stärker das maskierende Rauschen ist – der Effekt ist vom Pegel abhängig und damit nichtlinear. Die Form der Erregungsverteilung ist unabhängig von ihrer Lage auf der Tonheitsskala. Welche Steigungen Valenzuela (1999) verwendet hat, um die maskierende Wirkung von Schmalbandrauschen in ihren Analysen zu berücksichtigen, ist auf den Seiten 35 – 38 ihres Berichts dargelegt.

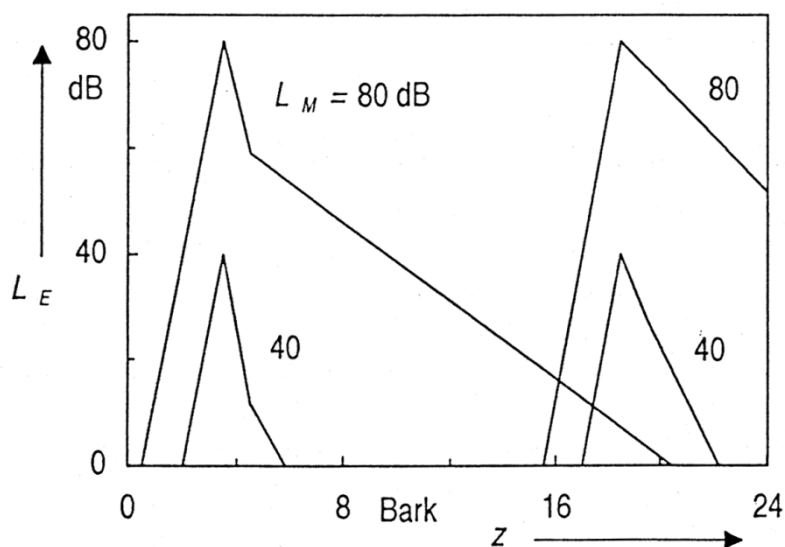


Fig. 29. Erregungspegel L_E als Funktion der Tonheit z von Sinustönen der Mittenfrequenz f_M und des Schallpegels L_M in vereinfachter Darstellung; vgl. Valenzuela (1999).

Während Fig. 28 die Erregungsverteilung eines geräuschhaften Schmalbandmaskierers repräsentiert, bezieht sich Fig. 29 auf einen monofrequenten Maskierer. Ein Sinuston bildet eine Erregungsverteilung aus und entfaltet eine Verdeckungswirkung, die gemäß Fig. 20 noch weiter zu hohen Frequenzen hin wirkt als diejenige eines schmalbandigen Rauschens (Fig. 19). Valenzuela (1999) hat dies durch eine geknickte obere Flanke der Erregungsverteilung angenähert, wie sie Fig. 29 entnommen werden kann.

Um die gegenseitige Maskierungswirkung von Spektralanteilen innerhalb eines Gongklanges zu berücksichtigen, hat Valenzuela (1999) jede Komponente gleichzeitig als Testton und als Maskierer betrachtet. Ein Testton ist dann maskiert, wenn sein Pegel unterhalb der von allen Maskierern verursachten Mithörschwelle liegt. Unter Umständen kann es hierbei erforderlich sein, zwischen tonhaften und geräuschhaften Maskierern zu unterscheiden. Wird eine Spektralkomponente als tonhaft identifiziert, dann kommt die Näherung gemäß Fig. 29 zur Anwendung. Treten im Teilton-Zeit-Muster kurze, zufällig verteilte Spektralkomponenten auf, wird die Näherung gemäß Fig. 28 verwendet. Diese Unterscheidung zwischen tonhaften und geräuschhaften Maskierern geht über die ursprüngliche Vorgehensweise hinaus, wie sie von Valenzuela (1998 a S. 107 f) beschrieben ist. Sie kann dann geboten sein, wenn ein Klang starke perkussive Anteile enthält. Valenzuela (1998 b, 1999) hat sie in ihren Untersuchungen der Klänge von Schlaginstrumenten immer dann angewandt, wenn sich Unterschiede gegenüber der Behandlung ergeben haben, bei der alle Maskierer als tonhaft betrachtet wurden. Bei der Behandlung von Gongs ist diese Unterscheidung offenbar nicht zwingend. Vielmehr hat es sich als ausreichend erwiesen, alle Komponenten pauschal als Töne mit Erregungsverteilungen gemäß Fig. 29 zu behandeln.

4.2.2. Modulationsschwellen

Nicht jede Schwankung eines Teiltones, die sich im Teilton-Zeit-Muster darstellt, muss zwangsläufig auch hörbar sein. Bekanntlich ist das Gehör nicht in der Lage, jede beliebig kleine Amplitudenschwankung zu detektieren. Vielmehr haben Hörexperimente mit amplitudenmodulierten Schallen (Zwicker und Feldtkeller 1967, Zwicker und Fastl 1999, Fleischer 1980 a und b) gezeigt, dass es einen eben wahrnehmbaren Modulationsgrad gibt, der von der Modulationsfrequenz, der Frequenz und dem Pegel des Schalles abhängt. Er kennzeichnet die Schwelle dafür, ab wann Versuchspersonen einen modulierten von einem unmodulierten Ton unterscheiden können. Nach Zwicker und Feldtkeller (1967) ist das Gehör dann am empfindlichsten gegen Amplitudenschwankungen, wenn die Modulationsfrequenz etwa 4 Hz beträgt. Mit wachsendem Pegel des Tones wird der eben wahrnehmbare Modulationsgrad kleiner. Wird gleichzeitig ein Störschall dargeboten, dann muss der Modulationsgrad größer sein, als dies ohne Störschall der Fall wäre, damit die Modulation gerade erkannt wird.

Ob die Fluktuation eines Teiltones gehörrelevant ist oder nicht, kann an Hand von Amplitudenmodulationsschwellen beurteilt werden, die aus der Literatur (z.B. Zwicker und Feldtkeller 1967) bekannt sind. Dabei sind jeweils die übrigen Spektralkomponenten im Gongklang als Störschalle zu berücksichtigen. Details hierzu sind bei Valenzuela (1998 a) ausgeführt. Modulierte Teiltöne, deren Amplitudenfluktuationen als unhörbar eingestuft werden, können durch Töne mit glatt abfallendem Pegel ersetzt werden. Dadurch, dass all diejenigen Modulationen eliminiert werden, die für das Hören irrelevant sind, lässt sich die im Teilton-Zeit-Muster enthaltene Information noch weiter reduzieren. Auch hier ist es jederzeit möglich, Vorher-Nachher-Hörvergleiche durchzuführen. Anhand der Resynthese lässt sich überprüfen, ob das bearbeitete Schallsignal noch mit dem Original übereinstimmt, oder ob der Eingriff möglicherweise zu weit gegangen ist und zu einem wahrnehmbaren Unterschied geführt hat.

4.3. Bearbeitete Teilton-Zeit-Muster

Während es sich bei Gitarren- und vor allem Klavierklängen als wesentlich herausgestellt hat, die Fluktuationen von gehörrelevanten Teiltönen auf die in Abschnitt 4.2.2 beschriebene Weise zu behandeln, wurde bei Gongs keine erwähnenswerte Informationsreduktion erzielt. Valenzuela (1999) erschien es deshalb nicht zwingend geboten, die Modulationsschwellen zu berücksichtigen. Der nach der Transformation zum Teilton-Zeit-Muster wichtigste Schritt bei

der gehörlichen Darstellung besteht bei den Gongklängen darin, die spektrale Maskierung (Abschnitt 4.2.1) mit einzubeziehen. Da dieser Effekt pegelabhängig ist, muss das Pegelniveau des Originalschalles berücksichtigt werden. Nach Valenzuela (1999) reicht es bei der Analyse der Gongklänge aus, alle Komponenten wie tonhafte Maskierer mit Erregungsverteilungen gemäß Fig. 29 zu behandeln.

Die folgenden drei Beispiele (Valenzuela 1999) verdeutlichen einige Ergebnisse. Weitere Diagramme, bei denen der Pegel in Farben kodiert ist, finden sich im Anhang 1 bis 5. Oben sind dort die originalen Teilton-Zeit-Muster abgebildet. Darunter ist jeweils das zugehörige Diagramm eingefügt, aus dem alle Spektralkomponenten entfernt sind, die in Folge der Maskierung als unhörbar einzustufen sind.

4.3.1. Burma-Gong Nr. I

Um ermessen zu können, wie weit die Informationsreduktion bei dem Klang dieses Instruments gehen kann, muss Fig. 30 mit Fig. 21 verglichen werden. Von den etwa zehn Teiltönen,

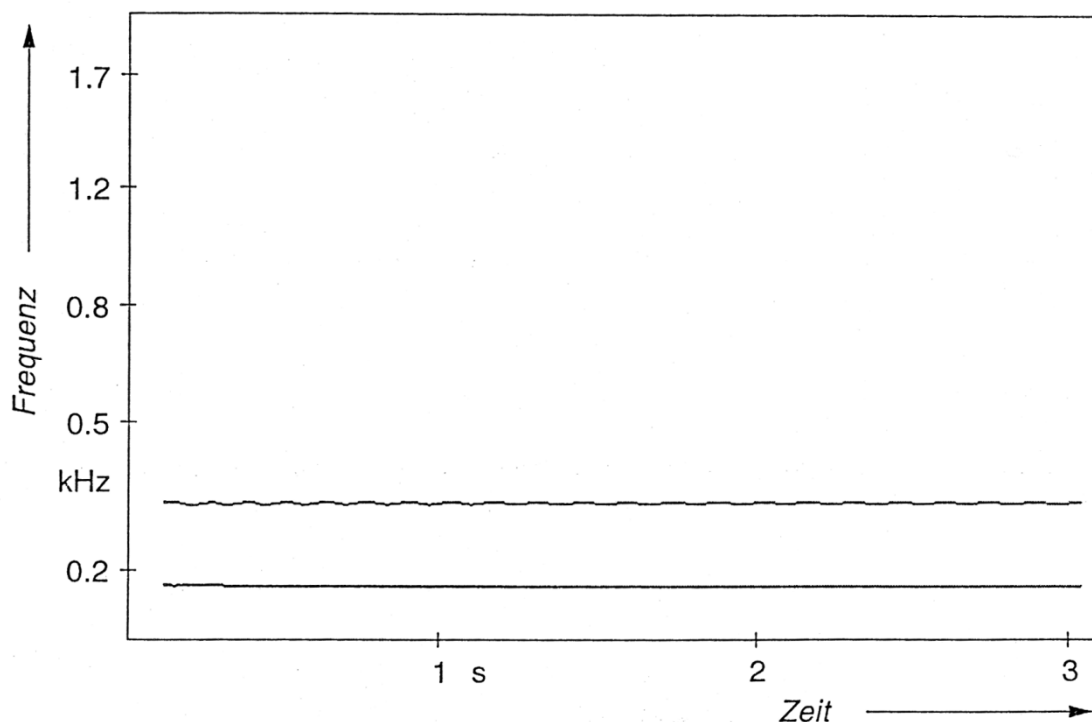


Fig. 30. Teilton-Zeit-Muster des Klanges des kleinen Burma-Gongs Nr. I, bearbeitet mit dem Verfahren zur Bestimmung und Eliminierung spektral maskierter Komponenten nach Valenzuela (1999). Die Schwärzung ist ein Maß für den Pegel.

die im Teilton-Zeit-Muster von Fig. 21 noch zu erkennen waren, bleiben nach der Bearbeitung noch ganze zwei übrig. Wie Fig. 30 deutlich macht, sind dies der glatte 0-1-Ton bei etwa 166 Hz und der schwebende Ton, der sich aus dem Zusammenspiel des Obertones und des 0-2-Tones ergibt und etwa eine Oktave höher liegt. Die Maskierungswirkung dieser beiden Spektralkomponenten ist so groß, dass alle anderen Teiltöne unhörbar sind. Für das Hören wirken sich demnach ein Grundton mit 166 Hz und seine etwas verstimmte, schwebende Oktave aus. Wird das bearbeitete Teilton-Zeit-Muster resynthetisiert und aural mit dem Original verglichen, ist kein Unterschied hörbar.

4.3.2. Burma-Gong Nr. III

In Fig. 31 sind im Vergleich zu Fig. 23 all diejenigen Spektralkomponenten entfernt, die als irrelevant eingestuft werden. Der Effekt, den die Maskierung auf das Teilton-Zeit-Muster dieses Gongs ausübt, ist auf den ersten Blick nicht ganz so groß wie beim vorher betrachteten Instrument. Nach der Bearbeitung verbleiben noch sechs bis höchstens sieben Teiltöne, die zur Hörwahrnehmung beitragen können. Vergleicht man die beiden Diagramme in Anhang 2

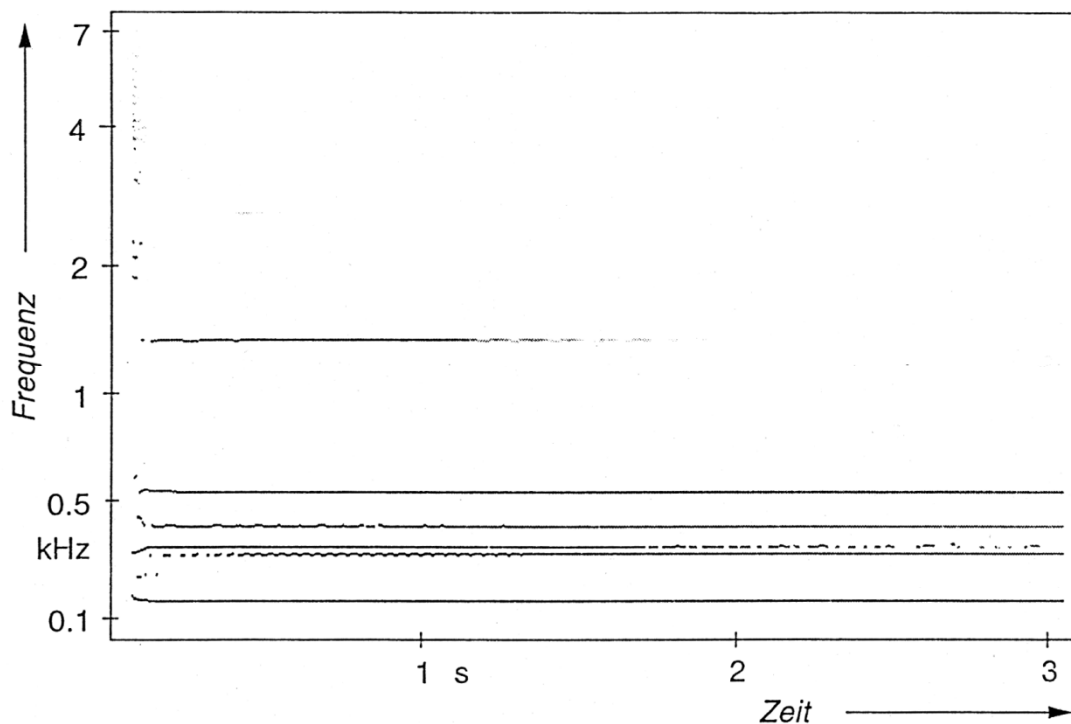


Fig. 31. Teilton-Zeit-Muster des Klanges des mittleren Burma-Gongs Nr. **III**, bearbeitet mit dem Verfahren zur Bestimmung und Eliminierung spektral maskierter Komponenten nach Valenzuela (1999). Die Schwärzung ist ein Maß für den Pegel.

miteinander, dann wird klar, wie tiefgreifend die Reduktion auch bei diesem Beispiel ist. Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass der Gong Nr. **III** untypisch ist. Anders als bei den übrigen untersuchten Exemplaren liegen bei diesem Gong Oberton und 0-2-Ton so weit auseinander, dass sie das Gehör getrennt auflöst. Die Berücksichtigung der spektralen Maskierung führt dazu, dass im Teilton-Zeit-Muster dieses Gongs letztlich nur noch Teiltöne verbleiben, die weitgehend glatt und ohne Modulation abklingen.

4.3.3. Burma-Gong Nr. VI

Ein Vergleich von Fig. 32 mit Fig. 25 lässt erkennen, wie viele Spektralkomponenten im Klang des Gongs Nr. **VI** eliminiert worden sind. Noch deutlicher ist die Reduktion in der farbigen Repräsentation von Anhang 4 zu erkennen. Wenn alle Komponenten entfernt sind, die maskiert werden und demzufolge als irrelevant anzusehen sind, verbleiben letztlich ganze sechs Teiltöne.

Wiederum haben die beiden tiefsten Teiltöne die größten Amplituden, wobei insbesondere die des zweiten Teiltones periodisch schwankt und dem Klang seinen typischen Charakter ver-

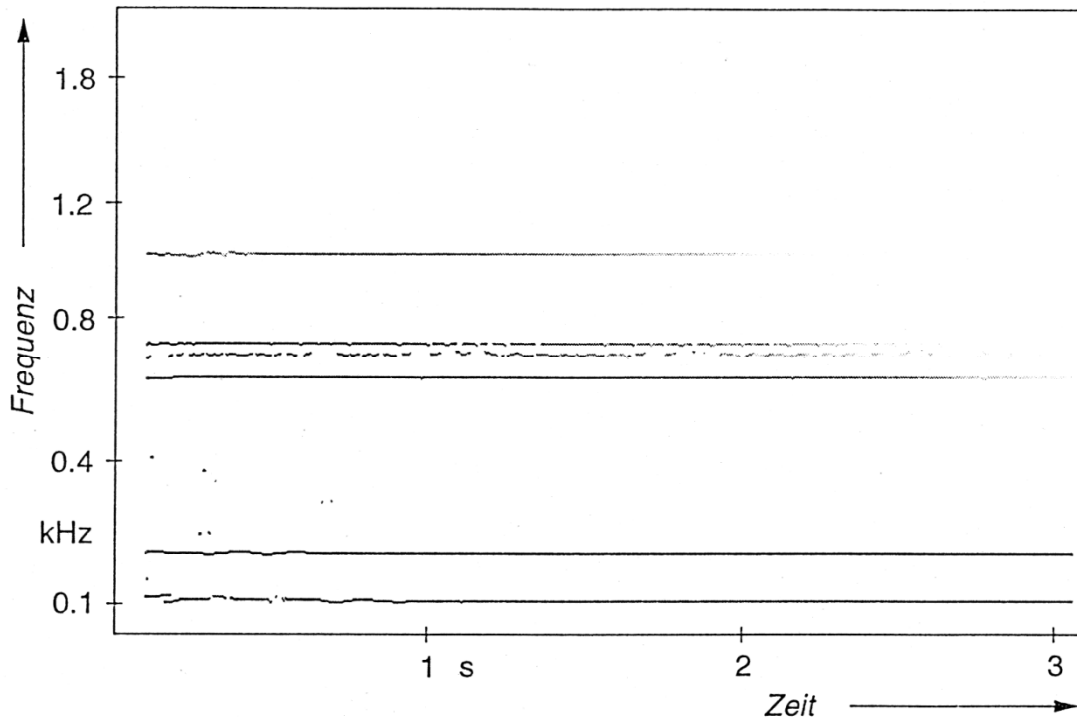


Fig. 32. Teilton-Zeit-Muster des Klanges des großen Burma-Gongs Nr. VI, bearbeitet mit dem Verfahren zur Bestimmung und Eliminierung spektral maskierter Komponenten nach Valenzuela (1999). Die Schwärzung ist ein Maß für den Pegel.

leicht. Insbesondere die Teiltöne mit den raschen Amplitudenfluktuationen, die auf Moden-Splitting zurückgehen, tauchen in Fig. 32 nicht mehr auf. Dies ist ein weiterer starker Hinweis darauf, dass nicht das Moden-Splitting, sondern die Nichtlinearität (Fleischer 2002 a) die Ursache der Schwebungen im Gongklang ist. Zwei weitere starke Teiltöne bei etwa 600 Hz und 700 Hz fallen praktisch glatt ab bzw. schwanken ganz langsam. Sie fügen sich weitgehend in das harmonische Raster ein, das auf der Grundfrequenz 104 Hz basiert. Es steht außer Frage, dass die Interpretation solcher Zusammenhänge an Hand des Diagramms von Fig. 32 (bzw. Anhang 4 unten) sehr leicht fällt. Sie ist wesentlich einfacher, als die Interpretation des un bearbeiteten Teilton-Zeit-Musters von Fig. 25 (bzw. Anhang 4 oben). Auf jeden Fall ist sie weit weniger kompliziert, als eine Diskussion des FFT-Spektrums von Fig. 26.

4.3.4. Burma-Gongs Nr. V und VII

Ergänzend sind im Anhang Ergebnisse von Analysen der Klänge von zwei weiteren Buckelgongs eingefügt. Es sind dies die großen Burma-Gongs Nr. V und VII. Um die Interpretation der Diagramme zu erleichtern, sind im Folgenden die Ergebnisse von hochauflösenden FFT-Analysen des Schallsignals zusammengestellt.

Tab. VII bezieht sich auf den Gong Nr. V; siehe hierzu auch Tab. XII bei Fleischer (2002 a). Der Vergleich mit dem unteren Diagramm von Anhang 3 zeigt, dass lediglich drei Komponenten für die Hörwahrnehmung Bedeutung haben. Dies ist zunächst der 0-1-Ton mit 101 Hz. Die zweite gehörrelevante Komponente ergibt sich aus dem Zusammenspiel des 0-2-Tones (195 Hz) mit dem Oberton des 0-1-Tones (203 Hz), die beim Hören gemeinsam aufgelöst werden. Wie das bearbeitete Teilton-Zeit-Muster richtig wiedergibt, nimmt man einen Ton der

Tab. VII. Ergebnisse von Schalldruckmessungen am großen Burma-Gong Nr. V. Fett gedruckte Komponenten lassen sich Schwingungen zuordnen, die durch die Anzahl m der Knotendurchmesser und n der Knotenkreise gekennzeichnet sind. Normaldruck charakterisiert den quadratischen Oberton des 0-1-Grundtones

Mode <i>m-n</i>	Frequenz / Hz
0-1	101,250
1-1	160,937
0-2	195,000
Oberton	202,812
1-2	236,875 / 242,500
2-1	250,937

Frequenz 199 Hz wahr, dessen Amplitude relativ rasch mit der Schwebungsfrequenz 8 Hz fluktuiert. Darüber hinaus dürfte noch ein dritter Teilton bei etwa 680 Hz wahrnehmbar sein, der möglicherweise von der 0-3-Mode herrührt; vgl. Fleischer (2001).

Tab. VIII gilt für den größten der untersuchten Burma-Gongs, das Instrument Nr. VII; vgl. Tab. XIV bei Fleischer (2002 a). Dem unteren Diagramm von Anhang 5 ist zu entnehmen, dass neben fünf schwächeren Teiltönen vor allem zwei sehr starke Komponenten für die Hörwahrnehmung wesentlich sind. Wiederum ist dies in erster Linie der 0-1-Ton, der die Frequenz 93 Hz hat. Die zweite für das Hören wichtige Komponente folgt daraus, dass der Oberton des 0-1-Tones (186 Hz) mit dem 0-2-Ton (190 Hz) verschmilzt. Es entsteht ein Ton der Frequenz 198 Hz, dessen Amplitude mit der deutlich wahrzunehmenden Schwebungsfrequenz 4 Hz periodisch schwankt. Diese Schwebung prägt den Klangeindruck ganz wesentlich.

Tab. VIII. Ergebnisse von Schalldruckmessungen am großen Burma-Gong Nr. VII. Fett gedruckte Komponenten lassen sich Schwingungen zuordnen, die durch die Anzahl m der Knotendurchmesser und n der Knotenkreise gekennzeichnet sind. Normaldruck charakterisiert den quadratischen Oberton des 0-1-Grundtones

Mode <i>m-n</i>	Frequenz / Hz
0-1	93,125
1-1	137,812 / 144,062
Oberton	186,250
0-2	190,000
2-1	216,875 / 222,187
1-2	234,687 / 244,375

4.4. Zusammenfassende Bemerkung

Die Klänge eines kleinen, eines mittleren und von drei großen Burma-Gongs sind einer gehörbezogenen Analyse unterzogen worden (Valenzuela 1998 b, 1999). Im ersten Schritt wurde eine Fourier-Zeit-Transformation nach Terhardt (1985) durchgeführt, bei der das Schallsignal spektral in ähnlicher Weise zerlegt wurde, wie es das Gehör tut. Maxima wurden detektiert und damit das Teilton-Zeit-Muster bestimmt. Dieses zeichnet sich gegenüber dem Ergebnis einer *Fast Fourier Transformation* beispielsweise dadurch aus, dass Teiltöne dann getrennt werden, wenn sie einzeln wahrnehmbar sein können. Verschmelzen sie dagegen beim Hören, so werden sie bei der gehörbezogenen Analyse gemeinsam verarbeitet. Dies zeigt sich insbesondere beim („nichtlinearen“) Oberton, der bei guten Gongs sehr nahe beim („linearen“) 0-2-Ton liegt. Es wird ein Ton wahrgenommen wird, dessen Amplitude - meist relativ langsam - periodisch fluktuiert. Da diese Schwebung als Qualitätsmerkmal eines Gongs gilt, ist ihre möglichst realistische Darstellung im Diagramm von wesentlichem Vorteil.

Das Teilton-Zeit-Muster gibt die gesamte Information wieder, die im Schallsignal physikalisch enthalten ist. So treten beispielsweise auch viele schwache Teiltöne auf, die von „gesplitteten“ Moden herrühren und deren Amplituden schwanken. Berücksichtigt man im nachfolgenden Schritt die spektrale Maskierung und eliminiert sämtliche Komponenten, die maskiert und damit unhörbar gemacht werden, so gelingt zusätzlich zur gehörgerechten Frequenzauflösung noch eine sehr hohe Informationsreduktion. Die Mithörschellen, die den Maskierungseffekt kennzeichnen, sind pegelabhängig. Valenzuela (1999) hat ein realistisches Pegelniveau angenommen und dafür „bearbeitete Teilton-Zeit-Muster“ erhalten, die nur noch einen Bruchteil der ursprünglichen Information enthalten. Wie Hörvergleiche des bearbeiteten mit dem originalen Schallsignal belegen, ist dies aber genau derjenige Anteil, welcher für die Hörwahrnehmung relevant ist.

Ergebnisse dieser Analyse an einigen Burma-Gongs (Valenzuela 1998 b) sind in Anhang 1 bis 5 zusammengestellt. Zum leichteren Vergleich sind bei allen Gongs die ersten drei Sekunden untersucht worden. Lediglich zwei bis maximal sieben Teiltöne erweisen sich für das Hören als relevant; nur sie tragen aurale Information. Darunter sind immer und stets mit großen Amplituden der 0-1-Ton und der 0-2-Ton, der in aller Regel schwebt. Diesen wenigen – und nur diesen – Teiltönen kommt im Hinblick auf die Funktion des Gongs als Musikinstrument Bedeutung zu. Die Extraktion der gehörrelevanten Spektralkomponenten stellt somit eine notwendige Voraussetzung dar, die Spektren von Gongklängen musikalisch richtig zu deuten.

5. GEHÖRBEZOGENE ANALYSE MIT VIPER

Die im vorigen Kapitel beschriebene Analyse liefert zwar hervorragende Ergebnisse, jedoch ist sie nur „Insidern“ zugänglich. Um diese Exklusivität etwas abzumildern, werden im vorliegenden Kapitel Untersuchungen mit einem Programmsystem beschrieben, das auf demselben Gedankengut wie die in Kapitel 4 behandelten Studien beruht. Die Firma Cortex Instruments GmbH, Regensburg, hat dieses Programmpaket unter dem Namen VIPER (*VI*sual *PER*ception of audio signals) in den Handel gebracht. Roida (2002) hat es im Rahmen einer Studienarbeit am Institut für Mechanik erprobt und damit u.a. Gongklänge analysiert.

5.1. Verarbeitung der Schallsignale im Programm

Es wurde der VIPER PerceptualXplorer in Versionen von 1.1 bis 2.12 verwendet. Als Handbuch wird das Manual zur Version 1.11 (VIPER 2000) zitiert. In einem Zeitschriftenartikel hat Lemme (2000) knapp und anschaulich dargelegt, welche Intention mit dieser Vorgehensweise verfolgt wird. Der erste Schritt besteht in einer Analyse, die mit der Fourier-Zeit-Transformation nach Terhardt (1985) vergleichbar ist; siehe auch Abschnitt 4.1. 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. In offensichtlicher Anlehnung an die Art der Präsentation, wie sie im vorigen Kapitel verwandt wurde, werden die Ergebnisse dargestellt, wie es Fig. 33 für den Gong Nr. II zeigt: Die Zeit läuft nach rechts, die Tonheit in Bark ist nach oben angetragen. Der Pegel ist ursprünglich in Farben und in Fig. 33 aus drucktechnischen Gründen ersatzweise in Grautönen kodiert; je heller, desto größer ist der Pegel. Da diese Kodierung nur unzureichend gelingt, empfiehlt sich die Betrachtung des oberen Diagramms in Anhang 7 in Kombination mit der Farbskala in Anhang 17.

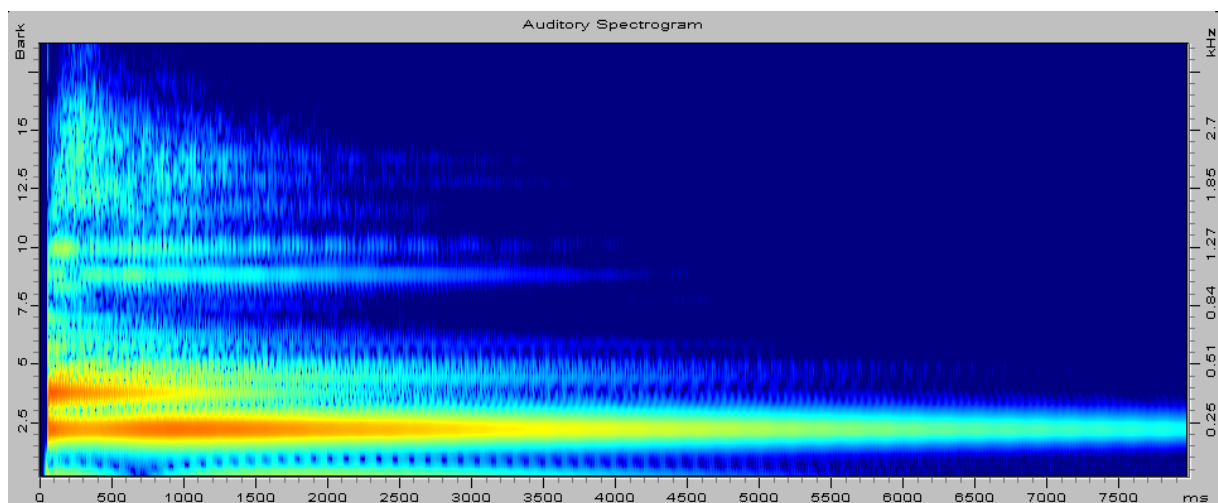


Fig. 33. Auditorisches Spektrogramm des Klanges des kleinen Burma-Gongs Nr. II nach Roida (2002), ermittelt mit VIPER. Die Helligkeit ist ein Maß für den Pegel.

An die gehöradäquate Frequenzanalyse schließt sich die Extraktion von „Frequenzkonturen“ (*frequency contours*) an, die der von Valenzuela (1998 a, 1999) beschriebenen Konturierung entspricht. Es entsteht ein Diagramm, das mit dem Teilton-Zeit-Muster vergleichbar ist. Roida

(2002) hat darauf hingewiesen, dass der Wahl der Analyseparameter naturgemäß eine wichtige Rolle zukommt. Werden diese Parameter ähnlich gewählt, wie dies Valenzuela (1998 b, 1999) getan hat, dann ergeben sich bei der Analyse mit VIPER erwartungsgemäß auch vergleichbare Frequenzkonturen. Trotz der unbefriedigenden Wiedergabe des ursprünglich farbigen Bildes in Graustufen deutet sich dies bei einem Vergleich von Fig. 34 mit Fig. 23 an, die sich beide auf den Gong Nr. **III** beziehen. Ergänzende Information liefert Anhang 8.

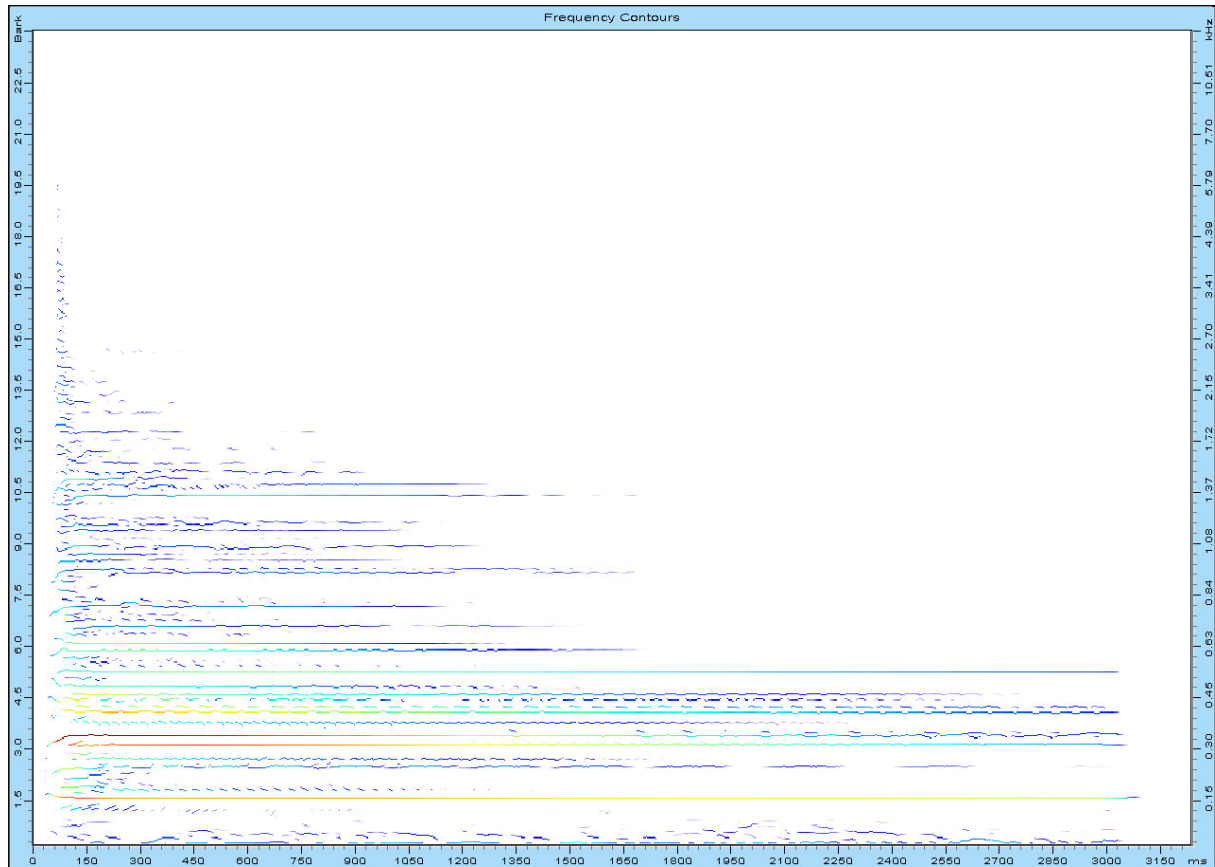


Fig. 34. Frequenzkonturen des Klanges des mittleren Burma-Gongs Nr. **III** nach Roida (2002), ermittelt mit VIPER. Der Pegel ist in Graustufen kodiert.

Entsprechend der Erwartung treten Unterschiede zwischen den Ergebnissen von Valenzuela (1998 b, 1999) und Roida (2002) dann auf, wenn die Analyseparameter anders gewählt werden. So lassen sich beim Gong Nr. **III** die beiden Teiltöne, die als Oberton des 0-1-Tones (309 Hz) und als 0-2-Ton (333 Hz) identifiziert werden, erst dann separieren, wenn die Analysebandbreite klein genug gewählt ist. Fig. 34 ergibt sich für die von Valenzuela (1999) gewählte Analysebandbreite 0,1 Bark. Mit der größeren Analysebandbreite 0,5 Bark, die in VIPER als *default*-Wert vorgegeben ist und für die sich Roida (2002) entschieden hat, ergibt sich die Repräsentation von Anhang 8 unten. Die beiden Töne werden nicht separiert, sondern gemeinsam verarbeitet, was zu einer sehr schnellen Schwebung mit mehr als 20 Fluktuationen pro Sekunde führt. Es hätte der Hörwahrnehmung eher entsprochen, die Analysebandbreite zu reduzieren, was sich problemlos per Mausclick erledigen ließe. Daraus wird deutlich, dass es einer gewissen Erfahrung bedarf, die Parameter der Analyse optimal einzustellen.

Weitergehende Diskrepanzen zwischen dem originalen Verfahren (Kapitel 4) und der VIPER-Realisierung treten zu Tage, sobald die spektrale Maskierung berücksichtigt werden soll. Laut Handbuch (VIPER 2000) ist die nichtlineare Auffächerung der oberen Flanke (vgl. Fig. 19

oder 20) nicht modelliert. Roida (2002) schreibt auf S. 32: „Die von Valenzuela errechneten Maskierungen können mit VIPER nicht in dem gleichen Maße nachvollzogen werden. Die VIPER-Option ‚*nonlinear masking*‘ ist praktisch nicht dokumentiert und bietet keine Einstellmöglichkeiten.“ So wirkt sich die spektrale Maskierung bei Roidas (2002) Frequenzkonturen (Anhang 6 bis 16) auch nur wenig aus. Dies tritt beim direkten Vergleich mit den entsprechenden Teilton-Zeit-Mustern in Anhang 1 bis 5, die Valenzuela (1998 b) unter Einbeziehung der Maskierung bestimmt hat, offen zu Tage. Hier sind Verbesserungen möglich.

5.2. Anwendungen in Hinsicht auf Gongklänge

Trotz der derzeitigen Unzulänglichkeiten, die behoben werden können, stellt das Programm VIPER ein vielseitiges Werkzeug dar, mit dem sich Gongklänge gründlich untersuchen lassen. In diesem Zusammenhang sei auf Folgendes hingewiesen:

- Im Programm ist die Möglichkeit vorgesehen, eine *Fast Fourier Transformation* durchzuführen. Somit ist ein direkter Vergleich der „objektiven“ mit der gehörbezogenen Analyse an Hand ein und desselben Schallsignals möglich.
- Es lassen sich Schnitte längs der Zeit- und längs der Tonheitsachse durch das Auditorische Spektrogramm legen, so dass beispielsweise der Auf- und Abbau der einzelnen Teiltöne verfolgt werden kann.
- Es bestehen weitreichende Möglichkeiten des Editierens, mit deren Hilfe es beispielsweise gelingt, Frequenzen und Amplituden von Teiltönen zu verändern.
- Die Auswirkung auf die Hörwahrnehmung lässt sich dadurch untersuchen, dass das modifizierte Signal resynthetisiert und mit dem Original verglichen werden kann.

Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass Teile des Programms noch verbesserungsfähig sind. Dazu gehören die derzeitige Version der Resynthese sowie vor allem die spektrale Maskierung, die beide für die vorliegende Aufgabenstellung von großer Bedeutung sind.

Ohne Zweifel stellt die Vorgehensweise, bei der Analyse die Eigenschaften des Gehörs zu berücksichtigen, einen Schritt in die richtige Richtung dar. Das Programm stellt vielfältige Möglichkeiten zur Verfügung, die physikalische Information auf das zu reduzieren, was für das Hören tatsächlich von Belang ist, und diese Reduktion mittels Resynthese aural mit dem Original zu vergleichen. Einige der Möglichkeiten der Analyse wurden an Gongklängen erprobt und haben insbesondere auf die Ergebnisse geführt, die im Anhang als farbige Diagramme zusammengestellt sind.

5.3. Untersuchungen an Gongklängen

Roida (2002) hat neben den sieben Burma-Gongs (Nr. I bis VII), deren Kenndaten in Tab. I und Abschnitt 2.1 bis 2.7 zusammengestellt sind, auch zwei Buckelgongs aus Java untersucht. Diese beiden Instrumente Nr. VIII und IX sind mit den Burma-Gongs eng verwandt. Fleischer (2001, 2002 a) hat sie näher beschrieben und untersucht; weitere Angaben finden sich in Abschnitt 2.8. Darüber hinaus wurden auch Schallsignale von zwei Flachgongs (Tamtams, Instrumente Nr. X und XI) analysiert, wie sie in Abschnitt 2.9 beschrieben und abgebildet sind.

Da im Textteil aus drucktechnischen Gründen nur Schwarz-Weiß-Wiedergabe möglich ist, sind die Ergebnisse in farbiger Repräsentation im Anhang zusammengestellt. Die Zuordnung der Farben zu den Pegelwerten kann Anhang 17 entnommen werden; sie gilt für die Burma-Gongs Nr. I bis VII exakt und für die übrigen Gongs näherungsweise. Die VIPER-Analysen

für sämtliche Gongs sind in Anhang 6 bis 16 zu finden. In Abhängigkeit von der Zeit ist oben jeweils das Auditorische Spektrogramm, in der Mitte der Gesamtpegel und unten das Diagramm der Frequenzkonturen (unter gewisser Berücksichtigung der spektralen Maskierung) angegeben. Um die Interpretation der Diagramme zu erleichtern, sind im Folgenden einige Ergebnisse früherer Analysen aufgelistet.

5.3.1. Burma-Gongs

Anhang 6 bis 12 beziehen sich auf Burma-Gongs, deren Klänge Roida (2002) analysiert hat. Die dargestellten Zeitfenster sind 3,75 s bis 10 s lang und erfassen neben dem Anschlag denjenigen Teil des Abklingens, den Roida als wichtig erachtet hat. Die Frequenzangaben zu fünf der untersuchten Burma-Gongs finden sich bereits in den Abschnitten 4.1.1 bis 4.1.3 und 4.3.4. Ergänzend sind im Folgenden die Ergebnisse von hochauflösenden FFT-Analysen der Schallsignale der beiden weiteren Gongs zusammengestellt.

Tab. IX. Ergebnisse von Schalldruckmessungen am kleinen Burma-Gong Nr. II. Fett gedruckte Komponenten lassen sich Schwingungen zuordnen, die durch die Anzahl m der Knotendurchmesser und n der Knotenkreise gekennzeichnet sind. Normaldruck charakterisiert den quadratischen Oberton des 0-1-Grundtones

Mode <i>$m-n$</i>	Frequenz / Hz
0-1	219,062
1-1	315,000 / 335,000
0-2	371,875
Oberton	438,437
1-2	442,812 / 453,437
2-1	483,125 / 504,000

Tab. IX gilt für den Gong Nr. II; die Zahlenwerte stimmen mit denen von Tab. IX bei Fleischer (2002 a) überein. Die Klangqualität dieses Gongs wird subjektiv als nicht sehr hoch eingeschätzt. Es fällt auf, dass die Frequenzen des 0-2-Tones (372 Hz) und des Obertones des 0-1-Tones (438 Hz) um 66 Hz differieren. Damit liegen sie so weit auseinander, dass sie nicht verschmelzen und bei der Analyse separiert werden müssten. Den Ergebnissen der VIPER-Analysen in Anhang 7 zufolge ist dies nicht geschehen. Offenbar ist der *default*-Wert der Analyse-Bandbreite von 0,5 Bark, den Roida übernommen hat, für diesen Anwendungsfall zu groß gewählt.

Tab. X nimmt Bezug auf das Instrument Nr. IV; vgl. Tab. XI bei Fleischer (2002 a). Dem unteren Diagramm von Anhang 9 kann entnommen werden, dass insbesondere zwei starke Komponenten für die Hörwahrnehmung bedeutsam sein werden. Es ist dies in erster Linie der 0-1-Ton der Frequenz 136 Hz. Die zweite Komponente, die für die Hörwahrnehmung von wesentlicher Bedeutung ist, resultiert aus dem Zusammenwirken des Obertones des 0-1-Tones (272 Hz) mit dem 0-2-Ton (282 Hz). Diese beiden Teiltöne verschmelzen beim Hören. Wahr-

genommen wird ein Ton der mittleren Frequenz 277 Hz, dessen Amplitude mit der Schwingungsfrequenz 10 Hz relativ schnell fluktuiert. Die Diagramme in Anhang 9, die ein Zeitfenster von etwas mehr als 5 s erfassen, geben diese Modulation richtig wieder.

Tab. X. Ergebnisse von Schalldruckmessungen am mittleren Burma-Gong Nr. IV. Fett gedruckte Komponenten lassen sich Schwingungen zuordnen, die durch die Anzahl m der Knotendurchmesser und n der Knotenkreise gekennzeichnet sind. Normaldruck charakterisiert den quadratischen Oberton des 0-1-Grundtones

Mode <i>$m-n$</i>	Frequenz / Hz
0-1	135,937
1-1	225,312 / 230,312
Oberton	271,562
0-2	281,875
1-2	330,937 / 342,500
2-1	369,062

5.3.2. Java-Gongs

Anhang 13 und 14 beziehen sich auf die beiden Java-Gongs. Die zugehörigen Ergebnisse von hochauflösenden FFT-Analysen der Schallsignale finden sich in den Tab. XI und XII.

Tab. XI. Ergebnisse von Schalldruckmessungen am großen Java-Gong Nr. VIII. Fett gedruckte Komponenten lassen sich Schwingungen zuordnen, die durch die Anzahl m der Knotendurchmesser und n der Knotenkreise gekennzeichnet sind. Normaldruck charakterisiert den quadratischen Oberton des 0-1-Grundtones

Mode <i>$m-n$</i>	Frequenz / Hz
0-1	83,437
1-1	135,937 / 141,875
Oberton	166,562
0-2	168,906
1-2	210,000 / 219,375
2-1	250,000

Tab. XI nimmt auf das Instrument Nr. **VIII** (*gong suwukan*) Bezug. Die VIPER-Analyse ergibt im Wesentlichen zwei gehörrelevante Teiltöne; vgl. Anhang 13 unten. Ein Blick in die zugehörige Tabelle belegt, dass es sich dabei zunächst um den 0-1-Ton mit 83 Hz handelt. Die zweite für die Hörwahrnehmung wichtige Komponente resultiert aus dem Zusammenspiel des Obertones des 0-1-Tones (167 Hz) mit dem 0-2-Ton (169 Hz). Es entsteht ein Ton der mittleren Frequenz 168 Hz, der in der Amplitude mit der Schwebungsfrequenz 2 Hz moduliert ist. Der Gesamtpegel (Anhang 9 Mitte), der über eine Zeitdauer von fast 17 s dargestellt ist, lässt diese langsame Fluktuation erkennen. Auch das untere Diagramm gibt die Modulation des zweiten Teiltones richtig wieder.

Tab. XII gilt für das Instrument Nr. **IX**. Die bei den anderen Gongs gewonnenen Erkenntnisse lassen erwarten, dass auch bei diesem Instrument zwei starke Komponenten für die Hörwahrnehmung von besonderer Bedeutung sein werden. Es ist dies in erster Linie

- der 0-1-Ton mit 47 Hz.

Der zweite für die Hörwahrnehmung wichtige Teilton ergibt sich aus dem Zusammenspiel

- des Obertones des 0-1-Tones (94 Hz) mit

- dem 0-2-Ton (95 Hz).

Die beiden letztgenannten Komponenten sind extrem dicht benachbart, so dass sie beim Hören miteinander verschmelzen. Es wird ein Ton von 94,5 Hz wahrgenommen, dessen Amplitude mit einer Schwebungsfrequenz von etwas weniger als 1 Hz ganz langsam fluktuiert. Im Pegel-Zeit-Diagramm in der Mitte von Anhang 14 zeigt sich diese Modulation mit zehn Maxima innerhalb von 11 s. Für die Analyse hat Roida (2002) die Bandbreite 0,5 Bark gewählt, was bei tiefen Frequenzen 50 Hz entspricht. Offenkundig ist das Analyseband zu breit, um den 0-1-Ton vom schwebenden 94,5 Hz-Ton (Oberton plus 0-2-Ton) zu separieren. Dies hat zur Folge, dass alle drei Komponenten als ein Ton mit pulsierender Amplitude dargestellt werden, was keineswegs der Hörwahrnehmung entspricht. Um eine gehörgerechte Darstellung zu erhalten, müsste die Analysebandbreite auf jeden Fall so weit verringert werden, dass der schwebende 94,5 Hz-Ton (Oberton plus 0-2-Ton) vom 0-1-Ton getrennt wird. Die von Valenzuela (1998 b, 1999) gewählte Bandbreite erscheint hierfür besser geeignet.

Tab. XII. Ergebnisse von Schalldruckmessungen am großen Java-Gong Nr. IX. Fett gedruckte Komponenten lassen sich Schwingungen zuordnen, die durch die Anzahl m der Knotendurchmesser und n der Knotenkreise gekennzeichnet sind. Normaldruck charakterisiert den quadratischen Oberton des 0-1-Grundtones

Mode <i>$m-n$</i>	Frequenz / Hz
0-1	46,875
1-1	72,812 / 80,937
Oberton	93,750
0-2	94,687
1-2	119,687 / 122,500
2-1	140,312

5.3.3. Flachgongs

In Fig. 35 sowie Anhang 15 und 16 sind ergänzend die Schallsignale von zwei Flachgongs mit VIPER analysiert. Rossing und Fletcher (1982) haben sich mit Instrumenten dieser Art beschäftigt, und auch bei Fletcher und Rossing (1998) ist ihnen ein Abschnitt gewidmet. Flachgongs unterscheiden sich deutlich von den bisher betrachteten Buckelgongs. Sie sind dünner und ihnen fehlt der zentrale Schlagbuckel. Ihr Schallsignal ist eher geräuschhaft, die Tonhöhe unbestimmt. Diese Instrumente sollen als Beispiele für Aufschlagsidiophone dienen, die eine so große Anzahl ähnlich starker Teiltöne erzeugen, dass das Signal nicht als Klang, sondern als Geräusch wahrgenommen wird. Der Unterschied zu den Buckelgongs (Anhang 6 bis 14) mit ihren ausgeprägten tonalen Komponenten ist sowohl im Auditorischen Spektrogramm (oben) wie auch im Diagramm der Frequenzkonturen (unten) deutlich zu erkennen.

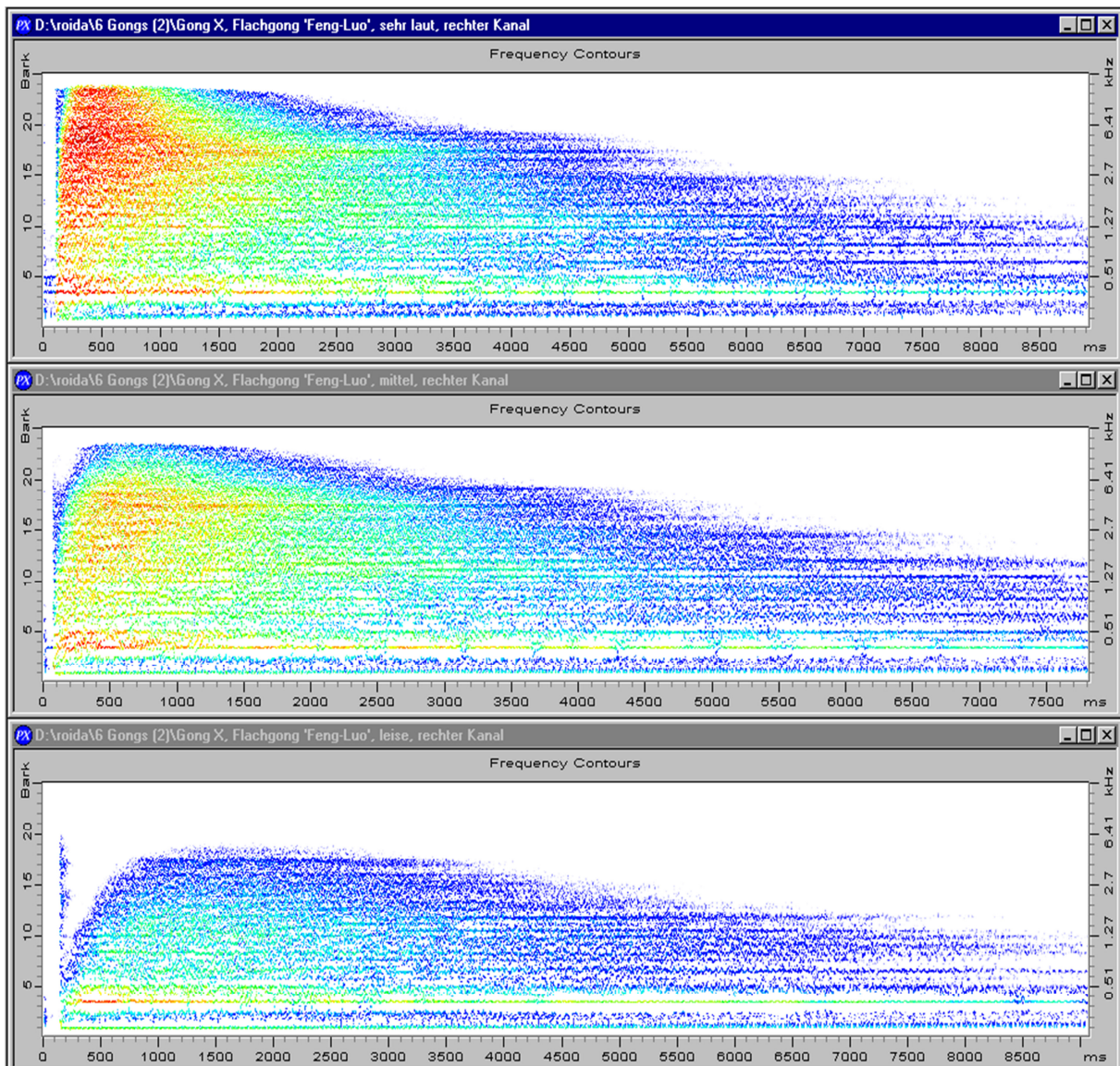


Fig. 35. Frequenzkonturen des Klanges des Flachgongs Nr. X (fengluo), ermittelt mit VIPER.
 Oben: starker Anschlag,
 Mitte: mittlerer Anschlag,
 unten: schwacher Anschlag.
 Der Pegel ist in Graustufen kodiert; nach Roida (2002).

Bei Gongs wirken Nichtlinearitäten. Bei Buckelgongs haben sie zur Folge, dass insbesondere die Zeitfunktion der 0-1-Schwingung nicht sinusförmig verläuft und neben der Grundfrequenz auch noch Vielfache dieser Frequenz enthält; vgl. Fleischer (2002 a). Bei Flachgongs äußern sich Nichtlinearitäten offenbar vor allem in einer nichtlinearen Modenkopplung (Legge 1989, Rossing und Fletcher 1982, Fletcher und Rossing 1998). Damit lässt sich die allmähliche Verlagerung der Schwingungsenergie von tiefen zu hohen Frequenzen hin erklären, die man bei Flachgongs beobachtet. Dies wird als „Donnerblech-Effekt“ wahrgenommen, bei dem ein hochfrequentes Schwirren nicht von vorne herein vorhanden ist, sondern sich erst allmählich aufbaut, um dann wieder abzuschwellen.

Das Frequenzspektrum des Flachgongs Nr. **X** (*fengluo*), gemessen am Institut für Mechanik, findet sich bei Varsányi (2002 b, Abschnitt 4.2.1). Im Frequenzkontur-Diagramm von Anhang 15 liegen die Teiltöne so dicht, dass fast das Bild eines Rauschsignals entsteht. In der Farbdarstellung ist zu erkennen, dass nicht alle Komponenten gleichzeitig ihr Maximum erreichen. Vielmehr verschiebt sich innerhalb einer Zeitdauer von der Größenordnung einer Sekunde der Schwerpunkt der Schallenergie im Spektrum von tiefen zu hohen Frequenzen hin. Anschließend klingen die hochfrequenten Teiltöne mehr und die tieffrequenten weniger schnell ab.

Dass dieser Effekt – wie bei einer Nichtlinearität nicht anders zu erwarten – amplitudenabhängig ist, zeigen die drei Diagramme in Fig. 35. Frequenzkonturen für unterschiedlich starken Anschlag des Gongs Nr. **X** sind über eine Zeitdauer von 9 s dargestellt. Angeschlagen wurde an derselben Stelle mit unterschiedlicher Stärke. Die druckbedingte Graustufen-Kodierung gibt den Sachverhalt nur unzureichend wieder. Anhang 18 zeigt deshalb dieselben Frequenzkontur-Diagramme noch einmal in Farbdruck. Der Anschlag selbst bildet sich als kurzer senkrechter Streifen ab. Während bei tiefen Frequenzen der Pegel rasch ein Maximum erreicht, um dann langsam wieder abzunehmen, dauert dies bei hohen Frequenzen wesentlich länger. Im unteren Diagramm ist zu erkennen, wie die hochfrequenten Anteile erst allmählich angeregt werden, was eine bis zwei Sekunden dauern kann. Je stärker der Anschlag ist, desto rascher läuft diese Verlagerung ab. Im oberen Diagramm ist zu erkennen, dass bei starkem Anschlag der Pegel bei hohen Frequenzen größere Werte erreicht als bei tiefen Frequenzen.

Das Frequenzspektrum des Paiste-Tamtams Nr. **XI**, gemessen am Institut für Mechanik, kann bei Varsányi (2002 b, Abschnitt 4.2.2) nachgeschlagen werden. Gemäß Anhang 16 ist der Hörbereich nicht so dicht und gleichmäßig gefüllt wie beim Gong Nr. **X**. Im Bereich tiefer Frequenzen, z.B. bei etwa 75 Hz und 230 Hz, werden einige Teiltöne getrennt aufgelöst. Die Diagramme geben etwas mehr als 14 s des An- und Abschwellens wieder. Auch hier macht die Farbkodierung deutlich, dass das Pegelmaximum unterschiedlich schnell erreicht wird. Während es sich bei tiefen Frequenzen bereits unmittelbar nach dem Anschlag ausprägt, wird es bei höheren Frequenzen teilweise erst nach etwa 3 s erreicht. Dieses „Wandern“ der Energie von den tiefen zu den hohen Frequenzen verleiht dem Schallsignal eines Flachgongs einen eigenen Charakter und lässt es lebendig erscheinen.

5.4. Zusammenfassende Bemerkung

Mit dem Programm VIPER ist ein Werkzeug kommerziell verfügbar, das die Analyse von Schallsignalen unter weitgehender Berücksichtigung von Erkenntnissen der Hörforschung ermöglicht, wie sie im vorigen Kapitel beschrieben worden sind. Erste tastende Versuche haben gezeigt, dass es sich prinzipiell auch dazu eignet, Klänge von Gongs zu untersuchen. Die im Schallsignal vorhandene Information lässt sich gehörriecht zerlegen und darstellen. Dabei hat sich allerdings erwiesen, dass beispielsweise die Implementierung der spektralen Maskierung noch verbesserungsfähig sind. Wie die Untersuchungen von Valenzuela (1999) belegen, ließe sich damit eine wesentlich weitergehende Informationsreduktion erzielen. Ebenso wäre eine verbesserte Resynthese wünschenswert.

Naturgemäß bedarf es dabei einer gewissen Erfahrung, die nicht jeder Nutzer mitbringt. Analyseparameter sind ausgehend von ihren *default*-Werten so zu verändern, dass die Teiltöne in gleicher Weise separiert werden, wie es beim Hören eines musikalischen Klanges geschieht. Obwohl nicht primär für die Untersuchung der Schalle von Musikinstrumenten konzipiert, erweist sich das Programm mit seinen gehörbezogenen Verarbeitungsschritten doch als ein wertvolles Hilfsmittel. Die Analysen von elf Gongklängen, wie sie Roida (2002) ohne psychoakustisches Vorwissen erzielt hat, sind in Anhang 5 bis 16 zusammengestellt und lassen sich mit Hilfe der Farbskale von Anhang 17 dechiffrieren. Die Ausschnitte sind zwischen 3,7 s und 15 s lang und geben damit für jeden Gong den relevanten Abschnitt des Schallsignals wieder. Einige für das Hören wesentliche Merkmale der Klänge werden in den Frequenzkonturen bereits richtig dargestellt. Eine verfeinerte Frequenzauflösung mit verringerter Analysebandbreite, wie sie vom Nutzer eingestellt werden kann, würde die Darstellung in noch bessere Übereinstimmung mit der Hörwahrnehmung bringen. Eine jedermann zugängliche Repräsentation im Sinne von „*What you see is what you hear*“ ist damit in greifbare Nähe gerückt.

6. ABSCHLIESSENDE DISKUSSION

Um die Entstehungsmechanismen der Teiltöne, die den Klang eines Gongs bilden, begreifen zu können, sind Untersuchungen der physikalischen Größen mit objektiven Methoden unverzichtbar. Für diesen Zweck stehen zahlreiche hochentwickelte Messverfahren zur Verfügung. Damit lassen sich die mechanische Schwingung (Fleischer 2001, 2002 b) bzw. das Schallsignal (2002 a) zuverlässig und reproduzierbar untersuchen. Der Vergleich der Wirkung (Schallsignal) mit der Ursache (Anschlag eines schwingungsfähigen Gebildes) macht die Zusammenhänge sichtbar und lässt Gesetzmäßigkeiten erkennen.

Bei technischen Systemen ist diese Art der Untersuchung angemessen und auch hinreichend. Bei einem Musikinstrument wie dem Gong reicht die rein objektive Betrachtung jedoch in aller Regel nicht aus. Sie greift zu kurz, da sie nicht Bezug auf „Das Ohr als Nachrichtenempfänger“ (Zwicker und Feldtkeller 1967) nimmt. So besteht die Gefahr, dass das objektive Messverfahren die Information völlig anders darstellt, als sie beim Hören wahrgenommen wird. Als Beispiel sind hier zwei dicht benachbarte Töne (wie der 0-2-Ton und der „nichtlineare“ Oberton des 0-1-Tones) zu nennen. Eine *Fast Fourier Transformation* entsprechend feiner Frequenzauflösung trennt die beiden Komponenten. Einerseits ist dies unabdingbare Voraussetzung dafür, die Herkunft der einzelnen Töne im Detail zu erforschen. Andererseits entspricht diese Separation jedoch in keiner Weise der Hörwahrnehmung, da das Gehör die beiden Spektralkomponenten zu einem Ton verschmelzen lässt. Dessen Amplitude ist sinusförmig moduliert („Schwebung“), was die Empfindung einer Schwankung hervorruft. Eine Frequenzauflösung, die nicht dem Hören angepasst ist, mag physikalisch noch so interessante Ergebnisse offenbaren – die Interpretation hinsichtlich der Hörwahrnehmung wird ohne einschlägiges Vorwissen in die Irre führen.

Von einem gehöradäquaten Messverfahren, mit dem die Schallsignale von Gongs und anderen Musikinstrumenten effizient untersucht werden können, ist also zunächst einmal zu fordern, dass es die frequenzselektiven Eigenschaften des Gehörs richtig nachbildet. Bei geschickter Wahl der Parameter erfüllt das Verfahren nach Terhardt (1998), wie es Valenzuela (1998 a, 1999) auf Gongs angewandt hat, diese Forderung. Auch mit dem kommerziellen Programm VIPER lassen sich gehörangepasste Analyseergebnisse erzielen, wenn die Analysebandbreite vom *default*-Wert 0,5 Bark gegebenenfalls reduziert wird. Die nachfolgende Konturierung liefert bei beiden Verfahren ein Teilton-Zeit-Muster bzw. Frequenzkontur-Diagramm, das bereits wichtige Aussagen zulässt.

In dieser Repräsentation ist noch die gesamte akustische Information enthalten; die Rücktransformation würde das Originalsignal liefern. Nun belegen aber moderne Audio-Kompressionsverfahren wie z.B. MP3, dass das Schallsignal in aller Regel deutlich mehr Information enthält, als für die Hörempfindung tatsächliche Relevanz besitzt. Ein weiterer wesentlicher Schritt ist demnach, das Teilton-Zeit-Muster von irrelevanter Information zu befreien. Den Schlüssel dazu liefert der psychoakustische Effekt der spektralen Maskierung. Die Implementierung der Maskierung in VIPER erscheint den Erfahrungen von Roida (2002) zufolge noch verbesserungsfähig. Im ursprünglichen Verfahren (Terhardt 1998, Valenzuela 1999) lässt sich damit eine sehr weitgehende Informationsreduktion erzielen. Teiltöne, die durch stärkere Komponenten maskiert sind, werden eliminiert. Diejenigen Teiltöne, welche danach noch verbleiben, sind mit hoher Wahrscheinlichkeit für die Hörempfindung maßgebend. Dies lässt sich durch Resynthese und Hörvergleich mit dem Original jederzeit verifizieren.

Modulationen der Teilton-Amplituden, wie sie beispielweise von Schwebungen des 0-2-Tones mit dem Oberton des 0-1-Tones herrühren, prägen wesentlich das Klangbild eines Gongs (Varsányi 2000 b). Es erscheint erstrebenswert, psychoakustische Erkenntnisse in Hin-

sicht auf Modulationsschwellen bei der Analyse zu berücksichtigen. Valenzuela (1999) hat davon abgesehen. Es wäre jedoch prinzipiell machbar, sämtliche Amplitudenschwankungen zu eliminieren, die nicht wahrgenommen werden und nur diejenigen darzustellen, die langsam und tief genug sind, um gehört zu werden. Dies wäre ein weiterer Schritt in Richtung auf eine gehörangepasste Repräsentation. Die Resynthese des reduzierten und geglätteten Gongklanges würde es auch hier ermöglichen, mit dem Original zu vergleichen und gehörmäßig zu prüfen, dass tatsächlich keine relevanten Modulationen unterdrückt worden sind. Auf diese Weise ließen sich sofort die gehörrelevanten Schwebungen ausfindig machen. Damit hätte man wesentlich Hinweise zur Klärung der Frage, ob bei einem Gong ausschließlich das Zusammenwirken linear und nichtlinear erzeugter Schallkomponenten (Fleischer 2002 a) oder vielleicht doch auch Moden-Splitting antimetrischer Schwingungsformen (Varsányi 2000 b) die Ursache für die wahrgenommenen Schwebungen ist.

Im Zusammenhang mit einem Musikinstrument, das kein harmonisches Spektrum erzeugt, ist die Frage nach der Tonhöhe immer von hohem Interesse. Das unter Berücksichtigung der Maskierung bearbeitete Teilton-Zeit-Muster enthält die gesamte Information, aus der sich die Spektraltonhöhen der Teiltöne sowie die Virtuelle Tonhöhe (Terhardt 1998) des Gesamtklanges errechnen lassen. Der Aufwand, der dazu notwendig ist, aus den vorliegenden Daten diese musikalisch bedeutsamen Kennwerte mit den zugehörigen Gewichten zu berechnen, dürfte gering sein. Angesichts des zu erwartenden Erkenntnisgewinns würde er sich mit Sicherheit lohnen.

Für die vorliegende Aufgabenstellung bedeutet aber bereits die Möglichkeit, die physikalische Information gehörrechtig darzustellen und auf den für das Hören tatsächlich bedeutsamen Anteil zu beschränken, einen großen Schritt nach vorne. Es ist problemlos möglich, mit *Finite-Element*-Berechnungen, wie sie z.B. Fleischer (2001) beschrieben hat, 100 Eigenformen mit den zugehörigen Eigenfrequenzen zu berechnen. Dort wurde mehrfach gezeigt, dass es auch keinerlei Schwierigkeiten bereitet, mit Hilfe der Laser-Vibrometrie 25 Schwingungsmoden zu messen. Dass bei Gongs davon nur etwa fünf tatsächlich für die Hörempfindung von Belang sind, ist eine Erkenntnis von essentieller Bedeutung, die auf die Messung und Berechnung zurückwirkt.

Die Reduzierung des physikalischen Spektrums auf seine gehörrelevanten Anteile fokussiert den Blick auf das Wesentliche. Bei Messungen, Berechnungen und Optimierungen brauchen nur diejenigen Eigenmoden und Produkte nichtlinearer Beziehungen betrachtet zu werden, die sich auch in der Hörwahrnehmung widerspiegeln. Die Auswahl gründet sich nicht mehr ausschließlich auf das subjektive Empfinden eines geübten Musikers. Mittels geeigneter Analyseverfahren ist sie inzwischen objektivierbar und damit der Willkür entzogen. Dass dieses Wissen nicht nur in einigen Forschergruppen vorhanden, sondern – wenn auch noch mit einigen Einschränkungen - inzwischen auch als Programm kommerziell verfügbar ist, stellt für die wissenschaftliche Untersuchung von Musikinstrumenten einen Schritt dar, dessen Bedeutung gar nicht hoch genug eingeschätzt werden kann.

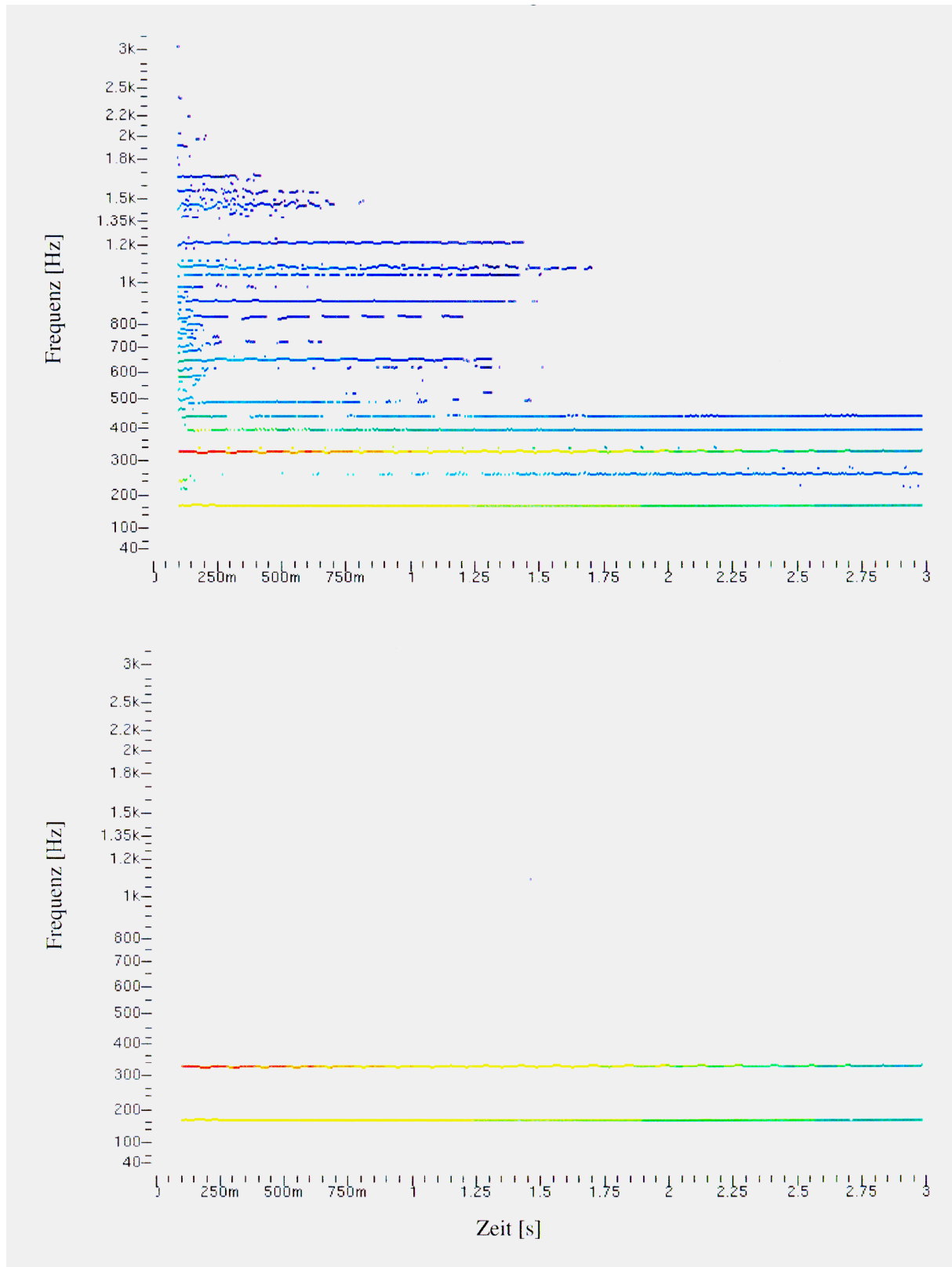
Der Autor dankt Frau Dipl.-Phys. Sieglinde Iosif für die Unterstützung bei der Bearbeitung der Druckvorlage. Herrn Bernhard Kolberg, Firma Kolberg Percussion in Uhingen, hat dankenswerterweise sieben Gongs für die Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Dank gebührt auch Herrn Dr. András Varsányi, der aus seinen Beständen vier Gongs kurzfristig überlassen hat.

LITERATUR

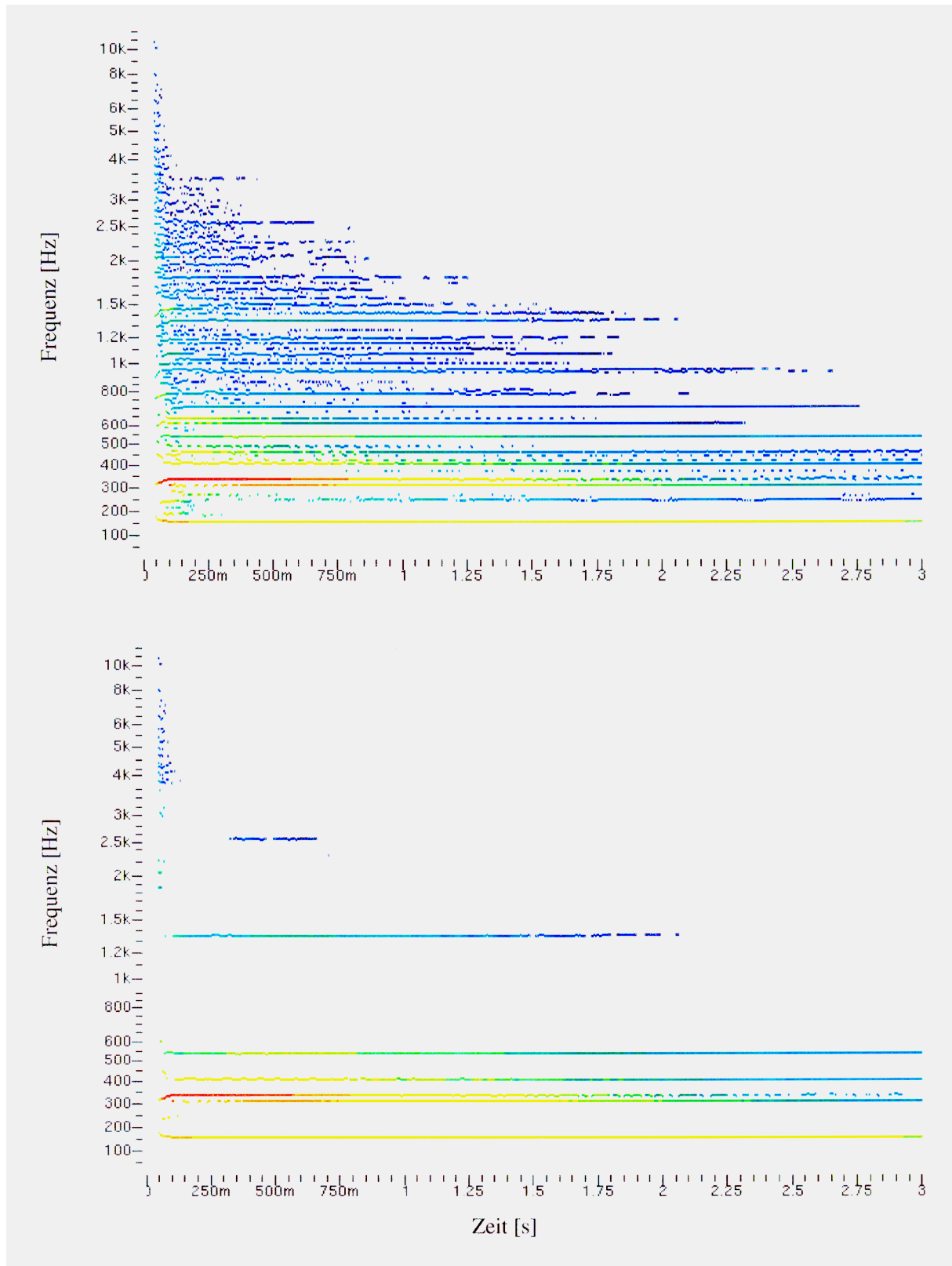
- Fastl, H., Beschreibung dynamischer Hörempfindungen anhand von Mithörschwellen-Mustern. Hochschulverlag, Freiburg 1982.*
- Fleischer, H., Amplitudenmodulation von Sinustönen und Terzrauschen: Absolute Schwellen, Unterschiedsschwellen, subjektive Größe. In: Fortschritte der Akustik (DAGA ,80). VDE-Verlag, Berlin 1980 a, 619 - 622.*
- Fleischer, H., Subjektive Größe von Unterschieden im Amplitudenmodulationsgrad von Sinustönen. Acustica 46 (1980 b), 31 - 38.*
- Fleischer, H., Schwingungsuntersuchungen an Gongs. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/01. Hrsg. H. Fleischer und H. Fastl, UniBw und TU München, Neubiberg 2001.*
- Fleischer, H., Nichtlinearität bei Gongs: Analyse des Schallsignals. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/02. Hrsg. H. Fleischer und H. Fastl, UniBw und TU München, Neubiberg 2002 a.*
- Fleischer, H., Experimentelle und FE-Untersuchung der Schwingungen von Gongs. In: Fortschritte der Akustik (DAGA 2002). DEGA, Oldenburg 2002 b; erscheint demnächst.*
- Fletcher, N.H. und Rossing, T.D., The physics of musical instruments. 2. Aufl. Springer, New York 1998.*
- Hornbostel, E.M. v. und Sachs, C., Systematik der Musikinstrumente. Zeitschrift für Ethnologie 46 , Heft IV-V (1914).*
- Legge, K.A. und Fletcher, N.H., Nonlinearity, chaos, and the sound of shallow gongs. J. Acoust. Soc. Amer. 86(6) (1989), 2439 - 2443.*
- Lemme, H., Hörbares sichtbar machen. In: Elektronik 22 (2000), 150 – 155.*
- Raman, C.V., Musikinstrumente und ihre Klänge. Kapitel 8 in: Handbuch der Physik Bd. VIII: Akustik. Hrsg. H. Geiger und K. Scheel. Springer, Berlin 1927, 354 – 424.*
- Roida, T., Gehörorientierte Schallanalyse mit Viper. Studienarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg 2002.*
- Rossing, T.D. und Fletcher, H.H., Acoustics of a tamtam. Bull. Australian Acoust. Soc. 10(1) (1982), 21 - 26.*
- Terhardt, E., Fourier transformation of time signals. Acustica 57 (1985), 242 – 256.*
- Terhardt, E., Akustische Kommunikation. Springer, Berlin 1998.*
- Valenzuela, M.N., Untersuchungen und Berechnungsverfahren zur Klangqualität von Klaviertönen. Herbert Utz Verlag Wissenschaft, München 1998 a.*
- Valenzuela, M.N., Persönliche Kommunikation (1998 b).*

- Valenzuela, M.N., 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 1999.*
- Varsányi, A., gong ageng: Herstellung, Klang und Gestalt eines königlichen Instruments des Ostens. Diss. Eberhard-Karls-Universität., Tübingen (1999) und Tübinger Beiträge zur Musikwissenschaft Band 21. Hans Schneider, Tutzing 2000 a.*
- Varsányi, A., Zur Akustik des javanischen gong ageng. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 2/00. Hrsg. H. Fleischer und H. Fastl. Universität der Bundeswehr München, Neubiberg 2000 b.*
- VIPER PerceptualXplorer Version 1.11. Manual, NCI, Regensburg 2000.*
- Zwicker, E. und Fastl, H., Psychoacoustics. 2nd ed. Springer, Berlin 1999.*
- Zwicker, E. und Feldtkeller, R., Das Ohr als Nachrichtenempfänger. 2. Aufl. Hirzel, 1967.*

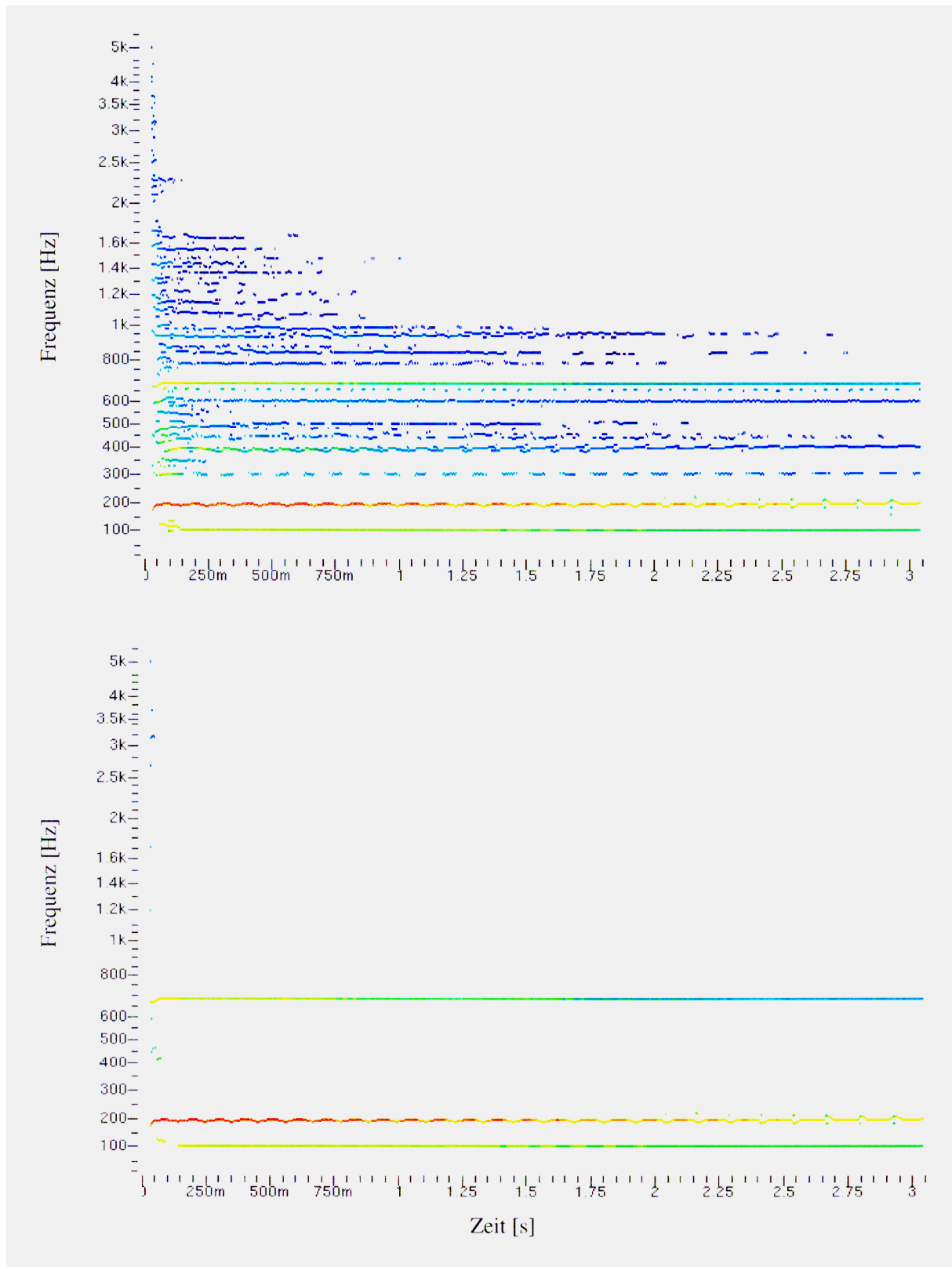
ANHANG



Anhang 1. Oben: Teilton-Zeit-Muster des Klanges des kleinen Burma-Gongs Nr. I.
 Unten: Teilton-Zeit-Muster unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung.
 Der Pegel ist so kodiert, dass die Folge dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot
 ansteigenden Pegel bedeutet; nach Valenzuela (1998 b).



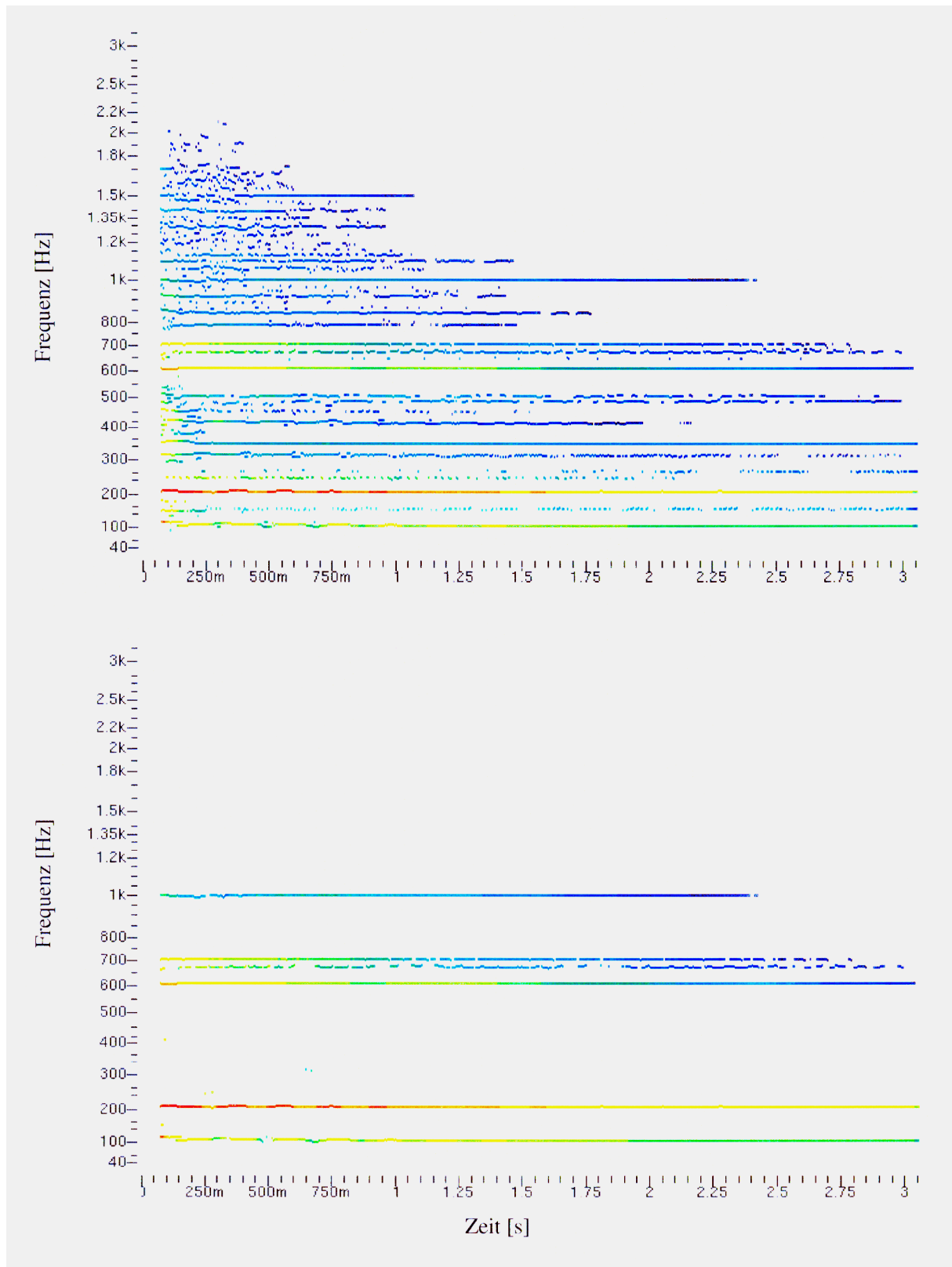
Anhang 2. Oben: Teilton-Zeit-Muster des Klanges des mittleren Burma-Gongs Nr. **III**.
 Unten: Teilton-Zeit-Muster unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung.
 Der Pegel ist so kodiert, dass die Folge dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot
 ansteigenden Pegel bedeutet; nach Valenzuela (1998 b).



Anhang 3. Oben: Teilton-Zeit-Muster des Klanges des großen Burma-Gongs Nr. V.

Unten: Teilton-Zeit-Muster unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung.

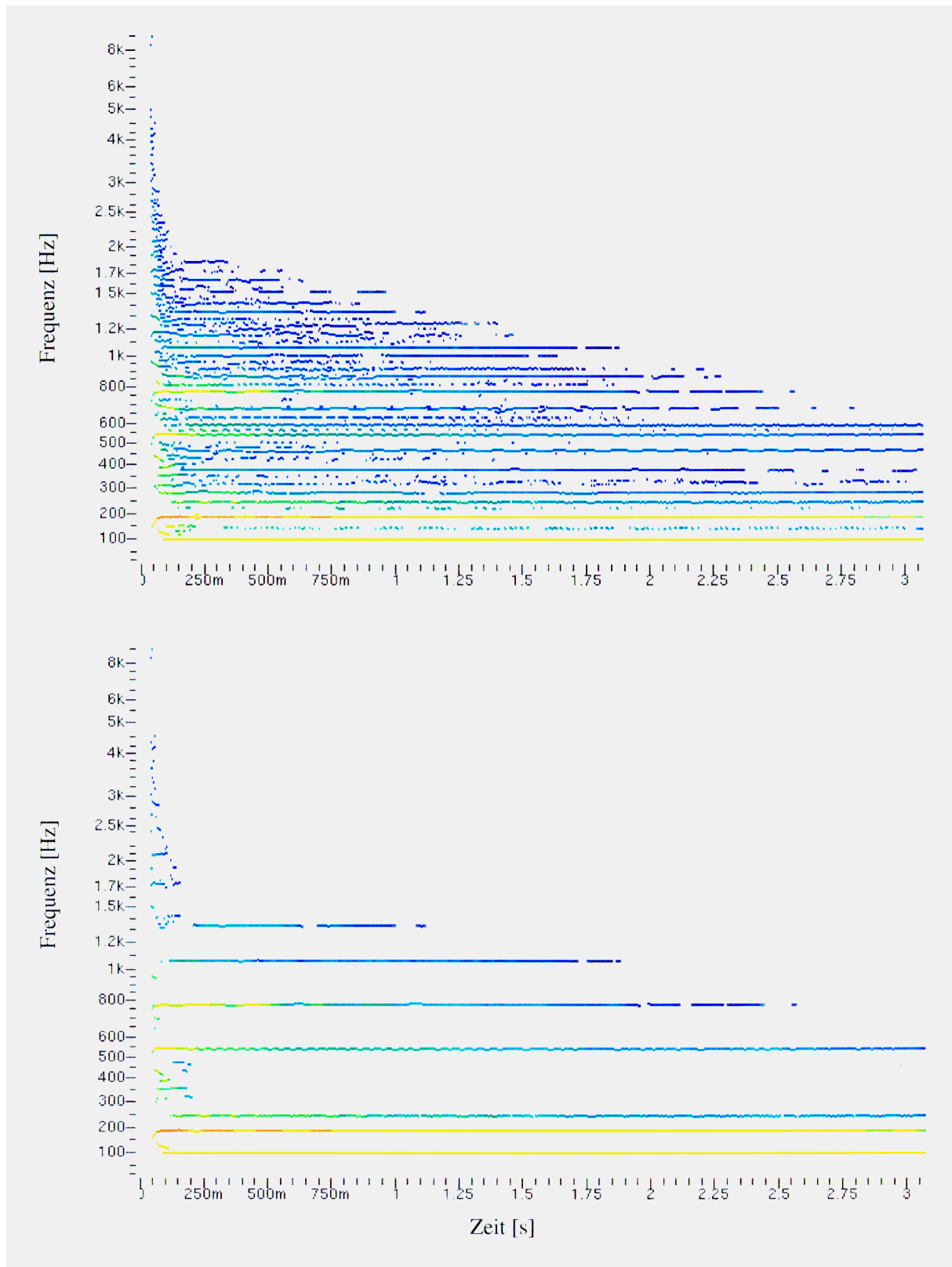
Der Pegel ist so kodiert, dass die Folge dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot ansteigenden Pegel bedeutet; nach Valenzuela (1998 b).



Anhang 4. Oben: Teilton-Zeit-Muster des Klanges des großen Burma-Gongs Nr. VI.

Unten: Teilton-Zeit-Muster unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung.

Der Pegel ist so kodiert, dass die Folge dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot ansteigenden Pegel bedeutet; nach Valenzuela (1998 b).

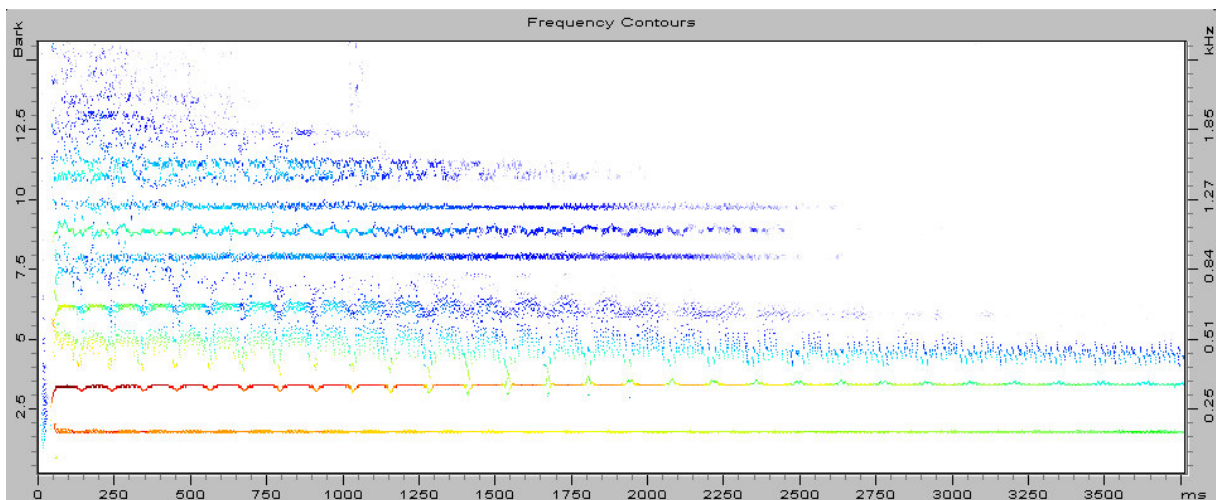
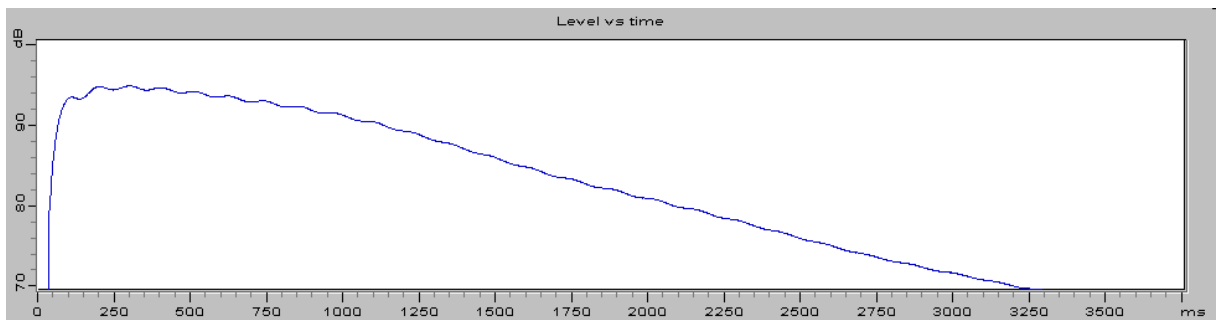
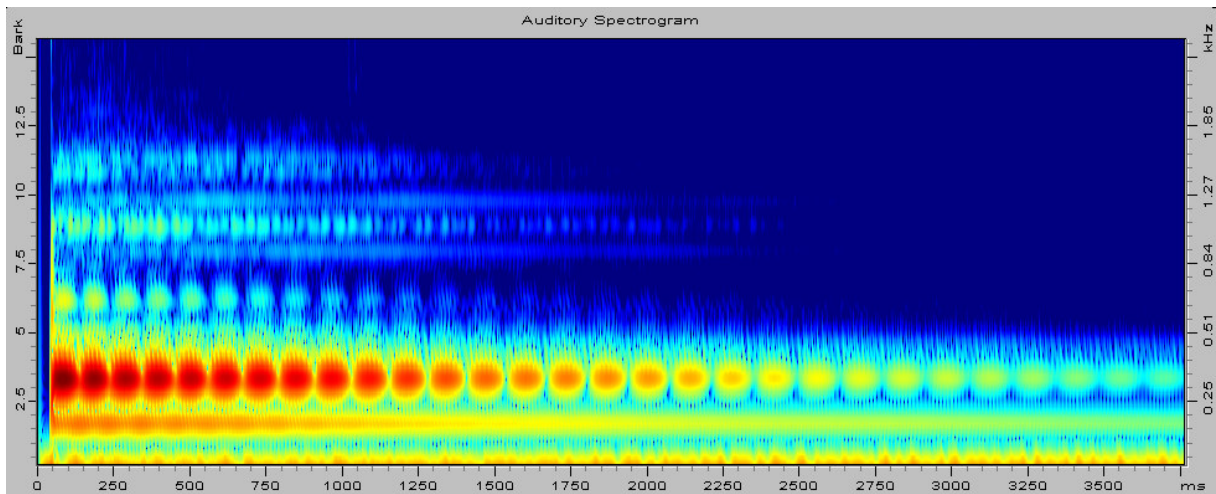


Anhang 5. Oben: Teilton-Zeit-Muster des Klanges des großen Burma-Gongs Nr. VII.

Unten: Teilton-Zeit-Muster unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung.

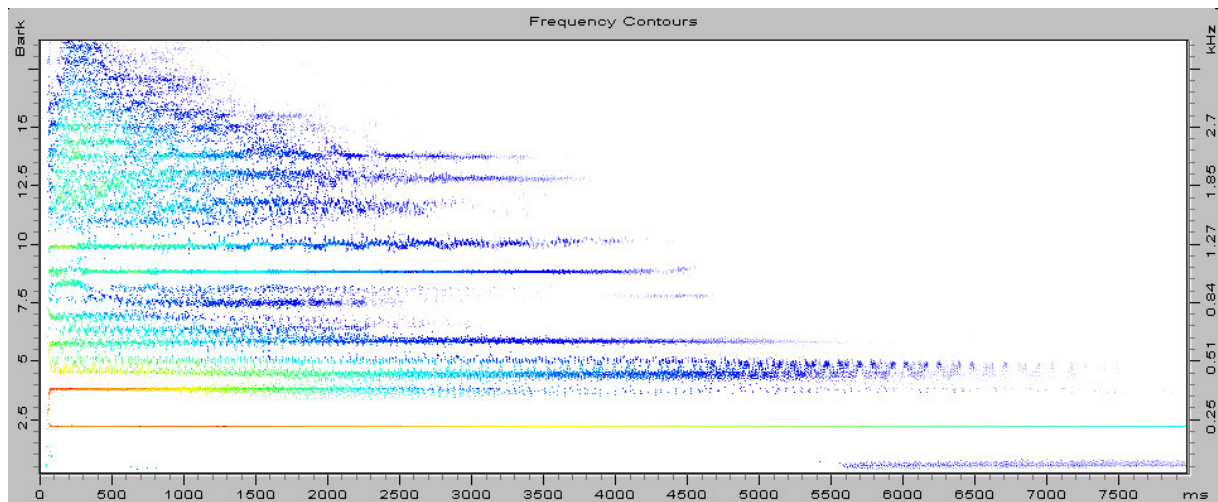
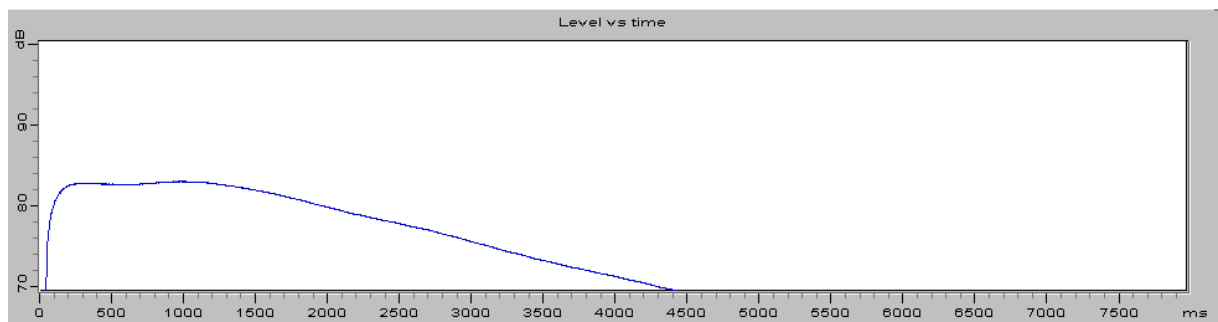
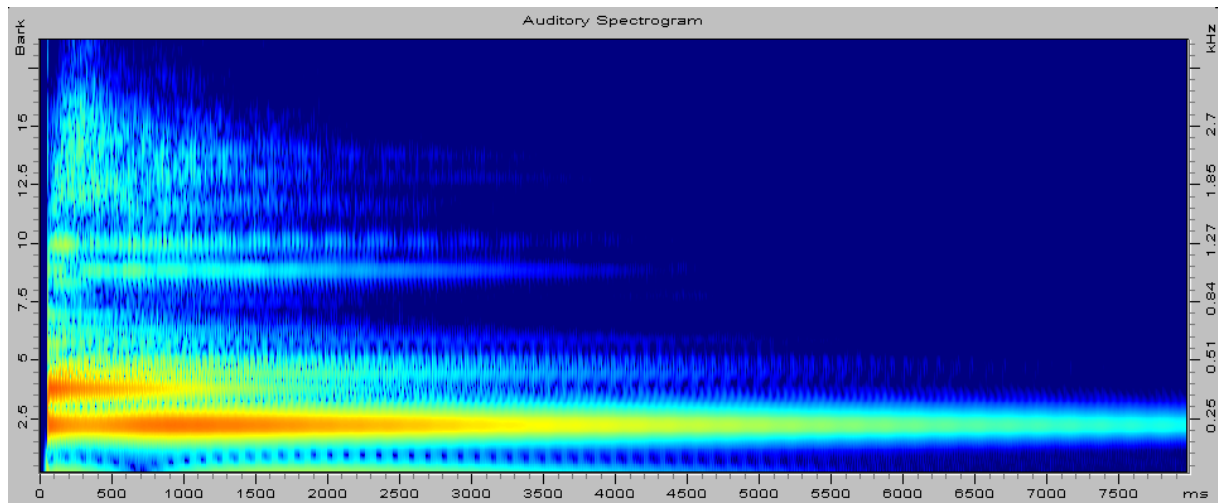
Der Pegel ist so kodiert, dass die Folge dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot ansteigenden Pegel bedeutet; nach Valenzuela (1998 b).

A 6



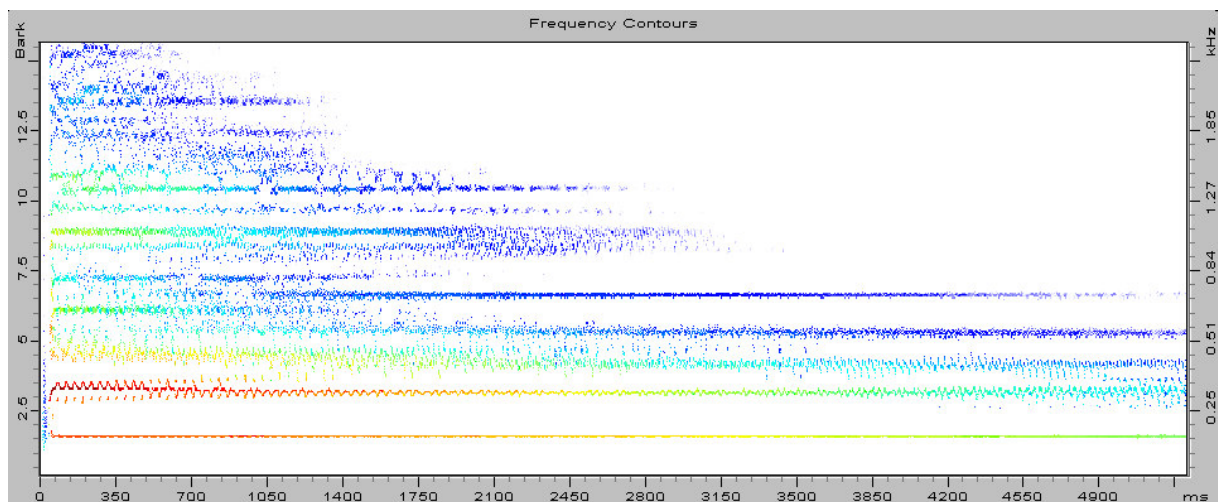
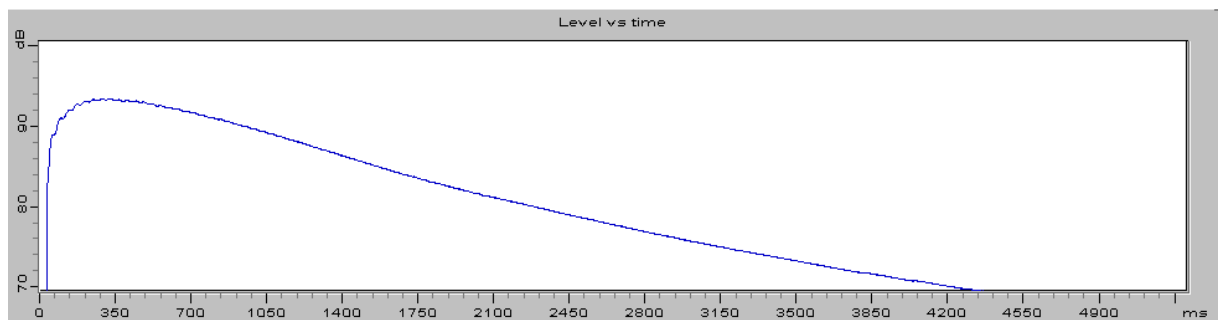
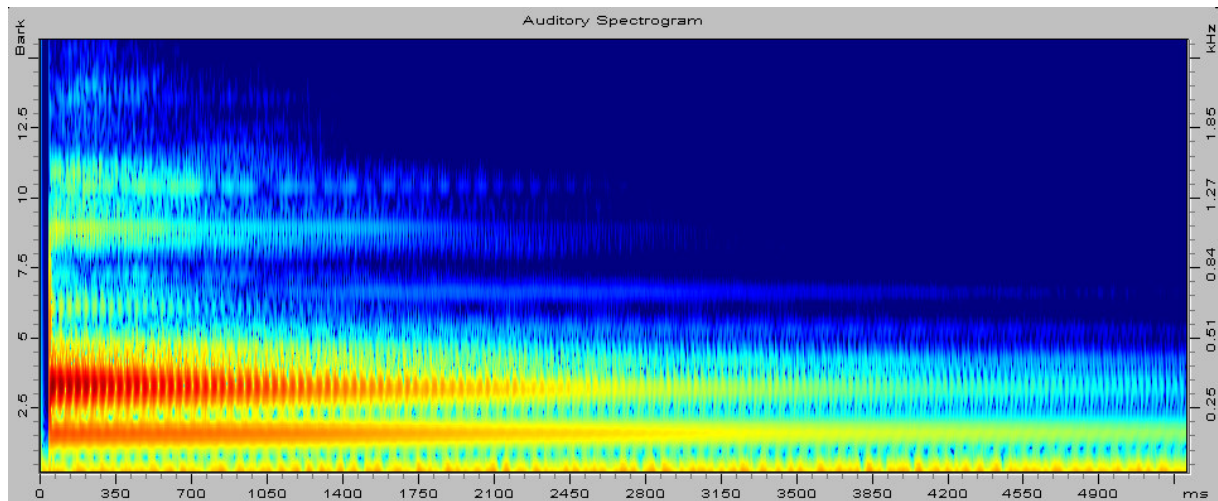
Anhang 6. Oben: Auditorisches Spektrogramm des Klanges des Burma-Gongs Nr. I, ermittelt mit VIPER.
 Mitte: Gesamtpegel über der Zeit.
 Unten: Frequenzkonturen unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung.
 Der Pegel ist gem. Anhang 17 so kodiert, dass die Folge weiß (unteres Diagramm) – dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot ansteigenden Pegel bedeutet; nach Roida (2002).

A 7



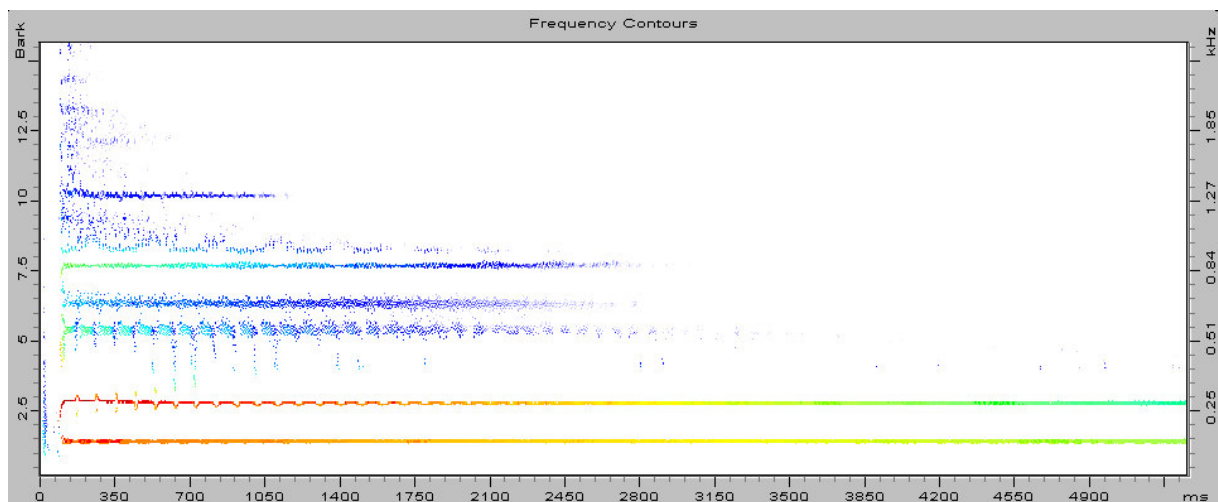
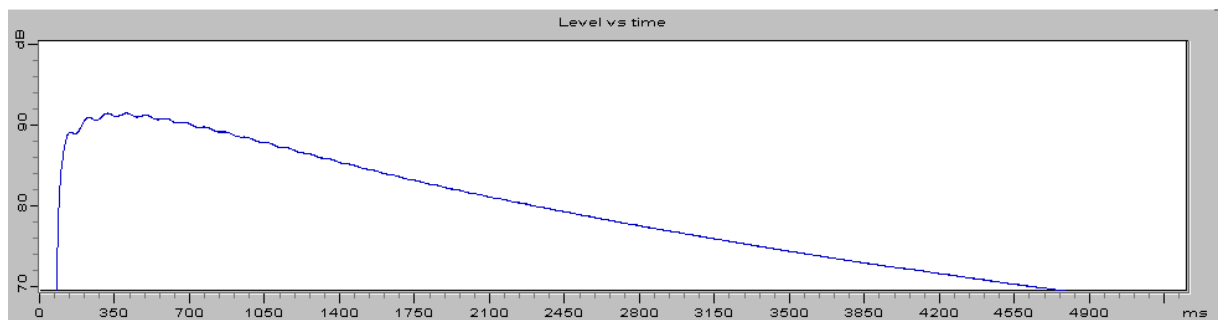
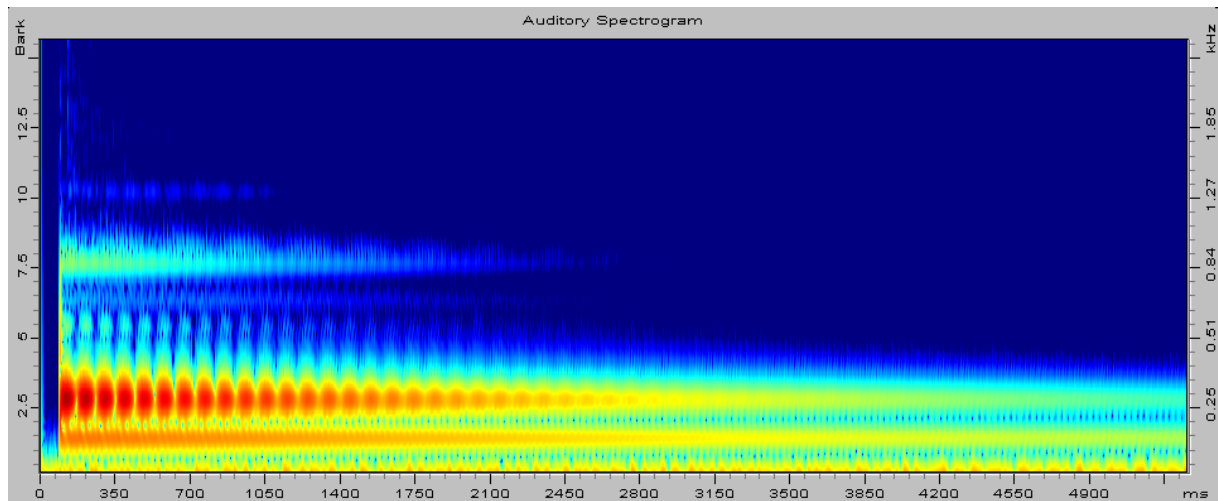
Anhang 7. Oben: Auditorisches Spektrogramm des Klanges des Burma-Gongs Nr. II, ermittelt mit VIPER.
 Mitte: Gesamtpegel über der Zeit.
 Unten: Frequenzkonturen unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung.
 Der Pegel ist gem. Anhang 17 so kodiert, dass die Folge weiß (unteres Diagramm) – dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot ansteigenden Pegel bedeutet; nach Roida (2002).

A 8



Anhang 8. Oben: Auditorisches Spektrogramm des Klanges des Burma-Gongs Nr. **III**, ermittelt mit VIPER.
Mitte: Gesamtpegel über der Zeit.
Unten: Frequenzkonturen unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung.
Der Pegel ist gem. Anhang 17 so kodiert, dass die Folge weiß (unteres Diagramm) – dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot ansteigenden Pegel bedeutet; nach Roida (2002).

A 9



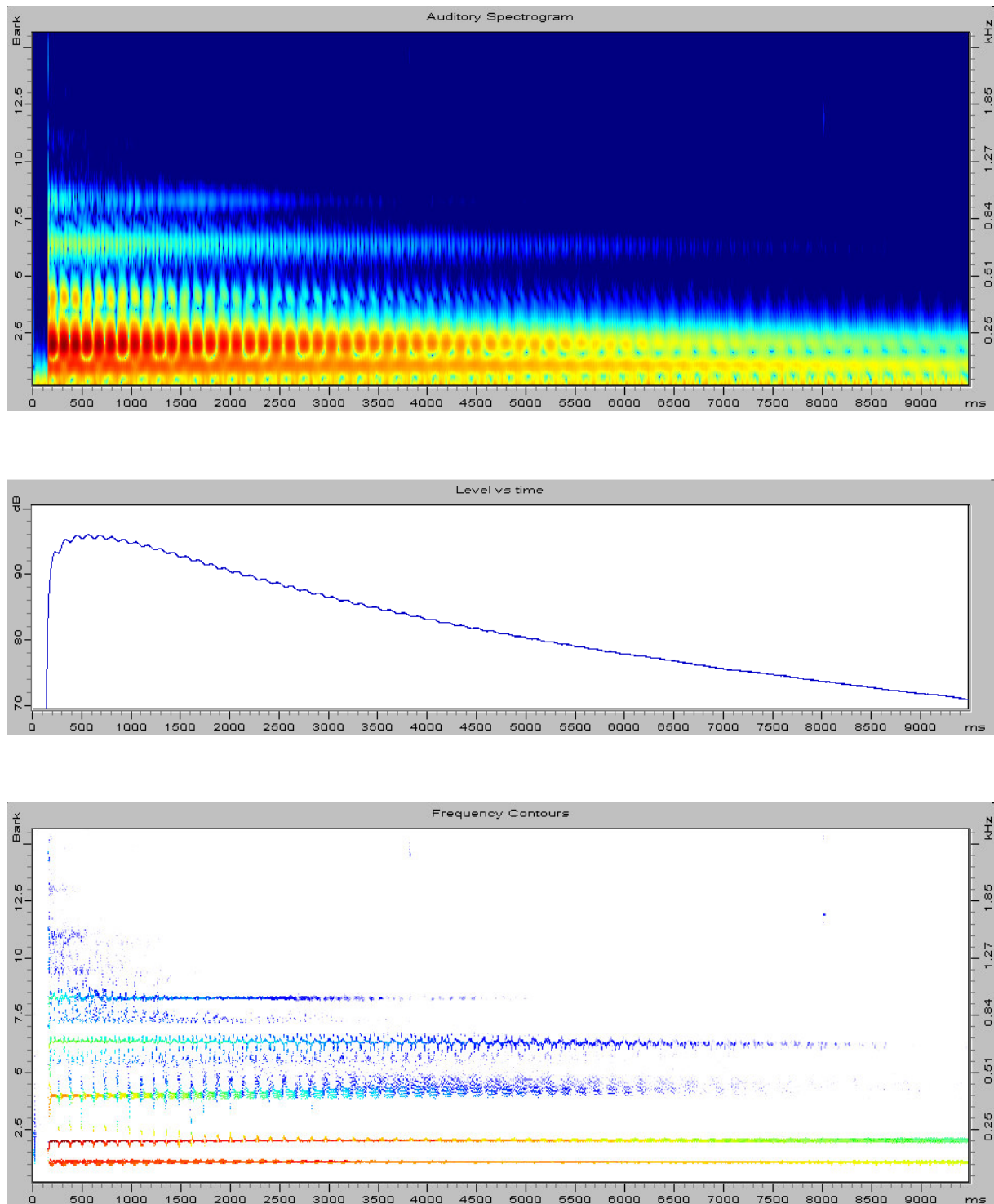
Anhang 9. Oben: Auditorisches Spektrogramm des Klanges des Burma-Gongs Nr. IV, ermittelt mit VIPER.

Mitte: Gesamtpegel über der Zeit.

Unten: Frequenzkonturen unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung.

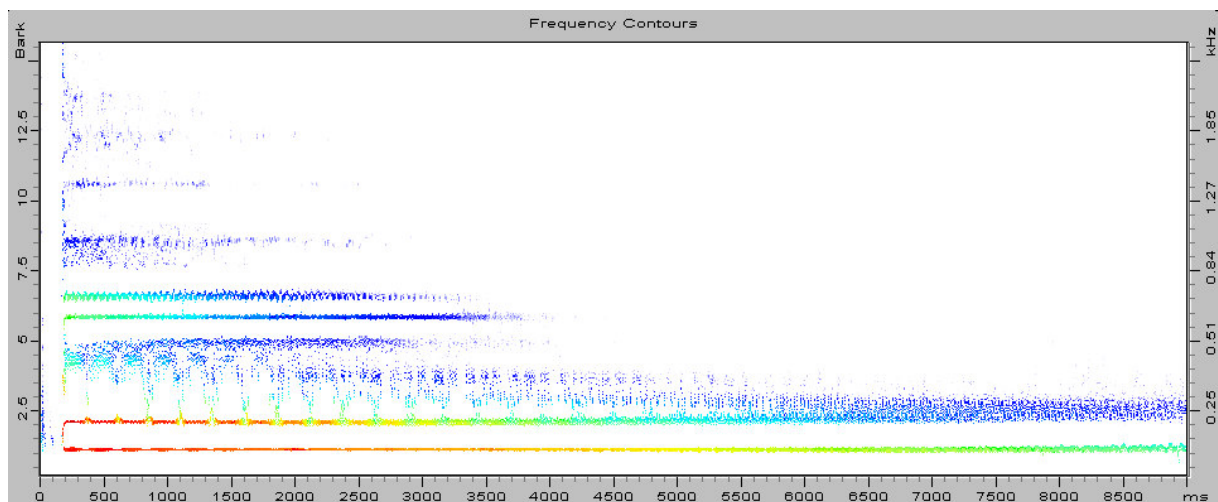
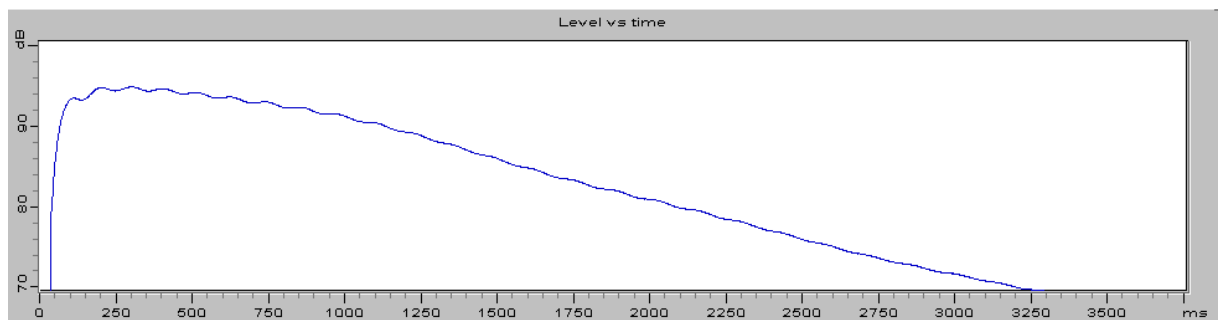
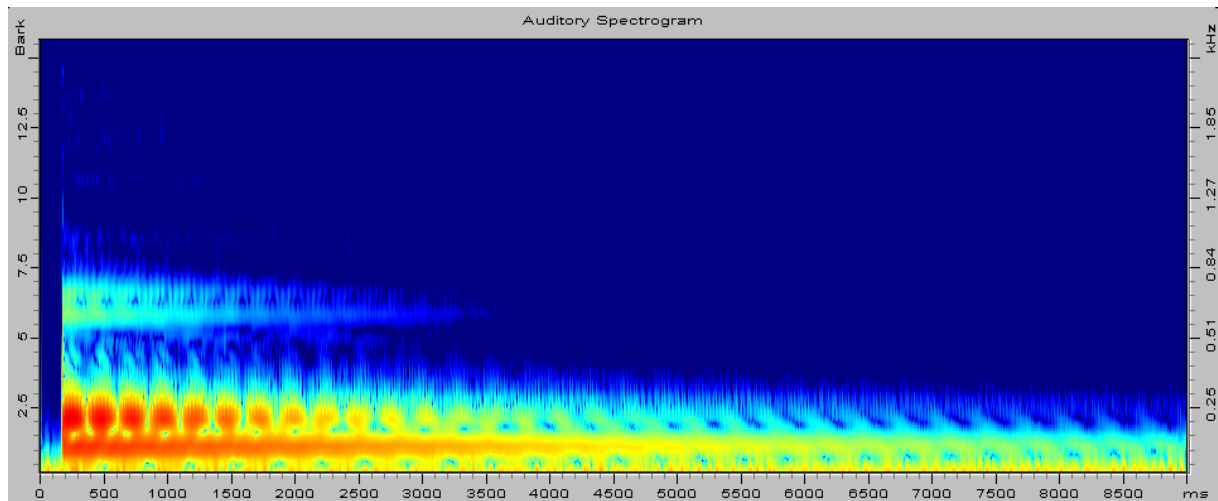
Der Pegel ist gem. Anhang 17 so kodiert, dass die Folge weiß (unteres Diagramm) – dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot ansteigenden Pegel bedeutet; nach Roida (2002).

A 10



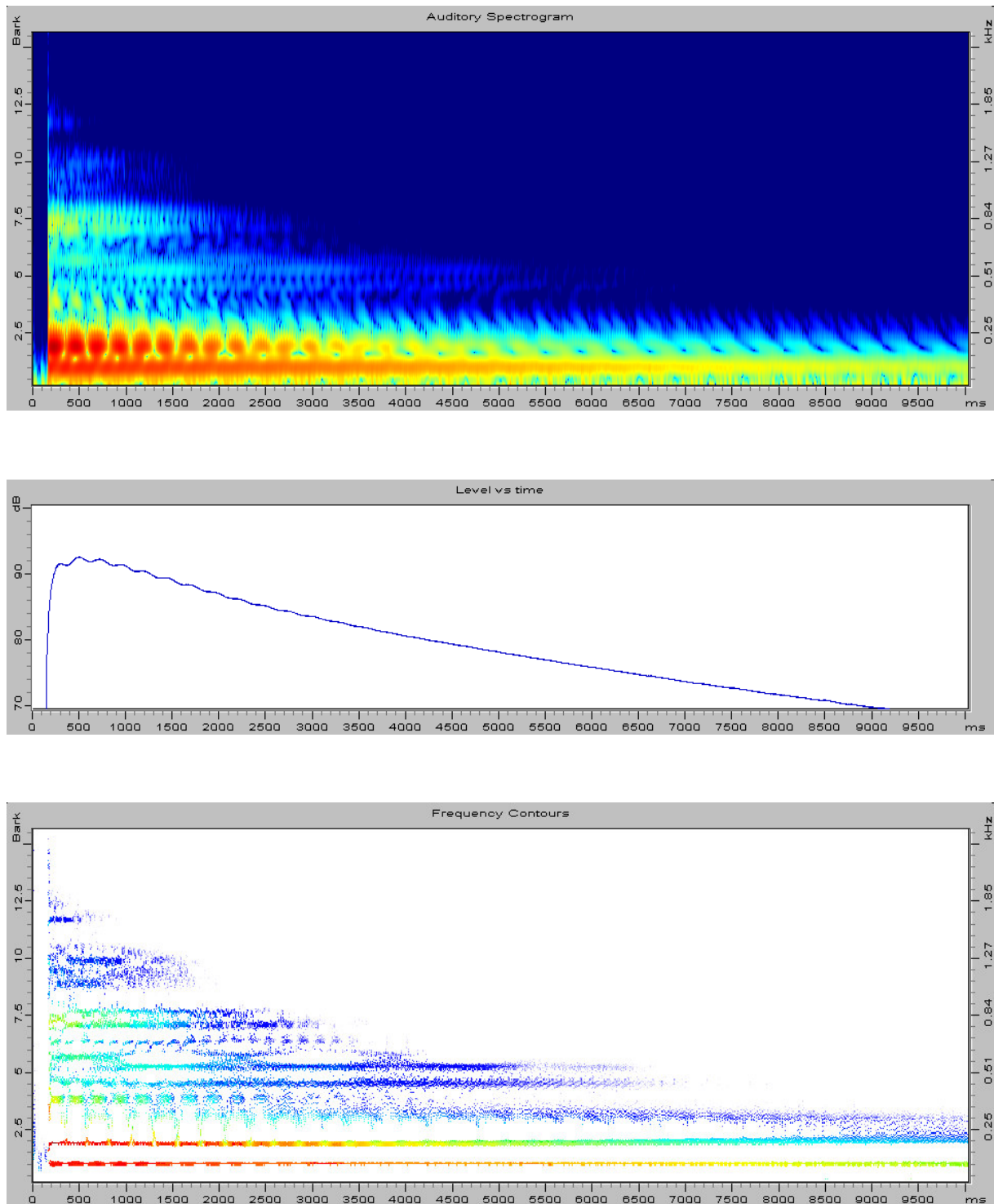
Anhang 10. Oben: Auditorisches Spektrogramm des Klanges des Burma-Gongs Nr. V, ermittelt mit VIPER.
Mitte: Gesamtpegel über der Zeit.
Unten: Frequenzkonturen unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung.
Der Pegel ist gem. Anhang 17 so kodiert, dass die Folge weiß (unteres Diagramm) – dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot ansteigenden Pegel bedeutet; nach Roida (2002).

A 11

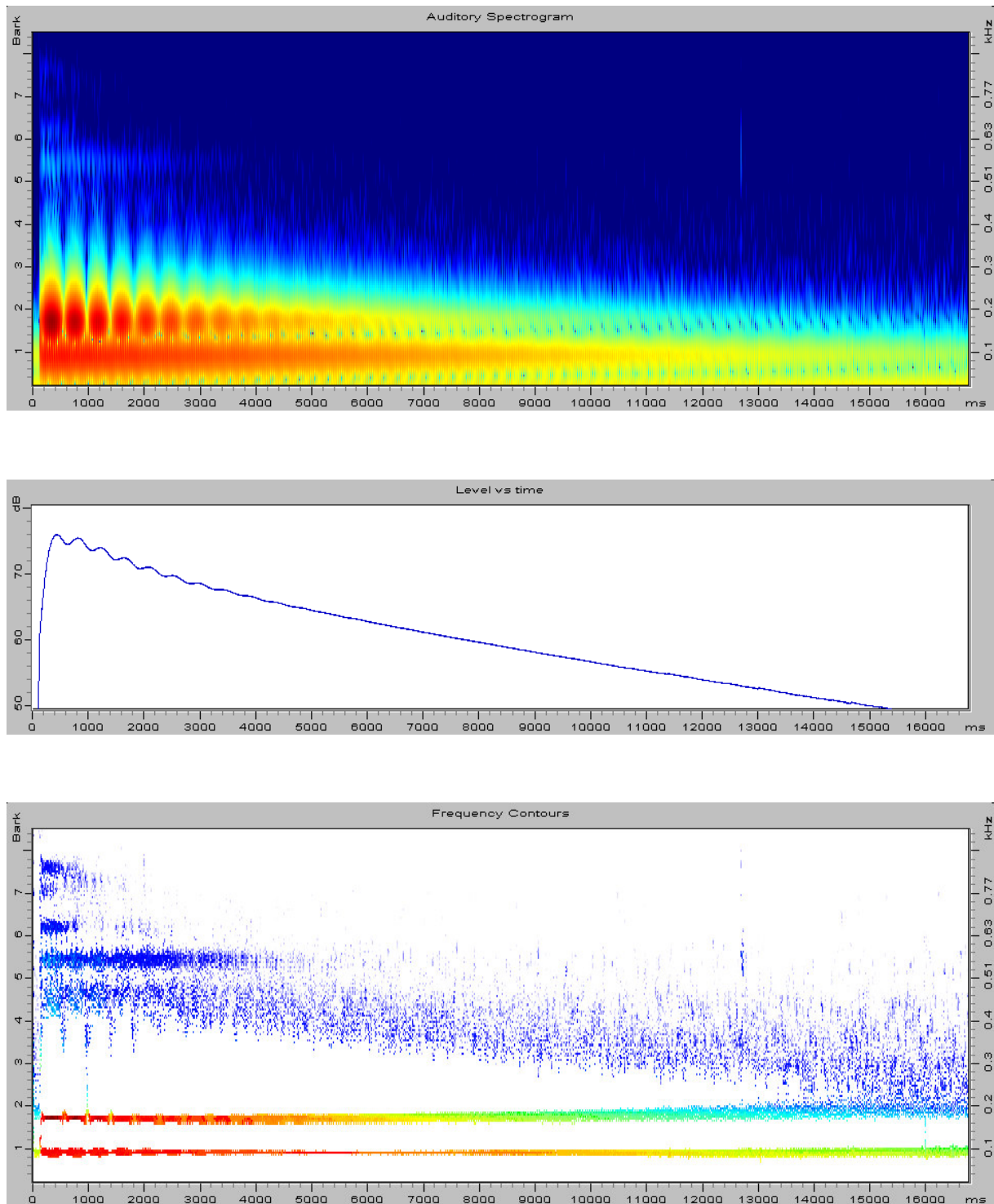


Anhang 11. Oben: Auditorisches Spektrogramm des Klanges des Burma-Gongs Nr. VI, ermittelt mit VIPER.
Mitte: Gesamtpegel über der Zeit.
Unten: Frequenzkonturen unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung.
Der Pegel ist gem. Anhang 17 so kodiert, dass die Folge weiß (unteres Diagramm) – dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot ansteigenden Pegel bedeutet; nach Roida (2002).

A 12

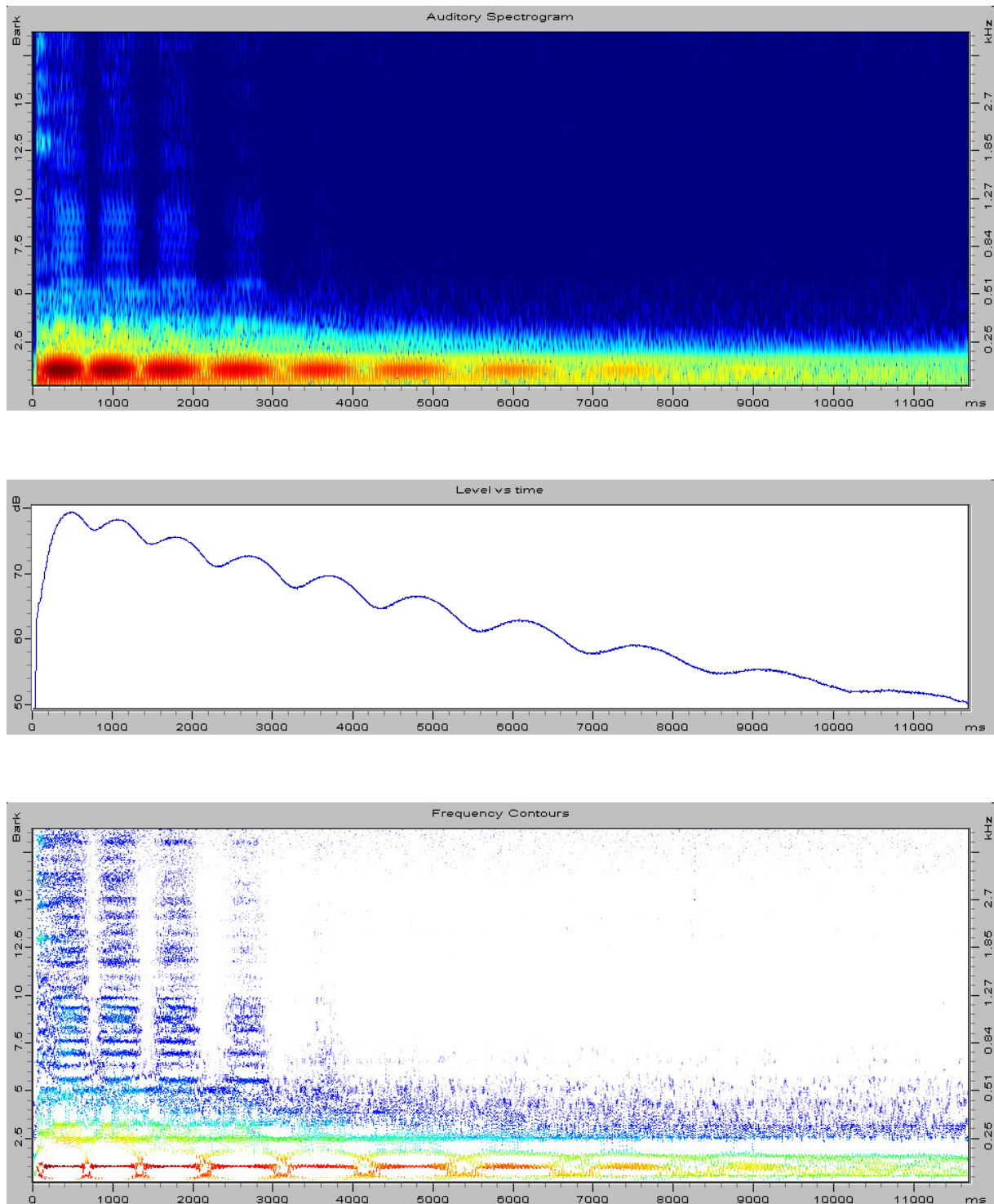


Anhang 12. Oben: Auditorisches Spektrogramm des Klanges des Burma-Gongs Nr. VII, ermittelt mit VIPER.
Mitte: Gesamtpegel über der Zeit.
Unten: Frequenzkonturen unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung.
Der Pegel ist gem. Anhang 17 so kodiert, dass die Folge weiß (unteres Diagramm) – dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot ansteigenden Pegel bedeutet; nach Roida (2002).



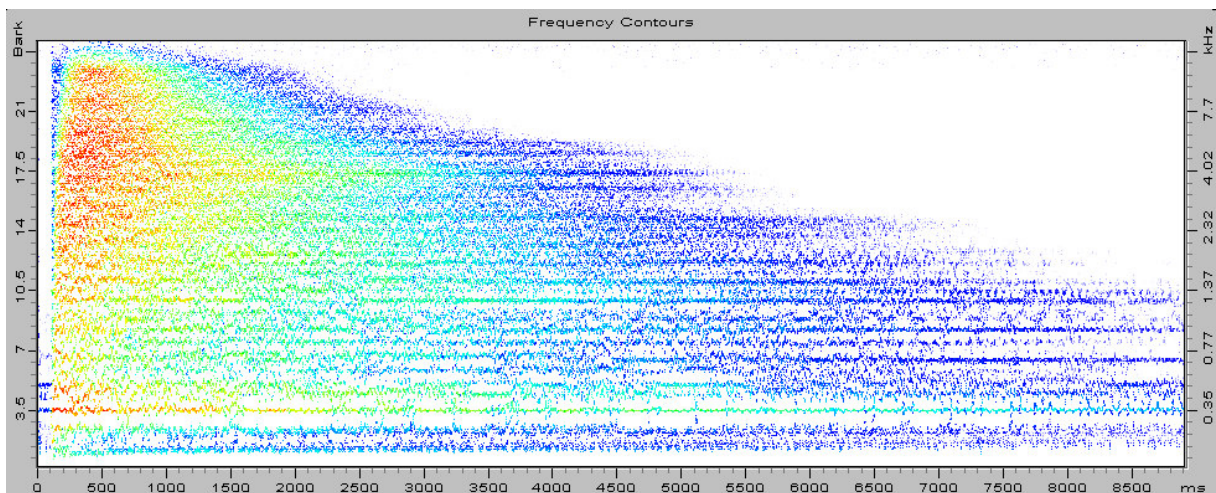
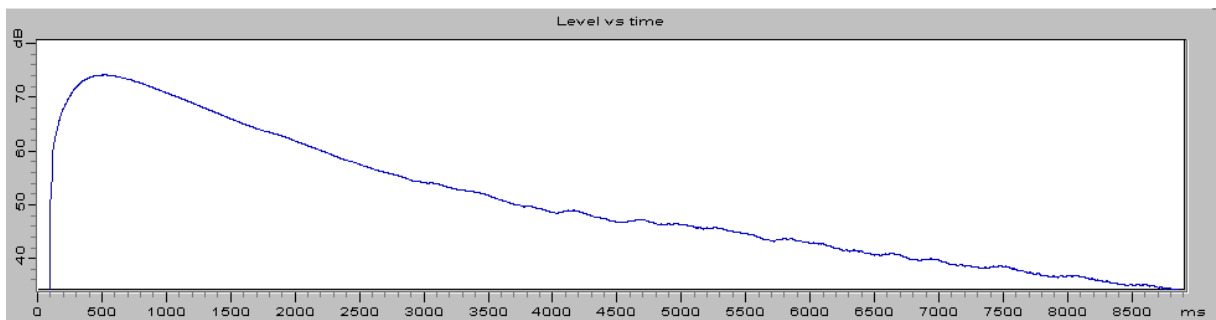
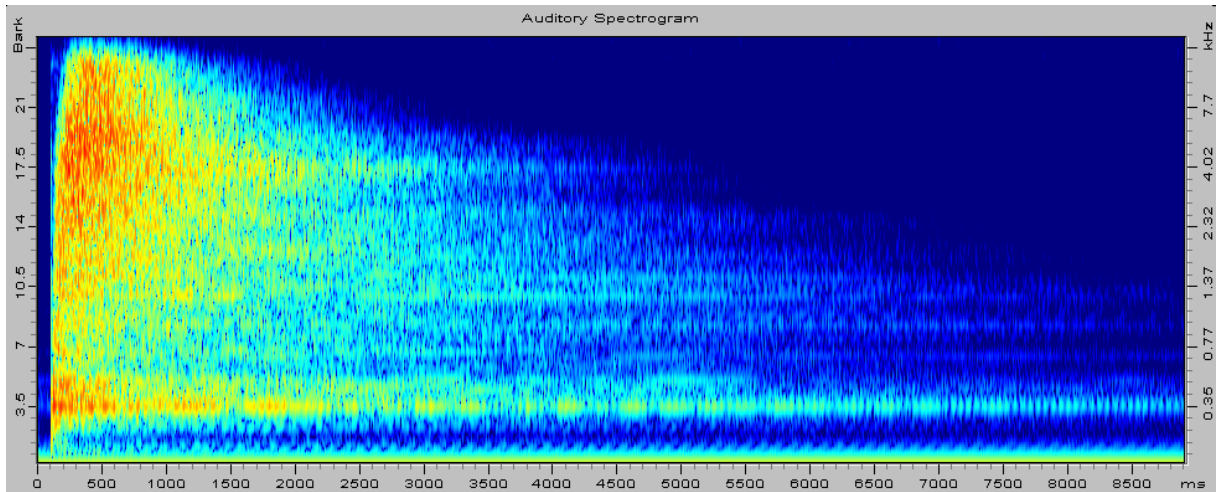
Anhang 13. Oben: Auditorisches Spektrogramm des Klanges des Java-Gongs Nr. **VIII**, ermittelt mit VIPER.
 Mitte: Gesamtpegel über der Zeit.
 Unten: Frequenzkonturen unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung.
 Der Pegel ist so kodiert, dass die Folge weiß (nur unteres Diagramm) – dunkelblau –
 hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot ansteigenden Pegel bedeutet; nach Roida (2002).

A 14



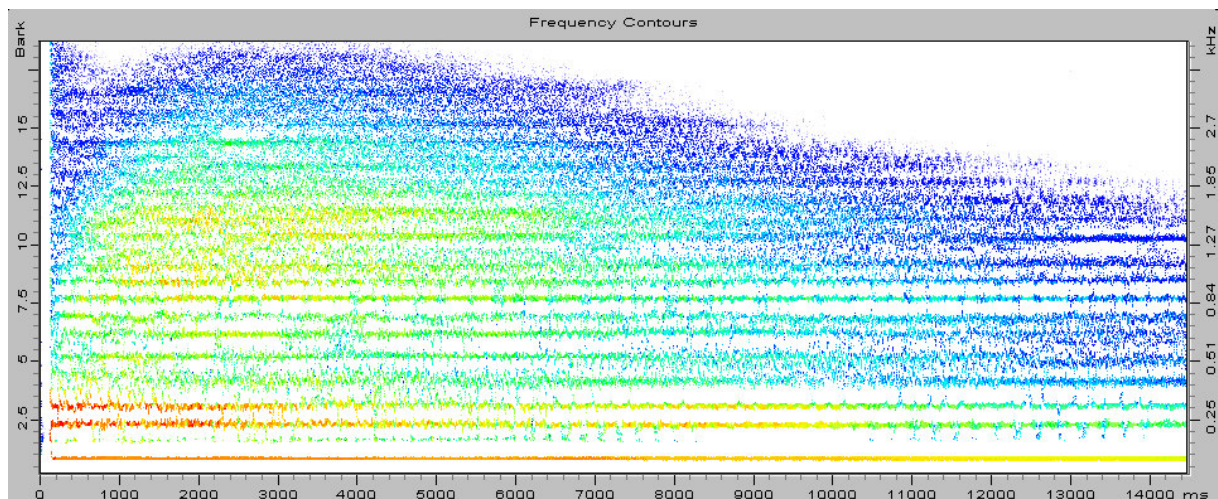
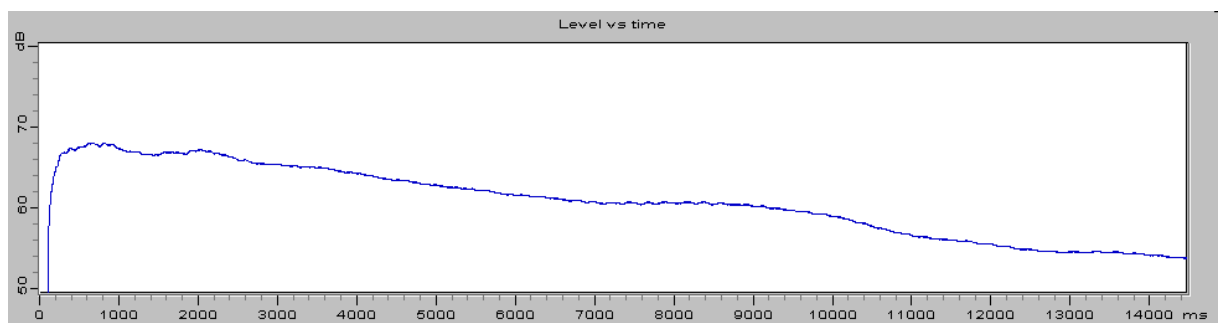
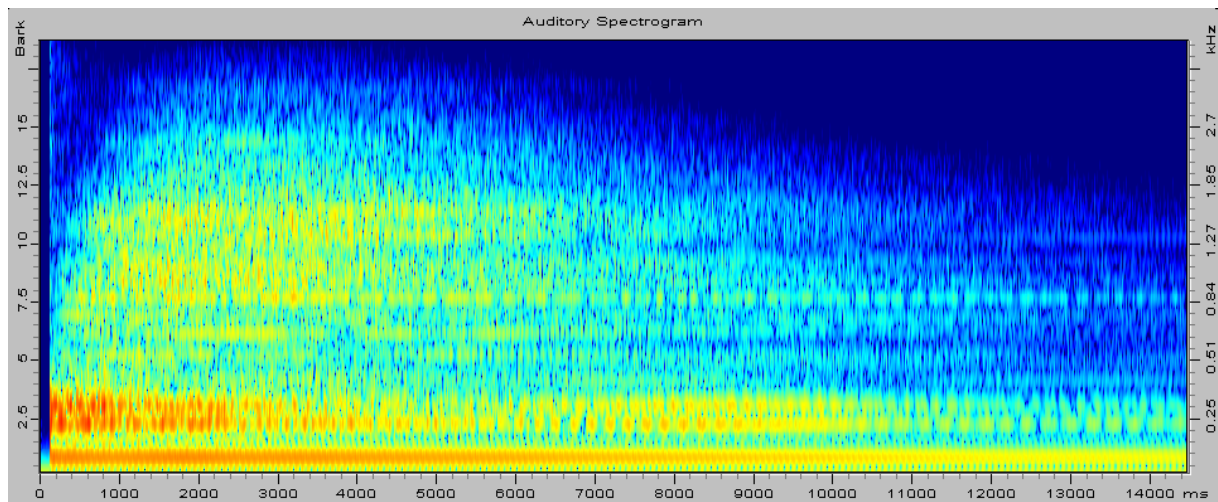
Anhang 14. Oben: Auditorisches Spektrogramm des Klanges des Java-Gongs Nr. IX, ermittelt mit VIPER.
Mitte: Gesamtpegel über der Zeit.
Unten: Frequenzkonturen unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung.
Der Pegel ist so kodiert, dass die Folge weiß (nur unteres Diagramm) – dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot ansteigenden Pegel bedeutet; nach Roida (2002).

A 15



Anhang 15. Oben: Auditorisches Spektrogramm des Klages des Flachgongs Nr. X, ermittelt mit VIPER.
Mitte: Gesamtpegel über der Zeit.
Unten: Frequenzkonturen unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung.
Der Pegel ist so kodiert, dass die Folge weiß (nur unteres Diagramm) – dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot ansteigenden Pegel bedeutet; nach Roida (2002).

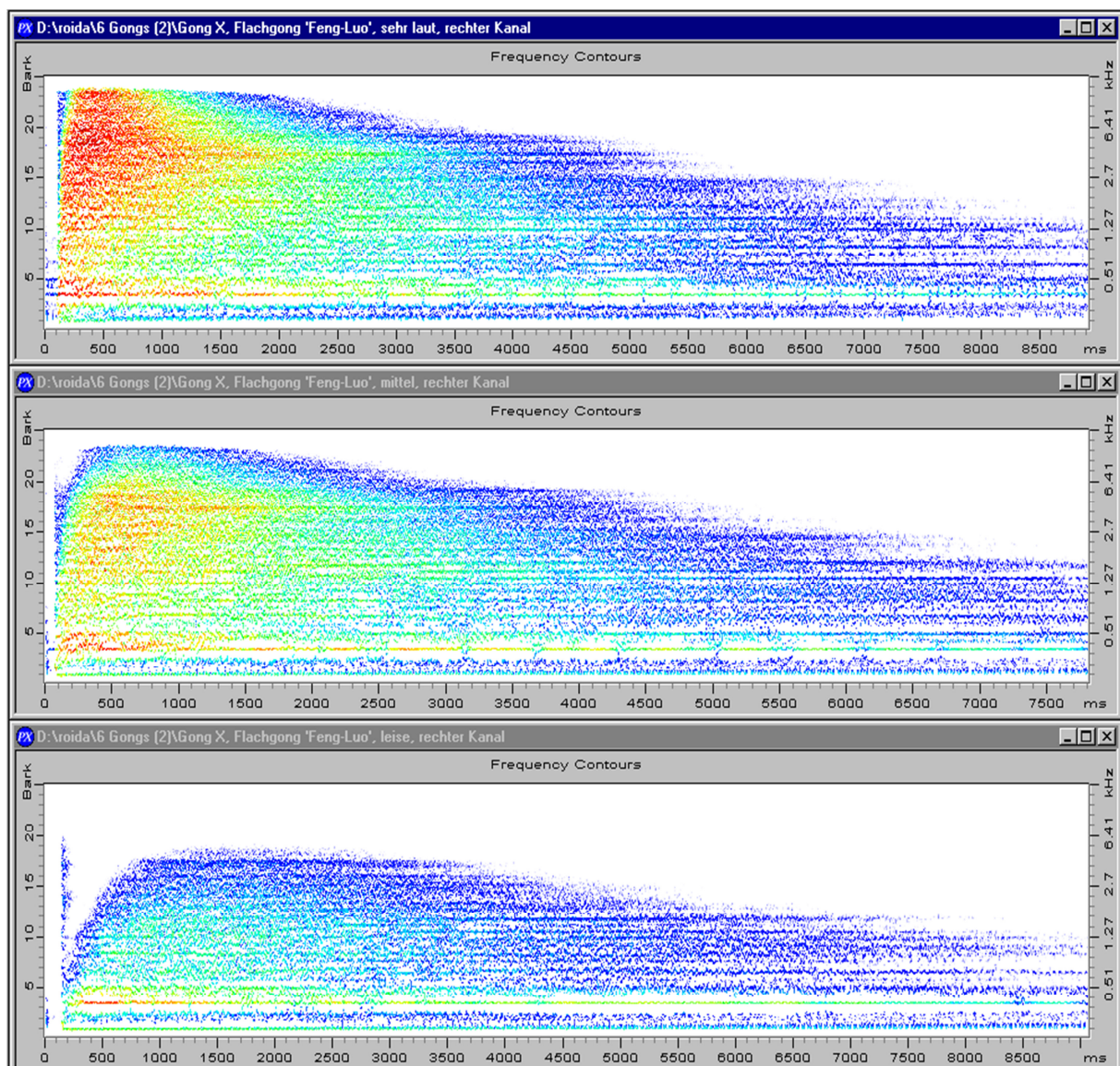
A 16



Anhang 16. Oben: Auditorisches Spektrogramm des Klanges des Flachgongs Nr. **XI**, ermittelt mit VIPER.
Mitte: Gesamtpegel über der Zeit.
Unten: Frequenzkonturen unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung.
Der Pegel ist so kodiert, dass die Folge weiß (nur unteres Diagramm) – dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot ansteigenden Pegel bedeutet; nach Roida (2002).



Anhang 17. Farbskala für den Pegel in Anhang 6 bis 12; für Anhang 13 bis 16 und 18 können die absoluten Pegelwerte geringfügig verschoben sein.
Links: für das Auditorische Spektrogramm,
rechts: für die Frequenzkonturen; nach Roida (2002).



Anhang 18. Frequenzkonturen des Klanges des Flachgongs Nr. X (fengluo), ermittelt mit VIPER.
Oben: starker Anschlag,
Mitte: mittlerer Anschlag,
unten: schwacher Anschlag.
Der Pegel ist so kodiert, dass gemäß Anhang 17 rechts die Folge weiß – dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot ansteigenden Pegel bedeutet; nach Roida (2002).

In der Reihe
Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik
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.

ISSN 1430-936X

Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik