

**BEITRÄGE  
ZUR  
VIBRO- UND PSYCHOAKUSTIK**

**Herausgeber: Helmut Fleischer und Hugo Fastl**

---

**Helmut Fleischer**

**SCHWINGUNGSUNTERSUCHUNGEN  
AN GONGS**

# **SCHWINGUNGSUNTERSUCHUNGEN AN GONGS**

von

**Helmut Fleischer**

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

**Heft 1/01 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:  
Schwingungsuntersuchungen an Gongs  
Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/01  
Neubiberg 2001  
**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.

## SCHWINGUNGSUNTERSUCHUNGEN AN GONGS

### Zusammenfassung

*Gegenstand der Studie sind die linearen Schwingungen asiatischer Gongs im Bereich von Frequenzen typischerweise bis 1 kHz. Sieben Burma- und zwei Java-Gongs, die in der Mitte einen Buckel aufweisen, werden mittels einer berührungsfreien Messmethode untersucht, die auf Laser-Vibrometrie basiert. Der Gong wird breitbandig mit einem elektrodynamischen Schwingerreger nahe seiner Mitte angeregt und die Kraft bestimmt. Die Normalschnelle wird an mehreren hundert Gitterpunkten auf der Oberfläche gemessen und die zugehörigen Übertragungsfunktionen Schnelle/Kraft werden berechnet. Die Spitzen der gemittelten Übertragungsfunktion zeigen Resonanzen an. In einer ersten Stufe werden die Schwingungsmuster für diese Resonanzfrequenzen ermittelt und dargestellt. Die Schwingungsmuster lassen sich nach Maßgabe der Anzahl  $m$  der Knotendurchmesser und  $n$  der Knotenkreise einordnen. In einer weiteren Stufe werden dieselben experimentellen Daten einer Modalanalyse unterzogen. Sowohl die modalen Formen als auch Frequenzen stimmen weitgehend mit den Schwingungsmustern bzw. Resonanzfrequenzen überein. Die Intervalle der Resonanzfrequenzen werden für jeden Gong berechnet. Hinsichtlich der Frequenzintervalle gleicht kein Gong dem anderen. Das "Splitting" der antimetrischen Moden erweist sich als der Normalfall. Die absoluten Differenzen der gesplitteten Frequenzen werden angegeben. Zur Abrundung der experimentellen Untersuchungen werden theoretische Berechnungen erprobt. Weder die Kreisplatte noch die Kegelschale eignen sich gut als einfache Modelle. Numerische Berechnungen mit finiten Elementen liefern bessere Ergebnisse. Die gesammelten Daten sollen als Grundlage für eine weiterführende Untersuchung des Schallsignals des Gongs dienen.*

## INVESTIGATIONS ON THE VIBRATIONS OF GONGS

### Summary

*The topic of the study are the linear vibrations of Asiatic gongs in the range of frequencies typically up to 1 kHz. Seven Burma and two Java gongs exhibiting a central dome are investigated by means of a non-contact measuring technique based on laser vibrometry. The gong is broadband-excited by an electrodynamic shaker close to its center and the force is determined. The normal velocity is measured at several hundred grid points on the surface and the corresponding frequency response functions velocity/force are calculated. The peaks of the average frequency response function serve as indicators of resonances. In a first stage, the operating deflection shapes are ascertained and displayed for these resonance frequencies. The majority of the deflection shapes reveals regular nodal lines and can be structured according to the numbers  $m$  of nodal diameters and  $n$  of nodal circles. In a next stage, the same experimental data are subject to a Modal Analysis. As well the modal shapes as the frequencies coincide with the operating deflection shapes and resonance frequencies, respectively, to a high degree. The intervals of the resonance frequencies are calculated for each gong. With respect to the frequency intervals no gong equals the other. Splitting of anti-symmetric modes proves as the normal case. The absolute differences of the splitted frequencies are given. In completion of the experimental investigations, theoretical calculations are tried. Neither the circular plate nor the conical shell suit as simple models. Numerical computations using finite elements yield better results. The collected data are to serve as a basis for a further study on the acoustic signal of the gong.*

# INHALT

## VORWORT

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1.     | EINLEITUNG .....                                 | 1  |
| 2.     | VERSUCHSOBJEKTE .....                            | 5  |
| 2.1.   | Übersicht über die untersuchten Gongs .....      | 5  |
| 2.2.   | Die Burma-Gongs .....                            | 6  |
| 2.2.1. | Burma-Gong Nr. I .....                           | 6  |
| 2.2.2. | Burma-Gong Nr. V .....                           | 7  |
| 2.2.3. | Burma-Gong Nr. VI .....                          | 9  |
| 2.3.   | Die Java-Gongs .....                             | 11 |
| 2.3.1. | Java-Gong Nr. VIII .....                         | 12 |
| 2.3.2. | Java-Gong Nr. IX .....                           | 12 |
| 2.4.   | Zusammenfassende Bemerkung .....                 | 13 |
| 3.     | SCHWINGUNGSMUSTER VON GONGS .....                | 14 |
| 3.1.   | Messung .....                                    | 14 |
| 3.1.1. | Messaufbau und -vorgang .....                    | 14 |
| 3.1.2. | Auswertung .....                                 | 16 |
| 3.2.   | Kleiner Burma-Gong Nr. I .....                   | 18 |
| 3.3.   | Kleiner Burma-Gong Nr. II .....                  | 21 |
| 3.4.   | Mittlerer Burma-Gong Nr. III .....               | 24 |
| 3.5.   | Mittlerer Burma-Gong Nr. IV .....                | 29 |
| 3.6.   | Großer Burma-Gong Nr. V .....                    | 31 |
| 3.7.   | Großer Burma-Gong Nr. VI .....                   | 34 |
| 3.8.   | Großer Burma-Gong Nr. VII .....                  | 38 |
| 3.9.   | Großer Java-Gong Nr. VIII .....                  | 42 |
| 3.10.  | Großer Java-Gong Nr. IX .....                    | 44 |
| 3.11.  | Zusammenfassende Bemerkung .....                 | 47 |
| 4.     | MODALANALYSE AN GONGS .....                      | 49 |
| 4.1.   | Messung und Auswertung .....                     | 49 |
| 4.2.   | Moden des kleinen Burma-Gongs Nr. I .....        | 49 |
| 4.3.   | Moden des mittleren Burma-Gongs Nr. III .....    | 54 |
| 4.4.   | Moden des großen Burma-Gongs Nr. V .....         | 59 |
| 4.4.1. | Erste Versuchsreihe .....                        | 59 |
| 4.4.2. | Zweite Versuchsreihe .....                       | 63 |
| 4.4.3. | Vergleich der Frequenzen .....                   | 67 |
| 4.5.   | Moden des großen Burma-Gongs Nr. VI .....        | 68 |
| 4.6.   | Zusammenfassende Bemerkung .....                 | 72 |
| 5.     | AUSWERTUNG DER SCHWINGUNGSMESSUNGEN .....        | 74 |
| 5.1.   | Frequenzintervalle der kleinen Burma-Gongs ..... | 74 |
| 5.1.1. | Kleiner Burma-Gong Nr. I .....                   | 74 |
| 5.1.2. | Kleiner Burma-Gong Nr. II .....                  | 74 |
| 5.1.3. | Gesamtschau der kleinen Burma-Gongs .....        | 75 |

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 5.2.   | Frequenzintervalle der mittleren Burma-Gongs.....           | 76  |
| 5.2.1. | Mittlerer Burma-Gong Nr. III .....                          | 76  |
| 5.2.2. | Mittlerer Burma-Gong Nr. IV .....                           | 76  |
| 5.2.3. | Gesamtschau der mittleren Burma-Gongs .....                 | 77  |
| 5.3.   | Frequenzintervalle der großen Burma-Gongs.....              | 78  |
| 5.3.1. | Großer Burma-Gong Nr. V .....                               | 78  |
| 5.3.2. | Großer Burma-Gong Nr. VI.....                               | 78  |
| 5.3.3. | Großer Burma-Gong Nr. VII.....                              | 79  |
| 5.3.4. | Gesamtschau der großen Burma-Gongs.....                     | 80  |
| 5.4.   | Frequenzintervalle der großen Java-Gongs.....               | 81  |
| 5.4.1. | Großer Java-Gong Nr. VIII .....                             | 81  |
| 5.4.2. | Großer Java-Gong Nr. IX.....                                | 82  |
| 5.4.3. | Gesamtschau der großen Java-Gongs .....                     | 82  |
| 5.5.   | Vergleich der Frequenzintervalle .....                      | 83  |
| 5.6.   | Frequenzdifferenzen.....                                    | 84  |
| 5.6.1. | Die beiden kleinen Burma-Gongs .....                        | 84  |
| 5.6.2. | Die beiden mittleren Burma-Gongs .....                      | 85  |
| 5.6.3. | Die drei großen Burma-Gongs .....                           | 86  |
| 5.6.1. | Die beiden großen Java-Gongs .....                          | 87  |
| 5.7.   | Zusammenfassende Bemerkung.....                             | 88  |
| 6.     | SCHWINGUNGSBERECHNUNGEN.....                                | 89  |
| 6.1.   | Einfache Modelle .....                                      | 89  |
| 6.1.1. | Versuchsweise Modellierung als Platte.....                  | 89  |
| 6.1.2. | Versuchsweise Modellierung als Kegelschale .....            | 92  |
| 6.2.   | Finite-Element-Berechnungen (erste Berechnungsreihe) .....  | 94  |
| 6.2.1. | Vorgehen .....  | 94  |
| 6.2.2. | Ergebnisse .....  | 94  |
| 6.3.   | Finite-Element-Berechnungen (zweite Berechnungsreihe) ..... | 99  |
| 6.3.1. | Vorgehen .....  | 99  |
| 6.3.2. | Ergebnisse für den kleinen Burma-Gong Nr. I .....           | 99  |
| 6.3.3. | Ergebnisse für den großen Burma-Gong Nr. V.....             | 101 |
| 6.3.4. | Ergebnisse für den großen Burma-Gong Nr. VI .....           | 104 |
| 6.4.   | Zusammenfassende Bemerkung.....                             | 105 |
| 7.     | ABSCHLIESSENDE DISKUSSION UND AUSBLICK.....                 | 107 |
|        | LITERATUR.....  | 114 |

## VORWORT

In der vorliegenden Arbeit beschäftigt sich Helmut Fleischer mit dem Schwingungsverhalten asiatischer Gongs. Nach der Arbeit von András Varsányi (Heft 2/00) ist dies der zweite Beitrag, der sich mit dieser Art von Idiophonen befasst. Mit einem Scanning Vibrometer hat er umfangreiche experimentelle Untersuchungen an sieben solcher Instrumente aus Burma sowie zwei Gongs aus Java durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass diese Unterscheidung Sinn macht, da die Vorstellungen von einem "guten" Gong in verschiedenen Kulturkreisen durchaus unterschiedlich sein können.

Alle untersuchten Gongs weisen in der Mitte einen Höcker auf. Dort werden sie mit einem elektrodynamischen Schwingerreger durch Pseudo-Rauschen angeregt, wobei der Anregungspunkt nicht exakt zentriert ist, um auch asymmetrische Schwingungen zu erzeugen. Die anregenden Kräfte wurden bewusst klein gehalten, da Nichtlinearitäten, die bei Gongs musikalisch eine Rolle spielen können, zunächst absichtlich außer Acht gelassen werden. Mit dem Laser des Scanning Vibrometers werden in umfangreichen Messreihen "Operating Deflection Shapes (ODSs)" ermittelt, die sehr anschaulich als "Schwingungsmuster" bezeichnet werden. Die Art der Darstellung ist den Lesern der "Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik" bereits aus Helmut Fleischers Untersuchungen an Elektrobässen bekannt.

Das von Helmut Fleischer bei seinen Untersuchungen an Glocken eingeführte  $m$ - $n$ -Schema mit der Anzahl  $m$  der Knotendurchmesser und  $n$  der Knotenkreise als Ordnungskriterien bewährt sich für die Strukturierung der Ergebnisse zum Schwingungsverhalten von Gongs. Auch das von Glocken und Pauken her bekannte Modensplitting, das zu "Spinning Modes" führt, findet sich bei Gongs wieder.

Auf den Daten, die als Ergebnis der Laser-Vibrometrie vorliegen, kann eine *e x p e r i m e n t e l l e* (im Gegensatz zur theoretisch-numerischen) Modalanalyse aufbauen. Die Eigenschwingungsformen werden in einer 3D-Gitterdarstellung veranschaulicht. Obwohl durch Interpolation die zugehörigen Eigenfrequenzen genauer angegeben werden können, zeigen bereits die ursprünglichen Schwingungsmuster alle wesentlichen Merkmale. Da die Abweichungen zwischen den durch Modalanalyse ermittelten Eigenfrequenzen einerseits und den Frequenzen der Schwingungsmuster andererseits unter einem Prozent liegen, erscheint für die Praxis im betrachteten Fall der zusätzliche Aufwand einer nachgeschalteten Modalanalyse nicht unbedingt notwendig. Die Maxima der Gesamtübertragungsfunktion liefern Schätzwerte für die Frequenzen der Eigenschwingungen mit hinreichender Genauigkeit.

Von besonderer Bedeutung für den Klang eines Gongs sind die Frequenzverhältnisse zwischen den Eigenschwingungen sowie die Frequenzunterschiede zwischen den "gesplitteten" Moden. Helmut Fleischer zeigt sehr anschaulich, dass im Vergleich zur "Basisschwingung" für die 1-1-Mode häufig ein Frequenzverhältnis um 1,5 und für die 0-2-Mode ein Frequenzverhältnis um 2,0 auftritt. Allerdings können bei sehr großen Gongs auch andere Frequenzintervalle vorkommen. Die Frequenzunterschiede durch Modensplitting liegen bei den Gongs aus Burma in aller Regel etwas höher als bei denjenigen aus Java. Die Unterschiede in den Frequenzen der Schwebungen, die daraus resultieren können, sind auch in der Musikwissenschaft bekannt.

Helmut Fleischer macht seine Leser auf den von ihm geplanten folgenden Beitrag zur musikalischen Bedeutung der Schwingungsmuster neugierig, da er andeutet, dass die musikalisch so bedeutsamen Schwebungen bei den großen Amplituden der Anregung, wie sie in der Musik üblich sind, womöglich auch durch Nichtlinearitäten hervorgerufen sein könnten. Zunächst müssen allerdings die Schallsignale analysiert werden, wobei zu erwarten ist, dass auch gehörbezogene Verfahren zum Einsatz kommen dürften.

München, im Dezember 2000

Hugo Fastl

## 1. EINLEITUNG

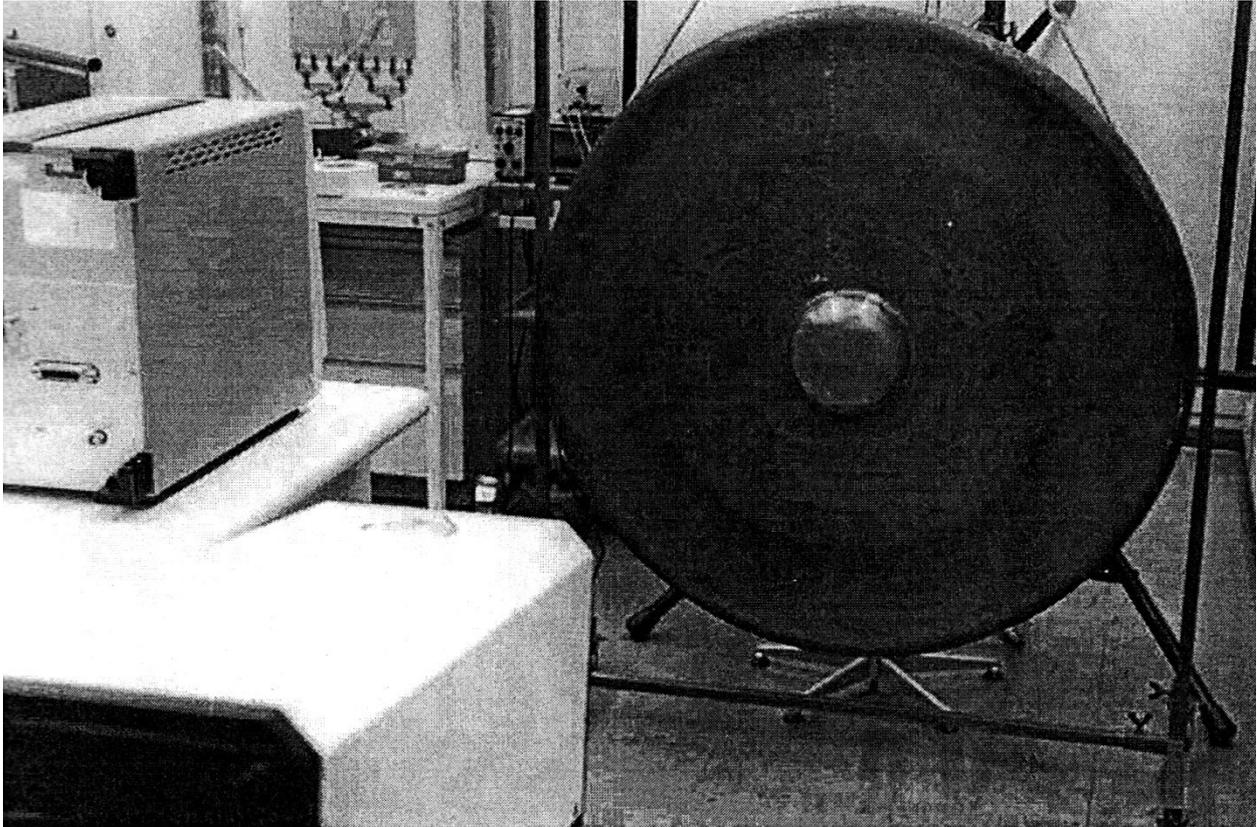
Nach der Systematik von Hornbostel und Sachs (1914) gehören Gongs zur Instrumentenfamilie der Idiophone (Selbstklinger). Im Abendland werden Gongs vorwiegend als Signalgeber, z.B. als Tischgongs, verwendet. Während sie damit hier zu Lande keine überragende Bedeutung besitzen, haben sie im Morgenland eine lange Tradition als Musikinstrumente (Varsányi (2000a), Fletcher und Rossing (1998)). In einigen asiatischen Ländern kommt ihnen darüber hinaus eine ausgeprägte religiöse Bedeutung zu. Aus der Gamelan-Musik Javas und Balis sind Gongs nicht wegzudenken (Varsányi (2000a)). Über Indonesien hat der Gong, aus China kommend, auch Einzug in einige sinfonische Werke des Abendlandes, wie z.B. Saint-Saëns "La princesse jaune" von 1872 oder Puccinis "Madame Butterfly" von 1904, gefunden. So verwenden bei einigen Stücken auch abendländische Orchester gestimmte Gongs, die zu Gong-Spielen zusammen gestellt sind.



*Fig. 1. Einige der Burma-Gongs, die für Messungen zur Verfügung stehen, samt den zugehörigen Schlegeln.  
Links oben Gong Nr. III, rechts oben Gong Nr. VI, links unten Gong Nr. V und rechts unten Gong Nr. I.*

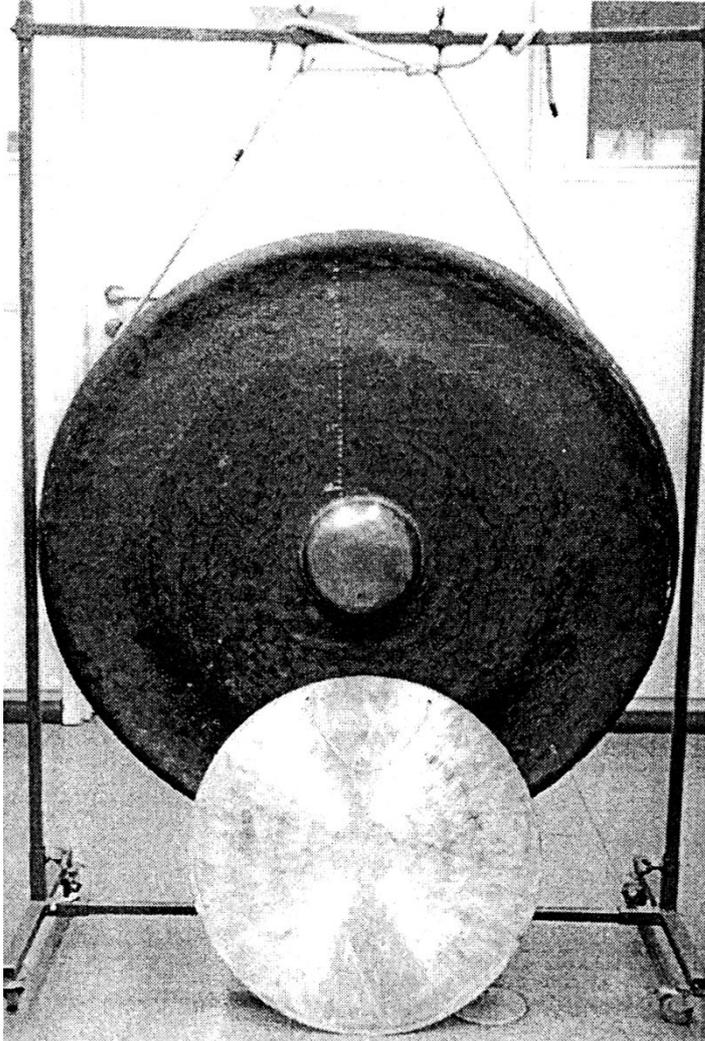
Gongs bestehen aus flachen Metallschalen unterschiedlicher Form und Größe. Die im folgenden untersuchten Buckelgongs besitzen ausnahmslos einen zentralen Schlagbuckel, der beim Java-Gong *pencu* heißt; vgl. Varsányi (2000a). Dessen Gewicht beträgt nach Fletcher und Rossing (1998) etwa 7 ... 10% des Gesamtgewichts. Gongs werden aus Bronze gegossen und anschließend geschmiedet bzw. getrieben (Varsányi (2000a)). In der Folge dieser Bearbeitung ist die Oberfläche gekrümmt und weist zum umgebördelten Rand (*bau*) hin eine bei Java-Gongs besonders ausgeprägte Randrinne (*rejeb*) auf. Gongs sind üblicherweise vertikal an einer Schnur aufgehängt, die durch zwei Löcher am Rand gezogen ist. Sie werden durch Anschlag auf den zentralen Schlagbuckel zum Klingen gebracht. Der Schlegel, der dazu dient, kann unterschiedlich hart und schwer sein. Nach Varsányi (2000a und b) beträgt sein Gewicht in aller Regel ca. 2 ... 2,5% des Gonggewichts.

Einige der Gongs, auf die sich die folgenden Untersuchungen beziehen, sind in Fig. 1 abgebildet. Sie stammen aus Burma. Herr Bernhard Kolberg von der Firma Kolberg Percussion in Uhingen, dem an dieser Stelle herzlich für sein Entgegenkommen gedankt sei, hat sie dem Institut für Mechanik für Messzwecke zur Verfügung gestellt. Zwei weitere Gongs wurden im Zusammenhang mit den Forschungsarbeiten von Dr. András Varsányi (Varsányi 2000a und b) im Institut für Mechanik untersucht. Sie stammen aus dem Privatbesitz von Dr. Varsányi und wurden auf der Insel Java gefertigt. Einer der beiden Java-Gongs, ein Instrument von beeindruckender Größe, ist in den Fig. 2 und 3 abgebildet. Der andere ist etwas kleiner und in Fig. 4 dargestellt.



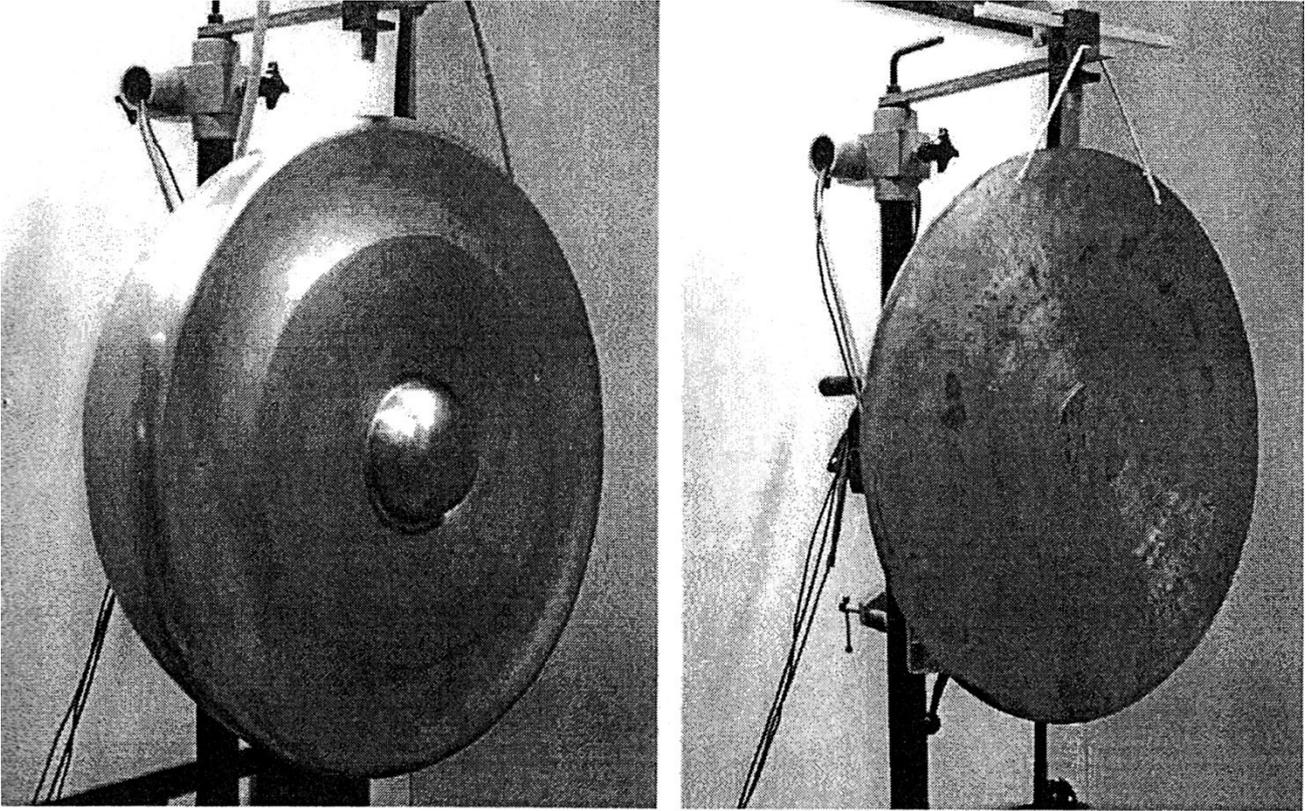
*Fig. 2. Gong Nr. IX (Gong Ageng aus Java; Dr. Varsányi),  
vorbereitet zur Schwingungsmessung mit dem Scanning Vibrometer.*

Von den Gongs, wie sie hier betrachtet werden, sind die Tamtams zu unterscheiden. Im Gegensatz zu einem Gong wird ein Tamtam außermittig angeschlagen. Sein Schallsignal baut sich langsam auf und ruft keine Tonhöhenempfindung hervor. Ein Tamtam besitzt keinen Schlagbuckel; der Rand ist gar nicht oder nur leicht aufgebogenen. Diese Unterschiede in der Form sind aus den Fig. 3 und 4 ersichtlich. Fig. 3 macht das Fehlen des Schlagbuckels beim Tamtam, das stehend abgebildet ist, deutlich. Fig. 4 zeigt im direkten Vergleich die halbseitlichen Ansichten eines Gongs und eines Tamtams. Der Gong (Fig. 4 links) weist einen ausgeprägten Rand auf. Beim Tamtam (Fig. 4 rechts) ist der Rand wesentlich schmaler und dünner ausgebildet.



*Fig. 3. Hängend: Gong Nr. IX  
(Gong Ageng aus Java;  
Dr. Varsányi);  
stehend: Tamtam (Fengluo  
aus China; Dr. Varsányi).*

Mit dem Gong in gewisser Hinsicht verwandt ist die Glocke, die seit geraumer Zeit am Institut für Mechanik untersucht wird (Fleischer (1989a und b), (1997), (1998) und (2000)). Bereits vor mehr als vierzig Jahren haben Grützmaker und Wesselhöft (1959) auf diese Verwandtschaft Bezug genommen. Aus Sicht der Mechanik stellt die Glocke eine *d i c k e* Schale dar, während der Gong als *d ü n n e* Schale modelliert werden kann. Eine Abschätzung lässt vermuten, dass die Auslenkungen, die eine Glocke infolge des Anschlags mit dem Klöppel erfährt, in einem *l i n e a r e n* Zusammenhang mit dem anregenden Kraftsignal stehen. Jeder Teilton ist direkt einer Teilschwingung zugeordnet. Bei einer dünnwandigen Struktur, wie sie ein Gong darstellt, ist dagegen ein geometrisch *n i c h t l i n e a r e s* Verhalten nicht ausgeschlossen. Das würde bedeuten, dass beim Gong ein und dieselbe Teilschwingung nicht nur einen, sondern möglicherweise mehrere Teiltöne hervorrufen könnte. Diese Nichtlinearität ist jedoch kein Gegenstand des vorliegenden Berichts. Vielmehr bleiben die folgenden experimentellen und theoretischen Betrachtungen auf geringe Kräfte und kleine Auslenkungen beschränkt, so dass hinreichend lineare Zusammenhänge vorausgesetzt werden können.



*Fig. 4. Links: Gong Nr. VIII (Suwukan aus Java; Dr. Varsányi);  
rechts: Tamtam (Fengluo; Dr. Varsányi).*

## 2. VERSUCHSOBJEKTE

Zur Erkundung der Schwingung und des Schallsignals von Gongs sollte eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt werden. Über Experimente und Berechnungen zur mechanischen Schwingung wird im Folgenden berichtet. Dafür standen - zum Teil nur zeitweise, zum Teil auf Dauer - mehrere Versuchsobjekte zur Verfügung.

### 2.1. Übersicht über die untersuchten Gongs

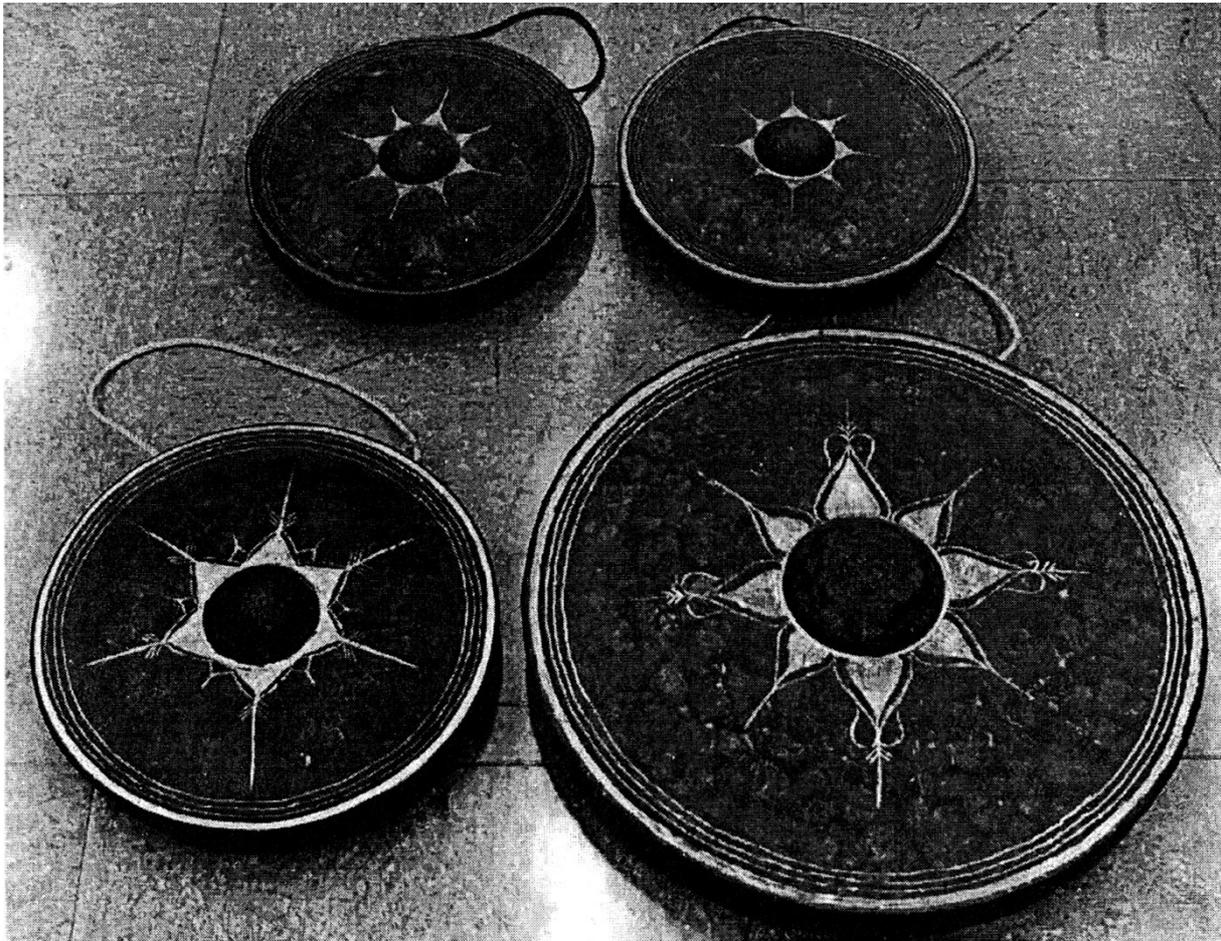
Tab. I zeigt eine Zusammenstellung der neun Gongs, auf die sich die Betrachtungen beziehen. Sie lassen sich nach ihrer Herkunft gliedern. Während die Gongs Nr. **I** bis **VII** aus Burma stammen, wurden die Gongs Nr. **VIII** und **IX** auf Java gefertigt. Gongs mit Durchmessern bis 35 cm werden hier als klein, solche mit Durchmessern von mehr als 50 cm als groß bezeichnet. Die dazwischen liegenden werden der mittleren Größenklasse zugeordnet. Die in der Tabelle angegebenen Frequenzen sind als Anhaltswerte zu verstehen; abhängig von Messmethode und Frequenzauflösung können sie geringfügig differieren. Typische Exemplare sind in den folgenden Abschnitten detaillierter beschrieben.

*Tab. I. Liste der Gongs, an denen Untersuchungen durchgeführt wurden*

| <b>Nummer</b> | <b>Durchmesser</b> | <b>Frequenz der 1. Teilschwingung</b> | <b>Bemerkungen</b>                            |
|---------------|--------------------|---------------------------------------|---|
| <b>I</b>      | 33 cm              | 161 Hz                                | kleiner Burma-Gong<br>der Firma Kolberg       |
| <b>II</b>     | 33 cm              | 216 Hz                                | kleiner Burma-Gong<br>der Firma Kolberg       |
| <b>III</b>    | 37 cm              | 151 Hz                                | mittlerer Burma-Gong<br>der Firma Kolberg     |
| <b>IV</b>     | 41 cm              | 132 Hz                                | mittlerer Burma-Gong<br>der Firma Kolberg     |
| <b>V</b>      | 53 cm              | 101 Hz                                | großer Burma-Gong<br>der Firma Kolberg        |
| <b>VI</b>     | 55 cm              | 103 Hz                                | großer Burma-Gong<br>der Firma Kolberg        |
| <b>VII</b>    | 61 cm              | 93 Hz                                 | großer Burma-Gong<br>der Firma Kolberg        |
| <b>VIII</b>   | 59 cm              | 82 Hz                                 | großer Java-Gong<br>Suwukan (Dr. Varsányi)    |
| <b>IX</b>     | 102 cm             | 48 Hz                                 | großer Java-Gong<br>Gong Ageng (Dr. Varsányi) |

## 2.2. Die Burma-Gongs

Um einen Größenvergleich zu ermöglichen, sind vier der Burma-Gongs im selben Bild (Fig. 5) dargestellt. Die Durchmesser der abgebildeten Objekte liegen zwischen 33 cm bei den kleinen Gongs Nr. I sowie II und 52 cm bei Gong Nr. V. Es sind dies Instrumente, aus denen die Firma Kolberg Gong-Spiele zusammensetzt. Insgesamt standen sieben Burma-Gongs zur Verfügung. Der Durchmesser des größten hier untersuchten Burma-Gongs (Nr. VII) beträgt 61 cm.



*Fig. 5. Untersuchte Burma-Gongs.*

*Links oben Gong Nr. I, rechts oben Gong Nr. II, links unten Gong Nr. III und rechts unten Gong Nr. V.*

### 2.2.1. Burma-Gong Nr. I

Die Abmessungen einiger Gongs wurden im Werkzeugmaschinen-Zentrallabor der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik mit Hilfe einer Messmaschine der Firma Mitutoyo (vgl. Fig. 8) aufgenommen, wofür Herrn Schön herzlich gedankt sei. Das Original-Messergebnis ist unterhalb der Fotografie als  $x$ - $y$ -Plot des halben Querschnitts dargestellt. Die eingefügte Beschriftung dient der Zuordnung der Messpunkte zu den Koordinaten, die auch in tabellarischer Form vorliegen. Man erkennt eine komplizierte Kontur mit mehrfacher Änderung der Krümmungsrichtung. Folgende ungefähre Abmessungen des Gongs Nr. I sind Fig. 6 zu entnehmen:

|                          |          |
|--------------------------|----------|
| Außenradius              | 16,5 cm, |
| Radius des Schlagbuckels | 4,0 cm,  |

Höhe des Schlagbuckels 2,5 cm,  
Höhe des Randes 6,0 cm.

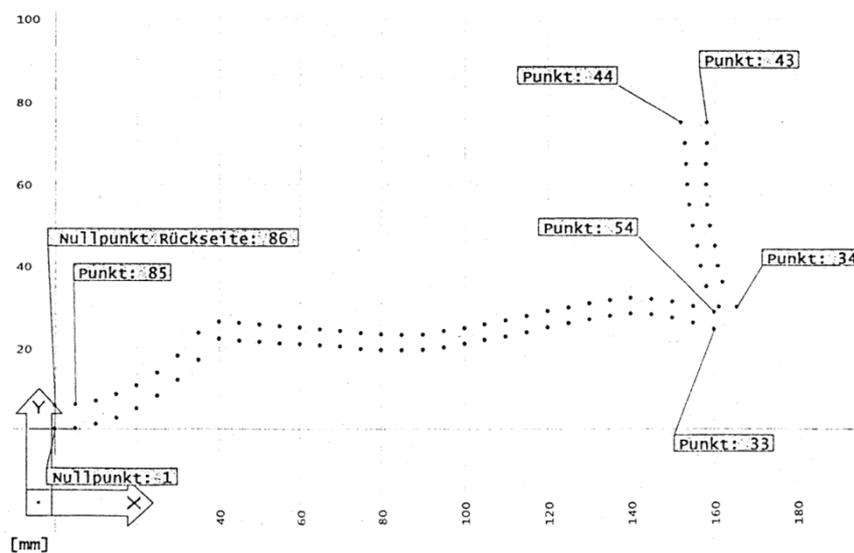
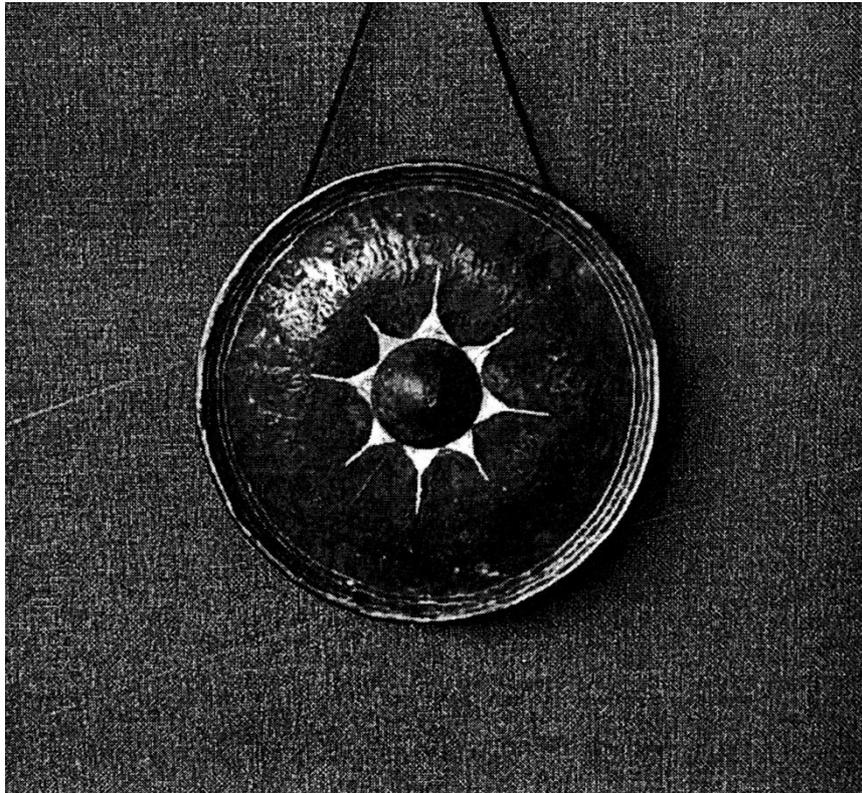


Fig. 6. Burma-Gong Nr. I. Oben: Gong samt Aufhänge-Schnur.  
Unten: Außen- und Innenkontur, aufgenommen mit der Mitutoyo-Messmaschine.

### 2.2.2 Burma-Gong Nr. V

Die Oberflächen sämtlicher Burma-Gongs sind schwärzlich-matt und zeigen Spuren der Bearbeitung durch Hämmern, die beim Gong Nr. V besonders ausgeprägt sind. Längs des Umfangs sind am Außenrand kreisförmige und um den Schlagbuckel herum blütenartige Verzie-

rungen eingeritzt, an denen die blanke Bronze sichtbar wird. Folgende ungefähre Abmessungen des Gongs Nr. V können Fig. 7 entnommen werden:

|                          |          |
|--------------------------|----------|
| Außenradius              | 26,5 cm, |
| Radius des Schlagbuckels | 6,5 cm,  |
| Höhe des Schlagbuckels   | 4,5 cm,  |
| Höhe des Randes          | 7,5 cm.  |

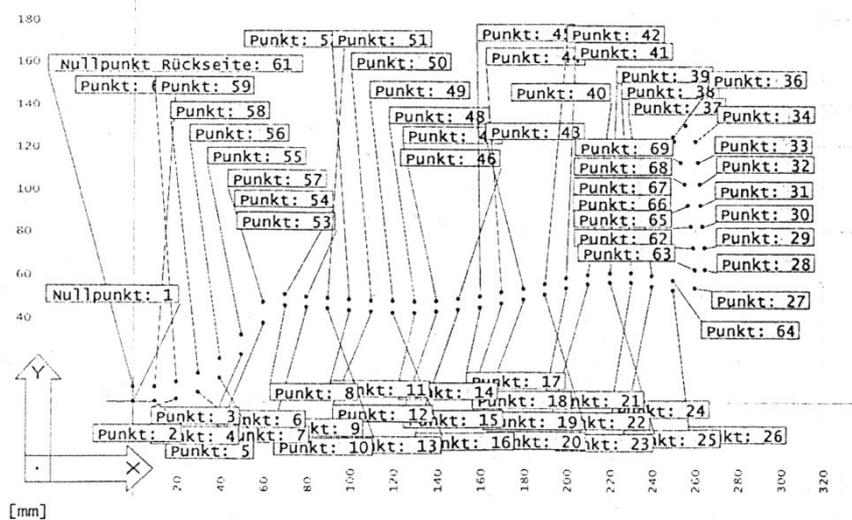
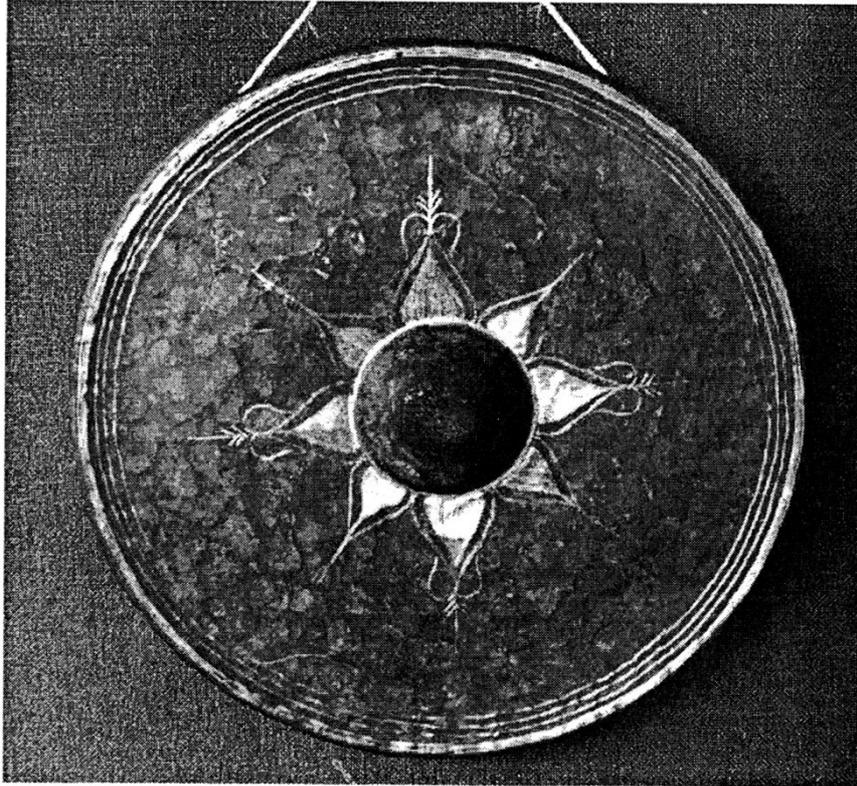
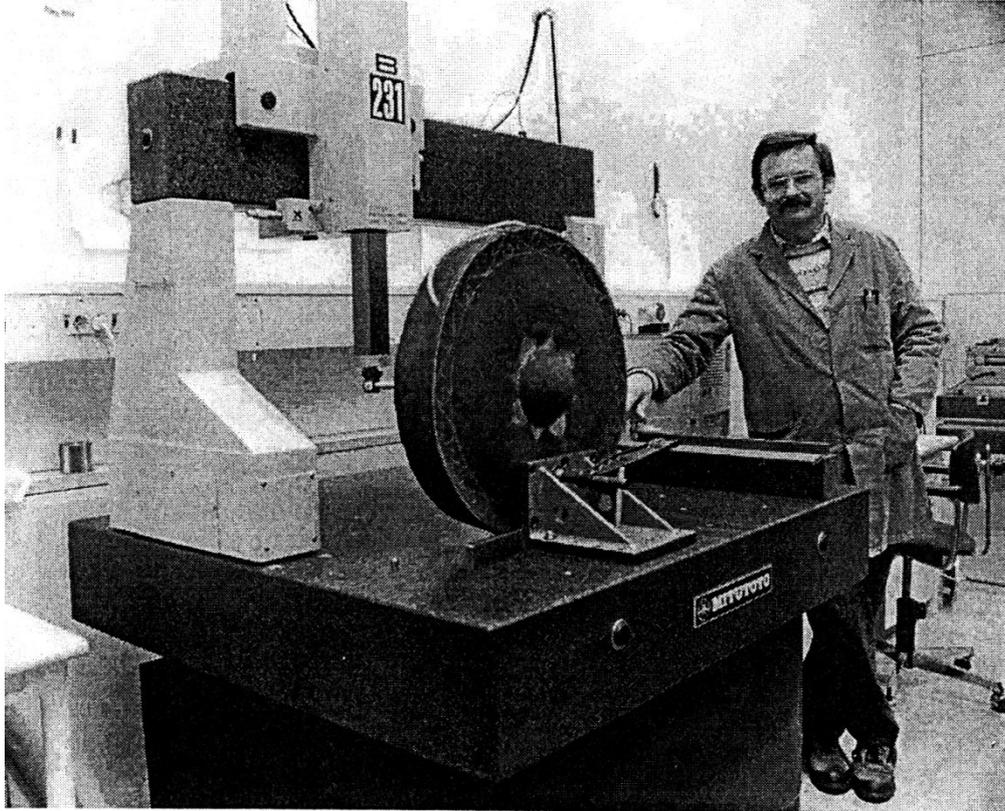
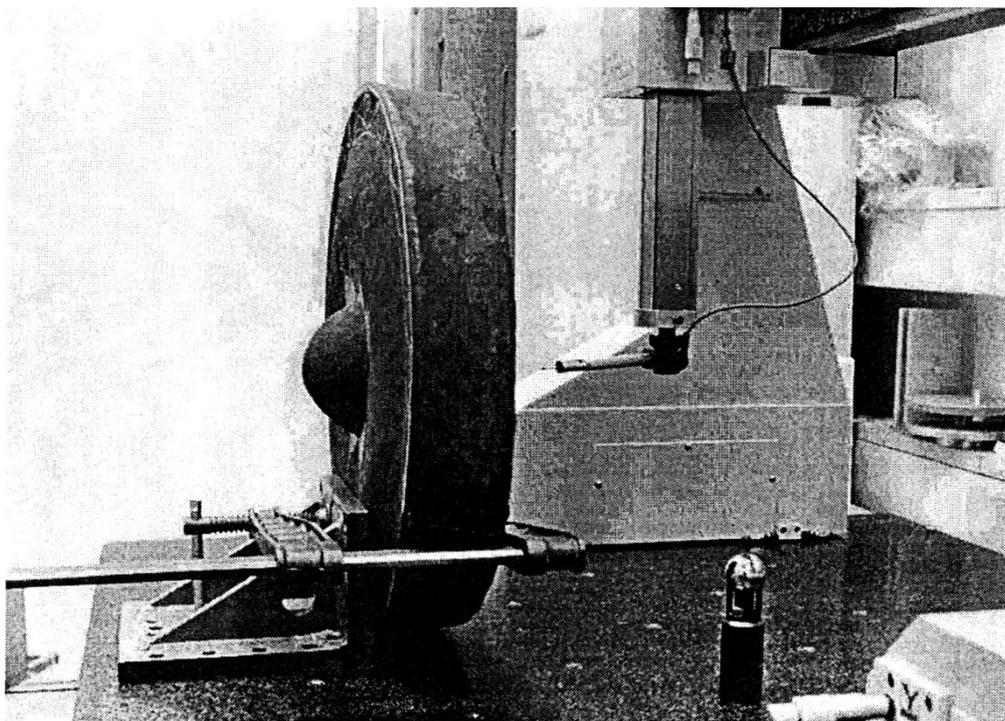


Fig. 7. Burma-Gong Nr. V. Oben: Gong samt Aufhänge-Schnur.  
Unten: Außen- und Innenkontur, aufgenommen mit der Mitutoyo-Messmaschine.

### 2.2.3. Burma-Gong Nr. VI



*Fig. 8. Messung der Kontur von Gong Nr. VI.  
Oben: Gong aufgespannt auf der Mitutoyo-Messmaschine;  
im Hintergrund Herr Schön vom Werkzeugmaschinen-Zentrallabor.  
Unten: Gong mit Messtaster, vorbereitet zur Messung der Innenkontur.*



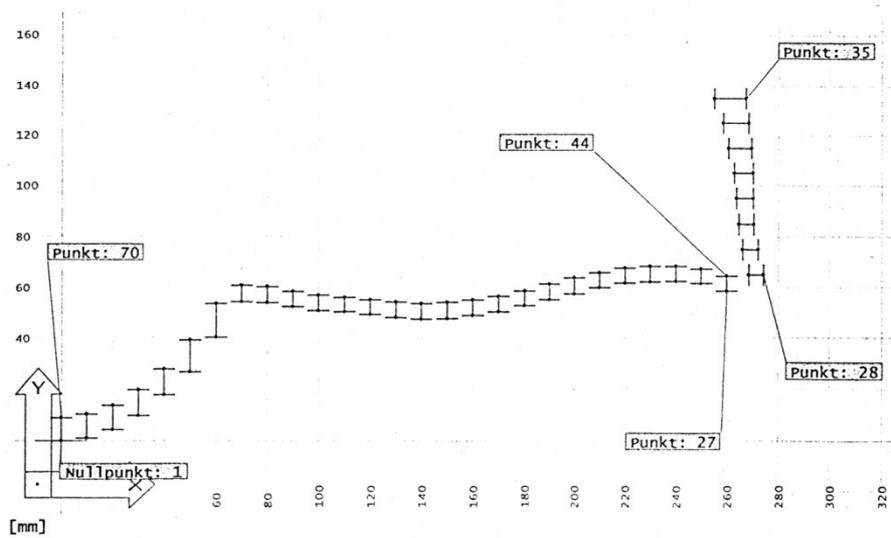
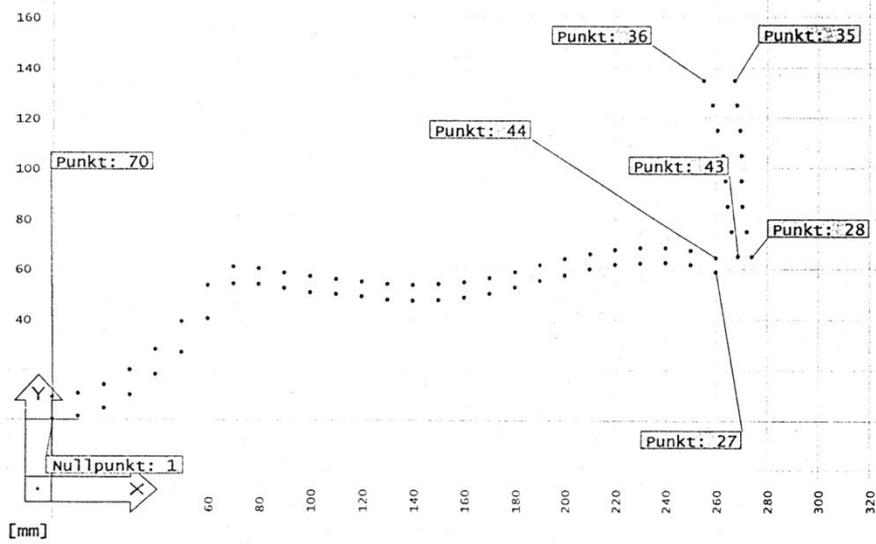
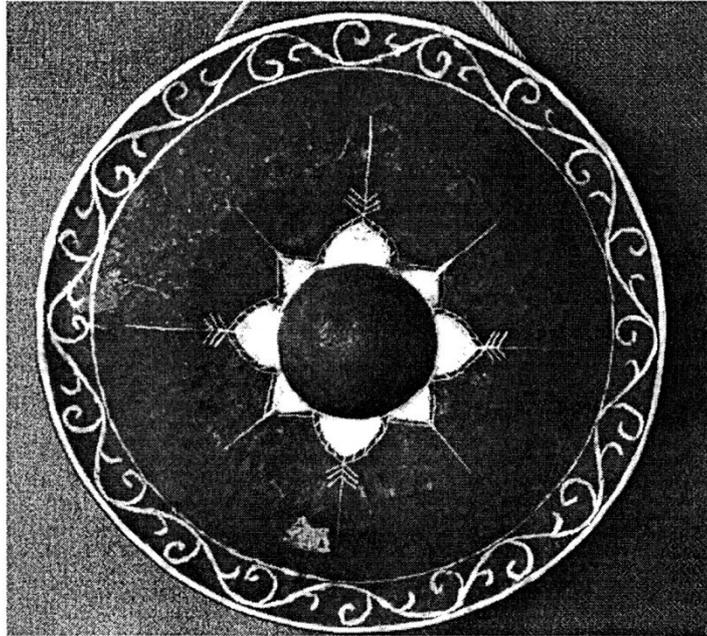


Fig. 9. Burma-Gong Nr. VI. Oben: Gong samt Aufhänge-Schnur.  
 Mitte: Außen- und Innenkontur, aufgenommen mit der Mitutoyo-Messmaschine.  
 Unten: Dicke in x- bzw. y-Richtung.

Infolge der manuellen Bearbeitung ist ein Gong niemals vollständig rotationssymmetrisch. Bereits in Hinsicht auf die Geometrie weist er sichtbare Abweichungen von der Rotationssymmetrie auf, so dass die Messung nur Anhaltswerte liefern kann. Die Fotografie von Fig. 8 oben zeigt den Gong Nr. VI auf dem Messtisch. In Fig. 8 unten ist der Messtaster zu erkennen, mit dem in der dargestellten Konfiguration die Rückseite des Gongs abgetastet wird. Die angegebenen Abmessungen sind - wie alle anderen geometrischen Maße - mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Gemäß Fig. 9 sind die charakteristischen Maße des Gongs Nr. VI:

|                          |          |
|--------------------------|----------|
| Außenradius              | 27,5 cm, |
| Radius des Schlagbuckels | 6,5 cm,  |
| Höhe des Schlagbuckels   | 5,5 cm,  |
| Höhe des Randes          | 8,5 cm.  |

In diesem Lichte sind die Angaben zur Dicke, die im unteren Teil von Fig. 9 gesondert herausgearbeitet ist, zu werten. Gongs sind üblicherweise einige Millimeter dick, wobei die Deckfläche dünner als der Schlagbuckel und der Rand ist. Sehr deutlich sind am Rand lokale Abweichungen von der Rotationssymmetrie der Dicke zu erkennen; in den übrigen Bereichen sind sie in ähnlichem Ausmaß zu vermuten. Wie die geometrischen Abmessungen nicht einheitlich sind, können auch die Materialeigenschaften vom Ort abhängen. Dies macht eine Nachbildung eines Gongs als Finite-Element-Modell (z.B. Twork (1997), Thölke (2000) sowie Kapitel VI) problematisch und unterstreicht die wesentliche Rolle experimenteller Untersuchungen am realen Objekt.

### 2.3. Die Java-Gongs

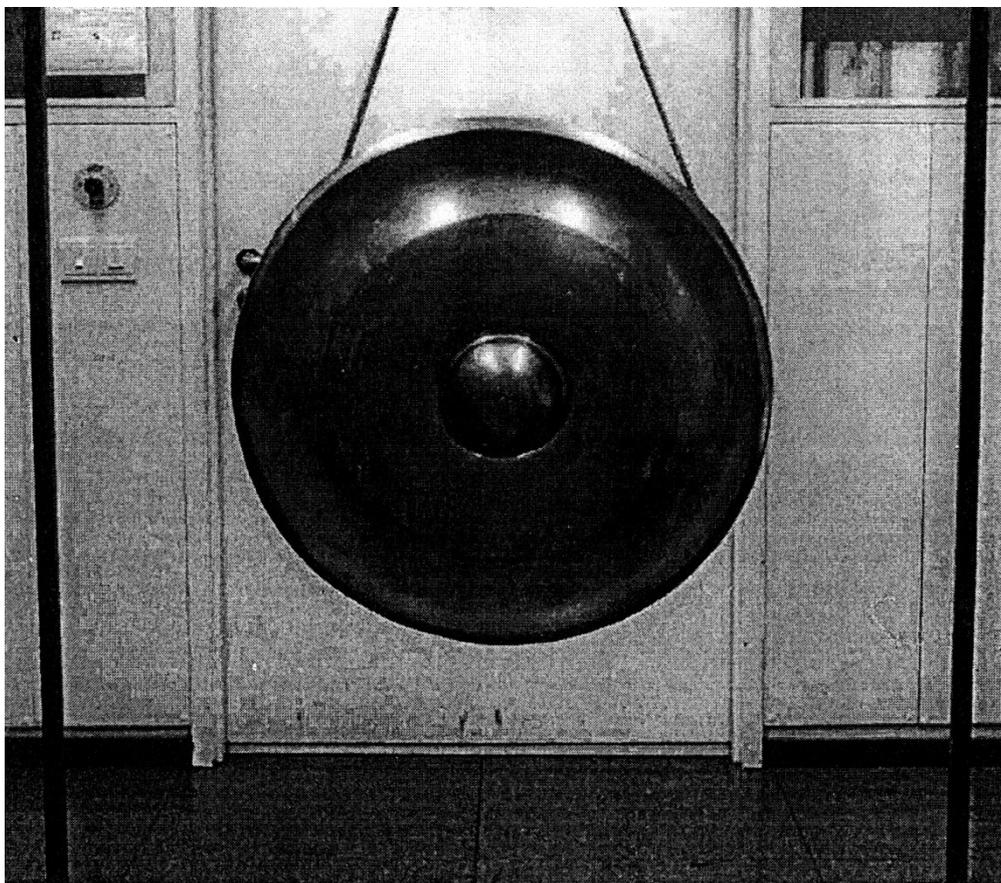


Fig. 10. Java-Gong Nr. VIII in einem Aufhängegestell.

Aus Anlass von Untersuchungen, die in Zusammenarbeit mit Dr. András Varsányi (Musikinstrumentenabteilung des Stadtmuseums München) am Institut für Mechanik durchgeführt wurden, standen für Messungen einige Gongs zur Verfügung, die aus Java stammen. Da sie der Sammlung von Dr. Varsányi nur kurzzeitig entnommen werden konnten, reichte die Zeit nur dazu aus, die Abmessungen grob zu bestimmen.

### 2.3.1. Java-Gong Nr. VIII

Fig. 10 zeigt den Gong Suwukan (Nr. VIII), der ebenso wie der nachfolgend beschriebene Java-Gong im Privatbesitz von Dr. Varsányi ist. Dieses Instrument stammt aus Mitteljava, misst etwa 60 cm im Außendurchmesser und hat eine metallisch glänzende Oberfläche. Der Schlagbuckel (*pencu*; vgl. Varsányi (2000a)) tritt deutlich hervor. Die Randrinne (*rejob*) ist erkennbar breiter als bei den Burma-Gongs. Der Gong Nr. VIII verfügt über einen auffallend tiefen Rand (*bau*), der aus Fig. 4 zu ersehen ist.

### 2.3.2. Java-Gong Nr. IX

Das mit mehr als einem Meter Außendurchmesser größte Exemplar ist der Gong Ageng (Nr. IX), der ebenfalls aus Mitteljava stammt. Die Fotografie in Fig. 11 lässt erkennen, dass die Oberfläche mit Ausnahme des Schlagbuckels, der metallisch glänzt, matt ist. Das Aufhängegestell ist dasselbe wie in Fig. 10. Der Vergleich zeigt, um welch mächtiges Instrument es sich bei diesem Gong handelt.

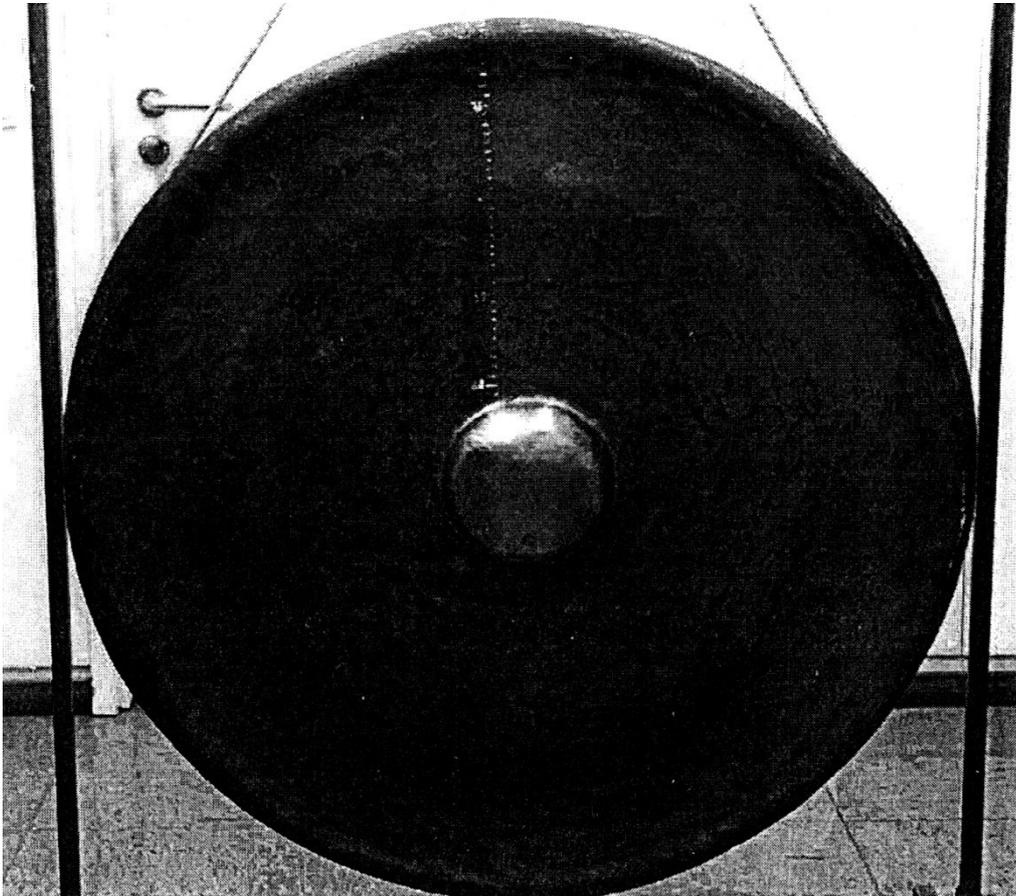


Fig. 11. Java-Gong Nr. IX in einem Aufhängegestell.

## **2.4. Zusammenfassende Bemerkung**

Für die Untersuchungen, über die hier berichtet wird, standen über mehr oder weniger lange Zeit hinweg insgesamt neun Gongs zur Verfügung. Ihrer Herkunft nach sind sie in zwei Klassen zu unterteilen. Sieben Exemplare stammen aus Burma, zwei aus Java. Die Durchmesser reichen von 33 cm bis 61 cm bei den Burma-Gongs und von 59 cm bis 102 cm bei den Java-Gongs. Diese Instrumente sollen im Hinblick auf die mechanischen Schwingungen, die für das Schallsignal von Bedeutung sein können, untersucht werden. Im Vordergrund steht im vorliegenden Bericht zunächst das Verhalten im linearen Bereich, d.h. bei kleinen Anregungskräften und Auslenkungen.

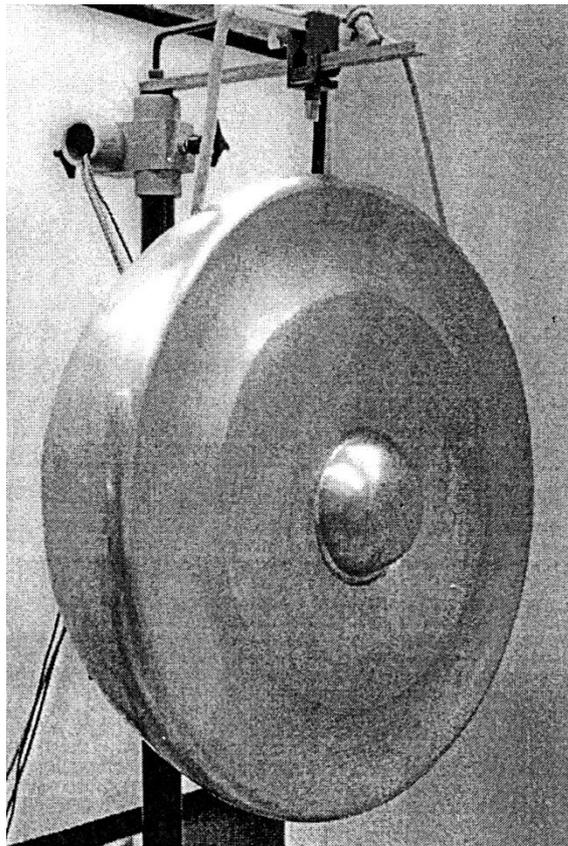
### 3. SCHWINGUNGSMUSTER VON GONGS

In der folgenden Übersichtsstudie werden die Schwingungsmuster der neun Gongs mit Hilfe der Laser-Vibrometrie bestimmt. Als Resultat ergeben sich *Operating Deflection Shapes* (ODSs; vgl. Richardson (1997)), die im Weiteren als *Schwingungsmuster* bezeichnet werden.

#### 3.1. Messung

##### 3.1.1. Messaufbau und -vorgang

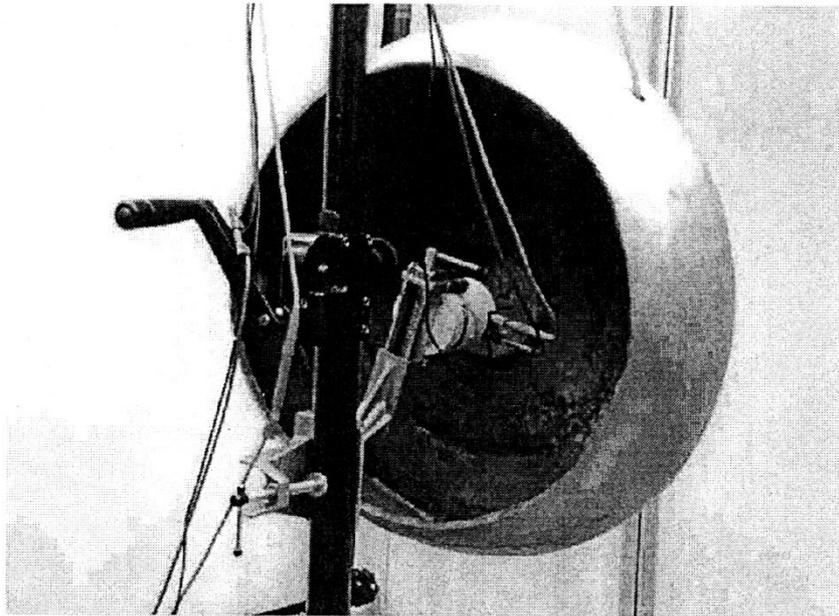
Die Schwingungen wurden mittels eines Polytec Scanning Vibrometers bestimmt. Fig. 12 zeigt am Beispiel des Gongs Nr. VIII, wie das zu untersuchende Instrument mit seiner Halteschnur vertikal in ein Stativ gehängt wurde. Es war damit in derselben Weise wie beim Spielen gelagert. Die Anregung erfolgte über einen elektrodynamischen Schwingerreger (entweder LDS V201 mit Verstärker LDS PA 100E oder B&K 4810 mit Verstärker B&K 2706). Die anregende Kraft wurde mit einem Kraftaufnehmer B&K 8200 samt nachgeschaltetem Ladungsverstärker B&K 2626 gemessen.



*Fig. 12. Gong Nr. VIII, aufgehängt zur Schwingungsmessung mit dem Scanning Vibrometer.*

Wie Fig. 13 erkennen lässt, wurde der Schwingerreger mit aufgeschraubtem Kraftaufnehmer auf der Innenseite des Schlagbuckels positioniert. Um nicht nur symmetrische, sondern auch antisymmetrische Schwingungen anzuregen, war er etwas außerhalb der Mitte in Kontakt mit dem Gong. Bei den kleinen Gongs wurde das vordere Ende des Kraftaufnehmers direkt gegen die Wandung gepresst. Bei den großen Gongs ist der Schlagbuckel so tief, dass auf den Kraftauf-

nehmer ein Aluminium-Stift geschraubt werden musste, dessen Spitze gegen die Wandung gedrückt wurde. Eine prinzipielle Quelle für Verfälschungen besteht darin, dass derjenige Teil des Kraftaufnehmers, der sich zwischen dem kraftmessenden Piezoelement und dem Messobjekt befindet, durch seine Masse das Schwingungsverhalten des Objekts verändert. Nach Herstellerangaben ist diese Masse etwas größer als 3 g; die Masse des von Fall zu Fall verwendeten Stifts beträgt ebenfalls etwa 3 g. Demnach wird die Masse der kleineren Gongs durch eine Zusatzmasse von etwa 3g, die der größeren im "worst case" durch 6 g vergrößert, die nahe der Mitte angebracht ist. Die Störung, die daraus resultiert, wurde im Frequenzbereich bis 500 Hz bzw. 1 kHz (lediglich in einem Fall auch bis 2 kHz) als so gering erachtet, dass sie toleriert werden kann. Gleichwohl kann daraus resultieren, dass die Frequenzen der gemessenen Schwingungsmuster nicht ganz exakt mit denen der Teiltöne übereinstimmen.



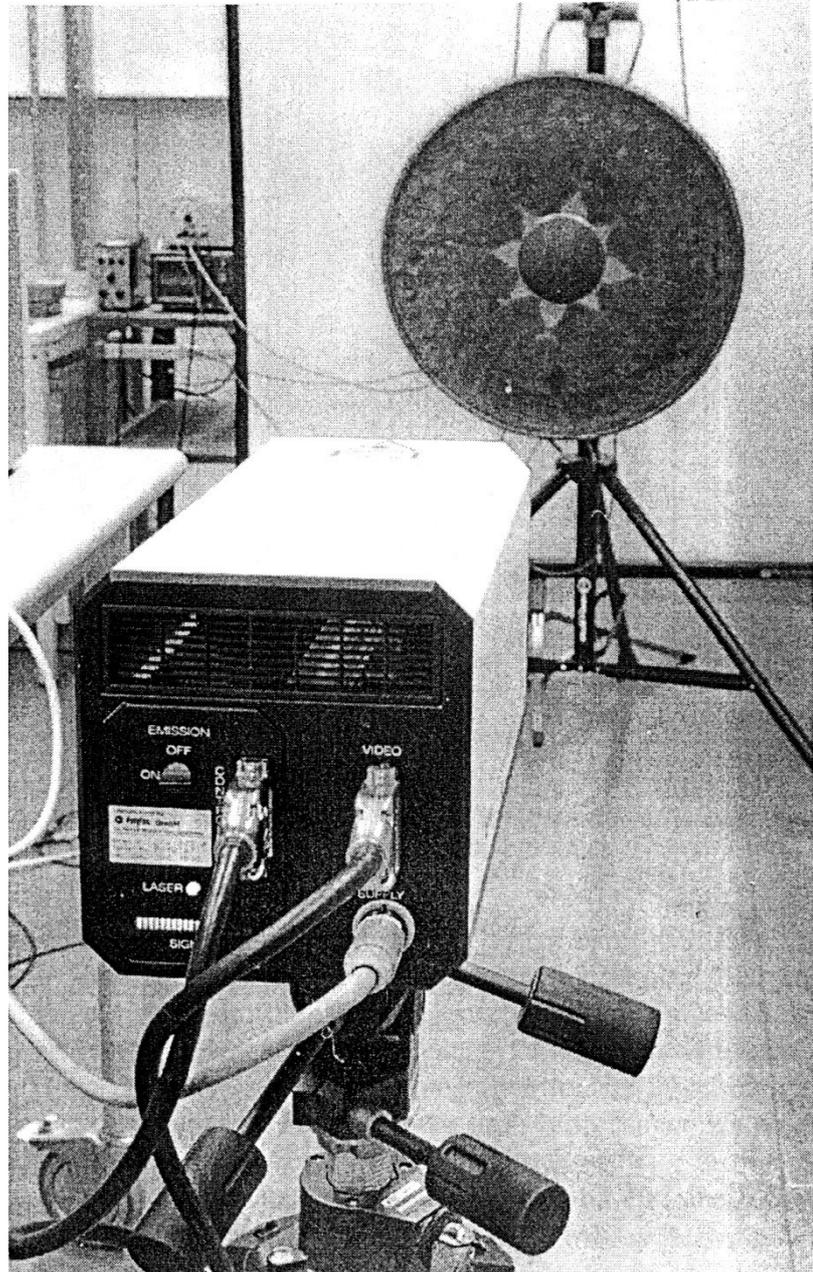
*Fig. 13. Rückseite des Gongs Nr. VIII. Man erkennt den Schwingungserreger, der den Gong an der Innenseite des Schlagbuckels anregt.*

Als Anregungssignal wurde Pseudo-Rauschen gewählt, das in einem Funktionsgenerator hp 33120A erzeugt wird. Es ist der anschließenden Analyse dadurch angepasst, dass es Spektralkomponenten ausschließlich bei denjenigen Frequenzen enthält, die für die Analyse relevant sind. Die Phasen der einzelnen Komponenten sind auf einen minimalen Spitzenfaktor des Zeitsignals hin optimiert. Da dieses sich nach einer Zeitdauer wiederholt, die dem Kehrwert des Frequenzabstandes der Spektralkomponenten entspricht, ist bei der Aufnahme der Messwerte eine Mittelung der Zeitfunktionen möglich, was das Signal-Stör-Verhältnis sehr wirkungsvoll zu verbessern erlaubt.

Die Messung mit dem Scanning Vibrometer wird von einem Computer aus gesteuert. Anhand eines Videobildes legt der Experimentator ein Netz von Messpunkten über das zu untersuchende Objekt. Der Strahl eines Lasers wird mittels zweier Galvo-Spiegel so abgelenkt, dass er an den vorgewählten Punkten auf die Oberfläche des schwingenden Messobjektes trifft. Ein Teil des Laserlichts, dessen Frequenz infolge des Doppler-Effekts verschoben ist, wird zum Messkopf zurückgeworfen. Aus dieser Dopplerverschiebung wird die Geschwindigkeit der Oberfläche extrahiert, ohne dass das Messobjekt dabei berührt wird.

Das beschriebene Vorgehen liefert Aufschluss über die Schwinggeschwindigkeit in Richtung des Laserstrahls. Diese repräsentiert - sofern das Messobjekt nicht zu stark gekrümmt und

vom Laser weit genug entfernt ist - hinreichend die wandnormale Komponente der Bewegung der Oberfläche. Auf diese Weise wurden berührungsfrei die Biegeschwingungen der Gongs erfasst. In allen Fällen wurde das Laserlicht von den Oberflächen der Gongs ausreichend reflektiert, so dass keine zusätzlichen Vorkehrungen zur Verbesserung der Rückstreuung getroffen werden mussten.



*Fig. 14. Gong Nr. V, aufgehängt zur Schwingungsmessung. Im Vordergrund erkennt man den Messkopf des Scanning Vibrometers, der den Laser und die Videokamera enthält.*

### 3.1.2. Auswertung

Die Signale des Kraftaufnehmers (Eingang) und des Vibrometers (Ausgang) wurden in den Auswertecomputer geführt. Nach einer gewissen Anzahl von Mittelungen (typischerweise vier) wurden sie dort einer Schnellen Fourier-Transformation (FFT) unterzogen und daraus die komplexe Übertragungsfunktion gebildet. Als Ergebnis dieser Prozedur liegt für jeden Messpunkt eine Übertragungsfunktion vor, die als kinematisches Ausgangssignal die

Schwinggeschwindigkeit mit dem dynamischen Eingangssignal, der Kraft am Anregungspunkt, verknüpft.

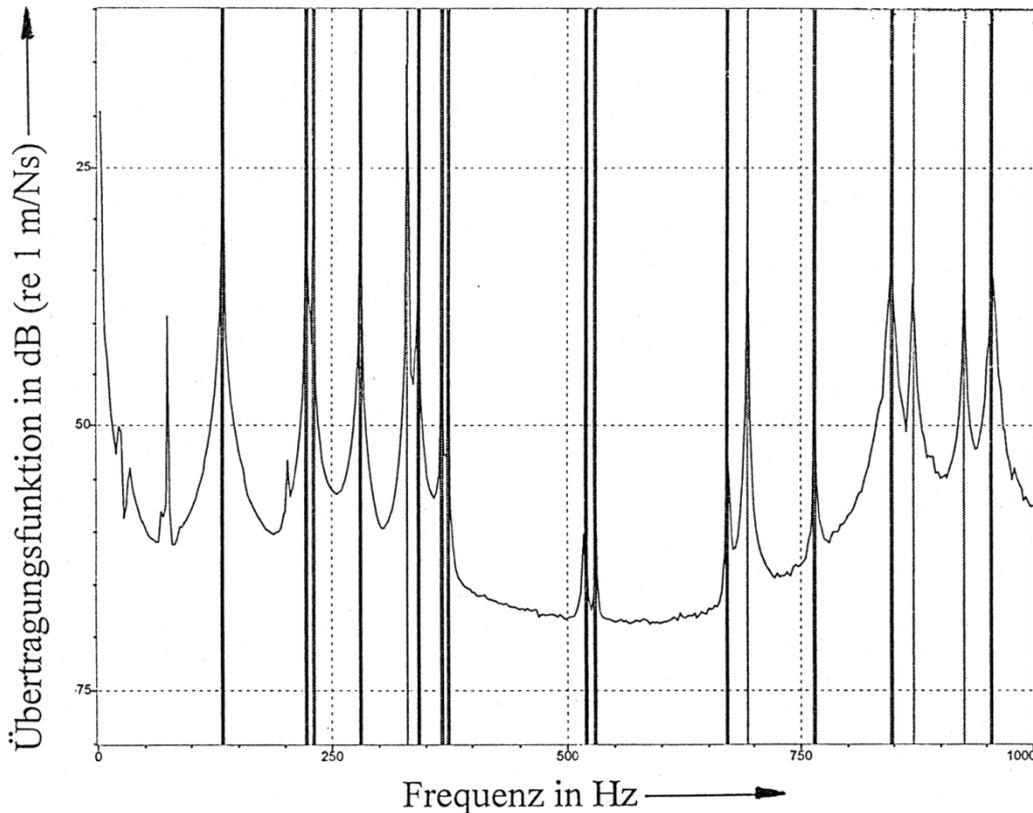


Fig. 15. Gesamt-Übertragungsfunktion des mittleren Burma-Gongs Nr. IV im Pegelmaß  $re\ 1\ m/(Ns)$  als Funktion der Frequenz mit den Bändern, die für die Darstellung der Schwingungsmuster ausgewählt worden sind.

Um die charakteristischen Frequenzen des Gongs aufzuspüren, wurden sämtliche Übertragungsfunktionen zu einer Gesamt-Übertragungsfunktion gemittelt. Fig. 15 gibt ein Beispiel. Dieses zeigt auf der Ordinate im Pegelmaß die mittlere Schwinggeschwindigkeit eines Gongs in Meter pro Sekunde, bezogen auf eine anregende Kraft von einem Newton. In den folgenden Abschnitten wird für jeden Gong diese Gesamt-Übertragungsfunktion im Pegelmaß für einen Bereich von 70 dB dargestellt. Als Referenz ist stets  $1\ m/s\ pro\ N$ , im Folgenden abgekürzt mit " $re\ 1\ m/(Ns)$ ", gewählt, was dem Pegel 0 dB entspricht. Im Beispiel von Fig. 15 reicht die Abszisse von 0 Hz bis 1 kHz, die Ordinate von -80 dB bis -10 dB. Bei den kleineren Gongs nehmen die Maxima Pegelwerte zwischen -10 dB bis -30 dB an; -20 dB kommt dabei einer mittleren Schwinggeschwindigkeit von 100 mm/s pro 1 Newton Anregungskraft gleich. Erwartungsgemäß ist bei den großen Java-Gongs die Schwinggeschwindigkeit bei derselben Anregungskraft kleiner, so dass die Maxima dort nur etwa -40 dB erreichen.

Diejenigen Frequenzen, bei denen die Schwingungsmuster dargestellt werden sollten, wählte der Experimentator anhand der Maxima der Gesamt-Übertragungsfunktionen aus. Naturgemäß ist damit eine gewisse Willkür verbunden. Das erste Maximum kennzeichnet üblicherweise eine Starrkörperbewegung des Gongs, die für seine akustische Funktion keine Rolle spielt und deshalb nicht betrachtet wird. In Fig. 15 sind die gewählten Frequenzen durch Bänder markiert. In den folgenden Abschnitten werden die Gesamt-Übertragungsfunktionen dagegen ohne diese Bänder dargestellt; die jeweils ausgewählten Frequenzen sind in einer gesonderten Tabelle zusammengestellt.

### 3.2. Kleiner Burma-Gong Nr. I

Der Gong Nr. I wurde bereits mehrfach untersucht; siehe z.B. Twork (1997), Bogolowski (1999), Winter und Wörner (2000). Die hier dargestellten Ergebnisse basieren auf einer erneuten Auswertung von Messungen, die Bogolowski (1999) beschrieben hat. Fig. 16 zeigt das Videobild ohne bzw. mit den 1410 Messpunkten. Die Bandbreite war 1 kHz, der Abstand zwischen den einzelnen Messfrequenzen 2,5 Hz.

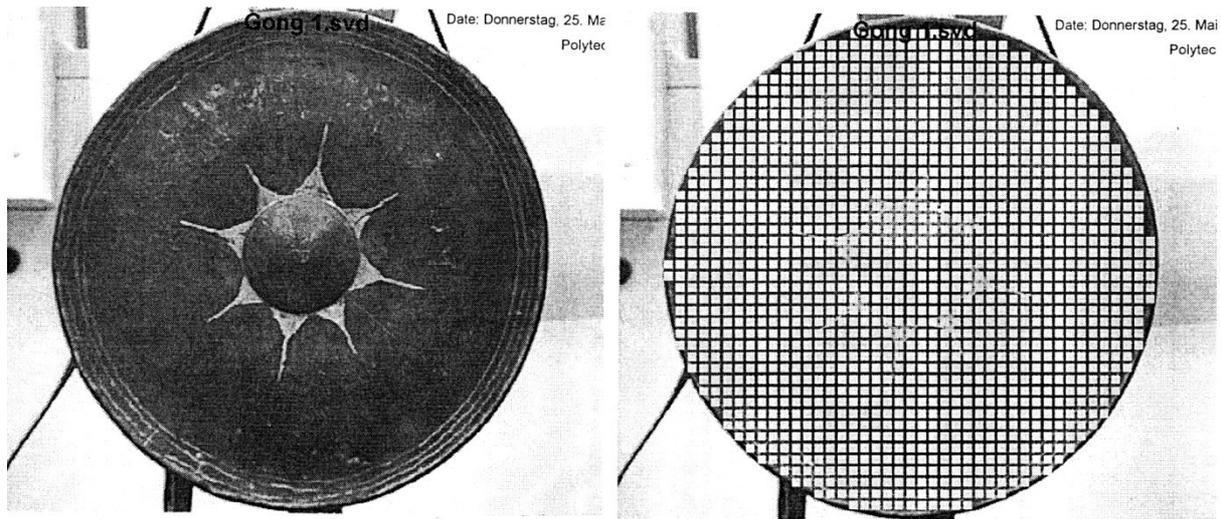


Fig. 16. Kleiner Burma-Gong Nr. I. Links: aufgehängt zur Messung; rechts: mit Messgitter.

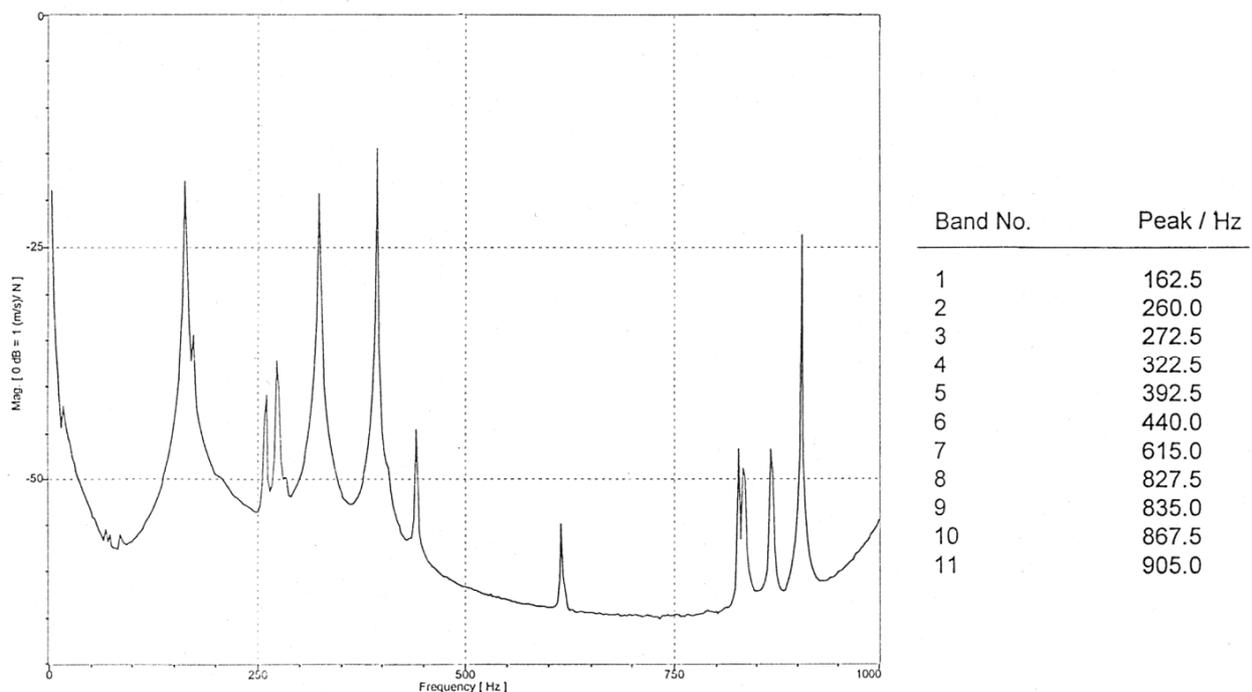
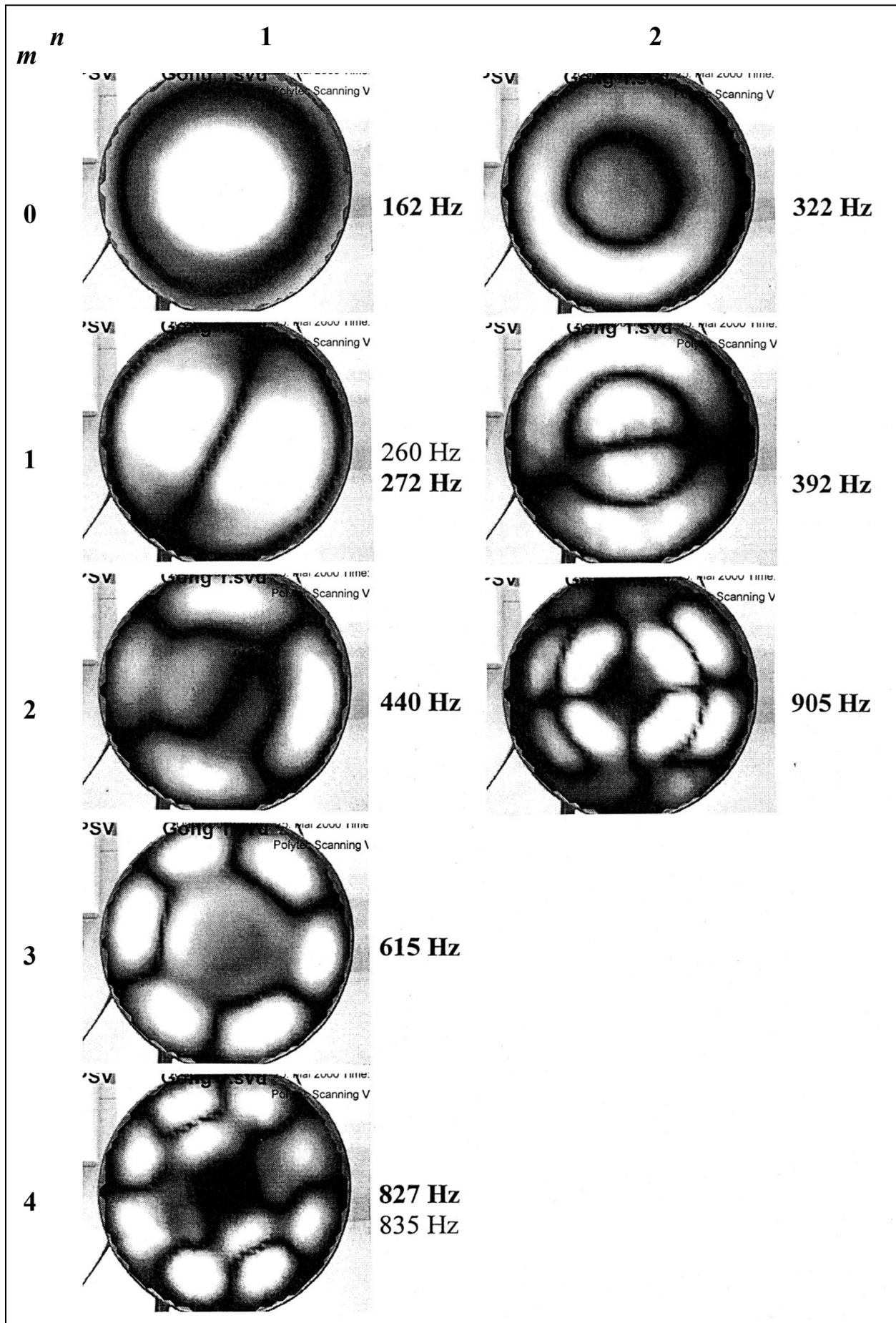


Fig. 17. Kleiner Burma-Gong Nr. I. Links: Gesamt-Übertragungsfunktion im Pegelmaß  $re\ 1m/(Ns)$ ; rechts: Frequenzbänder, die für die Darstellung der Schwingungsmuster ausgewählt worden sind.

Tab. II. Schwingungsmuster des kleinen Burma-Gongs Nr. I



Im linken Teil von Fig. 17 ist die Gesamt-Übertragungsfunktion abgebildet, anhand derer die Frequenzen für die Visualisierung festgelegt wurden. Die Ordinate reicht von -70 dB bis 0 dB re 1 m/(Ns). Der Tabelle zufolge, die im rechten Teil wiedergegeben ist, wurden elf Maxima dieser Übertragungsfunktion ausgesucht und die zugehörigen Schwingungsmuster dargestellt.

Ergebnisse finden sich in Tab. II. In den Schwingungsbildern ist der Betrag der Schwinggeschwindigkeit so in Graustufen kodiert, dass weiß einer Bewegung mit großer Amplitude entspricht, während schwarz bedeutet, dass sich der Gong nicht bewegt. Die Vorstellung, dass ein weißer Gong mit schwarzem Pulver bestreut wird und Chladni'sche Klangfiguren (Chladni (1787)) erzeugt werden, ist hilfreich: Das Pulver wandert zu den Stellen, die sich in Ruhe befinden. Weiß kennzeichnet demnach Schwingungsbäuche, während schwarz Schwingungsknoten charakterisiert. Auf eine Darstellung der Absolutwerte wurde verzichtet.

Zehn der Schwingungsmuster, die sich für Maxima in der Gesamt-Übertragungsfunktion ergeben, lassen sich nach Maßgabe der Knotenlinien in ein Schema nach Art eines Periodensystems einordnen; vgl. Fleischer (1997, 1998, 2000). In Tab. II ist waagerecht die Anzahl  $n$  der Knotenkreise angegeben. Es tritt mindestens  $n = 1$  Knotenkreis (linke Spalte von Tab II) nahe dem Rand des Gongs auf. In der rechten Spalte sind für  $n = 2$  solche Schwingungsmuster zusammengestellt, die einen weiteren Knotenkreis aufweisen. Senkrecht ist in Tab. II als weiteres Ordnungskriterium die Anzahl  $m$  der Knotendurchmesser angegeben, die beim betrachteten Gong im Frequenzbereich bis 1 kHz maximal den Wert 4 erreicht. Die oberste Zeile zeigt rotationssymmetrische Schwingungsmuster ohne Knotendurchmesser ( $m = 0$ ), die nächste Zeile bezieht sich auf  $m = 1$  Knotendurchmesser. Die zugehörigen Schwingungsmuster ähneln denjenigen ebener Kontinuumsschwinger wie Kreismembranen oder Kreisplatten (Leissa (1969)).

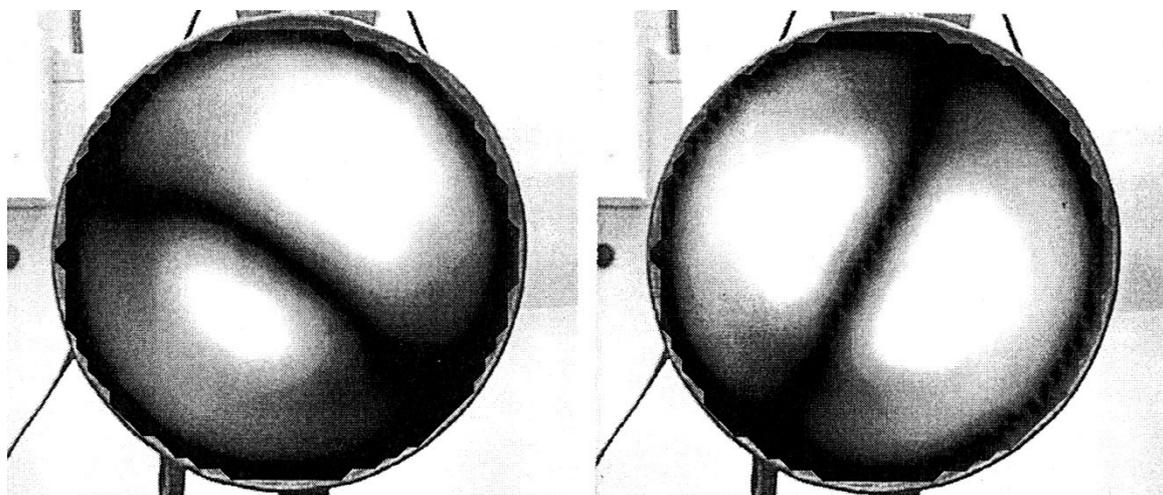


Fig. 18. Varianten des Schwingungsmusters mit  $m = 1$  Knotendurchmesser und  $n = 1$  Knotenkreis des kleinen Burma-Gongs Nr. I. Links: Frequenz 260 Hz; rechts: Frequenz 272,5 Hz.

Unterschiede zu ebenen Strukturen zeigen sich jedoch für zwei oder mehr Knotendurchmesser ( $m \geq 2$ ). Diese treten insbesondere in der linken Spalte von Tab. II zutage, d.h. wenn außer dem Knotenkreis nahe dem Rand kein weiterer Knotenkreis zu erwarten wäre. In der Mitte bildet sich dann häufig kein Knotenpunkt mehr aus, in dem sich alle "Knotendurchmesser" treffen. Vielmehr erweitert sich dieser Punkt zu einem Feld, in das die radialen Knotenlinien münden. Innerhalb dieses zentralen Feldes ist der Gong nicht immer in Ruhe, sondern schwingt in vielen Fällen mit einer Unterteilung, die von der "regulären" Unterteilung im äußeren Bereich abweichen kann. So finden sich z.B. in der unteren Zeile von Tab. II im äuße-

ren Teil  $2m = 8$  Schwingungsbäuche, im inneren Bereich dagegen nur vier Bäuche. "Irregularitäten" dieser Art finden sich bei praktisch jedem Gong. Als Kriterium für die Einordnung in das Periodensystem wurde bei  $n = 1$  stets die halbe Anzahl der  $2m$  Knotenradien im äußeren Bereich herangezogen. Dagegen wurde bei  $n \geq 2$  dafür stets der innere Bereich ausgewertet.

Das beschriebene Vorgehen ermöglicht es, den Großteil der gemessenen Schwingungsmuster zu klassifizieren. Nur bei einigen wenigen Schwingungsmustern gelingt die Einordnung in dieses Schema nicht. Beim Gong Nr. I trifft dies beispielsweise auf ein Muster zu, das sich für die Frequenz 867,5 Hz ergibt.

In Tab. II ist, wie auch in den weiteren Zusammenstellungen, die Frequenz auf volle Hertz gerundet. Bei einigen Schwingungsbildern ist nicht nur eine, sondern mehrere Frequenzen angegeben, wobei sich der fett gedruckte Wert auf die abgebildete Schwingung bezieht. Der Grund für die nicht eindeutige Zuordnung liegt darin, dass ein Schwingungsmuster in mehreren Varianten auftreten kann. In aller Regel äußert sich hierin das so genannte Moden-Splitting; vgl. Fleischer (1994), Fleischer und Rotter (1994). Dieses beinhaltet, dass jede nicht rotationssymmetrische Schwingungsform prinzipiell in zwei Partialformen auftritt, die von gleicher Gestalt, aber gegeneinander verdreht sind. Solange der Schwinger vollständig axial-symmetrisch ist, fallen die zugehörigen Partialfrequenzen zusammen. Ist die Symmetrie jedoch gestört, was bei einem Gong den Normalfall darstellt, so spalten sich die zugehörigen Frequenzen auf. Fig. 18 veranschaulicht diesen Sachverhalt am Beispiel des Schwingungsmusters mit  $m = 1$  Knotendurchmesser und  $n = 1$  Knotenkreis. Das linke Bild gibt die Partial-schwingung bei 260 Hz, das rechte diejenige bei 272,5 Hz wieder. Man erkennt zwei Schwingungsmuster vom selben Typ, die im Winkel so gegeneinander versetzt sind, dass sich bei einem dort ein Schwingungsbauch ausbildet, wo beim anderen ein Schwingungsknoten auftritt. Die relative Frequenzdifferenz, bezogen auf die kleinere der beiden Partialfrequenzen, beträgt 4,8%. Es ist damit zu rechnen, dass ein Anschlag beide Partialschwingungen anregt. In der Folge bilden sich "Spinning Modes" aus, was zu Schwebungen des betreffenden Teiltones mit einer Frequenz führt, die gleich der Differenz  $\Delta f = 272,5 \text{ Hz} - 260 \text{ Hz} = 12,5 \text{ Hz}$  ist.

### 3.3. Kleiner Burma-Gong Nr. II

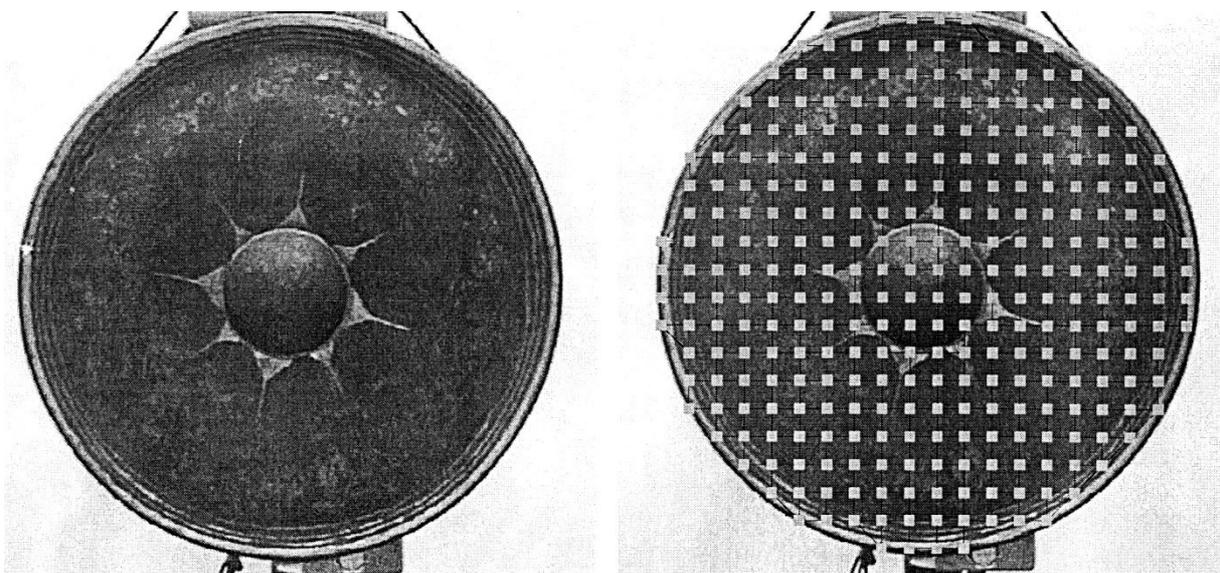


Fig.19. Kleiner Burma-Gong Nr. II. Links: aufgehängt zur Messung; rechts: mit Messgitter.

Die Messwerte von Twork (1997) für den Gong Nr. **II** beziehen sich auf 300 Messpunkte. Die Bandbreite war 1 kHz. Da 800 Frequenzlinien verwendet wurden, beträgt der Abstand zwischen den Messfrequenzen 1,25 Hz. Demnach ist die Auflösung in Hinsicht auf den Ort größer, in Hinsicht auf die Frequenz feiner als bei dem etwa gleich großen Gong Nr. **I**. Die Original-Messdaten wurden einer erneuten sorgfältigen Auswertung unterzogen. Fig. 20 zeigt im linken Teil die Gesamt-Übertragungsfunktion zwischen -70 dB und 0 dB re 1m/(Ns) und in der Tabelle rechts daneben die 14 Frequenzen, bei denen sich deutliche Maxima ausprägen.

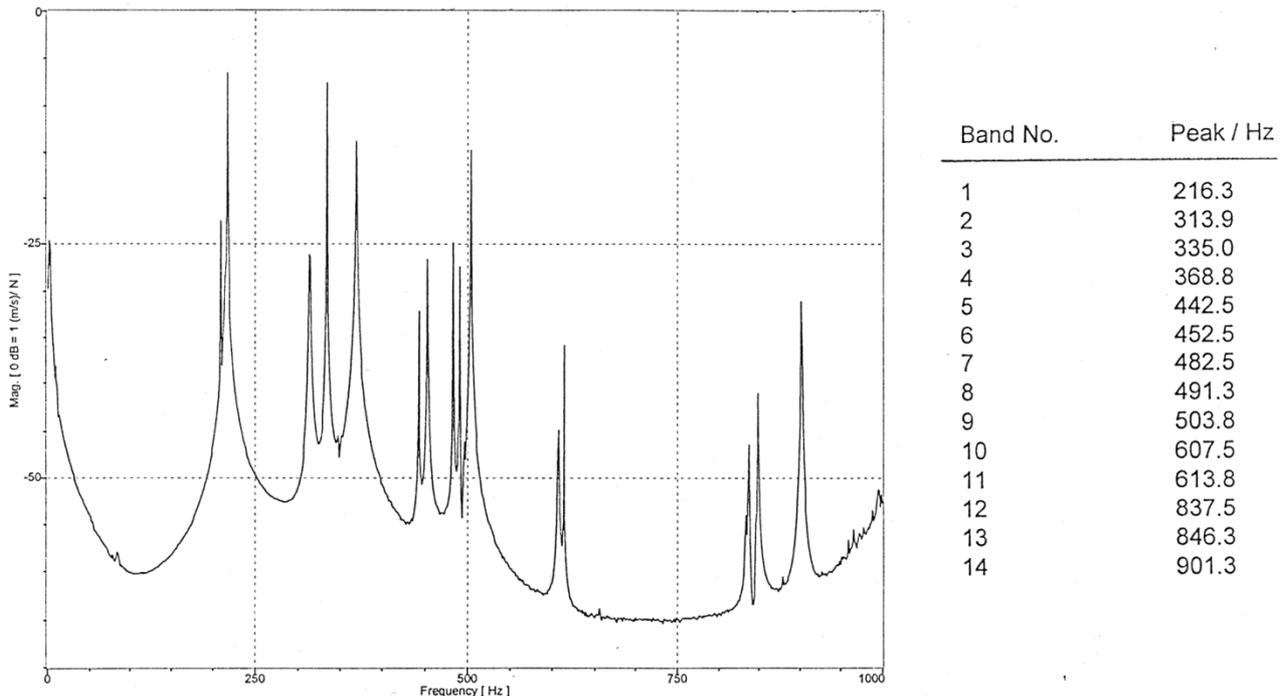
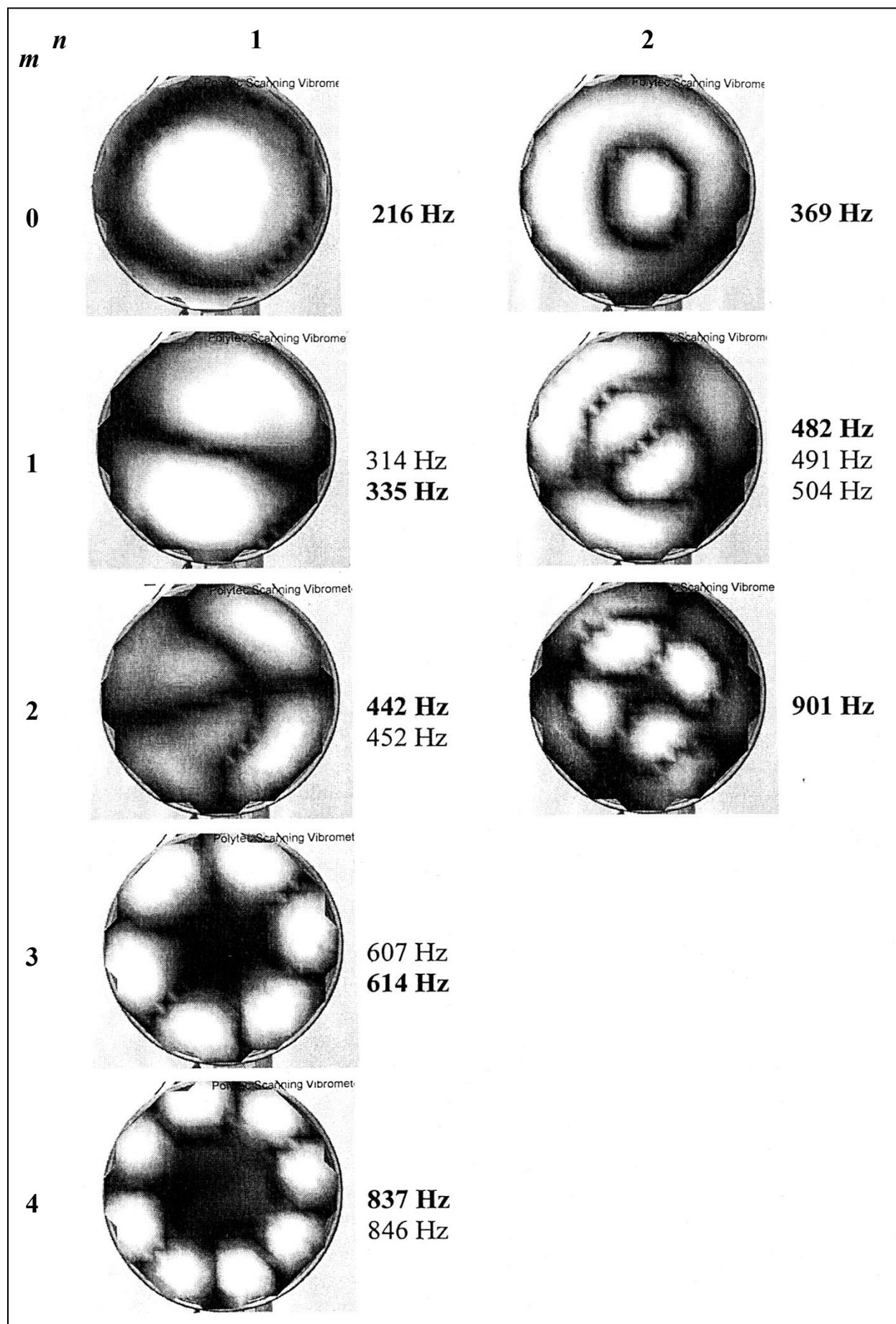


Fig. 20. Kleiner Burma-Gong Nr. **II**. Links: Gesamt-Übertragungsfunktion im Pegelmaß re 1m/(Ns); rechts: Frequenzbänder, die für die Darstellung der Schwingungsmuster ausgewählt worden sind.

Die zugehörigen Schwingungsmuster sind in Tab. III zusammen gestellt. Wiederum sind die Frequenzen auf volle Hertz gerundet. Fett gedruckte Frequenzwerte in den Auflistungen beziehen sich stets direkt auf die Abbildungen. Normaldruck charakterisiert dagegen Frequenzen, bei denen Varianten des abgebildeten Schwingungsmusters auftreten. In aller Regel ist darunter eine zweite Partialschwingung vom selben Typ mit einer anderen Winkellage zu verstehen. Eine Irregularität tritt beim Gong Nr. **II** insofern auf, als sich dem Muster mit  $m = 1$  Knotendurchmesser und  $n = 2$  Knotenkreisen drei Spitzen in der Gesamt-Übertragungsfunktion (Fig. 20) und damit drei Frequenzen zuordnen lassen. Der Grund dürfte darin liegen, dass ein anderes Schwingungsmuster mit  $m = 2$  Knotendurchmessern und  $n = 1$  Knotenkreis in einem Frequenzabstand von nur etwa 40 Hz auftritt. Ein "Übersprechen" des eng benachbarten Schwingungsmusters erscheint daher nicht ausgeschlossen. Eine nachfolgende Modalanalyse (vgl. Kapitel 4) könnte Klarheit schaffen. Anzahl und Art der identifizierten Schwingungen stimmen beim Gong Nr. **II** (Tab. III) weitgehend mit denjenigen des Gongs Nr. **I** (Tab. II) überein. Hinsichtlich der Frequenzen sind jedoch naturgemäß Unterschiede zu beobachten.

Tab. III. Schwingungsmuster des kleinen Burma-Gongs Nr. II



### 3.4. Mittlerer Burma-Gong Nr. III

Der Gong Nr. III, der in Fig. 21 abgebildet ist, ist etwas größer als die beiden bisher betrachteten Instrumente. Die Schwingung der Oberfläche wurde an 1639 Punkten abgetastet. Die Frequenzbandbreite war 2 kHz mit 400 Messfrequenzen im Abstand von 5 Hz. Die Messdaten stammen ursprünglich von Bogolowski (1999) und wurden noch einmal sorgfältig ausgewertet.

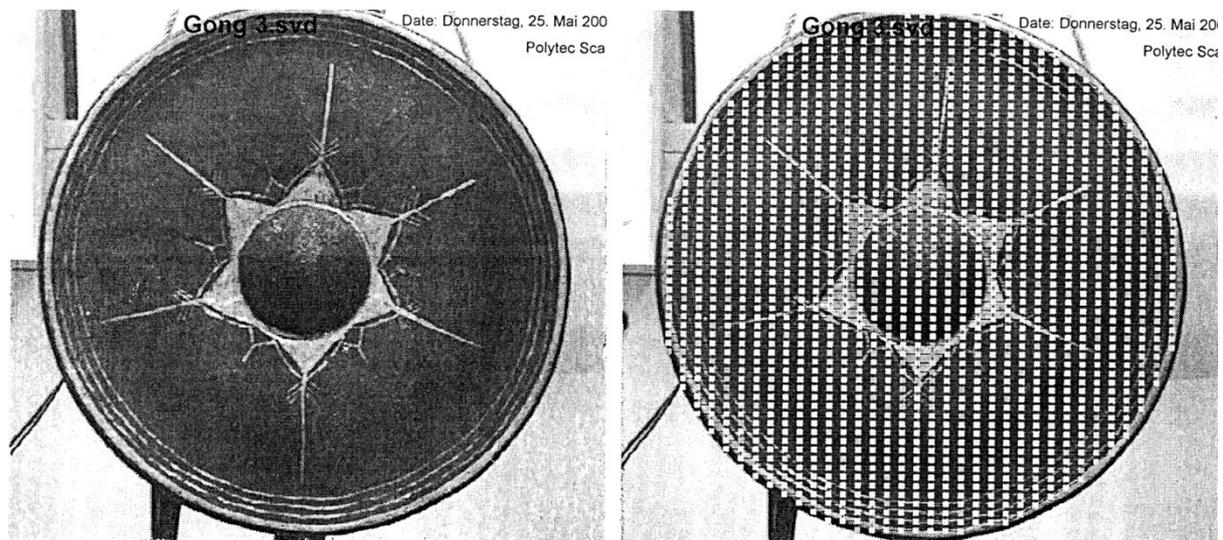


Fig. 21. Mittlerer Burma-Gong Nr. III. Links: aufgehängt zur Messung; rechts: mit Messgitter.

Die Gesamt-Übertragungsfunktion ist in Fig. 22 im Bereich zwischen - 80 dB und - 10 dB (entsprechend 0,0001 m/(Ns) bis 0,316 m/(Ns)) dargestellt. Sie weist eine große Anzahl von Maxima auf. In der Tabelle im rechten Teil sind insgesamt 39 Frequenzen vermerkt, bei denen Schwingungsmuster visualisiert wurden. Diese sind in Tab. IV zusammengestellt. Wiederum kennzeichnet Fettdruck die Frequenzen, für die sich die abgebildeten Schwingungsmuster ergeben; normal gedruckte Frequenzen beziehen sich auf Varianten, die nicht dargestellt sind.

Tab. IV besteht aus drei Teilen. Der erste Teil (Tab. IVa) umfasst rotationssymmetrische Schwingungsmuster ( $m = 0$ ) und antimetrische Muster mit bis zu vier Knotendurchmessern ( $m \leq 4$ ). Die Anzahl  $n$  der Knotenkreise reicht bis drei. Ein Fragezeichen besagt, dass die Einordnung zweifelhaft ist. Im Wesentlichen stimmen die Abbildungen und Frequenzen mit den Ergebnissen von Twork (1997) sowie Winter und Wörner (2000) überein, die sich auf Frequenzen unterhalb von 1 kHz beschränkt haben.

Der zweite Teil (Tab. IVb) umfasst Muster mit  $m = 5$  bis  $m = 9$  Knotendurchmessern. In der ersten Spalte ( $n = 1$ ) wurde als Ordnungskriterium die halbe Anzahl von radialen Knotenlinien im Außenbereich des Gongs herangezogen. Der innere Bereich ist meist in Ruhe. In einigen Fällen kann er jedoch ebenfalls Schwingungen ausführen, deren Ordnungsmerkmale von denen des Rests abweichen. Der umgekehrte Fall tritt für die 5-2-Schwingungsform bei 1825 Hz auf. Im inneren Bereich liegt ein regelmäßiges Muster mit  $2m = 10$  radialen Knotenlinien vor, während im äußeren Bereich keine Regelmäßigkeit zu erkennen ist.

Je höher die Frequenz wird, desto schwieriger gestaltet es sich, die gemessenen Schwingungsmuster in das  $m$ - $n$ -Schema einzufügen. Der dritte Teil (Tab. IVc) illustriert dies anschaulich. Man erkennt eine Vielfalt von Mustern, die sich auch mit großer Fantasie nicht

zweifelsfrei einordnen lassen. Während die Mitte des Gongs - der Schlagbuckel - in aller Regel als Ganzes schwingt, zeigt der Rest die Tendenz, sich immer feiner in immer mehr und immer kleinere Abschnitte zu unterteilen, von denen die benachbarten in Gegenphase schwingen. Eine nachgeschaltete Modalanalyse (vgl. Kapitel 4) könnte helfen, die zugrunde liegenden Eigenschwingungen zu extrahieren. Ein Blick auf die zugehörigen Frequenzen zeigt durchweg vierstellige Werte  $\geq 1190$  Hz. Eine Beschränkung auf tiefe Frequenzen erscheint sinnvoll, sofern angestrebt wird, die gemessenen Schwingungsmuster ohne Nachbearbeitung strukturieren zu können. Da zudem zu vermutet ist, dass die hochfrequenten Schwingungen nicht "klangbildend" sind, wurde bei den anderen Burma-Gongs eine Messbandbreite von üblicherweise 1000 Hz, bei den großen Java-Gongs von 500 Hz als ausreichend erachtet.

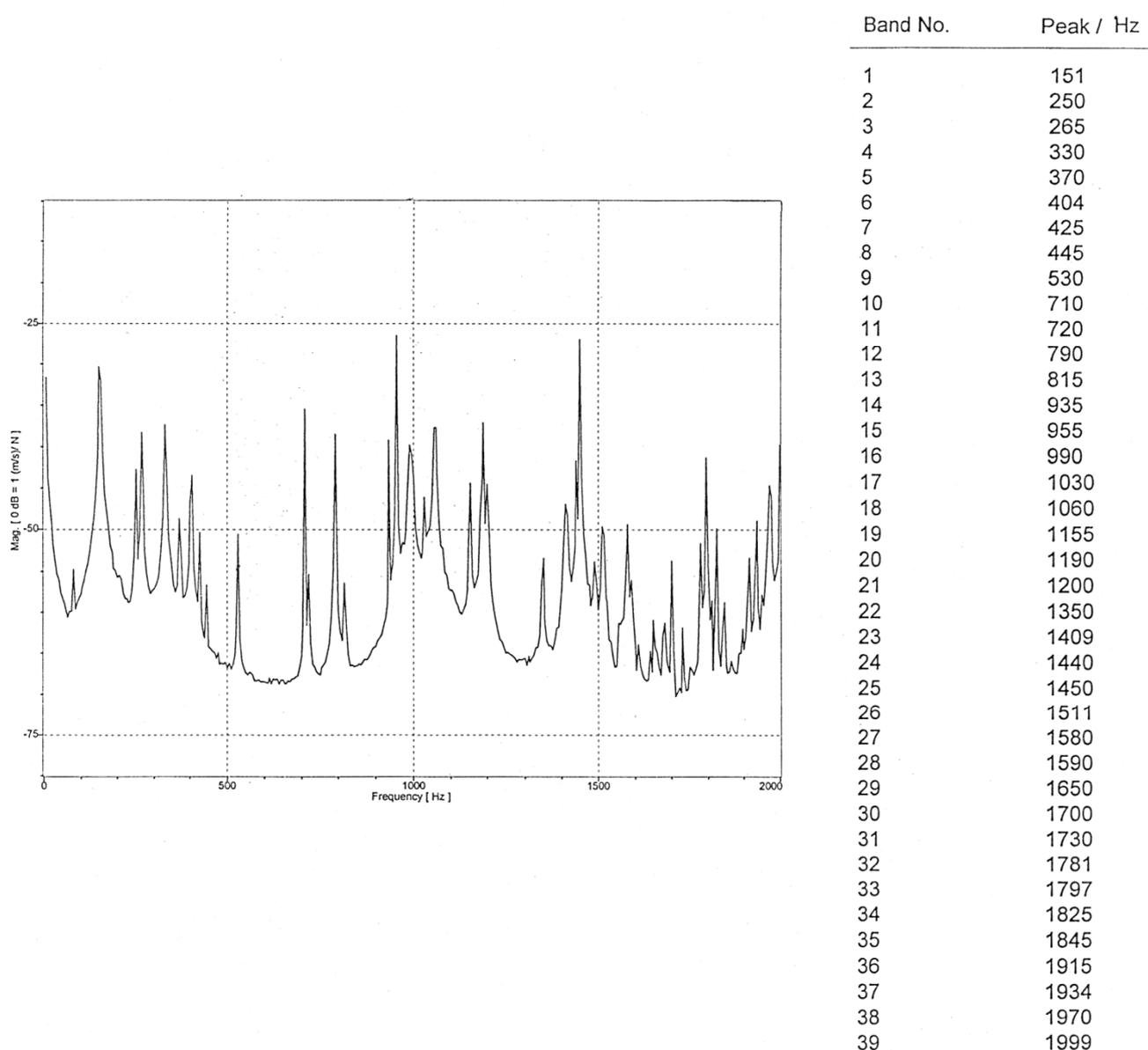
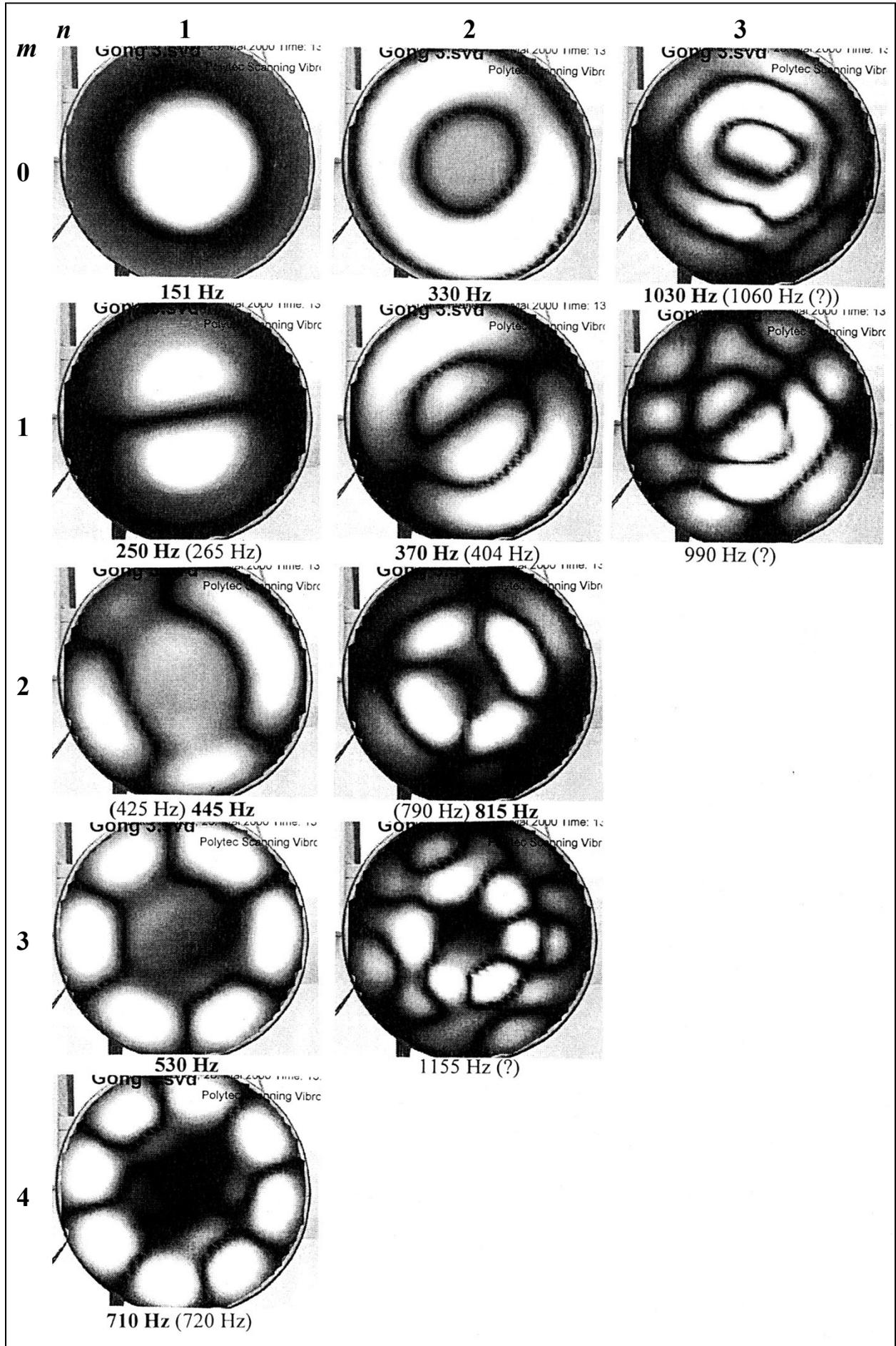
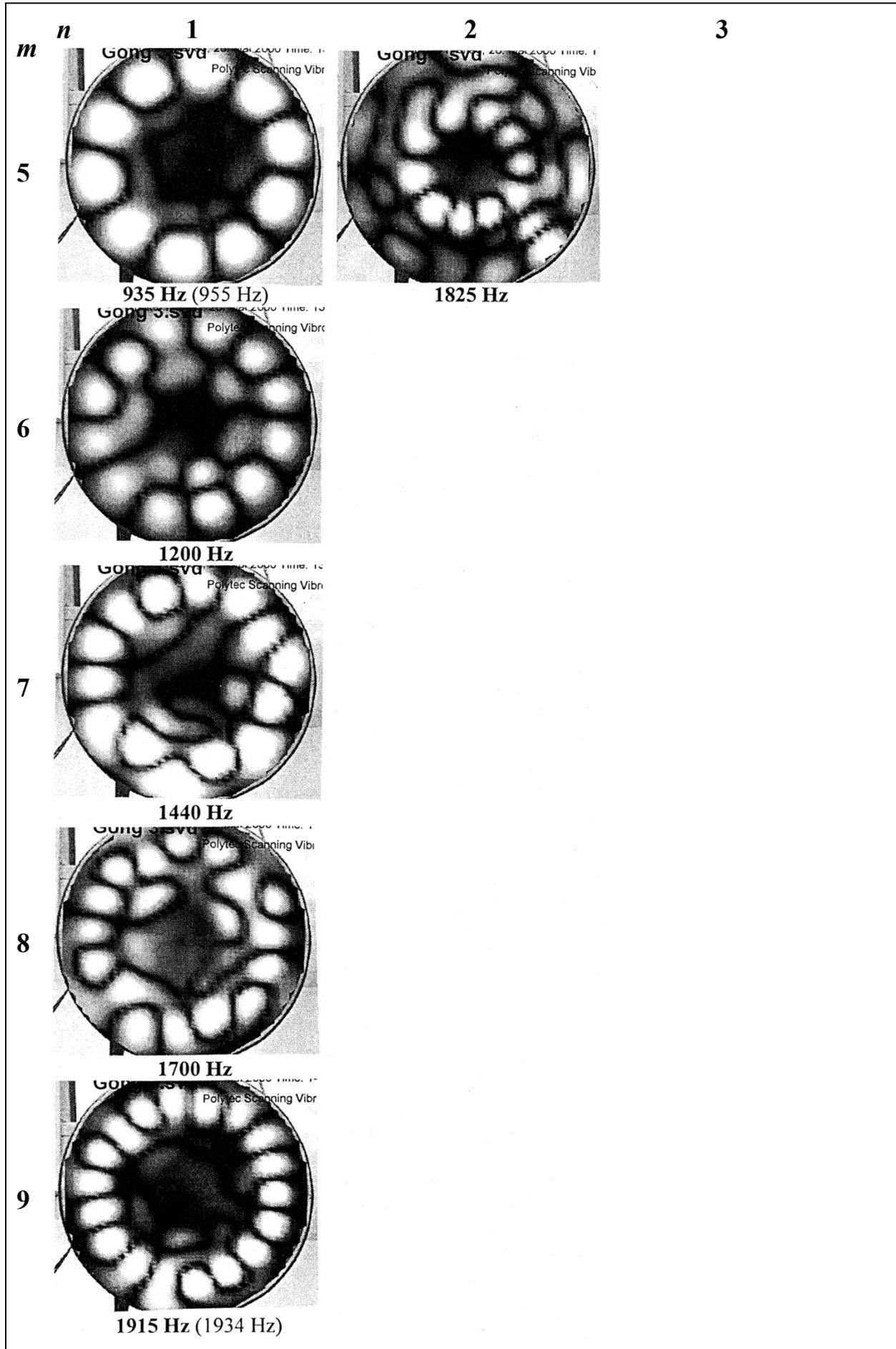


Fig. 22. Mittlerer Burma-Gong Nr. III. Links: Gesamt-Übertragungsfunktion im Pegelmaß  $re\ 1m/(Ns)$ ; rechts: Frequenzbänder, die für die Darstellung der Schwingungsmuster ausgewählt worden sind.

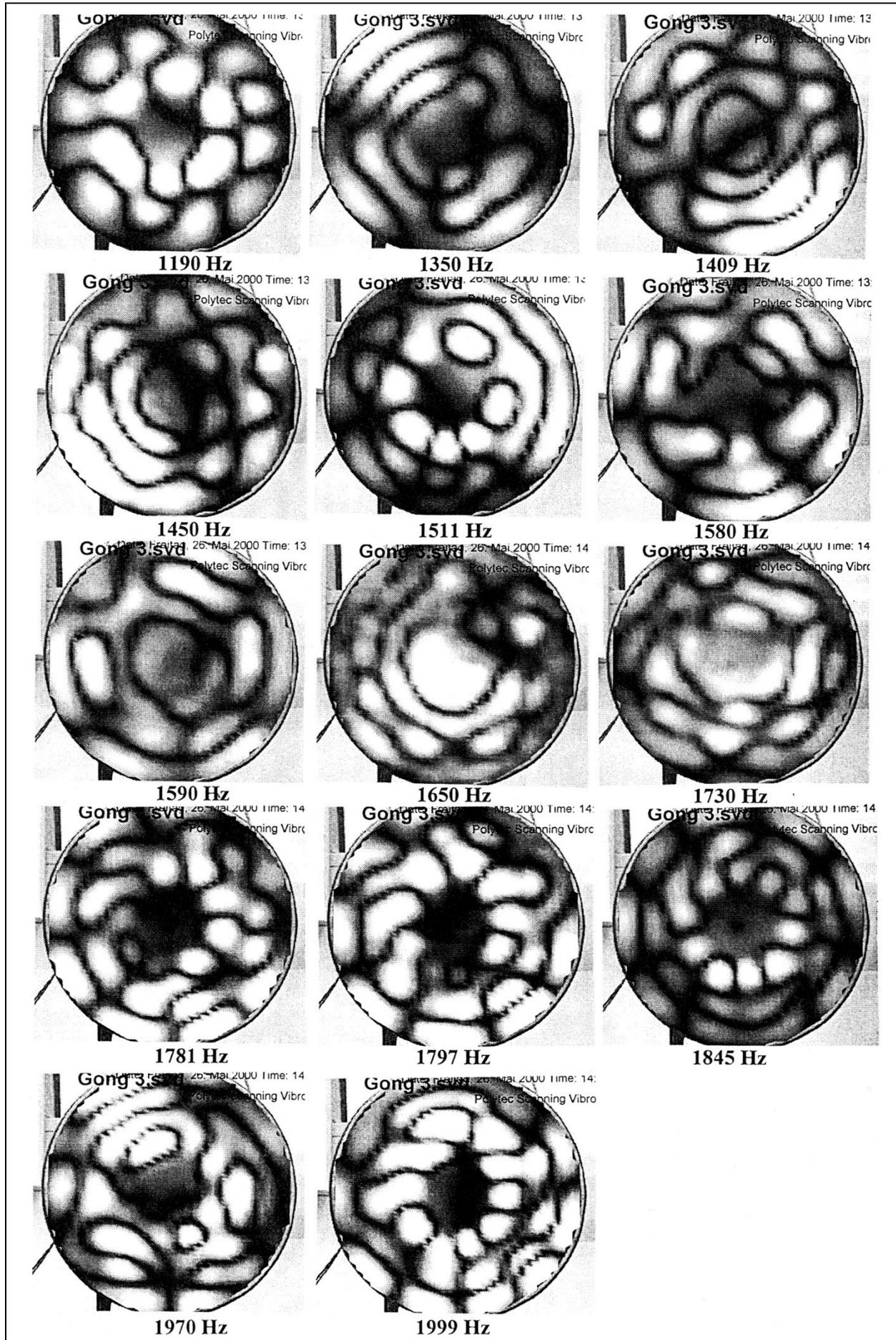
Tab. IVa. Schwingungsmuster des mittleren Burma-Gongs Nr. III Teil 1



Tab. IVb. Schwingungsmuster des mittleren Burma-Gongs Nr. III Teil 2



Tab. IVc. Weitere Schwingungsmuster des mittleren Burma-Gongs Nr. III, geordnet nach steigender Frequenz



### 3.5. Mittlerer Burma-Gong Nr. IV

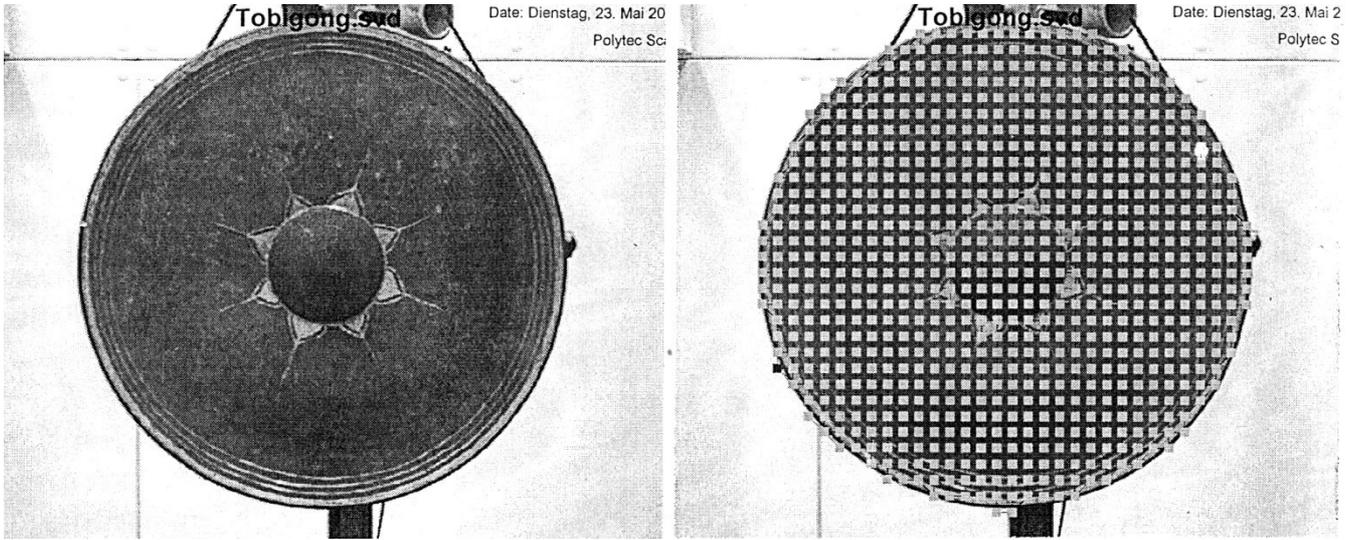
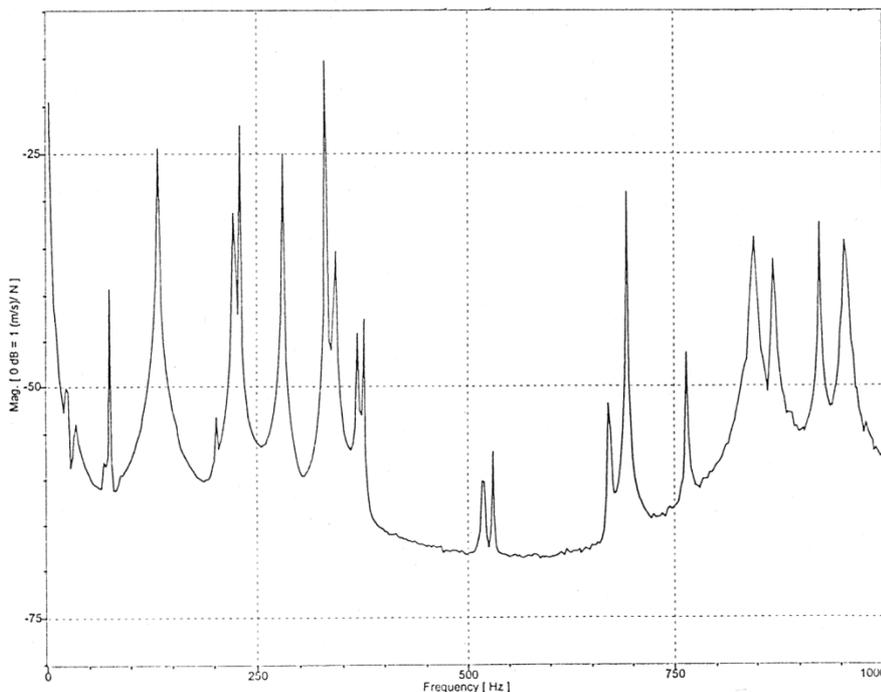


Fig. 23. Mittlerer Burma-Gong Nr. IV. Links: aufgehängt zur Messung; rechts: mit Messgitter.

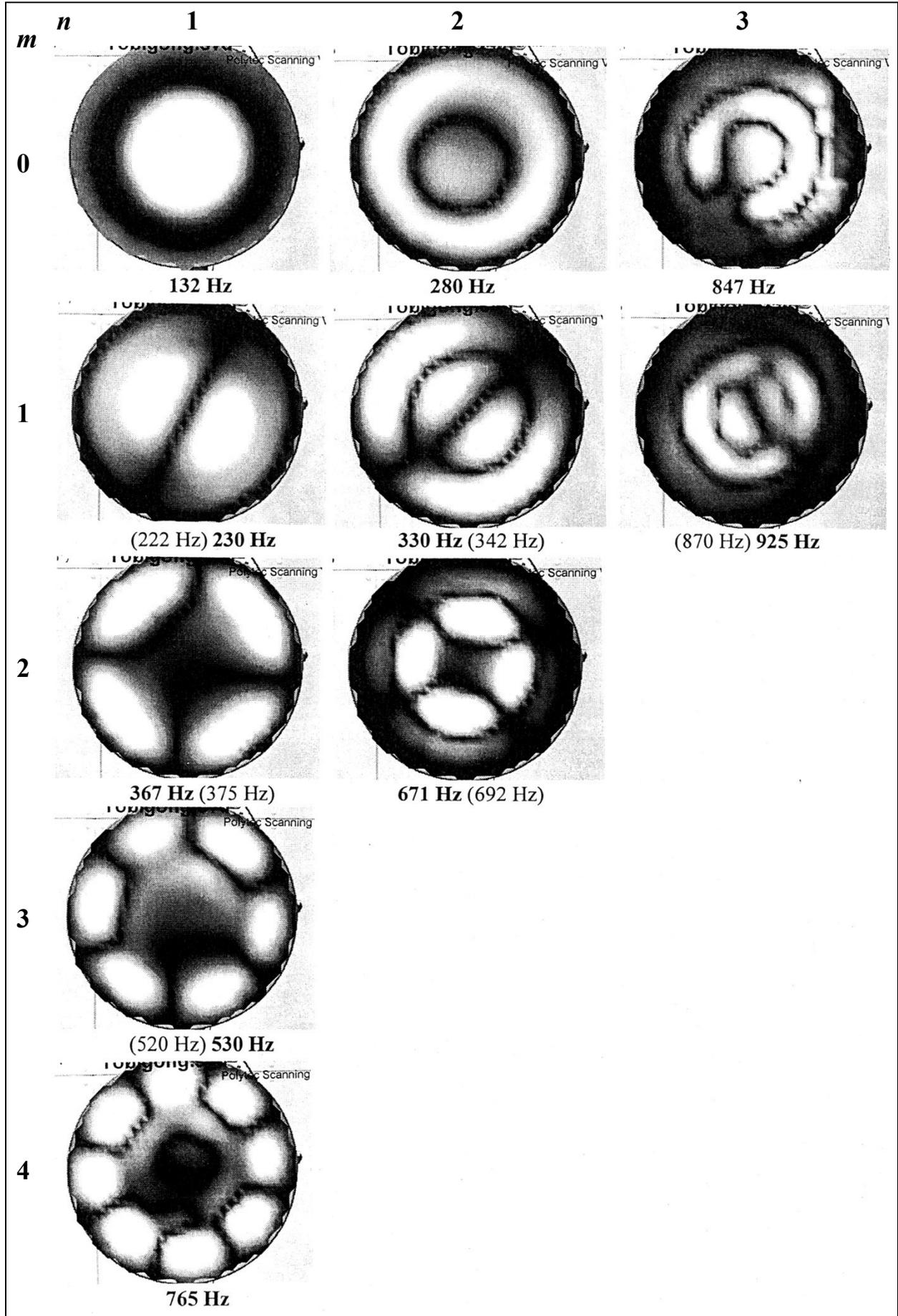
Die Ergebnisse eigener Messungen an 774 Punkten der Oberfläche des Gongs Nr. IV (Fig. 23) sind im vorliegenden Abschnitt dargestellt. Die Messbandbreite ist wiederum 1 kHz, der Abstand der Messfrequenzen 2,5 kHz. Fig. 24 zeigt die Gesamt-Übertragungsfunktion zwischen -80 dB und -10 dB re 1 m/(Ns). Die Frequenzen der 17 Maxima sind in der nebenstehenden Tabelle aufgelistet; in der nachfolgenden Tab. V sind diese Werte abgerundet.



| Band No. | Peak / Hz |
|----------|-----------|
| 1        | 132.5     |
| 2        | 222.2     |
| 3        | 230.0     |
| 4        | 280.2     |
| 5        | 330.0     |
| 6        | 342.2     |
| 7        | 367.5     |
| 8        | 375.0     |
| 9        | 520.0     |
| 10       | 530.0     |
| 11       | 670.6     |
| 12       | 692.5     |
| 13       | 765.5     |
| 14       | 847.5     |
| 15       | 870.5     |
| 16       | 925.0     |
| 17       | 955.4     |

Fig. 24. Mittlerer Burma-Gong Nr. IV. Links: Gesamt-Übertragungsfunktion im Pegelmaß re 1m/(Ns); rechts: Frequenzbänder, die für die Darstellung der Schwingungsmuster ausgewählt worden sind.

Tab. V. Schwingungsmuster des mittleren Burma-Gongs Nr. IV



Die Schwingungsmuster (mit Ausnahme desjenigen bei 955 Hz, das sich nicht zweifelsfrei einordnen lässt) sind in Tab V zusammengestellt. Im Frequenzbereich bis 1 kHz konnten zehn unterschiedliche Typen identifiziert werden. Maximal sind  $m = 4$  Knotendurchmesser und  $n = 3$  Knotenkreise nachzuweisen. Hinsichtlich dieser Ordnungsmerkmale stimmen die Muster mit denen überein, die den Tab. II bis IV zu entnehmen sind. Parallelen sind insbesondere zum Gong. Nr. III (Tab. IVa), der ebenfalls der mittleren Größenklasse zugeordnet wird, zu beobachten.

### 3.6. Großer Burma-Gong Nr. V

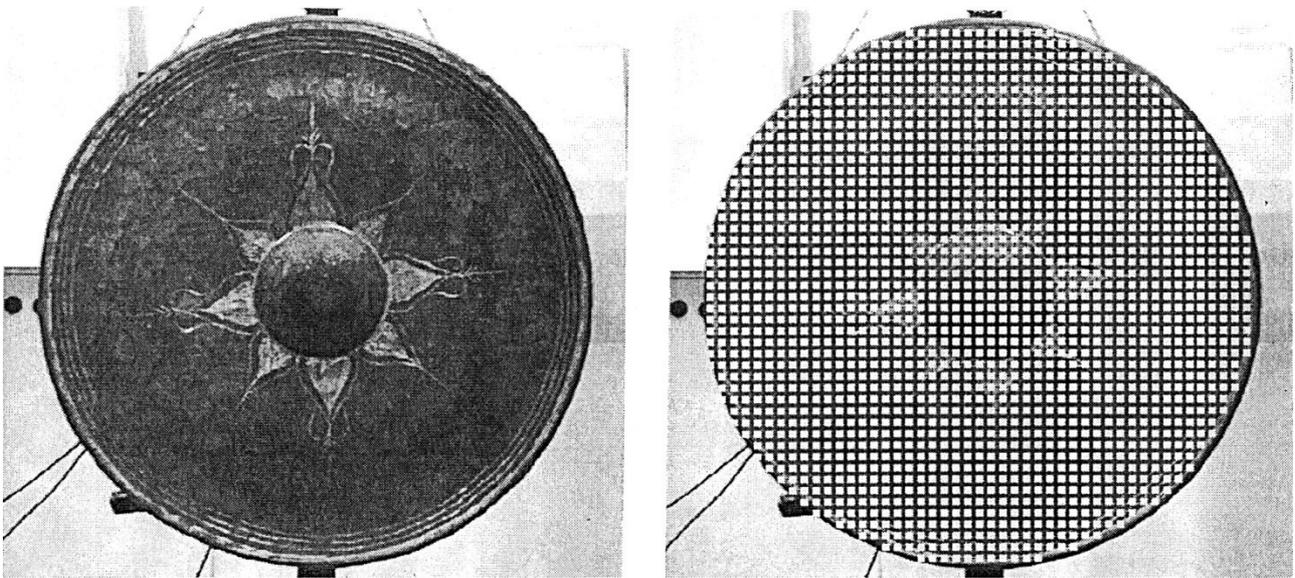


Fig. 25. Großer Burma-Gong Nr. V. Links: aufgehängt zur Messung; rechts: mit Messgitter.

Als erster der großen Gongs wird das Instrument Nr. V behandelt, das unter anderem schon Twork (1997), Bogolowski (1999) sowie Winter und Wörner (2000) untersucht haben. Dieser Gong ist in Fig. 25 mit und ohne das Messgitter gezeigt. Die Messdaten von Bogolowski (1999) wurden erneut ausgewertet. 1768 Messpunkte waren äquidistant auf der Oberfläche verteilt. Es wurden Frequenzen im Abstand von 2,5 Hz im Bereich bis 1 kHz analysiert. Die Gesamt-Übertragungsfunktion (Frequenzachse: linear geteilt von 0 Hz bis 1000 Hz, Ordinate: geteilt im logarithmischen Maß von -90 bis -20 dB re 1 m/(Ns)) kann Fig. 26 entnommen werden. Die beigefügte Liste enthält 24 Frequenzen, bei denen die Übertragungsfunktion Maxima aufweist und für die Schwingungsmuster dargestellt werden. Die Abweichungen gegenüber den Ergebnissen der anderen oben angegebenen Untersuchungen sind marginal. Sie bewegen sich innerhalb des Rahmens, der durch die Unterschiede in der Frequenzauflösung gegeben ist.

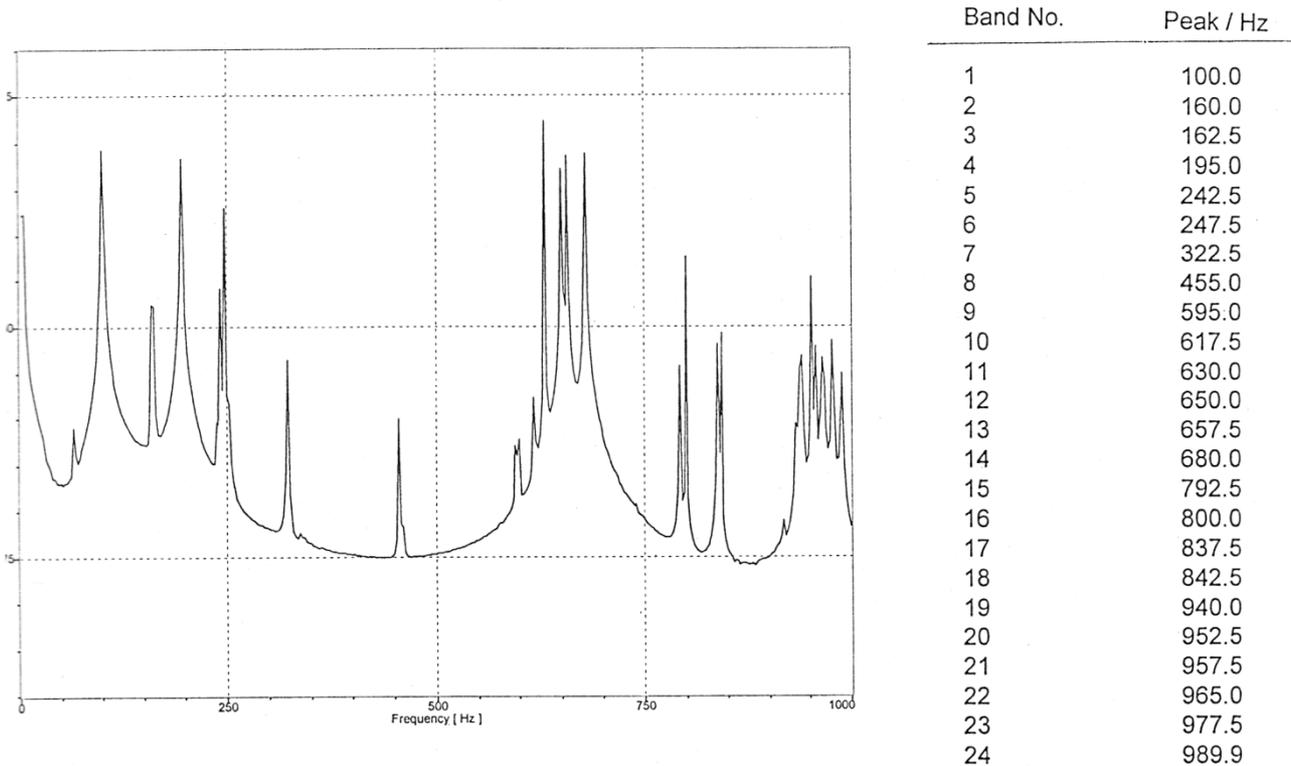
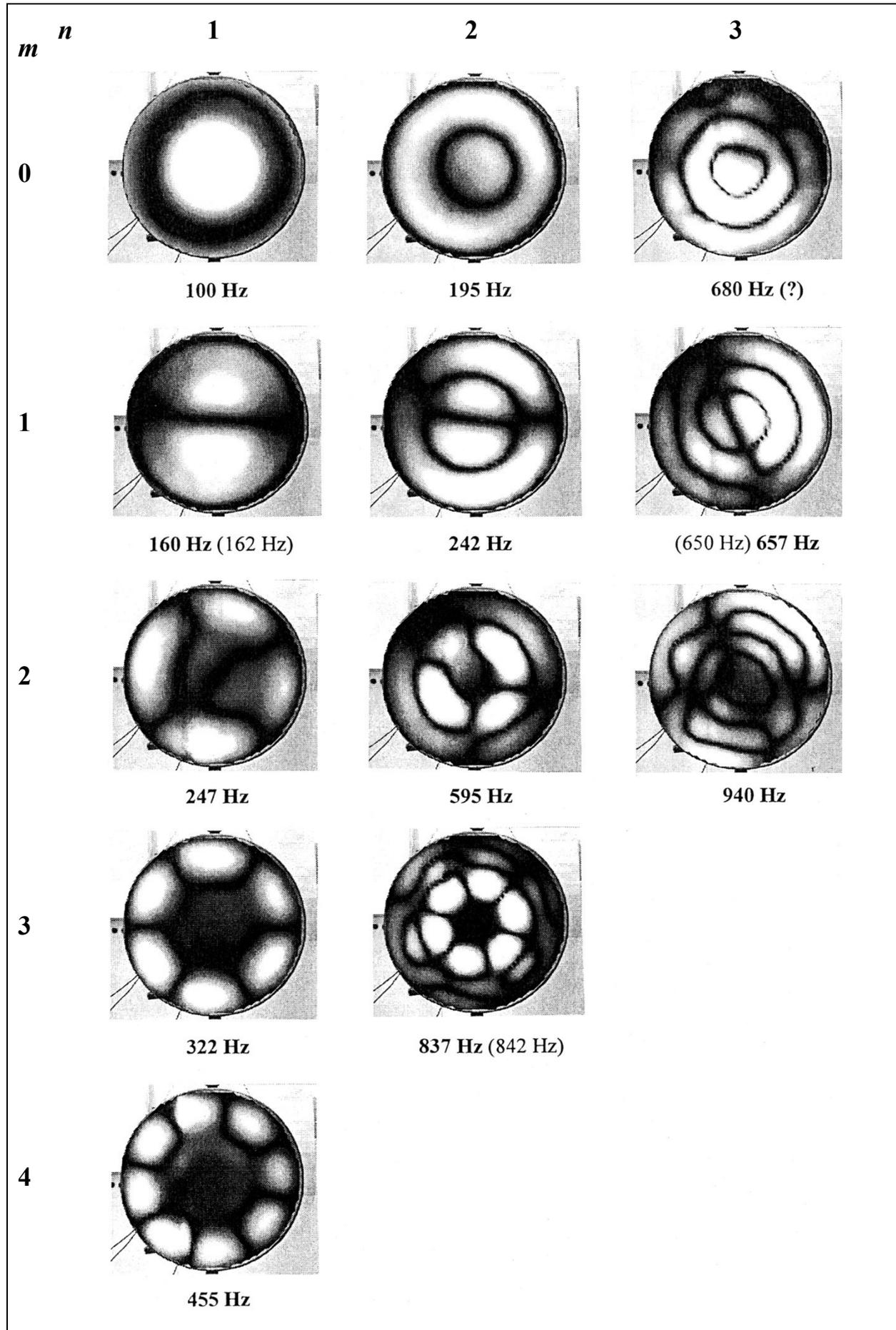


Fig. 26. Großer Burma-Gong Nr. V. Links: Gesamt-Übertragungsfunktion im Pegelmaß  $re\ 1m/(Ns)$ ; rechts: Frequenzbänder, die für die Darstellung der Schwingungsmuster ausgewählt worden sind.

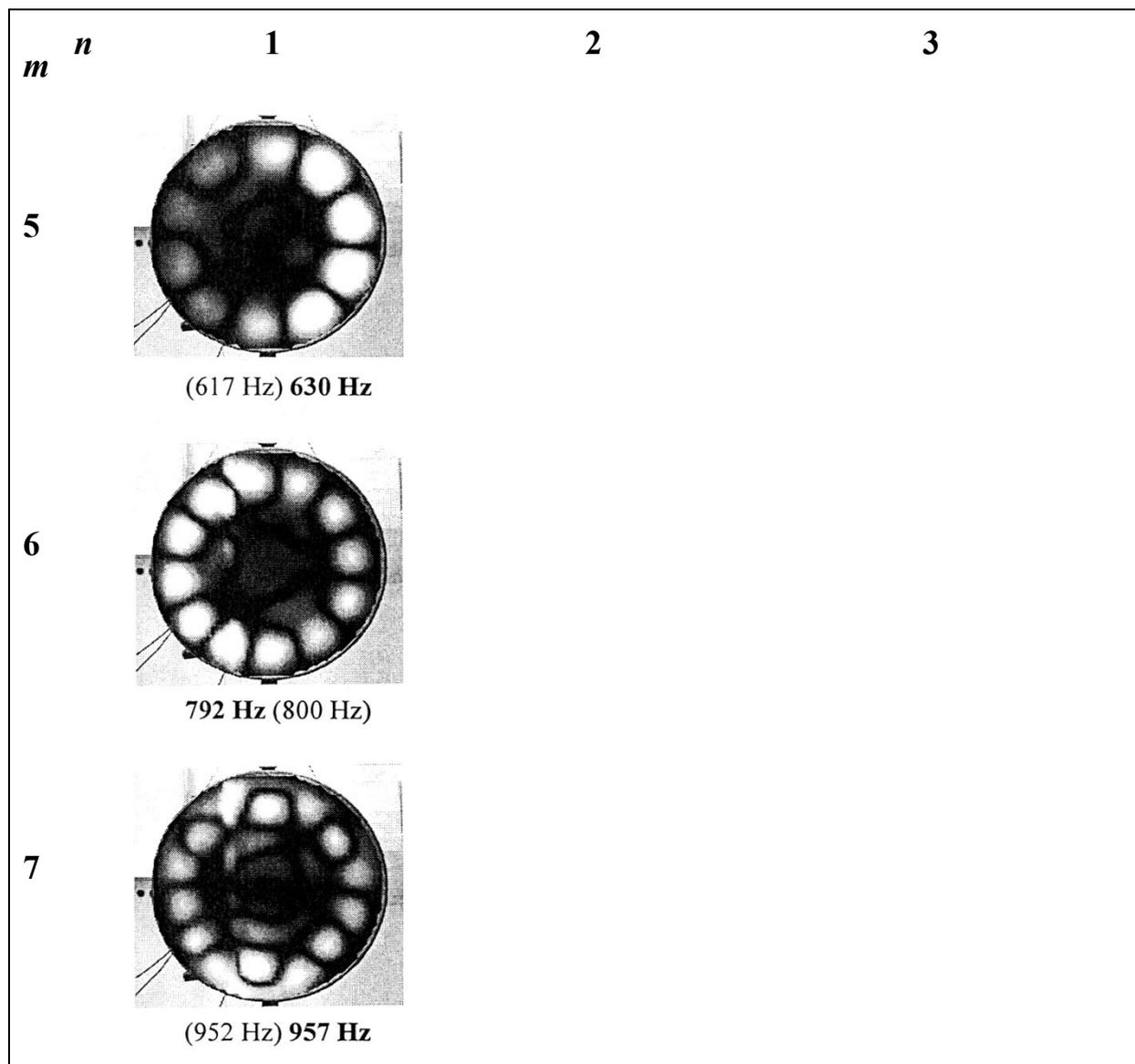
Von den insgesamt 24 Schwingungsmustern, die extrahiert wurden, konnten drei (bei 965 Hz, 977,5 Hz und 990 Hz) nicht zweifelsfrei klassifiziert werden. Die übrigen 21 Muster lassen sich in das  $m$ - $n$ -Periodensystem von Tab. VI einordnen. Auch hier charakterisiert Fettdruck die zur Abbildung gehörende Frequenz, wobei wiederum gerundet wurde. Der normal gedruckte Zahlenwert steht für die Frequenz einer Variante des abgebildeten Typs. Dies ist in aller Regel die zugeordnete Partialschwingungsform, die von gleicher Gestalt, aber anderer Winkellage ist.

Vor allem aus der ersten Spalte von Tab. VIa und b, in der antimetrische Muster mit  $n = 1$  Knotenkreis am Rand angeordnet sind, ist eine deutliche Tendenz ersichtlich. Mit wachsender Frequenz neigt die Zone nahe dem Schlagbuckel dazu, immer weniger zu schwingen. Der zentrale "Knotenpunkt" wird allmählich zu einem "Knotenfeld" oder "Knotenleck", der von der Mitte ausgehend einen immer größer werdenden Teil des Gongs umfasst. Der Bereich, in dem die Unterscheidung anhand von radialen Knotenlinien gelingt, verschiebt sich immer mehr zum Rand hin und wird schließlich zu einem schmalen Ring. In dieser Randzone konnten im Extremfall bei 957 Hz (siehe Tab. VIb) insgesamt  $2m = 14$  Schwingungsbäuche identifiziert werden. Benachbarte Schwingungsbäuche bewegen sich in Gegenphase zueinander und sind durch ebenso viele radiale Knotenlinien voneinander getrennt.

Tab. VIa. Schwingungsmuster des großen Burma-Gongs Nr. V Teil 1



Tab. VIb. Schwingungsmuster des großen Burma-Gongs Nr. V Teil 2



### 3.7. Großer Burma-Gong Nr. VI

Die Oberflächenschwingung des in Fig. 27 abgebildeten Gongs Nr. VI wurde an 775 Punkten gemessen. Auch bei diesem Experiment war die Frequenzbandbreite 1 kHz und der Abstand zwischen benachbarten Messfrequenzen 2,5 Hz. Wie aus der Tabelle in Fig. 28 zu ersehen ist, wurden aus der Gesamt-Übertragungsfunktion insgesamt 28 Maxima extrahiert. Die Ergebnisse stimmen in allen wesentlichen Punkten mit denjenigen von Winter und Wörner (2000) überein.

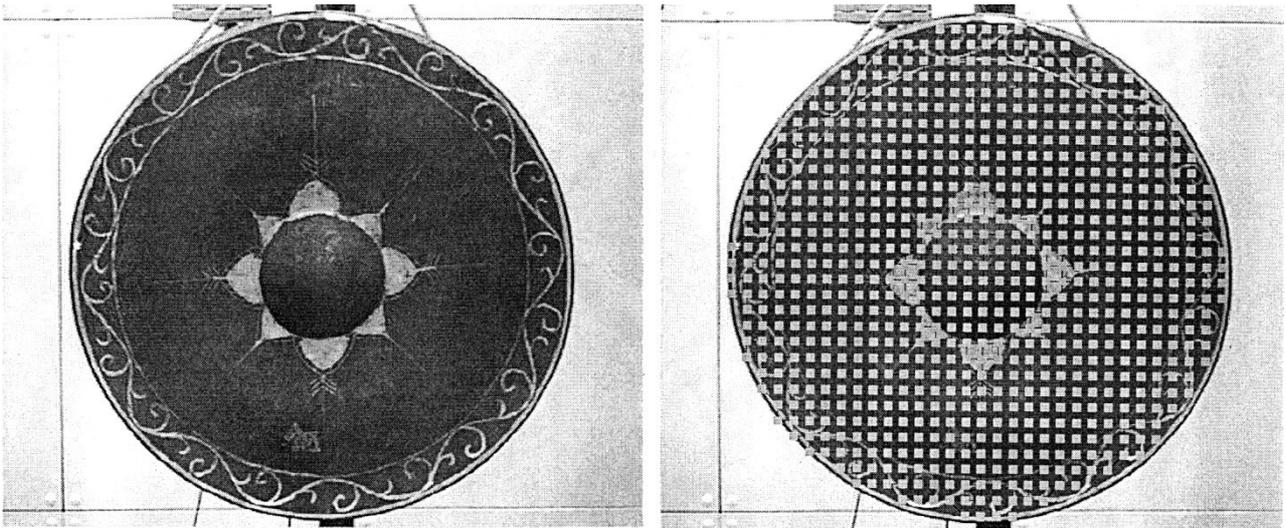


Fig. 27. Großer Burma-Gong Nr. VI. Links: aufgehängt zur Messung; rechts: mit Messgitter.

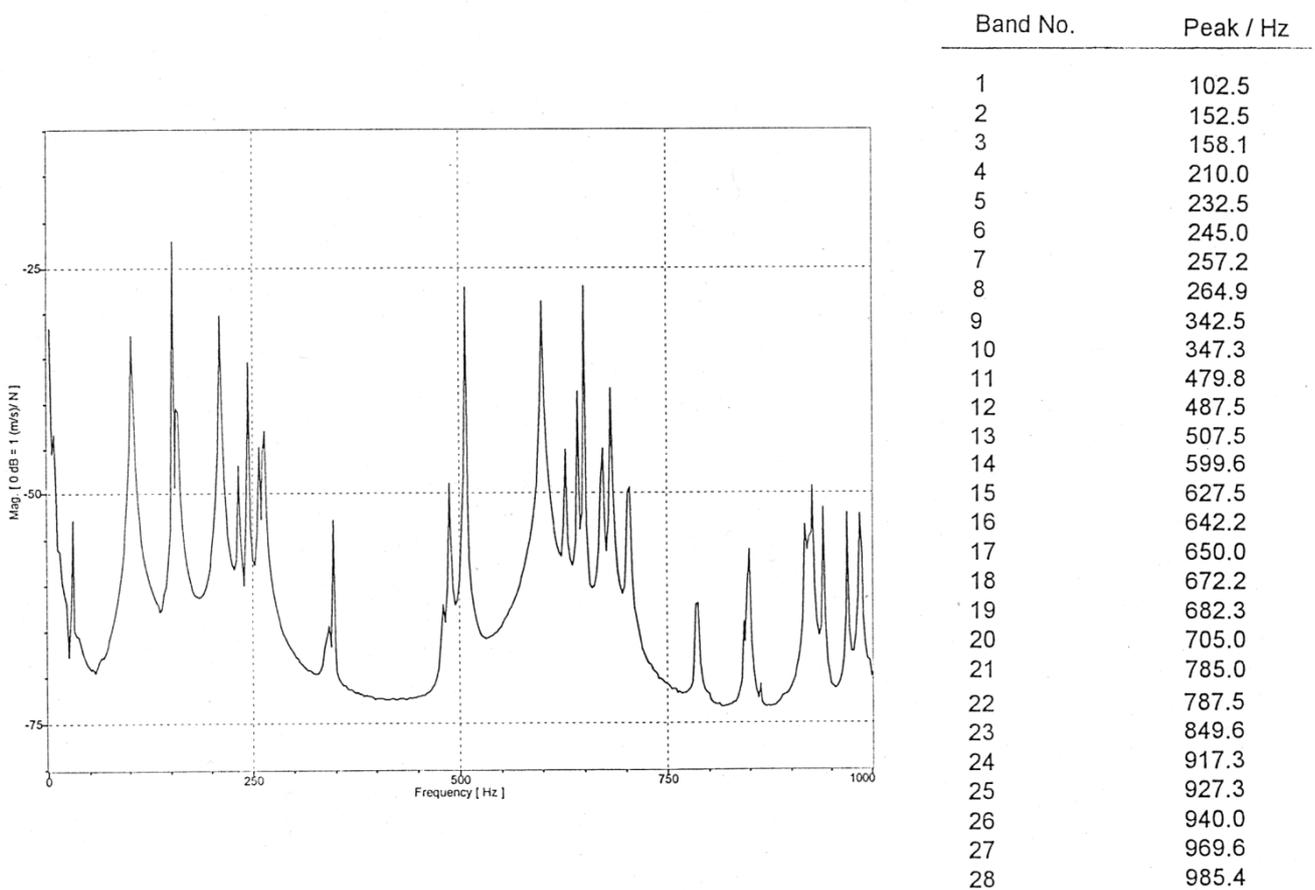
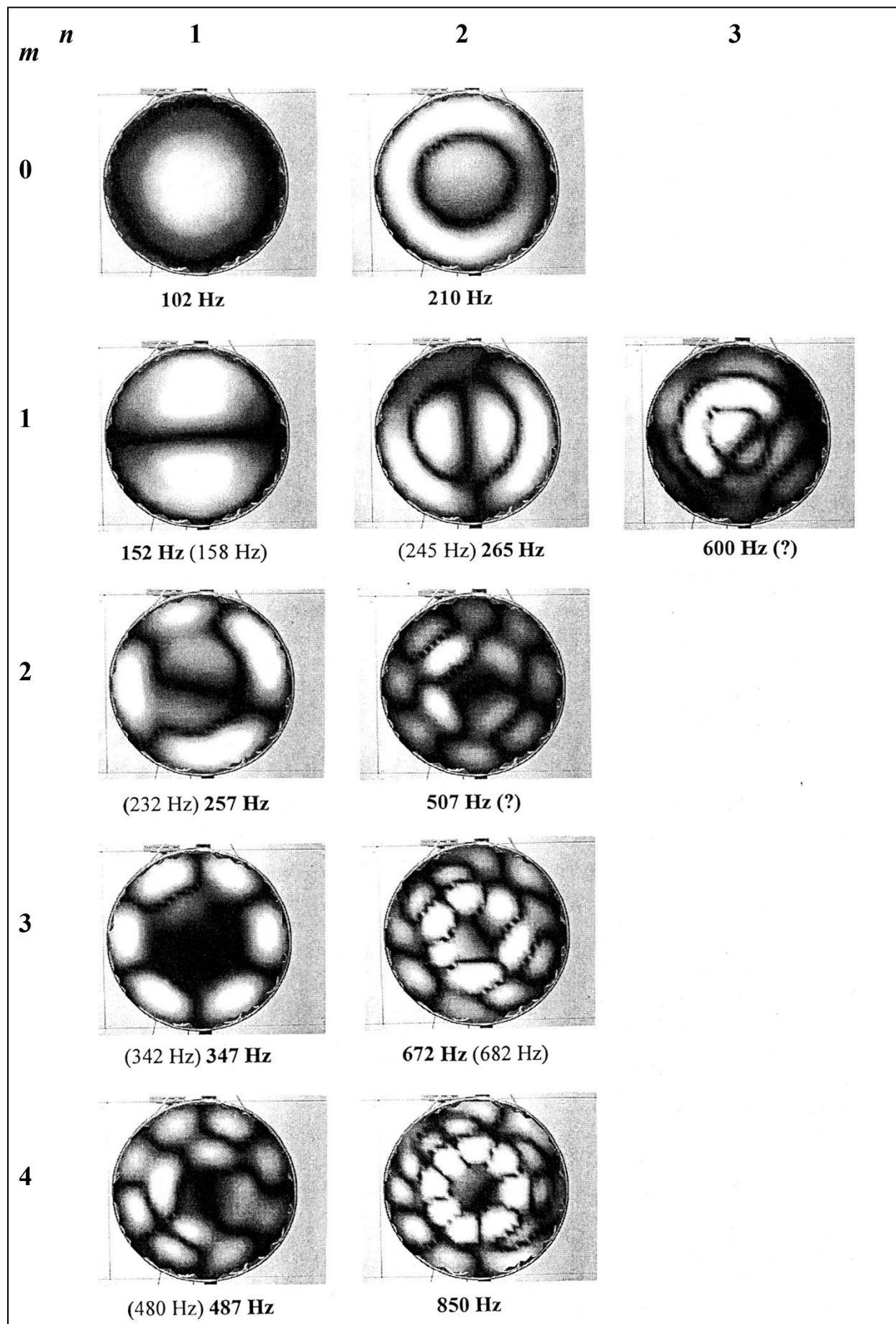
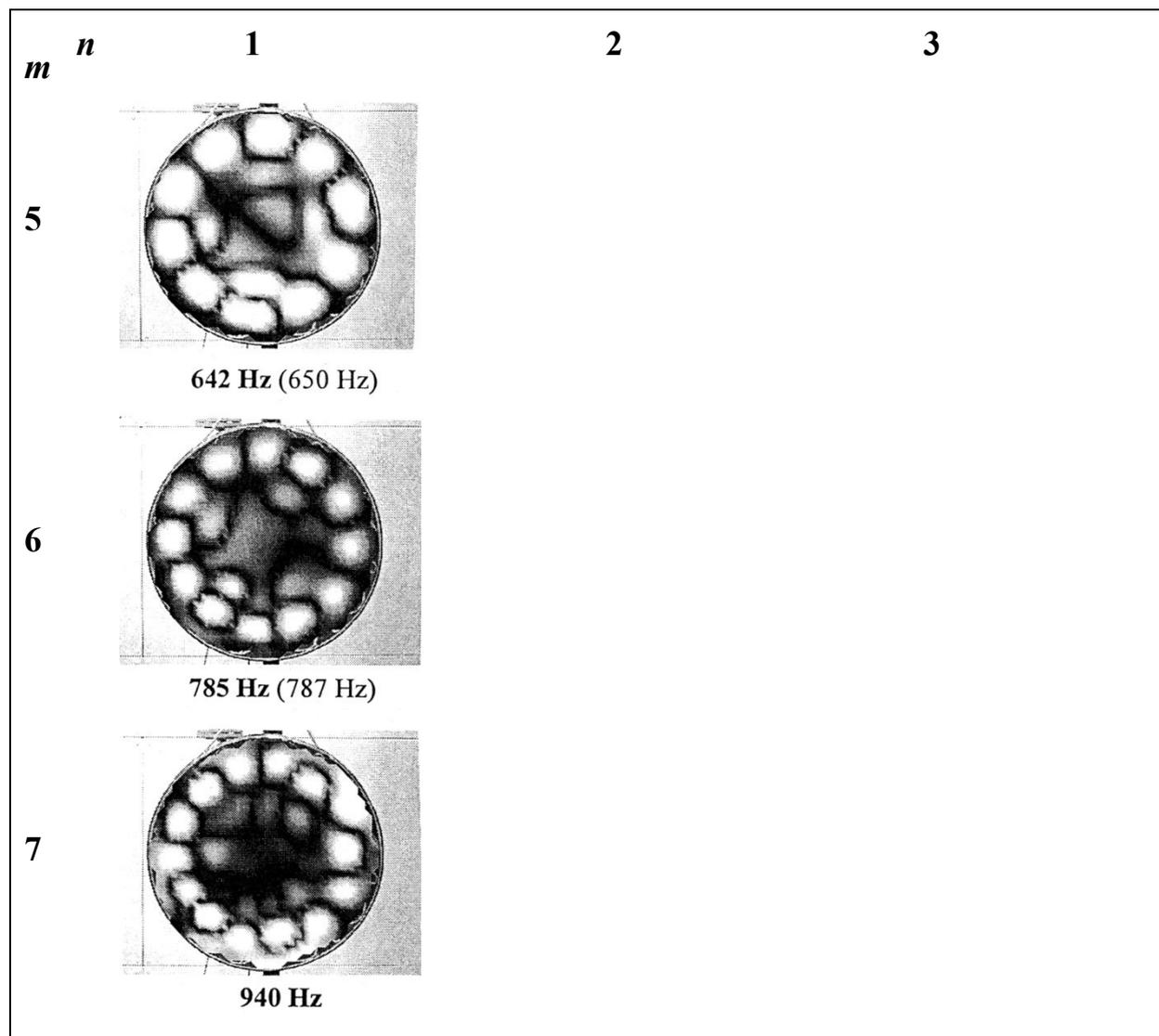


Fig. 28. Großer Burma-Gong Nr. VI. Links: Gesamt-Übertragungsfunktion im Pegelmaß re 1m/(Ns); rechts: Frequenzbänder, die für die Darstellung der Schwingungsmuster ausgewählt worden sind.

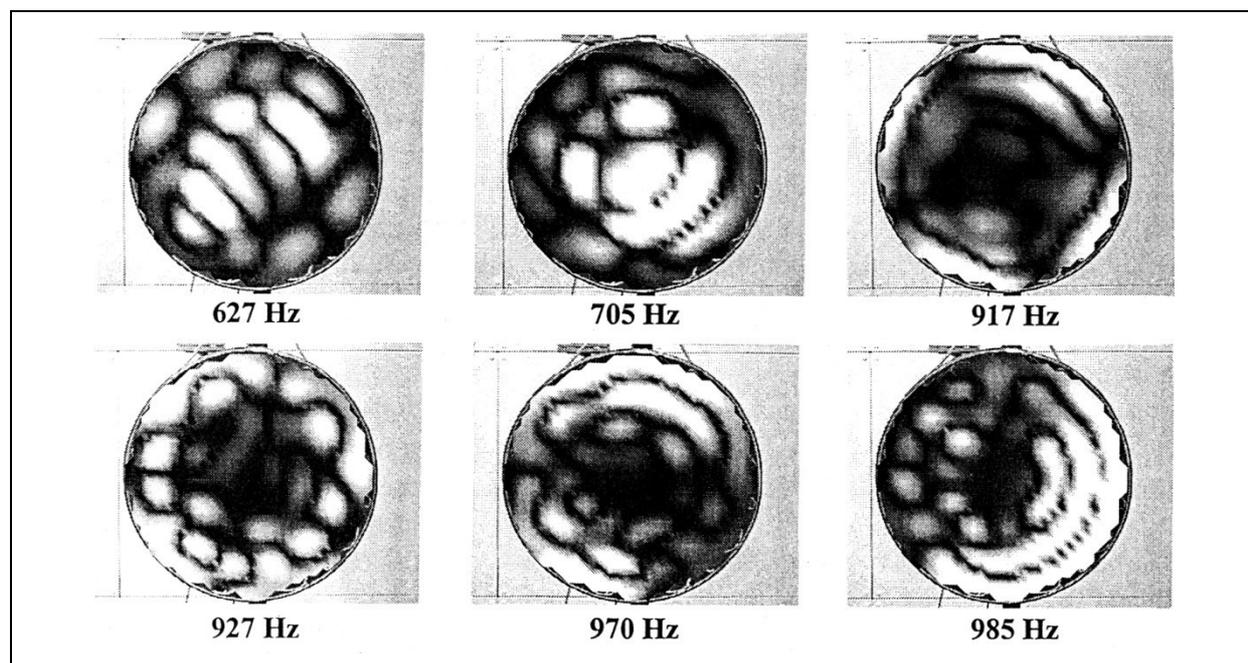
Tab. VIIa. Schwingungsmuster des großen Burma-Gongs Nr. VI Teil 1



Tab. VIIb. Schwingungsmuster des großen Burma-Gongs Nr. VI Teil 2



Tab. VIIc. Weitere Schwingungsmuster des großen Burma-Gongs Nr. VI, geordnet nach steigender Frequenz



Das Schwingungsmuster bei der Frequenz 245 Hz ist nicht wiedergegeben. Es scheint sich dabei um die Überlagerung der beiden Varianten der 2-1-Schwingung bei 232 Hz und 257 Hz zu handeln. Die übrigen Schwingungsmuster finden sich samt den gerundeten Frequenzwerten in Tab. VII. Deren erster Teil (Tab. VIIa) zeigt in aller Regel Schwingungsbilder, wie sie von den anderen Gongs her bereits bekannt sind. In einigen Fällen, die durch Fragezeichen markiert sind, ist die Einordnung nicht zweifelsfrei möglich. Wie auch bei den bisherigen Auswertungen praktiziert, wurde in Zweifelsfällen als Kriterium für die erste Spalte ( $n = 1$  Knotenkreis) die Anzahl der radialen Knotenlinien auf dem äußeren Teil des Gongs herangezogen; dies wird besonders auch in Tab. VIIb deutlich. In der zweiten Spalte von Tab. VIIa ( $n = 2$  Knotenkreise) wurde gemäß der Knotenlinien im inneren Teil geordnet. Tab. VIIc zeigt eine Zusammenstellung von sechs Schwingungsmustern, bei denen eine Einordnung allzu gewagt erscheint.

### 3.8. Großer Burma-Gong Nr. VII

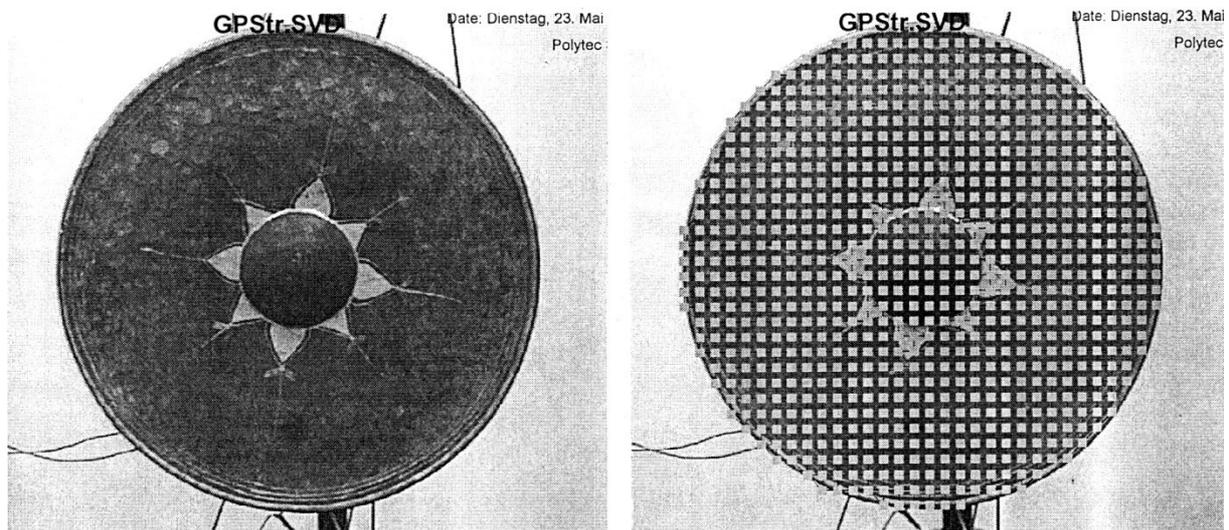


Fig. 29. Großer Burma-Gong Nr. VII. Links: aufgehängt zur Messung; rechts: mit Messgitter.

Der größte der Burma-Gongs, das in Fig. 29 abgebildete Instrument Nr. VII, wurde an 790 Messpunkten abgetastet (Twork (1997)). Die Gesamt-Übertragungsfunktion ist Fig. 30 zu entnehmen. Die Bandbreite beträgt 1 kHz; der Abstand zwischen zwei Messfrequenzen ist 1,25 Hz. Eine erneute Auswertung der Messergebnisse führt auf 36 Maxima, deren Frequenzen in der Tabelle aufgeführt sind. Die Schwingungsmuster bei 811 Hz, 832 Hz und 905 Hz waren nicht zweifelsfrei einzuordnen und sind deshalb nicht berücksichtigt. Die übrigen 33 Schwingungsmuster samt den gerundeten Frequenzen sind in Tab. VIII zusammengefasst, wobei die nicht dargestellten Varianten wiederum den normal gedruckten, eingeklammerten Frequenzen zuzuordnen sind. Ein Fragezeichen deutet darauf hin, dass dem Schwingungsmuster die betreffende Stelle im  $m$ - $n$ -Periodensystem nicht eindeutig, sondern mit gewissen Vorbehalten zugewiesen worden ist. Dies trifft auf die 1-4-Schwingung bei 885 Hz und die 2-3-Schwingung bei 916 Hz zu. Auch die 8-1-Schwingung bei 872 Hz bzw. 876 Hz weist nur im äußeren Bereich die einschlägigen Merkmale ( $2m = 16$  radiale Knotenlinien und ebenso viele Schwingungsbäuche) auf. Im Inneren zeigt sie mit  $2m = 8$  eine weniger feine Unterteilung. Dies könnte eine Folge der Überlagerung mit der 4-2-Schwingung sein, deren Frequenz (850 Hz bzw. 866 Hz) dicht benachbart ist.

Zwanzig unterschiedliche Schwingungsmuster sind in Tab. VIII vertreten. Sie weisen bis zu  $m = 9$  Knotendurchmesser und  $n = 4$  Knotenkreise auf und vermitteln damit ein anschauliches Bild von der Vielfalt der Formen, die ein großer Burma-Gong im Bereich von Frequenzen bis 1 kHz ausbilden kann.

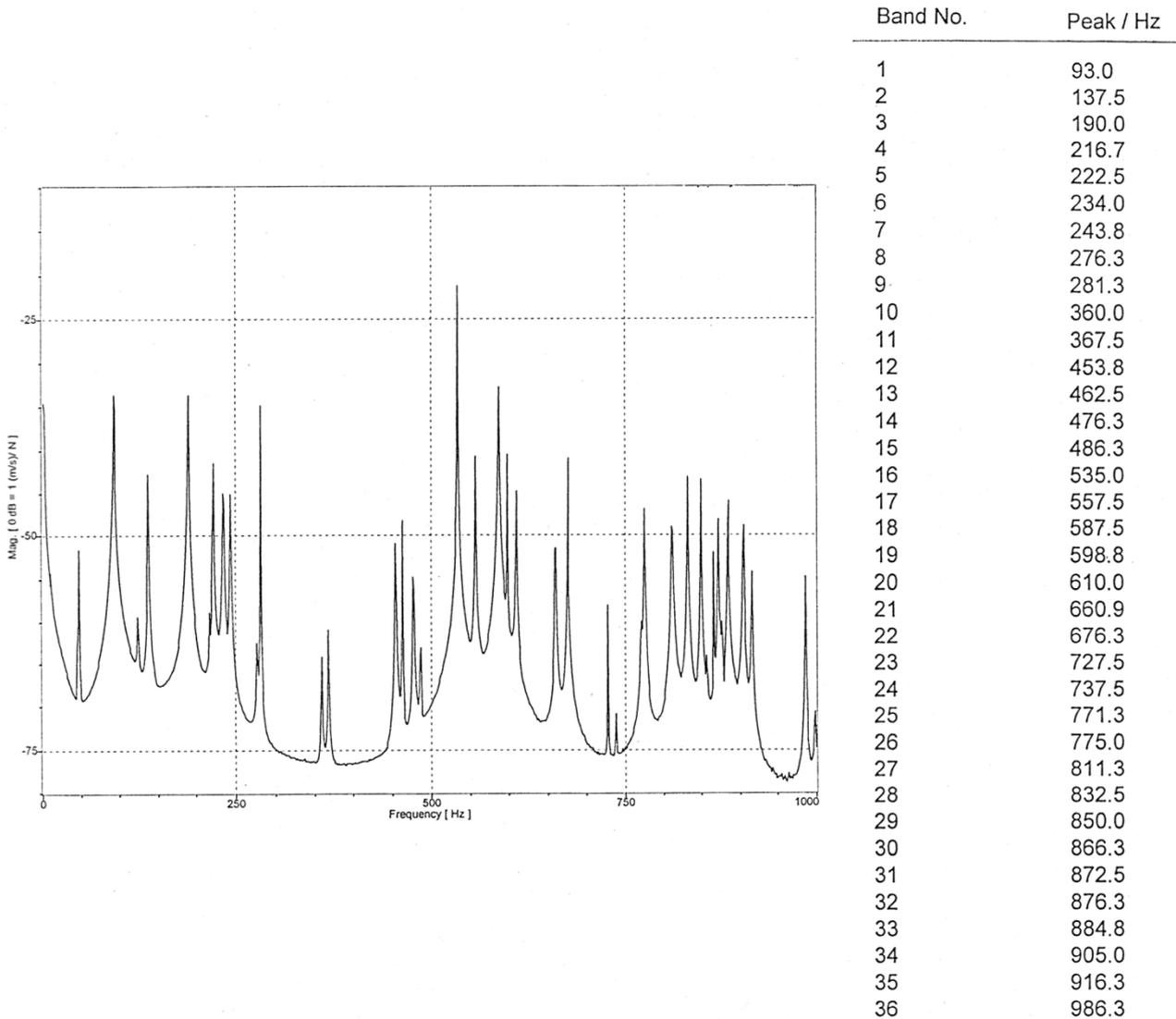
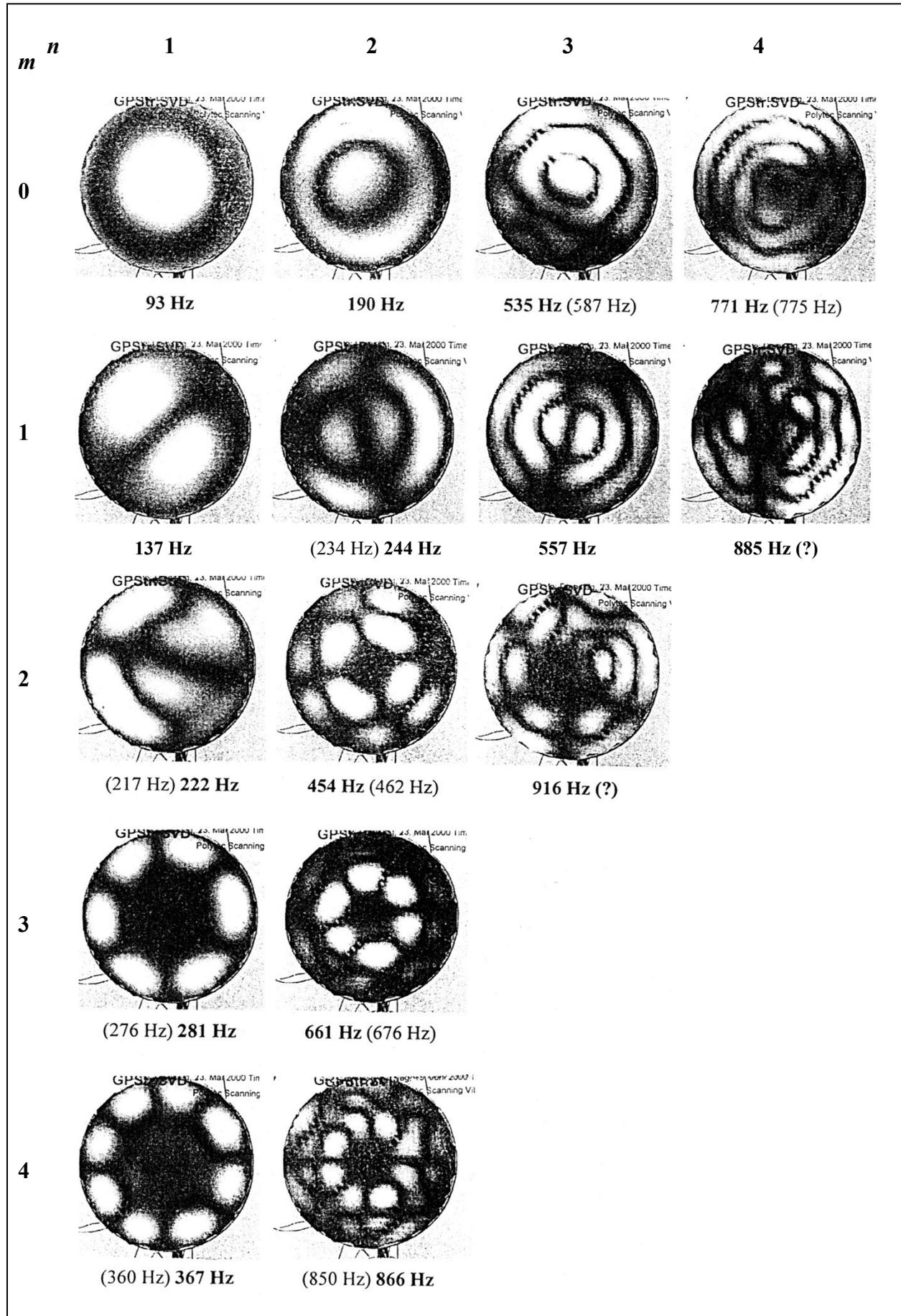
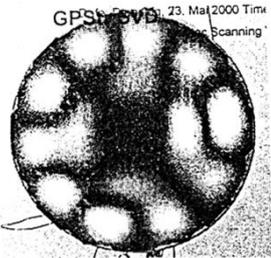
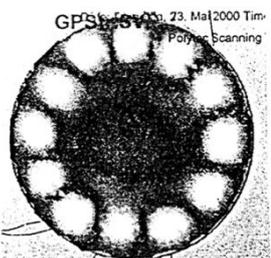
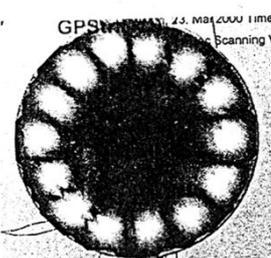
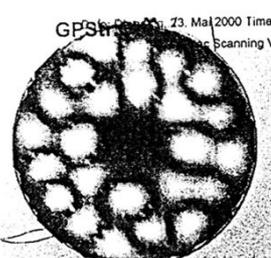
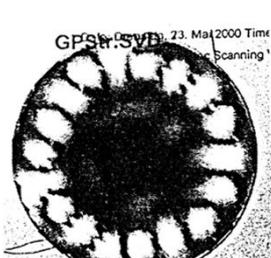


Fig. 30. Großer Burma-Gong Nr. VII. Links: Gesamt-Übertragungsfunktion im Pegelmaß  $re\ 1m/(Ns)$ ; rechts: Frequenzbänder, die für die Darstellung der Schwingungsmuster ausgewählt worden sind.

Tab. VIIIa. Schwingungsmuster des großen Burma-Gongs Nr. VII Teil 1



Tab. VIIIb. Schwingungsmuster des großen Burma-Gongs Nr. VII Teil 2

| $m$ | $n$ | 1   | 2 | 3 | 4 |
|-----|-----|---|---|---|---|
| 5   |     |  <p>GPSH-SVD 23. Mai 2000 Time<br/>Scanning</p> <p>476 Hz (486 Hz)</p>   |   |   |   |
| 6   |     |  <p>GPSH-SVD 23. Mai 2000 Time<br/>Scanning</p> <p>(599 Hz) 610 Hz</p>   |   |   |   |
| 7   |     |  <p>GPSH-SVD 23. Mai 2000 Time<br/>Scanning</p> <p>727 Hz (737 Hz)</p> |   |   |   |
| 8   |     |  <p>GPSH-SVD 23. Mai 2000 Time<br/>Scanning</p> <p>872 Hz (876 Hz)</p> |   |   |   |
| 9   |     |  <p>GPSH-SVD 23. Mai 2000 Time<br/>Scanning</p> <p>986 Hz</p>          |   |   |   |

### 3.9. Großer Java-Gong Nr. VIII

Die beiden Java-Gongs aus den Beständen von Dr. Varsányi, deren einer der Gong Suwukan Nr. VIII (Fig. 31) ist, standen für eine Messung nur kurze Zeit zur Verfügung. Aus diesem Grunde wurden sie mit einem relativ groben Gitter abgetastet, das lediglich 303 Messpunkte umfasst. Das Messgitter ist im rechten Teil von Fig. 31 zu sehen. Die Bandbreite wurde auf 500 Hz beschränkt. Der Abstand der Messfrequenzen war 2,5 Hz.

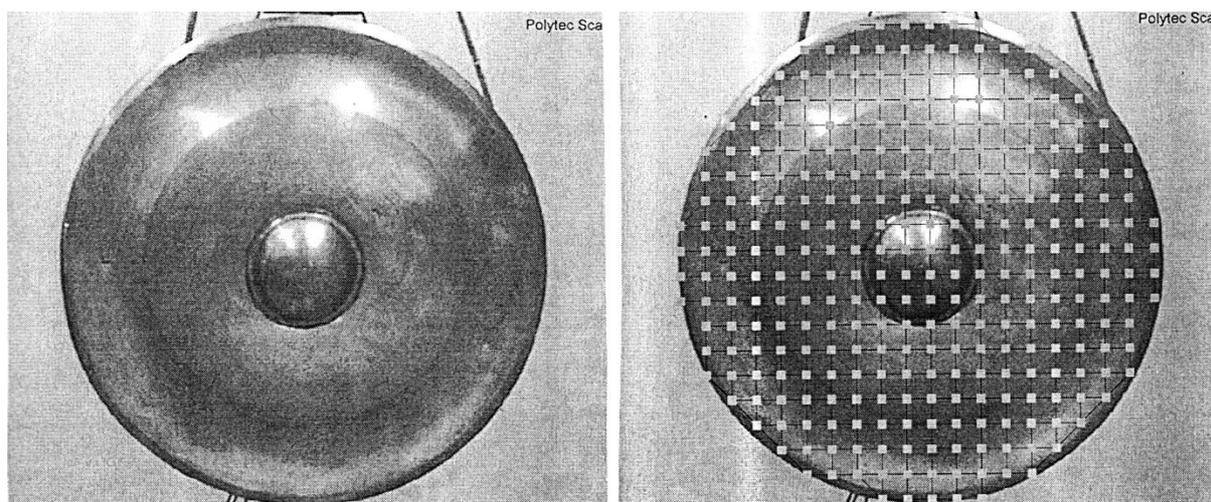


Fig. 31. Großer Java-Gong Nr. VIII. Links: aufgehängt zur Messung; rechts: mit Messgitter.

Fig. 31 gibt die Gesamt-Übertragungsfunktion der Messungen von Twork (1997) wieder. Die Ordinate reicht von - 80 dB bis - 10 dB (entsprechend 0,0001 m/(Ns) bis 0,316 m/(Ns)). Insgesamt neun lokale Maxima sind zu erkennen. Die zugehörigen Frequenzen sind in der beigefügten Tabelle aufgelistet. Dazu gehören sieben voneinander verschiedene Schwingungsmuster, die in Tab. IX zusammengestellt. Sie sind durch die fett gedruckten Frequenzen charakterisiert, die wiederum gerundet wurden. Die normal gedruckten Frequenzen kennzeichnen zwei Varianten. Dabei handelt es sich um Partialschwingungen desselben Typs; das Schwingungsbild entspricht dem dargestellten, ist jedoch im Winkel verdreht.

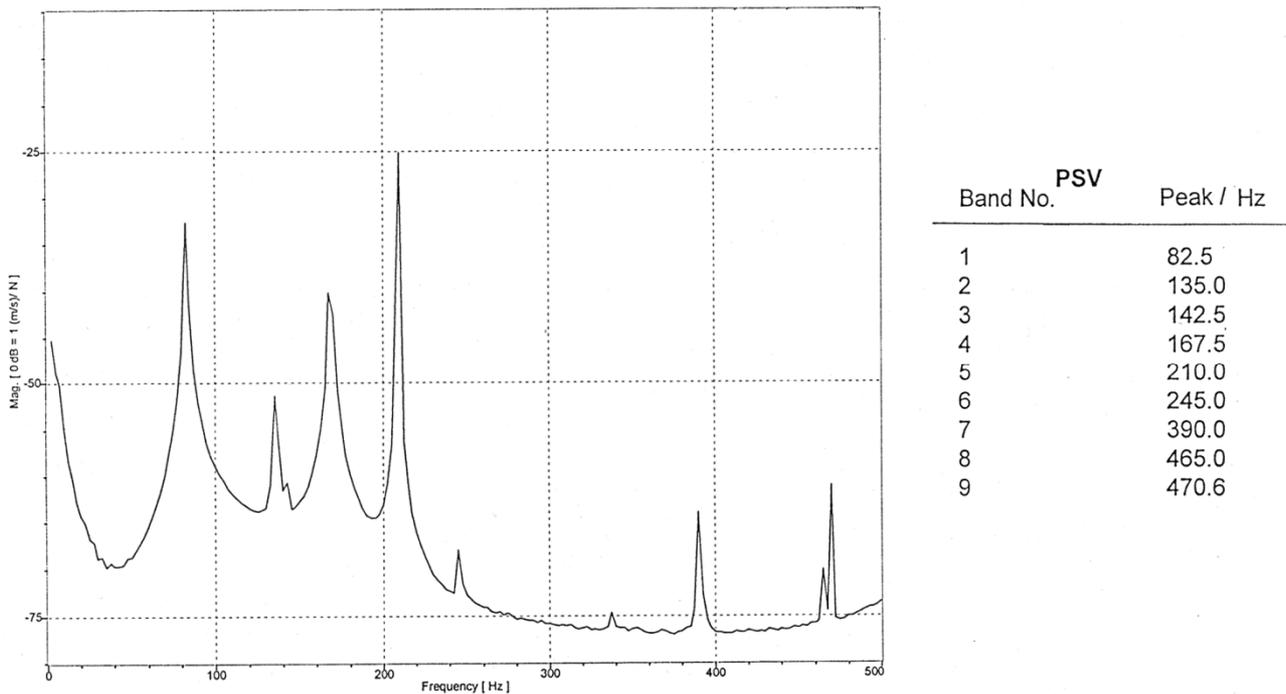
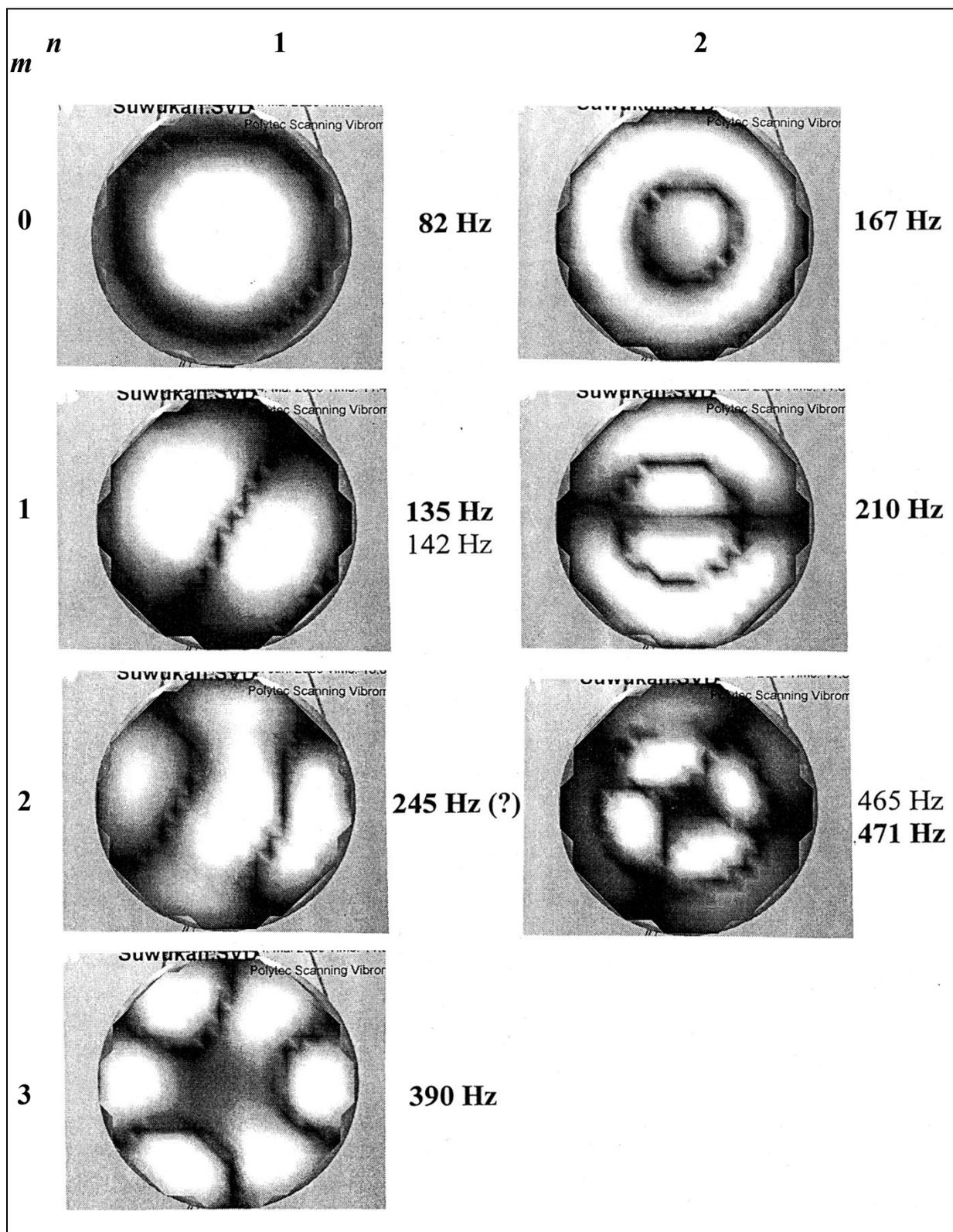


Fig. 32. Großer Java-Gong VIII. Links: Gesamt-Übertragungsfunktion im Pegelmaß  $re\ 1m/(Ns)$ ; rechts: Frequenzbänder, die für die Darstellung der Schwingungsmuster ausgewählt worden sind.

Aus Tab. IX wird ersichtlich, dass es trotz des recht weitmaschigen Messgitters möglich ist, die Schwingungsmuster zu identifizieren. Maximal  $m = 3$  Knotendurchmesser und  $n = 2$  Knotenkreise konnten nachgewiesen werden. Die zugehörigen Frequenzen reichen von 82,5 Hz für die 0-1-Schwingung bis zu 470,6 Hz für die 2-2-Schwingung.

Tab. IX. Schwingungsmuster des großen Java-Gongs Nr. VIII



### 3.10. Großer Java-Gong Nr. IX

Der andere Java-Gong (Nr. IX, Gong Ageng) ist ohne sowie mit Messgitter in Fig. 33 abgebildet. Seine Schwingung wurde an 305 Punkten erfasst (Twork (1997)). Die übrigen Para-

meter stimmen mit denen beim Gong Nr. **VIII** überein. So war die Messbandbreite 500 Hz und der Abstand zwischen den Messfrequenzen 2,5 Hz. Fig. 34 gibt die Gesamtübertragungsfunktion wieder. Deren Niveau liegt niedriger als bei den anderen Instrumenten. Da dieser Gong größer und schwerer ist, muss eine größere Kraft aufgewandt werden, um eine vorgegebene Schwingamplitude hervorzurufen. Innerhalb derselben Messbandbreite treten auch deutlich mehr Maxima als bei vorher betrachteten Gong Suwukan (Nr. **VIII**) auf.

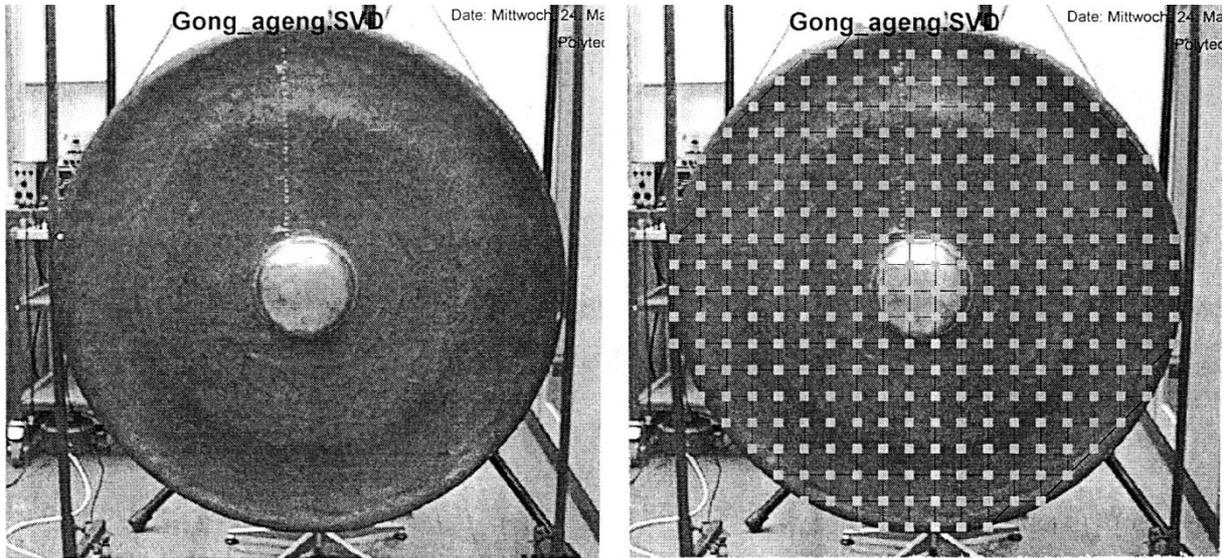
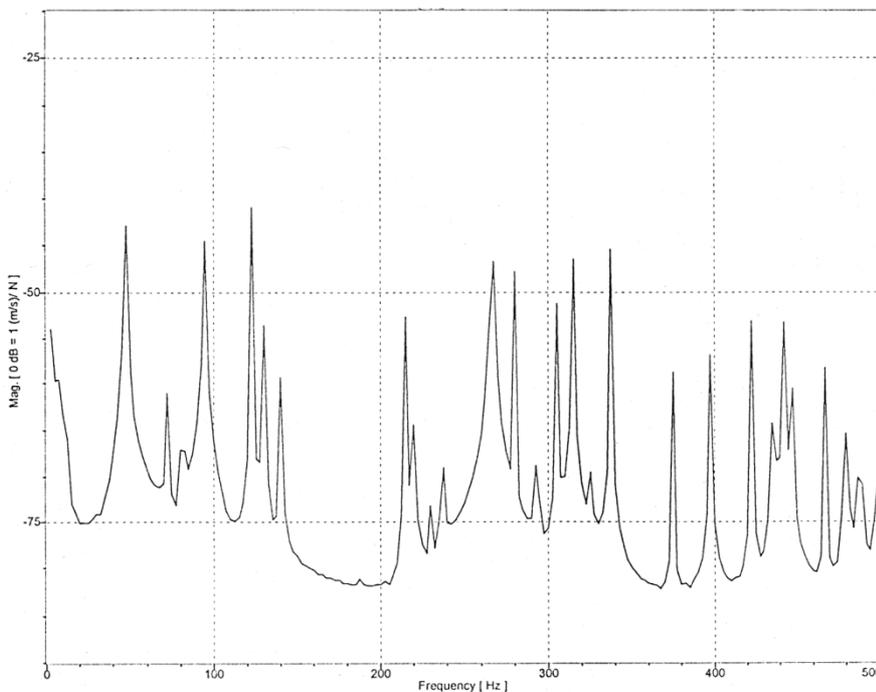


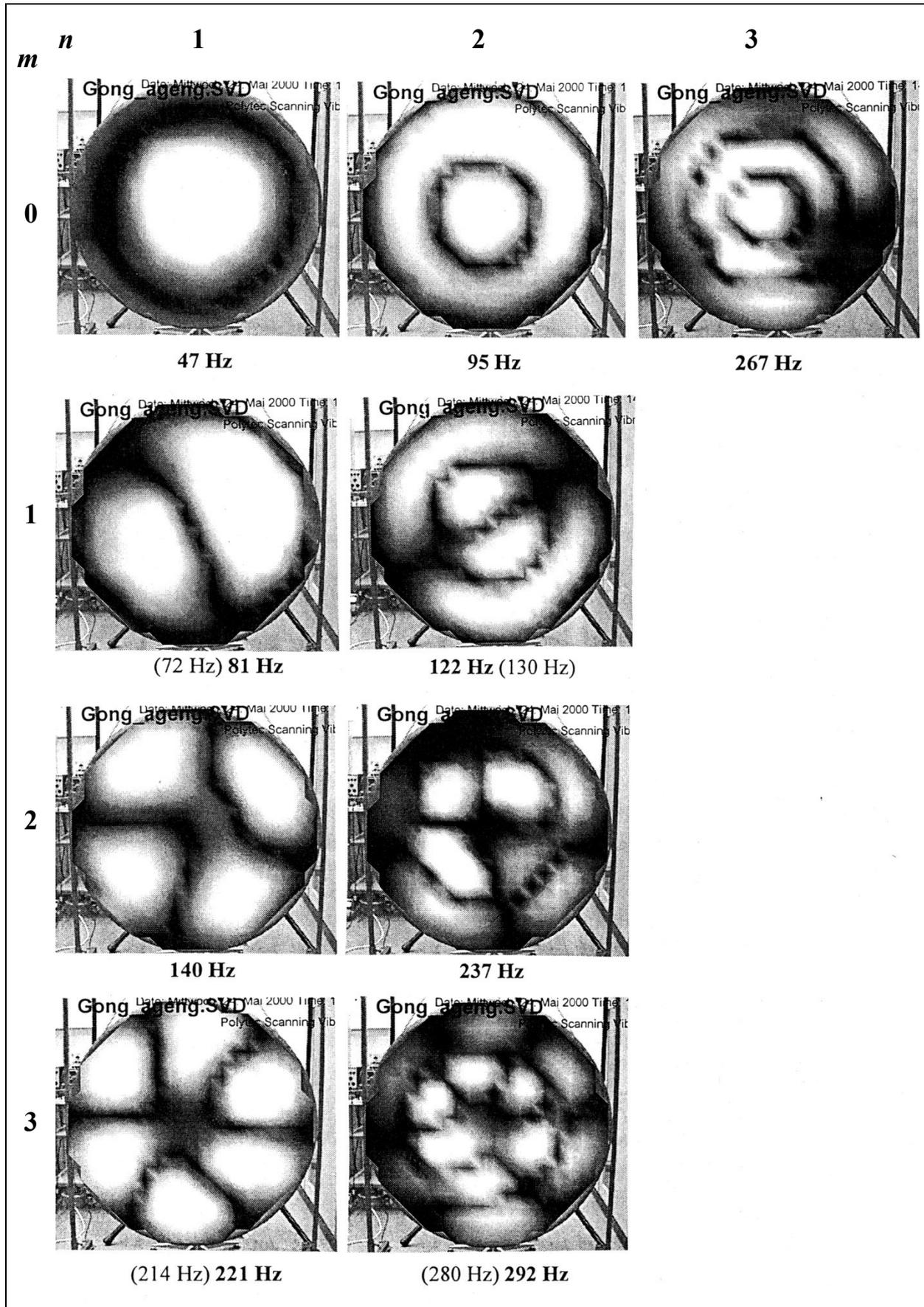
Fig. 33. Großer Java-Gong Nr. **IX**. Links: aufgehängt zur Messung; rechts: mit Messgitter.



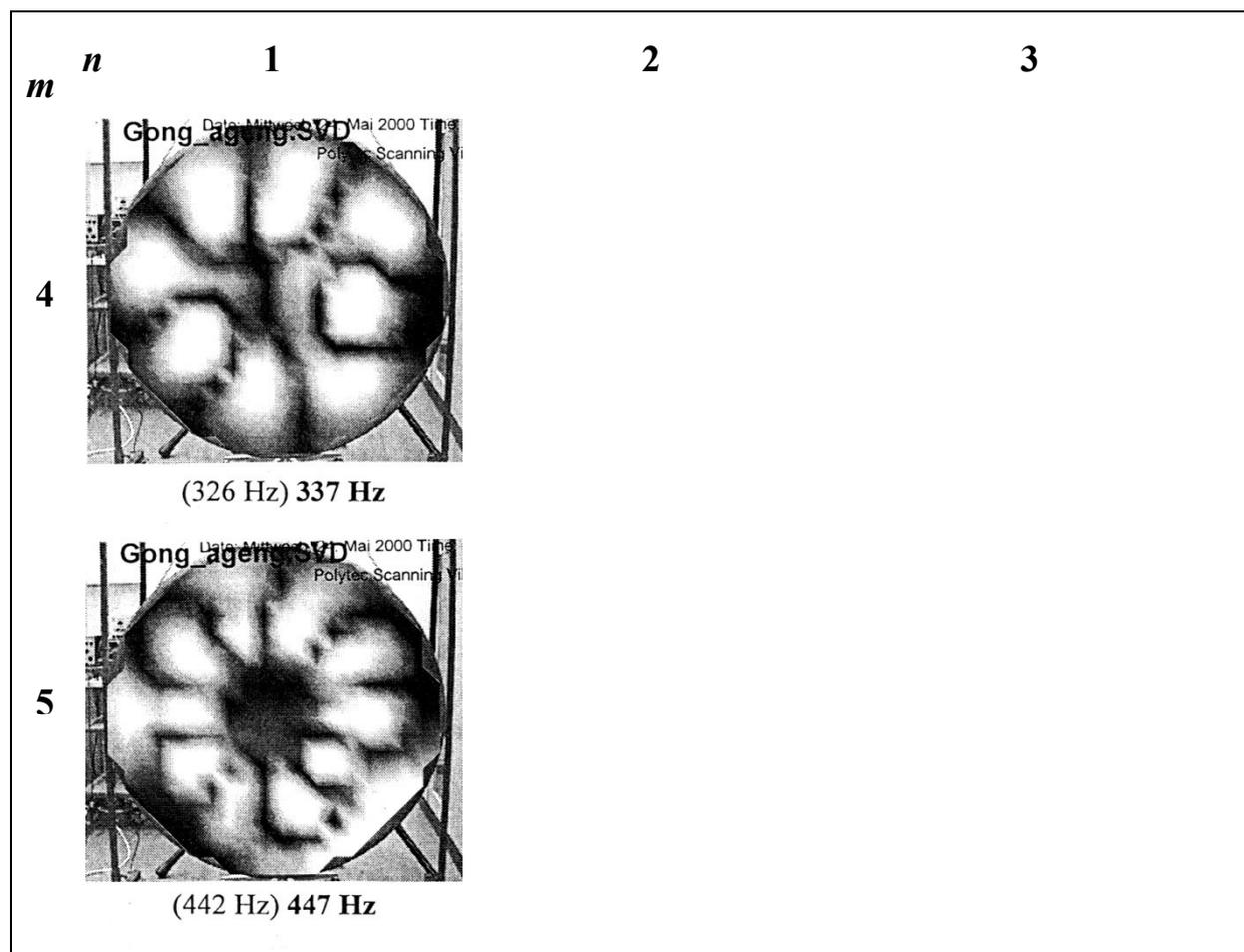
| Band No. | Peak / Hz |
|----------|-----------|
| 1        | 47.5      |
| 2        | 72.5      |
| 3        | 80.6      |
| 4        | 95.0      |
| 5        | 122.5     |
| 6        | 130.0     |
| 7        | 140.0     |
| 8        | 214.4     |
| 9        | 220.6     |
| 10       | 237.5     |
| 11       | 267.5     |
| 12       | 280.0     |
| 13       | 292.5     |
| 14       | 305.0     |
| 15       | 315.0     |
| 16       | 325.9     |
| 17       | 337.5     |
| 18       | 375.0     |
| 19       | 397.5     |
| 20       | 422.5     |
| 21       | 442.5     |
| 22       | 447.5     |
| 23       | 467.5     |

Fig. 34. Großer Java-Gong Nr. **IX**. Links: Gesamt-Übertragungsfunktion im Pegelmaß  $re\ 1m/(Ns)$ ; rechts: Frequenzbänder, die für die Darstellung der Schwingungsmuster ausgewählt worden sind.

Tab. Xa. Schwingungsmuster des großen Java-Gongs Nr. IX Teil 1



Tab. Xb. Schwingungsmuster des großen Java-Gongs Nr. IX Teil 2



Wie der Tabelle im rechten Teil von Fig. 34 zu entnehmen ist, wurden daraus 23 Maxima ausgewählt, deren Frequenzen aufgelistet sind. Sechs der Schwingungsmuster, die sich dafür ergeben, konnten nicht zweifelsfrei in das  $m$ - $n$ -Periodensystem eingeordnet werden. Sie gehören zu den (gerundeten) Frequenzen 305 Hz, 315 Hz, 375 Hz, 397 Hz, 422 Hz und 467 Hz. Von den übrigen Schwingungen erweisen sich sechs als bloße Varianten, die durch die eingeklammerten, normal gedruckte Frequenzangaben gekennzeichnet sind. In Tab. X sind die verbleibenden Schwingungsbilder, die den fett gedruckten Frequenzen zuzuordnen sind, zusammengestellt.

Da das Messgitter relativ grob ist, ist eine verlässliche Einordnung der Schwingungsmuster naturgemäß um so schwieriger, je größer die Anzahl der Knotenlinien wird. Mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit lassen sich im hier untersuchten Bereich von Frequenzen bis 500 Hz elf Grundmuster identifizieren. Diese weisen maximal  $m = 5$  Knotendurchmesser und  $n = 3$  Knotenkreise auf. Die tieffrequenten Schwingungsmuster sind bei Varsányi (2000b) auf eine etwas andere Art dargestellt.

### 3.11. Zusammenfassende Bemerkung

Für eine Reihe von Gongs wurde mittels Laser-Vibrometrie die wandnormale Schwinggeschwindigkeit bestimmt. Angeregt wurden die Gongs durch wiederholbares Pseudo-Rauschen, das über einen elektrodynamischen Schwingerreger von der Rückseite her nahe der

Mitte auf den Schlagbuckel wirkte. Aus der Anregungskraft und der Schwinggeschwindigkeit wurde für jeden einzelnen Messpunkt eine Übertragungsfunktion ermittelt. Aus sämtlichen Einzel-Übertragungsfunktionen wurde eine Gesamt-Übertragungsfunktion gebildet. Anhand der Maxima dieser Gesamt-Übertragungsfunktion wählte der Experimentator diejenigen Frequenzen aus, für die im nächsten Schritt die Schwingungsmuster dargestellt wurden. Der Betrag der Schwinggeschwindigkeit wurde in Graustufen visualisiert.

In ihrer Mehrzahl lassen sich diese Schwingungsmuster zweifelsfrei anhand ihrer Knotenlinien klassifizieren. Die Knoten, die in Umfangsrichtung verlaufen, werden als Knotenkreise und ihre Anzahl mit  $n$  bezeichnet. Es tritt mindestens ein Knotenkreis auf, der nahe dem Rand liegt. Im Höchstfall wurden vier Knotenkreise nachgewiesen. Die Knoten in radialer Richtung wurden vereinfacht als Knotendurchmesser bezeichnet; das Formelzeichen  $m$  charakterisiert ihre Anzahl. Die gewählte Bezeichnung trifft in vollem Umfang nur für  $m = 1$  zu. Bei zwei oder mehr "Knotendurchmessern" gehen die Knotenlinien in aller Regel nicht mehr durch den Mittelpunkt des Gongs. Vielmehr bildet sich auf dem und um den Schlagbuckel herum eine Zone aus, in der häufig ein andersartiges Schwingungsverhalten als im äußeren Ring zu beobachten ist. Es wäre daher in machen Fällen treffender, als Ordnungskriterium die halbe Anzahl von Knotenradien heranzuziehen und zu präzisieren, in welchem Bereich des Gongs die angesprochenen Linien auftreten. Im Interesse einer einfachen und einheitlichen Klassifizierung wird trotzdem an der nicht immer korrekten Bezeichnung "Knotendurchmesser" festgehalten. Maximal konnten  $m = 9$  Knotendurchmesser nachgewiesen werden.

Es liegen nun Bilder der mechanischen Schwingungen von insgesamt neun Gongs vor. Der Messfrequenzbereich umfasst bei den großen Gongs mindestens 500 Hz, bei den kleinen und mittleren Gongs 1000 Hz und in einem Fall 2000 Hz. Die Schwingungsmuster wurden auf die beschriebene Weise ermittelt und in  $m$ - $n$ -Periodensystemen dargestellt. Damit sind erste Erkenntnisse über die örtliche Verteilung der Schwingung auf der Oberfläche von sieben Burma-Gongs und zwei Java-Gongs verfügbar. Die experimentellen Befunde beschränken sich auf kleine Anregungskräfte und kleine Schwingungsamplituden und kennzeichnen somit das lineare Schwingungsverhalten.

## 4. MODALANALYSE AN GONGS

In diesem Kapitel wird überprüft, inwieweit die bisher bestimmten Schwingungsmuster tatsächlich das Eigenschwingungsverhalten der Gongs beschreiben. Dazu werden die vorliegenden Messdaten, die mit Hilfe des Scanning Vibrometers gewonnen wurden, einer weitergehenden Auswertung unterzogen. Somit deutet die Überschrift nicht auf die numerische, sondern auf die experimentelle Modalanalyse hin.

### 4.1. Messung und Auswertung

Im ersten Schritt wurden Messungen der Art durchgeführt, wie sie im vorhergehenden Kapitel geschildert sind; vgl. hierzu Twork (1997) sowie Winter und Wörner (2000). Untersuchungsobjekte waren vier Burma-Gongs aus dem Ensemble der Instrumente, die in Tab. I aufgelistet sind. Das Laser-Vibrometer wurde dazu genutzt, die transversale Komponente der Oberflächenschwingung zu messen. Jeder der Datensätze wurde zunächst auf dieselbe "konventionelle" Weise dadurch ausgewertet, dass die Maxima der jeweiligen Gesamt-Übertragungsfunktion gesucht wurden. Wie dies bereits in Abschnitt 3.1.2 geschildert worden ist, wurden für die zugehörigen Frequenzen die Schwingungen der Oberfläche visualisiert. Die Ergebnisse sind *Operating Deflection Shapes* (Richardson (1997)), die hier als *Schwingungsmuster* bezeichnet werden.

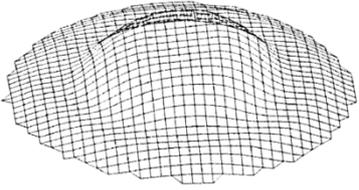
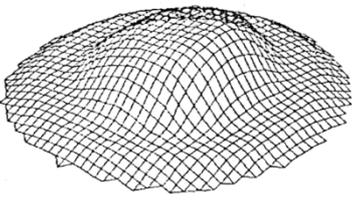
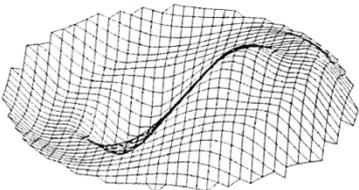
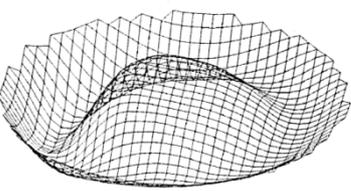
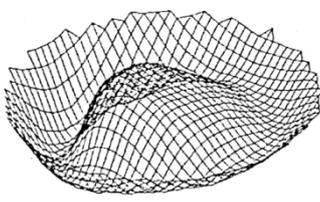
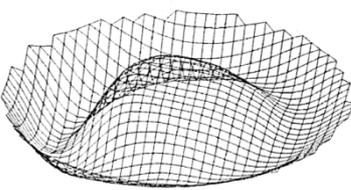
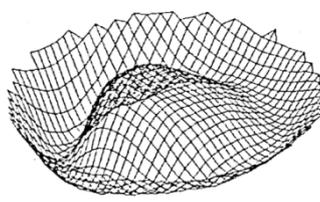
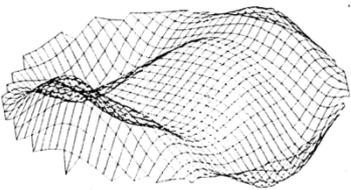
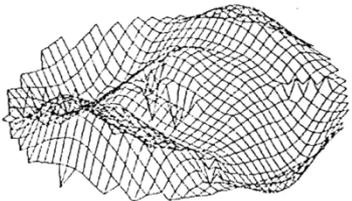
In einem nachfolgenden Schritt wurden die vorliegenden Datensätze einer intensiveren Bearbeitung unterzogen. Aus dem Steuercomputer des Scanning Vibrometers wurden die Messdaten über das Datennetz als Universal Files in einen anderen Rechner übertragen, auf dem das Modalanalyse-System StarModal der Firma SMS installiert ist. Mit diesem Programmpaket ist es möglich, die modalen Parameter zu extrahieren und damit Aufschluss über das Eigenschwingungsverhalten des Gongs zu erhalten. Als wesentliches Ergebnis liegen die Eigenschwingungsformen vor, die als *Moden* bezeichnet werden. Zu jeder Mode gehören eine Eigenfrequenz und eine modale Dämpfung. Die Eigenfrequenzen sind im vorliegenden Zusammenhang von besonderer Bedeutung, während die Dämpfung nicht weiter betrachtet wird.

Die Moden werden in StarModal mit einem 3D-Gitter dargestellt. Eine Glättung der dargestellten Werte ist nicht vorgesehen. Um einen möglichst direkten Vergleich zu gewährleisten, werden im Folgenden die Schwingungsmuster ohne Glättungsfunktion ("Filtering") ebenfalls anhand eines Gitters dargestellt ("3D Mesh"). Die Überhöhung und der Betrachtungswinkel sind so gewählt, dass die direkten Ergebnisse der Vibrometer-Messung möglichst gut mit den Resultaten der Modalanalyse zu vergleichen sind. Schwingungsmuster und Moden sind samt den zugehörigen Frequenzen tabellarisch zusammengestellt.

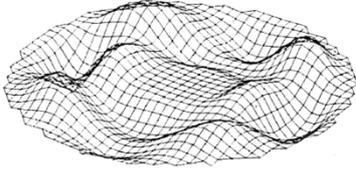
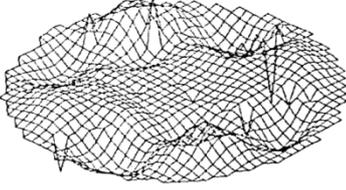
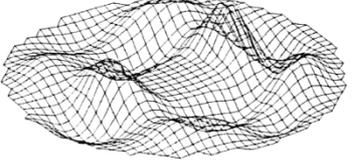
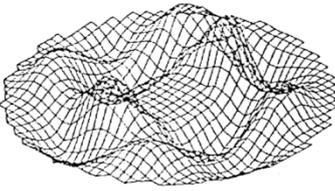
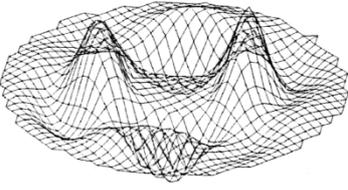
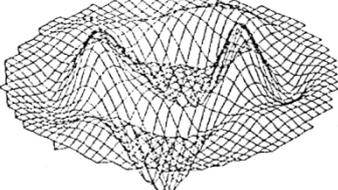
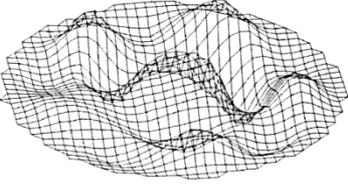
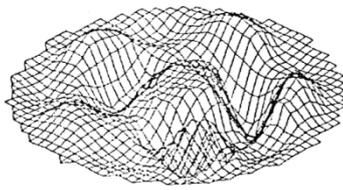
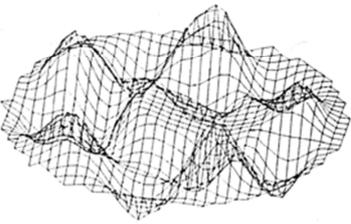
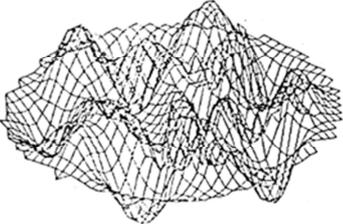
### 4.2. Moden des kleinen Burma-Gongs Nr. I

Ergebnisse für den kleinsten untersuchten Gong finden sich in Tab. XI. Es wurden 932 Messpunkte verwendet. Die Bandbreite war 1,6 kHz mit einem Abstand von 2 Hz zwischen den Messfrequenzen. Im rechten Teil ist eine Auswahl derjenigen Moden dargestellt, für welche die Untersuchungen von Winter und Wörner (2000) stabile Resultate ergeben haben. Die entsprechenden Schwingungsmuster, die man unmittelbar aus den Vibrometer-Daten erhält, sind links daneben dargestellt. Darunter sind jeweils die zugehörigen Frequenzen angegeben. Beim Vergleich ist zu beachten, dass die direkte Auswertung der Vibrometer-Messung Frequenz-

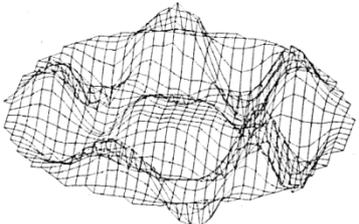
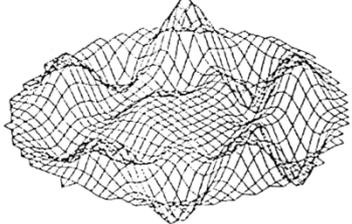
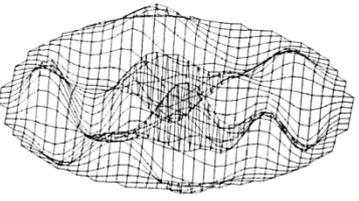
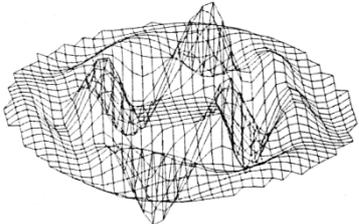
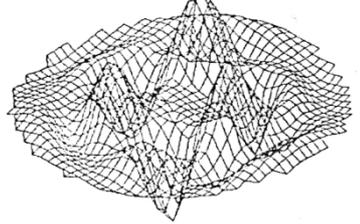
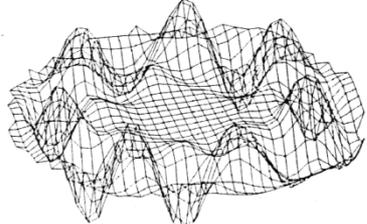
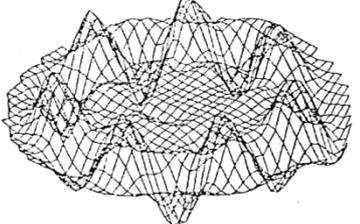
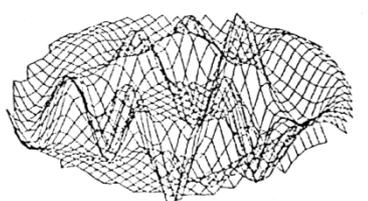
Tab. XIa. Schwingungsmuster und Moden des kleinen Burma-Gongs Nr. I samt zugehörigen Frequenzen Teil I

| <b>Schwingungsmuster</b><br>(Scanning Vibrometer)   | <b>Mode</b><br>(StarModal)   |
|---|--|
|  <p data-bbox="502 622 598 660">160 Hz</p>     |  <p data-bbox="925 622 1045 660">160,9 Hz</p>      |
|  <p data-bbox="494 974 598 1012">258 Hz</p>    | <p data-bbox="853 840 1133 878">keine Mode gefunden</p>  |
|  <p data-bbox="510 1332 614 1370">322 Hz</p> |  <p data-bbox="925 1332 1045 1370">321,5 Hz</p>  |
|  <p data-bbox="510 1691 614 1729">390 Hz</p> |  <p data-bbox="925 1691 1045 1729">390,9 Hz</p>  |
|  <p data-bbox="510 2038 614 2076">440 Hz</p> |  <p data-bbox="925 2038 1061 2076">440, 8 Hz</p> |

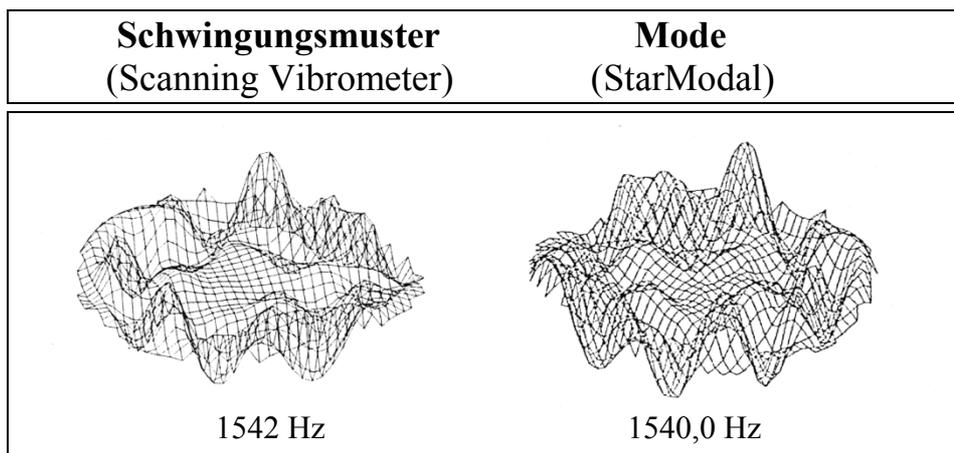
Tab. XIb. Schwingungsmuster und Moden des kleinen Burma-Gongs Nr. I samt zugehörigen Frequenzen Teil 2

| Schwingungsmuster<br>(Scanning Vibrometer)   | Mode<br>(StarModal)  |
|--|--|
|  <p data-bbox="512 629 608 663">834 Hz</p>      |  <p data-bbox="927 629 1023 663">826,2 Hz</p>      |
|  <p data-bbox="512 976 608 1010">868 Hz</p>     |  <p data-bbox="927 976 1023 1010">868,2 Hz</p>     |
|  <p data-bbox="512 1335 608 1368">904 Hz</p>  |  <p data-bbox="927 1335 1023 1368">902,0 Hz</p>  |
|  <p data-bbox="512 1682 608 1715">1032 Hz</p> |  <p data-bbox="927 1682 1023 1715">1030,0 Hz</p> |
|  <p data-bbox="512 2040 608 2074">1042 Hz</p> |  <p data-bbox="927 2040 1023 2074">1040,0 Hz</p> |

Tab. XIc. Schwingungsmuster und Moden des kleinen Burma-Gongs Nr. I samt zugehörigen Frequenzen Teil 3

| <b>Schwingungsmuster<br/>(Scanning Vibrometer)</b>   | <b>Mode<br/>(StarModal)</b>  |
|--|--|
|  <p data-bbox="507 622 619 656">1062 Hz</p>     |  <p data-bbox="927 622 1066 656">1060,0 Hz</p>     |
|  <p data-bbox="507 981 619 1014">1074 Hz</p>    |  <p data-bbox="919 981 1058 1014">1070,0 Hz</p>    |
|  <p data-bbox="507 1339 619 1373">1186 Hz</p> |  <p data-bbox="919 1339 1058 1373">1190,0 Hz</p> |
|  <p data-bbox="507 1686 619 1720">1442 Hz</p> |  <p data-bbox="919 1686 1058 1720">1440,0 Hz</p> |
|  <p data-bbox="507 2045 619 2078">1460 Hz</p> |  <p data-bbox="919 2045 1058 2078">1460,0 Hz</p> |

Tab. XI. Schwingungsmuster und Moden des kleinen Burma-Gongs Nr. I samt zugehörigen Frequenzen Teil 4



werte nur bei den diskreten Messfrequenzen und damit mit einer Auflösung liefern kann, wie sie dem Abstand zwischen den Messfrequenzen (in Tab. XI: 2 Hz) entspricht. Bei der Modalanalyse werden die Messwerte dagegen interpoliert und gegebenenfalls auch Zwischenwerte gebildet. Vergleicht man die Schwingungsbilder, so ist zu berücksichtigen, dass für die Darstellung zwei unterschiedliche Grafikprogramme verwendet wurden.

Die Gegenüberstellung zeigt, dass die Moden (rechte Spalte von Tab. XI) bezüglich ihrer Gestalt weitestgehend mit den Schwingungsmustern (linke Spalte von Tab. XI) übereinstimmen, die aus der direkten Analyse der unbearbeiteten Vibrometer-Daten resultieren. Rein optisch sind keine erwähnenswerten Unterschiede zu erkennen. In einem Fall (1-1-Schwingung bei 258 Hz) ist es nicht gelungen, die entsprechende Mode zu extrahieren. Dabei handelt es sich um eine Ausnahme. In aller Regel werden Moden errechnet, die hinsichtlich der Knotenlinien mit den Schwingungsmustern übereinstimmen, die sich für das benachbarte Maximum der Gesamt-Übertragungsfunktion ergeben.

Tab. XII gibt eine geraffte Zusammenstellung der Resultate. Links ist die Anzahl  $m$  der Knotendurchmesser sowie  $n$  der Knotenkreise angegeben. Die nächste Spalte enthält diejenige Frequenz, bei der die Gesamt-Übertragungsfunktion ein Maximum ausweist. Unter "Mode" ist diejenige Frequenz vermerkt, die das Modalanalyse-Programm als Eigenfrequenz errechnet. Diese dient als Referenz bei der anschließenden Berechnung der prozentualen Abweichung der beiden Frequenzen. Die relativen Differenzen sind im Promille-Bereich und überschreiten nie ein Prozent. So lässt sich feststellen, dass Moden in aller Regel nahe bei denjenigen Frequenzen errechnet werden, bei denen die Gesamt-Übertragungsfunktion maximal wird.

Ein Vergleich mit den Ergebnissen einer früheren Vibrometer-Messung am selben Objekt, die in Tab. II zusammengefasst sind, zeigt ebenfalls weitgehende Übereinstimmung. Die Abweichung der Frequenzen (vgl. Fig. 17) beträgt in einem Fall 3 Hz und ist sonst immer kleiner. Diese geringen Diskrepanzen lassen sich unter anderem als Folge der Diskretisierung erklären, die bezüglich der Frequenz bei der Schnellen Fourier-Transformation (FFT) unvermeidlich ist. Sie liegen in der Größenordnung, wie sie angesichts der unterschiedlichen Frequenzauflösungen zu erwarten sind. Es darf erwartet werden, dass eine Verfeinerung dieser Auflösung sowie die Verwendung desselben Frequenzrasters bei allen Messungen die Diskrepanzen noch weiter verringern würde.

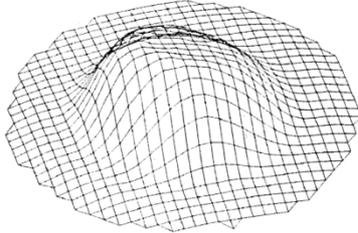
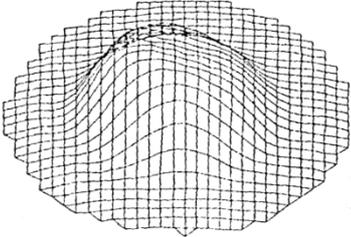
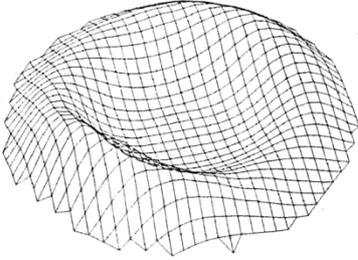
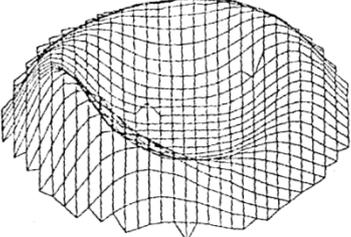
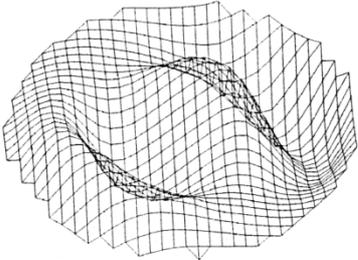
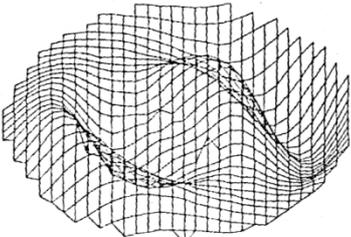
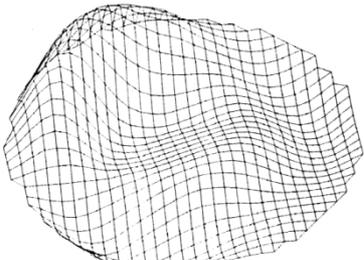
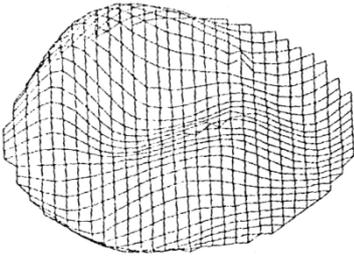
Tab. XII. Kleiner Burma-Gong Nr. I: Frequenzen der Schwingungsmuster (direkt ermittelt mit dem Scanning Vibrometer) und der Moden (bestimmt mittels Modalanalyse derselben Daten mit StarModal)

| <i>m</i> | <i>n</i> | Schwingungsmuster<br>Frequenz in Hz | Mode<br>Eigenfrequenz in Hz | rel. Frequenzdifferenz<br>bzgl. der Eigenfrequenz |
|----------|----------|-------------------------------------|-----------------------------|---|
| 0        | 1        | 160                                 | 160,9                       | - 0,56%   |
| 1        | 1        | 258                                 | ÷                           | ÷   |
| 0        | 2        | 322                                 | 321,5                       | + 0,15%   |
| 1        | 2        | 390                                 | 390,9                       | - 0,23%   |
| 2        | 1        | 440                                 | 440,8                       | - 0,18%   |
| 4        | 1        | 834                                 | 826,2                       | + 0,94%   |
| 4        | 1        | 868                                 | 868,6                       | - 0,07%   |
| 2        | 2        | 904                                 | 902,0                       | + 0,22%   |
| 5        | 1        | 1032                                | 1030,0                      | + 0,19%   |
| 5        | 1        | 1042                                | 1040,0                      | + 0,19%   |
| 5        | 1        | 1062                                | 1060,0                      | + 0,19%   |
| 5        | 2(?)     | 1074                                | 1070,0                      | + 0,37%   |
| 3        | 2        | 1186                                | 1190,0                      | - 0,34%   |
| 7        | 1        | 1442                                | 1440,0                      | + 0,14%   |
| 4        | 2        | 1460                                | 1460,0                      | 0,00%   |
| 7        | 2(?)     | 1542                                | 1540,0                      | + 0,13%   |

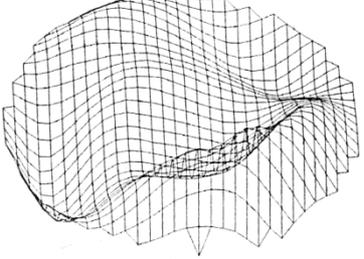
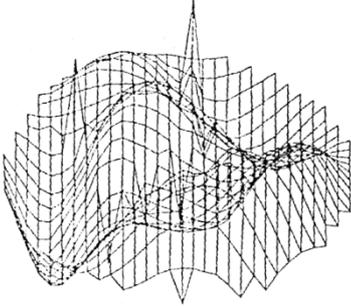
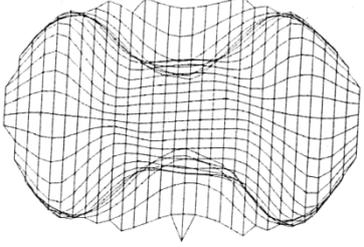
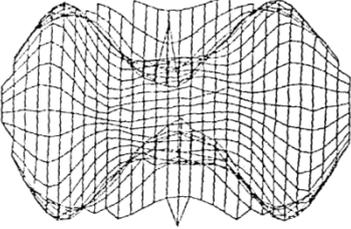
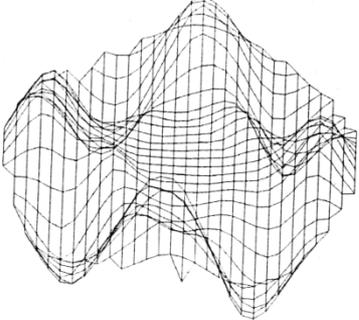
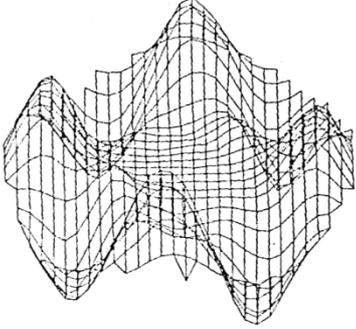
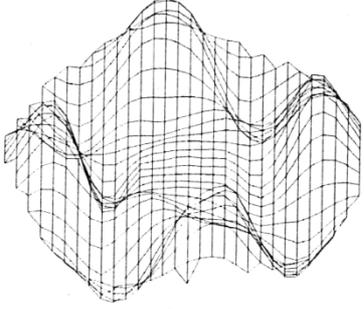
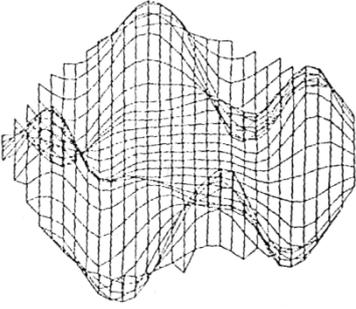
### 4.3. Moden des mittleren Burma-Gongs Nr. III

Der Gong Nr. III wurde auf dieselbe Weise untersucht; siehe Winter und Wörner (2000). Die Schwinggeschwindigkeit wurde an 665 Messpunkten erfasst. Die Messbandbreite war 1 kHz, der Abstand zwischen den Messfrequenzen 2,5 Hz. Resultate sind in Tab. XIII zusammen gestellt. Die Frequenzwerte samt Abweichungen finden sich in Tab. XIV.

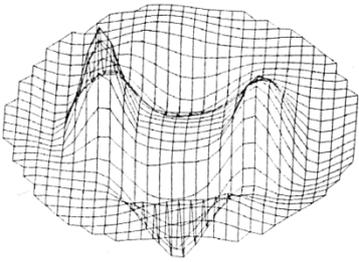
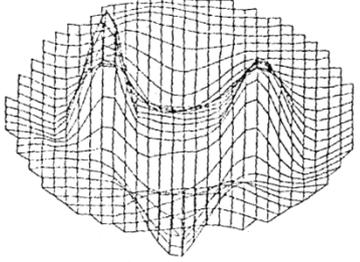
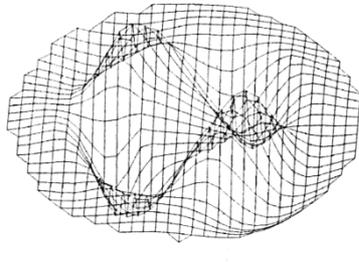
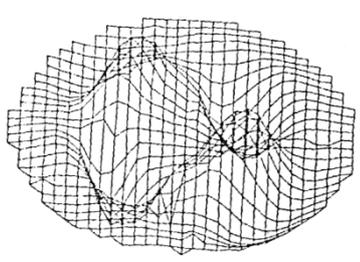
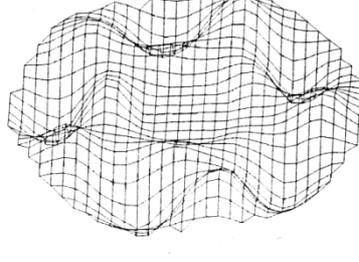
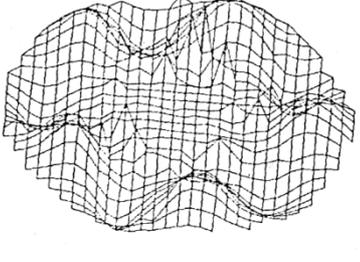
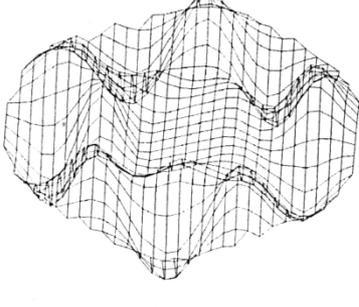
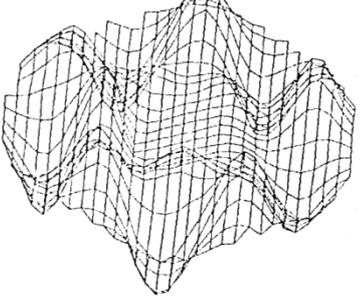
Tab. XIIIa. Schwingungsmuster und Moden des mittleren Burma-Gongs Nr. III samt Frequenzen Teil I

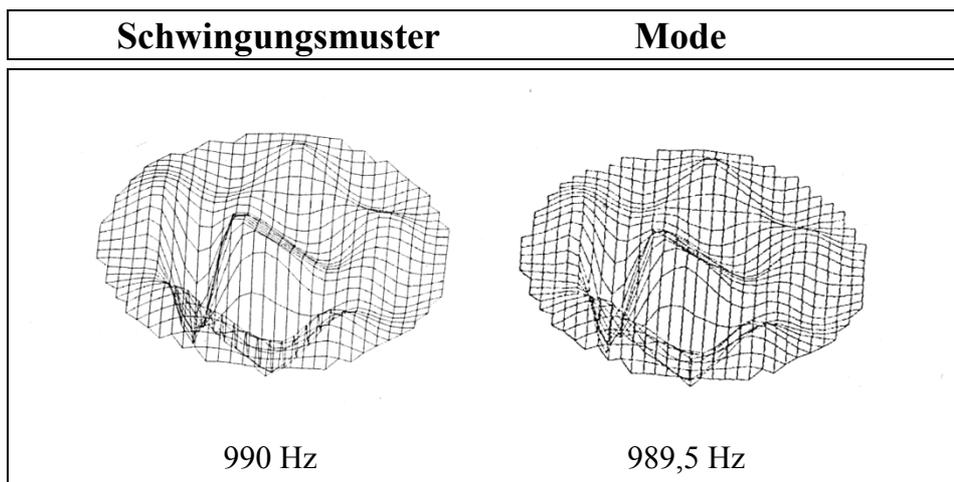
| <b>Schwingungsmuster</b><br>(Scanning Vibrometer)   | <b>Mode</b><br>(StarModal)  |
|---|---|
|  <p data-bbox="512 719 612 752">150 Hz</p>       |  <p data-bbox="916 719 1038 752">151,2 Hz</p>     |
|  <p data-bbox="512 1144 612 1178">330 Hz</p>    |  <p data-bbox="916 1144 1038 1178">331,5 Hz</p>  |
|  <p data-bbox="512 1570 635 1603">372,5 Hz</p> |  <p data-bbox="916 1570 1038 1603">372,0 Hz</p> |
|  <p data-bbox="512 1995 635 2029">402,5 Hz</p> |  <p data-bbox="916 1995 1038 2029">403,4 Hz</p> |

Tab. XIIIb. Schwingungsmuster und Moden des mittleren Burma-Gongs Nr. III samt Frequenzen Teil 2

| <b>Schwingungsmuster</b><br>(Scanning Vibrometer)   | <b>Mode</b><br>(StarModal)  |
|---|---|
|  <p data-bbox="512 723 611 757">445 Hz</p>     |  <p data-bbox="919 723 1034 757">444,8 Hz</p>     |
|  <p data-bbox="512 1149 611 1182">530 Hz</p>  |  <p data-bbox="919 1149 1034 1182">529,8 Hz</p>  |
|  <p data-bbox="512 1574 611 1608">710 Hz</p> |  <p data-bbox="919 1574 1034 1608">710,7 Hz</p> |
|  <p data-bbox="512 2000 611 2033">720 Hz</p> |  <p data-bbox="919 2000 1034 2033">721,3 Hz</p> |

Tab. XIIIc. Schwingungsmuster und Moden des mittleren Burma-Gongs Nr. III samt Frequenzen Teil 3

| <b>Schwingungsmuster</b><br>(Scanning Vibrometer)  | <b>Mode</b><br>(StarModal)  |
|--|---|
|  <p data-bbox="510 712 614 745">790 Hz</p>      |  <p data-bbox="917 712 1029 745">790,9 Hz</p>     |
|  <p data-bbox="510 1137 630 1171">817,5 Hz</p> |  <p data-bbox="917 1137 1029 1171">817,0 Hz</p>  |
|  <p data-bbox="510 1563 614 1597">935 Hz</p>  |  <p data-bbox="917 1563 1029 1597">935,4 Hz</p> |
|  <p data-bbox="510 2000 614 2033">955 Hz</p>  |  <p data-bbox="917 2000 1029 2033">954,7 Hz</p> |

Tab. XIIIa. Schwingungsmuster und Moden des mittleren Burma-Gongs Nr. **III** samt Frequenzen Teil 4

Der Vergleich mit einer anderen Vibrometer-Messung am selben Objekt (vgl. Tab. IVa und b) zeigt Übereinstimmung hinsichtlich der Schwingungsformen. Bezüglich der Frequenzen (Fig. 22) beobachtet man nur minimale Unterschiede. Diese betragen in zwei Fällen 2,5 Hz. Sonst sind sie kleiner oder verschwinden vollständig.

Auch für dieses Instrument ergibt die Modalanalyse Moden, die sehr weitgehend mit den Schwingungsmustern übereinstimmen, die man direkt aus den Vibrometer-Daten erhält. Rein optisch sind nur äußerst geringe Unterschiede zwischen zusammengehörigen Schwingungsbildern zu erkennen. Die Abweichungen hinsichtlich der Frequenzen können Tab. XIV entnommen werden. Typische Diskrepanzen betragen wenige Promille. Mit steigender Frequenz haben die prozentualen Unterschiede die Tendenz, kleiner zu werden. Dies liegt in der Tatsache begründet, dass der Abstand zwischen den Messfrequenzen über den gesamten Bereich konstant 2,5 Hz beträgt. Für die Frequenz der 0-1-Schwingung entspricht dies 1,67%. Bei der Frequenz der 5-1-Schwingung beträgt derselbe, absolut gesehen gleich große Schritt dagegen nur noch 0,26%. Die Vermutung ist begründet, dass die Abweichungen zwischen den Frequenzen der Schwingungsmuster und den Eigenfrequenzen im Wesentlichen auf der begrenzten Frequenzauflösung der FFT beruhen. Während den Schwingungsmustern naturgemäß nur Frequenzwerte im vorgegebenen Raster der Messfrequenzen zugeordnet werden können, sind die Eigenfrequenzen das Ergebnis einer Interpolation und können daher auch Zwischenwerte annehmen.

Der Gong Nr. **III** bildet oberhalb von etwa 1,2 kHz zahlreiche Schwingungsmuster aus, die sich anhand ihrer Knotenlinien nicht in das  $m$ - $n$ -Schema einordnen lassen; siehe hierzu Tab. IVc. Dabei handelt es sich höchstwahrscheinlich um Mischformen, die aus der Überlagerung mehrerer Moden resultieren. Winter und Wörner (2000) haben diesen Bereich nicht untersucht. Einerseits wäre es zwar interessant gewesen, der Frage nachzugehen, ob sich die zugrunde liegenden Elementarformen mit Hilfe der Modalanalyse extrahieren lassen. Andererseits ist zu vermuten, dass Schwingungen bei solch hohen Frequenzen nicht mehr "klangbildend" und demnach für das musikalische Signal eines Gongs ohne Belang sind.

Tab. XIV. Mittlerer Burma-Gong Nr. III: Frequenzen der Schwingungsmuster (direkt ermittelt mit dem Scanning Vibrometer) und der Moden (bestimmt mittels Modalanalyse derselben Daten mit StarModal)

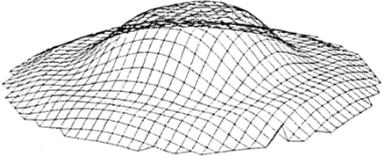
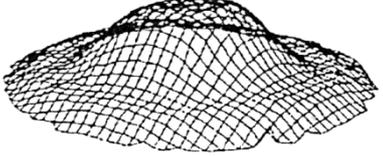
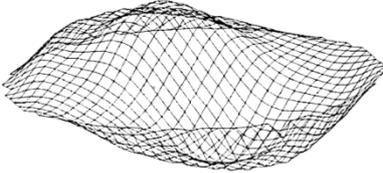
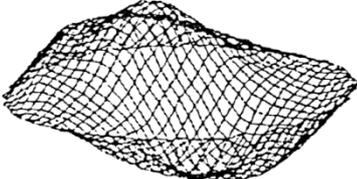
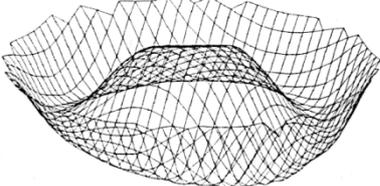
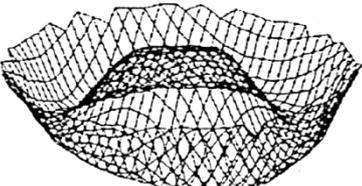
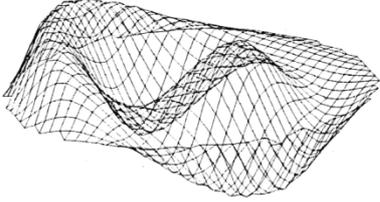
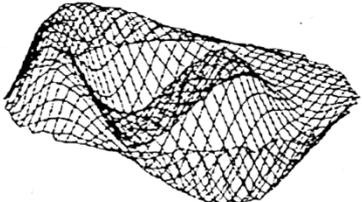
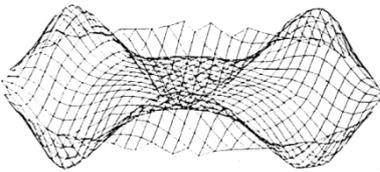
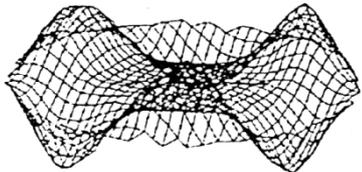
| <i>m</i> | <i>n</i> | Schwingungsmuster<br>Frequenz in Hz | Mode<br>Eigenfrequenz in Hz | rel. Frequenzdifferenz<br>bzgl. der Eigenfrequenz |
|----------|----------|-------------------------------------|-----------------------------|---|
| 0        | 1        | 150                                 | 151,2                       | - 0,77%   |
| 0        | 2        | 330                                 | 331,5                       | - 0,47%   |
| 1        | 2        | 372,5                               | 372,0                       | + 0,15%   |
| 1        | 2        | 402,5                               | 403,4                       | - 0,24%   |
| 2        | 1        | 445                                 | 444,8                       | + 0,03%   |
| 3        | 1        | 530                                 | 529,8                       | + 0,05%   |
| 4        | 1        | 710                                 | 710,7                       | - 0,01%   |
| 4        | 1        | 720                                 | 721,3                       | - 0,17%   |
| 2        | 2        | 790                                 | 790,9                       | - 0,12%   |
| 2        | 2        | 817,5                               | 817,0                       | + 0,06%   |
| 5        | 1        | 935                                 | 935,4                       | - 0,05%   |
| 5        | 1        | 955                                 | 954,7                       | + 0,03%   |
| 4(?)     | 2(?)     | 990                                 | 989,5                       | + 0,05%   |

## 4.4. Moden des großen Burma-Gongs Nr. V

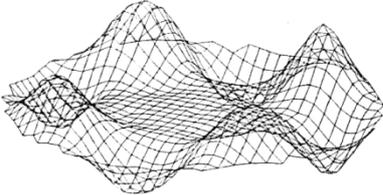
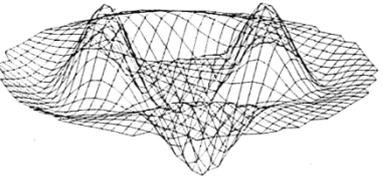
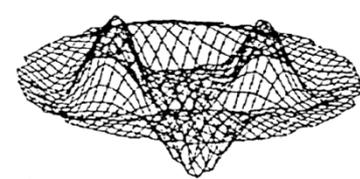
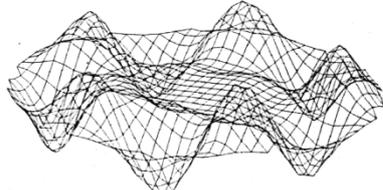
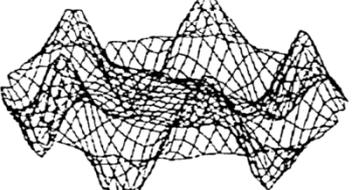
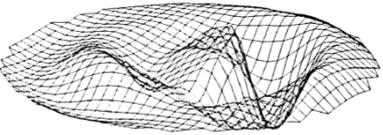
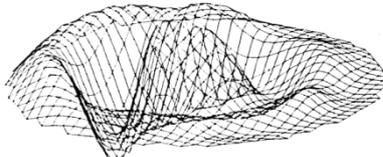
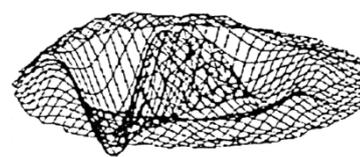
### 4.4.1. Erste Versuchsreihe

Twork (1997) hat den Gong Nr. V bei seinen Untersuchungen mit dem Vibrometer an 810 Messpunkten abgetastet. Die Messbandbreite wurde zu 1 kHz, der Abstand zwischen zwei benachbarten Messfrequenzen zu 1,25 Hz gewählt. Die Schwingungsmuster, wie sie direkt aus den Vibrometer-Daten folgen, sind links in Tab. XV zusammen gestellt. Daneben sind die Moden abgebildet, die sich als Ergebnis der anschließenden Modalanalyse derselben Daten ergeben haben.

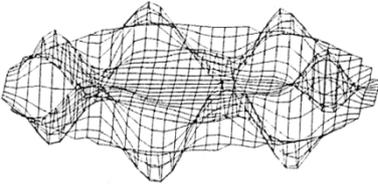
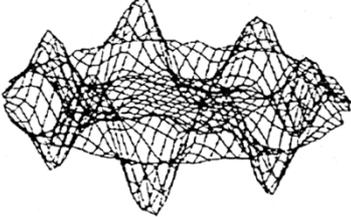
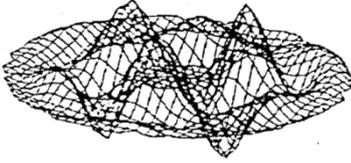
Tab. XVa. Schwingungsmuster und Moden des großen Burma-Gongs Nr. V samt Frequenzen Teil I

| Schwingungsmuster<br>(Scanning Vibrometer)  | Mode<br>(StarModal)  |
|---|--|
| <br>100,3 Hz   | <br>100,7 Hz   |
| <br>160,0 Hz   | <br>160,5 Hz   |
| <br>195,0 Hz | <br>195,6 Hz |
| <br>242,5 Hz | <br>242,9 Hz |
| <br>322,5 Hz | <br>322,1 Hz |

Tab. XVb. Schwingungsmuster und Moden des großen Burma-Gongs Nr. V samt Frequenzen Teil 2

| <b>Schwingungsmuster</b><br>(Scanning Vibrometer)   | <b>Mode</b><br>(StarModal)  |
|---|---|
|  <p data-bbox="502 638 630 672">455,0 Hz</p>     |  <p data-bbox="917 638 1045 672">456,4 Hz</p>     |
|  <p data-bbox="502 996 630 1030">596,3 Hz</p>    |  <p data-bbox="917 996 1045 1030">596,2 Hz</p>    |
|  <p data-bbox="502 1355 630 1388">630,0 Hz</p> |  <p data-bbox="917 1355 1045 1388">629,9 Hz</p> |
|  <p data-bbox="502 1702 630 1736">658,8 Hz</p> |  <p data-bbox="917 1702 1045 1736">657,3 Hz</p> |
|  <p data-bbox="502 2049 630 2083">678,8 Hz</p> |  <p data-bbox="917 2049 1045 2083">679,1 Hz</p> |

Tab. XVc. Schwingungsmuster und Moden des großen Burma-Gongs Nr. V samt Frequenzen Teil 3

| <b>Schwingungsmuster</b><br>(Scanning Vibrometer)  | <b>Mode</b><br>(StarModal)   |
|--|--|
|  <p data-bbox="507 640 624 674">800,0 Hz</p>  |  <p data-bbox="919 640 1035 674">799,9 Hz</p>  |
|  <p data-bbox="507 994 624 1028">837,5 Hz</p> |  <p data-bbox="919 994 1035 1028">838,1 Hz</p> |

Der Vergleich der Schwingungsmuster in der linken Spalte von Tab. XV mit den Schwingungsbildern und -frequenzen von Tab. VI zeigt eine hohe Reproduzierbarkeit: Zwei unterschiedliche Vibrometer-Messungen haben zu weitgehend identischen Ergebnissen geführt. Kleine Diskrepanzen resultieren vorwiegend aus der unterschiedlichen Frequenzauflösung, die hier 1,25 Hz ist und bei den Messungen in Abschnitt 3.6 mit 2,5 Hz halb so fein war. Ein Vergleich mit den Frequenzen aus der Tabelle von Fig. 26 lässt erkennen, dass die sich die Frequenzen nie um mehr als 1,25 Hz unterscheiden.

Der Vergleich der Schwingungsmuster in der linken Spalte Tab. XV mit den zugehörigen Moden in der rechten Spalte lässt auch für den vorliegenden Fall weitgehende Kongruenz erkennen. Die von Twork (1997) angegebenen Moden stimmen mit den Schwingungsmustern, die eine erneute Analyse der Messdaten liefert, weitestgehend überein. Tab. XVI ist zu entnehmen, dass dasselbe für die zugehörigen Frequenzen gilt. Wiederum ist die Tendenz zu beobachten, dass die prozentuale Abweichung um so kleiner wird, je höher die Frequenz wird. Während sie bei 100 Hz noch 0,4% beträgt, weicht im höherfrequenten Bereich die Frequenz, bei der sich in der Gesamt-Übertragungsfunktion ein Maximum ausbildet, nur noch um weniger als ein Promille von der entsprechenden Eigenfrequenz ab.

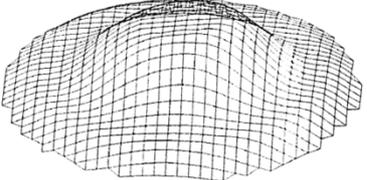
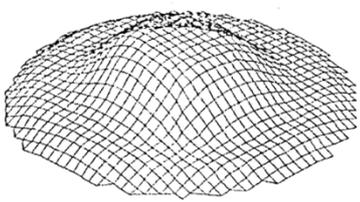
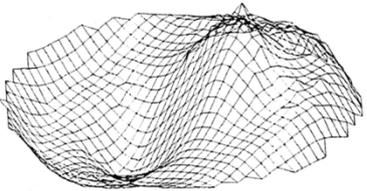
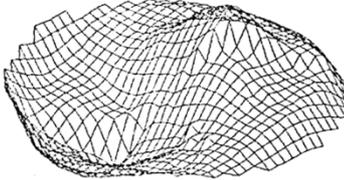
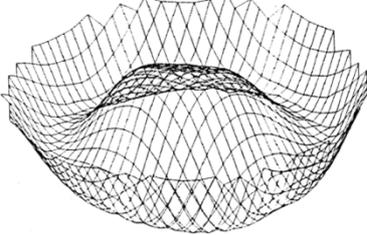
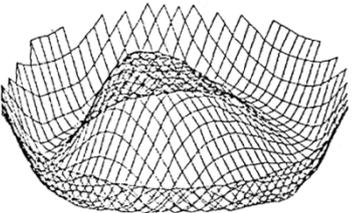
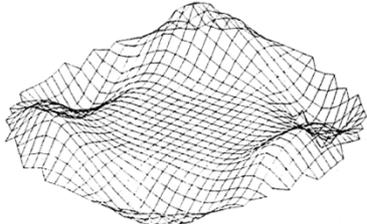
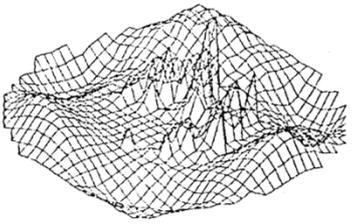
Tab. XVI. Großer Burma-Gong Nr. V: Frequenzen der Schwingungsmuster (nach Twork (1997) direkt ermittelt mit dem Scanning Vibrometer) und der Moden (bestimmt mittels Modalanalyse derselben Daten mit StarModal)

| <i>m</i> | <i>n</i> | Schwingungsmuster<br>Frequenz in Hz | Mode<br>Eigenfrequenz in Hz | rel. Frequenzdifferenz<br>bzgl. der Eigenfrequenz |
|----------|----------|-------------------------------------|-----------------------------|---|
| 0        | 1        | 100,3                               | 100,7                       | - 0,40%   |
| 1        | 1        | 160,0                               | 160,5                       | - 0,31%   |
| 0        | 2        | 195,0                               | 195,6                       | - 0,31%   |
| 1        | 2        | 242,5                               | 242,9                       | - 0,15%   |
| 3        | 1        | 322,5                               | 322,1                       | + 0,12%   |
| 4        | 1        | 455,0                               | 456,4                       | - 0,31%   |
| 2        | 2        | 596,3                               | 596,2                       | + 0,02%   |
| 5        | 1        | 630,0                               | 629,9                       | + 0,02%   |
| 1        | 3        | 658,8                               | 657,3                       | + 0,23%   |
| 0        | 3(?)     | 678,8                               | 679,1                       | - 0,04%   |
| 6        | 1        | 800,0                               | 799,9                       | + 0,01%   |
| 3        | 2        | 837,5                               | 838,1                       | - 0,07%   |

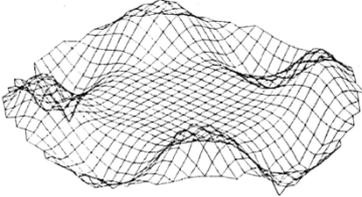
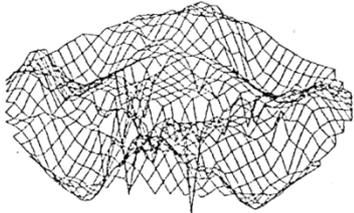
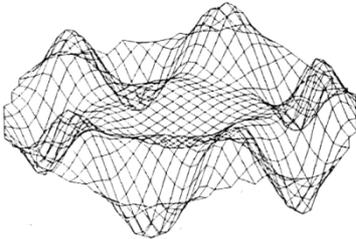
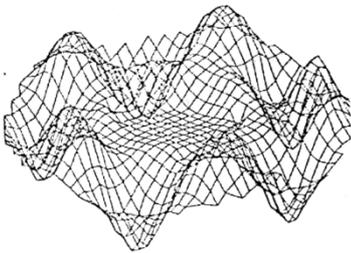
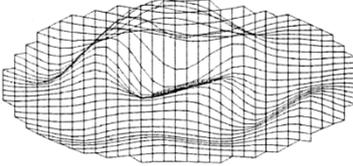
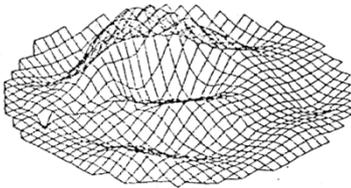
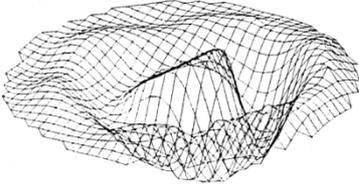
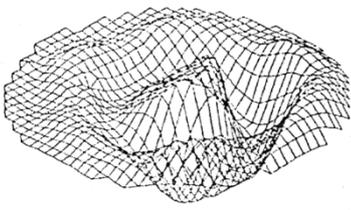
#### 4.4.2. Zweite Versuchsreihe

Um die Ergebnisse unterschiedlicher Modalanalysen am selben Objekt miteinander vergleichen zu können, sind ergänzend im Folgenden Resultate von Winter und Wörner (2000) aufgeführt, die sich ebenfalls auf den Gong Nr. V beziehen. Das Messgitter auf der Oberfläche des Gongs umfasste 806 Abtastpunkte, an denen mit dem Laser die Schwinggeschwindigkeit bestimmt wurde. Wie in der vorherigen Versuchsreihe war die Messbandbreite 1 kHz: Der Abstand zwischen den einzelnen Messfrequenzen war 2,5 Hz und damit doppelt so groß wie bei der vorher betrachteten Messung. Die Schwingungsmuster samt den entsprechenden Moden sind in Tab. XVII zusammen gestellt.

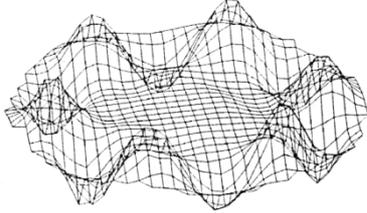
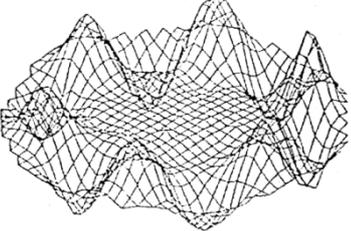
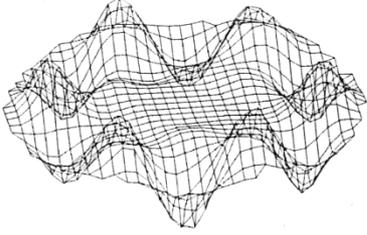
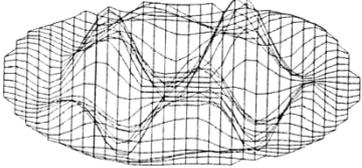
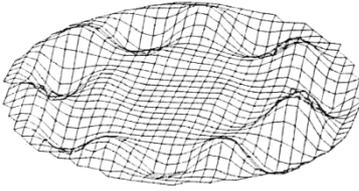
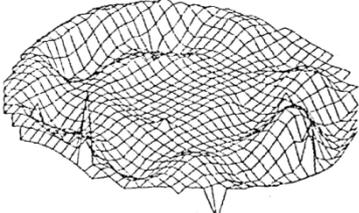
Tab. XVIIa. Schwingungsmuster und Moden des großen Burma-Gongs Nr. V samt Frequenzen Teil 1

| <b>Schwingungsmuster</b><br>(Scanning Vibrometer)   | <b>Mode</b><br>(StarModal)  |
|---|---|
|  <p data-bbox="510 672 614 705">100 Hz</p>       |  <p data-bbox="917 672 1029 705">100,7 Hz</p>     |
|  <p data-bbox="502 1064 630 1097">162,5 Hz</p>  |  <p data-bbox="917 1064 1045 1097">162,2 Hz</p>  |
|  <p data-bbox="510 1456 614 1489">195 Hz</p>   |  <p data-bbox="917 1456 1045 1489">195,5 Hz</p> |
|  <p data-bbox="502 1848 630 1881">322,5 Hz</p> |  <p data-bbox="917 1848 1045 1881">322,2 Hz</p> |

Tab. XVIIb. Schwingungsmuster und Moden des großen Burma-Gongs Nr. V samt Frequenzen Teil 2

| <b>Schwingungsmuster<br/>(Scanning Vibrometer)</b>  | <b>Mode<br/>(StarModal)</b>   |
|---|---|
|  <p data-bbox="512 674 612 707">455 Hz</p>       |  <p data-bbox="916 674 1034 707">454,9 Hz</p>     |
|  <p data-bbox="512 1061 612 1095">630 Hz</p>    |  <p data-bbox="916 1061 1034 1095">630,3 Hz</p>  |
|  <p data-bbox="512 1449 612 1482">650 Hz</p>   |  <p data-bbox="916 1449 1034 1482">650,5 Hz</p> |
|  <p data-bbox="504 1845 628 1879">677,5 Hz</p> |  <p data-bbox="916 1845 1040 1879">678,2 Hz</p> |

Tab. XVIIc. Schwingungsmuster und Moden des großen Burma-Gongs Nr. V samt Frequenzen Teil 3

| <b>Schwingungsmuster<br/>(Scanning Vibrometer)</b>  | <b>Mode<br/>(StarModal)</b>   |
|---|---|
|  <p data-bbox="507 645 625 678">792,5 Hz</p>     |  <p data-bbox="922 645 1024 678">792,4 Hz</p>     |
|  <p data-bbox="515 999 609 1032">800 Hz</p>      |  <p data-bbox="922 999 1024 1032">800,1 Hz</p>    |
|  <p data-bbox="515 1350 609 1384">840 Hz</p>   |  <p data-bbox="922 1350 1024 1384">839,9 Hz</p> |
|  <p data-bbox="507 1709 625 1742">957,5 Hz</p> |  <p data-bbox="922 1709 1024 1742">957,5 Hz</p> |

Auch im vorliegenden Fall zeigen Schwingungsmuster und Moden weitestgehende Kongruenz. Die Übereinstimmung der zugehörigen Frequenzen tritt in Tab. XVIII deutlich zutage. Wiederum prägt sich die im starren Frequenzraster der FFT begründete Tendenz aus, dass die prozentuale Abweichung mit wachsender Frequenz abnimmt. Bei 100 Hz beträgt sie noch 0,7%. Im höherfrequenten Bereich unterscheidet sich die Frequenz, die anhand eines Maximums der Gesamt-Übertragungsfunktion ermittelt worden ist, jedoch nur noch um weniger als ein Promille von der entsprechenden Eigenfrequenz.

Tab. XVIII. Großer Burma-Gong Nr. V: Frequenzen der Schwingungsmuster (nach Winter und Wörner (2000) direkt ermittelt mit dem Scanning Vibrometer) und der Moden (bestimmt mittels Modalanalyse derselben Daten mit StarModal)

| <i>m</i> | <i>n</i> | Schwingungsmuster<br>Frequenz in Hz | Mode<br>Eigenfrequenz in Hz | rel. Frequenzdifferenz<br>bzgl. der Eigenfrequenz |
|----------|----------|-------------------------------------|-----------------------------|---|
| 0        | 1        | 100                                 | 100,7                       | - 0,70%   |
| 1        | 1        | 162,5                               | 162,2                       | + 0,20%   |
| 0        | 2        | 195                                 | 195,5                       | - 0,25%   |
| 3        | 1        | 322,5                               | 322,2                       | + 0,08%   |
| 4        | 1        | 455                                 | 454,9                       | + 0,02%   |
| 5        | 1        | 630                                 | 630,3                       | - 0,04%   |
| 2        | 2        | 650                                 | 650,5                       | - 0,07%   |
| 0        | 3(?)     | 677,5                               | 678,2                       | - 0,10%   |
| 6        | 1        | 792,5                               | 792,4                       | + 0,01%   |
| 6        | 1        | 800                                 | 800,1                       | - 0,02%   |
| 3        | 2        | 840                                 | 839,9                       | + 0,02%   |
| 7        | 1        | 957,5                               | 957,5                       | 0,00%   |

#### 4.4.3. Vergleich der Frequenzen

Der Vergleich zwischen den Tab. VI, XV und XVII zeigt eine hohe Reproduzierbarkeit sowohl der Schwingungsmuster als auch der zugehörigen Frequenzen. Offenkundig haben drei unterschiedliche Messungen mit dem Scanning Vibrometer zu weitgehend identischen Schwingungsbildern geführt. Die nachstehende Tab. XIX soll es ermöglichen, die Frequenzen unmittelbar miteinander zu vergleichen. Ist ein Wert eingeklammert, so ist er mit dem zugehörigen Schwingungsbild zwar nicht in der entsprechenden Tab. XV bzw. XVII aufgeführt, hat sich jedoch bei der Analyse der gemessenen Gesamt-Übertragungsfunktion als Resultat ergeben. Die Frequenzauflösung war für die mittlere Spalte 1,25 Hz, sonst 2,5 Hz. Den letztgenannten Wert überschreiten die Differenzen zwischen den Frequenzen, die aus drei voneinander unabhängig durchgeführten Vibrometer-Messung stammen, in keinem Fall.

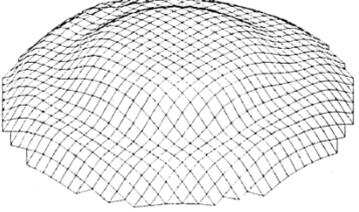
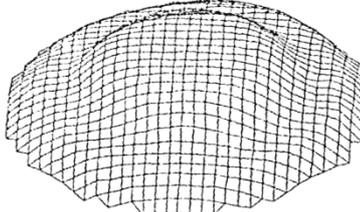
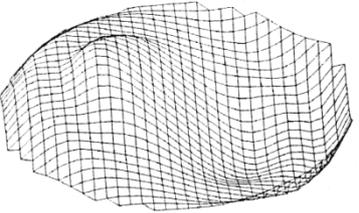
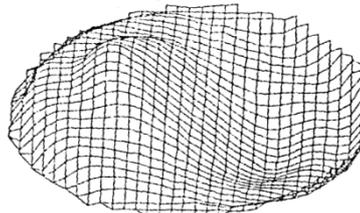
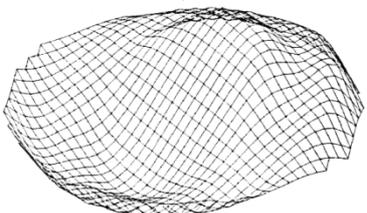
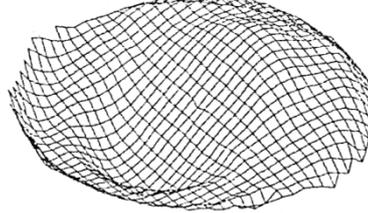
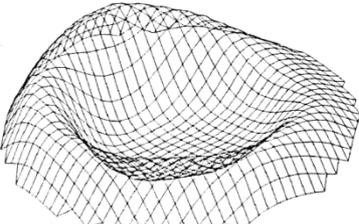
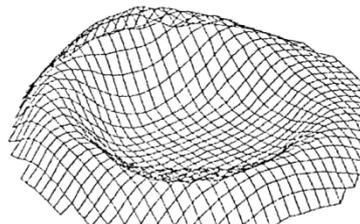
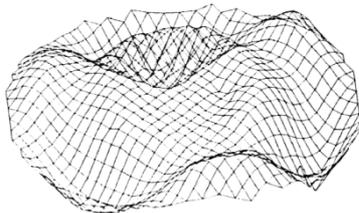
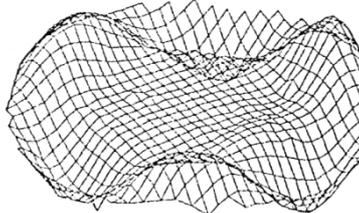
Tab. XIX. Großer Burma-Gong Nr. V: Frequenzen der Schwingungsmuster, direkt ermittelt mit dem Scanning Vibrometer, nach Twork (1997), Bogolowski (1999) bzw. Winter und Wörner (2000)

|          |          | <b>Frequenz des Schwingungsmusters in Hz gemäß</b> |                                |   |
|----------|----------|--|--------------------------------|---|
| <i>m</i> | <i>n</i> | <b>Tab. VI</b><br>Bogolowski (1999)                | <b>Tab. XV</b><br>Twork (1997) | <b>Tab XVII</b><br>Winter und Wörner (2000) |
| 0        | 1        | 100,0  | 100,25                         | 100,0                                       |
| 1        | 1        | 160 Hz/162,5                                       | 160,0                          | 162,5                                       |
| 0        | 2        | 195,0  | 195,0                          | 195,0                                       |
| 1        | 2        | 242,5  | 242,5                          | (242,5)                                     |
| 3        | 1        | 322,5  | 322,5                          | 322,5                                       |
| 4        | 1        | 455,0  | 455,0                          | 455,0                                       |
| 2        | 2        | 595,0  | 596,25                         | (600,0)                                     |
| 5        | 1        | 630,0  | 630,0                          | 630,0                                       |
| 1        | 3(?)     | 650,0  | (650,0)                        | 650,0                                       |
| 1        | 3(?)     | 657,5  | 658,75                         | (657,5)                                     |
| 0        | 3(?)     | 680,0  | 678,75                         | 677,5                                       |
| 6        | 1        | 792,5  | (792,5)                        | 792,5                                       |
| 6        | 1        | 800,0  | 800,0                          | 800,0                                       |
| 3        | 2        | 837,5  | 837,5                          | 840,0                                       |
| 7        | 1        | 957,5  | (957,5)                        | 957,5                                       |

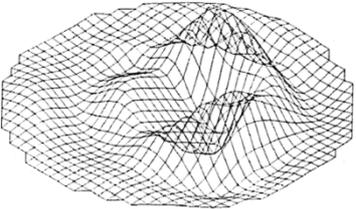
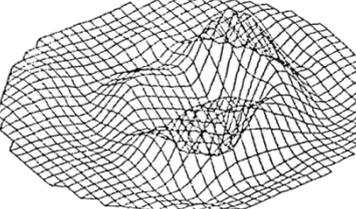
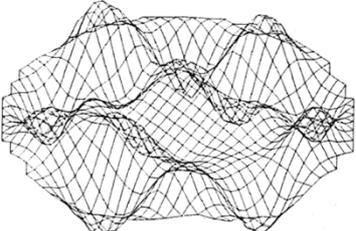
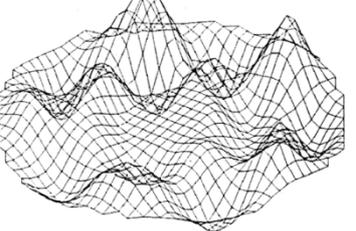
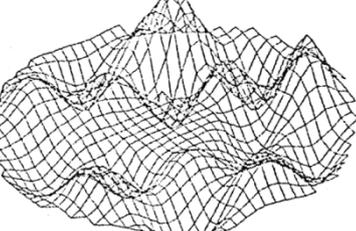
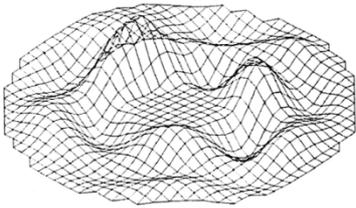
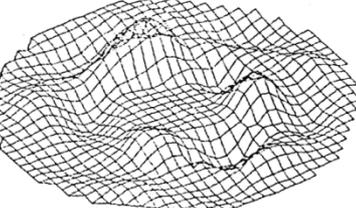
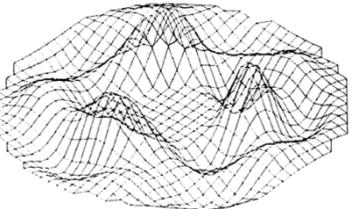
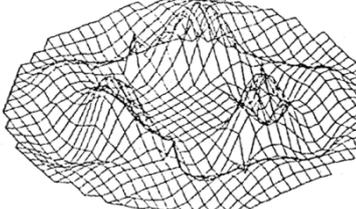
#### 4.5. Moden des großen Burma-Gongs Nr. VI

Auf der Oberfläche des großen Burma-Gongs Nr. VI wurden 786 Messpunkte gleichmäßig verteilt. Der Frequenzbereich reichte bis 1 kHz, wobei die einzelnen Messfrequenzen sich um jeweils 2,5 Hz unterschieden. Dreizehn Schwingungsmuster und ebenso viele Moden, wie sie Winter und Wörner (2000) ausgewählt haben, sind in Tab. XX zusammengefasst.

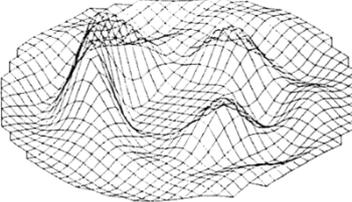
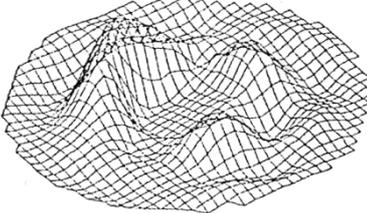
Tab. XXa. Schwingungsmuster und Moden des großen Burma-Gongs Nr. VI samt Frequenzen Teil I

| <b>Schwingungsmuster</b><br>(Scanning Vibrometer)   | <b>Mode</b><br>(StarModal)  |
|---|---|
|  <p data-bbox="507 638 630 683">102,5 Hz</p>     |  <p data-bbox="917 638 1040 683">103,8 Hz</p>     |
|  <p data-bbox="507 985 630 1030">152,5 Hz</p>    |  <p data-bbox="917 985 1040 1030">151,8 Hz</p>    |
|  <p data-bbox="510 1344 614 1388">160 Hz</p>   |  <p data-bbox="917 1344 1040 1388">158,4 Hz</p> |
|  <p data-bbox="502 1691 630 1736">212,5 Hz</p> |  <p data-bbox="917 1691 1040 1736">211,6 Hz</p> |
|  <p data-bbox="502 2049 630 2094">347,5 Hz</p> |  <p data-bbox="917 2049 1040 2094">348,6 Hz</p> |

Tab. XXb. Schwingungsmuster und Moden des großen Burma-Gongs Nr. VI samt Frequenzen Teil 2

| <b>Schwingungsmuster</b><br>(Scanning Vibrometer)   | <b>Mode</b><br>(StarModal)  |
|---|---|
|  <p data-bbox="507 645 624 678">607,5 Hz</p>     |  <p data-bbox="922 645 1038 678">607,5 Hz</p>     |
|  <p data-bbox="515 996 616 1030">645 Hz</p>      |  <p data-bbox="922 996 1023 1030">644,2 Hz</p>    |
|  <p data-bbox="507 1348 624 1382">652,5 Hz</p> |  <p data-bbox="922 1348 1023 1382">651,6 Hz</p> |
|  <p data-bbox="507 1706 624 1740">672,5 Hz</p> |  <p data-bbox="922 1706 1023 1740">672,8 Hz</p> |
|  <p data-bbox="515 2056 616 2089">685 Hz</p>   |  <p data-bbox="922 2056 1023 2089">683,9 Hz</p> |

Tab. XXc. Schwingungsmuster und Moden des großen Burma-Gongs Nr. VI samt Frequenzen Teil 3

| <b>Schwingungsmuster<br/>(Scanning Vibrometer)</b>  | <b>Mode<br/>(StarModal)</b>   |
|---|---|
|  <p data-bbox="507 645 625 678">702,5 Hz</p>   |  <p data-bbox="922 645 1040 678">703,4 Hz</p>   |
|  <p data-bbox="507 1003 625 1037">842,5 Hz</p> |  <p data-bbox="922 1003 1040 1037">841,3 Hz</p> |
| <p data-bbox="515 1350 617 1384">850 Hz</p>   | <p data-bbox="922 1350 1040 1384">850,9 Hz</p>  |

Sollen verschiedene Vibrometer-Resultate aneinander gemessen werden, so müssen die Schwingungsmuster, die in der linken Spalte von Tab. XX zusammengestellt sind, mit denjenigen aus Tab. VII verglichen werden. Im Hinblick auf Anzahl und Lage der Knotenlinien stimmen sie weitestgehend miteinander überein. Dies gilt auch für die Frequenzen (vgl. Fig. 28), die erwartungsgemäß im Rahmen der Frequenzauflösung (maximale Abweichung 2,5 Hz) praktisch identisch sind. Dies belegt ein weiteres Mal den hohen Grad der Reproduzierbarkeit der Vibrometer-Messungen.

Die in Tab. XX nebeneinander angeordneten Schwingungsbilder (links: Schwingungsmuster und rechts: Moden) stimmen offenkundig ausnehmend gut miteinander überein. Wie Tab. XXI erkennen lässt, weichen die zugehörigen Frequenzen um maximal 1,3% ab. Diese Diskrepanz tritt bei der ersten Eigenfrequenz 103,8 Hz auf, die zur rotationssymmetrischen 0-1-Mode gehört. Die Eigenfrequenz liegt offenbar ziemlich genau in der Mitte zwischen den beiden benachbarten Messfrequenzen 102,5 Hz und 105 Hz. Die übrigen Frequenzen sind in aller Regel bis auf Abweichungen im Promille-Bereich identisch.

Tab. XXI. Großer Burma-Gong Nr. VI: Frequenzen der Schwingungsmuster (direkt ermittelt mit dem Scanning Vibrometer) und der Moden (bestimmt mittels Modalanalyse derselben Daten mit StarModal)

| <i>m</i> | <i>n</i> | Schwingungsmuster<br>Frequenz in Hz | Mode<br>Eigenfrequenz in Hz | rel. Frequenzdifferenz<br>bzgl. der Eigenfrequenz |
|----------|----------|-------------------------------------|-----------------------------|---|
| 0        | 1        | 102,5                               | 103,8                       | - 1,30%   |
| 1        | 1        | 152,5                               | 151,8                       | + 0,40%   |
| 1        | 1        | 160                                 | 158,4                       | + 1,01%   |
| 0        | 2        | 212,5                               | 211,6                       | + 0,44%   |
| 3        | 1        | 347,5                               | 348,6                       | - 0,32%   |
| 1        | 3        | 607,5                               | 607,5                       | 0,00%   |
| 5        | 1        | 645                                 | 644,2                       | + 0,13%   |
| 5        | 1        | 652,5                               | 651,6                       | + 0,14%   |
| 3        | 2        | 672,5                               | 672,8                       | - 0,05%   |
| 3        | 2        | 685                                 | 683,9                       | + 0,15%   |
| 2        | 3(?)     | 702,5                               | 703,4                       | - 0,13%   |
| 4        | 2        | 842,5                               | 841,3                       | + 0,14%   |
| 4        | 2        | 850                                 | 850,9                       | - 0,11%   |

#### 4.6. Zusammenfassende Bemerkung

Gongs stellen Schwinger dar, die relativ schwach gedämpft sind. Sie bestehen aus einem einzigen Stück und haben somit keine Fügstellen, die zur Dämpfung beitragen könnten. Offensichtlich weist die Bronze, aus der sie gefertigt sind, eine relativ geringe innere Reibung auf. Die Schnur, die den Gong am Rand trägt, greift dort an, wo der Gong sich nur wenig bewegt. Dies bedeutet, dass auch die Aufhängung nur schwach dämpfend wirkt. Als akustischer Strahler arbeitet ein Gong bestenfalls wie ein Dipol, dessen Abmessungen klein gegenüber der Schallwellenlänge sind. Die Abgabe von Energie ins Schallfeld wird demzufolge nicht allzu hoch sein. Weder

- die innere Dämpfung, noch
- die Dämpfung an den Aufhängepunkten, noch
- die Strahlungs-dämpfung

nehmen besonders große Werte an. Folglich wird der daraus resultierende Kennverlustfaktor relativ gering sein. Die Biegeschwingungen von Gongs, die hier betrachtet werden, klingen deshalb relativ langsam ab.

Im Frequenzbereich bedeutet dies, dass die Resonanzgüten relativ hoch und damit die Resonanzkurven relativ schmal sind. Eigenschwingungen, sofern ihre Frequenzen weit genug von-

einander entfernt sind, werden sich gegenseitig nur wenig beeinflussen. Bei Anregung mit einer Eigenfrequenz dominiert somit bei weitem die zugehörige Eigenmode. Das "Übersprechen" der übrigen Eigenmoden, die prinzipiell ebenfalls angeregt werden, fällt in vielen Fällen kaum ins Gewicht. Demnach spiegelt die Bewegung des Gongs bei einer Frequenz, die nahe bei einer Eigenfrequenz liegt, im Wesentlichen die Eigenschwingungsform wider.

Um Aufschluss über die interessierenden Teilschwingungen zu erhalten, reicht es im Bereich tiefer Frequenzen offensichtlich aus,

- geeignete Schätzwerte für die Eigenfrequenzen aufzusuchen und
- die zugehörigen Schwingungsmuster zu visualisieren.

Wie die Gegenüberstellungen im vorliegenden Kapitel gezeigt haben, ist eine vollständige Modalanalyse meist gar nicht zwingend notwendig. Vielmehr genügt es in der Mehrzahl der hier betrachteten Fälle, auf der Basis der Messwerte des Scanning Vibrometers aussagekräftige Operating Deflection Shapes zu extrahieren. Dazu sind diejenigen Frequenzen zu bestimmen, bei denen die Gesamt-Übertragungsfunktion maximal wird. Auf diese Weise lassen sich gute Schätzwerte für die Eigenfrequenzen gewinnen. Die zugehörigen Schwingungsmuster erweisen sich in aller Regel als brauchbare Approximation der Eigenmoden.

Aufgrund dieser Überlegungen erscheint es vertretbar, im Rahmen der hier erreichbaren Genauigkeit die strikte Unterscheidung, die bisher betont wurde, zu lockern. Im Folgenden werden die Schwingungsmuster, die das direkte Ergebnis der Vibrometer-Messung sind, als repräsentativ für die Eigenmoden betrachtet und verkürzt als "Moden" bezeichnet. Diejenigen Frequenzen, bei denen die Gesamt-Übertragungsfunktion aufweist und klar identifizierbare Schwingungsmuster auftreten, werden den Eigenfrequenzen gleichgesetzt.

## 5. AUSWERTUNG DER SCHWINGUNGSMESSUNGEN

Wie die Vergleiche im vorangegangenen Kapitel gezeigt haben, können die Ergebnisse der Vibrometer-Messung, die in Kapitel 3 zusammengestellt sind, als repräsentativ für das Eigenschwingungsverhalten der Gongs angesehen werden. Diese Daten werden im vorliegenden Kapitel in kondensierter Form dargestellt. Dazu werden die Frequenzintervalle der zweifelsfrei identifizierten Teilschwingungen samt den zugehörigen Schwingungstypen zu Tabellen zusammengefasst. Das Formelzeichen  $m$  steht für die Anzahl der Knotendurchmesser, während  $n$  die Anzahl der Knotenkreise kennzeichnet. Als Bezug dient die Frequenz der rotations-symmetrischen 0-1-Grundschiwingung mit einem zentralen Schwingungsbauch.

### 5.1. Frequenzintervalle der kleinen Burma-Gongs

#### 5.1.1. Kleiner Burma-Gong Nr. I

*Tab. XXII. Frequenzintervalle der Teilschwingungen des kleinen Burma-Gongs Nr. I; als Bezug dient die Frequenz  $f_{01} = 162,5$  Hz*

| $m$ | $n$ | 1             | 2     |
|-----|-----|---------------|-------|
| 0   |     | 1 (Referenz)  | 1,985 |
| 1   |     | 1,600 / 1,677 | 2,415 |
| 2   |     | 2,708         | 5,569 |
| 3   |     | 3,785         |       |
| 4   |     | 5,092 / 5,138 |       |

Das Instrument Nr. I ist der leichteste der untersuchten Burma-Gongs. Die Eigenfrequenzen, die Fig. 17 sowie Tab II zu entnehmen sind, führen auf die Frequenzintervalle in Tab. XXII. Zwei Zahlenwerte, durch einen Schrägstrich getrennt, sind dann vermerkt, wenn Varianten desselben Schwingungstyps bei unterschiedlichen Frequenzen nachgewiesen wurden.

#### 5.1.2. Kleiner Burma-Gong Nr. II

Der etwas schwerere Gong Nr. II hat denselben Außendurchmesser wie das vorher betrachtete Instrument, ist insgesamt jedoch höher abgestimmt. Er weist die Frequenzintervalle auf, die in Tab. XXIII zusammengestellt sind. Diese basieren auf den Eigenfrequenzen, die in Fig. 20 und Tab. III aufgelistet sind. Durch Schrägstrich getrennte Zahlenwerte deuten auf Modensplitting hin, das hier bei praktisch jeder antimetrischen Eigenform ( $m \geq 1$ ) auftritt.

Tab. XXIII. Frequenzintervalle der Teilschwingungen des kleinen Burma-Gongs Nr. **II**; als Bezug dient die Frequenz  $f_{01} = 216,3$  Hz

| $m^n$ | 1             | 2             |
|-------|---------------|---------------|
| 0     | 1 (Referenz)  | 1,705         |
| 1     | 1,451 / 1,549 | 2,231 / 2,329 |
| 2     | 2,046 / 2,092 | 4,167         |
| 3     | 2,809 / 2,838 |               |
| 4     | 3,872 / 3,913 |               |

### 5.1.3. Gesamtschau der kleinen Burma-Gongs

Tab. XXIV. Frequenzintervalle der Teilschwingungen der beiden kleinen Burma-Gongs Nr. **I** und **II**

| $m^n$ | 1             | 2             |
|-------|---------------|---------------|
| 0     | 1 (Referenz)  | 1,70 ... 1,98 |
| 1     | 1,45 ... 1,68 | 2,23 ... 2,41 |
| 2     | 2,05 ... 2,71 | 4,17 ... 5,57 |
| 3     | 2,81 .. 3,78  |               |
| 4     | 3,87 ... 5,14 |               |

Die beiden Gongs Nr. **I** und **II** haben mit 33 cm nicht nur gleiche Außendurchmesser, sondern weisen eine enge Verwandtschaft hinsichtlich ihrer Herkunft und Machart auf. Um eventuell vorhandene Gemeinsamkeiten herauszuarbeiten, sind die Frequenzintervalle in Tab. XXIV so zusammengefasst, dass die Spannen erkennbar werden, innerhalb derer die gemessenen Werte liegen. Die Zahlen sind auf zwei Stellen hinter dem Komma gerundet. Bezogen auf die 0-1-Schwingung, die stets als Referenz fungiert, hat die 1-1-Schwingung eine etwa eineinhalbmal so hohe und die 0-2-Schwingung eine nicht ganz doppelt so hohe Frequenz.

## 5.2. Frequenzintervalle der mittleren Burma-Gongs

### 5.2.1. Mittlerer Burma-Gong Nr. III

Für den Gong Nr. **III** liegen besonders viele Ergebnisse vor, da bis zu einer oberen Grenze von 2 kHz gemessen wurde; vgl. hierzu Fig. 22 und Tab. IV. Bis zu neun Knotendurchmesser und Frequenzintervalle bis zum mehr als Zwölffachen, bezogen auf die 0-1-Grundschiwingung, sind in Tab. XXV vermerkt. Der Schrägstrich mit Angabe mehr als eines Frequenzintervalls für eine Schwingung zeigt Moden-Splitting an, was bei nicht-symmetrischen Schwingungsformen die Regel darstellt.

Tab. XXV. Frequenzintervalle der Teilschwingungen des mittleren Burma-Gongs Nr. **III**; als Bezug dient die Frequenz  $f_{01} = 151$  Hz

| $m$ | $n$ | 1               | 2             | 3     |
|-----|-----|-----------------|---------------|-------|
| 0   |     | 1 (Referenz)    | 2,185         | 6,821 |
| 1   |     | 1,656 / 1,755   | 2,450 / 2,675 |       |
| 2   |     | 2,815 / 2,947   | 5,232 / 5,397 |       |
| 3   |     | 3,510           |               |       |
| 4   |     | 4,702 / 4,768   |               |       |
| 5   |     | 6,192 / 6,324   | 12,086        |       |
| 6   |     | 7,947           |               |       |
| 7   |     | 9,536           |               |       |
| 8   |     | 11,258          |               |       |
| 9   |     | 12,682 / 12,808 |               |       |

### 5.2.2. Mittlerer Burma-Gong Nr. IV

Der Gong Nr. **IV** ist mit seinem Außendurchmesser von 41 cm etwas größer als der vorher betrachtete Gong, der 37 cm misst. Erwartungsgemäß ist deshalb auch die Frequenz  $f_{01}$  seiner 0-1-Schwingung etwas niedriger. Tab. XXVI bezieht sich auf den Bereich von Frequenzen bis 1 kHz. Die Intervalle beruhen auf den Frequenzen, wie sie Fig. 24 und Tab. V entnommen werden können. Moden-Splitting ist auch hier häufig zu beobachten.

Tab. XXVI. Frequenzintervalle der Teilschwingungen des mittleren Burma-Gongs Nr. **IV**; als Bezug dient die Frequenz  $f_{01} = 132,5$  Hz

| $m$ | $n$ | 1             | 2             | 3             |
|-----|-----|---------------|---------------|---------------|
| 0   |     | 1 (Referenz)  | 2,115         | 6,396         |
| 1   |     | 1,677 / 1,736 | 2,491 / 2,583 | 6,570 / 6,981 |
| 2   |     | 2,770 / 2,830 | 5,064 / 5,226 |               |
| 3   |     | 3,924 / 4,000 |               |               |
| 4   |     | 5,777         |               |               |

### 5.2.3. Gesamtschau der mittleren Burma-Gongs

Tab. XXVII. Frequenzintervalle der Teilschwingungen der beiden mittleren Burma-Gongs Nr. **III** und **IV**

| $m$ | $n$ | 1             | 2             | 3             |
|-----|-----|---------------|---------------|---------------|
| 0   |     | 1 (Referenz)  | 2,11 ... 2,18 | 6,40 ... 6,82 |
| 1   |     | 1,66 ... 1,75 | 2,45 ... 2,58 |               |
| 2   |     | 2,77 ... 2,95 | 5,06 ... 5,40 |               |
| 3   |     | 3,51 ... 4,00 |               |               |
| 4   |     | 4,70 ... 5,78 |               |               |

Die Gemeinsamkeiten der beiden Gongs Nr. **III** und **IV** in Hinsicht auf die Frequenzintervalle sind Tab. XXVII zu entnehmen. Solange sich nicht zu viele Knotendurchmesser ( $m \leq 2$ ) und Knotenkreise ( $n \leq 2$ ) ausbilden, sind die angegebenen Spannen relativ eng, d.h. die Frequenzintervalle bei beiden Gongs weitgehend identisch. Die Intervalle sind hier größer als diejenigen, die bei den kleinen Burma-Gongs (vgl. Tab. XXIV) festgestellt wurden. So ist die Frequenz der 1-1-Schwingung mehr als eineinhalbfach und die der 2-0-Schwingung mehr als doppelt so groß wie die Frequenz der 0-1-Schwingung.

### 5.3. Frequenzintervalle der großen Burma-Gongs

#### 5.3.1. Großer Burma-Gong Nr. V

Beim Gong Nr. V hat die 0-1-Schwingung etwa die Frequenz  $f_{01} = 100$  Hz; siehe hierzu auch Fig. 26 sowie Tab. VI. Unterhalb von 1 kHz lassen sich Schwingungsformen mit bis zu sieben Knotendurchmessern ( $m = 7$ ) zweifelsfrei identifizieren. Die entsprechenden Frequenzintervalle sind in Tab. XXVIII nach Maßgabe der Anzahl  $m$  der Knotendurchmesser und  $n$  der Knotenkreise wiedergegeben.

Tab. XXVIII. Frequenzintervalle der Teilschwingungen des großen Burma-Gongs Nr. V; als Bezug dient die Frequenz  $f_{01} = 100$  Hz

| $m$ | $n$ | 1             | 2             | 3             |
|-----|-----|---------------|---------------|---------------|
| 0   |     | 1 (Referenz)  | 1,950         |               |
| 1   |     | 1,600 / 1,625 | 2,425         | 6,500 / 6,575 |
| 2   |     | 2,475         | 5,950         | 9,400         |
| 3   |     | 3,225         | 8,375 / 8,425 |               |
| 4   |     | 4,550         |               |               |
| 5   |     | 6,175 / 6,300 |               |               |
| 6   |     | 7,925 / 8,000 |               |               |
| 7   |     | 9,525 / 9,575 |               |               |

#### 5.3.2. Großer Burma-Gong Nr. VI

Der Gong Nr. VI ist ein zweites Instrument, das hier zu den großen Burma-Gongs gezählt wird. Sein Außendurchmesser ist geringfügig größer als der des vorher betrachteten Instruments. Die 0-1-Teilschwingung hat die etwas höhere Frequenz 102,5 Hz; siehe hierzu Fig. 28 und Tab. VII. Der nachstehenden Tab. XXIX ist zu entnehmen, dass die Intervalle von ähnlicher Größe sind. Eine erkennbare Ausnahme bildet die 3-2-Mode.

Tab. XXIX. Frequenzintervalle der Teilschwingungen des großen Burma-Gongs Nr. VI;  
als Bezug dient die Frequenz  $f_{01} = 102,5$  Hz

| $m$ | $n$ | 1             | 2             | 3     |
|-----|-----|---------------|---------------|-------|
| 0   |     | 1 (Referenz)  | 2,049         |       |
| 1   |     | 1,488 / 1,546 | 2,390 / 2,584 | 5,950 |
| 2   |     | 2,268 / 2,512 | 4,951         |       |
| 3   |     | 3,341 / 3,390 | 6,558 / 6,657 |       |
| 4   |     | 4,681 / 4,756 | 8,289         |       |
| 5   |     | 6,265 / 6,341 |               |       |
| 6   |     | 7,658 / 7,683 |               |       |
| 7   |     | 9,171         |               |       |

### 5.3.3. Großer Burma-Gong Nr. VII

Mit 61 cm Außendurchmesser ist das Instrument Nr. VII der größte der untersuchten Burma-Gongs. Wie bereits Fig. 30 und Tab. VIII zu entnehmen war, ist die Frequenz der 0-1-Schwingung  $f_{01} = 93$  Hz. Bis zu  $m = 9$  Knotendurchmesser und  $n = 4$  Knotenkreise konnten nachgewiesen werden. Da der Bereich der Messfrequenz bis 1 kHz reichte, weist Tab. XXX Intervalle bis zum etwas mehr als Zehnfachen der Bezugsfrequenz aus. Die mehrfachen Zahlenwerte, die den rotationssymmetrischen ( $m = 0$ ) Schwingungen mit  $n = 3$  bzw.  $n = 4$  Knotenkreisen zugeordnet sind, dürften aus der Überlagerung benachbarter Schwingungen ähnlicher Frequenz, aber andersartiger Schwingungsform resultieren. Eine anschließende Modalanalyse hätte die Unsicherheiten ausräumen können. Auf keinen Fall deuten sie auf Moden-Splitting hin. Dieses tritt nicht bei rotationssymmetrischen Schwingungen auf, während es bei den antimetrischen ( $m \geq 1$ ) Schwingungen geradezu die Regel darstellt.

Tab. XXX. Frequenzintervalle der Teilschwingungen des großen Burma-Gongs Nr. VII;  
als Bezug dient die Frequenz  $f_{01} = 93$  Hz

| $n$<br>$m$ | 1             | 2             | 3             | 4             |
|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 0          | 1 (Referenz)  | 2,043         | 5,753 (6,317) | 8,293 (8,333) |
| 1          | 1,478         | 2,516 / 2,621 | 5,995         |               |
| 2          | 2,330 / 2,392 | 4,880 / 4,973 |               |               |
| 3          | 2,971 / 3,025 | 7,106 / 7,272 |               |               |
| 4          | 3,871 / 3,952 | 9,140 / 9,315 |               |               |
| 5          | 5,121 / 5,229 |               |               |               |
| 6          | 6,439 / 6,559 |               |               |               |
| 7          | 7,823 / 7,930 |               |               |               |
| 8          | 9,382 / 9,423 |               |               |               |
| 9          | 10,605        |               |               |               |

### 5.3.4. Gesamtschau der großen Burma-Gongs

Tab. XXXI gibt die Messungen an den drei großen Burma-Gongs in ihrer Gesamtheit wieder. Es sind die Spannen angegeben, in denen die Frequenzintervalle der Tab. XXVIII bis XXX liegen. Die großen Gongs zeigen die Tendenz, dass die 1-1-Schwingung etwa die 1,5-fache Frequenz der 0-1-Schwingung hat. Die 0-2-Schwingung weist etwa die doppelte Frequenz der 0-1-Schwingung auf. Ein Frequenzintervall von etwa 2,5 zeigt sich bei der 2-1- in ähnlicher Weise wie bei der 1-2-Schwingung. Diese geringharmonische Reihe setzt sich fort mit Intervallen von ca. drei (3-1-Schwingung), vier (4-2-Schwingung) und fünf (5-1-Schwingung).

Tab. XXXI. Frequenzintervalle der Teilschwingungen der drei großen Burma-Gongs Nr. V, VI und VII

| $m$ <sup><i>n</i></sup> | 1             | 2             | 3             |
|-------------------------|---------------|---------------|---------------|
| 0                       | 1 (Referenz)  | 1,95 ... 2,05 | 5,75 ... 6,32 |
| 1                       | 1,48 ... 1,62 | 2,39 ... 2,67 | 5,95 ... 6,57 |
| 2                       | 2,27 ... 2,51 | 4,88 ... 5,95 |               |
| 3                       | 2,97 ... 3,39 | 6,56 ... 8,42 |               |
| 4                       | 3,87 ... 4,76 | 8,29 ... 9,31 |               |
| 5                       | 5,12 ... 6,34 |               |               |
| 6                       | 6,44 ... 8,00 |               |               |
| 7                       | 7,82 ... 9,57 |               |               |

## 5.4. Frequenzintervalle der großen Java-Gongs

### 5.4.1. Großer Java-Gong Nr. VIII

Die beiden folgenden Gongs unterscheiden sich im äußeren Aufbau deutlich von den bisher betrachteten Burma-Gongs. In Bezug auf die Größe ähnelt der Java-Gong Nr. VIII am ehesten dem Burma-Gong Nr. VII. Jedoch ist die Frequenz seines ersten Teiltönen 11 Hz (was etwa zwei musikalischen Halbtönen entspricht) tiefer; vgl. Fig. 32 und Tab. IX. Die Intervalle in Tab. XXXII sind auf einen Bereich von Messfrequenzen bis 500 Hz beschränkt.

Tab. XXXII. Frequenzintervalle der Teilschwingungen des großen Java-Gongs Nr. VIII; als Bezug dient die Frequenz  $f_{01} = 82,5$  Hz

| $m$ <sup><i>n</i></sup> | 1             | 2             |
|-------------------------|---------------|---------------|
| 0                       | 1 (Referenz)  | 2,030         |
| 1                       | 1,636 / 1,727 | 2,545         |
| 2                       | 2,970         | 5,636 / 5,704 |
| 3                       | 4,727         |               |

### 5.4.2. Großer Java-Gong Nr. IX

Der größte Gong überhaupt, der untersucht wurde, ist das Instrument Nr. **IX**. Auch hier wurden Frequenzen bis 500 Hz betrachtet; die Originalresultate sind in Fig. 34 und Tab. X aufgelistet. Bezieht man die Frequenzen der Teilschwingungen auf die Frequenz der 0-1-Schwingung, so erhält man die in Tab. XXXIII zusammen gestellten Intervalle.

Tab. XXXIII. Frequenzintervalle der Teilschwingungen des großen Java-Gongs Nr. **IX**; als Bezug dient die Frequenz  $f_{01} = 47,5$  Hz

| $m$ <sup><math>n</math></sup> | 1             | 2             | 3     |
|-------------------------------|---------------|---------------|-------|
| 0                             | 1 (Referenz)  | 2,000         | 5,632 |
| 1                             | 1,526 / 1,697 | 2,579 / 2,737 |       |
| 2                             | 2,947         | 5,000         |       |
| 3                             | 4,514 / 4,644 | 6,063 / 6,158 |       |
| 4                             | 6,861 / 7,105 |               |       |
| 5                             | 9,316 / 9,421 |               |       |

### 5.4.3. Gesamtschau der großen Java-Gongs

Tab. XXXIV. Frequenzintervalle der Teilschwingungen der beiden Java-Gongs Nr. **VIII** und **IX**

| $m$ <sup><math>n</math></sup> | 1             | 2             |
|-------------------------------|---------------|---------------|
| 0                             | 1 (Referenz)  | 2,00 ... 2,03 |
| 1                             | 1,53 ... 1,73 | 2,54 ... 2,74 |
| 2                             | 2,95 ... 2,97 | 5,00 ... 5,64 |
| 3                             | 4,51 ... 4,73 |               |

Die Intervalle, welche die Schwingungsfrequenzen der beiden großen Java-Gongs aufweisen, stimmen relativ weit überein. So ist die Frequenz der 0-2-Schwingung etwa doppelt so groß wie die der 0-1-Schwingung. Die 2-1-Schwingung hat die nicht ganz dreifache Frequenz der 0-1-Schwingung. Die antimetrischen Schwingungen 1-1 bzw. 1-2 haben Frequenzen, die etwas mehr als 1,5 mal bzw. mehr als 2,5 mal so groß sind wie die der Grundschiwingung.

## 5.5. Vergleich der Frequenzintervalle

Die Frequenzintervalle der Teilschwingungen von Klangerzeugern sind von grundlegender Bedeutung für die musikalische Qualität des Schallsignals. Bei abendländischen Kirchenglocken, deren Gestalt der "gotischen Rippe" entspricht, lehnen sich die Intervalle der klangbildenden Teilschwingungen eng an die Folge 1 : 2 : 2,4 : 3 : 4 an; vgl. Fleischer (1997, 1998, 2000). Bei Gongs scheint eine so weitgehende Gemeinsamkeit nicht vorzuliegen. Die Schwingungsformen und deren Abfolge sind bei allen untersuchten Gongs zwar sehr ähnlich. Jedoch sind die Intervalle bei jedem Exemplar anders. Dies verwundert nicht weiter, da jeder Gong infolge seiner individuellen Bearbeitungsgeschichte ein Unikat ist. Selbst bei Gongs gleicher Herkunft sind die Frequenzintervalle unterschiedlich. Dies zeigt ein Vergleich von Tab. XXIV für kleine Burma-Gongs, Tab. XXVII für mittlere Burma-Gongs und Tab. XXXI für große Burma-Gongs. Offenbar spielt die Größe eine Rolle, denn ungeachtet ihrer gemeinsamen Herkunft weisen unterschiedlich große Gongs prinzipiell andere Intervalle auf.

Tab. XXXV. Frequenzintervalle der Teilschwingungen, bezogen auf die Frequenz  $f_{01}$ .  
 Oben: großer Burma-Gong Nr. VII; ( $f_{01} = 93$  Hz);  
 unten: großer Java-Gong Nr. VIII ( $f_{01} = 82,5$  Hz)

| $m^n$ | 1            | 2           |
|-------|--------------|-------------|
| 0     | 1 (Referenz) | 2,04        |
| 1     | 1,48         | 2,39 / 2,52 |
| 2     | 2,33 / 2,39  | 4,88 / 4,97 |
| 3     | 2,97 / 3,02  |             |

| $m^n$ | 1            | 2           |
|-------|--------------|-------------|
| 0     | 1 (Referenz) | 2,03        |
| 1     | 1,64 / 1,73  | 2,54        |
| 2     | 2,97         | 5,64 / 5,70 |
| 3     | 4,73         |             |

Um wenigstens eine näherungsweise Globalaussage zu versuchen, die auf die Herkunft (und Herstellungsart sowie Gestalt) der Gongs Bezug nimmt, sind in der obigen Tabelle Ergebnisse für zwei Gongs zusammengestellt, die von ähnlicher Größe sind. Beim ersten handelt es sich um den größten untersuchten Burma-Gong Nr. **VII** (Tab. XXX), beim zweiten um den kleineren der beiden Java-Gongs, das Instrument Nr. **VIII** (Tab. XXXII). In Tab. XXXV sind die Frequenzintervalle zusammengestellt. Gemeinsam ist beiden Gongs, dass die Frequenz der rotationssymmetrischen 0-2-Schwingung etwa doppelt so groß wie die Frequenz der rotationssymmetrischen 0-1-Schwingung ist. Dieser Befund deckt sich mit den Beobachtungen von Fletcher und Rossing (1998) S. 661. Bei den antimetrischen Teilschwingungen zeigt der Burma-Gong (oben) eine deutliche Tendenz zu engeren Frequenzintervallen als der Java-Gong (unten). Ob es sich dabei um Eigenschaften der jeweils vorliegenden Exemplare handelt, oder ob dies eine allgemeine Tendenz darstellt, lässt sich anhand der wenigen Gongs, die zur Verfügung standen, nicht endgültig klären.

## 5.6. Frequenzdifferenzen

Im Folgenden werden die absoluten Differenzen derjenigen Frequenzen betrachtet, die zu den Varianten ("Partialschwingungen") ein und derselben Schwingungsform gehören. Wie in Fig. 18 anhand eines Beispiels gezeigt wurde, tritt dieses als "Moden-Splitting" bezeichnete Phänomen (Fleischer (1994), Fleischer und Rotter (1994)) bei nicht exakt axialsymmetrischen Schwingern auf, die Schwingungen mit  $m \geq 1$  Knotendurchmessern ausführen. Die betrachteten Gongs sind solche Schwingern, bei denen sich das Splitting antimetrischer Moden in den Experimenten äußerst häufig gezeigt hat. Werden beim Anschlagen beide Partialformen angeregt, treten "Spinning Modes" auf. Für einen Hörer führt dies in aller Regel zu Schwebungen der entsprechenden Teiltöne im Schallsignal; vgl. Fleischer (1997). Die Differenz der Frequenzen der Partialtöne ist deshalb wichtig, weil sie gleich der Schwebungsfrequenz ist.

Da Schwebungen im Klang eines jeden Gongs vorkommen (Varsányi (2000a und b)), werden die Frequenzdifferenzen tabelliert, die bei den Vibrometer-Messungen festgestellt wurden. Grundlage sind dabei die Tabellen, die neben den Gesamt-Übertragungsfunktionen in Kapitel 3 angegeben sind. Die Betrachtungen werden auf maximal  $n = 2$  Knotenkreise beschränkt. Bei den Burma-Gongs (Messbandbreite mindestens 1 kHz) sind bis zu  $m = 4$  und bei den Java-Gongs (Messbandbreite 500 Hz)  $m = 3$  Knotendurchmesser berücksichtigt.

### 5.6.1. Die beiden kleinen Burma-Gongs

Tab. XXXVI. Frequenzdifferenzen von Partialschwingungen des kleinen Burma-Gongs Nr. **II**

| $m$ | 1       | 2       |
|-----|---------|---------|
| 1   | 21,2 Hz | 21,2 Hz |
| 2   | 10 Hz   |         |
| 3   | 6,2 Hz  |         |
| 4   | 8,7 Hz  |         |

Die Messung mit dem Vibrometer hat für den kleinen Burma-Gong Nr. **I** Moden-Splitting lediglich bei zwei Teilschwingungen gezeigt; vgl. Tab. II. Die Frequenzdifferenz beträgt bei der 1-1-Schwingung 12,5 Hz. Bei der 4-1-Schwingung wurde die Differenz 7,5 Hz gemessen.

Bei fünf der sechs antimetrischen Schwingungen, die beim Gong Nr. **II** identifiziert werden konnten, ließ sich Moden-Splitting nachweisen. Tab. XXXVI vermerkt Frequenzdifferenzen, die in Extremfällen mehr als 20 Hz erreichen können, im Normalfall aber zwischen 6 Hz und 10 Hz betragen.

### 5.6.2. Die beiden mittleren Burma-Gongs

Tab. XXXVII. Frequenzdifferenzen von Partialschwingungen des mittleren Burma-Gongs Nr. **III**

| <b><i>m</i></b> <b><i>n</i></b> | <b>1</b> | <b>2</b> |
|---------------------------------|----------|----------|
| <b>1</b>                        | 15 Hz    | 34 Hz    |
| <b>2</b>                        | 20 Hz    | 25 Hz    |
| <b>3</b>                        | ÷        |          |
| <b>4</b>                        | 10 Hz    |          |

Beim Gong Nr. **III** (Tab. XXXVII) wurde mit 34 Hz die maximale Aufspaltung der Frequenzen bei der 1-2-Teilschwingung festgestellt. Für die 3-1-Schwingung wurde nur eine Frequenz ermittelt. Die übrigen gemessenen Werte liegen zwischen 10 Hz und 25 Hz.

Tab. XXXVIII. Frequenzdifferenzen von Partialschwingungen des mittleren Burma-Gongs Nr. **IV**

| <b><i>m</i></b> <b><i>n</i></b> | <b>1</b> | <b>2</b> |
|---------------------------------|----------|----------|
| <b>1</b>                        | 7,8 Hz   | 12,2 Hz  |
| <b>2</b>                        | 7,5 Hz   | 21,9 Hz  |
| <b>3</b>                        | 10 Hz    |          |
| <b>4</b>                        | ÷        |          |

Der Gong Nr. **IV** zeigt bei der 4-1-Schwingung keine, bei der 2-2-Schwingung dagegen eine Aufspaltung der Partialfrequenzen um nahezu 22 Hz. Die übrigen Wert von Tab. XXXVIII liegen zwischen diesen beiden Extremen.

### 5.6.3. Die drei großen Burma-Gongs

Tab. XXXIX. Frequenzdifferenzen von Partialschwingungen des großen Burma-Gongs Nr. V

| $m$ | $n$ | 1      | 2      |
|-----|-----|--------|--------|
| 1   | 1   | 2,5 Hz | ÷      |
| 2   | 2   | ÷      | ÷      |
| 3   | 3   | ÷      | 5,0 Hz |
| 4   | 4   | ÷      |        |

Im betrachteten Bereich wurde beim großen Burma-Gong Nr. V lediglich bei zwei Teilschwingungen Moden-Splitting festgestellt. Die maximale Frequenzdifferenz ist 5 Hz. Wie Tab. XXXIX ausweist, traten alle übrigen Teilschwingungen jeweils in nur einer Partialform auf.

Tab. XL. Frequenzdifferenzen von Partialschwingungen des großen Burma-Gongs Nr. VI

| $m$ | $n$ | 1       | 2       |
|-----|-----|---------|---------|
| 1   | 1   | 5,6 Hz  | 19,9 Hz |
| 2   | 2   | 25,2 Hz |         |
| 3   | 3   | 4,8 Hz  | 10,1 Hz |
| 4   | 4   | 7,7 Hz  |         |

Aus Tab. XL ist zu ersehen, dass sich für den großen Burma-Gong Nr. VI in zwei Fällen deutliche Frequenzdifferenzen von 20 Hz oder mehr ausprägen. Die übrigen Werte reichen von etwa fünf bis etwa acht Hertz.

Tab. XLI bezieht sich auf den größten Burma-Gong Nr. VII. Wie die nachstehende Zusammenstellung zeigt, deuten die Ergebnisse der Vibrometer-Messung auf Moden-Splitting bei jeder Teilschwingung mit Ausnahme der 1-1-Mode hin. Die Frequenzdifferenzen liegen zwischen fünf und etwa sechzehn Hertz.

Tab. XLI. Frequenzdifferenzen von Partialschwingungen des großen Burma-Gongs Nr. VII

| $m$ | $n$ | 1      | 2       |
|-----|-----|--------|---------|
| 1   |     | ÷      | 9,8 Hz  |
| 2   |     | 5,8 Hz | 8,7 Hz  |
| 3   |     | 5,0 Hz | 15,4 Hz |
| 4   |     | 7,5 Hz | 16,3 Hz |

#### 5.6.4. Die beiden großen Java-Gongs

Tab. XLII. Frequenzdifferenzen von Partialschwingungen des großen Java-Gongs Nr. VIII

| $m$ | $n$ | 1      | 2      |
|-----|-----|--------|--------|
| 1   |     | 7,5 Hz | ÷      |
| 2   |     | ÷      | 5,6 Hz |
| 3   |     | ÷      |        |

Beim Gong Suwukan Nr. VIII aus Java (Tab. XLII) wurde bei zwei der betrachteten Moden eine Aufspaltung festgestellt. Die Frequenzdifferenzen sind etwa sechs bzw. sieben Hertz.

Tab. XLIII. Frequenzdifferenzen von Partialschwingungen des großen Java-Gongs Nr. IX

| $m$ | $n$ | 1      | 2       |
|-----|-----|--------|---------|
| 1   |     | 8,1 Hz | 7,5 Hz  |
| 2   |     | ÷      | ÷       |
| 3   |     | 6,2 Hz | 12,5 Hz |

Der größere Java-Gong (Gong Ageng Nr. **IX**) zeigt bei vier der Teilschwingungen in Tab. XLIII Moden-Splitting mit Frequenzdifferenzen von etwa sechs bis zwölf Hertz. In zwei Fällen hat die Messung keine Aufspaltung ergeben.

## 5.7. Zusammenfassende Bemerkung

In diesem Kapitel wurden die Frequenzen der Schwingungsmuster, die aus den Messungen mit dem Scanning Vibrometer resultieren, in zweierlei Hinsicht analysiert. Zum einen wurden die Intervalle der Frequenzen berechnet und verglichen. Die Erwartung, dass bei Gongs - ähnlich wie bei Kirchenglocken - spektrale Grundmuster nachzuweisen sind, die sich bei jedem Instrument wiederholen, hat sich nicht erfüllt. Die Schwingungsmoden sind ähnlich, ihre Aufeinanderfolge ist im untersuchten Frequenzbereich stets dieselbe. Die Intervalle, welche die Frequenzen der Teilschwingungen bilden, differieren jedoch so stark, dass eine allgemeine Aussage derzeit nicht sinnvoll erscheint. Da mit Blick auf den musikalischen Aufbau eines Gong-Klanges neben den Frequenzen auch die Amplituden der Teilschwingungen von Bedeutung sind, über die bisher noch keine Information vorliegt, werden die Schwingungsmessungen an dieser Stelle beendet. Um das Problem umfassend behandeln zu können, werden zukünftig weitere Kennwerte bestimmt werden. Es liegt nahe, zur Kennzeichnung des Signals, das der Schlegel auf den Gong übertragen kann, die Admittanz am Anschlagort zu messen. Das Signal, das der Gong beim Empfänger hervorruft, ist der Schalldruck am Abhörort. Sowohl die mechanische Admittanz wie auch das akustische Signal werden Gegenstand eines weiteren Berichtes sein.

Für die Hörempfindung, die das Schallsignal hervorruft, sind die Modulationen der Teiltöne von Bedeutung. Bei einem Gong gelten sie geradezu als Qualitätsmerkmal; vgl. Varsányi (2000a und b). Deshalb wurde zum anderen auch das Splitting antimetrischer Moden untersucht. Die Differenz zwischen den Partialfrequenzen bestimmt die Schwebungsfrequenz des betreffenden Teiltöne: Diese erweist sich für jeden Teilton als unterschiedlich. Frequenzdifferenzen zwischen 0 Hz und 25 Hz wurden gemessen. Diese Werte sind denen nach Varsányi (2000b) gegenüber zu stellen, wonach auf Java 2 ... 3 Schwebungen pro Sekunde, auf Bali dagegen 5 .. 7 Schwebungen pro Sekunde als optimal gelten. Ob überhaupt und in welchem Ausmaß die Aufspaltung der antimetrischen Moden und die daraus resultierenden Schwebungen für die Hörempfindung von Bedeutung sind, ist im derzeitigen Stadium noch ungeklärt. Dieser Frage muss in weiteren Untersuchungen nachgegangen werden.

## 6. SCHWINGUNGSBERECHNUNGEN

In diesem Kapitel wird versucht, die Schwingungen von Gongs mit Hilfe mathematischer Verfahren theoretisch zu erfassen.

### 6.1. Einfache Modelle

#### 6.1.1. Versuchsweise Modellierung als Platte

Wird seine Krümmung nicht berücksichtigt, kann ein Gong als Kreisplatte aufgefasst werden. Im Bewusstsein der Gefahr, dass diese Idealisierung zu weit geht, werden versuchsweise theoretische Ergebnisse nach Leissa (1969) zusammengestellt und mit den experimentellen Resultaten verglichen. Für die Eigenfrequenzen von Kreisplatten gilt bekanntlich

$$f_{mn} = \frac{\lambda_{mn}^2}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \quad ; \quad (1)$$

hierin bedeutet

$\lambda_{mn}$  Eigenwerte, die von den Randbedingungen abhängen,  
 $a$  Außenradius,  
 $\rho$  Dichte und  
 $h$  Dicke.

Die Indices  $m$  und  $n$  stehen für die Anzahl der Knotendurchmesser bzw. Knotenkreise. Das Formelzeichen  $D$  kennzeichnet die Biegesteifigkeit, die gemäß

$$D = \frac{E h^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (2)$$

mit den Materialkennwerten

$E$  Elastizitätsmodul und  
 $\nu$  Querkontraktionszahl

und dem Geometrieparameter

$h$  Dicke

zusammenhängt. Setzt man Gl. (2) in Gl. (1) ein, erhält man

$$f_{mn} = \frac{1}{4\sqrt{3}\pi} \lambda_{mn}^2 \frac{h}{a^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1 - \nu^2)}} \quad . \quad (3)$$

Gl. (3) besagt, dass die Abmessungen  $a$  und  $h$  der Platte in die Eigenfrequenzen gemäß

$$f_{mn} \sim \frac{h}{a^2} \quad , \quad (4)$$

die Materialeigenschaften  $E$ ,  $\rho$  und  $\nu$  gemäß

$$f_{mn} \sim \sqrt{\frac{E}{\rho(1 - \nu^2)}} \quad (5)$$

und die Eigenwerte  $\lambda_{mn}$  quadratisch eingehen.

Aus den Beziehungen (1) und (3) ist zu ersehen, dass die Frequenzintervalle durch die Quadrate der Eigenwerte bestimmt sind, denen damit eine zentrale Rolle zukommt. Die experimentell bestimmten Intervalle der Schwingungsfrequenzen liegen für sämtliche Gongs vor; sie sind in Kapitel 5 zusammengestellt. Anhand eines Vergleichs mit den Frequenzintervallen, die aus theoretischen Überlegungen folgen, lässt sich schließen, ob eventuell eine - zumindest teilweise - Übereinstimmung vorliegt.

Von grundlegender Bedeutung ist, welche Standard-Randbedingung dafür gewählt wird, die Verhältnisse beim Gong zu modellieren. Der Gong hat einen sehr massiven, umgebördelten Rand, der in Richtung der Biegeschwingung des Gongs weitgehend unbeweglich ist. Wäre die Berandung so steif, dass sie eine Verdrehung der Platte verhindern würde, dann müsste am Rand eine Einspannung ("clamped") angenommen werden. Leissa (1969) hat die Ergebnisse anderer Autoren zusammengestellt und aufbereitet. Eigenwerte für feste Randeinspannung sind in seiner Table 2.1 angegeben. Aus der Normierung auf die 0-1-Schwingung folgen die

*Tab. XLIV. Frequenzintervalle der Teilschwingungen einer am Rand eingespannten Kreisplatte nach Leissa (1969)*

| <b><math>m</math></b> | <b><math>n</math></b> | <b>1</b>     | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> |
|-----------------------|-----------------------|--------------|----------|----------|----------|
| <b>0</b>              |                       | 1 (Referenz) | 3,893    | 8,722    | 15,484   |
| <b>1</b>              |                       | 2,081        | 5,953    | 11,754   | 19,485   |
| <b>2</b>              |                       | 3,414        | 8,279    | 15,056   |          |
| <b>3</b>              |                       | 4,996        | 10,866   | 18,628   |          |
| <b>4</b>              |                       | 6,819        | 13,715   |          |          |
| <b>5</b>              |                       | 8,882        | 16,817   |          |          |
| <b>6</b>              |                       | 11,180       |          |          |          |
| <b>7</b>              |                       | 13,710       |          |          |          |
| <b>8</b>              |                       | 16,469       |          |          |          |
| <b>9</b>              |                       | 19,456       |          |          |          |

Frequenzintervalle in Tab. XLIV. In Anpassung an die Ergebnisse der eigenen Experimente (siehe Kapitel 5) sind nur Zahlenwerte berücksichtigt, die kleiner als 20 sind.

Wäre eine Verdrehung der Platte am Außenrand möglich, könnte die Berandung wie eine gelenkige Einspannung ("simply supported") wirken. Für Kreisplatten, die am Rand gelenkig gelagert sind, hat Leissa (1969) die Eigenwerte für  $\nu = 0,3$  in Table 2.3 angegeben. Die Frequenzintervalle sind in Tab. XLV zusammen gestellt.

*Tab. XLV. Frequenzintervalle der Teilschwingungen einer am Rand gelenkig gelagerten Kreisplatte nach Leissa (1969)*

| <b><i>m</i></b> <b><i>n</i></b> | <b>1</b>     | <b>2</b> | <b>3</b> |
|---------------------------------|--------------|----------|----------|
| <b>0</b>                        | 1 (Referenz) | 5,980    | 14,909   |
| <b>1</b>                        | 2,801        | 9,747    |          |
| <b>2</b>                        | 5,154        | 14,093   |          |

Wäre kein Rand vorhanden (was z.B. auf manche Tamtams zutrifft), so könnte der schwebend aufgehängte Gong als freie Platte ("free") aufgefasst werden. Leissa (1969) gibt in Table 2.5 Eigenwerte für  $\nu = 0,33$  an. Die Normierung führt auf die Frequenzintervalle, die Tab. XLVI entnommen werden können.

*Tab. XLVI. Frequenzintervalle der Teilschwingungen einer freien Kreisplatte nach Leissa (1969)*

| <b><i>m</i></b> <b><i>n</i></b> | <b>1</b>     | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> |
|---------------------------------|--------------|----------|----------|----------|
| <b>0</b>                        | 1 (Referenz) | 4,244    | 9,665    | 17,283   |
| <b>1</b>                        | 2,259        | 6,590    | 13,100   |          |
| <b>2</b>                        | 3,880        | 9,236    | 16,953   |          |
| <b>3</b>                        | 5,825        | 12,252   |          |          |
| <b>4</b>                        | 8,047        |          |          |          |
| <b>5</b>                        | 10,546       |          |          |          |
| <b>6</b>                        | 13,320       |          |          |          |

Die theoretischen Werte der Tab. XLIV bis XLVI müssen mit den experimentell ermittelten Frequenzintervallen, wie sie in Kapitel 5 individuell für jeden Gong sowie für Klassen von Gongs zusammengestellt sind, verglichen werden. Stets sind die Intervalle bei den realen Gongs enger als bei den Platten. Die größte Ähnlichkeit mit den Gongs zeigt sich bei der am Rande eingespannten Kreisplatte (Tab. XLIV). Insgesamt weichen die Zahlenwerte jedoch so weit voneinander ab, dass von einer brauchbaren Übereinstimmung nicht die Rede sein kann. So eignet sich das Modell der Vollkreisplatte mit keiner der drei Randbedingungen dafür, die Frequenzintervalle eines Gongs auch nur näherungsweise zu beschreiben. Offensichtlich ist die Einfluss der Krümmung beim Gong so groß, dass ein ebener Schwinger als Modell nicht zu verwenden ist.

### 6.1.2. Versuchsweise Modellierung als Kegelschale

An die Stelle der Platte hat als weitergehendes Modell die Schale zu treten. Die nächste Stufe der Approximation könnte die Modellierung als Kegelschale sein. Anders als bei der Platte sind analytische Lösungen nicht bekannt. Jager (1979) hat, ausgehend von einer Energiebetrachtung, eine halbempirische Näherungsvorschrift angegeben, mit der die Eigenfrequenzen dünner Kegelschalen abgeschätzt werden können. Sie lautet

$$f_{mn}^2 = \sqrt[4]{\frac{\sqrt{3} a \sin^2 \alpha}{h} \frac{\rho E h^4}{6 M^2 \sin^2 \alpha}} \cdot \left[ m^4 \nu^2 + \frac{P_n^4 \sin^4 \alpha}{2} (1 - 4 \nu \sin^2 \alpha) - 2 \nu (m-1)(m-2)(m-3) - 2 \nu (m-2)(m-3)(m-4) \right] \quad (6)$$

mit

- $a$  Radius der Mittelfläche an der Basis des Kegels,
- $h$  Wanddicke des Kegels,
- $M$  Gesamtmasse des Kegels,
- $\alpha$  halber Öffnungswinkel des Kegels,
- $E$  Elastizitätsmodul,
- $\rho$  Dichte,
- $\nu$  Querkontraktionszahl,
- $m$  Anzahl der Knotendurchmesser,
- $n$  Anzahl der Knotenkreise und
 
$$P_n = \begin{cases} 1,875 & \text{für } n = 1, \\ 4,694 & \text{für } n = 2, \\ (n - 0,5)\pi & \text{für } n \geq 3. \end{cases}$$

Im Folgenden wird untersucht, ob diese Formel auf das vorliegende Problem anwendbar ist. Wird die Gesamtmasse  $M$  aus Gl. (6) gemäß

$$M^2 = \frac{a^4 \rho^2 \pi^2 h^2}{\sin^2 \alpha} \quad (7)$$

eliminiert, so folgt daraus als endgültige Frequenzformel

$$f_{mn} = 0,1392 \sqrt[4]{\sin \alpha} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \frac{h^{7/8}}{a^{15/8}}.$$

$$\sqrt{m^4 \nu^2 + \frac{P_n^4 \sin^4 \alpha}{2} (1 - 4 \nu \sin^2 \alpha) - 2 \nu (m-1)(m-2)(m-3) - 2 \nu (m-2)(m-3)(m-4)}. \quad (8)$$

Aus Gl. (8) resultiert bezüglich der Geometrieparameter die Proportionalität

$$f_{mn} \sim \frac{h^{7/8}}{a^{15/8}}. \quad (9)$$

Demnach geht die Wanddicke  $h$  geringfügig unterlinear in die Eigenfrequenzen ein; der Kehrwert des Radius  $a$  ist annähernd quadratisch mit den Eigenfrequenzen verknüpft. Daneben wirkt sich der Öffnungswinkel  $\alpha$  gemäß der vierten Wurzel von  $\sin \alpha$  aus.

In Hinsicht auf die Materialkennwerte ist aus Gl. (8) der Zusammenhang

$$f_{mn} \sim \sqrt{E/\rho} \quad (10)$$

zu ersehen, d.h. die Eigenfrequenzen  $f_{mn}$  sind der Wellengeschwindigkeit für Longitudinalwellen  $\sqrt{E/\rho}$  proportional. Die Querkontraktionszahl  $\nu$  geht in den umfangreichen Wurzel­ausdruck von Gl. (8) ein, der neben der Anzahl  $m$  der Knotendurchmesser über den Faktor  $P_n$  auch die Anzahl  $n$  der Knotenkreise erfasst. Bezüglich der Material- und Geometrieparameter stimmen die Zusammenhänge im Wesentlichen mit denjenigen überein, wie sie beispielsweise auch aus Gl. (3) für die Platte ersichtlich sind.

Dem umfangreichen Wurzel­ausdruck kommt dieselbe Rolle wie den Eigenwerten  $\lambda_{mn}$  (vgl. Gl. (3)) zu. Dabei spiegelt sich im Term

$$\frac{P_n^4 \sin^4 \alpha}{2} (1 - 4 \nu \sin^2 \alpha) \quad (11)$$

der Einfluss des Öffnungswinkels  $2\alpha$  und der Anzahl  $n$  der Knotenkreise wider, die den Faktor  $P_n$  bestimmt.

Für  $\nu = 0,3$  und den Winkel  $\alpha \approx 66^\circ$  wird der Klammerausdruck in Gl. (11) zu Null, was bedeutet, dass sich die Anzahl der Knotenkreise überhaupt nicht mehr auswirkt. Für größere Öffnungswinkel wird der Inhalt der Klammer in Gl. (11) negativ. Unter diesen Umständen, die für die Modellierung von Gongs relevant wären, kann die Formel (9) bereits für kleine  $m$  und  $n$  imaginäre und damit sinnlose Frequenzen ergeben. Obwohl diese Näherungsformel für Glockenberechnungen erstaunlich gute Ergebnisse gebracht hat (vgl. Fleischer (1989b)), erweist sie sich deshalb für die vorliegende Aufgabenstellung als ungeeignet.

Abschließend kann bezüglich des Einflusses der Abmessungen des Gongs den Gln. (4) und (9) weitgehend übereinstimmend entnommen werden, dass die Eigenfrequenzen

- etwa proportional zur Dicke ( $\sim h$ ) und
- etwa umgekehrt proportional zum Quadrat des Außenradius ( $\sim 1/a^2$ )

sind. Hinsichtlich der Materialeigenschaften  $\rho$  und  $E$  erweisen sich die Eigenfrequenzen gemäß den Gln. (5) und (10) als

- proportional zur Wellengeschwindigkeit ( $\sim \sqrt{E/\rho}$ ).

## 6.2. Finite-Element-Berechnungen (erste Berechnungsreihe)

### 6.2.1. Vorgehen

Als moderne Alternative zur analytischen Annäherung der realen Struktur haben sich numerische Verfahren etabliert, deren am weitesten entwickeltes die Methode der Finiten Elemente (FEM) ist. Die zu berechnende Struktur - im vorliegenden Fall der Gong - wird in eine große Menge kleiner Elemente von einfacher Geometrie zerlegt. Die mechanischen Gesetze werden für jedes dieser Elemente erfüllt und die Lösungen an den Rändern einander angepasst. Dank moderner Rechner und ausgeklügelter Pre- und Postprocessing-Programme bereitet die Bearbeitung eines FE-Modelles keine nennenswerten Schwierigkeiten mehr.

Probleme können jedoch mit zwei Schwerpunkten auftreten: Zum einen ist es nicht ganz trivial, die Geometrie eines Gongs fehlerfrei und vollständig zu erfassen. Erfahrungsgemäss bereitet vor allem die Bestimmung der Dicke Schwierigkeiten. Zum anderen sind weder die Zusammensetzung des Materials noch seine elastischen Eigenschaften genau bekannt. Mit diesen Schwierigkeiten hatten auch die beiden Autoren (Twork (1997) und Thölke (2000)) zu kämpfen, die am Institut für Mechanik FE-Schwingungsrechnungen durchgeführt haben.

### 6.2.2. Ergebnisse

Vor einigen Jahren hat Twork (1997) mit dem Programmpaket MSC/NASTRAN Berechnungen am Gong Nr. V durchgeführt. Für die Berechnung sind 8680 Elemente (vermutlich Plattenelemente) mit 8600 Knoten verwendet worden.

Als Materialparameter wurden

$$\begin{aligned} E &= 100,5 \text{ GPa als Elastizitätsmodul,} \\ \rho &= 8420 \text{ kg/m}^3 \text{ als Dichte und} \\ \nu &= 0,34 \text{ als Querkontraktionszahl} \end{aligned}$$

gewählt; diese Werte beziehen sich auf Glockenbronze.

Die Geometriedaten wurden ohne großen Anspruch hinsichtlich der Genauigkeit mit Lineal und Schieblehre bestimmt. Twork (1997) gibt als Ergebnis dieser überschlägige Messung

$$\begin{aligned} a &= 0,2625 \text{ m als Außenradius} \\ h_1 &= 2,3 \text{ mm als mittlere Dicke des schwingenden Teiles und} \\ h_2 &= 5,0 \text{ mm als mittlere Dicke des umgebördelten Randes} \end{aligned}$$

an. Für die Rechnung wurde die Dicke dann mit  $h_2 = 3 \text{ mm}$  an Rand und Schlagbuckel sowie mit  $h_1 = 1 \text{ mm}$  im dazwischen liegenden Bereich angenommen. Diese Abmessungen sind etwas kleiner als diejenigen, die Varsányi (2000a) in Abb. 290 für einen vergleichbaren Burma-Gong angibt. Damit ergab die Berechnung die richtige Frequenz der 0-1-Mode. Wie Gl. (3) entnommen werden kann, gehen bei einer Platte die Kennwerte gemäß

$$f_{mn} \sim \frac{h}{a^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1 - \nu^2)}}$$

in die Eigenfrequenzen ein. Bei der Kegelschale ist diese Abhängigkeit (siehe z.B. Gl. (8)) geringfügig anders, zeigt jedoch in dieselbe Richtung. Eventuell hat Twork (1997) einen zu groß angenommenen Elastizitätsmodul  $E$  mit Hilfe einer zu klein angenommenen Dicke  $h$  kompensiert, um realistische Rechenergebnisse zu erzielen.

Tab. XLVII. Mittels FEM berechnete Eigenfrequenzen der Teilschwingungen des großen Burma-Gongs Nr. V nach Twork (1997); in den Klammern sind die prozentualen Abweichungen der Rechenergebnisse, bezogen auf die Resultate der Vibrometer-Messungen nach Tab. VI, angegeben

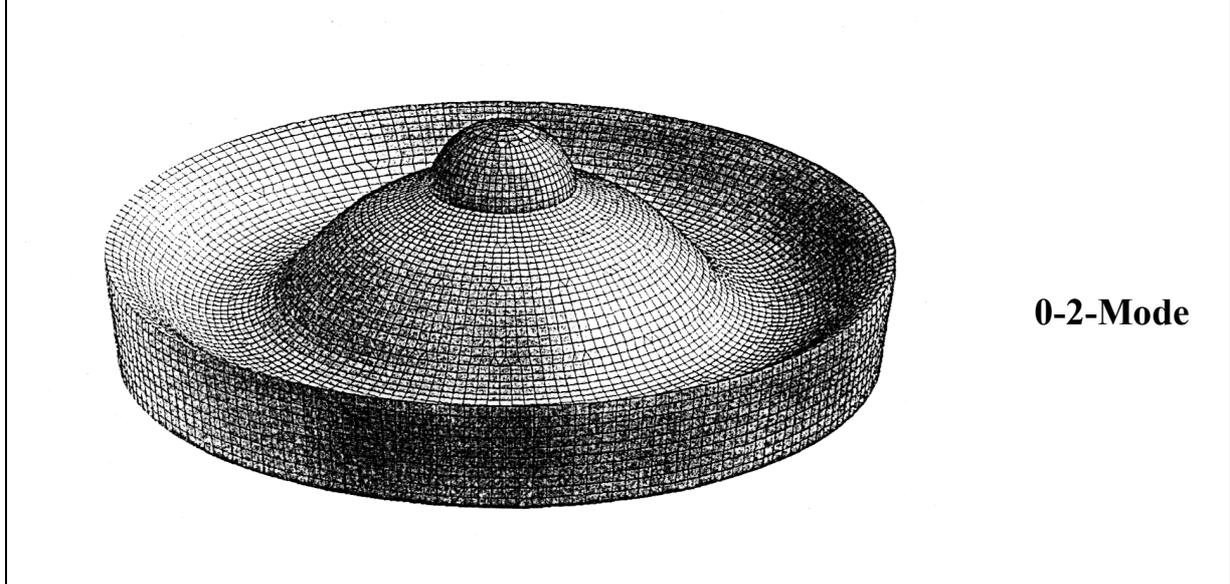
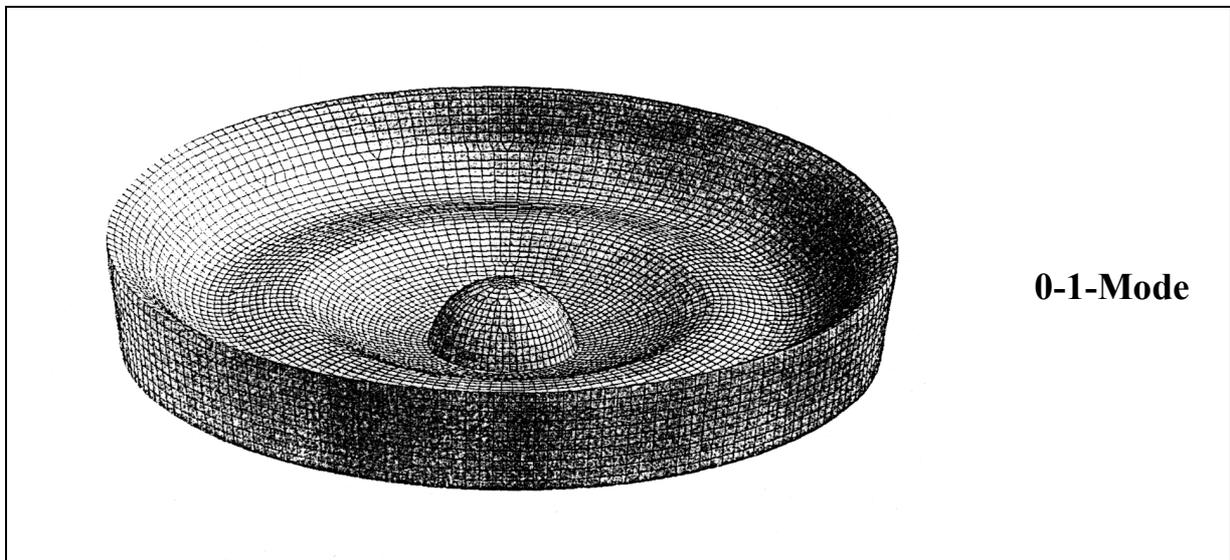
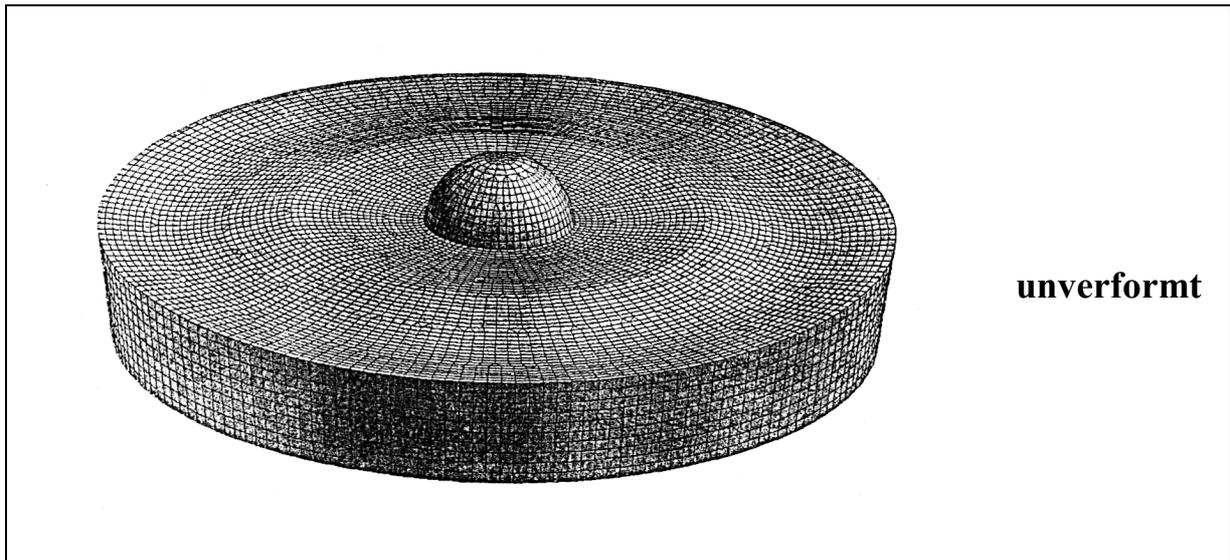
| $m$ | $n$ | 1                  | 2                 |
|-----|-----|--------------------|-------------------|
| 0   |     | 100,3 Hz (+ 0,3%)  | 179,8 Hz (- 7,8%) |
| 1   |     | 133,5 Hz (- 16,6%) | 220,4 Hz (- 9,1%) |
| 2   |     | 188,7 Hz (- 31,2%) |                   |
| 3   |     | 315,2 Hz (- 3,3%)  |                   |
| 4   |     | 462,5 Hz (+ 1,6%)  |                   |

In Tab. XLVII sind die Frequenzen, die Twork (1997) als Ergebnis seiner FE-Rechnungen angibt, zusammengestellt. Die Abweichungen zu experimentellen Ergebnissen nach Bogolowski (1999), die sich in Tab. VI und in der Tabelle von Fig. 25 finden, sind jeweils in Klammern beigefügt. Zwei "Ausreißer" treten bei der 1-1- und der 2-1-Mode auf. Die errechneten Frequenzen sind hier bis zu 31% kleiner als die gemessenen. Bei den übrigen Moden betragen die Abweichungen nur wenige Prozent. Absolut betrachtet liegen sie innerhalb eines "Toleranzschlauches" der Breite 33%. Würde die Dicke  $h$  etwas größer - und damit näher an der Wirklichkeit - angenommen, dann wären die errechneten Frequenzen höher und die Abweichungen von den experimentellen Werten dem Betrag nach kleiner.

Tab. XLVIII. Frequenzintervalle der mittels FEM von Twork (1997) berechnete Eigenfrequenzen der Teilschwingungen des großen Burma-Gongs Nr. V

| $m$ | $n$ | 1            | 2     |
|-----|-----|--------------|-------|
| 0   |     | 1 (Referenz) | 1,793 |
| 1   |     | 1,331        | 2,197 |
| 2   |     | 1,881        |       |
| 3   |     | 3,143        |       |
| 4   |     | 4,611        |       |

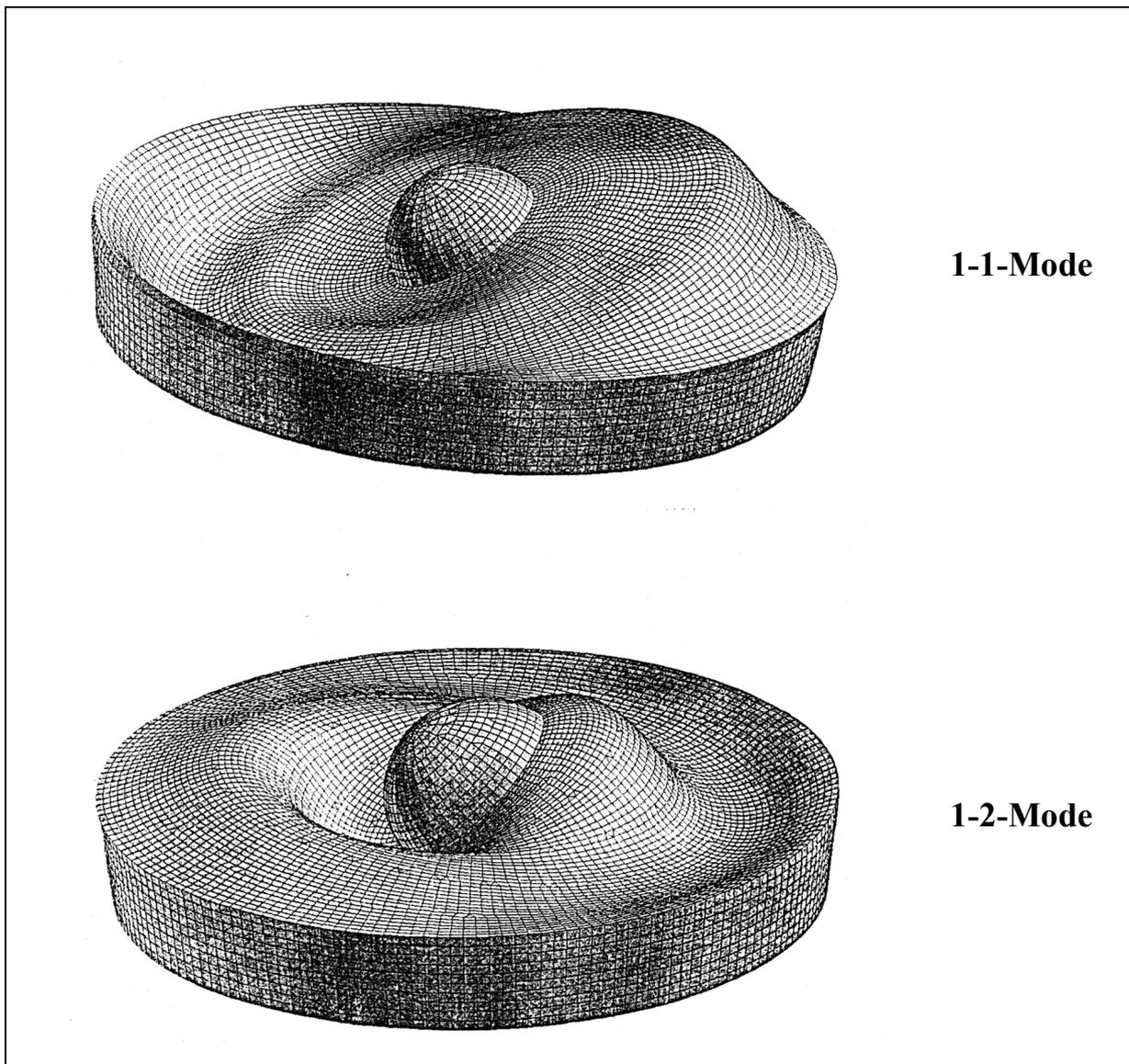
Tab. IIa. Mittels FEM errechnet Eigenschwingungsformen des Gongs Nr. V nach Twork (1997) Teil I



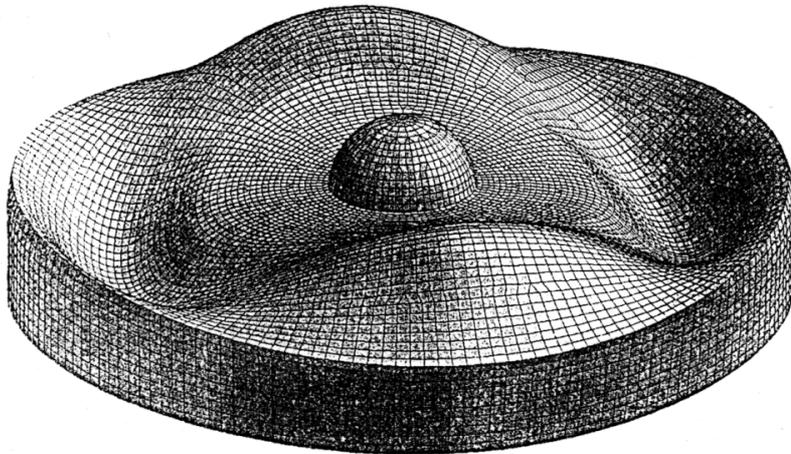
Tab. XLVIII gibt die Intervalle wieder, die man bei Normierung der errechneten Eigenfrequenzen auf die Frequenz der 0-1-Mode erhält. Im Gegensatz zu der Modellierung als Platte erkennt man hier die Tendenz, dass die Frequenzintervalle bei der FE-Rechnung etwas zu eng sind. Insgesamt lässt sich jedoch eine Übereinstimmung mit den gemessenen Intervallen gemäß Tab. XV feststellen, die deutlich besser als bei jeder bisherigen Approximation ist.

Tab. II zeigt die Schwingungsformen, die aus dieser FE-Rechnung resultieren. Im ersten Teil der Tabelle ist zum besseren Vergleich die unverformte Struktur wiedergegeben; darunter sind die beiden rotationssymmetrischen Moden ( $m = 0$ ) dargestellt. Während bei der 0-1-Mode  $n = 1$  Knotenkreis nahe am Rand auftritt, weist die 0-2-Mode einen weiteren Knotenkreis zwischen Rand und Schlagbuckel auf; so dass sich der mittlere und der äußere Teil in Gegenphase bewegen.

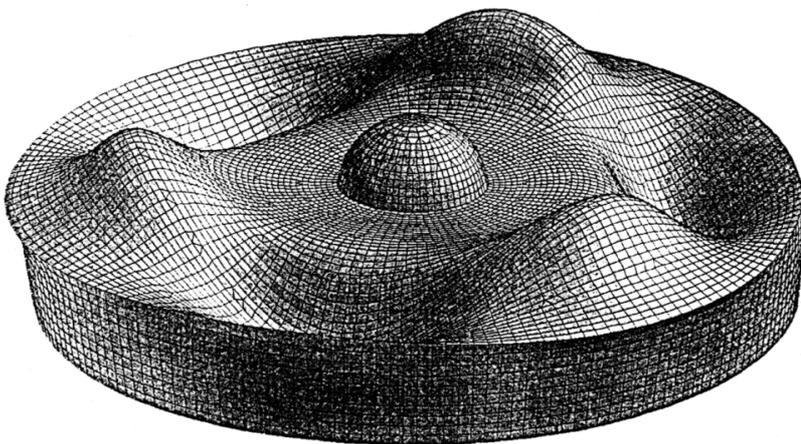
Tab. IIb. Mittels FEM errechnet Eigenschwingungsformen des Gongs Nr. V nach Twork (1997) Teil 2



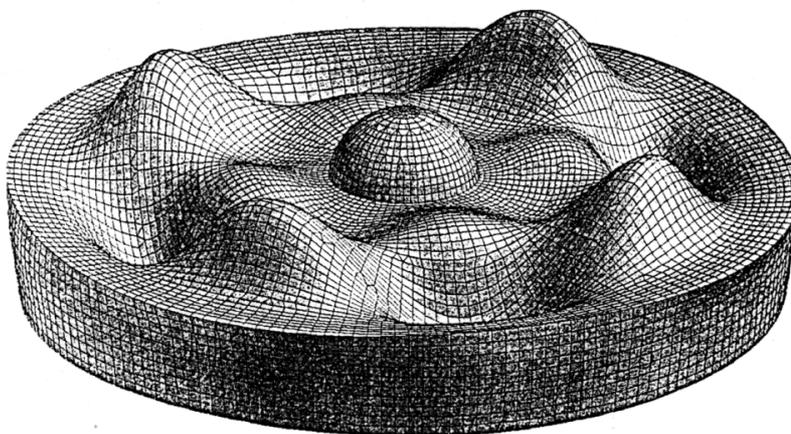
Tab. IIc. Mittels FEM errechnet Eigenschwingungsformen des Gongs Nr. V nach Twork (1997) Teil 3



**2-1-Mode**



**3-1-Mode**



**4-1-Mode**

Zwei antimetrische Moden mit  $m = 1$  Knotendurchmesser sind im zweiten Teil von Tab. II einander gegenüber gestellt. Die oben abgebildete 1-1-Mode weist  $n = 1$  Knotenkreis nahe dem Rand auf. Ein großer Teil des Gongs führt eine Art Kippbewegung aus. Die 1-2-Mode mit einem weiteren Knotenkreis ist dadurch gekennzeichnet, dass sich diese Kippbewegung nunmehr auf den inneren Teil um den Schlagbuckel herum beschränkt. Die gegenphasigen Schwingungen, die der äußere Bereich ausführt, sind vergleichsweise schwach ausgebildet. Hiermit findet sich bestätigt, was bei den Vibrometer-Messungen immer wieder zu beobachten war: Sobald sich ein zweiter Knotenkreis ausbildet, verlagert sich die Zone maximaler Amplituden vom äußeren in den inneren Teil des Gongs.

Im dritten Teil von Tab. II sind drei weitere antimetrische Schwingungsformen mit  $m = 2, 3$  bzw. 4 Knotendurchmessern zusammengestellt, die allesamt  $n = 1$  Knotenkreis in der Nähe des Randes aufweisen. Deutlich ist zu erkennen, wie sich der Gong in immer mehr immer kleinere Bereiche aufteilt, die in Gegenphase zueinander schwingen.

Da bei den FE-Berechnungen keine Einschränkung hinsichtlich der Freiheitsgrade gemacht wurde, vermitteln die Schwingungsbilder einen Eindruck von der räumlichen Bewegung des Gongs. Im Gegensatz dazu haben die Vibrometer-Messungen stets nur die Komponente der Bewegung in Richtung des Laserstrahls erfassen und demzufolge Aufschluss ausschließlich über die wandnormale Komponente dieser Bewegung geben können. Damit ist, wie die bisher vorliegenden FE-Resultate belegen, der wichtigste Teil der Bewegung gemessen und richtig wiedergegeben worden.

## 6.3. Finite-Element-Berechnungen (zweite Berechnungsreihe)

### 6.3.1. Vorgehen

In jüngster Zeit hat Thölke (2000) FE-Berechnungen mit Hilfe von MSC/NASTRAN an drei unterschiedlichen Burma-Gongs durchgeführt. Das geometrische Modell entstand folgendermaßen: Ausgangspunkt waren die mit der Mitutoyo-Messmaschine ermittelten Außenkonturen; vgl. Kapitel 2. Daraus wurde eine mittlere Kontur errechnet. Es erweist sich als fehlerträchtig, die Dicke über zwei aufeinanderfolgende Konturmessungen zu bestimmen, zwischen denen das Messobjekt neu aufgespannt werden muss. Die fehlenden Abmessungen wurden deshalb indirekt ermittelt. Aufbauend auf weiteren Angaben (gemessene Masse, übliche Aufteilung Masse des Buckels zu Gesamtmasse, aus dem FE-Netz berechnetes Volumen) wurde ein wirklichkeitsnahes Modell für die FE-Berechnung konstruiert. Die Dichte wurde mit  $\rho = 8000 \text{ kg/m}^3$  (Bronze), die Querkontraktionszahl mit  $\nu = 0,3$  angenommen. Der unbekannte Elastizitätsmodul wurde "gefittet". Darunter ist zu verstehen, dass ihn Thölke so lange variiert hat, bis die errechneten Schwingungsfrequenzen auf die im Folgenden dargelegte Weise mit den gemessenen Frequenzen übereinstimmten. Als Randbedingung wurde frei-frei gewählt.

### 6.3.2. Ergebnisse für den kleinen Burma-Gong Nr. I

Die gemessenen Konturen können Fig. 6 entnommen werden. In einer neueren Nachrechnung wurden mit dem Elastizitätsmodul  $E = 60 \text{ GPa}$  die Frequenzen errechnet, die in Tab. L zusammen gestellt sind. Die Prozentzahlen in Klammern geben die Abweichungen dieser Werte von den Schwingungsfrequenzen an, die mit dem Vibrometer gemessen wurden und in Tab. II aufgelistet sind. Für die Frequenzen der ersten fünf Teilschwingungen sind die errechneten Werte maximal um -3,4% kleiner bzw. +6,4% größer als die gemessenen Werte. Im Bereich bis 1000 Hz verbreitert sich dieser "Toleranzschlauch" auf -11,0% bis +6,4%, d.h. mit der Tendenz, dass die Rechnung mit wachsender Frequenz zunehmend zu kleine Werte ergibt.

*Tab. L. Mittels FEM berechnete Eigenfrequenzen der Teilschwingungen des kleinen Burma-Gongs Nr. I; in den Klammern sind die prozentualen Abweichungen der Rechenergebnisse, bezogen auf die Resultate der Vibrometer-Messungen nach Tab. II, angegeben*

| <b><i>m</i></b> | <b><i>n</i></b> | <b>1</b>           | <b>2</b>           |
|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| <b>0</b>        |                 | 168,5 Hz (+ 3,7%)  | 343,2 Hz (+ 6,4%)  |
| <b>1</b>        |                 | 268,0 Hz (+ 3,1%)  | 398,4 Hz (+ 1,5%)  |
| <b>2</b>        |                 | 425,0 Hz (- 3,4%)  | 805,6 Hz (- 11,0%) |
| <b>3</b>        |                 | 564,2 Hz (- 8,3%)  |                    |
| <b>4</b>        |                 | 740,8 Hz (- 10,5%) |                    |

Für die Nachrechnung wurden die Ausgangsdaten gegenüber denjenigen, die Thölke (2000) verwendet hat, verbessert. Folglich sind die Resultate auch besser. Die Intervalle, die sich damit bei Normierung auf die 0-1-Schwingung ergeben, können Tab. LI entnommen werden. Sie sind mit den Messergebnissen von Tab XXII zu vergleichen. Je größer die errechneten Intervalle werden, desto mehr weichen sie von den gemessenen ab. Insgesamt kann die Übereinstimmung als durchaus befriedigend bezeichnet werden. Sie ist auf jeden Fall mit Abstand besser als jede Annäherung, die durch Modellierung des Gongs als Platte erreicht werden konnte.

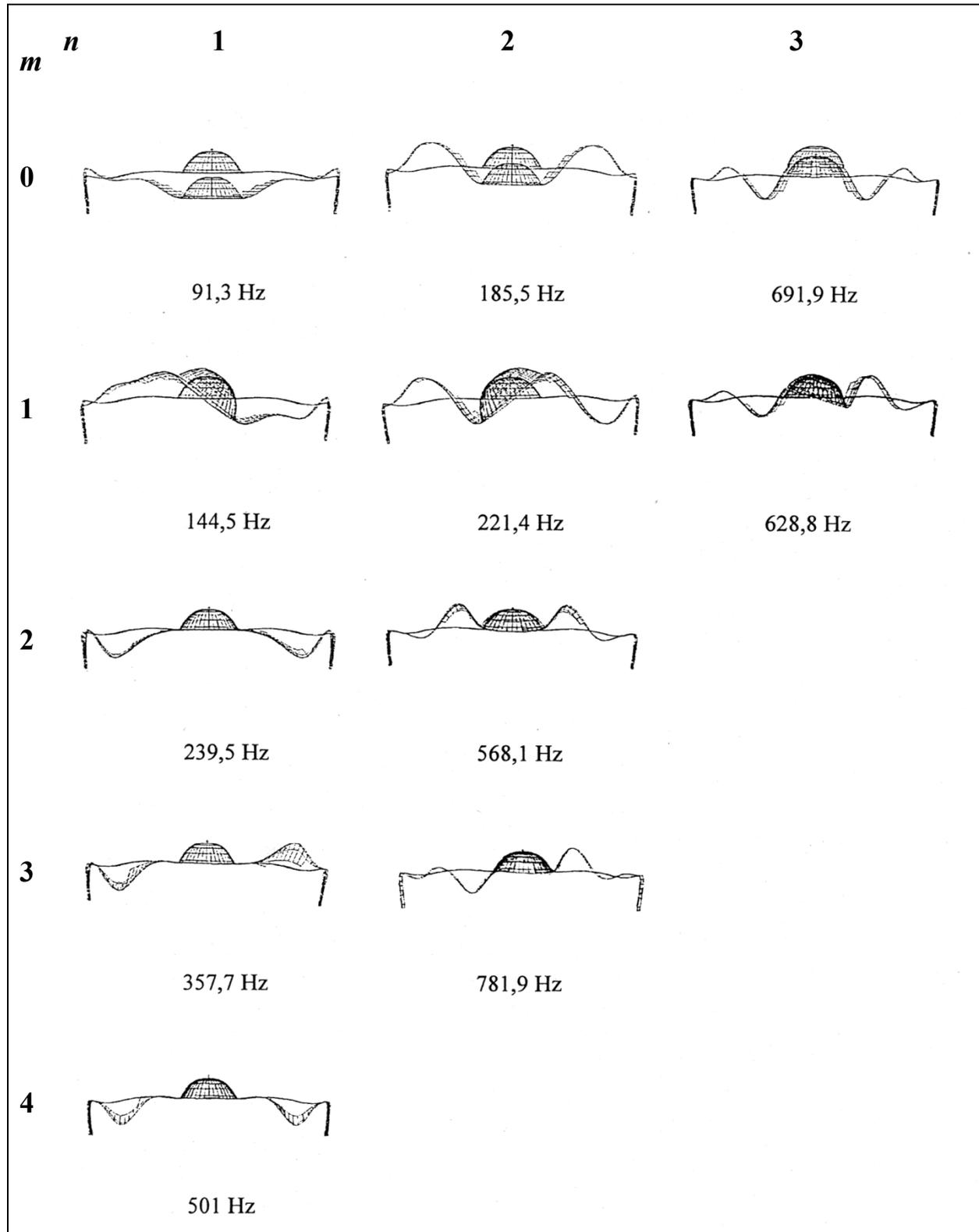
*Tab. LI. Frequenzintervalle der mittels FEM berechnete Eigenfrequenzen der Teilschwingungen des kleinen Burma-Gongs Nr. I*

| <b><i>m</i></b> | <b><i>n</i></b> | <b>1</b>     | <b>2</b> |
|-----------------|-----------------|--------------|----------|
| <b>0</b>        |                 | 1 (Referenz) | 2,036    |
| <b>1</b>        |                 | 1,590        | 2,363    |
| <b>2</b>        |                 | 2,522        | 4,780    |
| <b>3</b>        |                 | 3,347        |          |
| <b>4</b>        |                 | 4,395        |          |

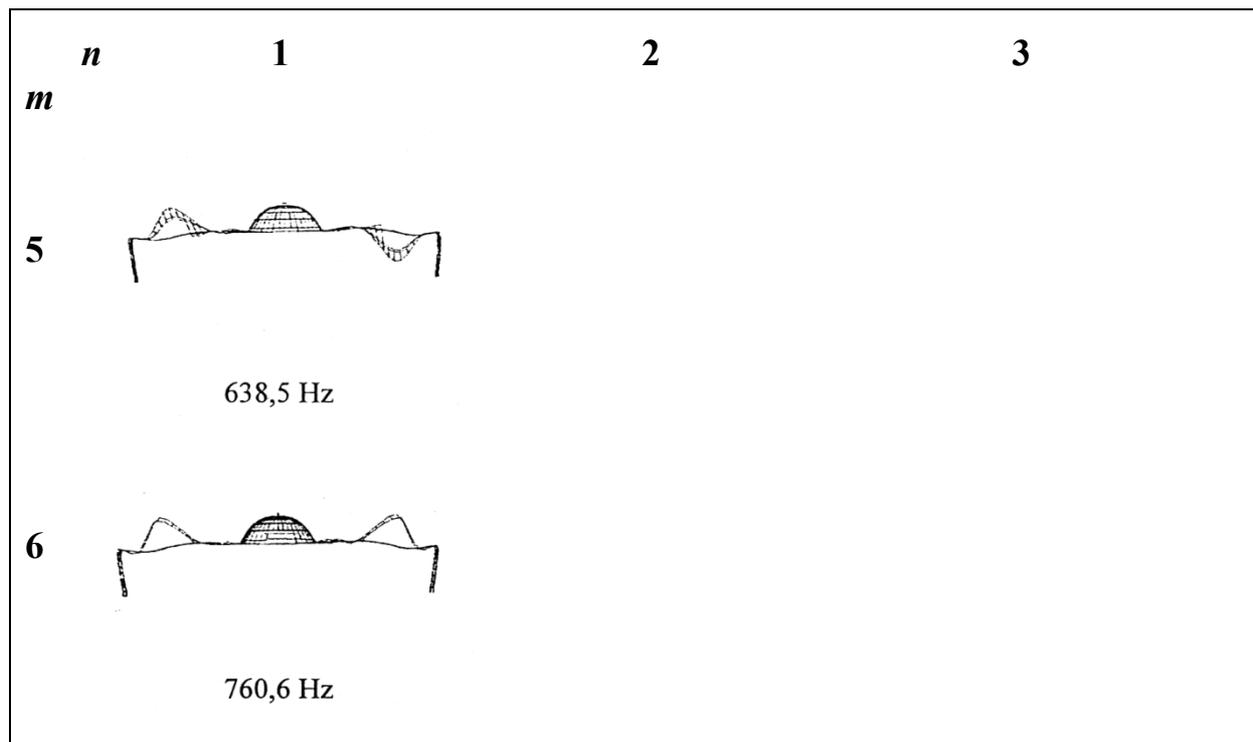
### 6.3.3. Ergebnisse für den großen Burma-Gong Nr. V

Die gemessene Außenkontur ist in Fig. 7 unten dargestellt. Der Elastizitätsmodul, mit dem sich nach Thölke (2000) optimale Rechenergebnisse erzielen lassen, ist  $E = 72$  GPa. Die Schwingungsbilder samt den Frequenzen, die sich dafür ergeben, sind in Tab. LII aufgelistet.

Tab. LIIa. Mittels FEM errechnet Eigenschwingungsformen des Gongs Nr. V nach Thölke (2000) Teil 1



Tab. LIIb. Mittels FEM errechnet Eigenschwingungsformen des Gongs Nr. V nach Thölke (2000) Teil 2



In Tab. LII sind die Eigenformen tabelliert, die aus der FE-Berechnung resultieren. Zusätzlich zur verformten Struktur ist stets auch die unverformte abgebildet. Trotz der neuartigen Darstellung in Form von Radialschnitten ist die Übereinstimmung mit den früheren numerischen Ergebnissen von Tab. II offenkundig. Auch ein Vergleich mit den Resultaten der Vibrometer-Messung sowie der anschließenden experimentellen Modalanalyse (Tab. XV und XVII) zeigt, dass die Berechnung mittels der Methode der Finiten Elemente die gleichen Schwingungsformen liefert, wie sie die Messungen ergeben haben.

Die errechneten Eigenfrequenzen samt ihren Abweichungen von den gemessenen Schwingungsfrequenzen gemäß Tab. VII sind in Tab. LIII zusammen gestellt. Die Rechnung ergibt Werte, die maximal um -9,7% kleiner bzw. um +10,9% größer als die experimentellen Ergebnisse sind. Beim Gong Nr. V nimmt der Elastizitätsmodul einen etwas größeren und damit realistischeren Wert an. Die errechneten Frequenzen weichen von den gemessenen etwa im selben Maße ab wie beim Gong Nr. I. Das Toleranzband ist im Bereich bis 800 Hz insgesamt noch etwa 20% breit. Ebenso wie beim vorher betrachteten Gong erweist sich die Annäherung damit als so gut, dass sie für viele Anwendungen von praktischem Nutzen sein kann.

Dies bestätigt sich in Tab. LIV auch für die Intervalle der Frequenzen. Die dort angegebenen Werte basieren auf der FE-Berechnung nach Thölke (2000) und sind mit den gemessenen von Tab. XXVIII zu vergleichen. Für die musikalische Beurteilung der Intervalle dürften die Diskrepanzen noch zu groß sein. Aus der Sicht der Schwingungstechnik stimmen die errechneten Intervalle jedoch durchaus erfreulich mit denen überein, die aus den experimentellen Resultaten abgeleitet sind.

Tab. LIII. Mittels FEM berechnete Eigenfrequenzen der Teilschwingungen des großen Burma-Gongs Nr. V nach Thölke (2000); in den Klammern sind die prozentualen Abweichungen der Rechenergebnisse, bezogen auf die Resultate der Vibrometer-Messungen nach Tab. VII, angegeben

| $m$ $n$ | 1                  | 2                 | 3                 |
|---------|--------------------|-------------------|-------------------|
| 0       | 91,3 Hz (- 8,7%)   | 185,5 Hz (- 4,9%) | 691,9 Hz (+ 1,7%) |
| 1       | 144,5 Hz (- 9,7%)  | 221,4 Hz (- 8,7%) | 628,8 Hz (- 3,3%) |
| 2       | 239,5 Hz (- 1,2%)  | 568,1 Hz (- 4,5%) |                   |
| 3       | 357,7 Hz (+ 10,9%) | 781,9 Hz (- 6,6%) |                   |
| 4       | 501,0 Hz (+ 10,1%) |                   |                   |
| 5       | 638,5 Hz (+ 1,3%)  |                   |                   |
| 6       | 760,6 Hz (- 4,0%)  |                   |                   |

Tab. LIV. Frequenzintervalle der mittels FEM von Thölke (2000) berechnete Eigenfrequenzen der Teilschwingungen des großen Burma-Gongs Nr. V

| $m$ $n$ | 1            | 2     | 3     |
|---------|--------------|-------|-------|
| 0       | 1 (Referenz) | 2,032 | 7,578 |
| 1       | 1,583        | 2,425 | 6,887 |
| 2       | 2,623        | 6,222 |       |
| 3       | 3,918        | 8,564 |       |
| 4       | 5,487        |       |       |
| 5       | 6,993        |       |       |
| 6       | 8,330        |       |       |

### 6.3.4. Ergebnisse für den großen Burma-Gong Nr. VI

Thölke (2000) hat FE-Berechnungen für einen weiteren großen Burma-Gong durchgeführt. Fig. 9 zeigt die Konturen, von denen die äußere für die Berechnung herangezogen wurde. Beim Vermessen der Kontur zeigte sich, dass dieses Instrument eine erhebliche Exzentrizität aufweist, d.h. der Buckel sitzt nicht in der Mitte. Diese Abweichung von der Rotations-symmetrie wurde bei der Rechnung nicht berücksichtigt. Der Elastizitätsmodul, mit dem die Rechnung brauchbare optimale Resultate ergeben hat, ist  $E = 70$  GPa. Die Eigenfrequenzen, die man damit erhält, sind in Tab. LV aufgelistet.

Tab. LV. Mittels FEM berechnete Eigenfrequenzen der Teilschwingungen des großen Burma-Gongs Nr. VI nach Thölke (2000); in den Klammern sind die prozentualen Abweichungen der Rechenergebnisse, bezogen auf die Resultate der Vibrometer-Messungen nach Tab. VII, angegeben

| $m$ | $n$ | 1                  | 2                  | 3                  |
|-----|-----|--------------------|--------------------|--------------------|
| 0   |     | 87,3 Hz (- 14,8%)  | 224,9 Hz (+ 7,1%)  | 810,4 Hz ( ÷ )     |
| 1   |     | 154,4 Hz (+ 1,5%)  | 269,9 Hz (+ 1,9%)  | 700,6 Hz (+ 16,8%) |
| 2   |     | 325,2 Hz (+ 24,4%) | 643,8 Hz (+ 26,9%) |                    |
| 3   |     | 413,2 Hz (+ 19,0%) | 850,5 Hz (+ 24,6%) |                    |
| 4   |     | 544,9 Hz (+ 11,8%) |                    |                    |
| 5   |     | 688,7 Hz (+ 5,9%)  |                    |                    |
| 6   |     | 821,6 Hz (+ 4,3%)  |                    |                    |
| 7   |     | 943,6 Hz (+ 0,4%)  |                    |                    |

Diese Werte sind mit den experimentell ermittelten Frequenzen von Tab. VII zu vergleichen. Tab. LV ist zu entnehmen, dass die errechneten Frequenzen der ersten 14 Teilschwingungen maximal um -14,8% kleiner und +26,9% größer als die gemessenen Werte sind. Im Bereich bis 1000 Hz hat dieser "Toleranzschlauch" somit eine Gesamtbreite von 41,7%. Die Frequenz der 0-1-Mode wird um 14,8% zu klein errechnet. In allen anderen Fällen zeigt sich die Tendenz, dass die Rechnung stets zu große Werte ergibt.

Die Intervalle, die sich bei Normierung auf die 0-1-Schwingung ergeben, sind in Tab. LVI zusammen gestellt. Sie sind mit denen in Tab XXIX zu vergleichen. Die Tatsache, dass die Referenzfrequenz zu niedrig und alle übrigen Frequenzen zu hoch errechnet werden, wirkt sich erwartungsgemäß fatal aus. Verglichen mit den gemessenen Intervallen sind die mittels FEM errechneten durchweg zu groß. Auch hier ist die Übereinstimmung noch nicht ganz so gut, wie es zu wünschen wäre. Sie ist jedoch immer noch wesentlich besser als bei der Modellierung des Gongs als Kreisplatte.

Tab. LVI. Frequenzintervalle der mittels FEM von Thölke (2000) berechnete Eigenfrequenzen der Teilschwingungen des großen Burma-Gongs Nr. VI

| $m$ | $n$ | 1            | 2     | 3     |
|-----|-----|--------------|-------|-------|
| 0   |     | 1 (Referenz) | 2,576 | 9,283 |
| 1   |     | 1,769        | 3,091 | 8,025 |
| 2   |     | 3,725        | 7,375 |       |
| 3   |     | 4,733        | 9,742 |       |
| 4   |     | 6,242        |       |       |
| 5   |     | 7,889        |       |       |
| 6   |     | 8,331        |       |       |
| 7   |     | 10,809       |       |       |

#### 6.4. Zusammenfassende Bemerkung

Bei einem Gong sind Berechnungen schon deshalb schwierig, weil weder die Eigenschaften des Materials noch die Geometrie exakt bekannt sind. Offenbar ist die Gestalt eines Gongs so kompliziert, dass sich einfache Schwinger wie Platte oder Kegelschale nicht für die Modellierung eignen. Das verfügbare Modell der "schlanken" Kegelschale ist aufgrund der "flachen" Form des Gongs von vornherein nicht anwendbar. Modelliert man den Gong als Platte, so zeigt die Auswertung der Ergebnisse, dass die Intervalle der damit errechneten Eigenfrequenzen unzulässig weit von denen abweichen, die für die Gongs experimentell bestimmt wurden. Dies darf auch nicht verwundern, da die vielfältigen Krümmungen durch einen ebenen Schwinger naturgemäß nicht erfasst werden können. Bei den Modellrechnungen treten jedoch funktionale Zusammenhänge zutage, die zumindest ungefähr die Einflüsse von Geometrieparametern (Außenradius, Dicke) und Materialeigenschaften (Elastizitätsmodul, Dichte bzw. Wellengeschwindigkeit) erkennen lassen.

Solche einfachen Beziehungen sind bei der nächsten Stufe der Modellierung, die erprobt wurde, nicht mehr unmittelbar ersichtlich. Die Methode der Finiten Elemente wurde dazu genutzt, Modelle zu erstellen, mit denen sich die Geometrie eines realen Gongs wesentlich besser annähern lässt. Die Frequenzintervalle, die daraus resultieren, geben die Realität weitgehend brauchbar wieder. Um die absoluten Werte der Rechnung mit den experimentellen Ergebnissen in Übereinstimmung zu bringen, müssen für die nur ungefähr bekannten Material- und Geometrieparameter sinnvolle Schätzwerte angenommen werden. Zwei Wege wurden beschritten. Der eine besteht darin, die Eigenschaften eines verwandten Materials (z.B. gegossener Glockenbronze) vorzugeben und die - nur unzureichend bekannte - Dicke des Gongs so lange zu variieren, bis errechnete und gemessene Frequenzen hinreichend überein-

stimmen. Als weitere Möglichkeit wurde erprobt, die Geometrie vorzugeben und die - weitgehend unbekannt - Eigenschaften des Materials, insbesondere den Elastizitätsmodul, zu verändern. Bei diesem "Fitten" haben sich Wellengeschwindigkeiten

$$\sqrt{E/\rho} = 2739 \dots 3000 \text{ m/s}$$

als geeignet erwiesen. Die Wellengeschwindigkeit von gegossener Glockenbronze liegt nach Fleischer (1989a) zwischen etwa 3400 m/s und 3881 m/s. Die gefitteten Wellengeschwindigkeiten nehmen damit durchaus realistische Werte an.

Den Schwachpunkt stellt nach wie vor die hinreichend genaue Erfassung der Geometrie dar. Die Messung von zwei Konturen des Gongs, die nachträglich aneinander gefügt werden müssen, hat sich als fehlerträchtig erwiesen. In naher Zukunft sollen Rechenetze auf zwei unterschiedlichen Messungen der Geometrie aufbauen: Im ersten Schritt wird auf die beschriebene Weise mit der Mitutoyo-Messmaschine die Außenkontur erfasst. Im zweiten Schritt wird mit Hilfe eines speziellen Dickenmessgerätes die Dicke senkrecht zur Oberfläche gemessen. In ferner Zukunft soll darüber hinaus die Idealisierung der Rotationssymmetrie fallen gelassen und die tatsächliche Geometrie des Gongs im FE-Modell berücksichtigt werden

Obwohl Verbesserungen nötig und möglich sind, haben die ersten Bemühungen ermutigende Resultate erbracht. Somit erweist sich die Methode der Finiten Elemente als prinzipiell richtige Vorgehensweise, das Schwingungsverhalten von Gongs theoretisch zu behandeln.

## 7. DISKUSSION UND AUSBLICK

Wie Gongs geschichtlich entstanden und mit welchen anderen Musikinstrumenten sie verwandt sind, hat erst in jüngster Zeit Varsányi (2000a) ausführlich und kenntnisreich behandelt. Diese historischen, ethnologischen und musikwissenschaftlichen Aspekte haben im vorliegenden Bericht keine Rolle gespielt. Nicht einmal das Schallsignal, das beim Anschlagen entsteht, wurde untersucht. Vielmehr wurde der Gong ausschließlich als mechanischer Schwinger betrachtet. Neun Exemplare, von denen sieben aus Burma und zwei aus Java stammen, wurden im Hinblick auf ihre Schwingungen erforscht. Dabei interessierte nur das "Kleinsignal-Verhalten", d.h. wie der Gong im linearen Bereich infolge kleiner Anregungskräfte mit kleinen Auslenkungen schwingt.

Die wesentlichen Grundgrößen, die das lineare Schwingungsverhalten eines Kontinuums charakterisieren, sind seine Eigenformen (Moden) und Eigenfrequenzen. Ein erprobtes experimentelles Verfahren zu deren Bestimmung ist die Modalanalyse. Diese erfordert nicht nur die Erfassung von Übertragungsfunktionen an zahlreichen Messpunkten auf dem Objekt, sondern auch eine aufwendige Nachbearbeitung der Messdaten in einem speziellen Programm. Die nachgeschaltete Bearbeitung dient dazu, die "Atome" einer Kontinuumschwingung, die Moden mit ihren charakteristischen Formen, Frequenzen und Dämpfungen, unter Beachtung der mechanischen Gesetzmäßigkeiten aus dem Gemisch von Schwingungen zu extrahieren.

Die Messungen in diesem Bericht wurden ausnahmslos mit einem Laser Scanning Vibrometer der Firma Polytec durchgeführt, das die rasche und berührungsfreie Messung der Schwinggeschwindigkeit einer Oberfläche erlaubt. Für drei Gongs wurde auf der Basis solcher Messdaten eine ausführliche Modalanalyse der oben beschriebenen Art durchgeführt. Deren Ergebnisse wurden mit den "Schwingungsmustern" (Operating Deflection Shapes) verglichen, die ohne weiteren Rechenaufwand unmittelbar den experimentellen Daten entnommen wurden. Es zeigte sich, dass in der Mehrzahl der Fälle die vereinfachte Vorgehensweise ebenfalls zum Ziel führt: Die Übertragungsfunktionen der einzelnen Messpunkte werden zu einer Gesamt-Übertragungsfunktion zusammengefasst. Deren Maxima dienen als Indikatoren für Eigenfrequenzen. Die zugehörigen Schwingungsmuster, die sich visualisieren lassen, weisen große Ähnlichkeit mit den Moden auf. Für den hier untersuchten Frequenzbereich (bis 1 kHz bei kleineren und bis 500 Hz bei größeren Gongs) zeigt sich, dass die Möglichkeiten der Messdatenverarbeitung ausreichen, die in der Software des Vibrometers enthalten sind. Davon wurde bei den neun Gongs Gebrauch gemacht, womit man gute Schätzwerte für die Eigenfrequenzen erhielt. Das Schwingungsbild, das der Gong bei einer solchen Frequenz ausbildet, wurde als gute Näherung der Eigenschwingungsform betrachtet. Auf eine nachgeschaltete Modalanalyse wurde - mit Ausnahme der erwähnten Beispiele - verzichtet.

Im Institut für Mechanik haben verschiedene Experimentatoren an Gongs bereits zahlreiche Vibrometer-Messungen vorgenommen. Aus der Fülle des experimentellen Materials wurde für jedes der neun Instrumente ein Datensatz ausgewählt und auf die beschriebene Weise ausgewertet. Als Resultate liegen die Frequenzen und Formen der wesentlichen Teilschwingungen vor. Das Eigenschwingungsverhalten ist somit untersucht, und die neun Gongs als lineare mechanische Schwinger sind hinreichend charakterisiert.

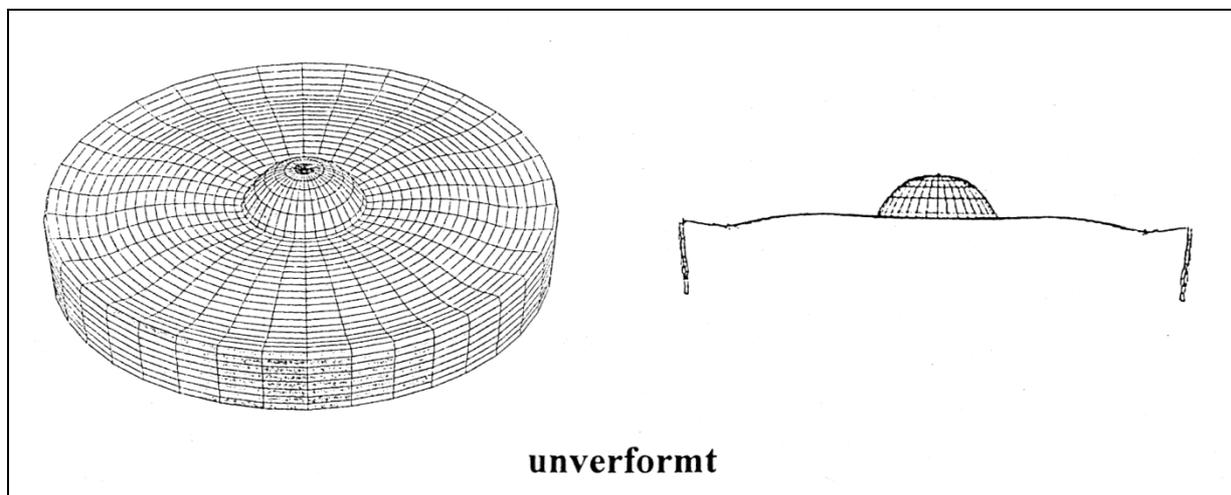
Zwar liegen ursprünglich auch Informationen hinsichtlich der absoluten Amplituden vor, mit denen sich diese Schwingungen bei vorgegebener Anregungskraft ausbilden. Nicht bekannt ist dagegen, in welchem Maße diese Teilschwingungen durch den Anschlag mit dem Schlegel tatsächlich angeregt werden. Des weiteren ist noch ungeklärt, in welchem Ausmaß sich die mechanischen Schwingungen des Gongs in ein entsprechendes Schallsignal am Ohr des Zuhörers umsetzen. Nur in vagen Umrissen ist zur Zeit erkennbar, welche dieser Schallkompo-

nennten zur Hörempfindung beitragen und welche infolge Verdeckung unhörbar bleiben werden. Sowohl bei der Umsetzung der Schwingung in Schall wie auch bei der auralen Verarbeitung wird eine Informationsreduktion stattfinden. Bezüglich des linearen Schwingungsverhaltens ist insgesamt zu vermuten, dass derzeit *m e h r* als diejenigen Komponenten bekannt sind, welche für das Hören tatsächlich relevant sein werden. Auf eine Interpretation der physikalischen Ergebnisse, insbesondere der Frequenzen und ihrer Intervalle, bezüglich ihrer musikalischen Bedeutung ist deshalb im derzeitigen Stadium der Untersuchungen bewusst verzichtet worden.

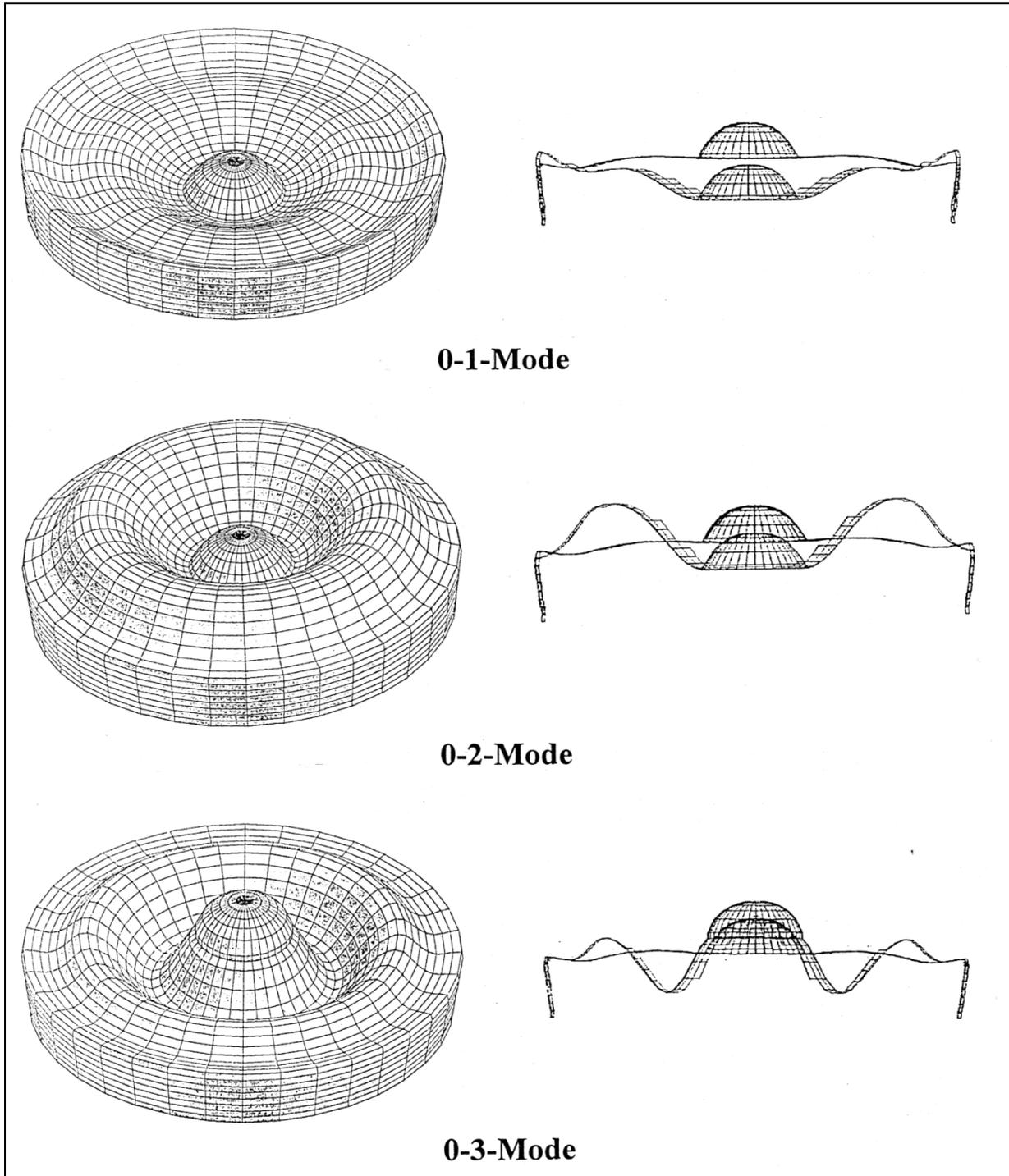
In Hinsicht auf die Schwebungen, die nach Varsányi (2000a und b) eine ganz wesentliche Rolle bei einem Gongklang spielen, liegen einige Erkenntnisse vor. Da der Gong nicht streng axialsymmetrisch ist, spalten sich sämtliche antimetrischen Schwingungen in zwei Partialschwingungen mit leichtem Frequenzversatz auf ("Moden-Splitting"). In der Folge weist das Schallspektrum anstelle eines Teiltones zwei Partialtöne auf, deren Frequenzen um mehrere Hertz voneinander verschieden sein können. Wie groß die Frequenzdifferenzen sind, die gemessen wurden, ist in Tabellen vermerkt. Eng benachbarte Partialtöne rufen Schwebungen hervor. Nun wäre zu prüfen, ob die auf Moden-Splitting basierenden Schwebungen tatsächlich die musikalisch relevanten sind oder ob noch andere Effekte in Betracht kommen können. Nach gängiger Meinung (Fletcher und Rossing (1998), Varsányi (2000a)) sind die rotations-symmetrischen 0-1- und 0-2-Schwingungsmoden von großer musikalischer Bedeutung. Bei rotationssymmetrischen Moden kommt jedoch eine Aufspaltung der Art, wie sie bei antimetrischen Moden auftritt, nicht vor. Schwebungen des 0-1- und 0-2-Tones müssen demzufolge andere Ursachen haben, die nach Ansicht des Autors mit Nichtlinearitäten zu tun haben dürften. Diese Vermutung wird derzeit überprüft.

Ein geflügeltes Wort besagt, dass es nichts Praktischeres gibt, als eine gute Theorie. Um den Versuchsergebnissen die richtige Struktur zu geben, das Verständnis zu vertiefen und Vorhersagen machen zu können, wurde nach einer theoretischen Beschreibung des Eigenschwingungsverhaltens gesucht. Dazu muss ein geeignetes mechanisches Modell gefunden werden. Das Modell der Kreisplatte führt auf Knotenkreise und -durchmesser als Ordnungskriterien für die Moden, erlaubt jedoch nicht, die Frequenzen richtig zu berechnen. Analoges gilt für das Modell des Kreiskegels. Beide Modelle lassen jedoch einige funktionale Zusammenhänge zwischen Geometrie, Material und Frequenz erkennen, die beim realen Gong in ähnlicher Weise vorliegen dürften. Solche elementaren Einblicke sind für die Praxis stets äußerst hilfreich. Bedauerlicherweise erweisen sich diese einfachen Schwinger darüber hinaus jedoch als nicht geeignet, den Gong zu modellieren.

*Tab. LVIIa. FE-Modell des unverformten Gongs*



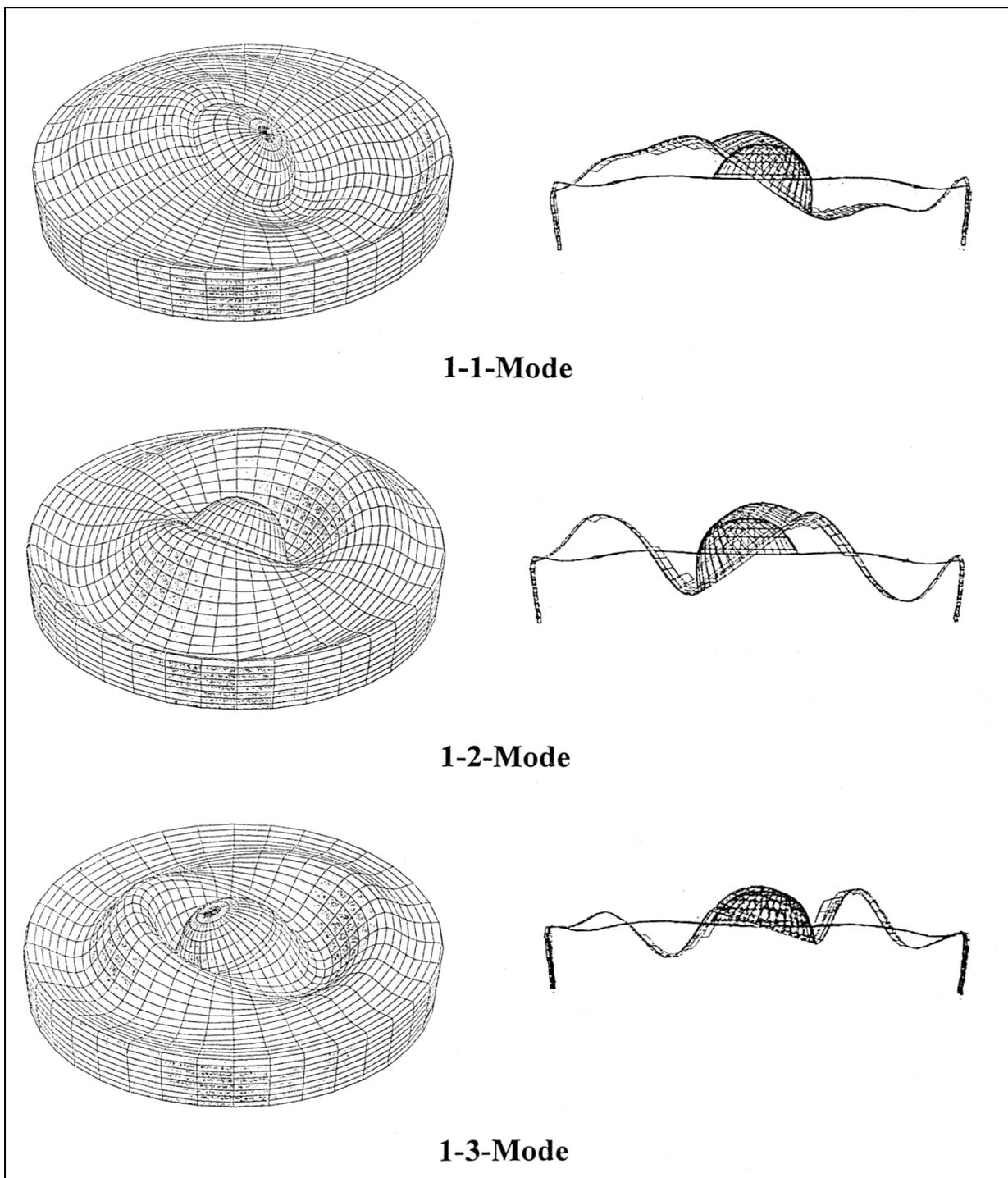
Tab. LVIIb. Mittels FEM errechnet typische Eigenschwingungsformen eines Gongs;  
Teil 1: rotationsymmetrische Moden



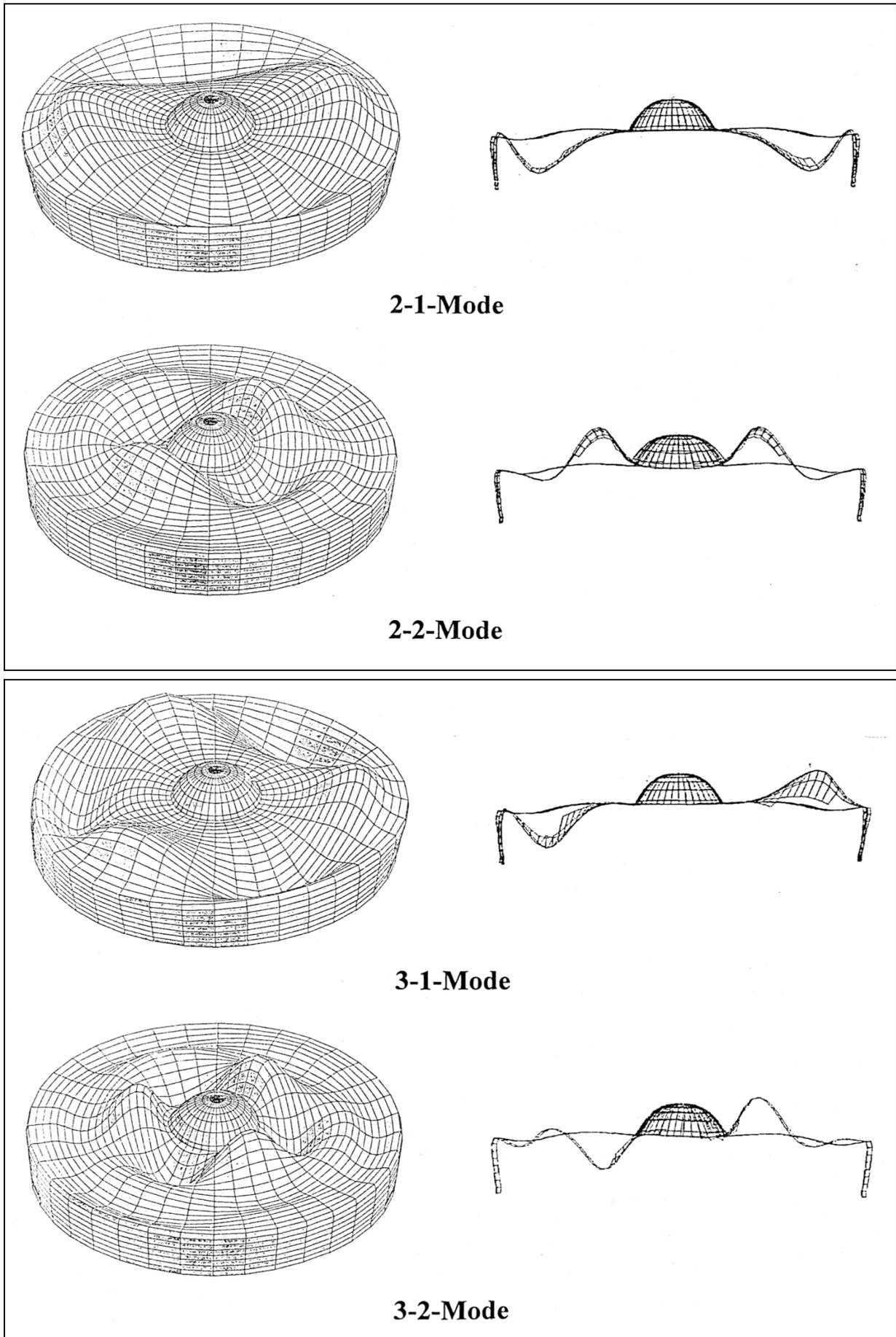
Eine wesentlich bessere Annäherung lässt sich mit numerischen Verfahren wie der Methode der Finiten Elemente erreichen. Dies ist mittels "Fitten" des Elastizitätsmoduls gelungen, dessen Wert sich bei jedem Gong als unterschiedlich, aber stets in einem realistischen Bereich erweist. Damit ist es möglich, in einem weiten Bereich die absoluten Frequenzen brauchbar zu berechnen und die Frequenzintervalle mit einer akzeptablen Toleranz vorherzusagen. Insbesondere stimmen die errechneten Schwingungsformen sehr gut mit denen überein, die experimentell nachgewiesen werden konnten. Die Schwingungsbilder in Tab. LVII können als repräsentativ für sämtliche untersuchten Gongs gelten. Neben der Gesamtansicht ist jeweils

ein Schnitt entlang einem Durchmesser angegeben. Thölke (2000) hat sie für den Gong Nr. V errechnet. Zur besseren Orientierung zeigt Tab. LVIIa die Gestalt des unverformten Gongs. Die Schwingungsformen sind nach Maßgabe der Anzahl ihrer Knotendurchmesser in die weiteren Teil-Tabellen LVIIb bis e eingeordnet. Ein oftmals beklagter Nachteil der sonst so leistungsfähigen numerischen Verfahren ist, dass der funktionale Zusammenhang zwischen Eingabeparametern und Ergebnis der Berechnung nicht mehr direkt erkennbar ist. Einige Grunderkenntnisse, die von den oben erwähnten "falschen" - da zu einfachen Modellen - stammen, können deshalb trotzdem von Nutzen sein.

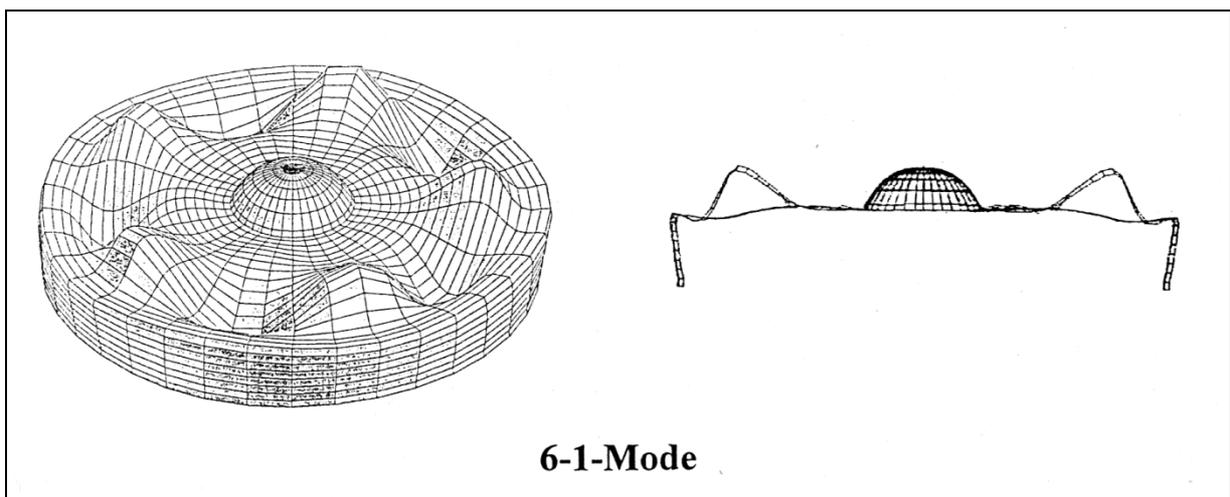
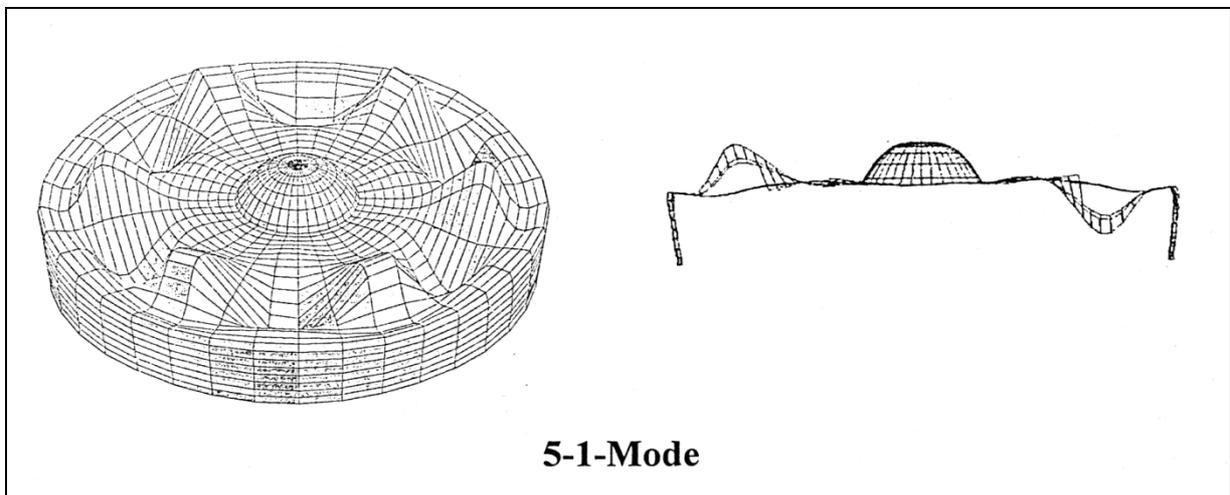
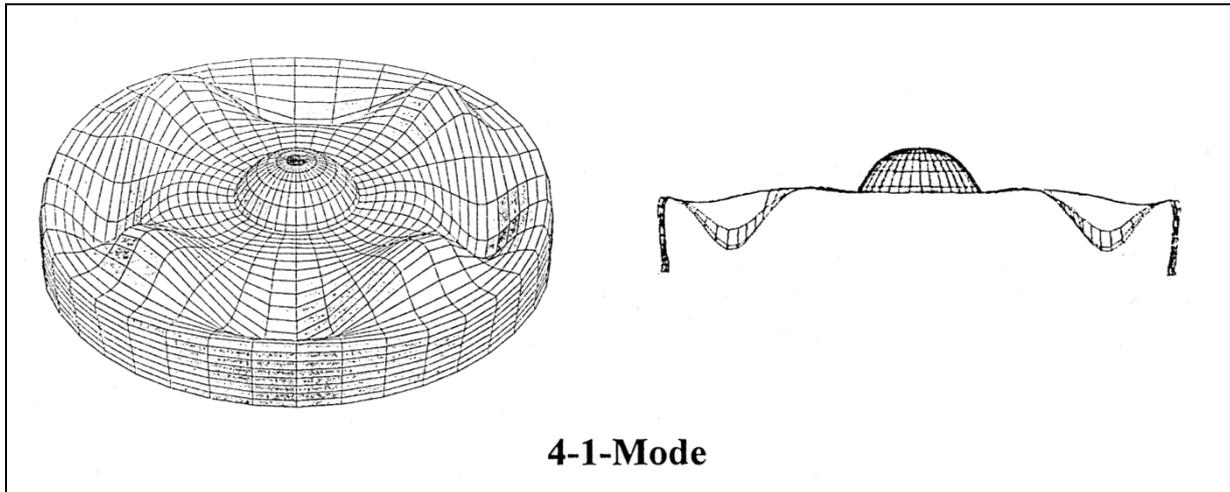
*Tab. LVIIc. Mittels FEM errechnet typische Eigenschwingungsformen eines Gongs;  
Teil 2: antisymmetrische Moden mit einem Knotendurchmesser*



Tab. LVIIId. Mittels FEM errechnet typische Eigenschwingungsformen eines Gongs;  
Teil 3: antimetrische Moden mit zwei bzw. drei Knotendurchmessern



Tab. LVIIIe. Mittels FEM errechnet typische Eigenschwingungsformen eines Gongs;  
 Teil 4: antimetrische Moden mit vier, fünf bzw. sechs Knotendurchmessern



Varsányi (2000a) sieht gewisse Beziehungen zwischen Bronzegongs und Bronzeglocken. Aus globaler Sicht trifft dies sicher zu; schließlich sind beide Instrumente Idiophone und werden angeschlagen, wodurch eine Vielzahl von freien Teilschwingungen mit nicht-harmonischen Frequenzintervallen angeregt wird. Bereits beim Ort des Anschlags und der Aufhängung zeigen sich jedoch elementare Unterschiede. Eine Glocke wird im Zentrum aufgehängt; dort ist sie

weitgehend in Ruhe. Angeschlagen wird sie am Schlagring in der Nähe des Randes, wo die Teilschwingungen, die bevorzugt angeregt werden sollen, keinen Knotenkreis aufweisen und sich deshalb mit großen Amplituden ausbilden können. Ein Gong hängt dagegen an einer Schnur, die am Rand befestigt ist. Der Rand wird demzufolge nur geringe Bewegungen ausführen. Der Schlegel trifft den Schlagbuckel nahe der Mitte. Dies lässt darauf schließen, dass beim Gong rotationssymmetrischen Schwingungen mit einem Bauch in der Mitte eine große Bedeutung, antimetrischen mit Knotendurchmessern durch die Mitte dagegen eine kleinere Rolle zukommen wird. Weitere Unterschiede zeigen sich im Material, das bei einer Glocke als Ergebnis des Gießens weitgehend homogen und hinsichtlich seiner Kennwerte leicht beschreibbar ist. Bei einem Gong führt die langwierige warm- und kaltverformende Bearbeitung zu Materialeigenschaften, die höchstwahrscheinlich orts- und vielleicht überdies richtungsabhängig sind. Eine ganz bedeutsame Diskrepanz dürfte in der Wanddicke und deren Relation zu den Schwingamplituden begründet sein. Bei einer Glocke sind die Schwingamplituden klein im Vergleich zur Wanddicke, bei einem Gong dagegen groß. Dies deutet darauf hin, dass nichtlineares Verhalten beim Gong nicht mehr ausgeschlossen werden kann.

Dieser und einer Reihe weiterer Fragen soll in einem nachfolgenden Bericht nachgegangen werden. Die Basis dafür bietet die umfangreiche Materialsammlung, die hiermit vorliegt.

*Der Autor dankt Frau Dipl.-Phys. Sieglinde Iosif für die Mitarbeit am Manuskript. Herr Dipl.-Ing. Peter Middendorf hat seine Fähigkeiten als Spezialist für FEM unter Beweis gestellt und dankenswerterweise in einer Nachrechnung frühere numerische Ergebnisse wesentlich verbessert. Herrn Schön vom Werkzeugmaschinen-Zentrallabor der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik sei für das zeitaufwendige Vermessen der Konturen der Gongs gedankt. Herrn Bernhard Kolberg von der Firma Kolberg Percussion in Uhingen gebührt Dank dafür, dass er mit Burma-Gongs aus seinen Beständen Objekte für die beschriebenen Messungen geliefert hat.*

## LITERATUR

- Bogolowski, T., *Schwingungsmessungen mit dem Laser-Vibrometer. Studienarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg 1999.*
- Chladni, E.F.F., *Entdeckungen über die Theorie des Klanges. Weidmanns Erben und Reich, Leipzig 1787.*
- Fleischer, H., *Die Glocke. Teil I: Mechanische und akustische Experimente. Forschungsbericht 02/89 aus dem Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 1989 a.*
- Fleischer, H., *Die Glocke. Teil II: Elastokinetische und psychoakustische Berechnungen. Forschungsbericht 04/89 aus dem Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 1989 b.*
- Fleischer, H., *Glockenschwingungen. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/97. Hrsg. H. Fleischer und H. Fastl. Universität der Bundeswehr München, Neubiberg 1997.*
- Fleischer, H., *Messen und Berechnen von Glockenschwingungen. In: Glocken und Glockenspiele. 17. Musikinstrumentenbau-Symposium in Michaelstein. Stiftung Kloster Michaelstein, Blankenburg 1998, 240 - 264.*
- Fleischer, H., *Schwingung und Schall von Glocken. In: Fortschritte der Akustik (DAGA 2000). DEGA, Oldenburg 2000. Erscheint demnächst.*
- Fleischer, H. und Rotter, R., *Das Phänomen der Spinning Modes. In: Fortschritte der Akustik (DAGA '94), DPG-GmbH, Bad Honnef 1994, 553 - 556.*
- Fletcher, N.H. und Rossing, T.D., *The physics of musical instruments. 2. Aufl. Springer, New York 1998.*
- Grützmacher, M. und Wesselhöft, E., *Über den Klang eines chinesischen Gongs. Acustica 9 (1959), 221 - 223.*
- Hornbostel, E.M. v. und Sachs, C., *Systematik der Musikinstrumente. Zeitschrift für Ethnologie 46, Heft IV-V (1914).*
- Jager, E.H., *An engineering approach to calculating the lowest natural frequencies of thin conical shells. J. Sound and Vibration 63 (2) (1979), 259 - 264.*
- Leissa, A.W., *Vibration of plates. NASA-Report SP-160, Washington 1969.*
- Richardson, M.H., *Is it a mode shape, or an operating deflection shape? Sound and Vibration, Jan. 1997, 54 - 61.*
- Thölke, T., *Analyse der Schwingungen von Gongs mit Hilfe des FEM-Programmpaketes MSC PATRAN/NASTRAN. Studienarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg 2000.*
- Twook, T., *Laser-Vibrometrie - Berührungsloses Messen von Oberflächenschwingungen. Diplomarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg 1997.*
- 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.*
- Winter, M. und Wörner, J., *Vergleich zwischen Moden und ODSs. Studienarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg 2000.*

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.

---

**ISSN 1430-936X**

**Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik**