

**BEITRÄGE
ZUR
VIBRO- UND PSYCHOAKUSTIK**

Herausgeber: Helmut Fleischer und Hugo Fastl

Helmut Fleischer

**SCHWINGUNGS- UND
SCHALLUNTERSUCUNGEN
AN DER INDISCHEN TABLA**

Schwingungs- und Schalluntersuchungen an der indischen Tabla

von

Helmut Fleischer

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

Heft 1/03 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
Helmut.fleischer@unibw.de

Fleischer, Helmut:
Schwingungs- und Schalluntersuchungen an der indischen Tabla
Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/03
Neubiberg 2003
ISSN 1430-936X

Postanschrift des Verfassers:

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

SCHWINGUNGS- UND SCHALLUNTERSUCHUNGEN AN DER INDISCHEN TABLA

Zusammenfassung

Das Tabla-Paar ist ein Jahrhunderte altes Musikinstrument Nordindiens, bestehend aus zwei verschiedenen Trommeln. Die größere, gespielt mit der linken Hand, heißt Bayan, die kleinere, gespielt mit der rechten Hand, wird als Tabla bezeichnet. Nach traditionellen Anschlag- und Grifftechniken werden mechanische Schwingungsmuster der Trommelfelle gezielt hervorgerufen bzw. unterdrückt. Das Ziel der Studie ist es, die Beziehungen zwischen diesen Schwingungen einerseits und dem Schallsignal andererseits zu untersuchen. Mehrere charakteristische Schläge wurden von zwei professionellen Spielern gespielt und zur weiteren Analyse auf DAT gespeichert. Parallel dazu wurden die mechanischen Schwingungen der Trommelfelle eines dieser Tabla-Paare bei Anregung über einen Lautsprecher mittels Laser-Doppler-Vibrometrie gemessen. Dieses Verfahren erlaubte, die Betriebsschwingungsformen des Tabla- und Bayan-Felles zu bestimmen.

*Sämtliche Schallsignale wurden sowohl mittels Fast-Fourier-Transformation (Schallpegel-Spektrum als Funktion der Zeit in Wasserfall-Darstellung) als auch nach einem gehörbezogenen Verfahren untersucht. Letzteres ist die kommerziell verfügbare Software VIPER, welche die gehörgerechte Frequenzanalyse, die Frequenzkonturierung und die spektrale Maskierung einschließt. Die am weitesten gehende Verarbeitungsstufe waren „Frequenzspuren“. Durch die Berücksichtigung der spektralen Maskierung wurde die physikalische Information auf ihren hörrelevanten Gehalt reduziert. Diese Darstellung erwies sich als gut geeignet für die Interpretation der Tabla- und Bayan-Klänge in Hinsicht auf die Schwingungsmoden. Für die maskierten Frequenzspuren der tonalen Tabla-Klänge **tun** und **na** als Beispiele werden die hörrelevanten Teiltöne mit den zugehörigen Schwingungen verknüpft. Die Kenntnis der Schwingungsmuster ist der Schlüssel zum physikalischen Verständnis der Anschlag- und Grifftechnik.*

INVESTIGATIONS ON THE VIBRATION AND SOUND OF THE INDIAN TABLA

Summary

The tabla pair is a centuries old musical instrument from North India consisting of two different drums. The bigger one, played by the left hand, is called a bayan, the smaller one, played by the right hand, is named tabla. Mechanical vibration patterns of the drum heads are selectively evoked and suppressed according to the traditional striking and fingering techniques. The aim of the study is to investigate the relationship between these vibrations on the one hand and the acoustic signal on the other hand. Several characteristic strokes were played by two professional players and recorded on DAT for further analysis. In parallel, the mechanical vibrations of the drum heads of one of these tabla pairs were measured by excitation via a loudspeaker using Laser Doppler vibrometry. This technique allowed the operating deflection shapes of the tabla and bayan heads to be ascertained.

*All acoustic signals were also investigated by Fast Fourier transformation (sound level spectrum as a function of time in waterfall representation) and by an aurally-related approach. The latter one used the commercially available software VIPER, which includes aurally-adequate frequency analysis, frequency contouring and spectral masking. The most advanced stage of processing were “frequency tracks”. By considering spectral masking, the physical information was reduced to its aurally-relevant content. This representation also proved to be suited to the interpretation of the tabla and bayan sounds in terms of vibrational modes. For the masked frequency tracks of the tonal tabla strokes, **tun** and **na** as examples, the aurally-relevant partial tones were interrelated to the corresponding vibrations. Knowledge of the vibrational patterns is the key for the physical understanding of the striking and fingering technique.*

INHALT

VORWORT

1.	EINLEITUNG	1
2.	DIE UNTERSUCHTEN INSTRUMENTE.....	5
2.1.	Die Tabla-Paare.....	5
2.2.	Die <i>Bayans</i>	6
2.3.	Die <i>Tablas</i>	8
2.4.	Zusammenfassende Bemerkung.....	9
3.	SCHWINGUNGEN DES FELLES.....	10
3.1.	Messung	10
3.1.1.	Messaufbau und -vorgang	10
3.1.2.	Auswertung	12
3.2.	Die <i>Bayan P</i>	13
3.2.1.	Übertragungsfunktion.....	13
3.2.2.	Schwingungsformen.....	14
3.2.3.	Die Rolle des „schwarzen Flecks“	17
3.3.	Die <i>Tabla P</i>	19
3.2.1.	Übertragungsfunktion.....	19
3.2.2.	„Reguläre“ Schwingungsformen.....	22
3.2.3.	Gemischte Schwingungsformen.....	25
3.4.	Schwingungsfrequenzen und Frequenzintervalle der <i>Tabla P</i>	28
3.5.	Hinweise für das „Greifen“ des <i>Tabla</i> -Felles	30
3.6.	Zusammenfassende Bemerkung.....	31
4.	FFT-ANALYSE DER SCHALLSIGNALS.....	33
4.1.	Methode.....	33
4.2.	Untersuchte <i>Tabla</i> - Klänge	33
4.3.	Kombinations-Klänge	34
4.4.	<i>Bayan</i> - Klänge.....	35
4.5.	Zusammenfassende Bemerkung.....	35
5.	OBJEKTIVE ANALYSE DER <i>TABLA</i> -KLÄNGE	36
5.1.	<i>Tabla</i> -Klang <i>na</i>	36
5.1.1.	<i>na</i> , gespielt von Parvinder Bharat	36
5.1.2.	<i>na</i> , gespielt von Harpit Sahota	37
5.1.3.	Wasserfall-Diagramme.....	38
5.2.	<i>Tabla</i> -Klang <i>tun</i>	39
5.2.1.	<i>tun</i> , gespielt von Parvinder Bharat.....	39
5.2.2.	<i>tun</i> , gespielt von Harpit Sahota.....	40
5.2.3.	Wasserfall-Diagramme.....	41
5.3.	<i>Tabla</i> -Klang <i>kalan</i>	42
5.3.1.	Zeitfunktion und Spektrum	42
5.3.2.	Wasserfall-Diagramm	44
5.4.	<i>Tabla</i> -Klang <i>tik</i>	44
5.4.1.	Zeitfunktion und Spektrum	44
5.4.2.	Wasserfall-Diagramme.....	45

5.5.	<i>Tabla</i> -Klang tit	46
5.5.1.	Zeitfunktion und Spektrum	46
5.5.2.	Wasserfall-Diagramme.....	47
5.6.	<i>Tabla</i> -Klang dhin	48
5.6.1.	Zeitfunktion und Spektrum	48
5.6.2.	Wasserfall-Diagramme.....	49
5.7.	<i>Tabla</i> -Klang dhit	50
5.7.1.	Zeitfunktion und Spektrum	50
5.7.2.	Wasserfall-Diagramm	51
5.8.	<i>Tabla</i> -Klang dhir-dhir	51
5.8.1.	Zeitfunktion und Spektrum	51
5.8.2.	Wasserfall-Diagramme.....	52
5.9.	Zusammenfassende Bemerkung.....	53
6.	OBJEKTIVE ANALYSE DER KLÄNGE, BEI DENEN DIE <i>BAYAN</i> GESPIELT WIRD	54
6.1.	Kombinations-Klang dhin	54
6.1.1.	Zeitfunktion und Spektrum	54
6.1.2.	Wasserfall-Diagramm	55
6.2.	Kombinations-Klang dhir-dhir	56
6.2.1.	Zeitfunktion und Spektrum	56
6.2.2.	Wasserfall-Diagramm	57
6.3.	<i>Bayan</i> -Klang ke	58
6.3.1.	ke , gespielt von Parvinder Bharat	58
6.3.2.	ke , gespielt von Harpit Sahota.....	59
6.3.3.	Wasserfall-Diagramme.....	60
6.4.	<i>Bayan</i> -Klang gin	61
6.4.1.	Zeitfunktion und Spektrum	62
6.4.2.	Wasserfall-Diagramme.....	63
6.5.	Zusammenfassende Bemerkung.....	64
7.	GEHÖRBEZOGENE ANALYSE DER SCHALLSIGNALLE.....	65
7.1.	Bisherige Untersuchungen an musikalischen Klängen	65
7.2.	Verarbeitung der Schallsignale im Programm VIPER.....	65
7.2.1.	Auditorisches Spektrogramm	65
7.2.2.	Frequenzkonturen und Frequenzspuren	66
7.2.3.	Spektrale Maskierung.....	67
7.3.	Problemorientierte Wahl der Analyseparameter	69
7.4.	Anwendung auf <i>Tabla</i> - Klänge	69
7.5.	Zusammenfassende Bemerkung.....	71
8.	VERGLEICH EINIGER ERGEBNISSE	72
8.1.	Schwingungsmoden und Teiltöne	72
8.2.	Schwingung und Schall von tun	74
8.3.	Schwingung und Schall von na	76
8.4.	Zusammenfassende Bemerkung.....	78
9.	ABSCHLIESSENDE DISKUSSION UND AUSBLICK.....	79
	LITERATUR.....	85
	ANHANG.....	A 1

VORWORT

Im vorliegenden Band der Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik setzt Helmut Fleischer seine Exkursion zu Schwingungsformen und Klang von uns bisher weitgehend unbekanntem Musikinstrumenten fort. Standen bei weiter zurückliegenden Bänden dem Europäer gut vertraute Schallerzeuger wie Gitarren, Bässe, Pauken oder Glocken im Vordergrund, so hat er uns mit den zwei vorletzten Bänden in die Musikwelt asiatischer Inseln entführt.

Die Heimat der in diesem Band behandelten Tablas ist Indien, und es ist bewundernswert, welche Vielfalt an tonalen und perkussiven Klängen versierte Musiker „zwei kleinen Trommeln“ entlocken können. Obwohl man bei oberflächlicher Betrachtung aus weiterer Entfernung die größere der beiden Trommeln, die *Bayan*, als „geschrumpfte Pauke“ missverstehen könnte, zeigt sich bei näherer Betrachtung ein besonders auffälliger Unterschied: Auf dem Fell ist eine schwarze Zusatzmasse etwa in der Größe eines Maria-Theresien-Talers angebracht, die etwas exzentrisch liegt. Exzentrisch im übertragenen Sinne liest sich für den Europäer auch die Zusammensetzung dieser Masse aus Manganpulver, gedünstem Reis und Tamarindensaft! Die kleinere der beiden Trommeln, die *Tabla*, besitzt zwar auch einen magischen schwarzen in der Größe eines Maria-Theresien-Taler, aber zumindest ist er bei diesem Instrument zentriert.

Mit der bei Forschungsarbeiten von Helmut Fleischer gewohnten Akribie untersucht er mittels Laser Scanning Vibrometer die Schwingungen von *Bayan* und *Tabla*. Neben den bekannten Schwingungsformen, die sich in das gewohnte m - n -Schema einordnen lassen, gibt es gemischte Schwingungsformen wie beispielsweise die Kombination von 2-1- plus 0-2-Mode. Zumindest aus der Sicht von Europäern sinnvolle Intervalle ergeben sich, wenn als Referenz statt der 0-1-Mode die 1-1-Mode verwendet wird.

Helmut Fleischer erläutert und charakterisiert wesentliche tonale, perkussive sowie gemischt tonal-perkussive Elemente der *Tabla*-Musik und stellt die zugehörigen physikalischen Repräsentationen durch FFT-Spektren in Wasserfalldiagrammen anschaulich dar. Auch die bei der *Bayan* übliche dynamische Erhöhung der Tonhöhe durch Vergrößerung der Spannung des Felles mittels Druck mit dem Handballen lässt sich sehr gut nachvollziehen.

In einer gehörbezogenen Analyse werden die Spektraldarstellungen durch Berücksichtigung des Maskierungsphänomens „ausgedünnt“ und auf wenige, für die Hörwahrnehmung wichtige Komponenten reduziert. Besonders lehrreich ist die Gegenüberstellung dieser relevanten Komponenten mit den zugehörigen Schwingungsformen. Unbeschwert von Physikkenntnissen erzwingen indische *Tablaspieler* durch Auflegen ihrer Finger auf das Fell Schwingungsknoten und erzeugen damit die Schwingungsmoden, die einen musikalisch gewünschten Klang hervorrufen. Genauso souverän regen sie durch Variation des Ortes des Anschlages verschiedene Moden an und erreichen damit verschiedene Klangbilder.

In diesem Band ist es Helmut Fleischer wieder einmal besonders gut gelungen, eine Brücke zwischen Vibroakustik und Psychoakustik zu bauen. Jetzt fehlen nur noch die Ergebnisse von Hörversuchen, um die Aussagekraft der gehörbezogenen Spektraldarstellungen zu verifizieren.

München, im Juli 2003

Hugo Fastl

1. EINLEITUNG

Perkussionsinstrumente spielen in der klassischen Musik Europas keine große Rolle. Eine sehr viel höhere Bedeutung kommt ihnen dagegen außerhalb unseres Kulturkreises zu. Dies gilt zum Beispiel für die indischen Tablas. Dieses Paar kleiner Handtrommeln gehören zur Instrumentenfamilie der Membranophone oder Fellklinger (Hornbostel und Sachs 1914). Im Handbuch von Buchner (1995) steht auf S. 205: „In den nördlichen Gegenden Indiens sind die sog. *Tablâ*, ein Trommelpaar von verschiedener Stimmung und Größe, verbreitet; die größere, nach oben sich verengende wird mit der Rechten geschlagen, während die Linke die fäßchenförmige kleinere Trommel rührt. Die Öffnung des Tablâkorpus ist mit drei Fellschichten bespannt, wobei die unterste die ganze Öffnung bedeckt, die nächste angeklebte Schicht ein kreisförmiges Loch in der Mitte hat, das in größerer Form auf dem obersten Fell wiederkehrt. Zwischen den Trommelfellen liegt eine dünne glatte Schicht, die aus einer Masse von Manganpulver, gedünstetem Reis und Tamarindensaft besteht und dem Instrument einen zarten, gedämpften Klang verleiht.“



Fig. 1. Der Tabla-Spieler Parvinder Bharat von der Gruppe „El Nombre“ bei der Ausübung seiner Kunst.

Die Gelegenheit zu eigenen Untersuchungen an diesen exotischen Schlaginstrumenten ergab sich anlässlich eines kurzen Aufenthalts der Liverpooler Flamenco-Gruppe „*El Nombre*“ in München. Neben dem Flamenco-Gitarristen Daniel Cortes und dem Bassisten Tobias Fleischer gehören dieser professionellen Gruppe zwei britische Tabla-Spieler indischer Abstammung an: Parvinder Bharat (Fig. 1) und Harpit Sahota (Fig. 2). Die beiden letztgenannten Künstler haben dankenswerterweise ihre Instrumente kurzfristig zur Verfügung gestellt, einige Tabla-Klänge gespielt und dem Autor Erläuterungen zum Instrument, zur Spieltechnik sowie zur indischen Musik allgemein gegeben. Ergebnisse der Studie, die daraus resultieren, sind im vorliegenden Bericht zusammen gestellt.



Fig. 2. Der Tabla-Spieler Harpit Sahota von der Gruppe „El Nombre“ bei der Ausübung seiner Kunst.

Der indische Nobelpreisträger Raman, dessen Portrait Fig. 3 zeigt, schreibt in seiner Arbeit „*The Indian musical drums*“ (1934), von der noch häufiger die Rede sein wird, zum Einsatzbereich dieser Trommeln auf den S. 179 und 180: „... *is used exclusively for high class chamber music where the noise of an ordinary percussion instrument would be intolerable.*“ Wie den Fig. 1 und 2 zu entnehmen ist, sitzt der Spieler mit verschränkten Beinen auf dem Boden. Vor ihm ruhen die beiden Trommeln auf weichen Ringen. Sie sind so geneigt, dass er sie mit den Händen gut bedienen kann.

In der Sprache *Hindi* heißt die bauchige Trommel mit dem größeren Fell, die mit der linken Hand gespielt wird, *Bayan*. In der Sprache *Punjabi* des Pandschab, aus der die Vorfahren der

beiden Spieler stammen, wird sie lautmalerisch als *Dugi* bezeichnet. Der Ballen der linken Hand drückt meist auf das Fell. Durch Veränderung von Druck und Position des Handballens lässt sich eine Art *Talking-Drum*-Effekt erzielen: Die Tonhöhe ändert sich während des Schlages. Je nachdem, ob der Ballen von außen zur Mitte hin oder in umgekehrter Richtung wandert, nimmt die Tonhöhe ab oder zu.

Die rechte Hand spielt die Trommel mit dem kleineren Fell, die dem Trommelpaar seinen Namen gibt, da sie auf *Hindi* als *Tabla* bezeichnet wird. In der Sprache *Punjabi* heißt sie *Chatu*. Sie wird mit den Fingern angeschlagen. Im Gegensatz zur Spielweise anderer, insbesondere abendländischer Trommeln liegen dabei häufig ein oder mehrere Finger auf dem Fell auf, wodurch der Spieler die Tonhöhe beeinflussen kann.



Fig. 3. Chandrasekhara Venkata Raman (1888 – 1970).

Es verwundert nicht weiter, dass sich bereits sehr frühzeitig indische Wissenschaftler mit dem physikalischen Fundament befasst haben, auf dem die Funktionsweise der *Tabla* beruht. Von besonderer Prominenz ist der 1888 in Südindien geborene Chandrasekhara Venkata Raman (Fig. 3), der sich bereits in seiner Zeit in Kalkutta mit der *Tabla* beschäftigte. In dieser Epoche entstanden die Arbeiten von Raman und Kumar (1920) sowie ein umfangreicher Beitrag zum Band *Akustik* des Handbuchs für Physik (Raman 1927). Im hier betrachteten Zusammenhang interessieren insbesondere die Abschnitte 61 (Trommeln mit harmonischen Obertönen) und 62 (Schwingungen inhomogener Membranen).

Auch nachdem er 1930 den Nobelpreis für Physik für die Entdeckung des nach ihm benannten atomphysikalischen Raman-Effekts erhalten hatte, befasste er sich immer noch mit den indischen Trommeln. Eine ausführliche Arbeit widmet er der *Mridanga* (Raman 1934). Darin schreibt er: „*A modern variant of the Mridanga is known as the Thabla*“, so dass sich seine Beobachtungen auf beide Spielarten indischer Trommeln beziehen. Raman schildert detailliert den Aufbau von *Mridanga* und *Tabla* sowie der Trommelfelle. Ihm ist die Erkenntnis zu verdanken, dass diese Trommeln nahezu harmonische Obertöne haben. Dies steht im Gegensatz zu den Erwartungen, die aus der Theorie der Kreismembran folgen und die ein unharmonisches Bessel-Spektrum vorhersagen. Raman führt die harmonischen Intervalle der Teiltöne

auf die ungleiche Massenbelegung zurück, die durch das Aufbringen des Belages auf das Fell der Tabla erreicht wird. Dieser Belag ist als dunkler Kreis auf der Tabla von Fig. 1 zu erkennen.

Auch später beschäftigten sich indische Wissenschaftler immer wieder mit Tablas. Im Jahre 1954 behandelten Ramakrishna und Sondhi (1954) das Fell der Tabla mit der Theorie einer mehrschichtigen Membran. Ein weiteres Beispiel ist De (1972 b), der theoretisch den Einfluss einer Zusatzmasse auf die Schwingungen einer Membran behandelt hat. Später (De 1978) hat er auch Experimente an Tablas, genauer *Tabla* und *Bayan*, durchgeführt. Rossing und Sykes (1983) haben Schwingungsformen der Membran mittels Chladni'scher Klangfiguren visualisiert und Spektralanalysen durchgeführt. Diese Ergebnisse finden sich auch bei Fletcher und Rossing (1998). Banerjee und Nag (1991) haben Tablalklänge analysiert und 3D-Spektren angegeben. Hinweise auf neuere Untersuchungen und Unterrichtsbücher zur Tabla finden sich auf „*The Tabla Site*“ im Internet (Courtney 2002).

Häufig werden Tablas im Zusammenhang mit der europäischen Orchesterpauke behandelt; vgl. z.B. De (1972 a). Dies liegt insofern nahe, dass bei Tablas ebenso wie bei Pauken die zwischen Fell und Kessel eingeschlossene Luft sowie die Luft vor dem Fell die Lage und Intervalle der Teiltonfrequenzen deutlich beeinflussen. Gemeinsam ist beiden Instrumenten, dass die Frequenzen der musikalisch bedeutenden Teiltöne in weitgehend harmonischen Intervallen stehen. Insofern kann die Tabla als die kleine Schwester der Pauke angesehen werden. Abgesehen von dieser phänomenologischen Verwandtschaft bestehen jedoch einige wesentliche Unterschiede. So wird eine Pauke nicht mit der Hand, sondern mit einem Schlegel angeschlagen. Ihr Fell schwingt im Allgemeinen frei; wogegen das der Tabla mit Fingern oder Handballen an bestimmten Stellen fixiert wird. Ein wesentliches Merkmal der Tabla ist, dass ihr Fell aus mehreren Schichten besteht und eine zusätzlich erhöhte Masse trägt. Im Gegensatz dazu ist das Paukenfell praktisch homogen.

Zur Pauke wurden am Institut für Mechanik, teilweise in Kooperation mit Hugo Fastl von der TU München, zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, die eine Fülle von Ergebnissen gebracht haben. So modellierte Fleischer (1988, 1990 a, 1996) das Zusammenwirken der Membran mit der Luft „davor“ und „dahinter“ und konnte begründen, warum an Stelle eines unharmonischen Bessel-Spektrums eine nahezu harmonische Abfolge von Teiltönen entsteht. Moosrainer (1998) sowie Moosrainer und Fleischer (2000) haben moderne numerische Verfahren (FEM und BEM) verwendet, um die Fluid-Struktur-Interaktion bei der Pauke zu studieren. Die Schwingungen des Felles sowie das Schallfeld werden von Fleischer (1990 b) experimentell betrachtet, die Rolle des Kessels ist bei Fleischer (1992) beleuchtet. Das Schallsignal der Pauke wird eingehend bei Fleischer (1991) sowie Fleischer und Fastl (1991) analysiert. Psychoakustische Untersuchungen zur Ausgeprägtheit der Tonhöhe finden sich bei Fastl und Fleischer (1992). Es ist somit genügend Vorwissen vorhanden, um die folgende Behandlung der Tabla zielgerichtet zu gestalten.

2. DIE UNTERSUCHTEN INSTRUMENTE

Im Folgenden wird als „Tablas“ das aus zwei Instrumenten bestehende Paar bezeichnet. Die kleinere Trommel allein heißt „*Tabla*“, die größere „*Bayan*“. Jedem der beiden Spieler gehört ein *Tabla*-Paar.

2.1. Die *Tabla*-Paare



Fig. 4. *Tabla*-Paar von Parvinder Bharat. Links: *Tabla*; rechts: *Bayan*.

Die zwei Instrumente von Parvinder Bharat sind in Fig. 4 dargestellt. Fig. 5 zeigt die Instrumente von Harpit Sahota. Bei der gewählten Perspektive sieht man die *Tablas* aus der Blickrichtung des Zuhörers. Der Spieler würde hinter den Instrumenten sitzen. Die Trommeln ruhen jeweils auf einer Art ringförmigem Kissen und können geneigt werden, um eine zweckmäßige Spielhaltung zu erzielen. Man erkennt die Spannschnüre, die mit Hilfe verschiebbarer Holzrollen unter Zug gesetzt werden können. Nach Raman (1934) beträgt deren Zahl immer sechzehn. Damit ist es möglich, die Spannung des Felles zu justieren und über den Umfang zu egalisieren. Der Spieler besorgt dies nach Gehör und mittels eines Hämmerchens, mit dem er die Holzrollen verschiebt. Die Größenverhältnisse der beiden Instrumente sind gut erkennbar.

Der Kessel der *Tabla* (links in den Fig. 4 und 5) besteht aus Holz. Der Kessel der *Bayan* ist aus Metall (Kupfer, Aluminium, hier: Messing) gefertigt. Das Fell stammt von einem Lamm. Wie eingangs beschrieben, weist es mehrere Schichten auf. Der Ring aus Fell, der vom Rand ein Stück weit auf dem durchgehenden Fell aufliegt, ist schwach zu erkennen. Raman (1934) führt auf S. 184 hierzu aus: „*The contact between the ring and the drum-head is probably imperfect, and this should tend to make the ring act as a damper rather than as a load influen-*



Fig. 5. Tabla-Paar von Harpit Sahota. Links: *Tabla*; rechts: *Bayan*.

cing the pitch.“ Besonders deutlich, da dunkler als das Fell, zeichnet sich der Bereich ab, in dem zusätzlich Masse auf das Fell aufgebracht worden ist. Er wird *Syahi* genannt. Die konzentrischen Ringe machen deutlich, dass mehrere Schichten unterschiedlicher Dicke aufgebracht worden sind. Die applizierte Masse enthält Metallpulver und beschwert das Fell. Verschiedenen Quellen zufolge (vgl. Fletcher und Rossing 1989) kann dies die Massenbelegung des Felles lokal bis zum Zehnfachen erhöhen. Die zusätzlich aufgebrachte Masse wird im Folgenden kurz als „dunkler Fleck“ bezeichnet. Sie befindet sich bei der *Tabla* zentral auf dem Fell. Bei der *Bayan* liegt sie jedoch außerhalb der Mitte und dem Bereich des Felles gegenüber, auf das der Spieler mit dem Ballen seiner linken Hand drückt. Weitergehende Information, illustriert mit farbigen Bildern und versehen mit zahlreichen Hinweisen auf *Links* sowie Lehrbücher, findet sich im Internet auf „*The Tabla Site*“ (Courtney 2002).

2.2. Die *Bayans*

Nachdem die gemeinsame Abbildung beider Trommeln die Größenverhältnisse zu beurteilen erlaubt hat, sind nun die zwei *Bayans* allein und größer abgebildet. Das Instrument *Bayan P* in Fig. 6 ist mit Hilfe der Holzrollen gestimmt. Die *Bayan H* (Fig. 7) wurde eben dem Transportbehälter entnommen; ihr Fell befindet sich noch im entspannten Zustand. Der äußere Fellring und die in Schichten aufgebrachte Zusatzmasse, die sich insgesamt als dunkler Fleck abzeichnet, sind zu erkennen. Offensichtlich liegt dieser Bereich außerhalb der Mitte des Felles. Details zum Schichtaufbau des Felles und zu Werkstoffkennwerten finden sich bei De (1978).



Fig. 6. Bayan von Parvinder Bharat (Bayan P).



Fig. 7. Bayan von Harpit Sahota (Bayan H).

2.3. Die *Tablas*



Fig. 8. Tabla von Parvinder Bharat (Tabla P).



Fig. 9. Tabla von Harpit Sahota (Tabla H).

Fotografien der beiden *Tablas* sind in den Fig. 8 (*Tabla P*) und 9 (*Tabla H*) wiedergegeben. Bei beiden Instrumenten sind die zylindrischen Holzstückchen sichtbar, die mit einem kleinen Hammer so verkeilt werden, dass das Fell gleichmäßig gespannt und auf die gewünschte Tonlage gestimmt ist. Mit dem unteren Ende sind die Instrumente in einen Ring gesetzt. Auf den Fotografien stehen sie senkrecht, werden zum Spielen jedoch geneigt, wie dies den Fig. 1 und 2 zu entnehmen ist. Zumindest bei der *Tabla P* ist der äußere, etwas dunklere Fellring zu erkennen. Bei beiden Instrumenten zeichnet sich die in Schichten aufgebraachte Zusatzmasse, die sich dunkel als Fleck mit konzentrischen Ringen darstellt, deutlich ab. Im Gegensatz zur *Bayan* (Fig. 6 und 7) befindet sich dieser Bereich mitten auf dem Fell. Weitere Angaben zum Aufbau des Felles und zu Werkstoffkennwerten finden sich bei De (1978) sowie im Internet bei Courtney (2002; insbesondere: „*The tabla pudi*“).

2.4. Zusammenfassende Bemerkung

Mit den beiden *Tabla*-Sätzen von Parvinder Bharat und Harpit Sahota, jeweils bestehend aus einer *Tabla* und einer *Bayan*, liegen Instrumente vor, wie sie von professionellen Musikern tatsächlich gespielt werden. Für die Messungen, die im Folgenden beschrieben sind, wurden sie von den Künstlern selbst gestimmt und betätigt. Insofern können die damit erzielten Ergebnisse als verlässlich und wirklichkeitsnah betrachtet werden.

3. SCHWINGUNGEN DES FELLES

Anlässlich eines Kurzbesuchs am Institut für Mechanik hat Parvinder Bharat die beiden Trommeln seines Tabla-Paares freundlicherweise für eine Schwingungsmessung mit dem Laser-Vibrometer zur Verfügung gestellt.

3.1. Messung

3.1.1. Messaufbau und -vorgang

Die Schwingungen des Felles wurden mittels eines Scanning Vibrometers der Firma Polytec bestimmt. Das zu untersuchende Instrument wurde waagrecht auf eine Platte gelegt und soweit unterstützt, dass sein Fell senkrecht zum Laserstrahl lag. Die Anregung erfolgte berührungsfrei über den Schalldruck, den eine Eigenbau-Box mit zwei elektrodynamischen Tieftonlautsprechern erzeugte. Diese wurden über einen Verstärker B&K 2706 gespeist. Der anregende Schalldruck wurde in der Nähe der Trommel mit einem $\frac{1}{2}$ “-Kondensatormikrofon B&K 4165 samt nachgeschaltetem Mikrofon-Netzgerät B&K 2807 gemessen.

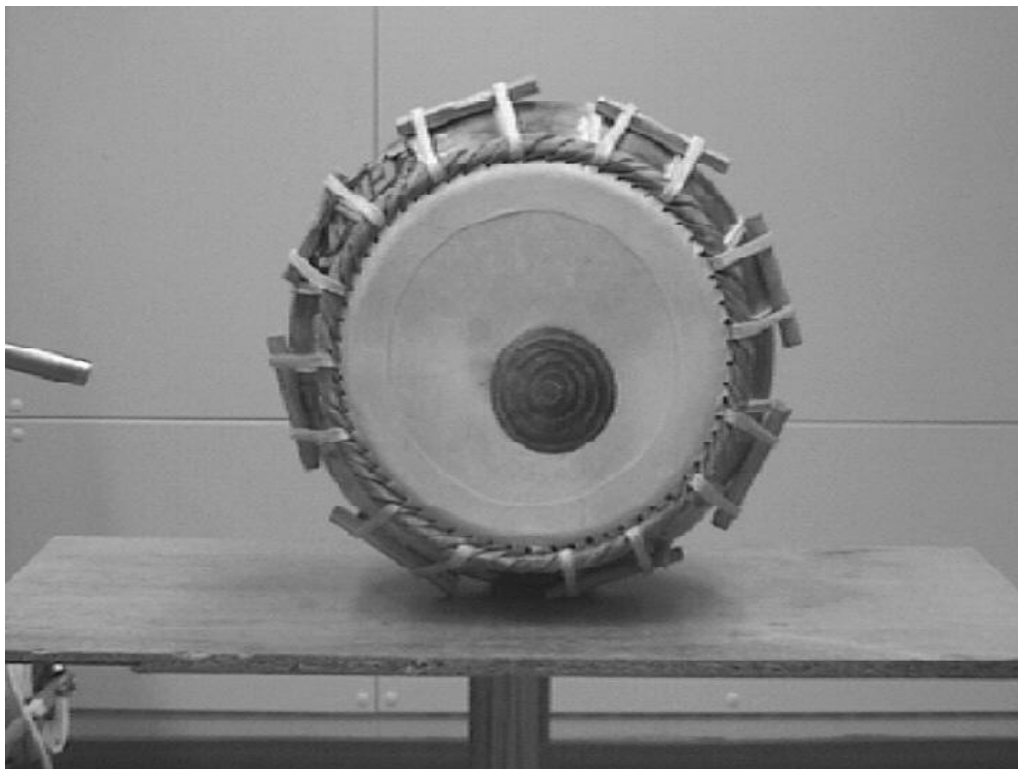


Fig. 10. Bayan P, vorbereitet zur Schwingungsmessung mit dem Scanning Vibrometer.

Fig. 10 zeigt die Situation bei der Messung mit der liegenden *Bayan*. Im linken Teil des Bildes ist das Mikrofon sichtbar. Der dort gemessene Schalldruck dient als Referenzsignal, lässt aber keine direkten Schlüsse auf die Anregung des Felles zu. Im Folgenden wird während einer Messung die Geometrie unverändert beibehalten und aus der Bewegung am jeweiligen

Messpunkt und dem anregenden Schalldruck eine Übertragungsfunktion gebildet. Mögliche Schwankungen des Schalldrucks im Verlaufe der Messung lassen sich damit kompensieren.

Als Anregungssignal wurde Pseudo-Rauschen verwendet, das aus einem Funktionsgenerator hp 33120A stammt. Es ist der anschließenden Analyse dadurch angepasst, dass es Spektralkomponenten ausschließlich bei denjenigen Frequenzen enthält, die für die Analyse relevant sind. Im Beispiel wurden 400 Frequenzlinien im Abstand von 5 Hz gewählt, was auf eine Analysebandbreite von 0 Hz bis 2 kHz führt. Die Phasen der einzelnen Komponenten sind auf einen minimalen Spitzenfaktor des Zeitsignals optimiert. Dieses wiederholt sich nach der Zeitdauer 200 ms, die dem Kehrwert des Frequenzabstandes 5 Hz entspricht. Da dieselbe Zeitfunktion ständig wiederkehrt, ist bei der Aufnahme der Messwerte eine Mittelung im Zeitbereich möglich, was das Signal-Stör-Verhältnis sehr wirkungsvoll zu verbessern erlaubt. Es wurde dreimal gemittelt.

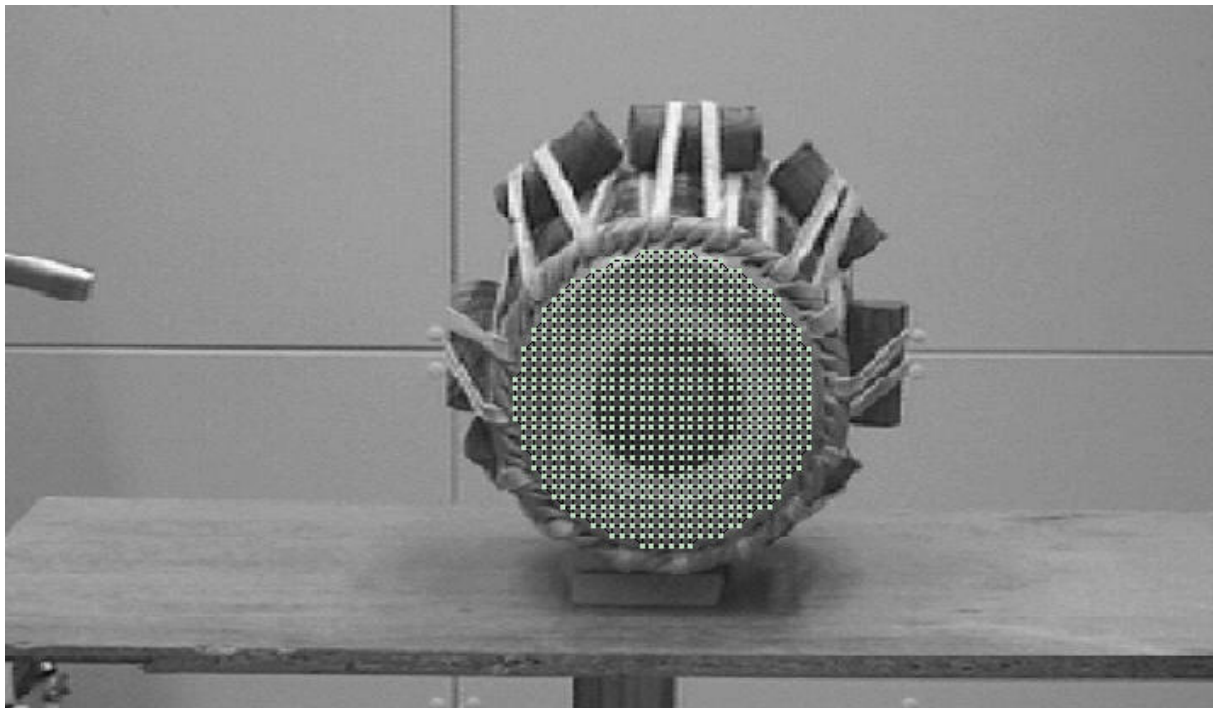


Fig. 11. Tabla P mit dem Messgitter zur Schwingungsmessung mittels Scanning Vibrometer.

Die Messung mit dem Scanning Vibrometer wird von einem Computer aus gesteuert. Anhand eines Videobildes legt der Experimentator ein Gitter von Messpunkten über das zu untersuchende Objekt. Im betrachteten Fall waren dies etwa 750 Punkte auf dem Fell der *Tabla* (Fig. 11) und etwa 2200 auf dem Fell der *Bayan*. Der Strahl eines Lasers wird mittels zweier Galvo-Spiegel so abgelenkt, dass er an den vorgewählten Punkten auf die schwingende Oberfläche trifft. Ein Teil des Laserlichts, dessen Frequenz infolge des Doppler-Effekts verschoben ist, wird zum Messkopf zurückgeworfen. In allen Fällen wurde das Laserlicht von den Fellen ausreichend reflektiert, so dass keine zusätzlichen Vorkehrungen zur Verbesserung der Rückstreuung getroffen werden mussten. Aus der Dopplerverschiebung lässt sich die Geschwindigkeit des Punktes auf der Oberfläche extrahieren, ohne dass das Messobjekt berührt zu werden braucht.

Das beschriebene Vorgehen liefert Aufschluss über die Schwinggeschwindigkeit in Richtung des Laserstrahls. Diese repräsentiert - sofern das Messobjekt eben und vom Laser weit genug

entfernt ist - hinreichend die Normal-Komponente der Bewegung der Oberfläche. Auf diese Weise wurden berührungsfrei die Transversalschwingungen des Felles erfasst, wie sie sich bei der beschriebenen Anregung über Luftschall ausprägen.

3.1.2. Auswertung

Die Signale des Messmikrofons (Eingang) und des Vibrometers (Ausgang) wurden in den Auswertecomputer geführt. Nach drei erfolgreichen Mittelungen wurden sie einer Schnellen Fourier-Transformation (*Fast Fourier Transformation*, FFT) unterzogen. Aus den Spektren wurde die komplexe Übertragungsfunktion gebildet. Als Ergebnis der Messprozedur liegt für jeden Messpunkt eine Übertragungsfunktion vor, die als kinematisches Ausgangssignal die Schwinggeschwindigkeit mit einem dynamischen Eingangssignal, dem Schalldruck am Messmikrofon, verknüpft.

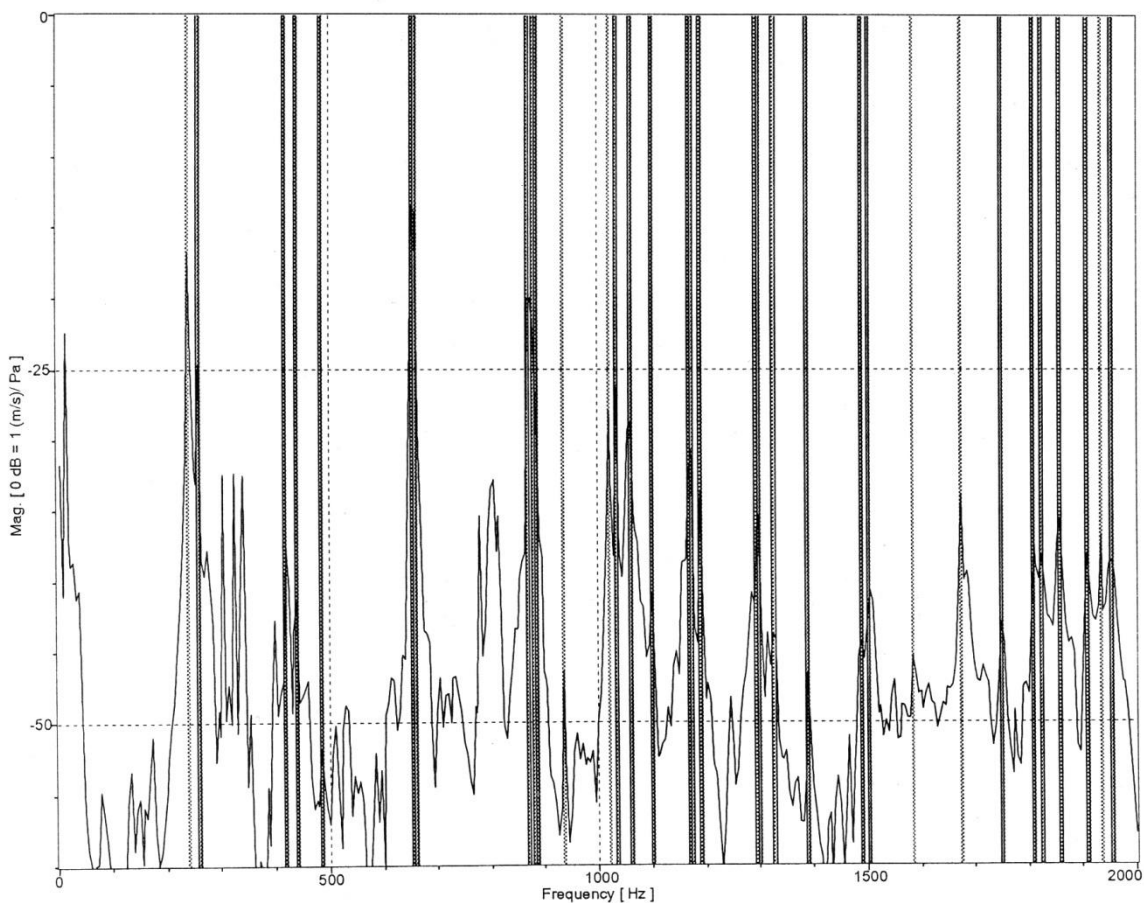


Fig. 12. Gesamt-Übertragungsfunktion (Schwinggeschwindigkeit/Schalldruck) der Tabla P im Pegelmaß als Funktion der Frequenz mit den Bändern, die für die Darstellung der Schwingungsverteilungen ausgewählt worden sind.

Um die charakteristischen Frequenzen eines jeden Felles aufzuspüren, wurden sämtliche Übertragungsfunktionen einer Messreihe gemittelt. Fig. 12 zeigt ein Ergebnis. Die Frequenzachse ist linear unterteilt. An der Ordinate ist im Pegelmaß die mittlere Schwinggeschwindigkeit des Felles der *Tabla*, bezogen auf den Schalldruck, aufgetragen. Wie auch in den folgenden Abschnitten ist diese Gesamt-Übertragungsfunktion im Pegelmaß innerhalb einer Spanne von 60 dB dargestellt.

Diejenigen Frequenzen, bei denen die örtlichen Schwingungsverteilungen sichtbar gemacht werden sollten, wählte der Experimentator anhand von Maxima dieser Gesamt-Übertragungsfunktionen aus. Naturgemäß ist damit eine gewisse Willkür verbunden. Das erste Maximum kennzeichnet üblicherweise eine Starrkörperbewegung der Trommel, die für deren akustische Funktion keine Rolle spielt und deshalb nicht betrachtet wird. Die übrigen gewählten Frequenzen sind in Fig. 12 durch Bänder markiert. Im Folgenden werden die Gesamt-Übertragungsfunktionen zur besseren Übersicht ohne diese Bänder wiedergegeben.

3.2. Die *Bayan P*

Die *Bayan* wird mit der linken Hand so gespielt, dass der Handballen auf dem Fell aufliegt. Da diese Spielweise bei der Messung nicht nachgebildet werden kann, erscheint die Aussagekraft von Messungen am unbelasteten Fell eingeschränkt. Trotzdem sind im vorliegenden Abschnitt einige Resultate zusammen gestellt, die zumindest einen gewissen Einblick in das vielfältige Schwingungsverhalten geben sollen.

3.2.1. Übertragungsfunktion

Fig. 13 zeigt im Pegelmaß die Gesamt-Übertragungsfunktion. Diese ist durch die Mittelung der individuellen Übertragungsfunktionen (Schwinggeschwindigkeit des Felles, bezogen auf den Schalldruck) entstanden. Für diese Messung wurde die Bandbreite auf 2 kHz festgelegt. Mit 400 Frequenzlinien folgt daraus die Frequenzauflösung 5 Hz.

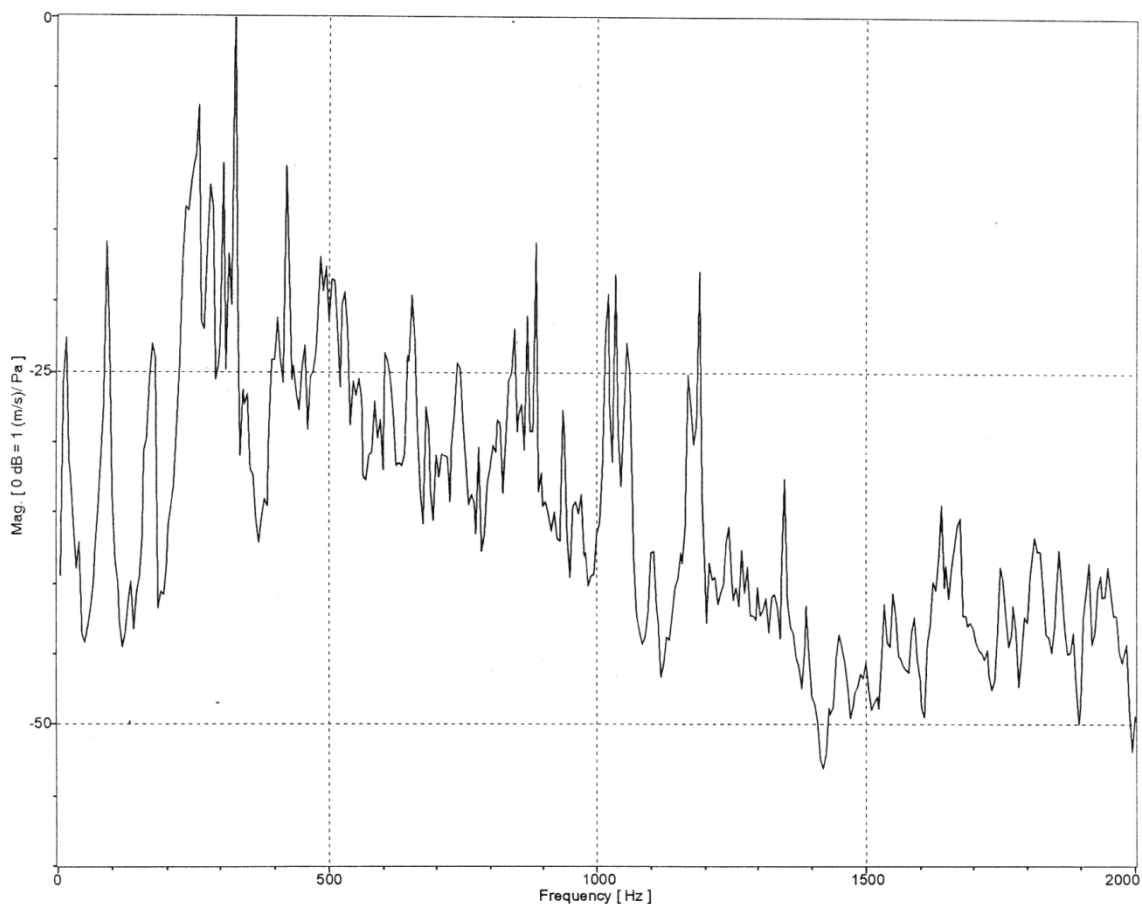


Fig. 13. Gesamt-Übertragungsfunktion (Schwinggeschwindigkeit/Schalldruck) der *Bayan P* im Pegelmaß als Funktion der Frequenz.

Wie eingangs beschrieben, erfolgte die Auswertung in aller Regel anhand von Maxima der Übertragungsfunktion. Bei den gewählten Frequenzen wurden die zugehörigen Bewegungsverteilungen visualisiert. Dabei entstanden in den meisten Fällen keine regelmäßigen, stehenden Moden. Vielmehr zeigten sich umlaufende Schwingungsbilder, die während eines Umlaufs ihre Form ändern. Diese resultieren aus der Überlagerung mehrerer Moden. Dabei könnte es sich um so genannte *Spinning Modes* handeln; siehe hierzu Fleischer (1994 b) sowie Fleischer und Rotter (1994). *Spinning Modes* stellen die Folge von Moden-Splitting dar, wie es bei antimetrischen Schwingungsformen mit $m = 1, 2, 3, \dots$ Knotendurchmessern auftritt. Bei realen Objekten (Glocken, Pauken usw.), die annähernd - aber nie vollkommen - rotationssymmetrisch sind, ist diese Erscheinung regelmäßig zu beobachten; vgl. Fleischer (1997). Da bei der *Bayan* die Symmetrie massiv und gezielt durch die außermittig aufgebrachte Zusatzmasse gestört ist, wird das Auftreten von *Spinning Modes* gefördert. Daneben könnte auch der später bei der *Tabla* maßgebliche Effekt wirksam werden, dass verschiedenartige Moden nahezu gleiche Frequenzen haben und deshalb nur schwer zu trennen sind.

3.2.2. Schwingungsformen

Dass bei Tablas unterschiedliche Moden sehr ähnliche Frequenzen haben können, haben bereits Raman und Kumar (1920) sowie Raman (1934) beobachtet. Dies ist charakteristisch für die kleinere *Tabla* und möglicherweise auch für die hier betrachtete *Bayan*. Danach besitzen beispielsweise die axialsymmetrische 0-2-Mode ($m = 0$ Knotendurchmesser, $n = 2$ Knotenkreise) und die antimetrische 2-1-Mode nahezu dieselbe Frequenz, wobei letztere noch in zwei Partialschwingungen zerfallen kann. Liegen die Frequenzen all dieser Schwingungen innerhalb eines 5 Hz breiten Bandes, mischen sie sich zu einer schwer zu deutenden Gesamtschwingung. Abhilfe könnten Präzisionsmessungen mit hoher Frequenzauflösung bringen, die angesichts der knapp bemessenen Zeit nicht in Frage kamen. In diesem Zusammenhang ist allerdings zu beachten, dass die Messung nicht zu lange dauern darf. Anderenfalls ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass sich während des Messvorganges die Eigenschaften des Naturfelles – beispielsweise in Folge von Schwankungen der Temperatur oder der Luftfeuchte - ändern. Bei der über zwei Stunden dauernden Messung an der *Bayan*, die hier beschrieben ist, machte sich dieser Effekt schon äußerst störend bemerkbar.

Als *S c h w i n g u n g s f o r m e n* werden im Folgenden diejenigen Bilder bezeichnet, die sich im *Presentation Mode* der Polytec-Software als *Instant Value* ergeben. Die Animation, die in nahezu jedem Fall umlaufende Moden zeigt, wird zu einem vom Experimentator bestimmten Zeitpunkt angehalten und das entstehende Bild ausgegeben. Einige Beispiele solcher Formen, wie sie bei Frequenzen unterhalb von 1000 Hz gemessen wurden, sind in Fig. 14 a und b in einer stark überhöhten 3D-Repräsentation zusammen gestellt.

Lediglich die ersten beiden Schwingungsformen lassen sich unzweideutig in das bekannte Raster einordnen, das auf der Anzahl m der Knotendurchmesser und der Anzahl n der Knotenkreise basiert. Bei etwa 85 Hz schwingt das Fell in der rotationssymmetrischen 0-1-Mode mit einem Schwingungsknoten am Rand. Die erste antimetrische Mode (1-1) mit einem Knotendurchmesser und einem Knotenkreis wird bei etwa 150 Hz beobachtet. Alle weiteren Schwingungsformen entstehen offenbar aus der Überlagerung elementarer Moden, die sich anhand der vorliegenden Messdaten nicht eindeutig identifizieren lassen.

Relativierend soll noch einmal betont werden, dass die Formen des frei schwingenden Felles für den Spielbetrieb der *Bayan* höchstwahrscheinlich nicht unmittelbar repräsentativ sind, da beim Spielen der Handballen an unterschiedlichen Stellen aufliegt. Dadurch wird ein Schwingungsknoten erzwungen und zudem die Vorspannkraft des Felles vergrößert. Ungeachtet dieser Einschränkung vermitteln diese und eine weitere Zusammenstellung in Fig. 15 einen treffenden Eindruck von der Mannigfaltigkeit der Formen, mit denen sich das Fell der *Bayan* schwingend bewegen kann.

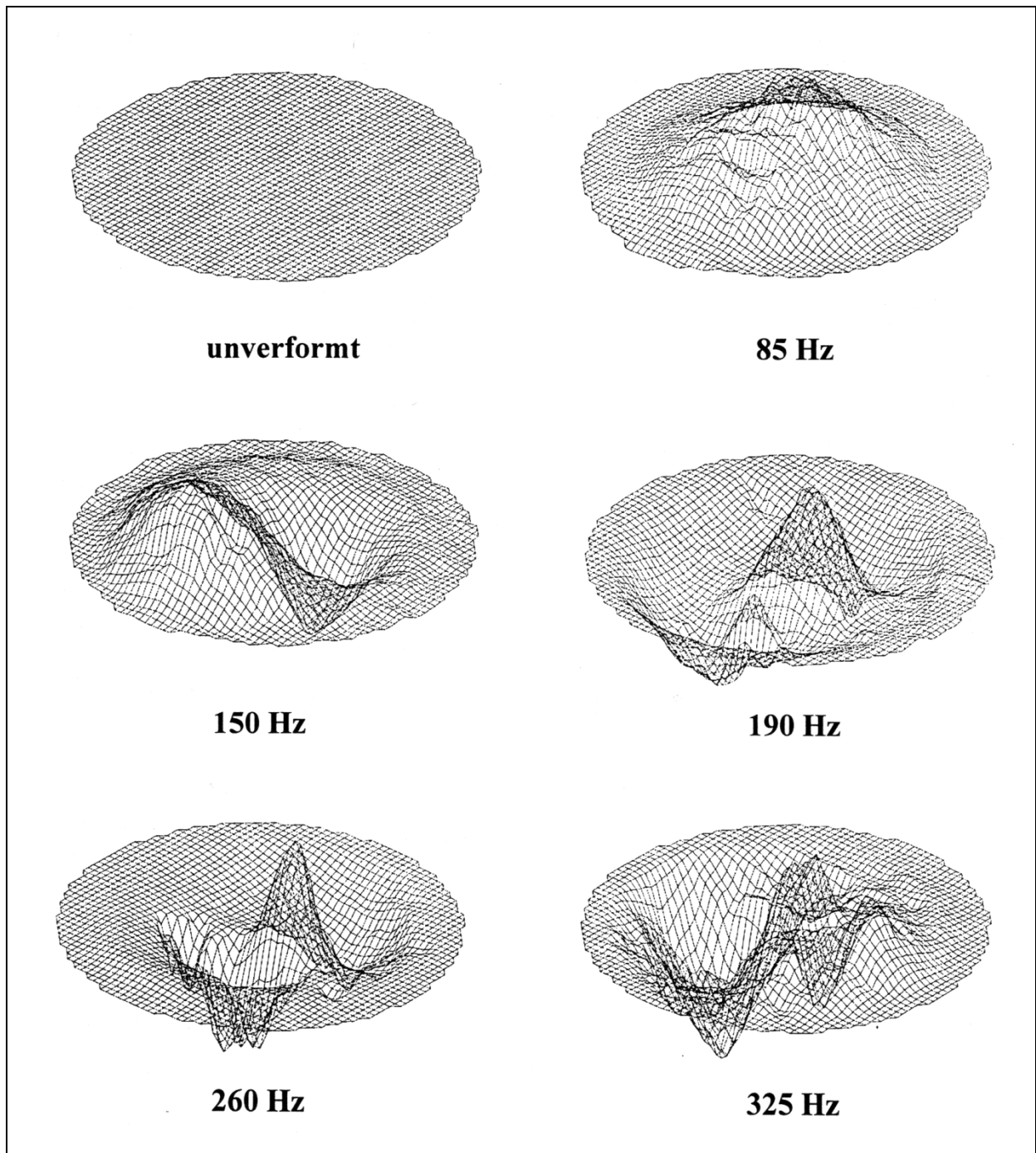


Fig. 14 a. Schwingungsformen und -frequenzen der Bayan P.

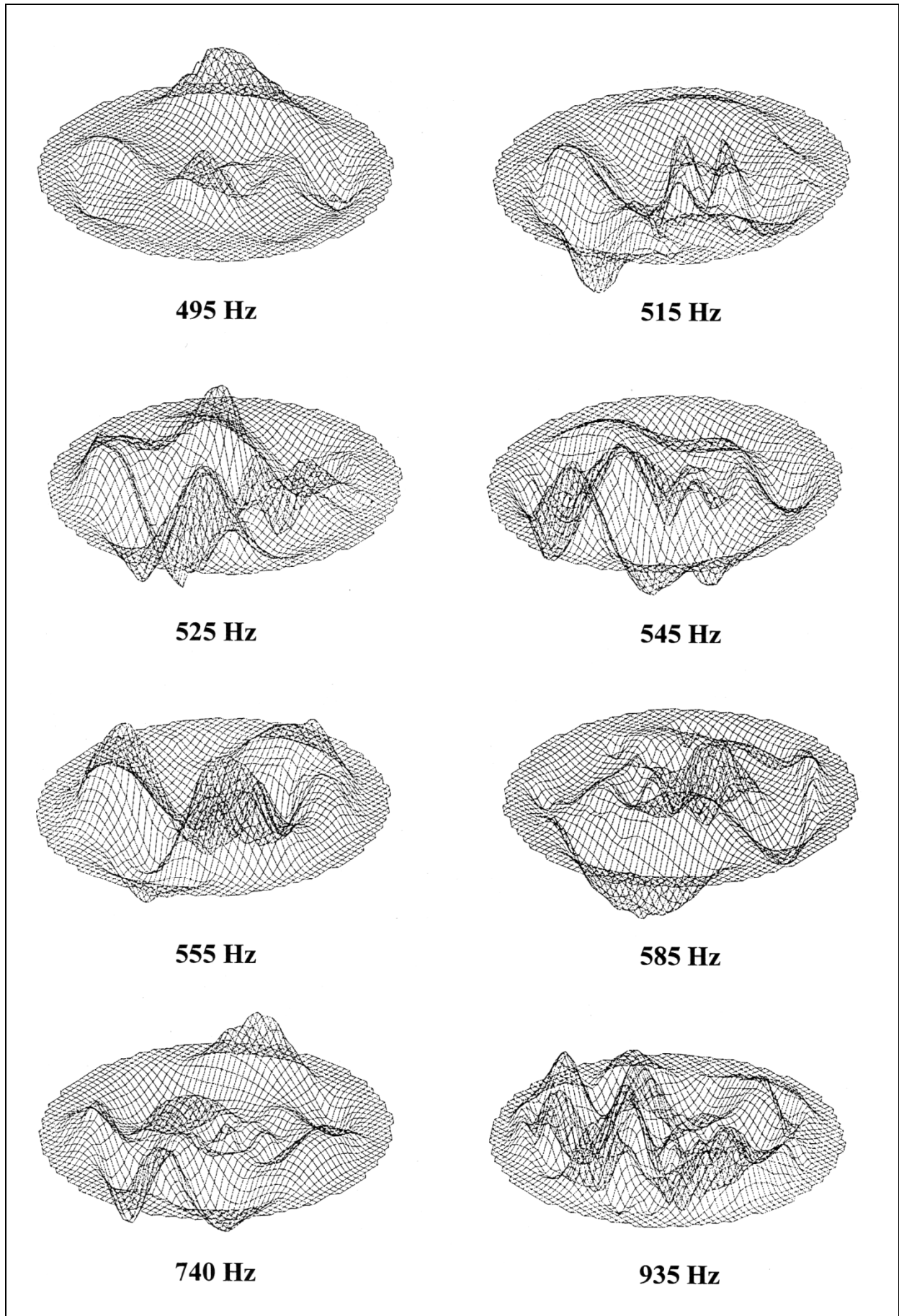


Fig. 14 b. Weitere Schwingungsformen und -frequenzen der Bayan P.

3.2.3. Die Rolle des „schwarzen Flecks“

Um aufzuzeigen, welchen Einfluss die zusätzliche Massenbelastung auf die Schwingungsformen ausübt, findet sich im Anhang 1 eine Zusammenstellung von farbigen Schwingungsbildern der *Bayan*. Die Auslenkung des Felles ist in Farben (*Colour Map Red-Green*) kodiert. Grün bedeutet negatives, rot positives Vorzeichen. Je heller, desto größer ist die Amplitude. Helle Stellen kennzeichnen demnach Schwingungsbäuche, dunkle Stellen Schwingungsknoten. Da die Einstellung *Instant Value* verwendet wurde, handelt es sich hier um die hier verwendeten Nomenklatur zufolge um Schwingungsformen. Die auf das Fell aufbrachten Zusatzmasse, die sich in Fig. 10 als schwarzer Fleck darstellt, ist in diesen Bildern als Kontur markiert. Das linke obere Bild dient dazu, die Position des schwarzen Flecks deutlich zu machen.

Aus drucktechnischen Gründen müssen farbige Darstellungen am Ende des Berichts zusammengefasst werden. Ergänzend sind an dieser Stelle in Fig. 15 Schwarz-Weiß-Bilder präsentiert, wie sie die Einstellung *Colour Map Grey* liefert. Die Willkür hinsichtlich des Zeitpunktes, an dem die Animation gestoppt wird, entfällt hier, da die Einstellung *Magnitude* gewählt worden ist. Die entstehenden Bilder werden im Weiteren als *Schwingungsmuster* bezeichnet. In dieser Darstellungsart ist die Helligkeit ein Maß für den Betrag der Auslenkung. Dies entspricht im Wesentlichen Chladni'schen Klangfiguren (Chladni 1787). Solche Schwingungsbilder hat beispielsweise Raman (1934) dadurch erzeugt, dass er helles Pulver auf ein Instrument aufgebracht hat, dessen Körner sich dort sammeln, wo das Fell sich in Ruhe befindet. Die für Fig. 15 gewählte Darstellung entspricht dunklem Pulver, das auf ein helles Fell gestreut wird und sich dort ansammelt, wo das Fell am wenigsten schwingt. Schwingungsknoten zeichnen sich demnach schwarz, Schwingungsbäuche weiß ab.

Die Position der *Bayan* ist in allen Bildern unverändert so, dass der schwarze Fleck sich unten rechts etwa in 5-Uhr-Richtung befindet. Fig. 15 gibt einige ausgewählte Schwingungsmuster im Frequenzbereich bis 2000 Hz wieder. Der schwarze Fleck zeichnet sich durchgehend als Irregularität des Schwingungsbildes ab. So verschiebt die damit auf das Fell aufgebrachte Zusatzmasse bei der 0-1-Mode (85 Hz) den Schwingungsbauch aus der Mitte bzw. stört die Balance der beiden Schwingungsbäuche bei der 1-1-Mode (150 Hz). Bei 325 Hz deutet sich möglicherweise eine Kippbewegung des schwarzen Flecks an. Bei höheren Frequenzen erscheint es nicht mehr zulässig, den schwarzen Fleck als starren Körper zu betrachten. Bereits bei 935 Hz entfaltet er ein reges „Eigenleben“ und weist eine große Zahl von Schwingungsbäuchen und -knoten in immer feinerer Unterteilung auf. Ungeachtet dieser Details lässt sich festhalten, dass der schwarze Fleck sich in jedem Fall auf die Bewegungsverteilung auswirkt und die Schwingungsformen regelmäßig beeinflusst.

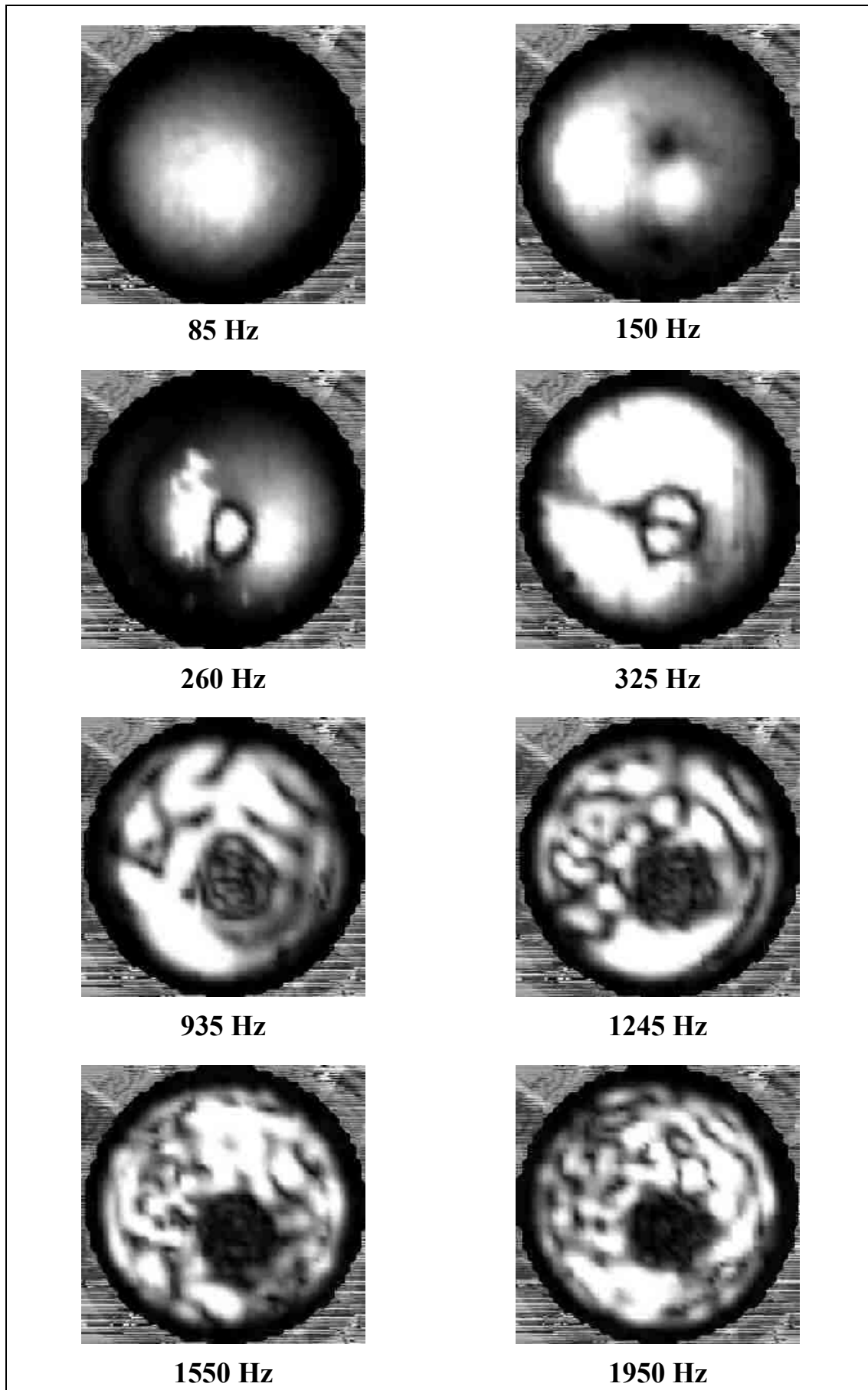


Fig. 15. Schwingungsmuster und -frequenzen der Bayan P.

3.3. Die *Tabla P*

Ausführlicher als die *Bayan* ist in der Literatur die *Tabla*, die kleinere Trommel des Paares, dokumentiert. Messungen am frei schwingenden Fell erscheinen hier insofern aussagekräftiger, als die *Tabla* beim Spielen anders als die *Bayan* gehandhabt wird. Der Spieler drückt ihr Fell nicht mit dem Handballen. Vielmehr spielt er es entweder „leer“ (*open*, d.h. ohne es zu berühren), oder er setzt ohne Druck eine oder mehrere Fingerspitzen auf bestimmte Stellen.

3.3.1. Übertragungsfunktion

In Fig. 16 ist im Pegelmaß die Gesamt-Übertragungsfunktion (Schwinggeschwindigkeit des Felles, bezogen auf den Schalldruck) dargestellt. 400 Frequenzlinien, äquidistant verteilt zwischen 0 Hz und 2 kHz, führen auf eine Frequenzauflösung von 5 Hz.

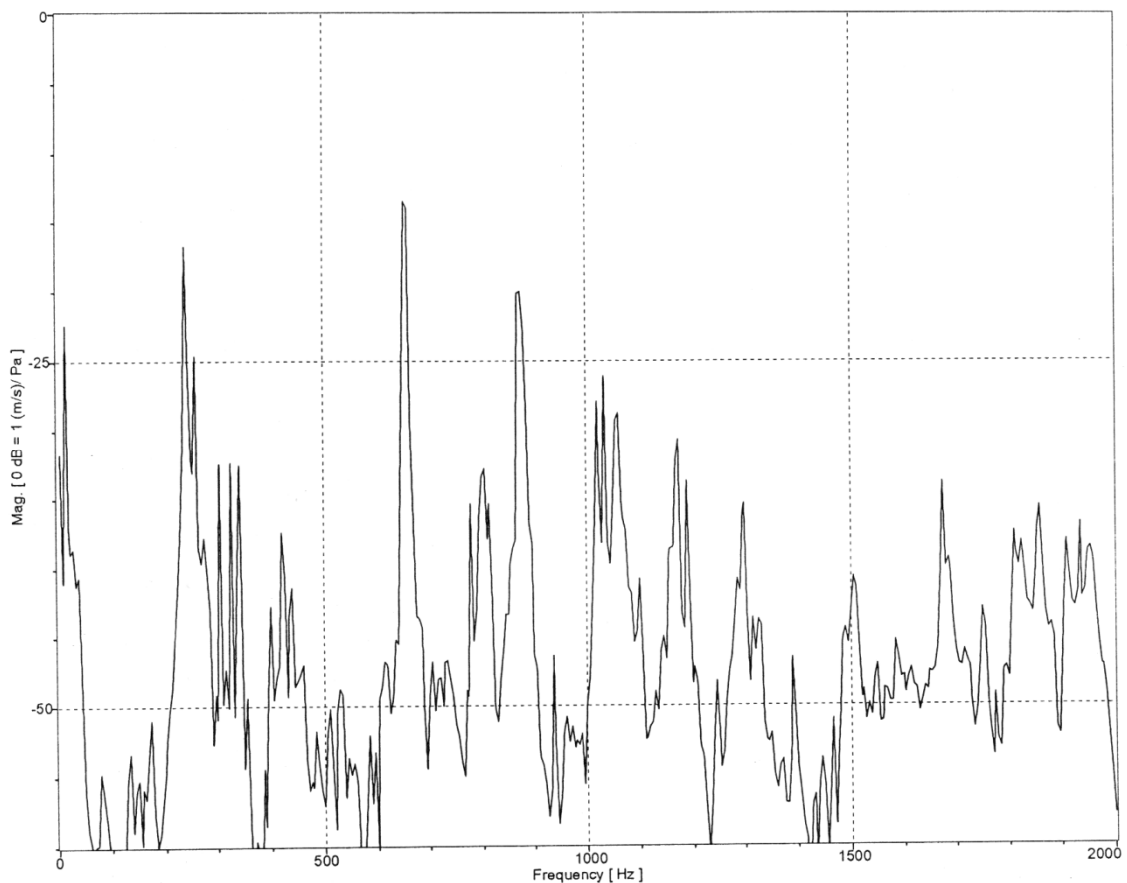


Fig. 16. Gesamt-Übertragungsfunktion (Schwinggeschwindigkeit/Schalldruck) der *Tabla P* im Pegelmaß als Funktion der Frequenz.

Die Übertragungsfunktion in Fig. 16 weist bei tiefen Frequenzen ein niedrigeres Niveau als diejenige der *Bayan* (Fig. 13) auf. Offensichtlich bringt ein und derselbe Schalldruck das Fell der *Tabla* weniger stark zum Schwingen als das (größere) der *Bayan*. Umgekehrt bedeutet dies, dass die *Tabla* bei gleicher Anregung auch weniger Schalldruck hervorzurufen vermag als die *Bayan*. Die Übertragungsfunktion lässt einige ausgeprägte Maxima erkennen. Die Frequenzen, bei denen die Kurve Spitzen zeigt, wurden extrahiert (vgl. Fig. 12) und die zugehörigen Bewegungsverteilungen visualisiert. Ähnlich wie bei der *Bayan* entstanden häufig keine

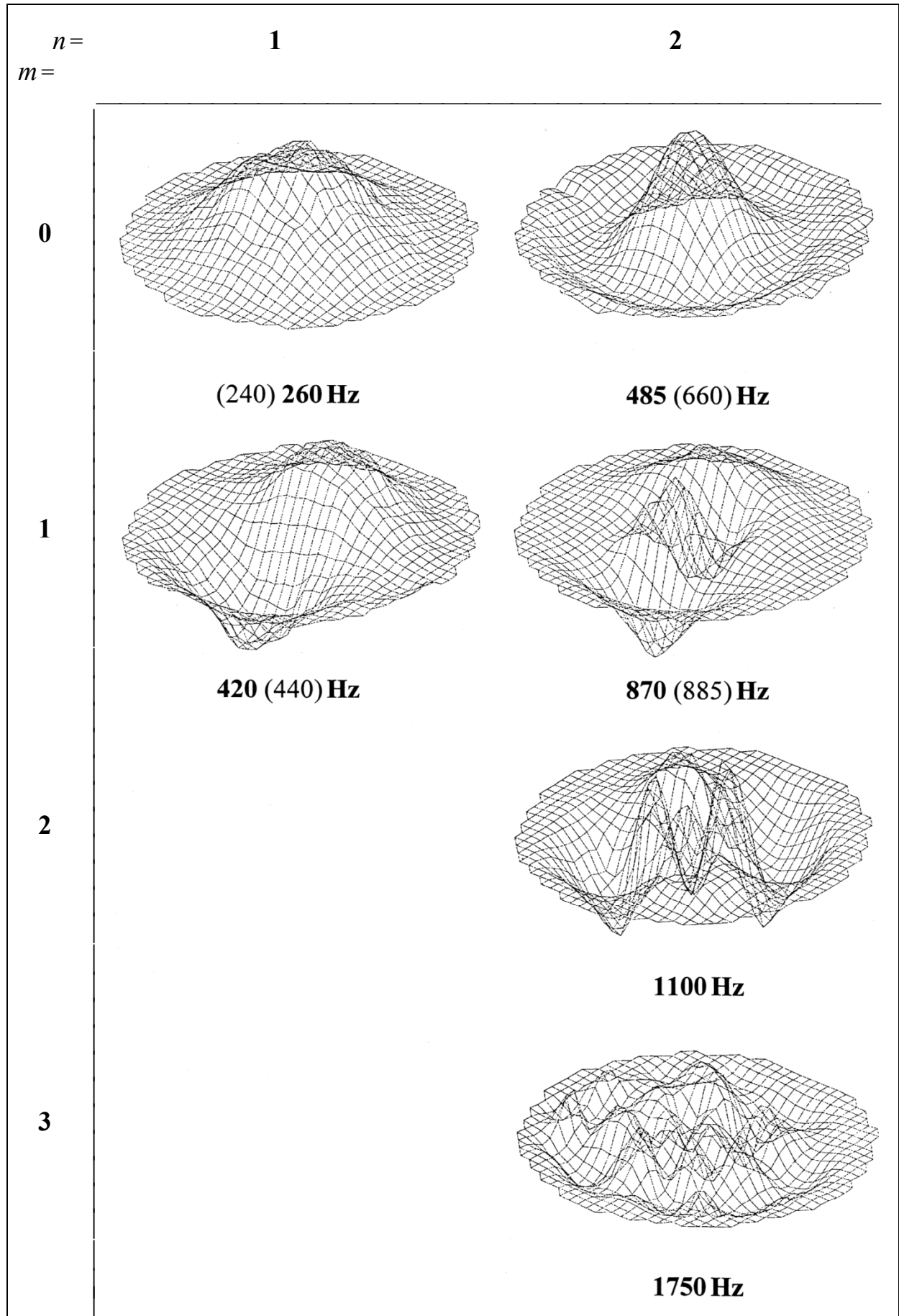


Fig. 17 a. Schwingungsformen und -frequenzen der Tabla P.

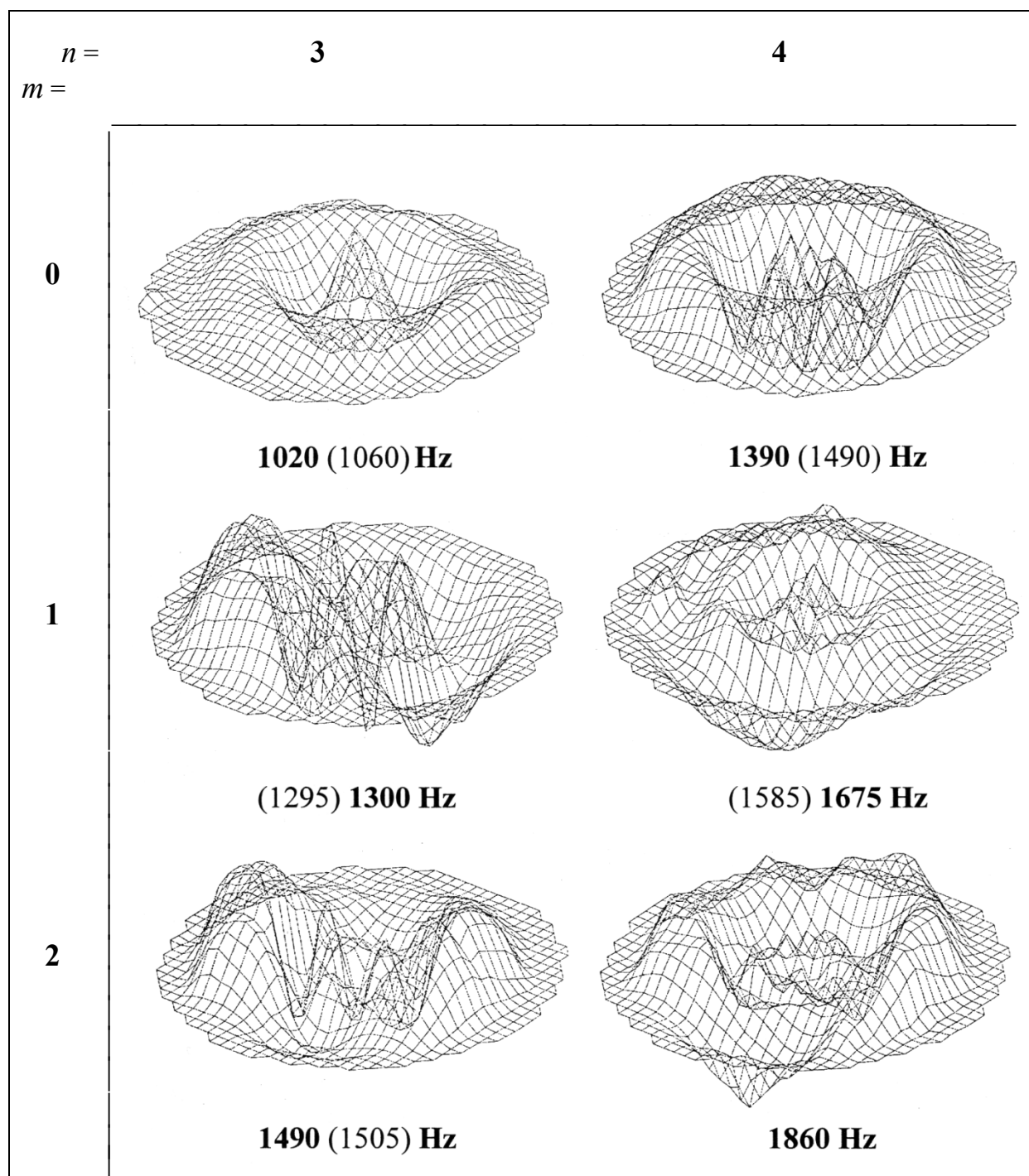


Fig. 17 b. Weitere Schwingungsformen und -frequenzen der *Tabla P*.

regelmäßigen stehenden Schwingungsbilder, sondern umlaufende Moden. Diese ändern während des Umlaufens ihre Gestalt. Wie bereits erwähnt, können solche Erscheinungen die Folge von Moden-Splitting sein, wie es oftmals bei antimetrischen Schwingungsformen mit $m = 1, 2, 3, \dots$ Knotendurchmessern auftritt. Möglicherweise beruhen sie auch auf einem Sachverhalt, die für die *Tabla* typisch zu sein scheint. Da das Fell inhomogen aufgebaut ist, können unterschiedliche Moden nahezu gleiche Frequenzen haben. Die gewählte Analysebandbreite von 5 Hz und die dadurch gegebene Trennschärfe ist unter Umständen nicht ausreichend fein, um diese Moden voneinander zu separieren. Es entstehen dann Kombinations-Formen mit zeitlich-örtlichen Schwebungen.

3.3.2. „Reguläre“ Schwingungsformen

Da die *Tabla* ein rotationssymmetrisch aufgebautes Fell hat, sind ihre Schwingungen besser zu identifizieren als diejenigen der *Bayan*. Fig. 17 zeigt eine zweiteilige Zusammenstellung von 3D-Bildern, die sich hinreichend genau einordnen lassen. Die Schwingungsformen sind entsprechend der Anzahl m der Knotenkreise und n der Knotendurchmesser sortiert, die zugehörigen Frequenzen angegeben. Fettdruck hebt diejenige Frequenz hervor, zu der das dargestellte Schwingungsbild gehört.

In Fig. 17 a finden sich Schwingungsformen mit einem ($n = 1$) bzw. zwei ($n = 2$) Knotenkreisen. Die oberste Zeile enthält rotationssymmetrische Formen ($m = 0$). Die übrigen Zeilen zeigen antimetrische Formen mit einem ($m = 1$), zwei ($m = 2$) bzw. drei ($m = 3$) Knotendurchmessern. Häufig treten ähnliche Formen bei mehreren Frequenzen auf. Der zweite Teil (Fig. 17 b) umfasst Moden mit drei ($n = 3$) bzw. vier ($n = 4$) Knotenkreisen. Wiederum sind in der obersten Zeile rotationssymmetrische Formen ($m = 0$) zusammen gestellt; die beiden anderen Zeilen zeigen antimetrische Formen mit einem ($m = 1$) bzw. zwei ($m = 2$) Knotendurchmessern.

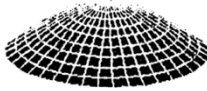




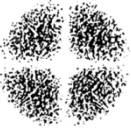



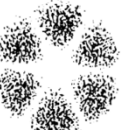




Mode mn	Eigenwert $(k_M a)_{mn}$	perspektivische Darstellung	Chladnische Klangfigur
01	2,40		
11	3,83		
21	5,14		
02	5,52		
31	6,38		
12	7,02		
41	7,59		

Fig. 18. Eigenschwingungsformen und Eigenwerte der idealen Membran.

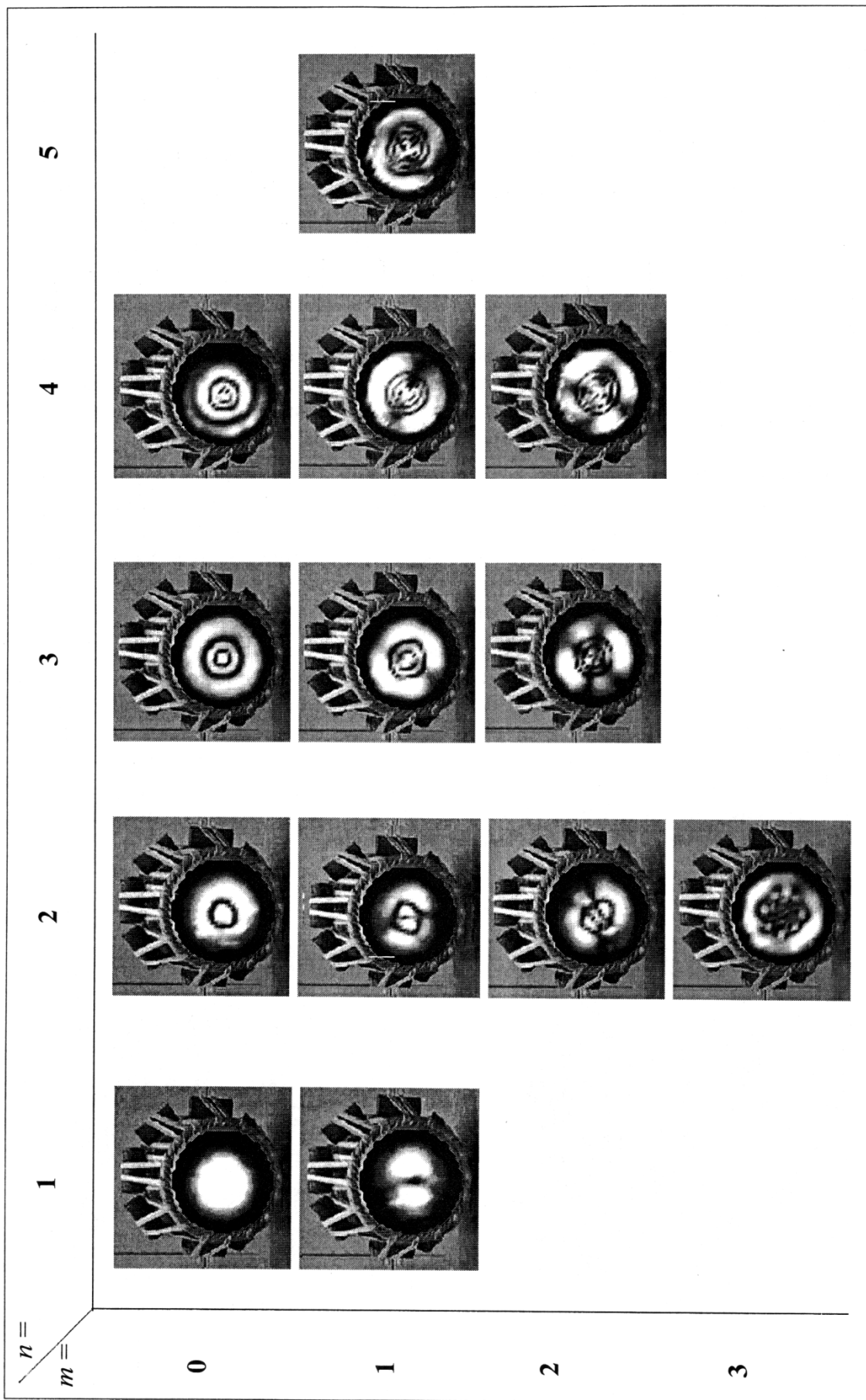


Fig. 19. Schwingungsmuster der Tabla P.

Viele der beobachteten Schwingungsformen stimmen im Großen und Ganzen mit denjenigen überein, die für die ideale homogene Membran zu erwarten sind. Abweichungen ergeben sich hinsichtlich der inneren Knotenkreise, die beim inhomogenen Fell der *Tabla* meist enger sind als bei der idealen Membran; vgl. beispielsweise Fleischer (1988). Aus dieser Arbeit stammt Fig. 18. Nach aufsteigenden Eigenwerten sind die Eigenformen der Membran geordnet. Die perspektivischen Darstellungen sind mit den Schwingungsbildern von Fig. 17 zu vergleichen.

Daneben finden sich in Fig. 18 rechnerisch erzeugte Chladni'sche Klangfiguren (Chladni 1787). Diese Bilder würden entstehen, wenn weißer Sand auf eine schwarze Membran gestreut würde. Bei Anregung mit der Eigenfrequenz würde der Sand zu den Knotenlinien wandern, die sich folglich weiß abzeichnen. Somit ist die Kodierung in Schwarz-Weiß invers zu der in Fig. 19. Die dort gewählte Darstellung entspricht dunklem Pulver, das auf ein helles Fell gestreut wird und sich dort sammelt, wo das Fell am wenigsten schwingt. Schwingungsknoten zeichnen sich demzufolge schwarz, Schwingungsbäuche dagegen weiß ab. Bilder dieser Art entstehen in den Einstellungen *Colour Map Grey* und *Magnitude* der Polytec-Software. In den daraus resultierenden Bildern, hier Schwingungsmuster genannt, wird der Betrag so dargestellt, dass die Helligkeit ein Maß für die Auslenkung ist.

Um einen vertieften Eindruck von den beobachteten Bewegungsverteilungen zu vermitteln, sind die Schwingungsformen in Anhang 2 in einer farbigen Repräsentation zusammen gestellt. Die Auslenkung des *Tabla*-Felles ist als *Instant Value* in Farben (*Colour Map Red-Green*) kodiert. Dabei bedeutet die grüne Farbe negatives, die rote positives Vorzeichen. Je heller die Farbe ist, desto größer ist die Amplitude. Schwarze Stellen kennzeichnen somit Schwingungsknoten, farbige-helle dagegen Schwingungsbäuche.

Dass das „Periodensystem“ der Schwingungsbilder in Fig. 17 und 19 oder Anhang 2 nicht vollständig besetzt ist, kann mehrere Gründe haben. Zum einen besteht immer die Möglichkeit, dass eine Schwingungsform dem Fell zwar zu eigen ist, jedoch durch die gewählte Anregung nicht oder nur so schwach hervorgerufen wird, dass sie nicht gemessen werden kann. Zum anderen können bei der *Tabla* – wie im Weiteren noch näher erläutert wird - unterschiedliche Moden ähnliche Frequenzen haben, was eine Folge der ortsabhängigen Massenbelegung des Felles ist. Unter Umständen reicht dann die für die Analyse gewählte Trennschärfe nicht dazu aus, diese Moden voneinander zu separieren.

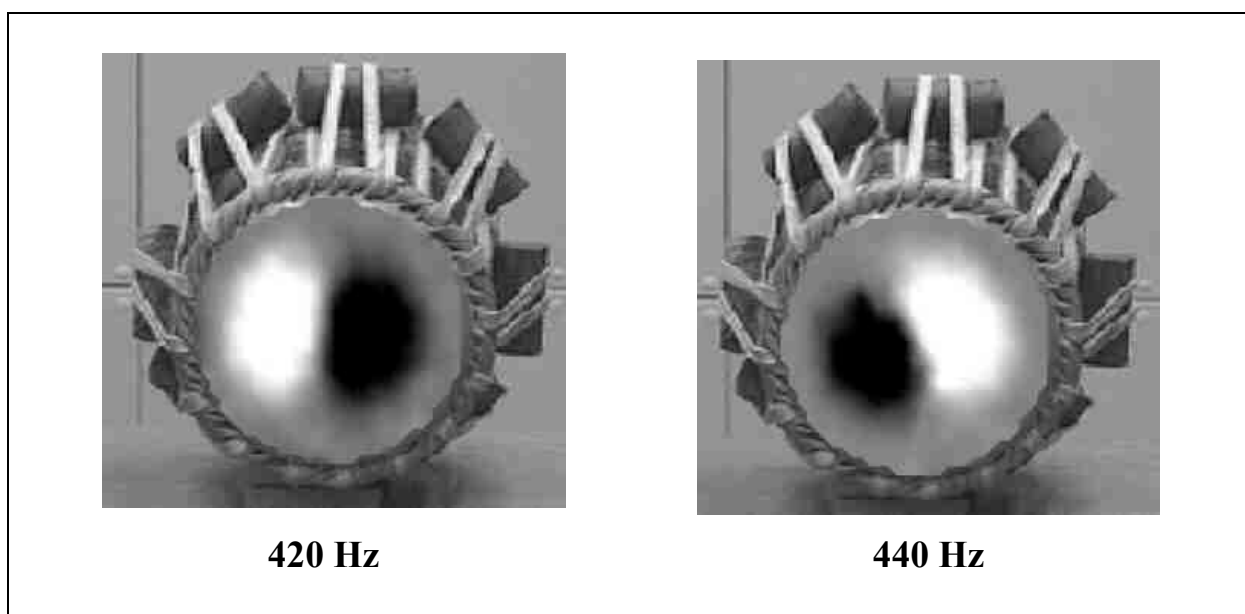


Fig. 20. Moden-Splitting bei der 1-2-Schwingungsform.

Das „Moden-Splitting“, d.h. das Auftreten von Schwingungsformen desselben Typs, die jedoch im Winkel gegeneinander versetzt sind und leicht unterschiedliche Frequenzen haben, soll an Hand von Fig. 20 veranschaulicht werden. In der Darstellungsart *Instant Value* ist das Vorzeichen in Schwarz bzw. Weiß kodiert. Fig. 20 gibt demnach eine Schwingung mit einem Knotendurchmesser ($m = 1$) und einem Knotenkreise ($n = 1$) am Rand wieder. Man erkennt, dass die beiden Schwingungsmuster gegeneinander verdreht sind und die zugehörigen Frequenzen sich um 20 Hz voneinander unterscheiden. Würden beide Moden angeregt werden, könnte dies zur Hörempfindung eines Tones mit 430 Hz führen, dessen Amplitude periodisch mit 20 Hz schwankt, was als schnelle Schwebung wahrgenommen wird. Im Anhang 3 sind dieses und zwei weitere Beispiele in Rot-Grün-Darstellung zusammen gestellt. Sie illustrieren den Sachverhalt, der für antimetrische Schwingungsformen (allgemein für $m = 1, 2, \dots$, im Beispiel für $m = 1$) plausibel macht, warum in Fig. 17 teilweise ein und demselben Schwingungsbild unterschiedliche Frequenzen zugeordnet sind. Bei rotationssymmetrischen Formen ($m = 0$) tritt diese Erscheinung naturgemäß nicht auf.

Die Vermutung von Raman (1934 S.188), dass das Fell der *Tabla* „... is loaded and damped in such a manner that all the overtones above the ninth are suppressed ...“ bestätigt sich hier hinsichtlich der Schwingung nicht in vollem Umfang. Die neunte Teilschwingung hat bei der *Tabla P* etwa die Frequenz 1100 Hz. Die eigenen Messungen zeigen, dass auch höherfrequente Schwingungen problemlos nachzuweisen sind. Ob diese allerdings auch zu wahrnehmbaren Schallkomponenten führen, kann erst die spätere Analyse des akustischen Signals zeigen.

3.3.3. Gemischte Schwingungsformen

An Hand der Rot-Grün-Darstellung des *Instant Value* soll ein weiterer Effekt illustriert werden, der für die *Tabla* typisch zu sein scheint. Das Fell ist offenbar gezielt so inhomogen gemacht, dass Moden unterschiedlichen Typs nahezu gleiche Frequenzen haben können. Die Auflösung von 5 Hz ist dann nicht fein genug, um diese Moden in jedem Fall zu separieren. Es können Misch-Formen entstehen, die schwer zu deuten sind. Hinweise auf ihr Zustandekommen finden sich bei Raman (1934). Er hat auf S. 183 mit der Unterschrift „*Normal Modes of Harmonic Drum*“ die Zusammenstellung veröffentlicht, die Fig. 21 zu entnehmen ist.

Ein erstes eigenes Beispiel ist in Anhang 4 wiedergegeben. Bei 1675 Hz zeigt die Gesamt-Übertragungsfunktion ein ausgeprägtes Maximum. Visualisiert man das Schwingungsbild, so lassen sich zunächst keine „regulären“ Moden der Art identifizieren, wie sie beispielsweise in Fig. 18 zusammen gestellt sind. Animiert man die Darstellung, so ändert sich das Schwingungsbild fortwährend. In Anhang 4 ist die Animation zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten angehalten. Das linke Bild (1675 Hz/I) zeigt eine weitgehend rotationssymmetrische Schwingung mit wahrscheinlich fünf Knotenkreisen. Das rechte Bild (1675 Hz/II) gibt dagegen eine antimetrische Schwingung mit einem Knotendurchmesser und vier Knotenkreisen wieder.

Das Mischen von Schwingungsformen soll noch an einem weiteren Beispiel illustriert werden. Im Anhang 5 ist die Animation der Misch-Form, die sich für 1490 Hz ergibt, zu zwei verschiedenen Zeitpunkten gestoppt. Der Zustand, der mit 1490 Hz/I bezeichnet ist, lässt sich als rotationssymmetrische 0-4-Schwingung deuten. Eine ganz ähnliche Schwingung tritt „reinrassig“ auch bei 1390 Hz auf (kleines Bild links oben). Das mit 1490 Hz/II bezeichnete Schwingungsbild zeigt dagegen zwei Knotendurchmesser und drei Knotenkreise. Es stimmt mit dem überein, was bei 1505 Hz (kleines Bild recht oben) beobachtet wird. Auch dieses Beispiel zeigt, dass bei der *Tabla* – und ebenso bei der *Bayan* – die Identifikation der einzelnen Moden nicht ganz so einfach ist, wie beispielsweise bei der Pauke (z.B. Fleischer 1990b).

Raman und Kumar (1920) sowie Raman (1934) haben darauf hingewiesen, dass die Überlagerung von „regulären“ Moden zu Misch-Formen führt, die durch Auflegen der Fingerspitzen

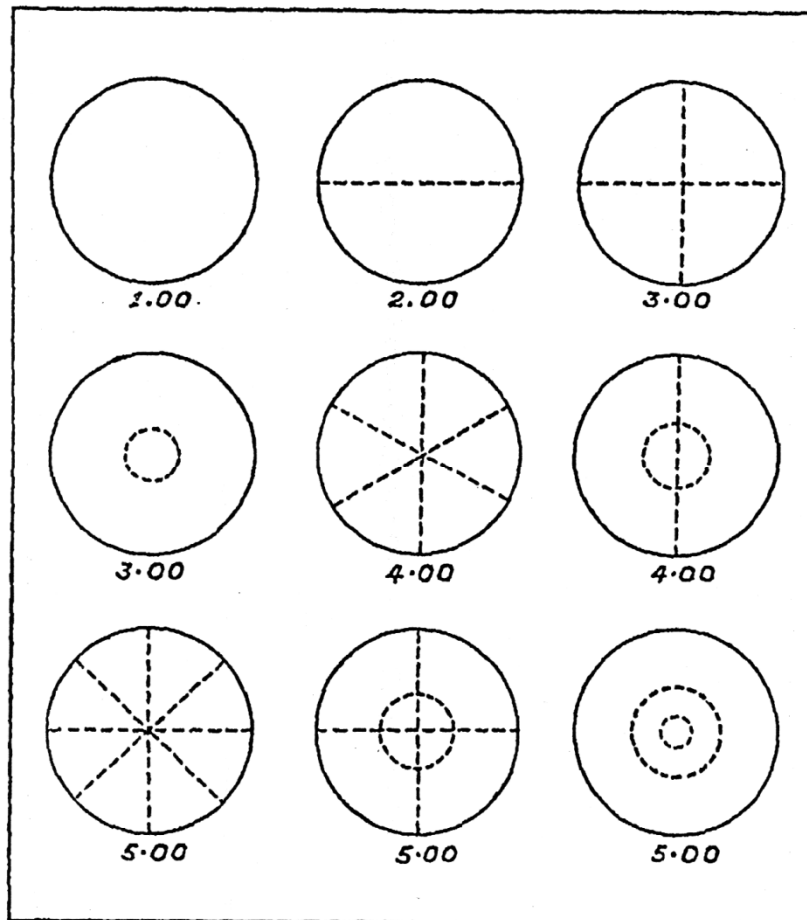
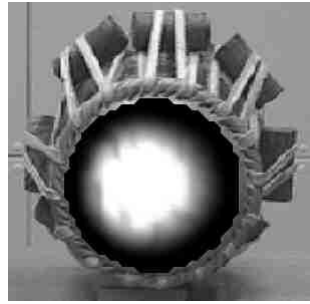


Fig. 21. Eigenschwingungsformen und Frequenzintervalle der Tabla, bezogen auf die Frequenz $f_{0,1}$ der 0-1-Schwingung, nach Raman (1934).

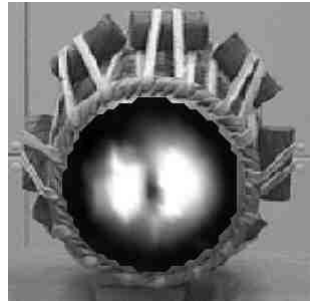
auf das Fell nach Art von Flageolett-Tönen hervorgerufen werden können. Musikalisch nutzen lassen sich auf diese Weise die

- 0-1-Form („reguläre“ Mode),
- 1-1-Form („reguläre“ Mode),
- Kombination aus 2-1-Mode und 0-2-Mode,
- Kombination aus 3-1-Mode und 1-2-Mode sowie
- Kombination aus 2-2-Mode, 4-1-Mode und 0-3-Mode.

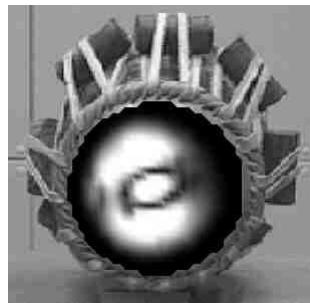
Entsprechende Schwingungsmuster, die bei den eigenen Experimenten ermittelt wurden, sind in Fig. 22 den Chladi'schen Klangfiguren gegenüber gestellt, die Raman im Jahre 1934 veröffentlicht hat. Beim Vergleich ist zu beachten, dass bei den Vibrometer-Bildern (linke Spalte) Knotenlinien schwarz erscheinen. Bei Raman (rechte Spalte) zeichnen sich die Knoten dagegen weiß ab. Sehr anschaulich ist, dass Raman eine Hand mitfotografiert hat. Damit wird verdeutlicht, wie durch Auflegen von Fingern an den richtigen Stellen Knotenlinien erzwungen werden können. Wird das Fell mit einem weiteren Finger an einer geeigneten Stelle angeschlagen, so wird die entsprechende „reguläre“ Mode bzw. Misch-Form und damit der gewünschte Ton hervorgerufen. Nach Raman (1934) lassen sich auf diese Weise fünf unterschiedliche Tonhöhen realisieren, die er als *harmonic tones* bezeichnet. Wie sich diese „Harmonischen“ durch entsprechende Spieltechnik einzeln erzeugen lassen, ist in Abschnitt 3.5 beschrieben.



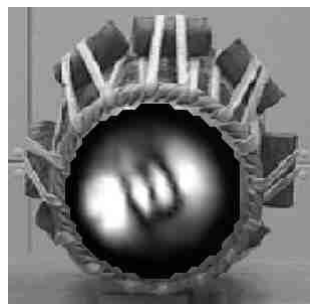
260 Hz



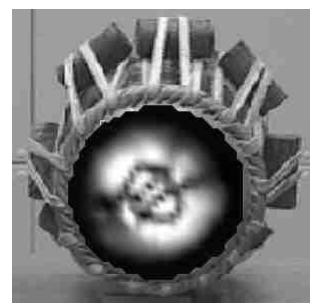
440 Hz



655 Hz



870 Hz



1100 Hz

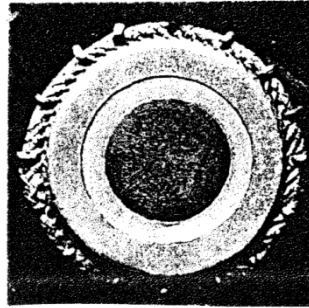


FIG. 3 bei Raman (1934)

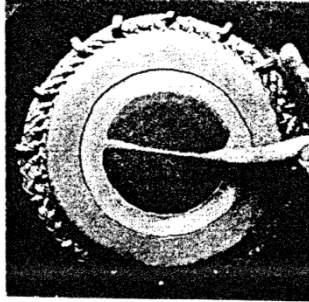


FIG. 4 bei Raman (1934)

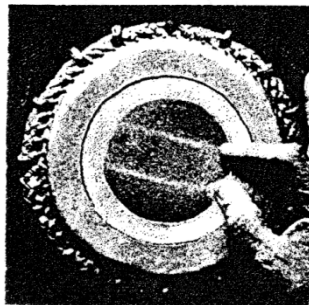


FIG. 5 bei Raman (1934)

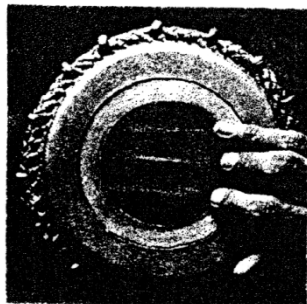


FIG. 6 bei Raman (1934)

Fig.22. Schwingungsmuster und –frequenzen der Tabla P, die musikalisch genutzt werden.

3.4. Schwingungsfrequenzen und Frequenzintervalle der *Tabla P*

Bei musikalisch genutzten Schallen wird den Frequenzverhältnissen (Intervallen) der Teiltöne eine große Rolle zugeschrieben. Entsprechen sie den Verhältnissen ganzer Zahlen wie beispielsweise $1 : 2 : 3 : \dots$, so wird der Klang als „harmonisch“ bezeichnet. Raman und Kumar (1920) haben dem Schallsignal der *Tabla* diese Eigenschaft zugemessen. Ergänzend hat Raman (1934) die Zusammenstellung angegeben, die Fig. 21 zu entnehmen ist. Inwieweit die vorliegende *Tabla P* den damit verknüpften Erwartungen entspricht, kann anhand der beiden nachfolgenden Tabellen überprüft werden.

Tab I. Frequenzen von Teilschwingungen der *Tabla P*, gekennzeichnet durch die Anzahl m der Knotendurchmesser und n der Knotenkreise. Fettdruck hebt die Harmonischen nach Raman (1934) hervor

$n =$	1	2	3	4	5
$m =$	<hr/>				
0	240 Hz	660 Hz	1060 Hz	1390 Hz	
1	440 Hz	885 Hz	1300 Hz	1675 Hz	1910 Hz
2		1100 Hz	1505 Hz	1860 Hz	
3		1750 Hz			

In Tab. I sind die Frequenzen von Teilschwingungen der *Tabla P* zusammen gestellt, die durch die Anzahl m der Knotenkreise sowie n der Knotendurchmesser charakterisiert sind. Die zugehörigen Schwingungsbilder für die angegebenen oder weitere Frequenzen, bei denen sich Formen des gleichen Typs zeigen, können Fig. 17, 19 oder Anhang 2 entnommen werden. Misch-Formen, die bei 655 Hz, 870 Hz und 1100 Hz beobachtet wurden, gibt Fig. 22 wieder.

Tab II. Frequenzintervalle von Teilschwingungen, gekennzeichnet durch die Anzahl m der Knotendurchmesser und n der Knotenkreise, bezogen auf die Frequenz $f_{0,1}$ der 0-1-Schwingung. Fettdruck hebt die Harmonischen nach Raman (1934) hervor

$n =$	1	2	3	4	5
$m =$	<hr/>				
0	1 (Ref.)	2,75	4,42	5,80	
1	1,83	3,69	5,42	6,98	7,96
2		4,58	6,27	7,75	
3		7,29			

Die Frequenzintervalle, die man daraus mit der Referenz $f_{0-1} = 240$ Hz erhält, finden sich in Tab. II. Ganze Zahlen, wie sie nach Raman und Kumar (1920) sowie Raman (1934) für mehrere Teilschwingungen zu erwarten wären, treten nicht auf. Vielmehr weichen die Zahlenverhältnisse von den harmonischen Intervallen, die Raman und Kumar sowie Raman (vgl. Fig. 21) gefunden haben, stets nach unten ab. Tab. III zeigt eine Gegenüberstellung.

Tab. III. Intervalle der Frequenzen einiger Teilschwingungen, bezogen auf die Frequenz f_{0-1} der 0-1-Mode

Mode	Frequenz	
	nach Raman (1934)	eigene Schwingungsmessung
0-1	f_{0-1}	f_{0-1}
1-1	$2,00 f_{0-1}$	$1,83 f_{0-1}$
2-1	$3,00 f_{0-1}$	÷
0-2	$3,00 f_{0-1}$	$2,75 f_{0-1}$
3-1	$4,00 f_{0-1}$	÷
1-2	$4,00 f_{0-1}$	$3,69 f_{0-1}$
4-1	$5,00 f_{0-1}$	÷
0-3	$5,00 f_{0-1}$	$4,42 f_{0-1}$
2-2	$5,00 f_{0-1}$	$4,58 f_{0-1}$
0-4	÷	$5,80 f_{0-1}$
1-3	÷	$5,42 f_{0-1}$

Die eigenen Messungen ergeben engere Intervalle als die der rein harmonischen Verhältnissen $1 : 2 : 3 : \dots$ usw. Nach Terhardt (1998) liegt somit ein „geringharmonisches komplexes Spektrum“ vor. Die Abweichung von der harmonischen Folge beträgt systematisch etwa -9% . Demzufolge ist die 0-1-Referenzfrequenz um eben diesen Prozentsatz zu hoch. Ein erster Teilton, der Ramans Vorstellungen entspräche, würde bei $f_{0-1} = 220$ Hz liegen.

Parvinder Bharat gibt an, seine *Tabla* in aller Regel auf die Note A (entsprechend 220 Hz oder auch 440 Hz) zu stimmen. Es wäre denkbar, dass diese Tonhöhe gar nicht allein von der 0-1-Schwingung bestimmt wird, sondern dass ähnlich wie bei der Glocke (Fleischer 1997) im Gehör eine Art Schlagton entsteht. Um diesen Fall zu illustrieren, ist probenhalber in Tab. IV als Referenz die Frequenz f_{1-1} der 1-1-Schwingung gewählt. Dies führt auf ein ähnliches Intervallraster wie für die Pauke (Fleischer 1994 a), bei der die 1-1-Schwingung den Hauptton hervorruft und weitere Teiltöne als Quinte, Oktave usw. auftreten.

Wie z.B. Tab. I zeigt, liegen die höherfrequenten Teiltöne im „dominanten Frequenzbereich“, der nach Terhardt (1998) von 500 Hz bis 2 kHz reicht. Es erscheint somit plausibel, dass aus dem Raster der Spektraltonhöhen beim Hören eine Virtuelle Tonhöhe (Terhardt 1972 a, 1972 b und 1998) entsteht. Die „Missing Fundamental“ würde höchstwahrscheinlich bei $0,5 f_{1-1} = 220$ Hz wahrgenommen werden und läge damit tiefer als der physikalisch vorhandene 0-1-Ton. Bei all diesen Betrachtungen ist stets im Auge zu behalten, dass neben der Frequenz auch die Amplitude eine Rolle spielt. Zwar kann vorhergesagt werden, dass sich die F r e –

q u e n z e n der Teilschwingungen im Schallsignal wiederfinden. Ob eine Teilschwingung beim Spielen überhaupt angeregt wird und in welchem Maße sie sich in S c h a l l p e g e l umsetzt, kann derzeit jedoch noch nicht beurteilt werden. Weitergehende Interpretationen sollen deshalb erst an Hand des Schallsignals versucht werden.

Tab IV. Frequenzintervalle von Teilschwingungen, gekennzeichnet durch die Anzahl m der Knotendurchmesser und n der Knotenkreise, bezogen auf die Frequenz f_{1-1} der 1-1-Schwingung. Fettdruck hebt die Harmonischen nach Raman (1934) hervor

$n =$	1	2	3	4	5
$m =$	<hr/>				
0	0,55	1,50	2,41	3,16	
1	1 (Ref.)	2,01	2,95	3,81	4,34
2		2,50	3,42	4,23	
3		3,98			

Unabhängig von der Normierung belegen einige markante Beispiele die Aussage von Raman, dass unterschiedliche Schwingungsformen bei eng benachbarten Frequenzen auftreten können; vgl. Fig. 21. Exemplarisch seien die 0-3- und die 2-2-Schwingung genannt. Dies wäre auch eine Erklärung dafür, warum die 2-1-Schwingung und die 3-1-Schwingung, die üblicherweise einfach nachzuweisen sind, bei den eigenen Messungen nicht zu identifizieren waren. Offenbar werden sie in so geringem Maße angeregt und/oder verschmelzen so eng mit der 0-2- bzw. 1-2-Schwingung, dass sie mit der gewählten Frequenzauflösung von 5 Hz nicht zu separieren sind.

3.5. Hinweise für das „Greifen“ des *Tabla*-Felles

Ausgehend von den Schwingungsmustern des Felles gibt Raman (1934) gradezu eine Lehrstunde für das Spielen der *Tabla*, indem er beschreibt, wie bestimmte Schwingungsmuster und damit die einzelnen Harmonischen gezielt hervorgerufen werden können. Zur Illustration können die Schwingungsbilder von Fig. 22 dienen.

So schreibt er auf S. 184 zur **ersten Harmonischen**, die von der 0-1-Mode herrührt und bei der *Tabla P* etwa die Frequenz 240 Hz hat: „*This is best excited by bringing down the flat of the palm of the hand smartly on the centre of the drum-head and then quickly removing it. Produced in this way, the deep hum-tone obtained is quite free from overtones, whereas the tone obtained by striking the drum with the finger tips contains overtones.*“ Raman beschreibt hier die Vorgabe einer Anfangsauslenkung ähnlich der 0-1-Schwingungsform, bei der das Fell folgerichtig im Wesentlichen auch nur mit der zugehörigen 0-1-Frequenz schwingt. Impulsartige Anregung, wie sie beispielsweise auch bei der Pauke ausgeübt wird, ruft dagegen auch die höheren Teiltöne hervor. Auf die letztgenannte Situation bezieht sich die oben geäußerte Vermutung zur Virtuellen Tonhöhe.

Die **zweite Harmonische** wird von der 1-1-Mode erzeugt. Wie diese antimetrische Schwingung gezielt hervorgerufen werden kann, schildert Raman folgendermaßen: „*The professional*

drummer excites this by smartly striking the membrane with the edge of his palm laying his little finger along a diameter so as to bring it to rest, while the edge strikes the membrane and rapidly recoils from it.“ Aus dieser Beschreibung geht hervor, dass durch Auflegen des kleinen Fingers ein Knotendurchmesser auf dem Fell erzwungen wird. Durch geeignete Wahl der Anschlagstelle wird die gewünschte 1-1-Mode stärker als andere antimetrische Schwingungsformen angeregt. So prägt sich auch der zugehörige Teilton, der bei der *Tabla P* in aktueller Stimmung etwa die Frequenz 440 Hz hat, entsprechend stark aus.

Die **dritte Harmonische** rührt von einer Misch-Form her, die sich aus den zwei Grundmoden 2-1 und 0-2 aufbaut. Von den vielfältigen Kombinationen lässt sich diejenige am leichtesten erzwingen, bei der zwei Knotenlinien parallel über den schwarzen Fleck verlaufen. Raman sagt auf S. 185 dazu: „*For exciting the third tone of the drum by itself, the simplest method is to touch the membrane gently with the fingers at two points near each other on the edge of the black central load and then strike the drum smartly with the finger at a point 90⁰ away ...*“. Das Auflegen der beiden Finger bewirkt Knotenlinien. Das Anschlagen nahe dem Schwingungsbauch hat maximale Anregung der gewünschten Misch-Form zur Folge. Die zugehörige dritte Misch-Form hat bei der *Tabla P*, wie sie bei der Messung gestimmt war, etwa die Frequenz 655 Hz.

Vergleichbare Verhältnisse liegen bei der **vierten Harmonischen** vor, die für die *Tabla P* in aktueller Stimmung bei etwa 870 Hz liegt. Raman gibt folgende Anleitung: „*The fourth tone is similarly excited by touching the edge of the loaded area lightly at three points, and striking the drum near its outer edge with the finger at a point 90⁰ away from the middle of the three points touched.*“ Auf diese Weise werden drei Knotenlinien erzwungen, wie sie die entsprechende Misch-Form aufweist, die sich aus der Überlagerung der 3-1- und der 1-2-Grundmode ergibt. Angeschlagen wird dort, wo die Schwingungsform einen Bauch aufweist.

Die Misch-Form, die zur **fünften Harmonischen** führt, konnte Raman mit seinen Chladni-Figuren nicht nachweisen. Sie setzt sich aus den Grundformen 4-1, 2-2 und 0-3 zusammen. Raman schreibt auf S. 186: „*The fifth tone may similarly be excited by touching the edge of the loaded area at four points, and striking the drum smartly at a point some distance away on the marginal ring of leather.*“ Auch hierbei erzwingt das Auflegen der vier Finger Knotenlinien; das Anschlagen nahe dem Schwingungsbauch bewirkt die maximale Anregung der gewünschten Misch-Form. Die fünfte Harmonische ist bei der *Tabla P* schwach ausgeprägt und besitzt bei der aktuellen Stimmung etwa die Frequenz 1100 Hz.

Die Vorschriften dafür, wie die Finger zu setzen sind, damit der gewünschte Ton hervorgerufen wird, lassen sich nicht ohne die Kenntnis der Schwingungsformen des *Tabla*-Felles herleiten. Die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen können dazu beitragen, diese Kenntnis zu erweitern und zu vertiefen. Neu ist bei diesem Instrument im Gegensatz zu bisher untersuchten Membranophonen, dass dafür nur in zwei Fällen (erste und zweite Harmonische) die regulären Grundmoden relevant sind. Bei den drei höheren Harmonischen können dagegen Misch-Formen, die sich aus der Überlagerung von zwei oder drei Grundmoden ergeben, bei der Klangerzeugung eine Rolle spielen. Dies haben Raman und Kumar bereits im Jahr 1920 richtig erkannt.

3.6. Zusammenfassende Bemerkung

Die Vibrometer-Messungen haben bei der *Bayan* Schwingungsformen ergeben, die teilweise nur schwer zu deuten sind. Lediglich die ersten Moden bei 85 Hz bzw. 150 Hz traten völlig „reinrassig“ auf. Wenn wieder einmal die Möglichkeit zu einer Messung bestehen sollte, dann wäre es ratsam, die Versuchsparameter anders zu wählen. Die Frequenzauflösung sollte auf jeden Fall verfeinert werden, so dass möglichst jede Schwingungsform über ein eigenes

Maximum in der Gesamt-Übertragungsfunktion identifiziert werden kann. Als sinnvoller Wert erscheint derzeit ein Frequenzabstand von 2 Hz. Gleichzeitig darf die Messzeit jedoch nicht zu lange werden, damit auf jeden Fall verhindert wird, dass das Fell im Laufe der Messung – beispielsweise durch Aufnahme von Feuchtigkeit oder in Folge von Änderungen der Umgebungstemperatur - seine Eigenschaften verändert. Dafür sollte ein weitmaschigeres Messgitter in Kauf genommen werden. Ein Viertel der Gitterpunkte, die bei der vorliegenden Messung verwendet wurden, d.h. ca. 500 Messpunkte, dürfte immer noch gut ausreichen. Darüber hinaus wäre es hinnehmbar, den Frequenzbereich auf 1 kHz zu halbieren.

Die experimentellen Ergebnisse der *Tabla* sind von weitaus höherer Qualität und Aussagekraft. Da bei sonst gleichen Parametern anstelle von 2200 Messpunkten lediglich 750 verwendet wurden, dauerte die Messung nur ein Drittel der Zeit, die für die *Bayan* aufgebracht werden musste. Während dieser Zeitspanne änderten sich die Eigenschaften des Felles offenbar nicht so gravierend, dass dies die Messung entwertet hätte. Zahlreiche *Normal Modes*, beginnend bei der Frequenz 240 Hz, konnten identifiziert werden. Die Schwingungsformen haben große Ähnlichkeit mit denjenigen, welche für eine ideale Membran konstanter Dicke zu erwarten sind, die im Vakuum schwingt. Allerdings besitzen die inneren Knotenkreise in Folge der zusätzlichen Massenbelastung des *Tabla*-Felles durch den schwarzen Fleck geringere Durchmesser als bei der idealen Membran. Moden-Splitting ist häufig zu beobachten.

Die Intervalle der Schwingungsfrequenzen weichen teilweise beträchtlich von denjenigen ab, welche sich für die *in-vacuo*-Membran ergeben. Beispielsweise liefert das Experiment für die 1-2-Mode eine 3,35 ... 3,65 Mal so hohe Frequenz wie für die 0-1-Mode. Dagegen hätte die Theorie das Intervall 2,93:1 vorhergesagt. Es gehört zum Wesen der *Tabla*, dass unterschiedliche Schwingungsmoden bei nahezu den gleichen Frequenzen auftreten können. Die Misch-Formen, die daraus resultieren, erweisen sich geradezu als der Normalfall und als kennzeichnend für die *Tabla*. So zeigt sich, dass das Experiment der geeignete Weg ist, die Frequenzen des *Tabla*-Felles und ihre Zuordnung zu den Schwingungsformen zu untersuchen.

4. FFT-ANALYSE DER SCHALLSIGNALLE

Sowohl Parvinder Bharat wie auch Harpit Sahota sind erwiesenermaßen in der Lage, ihre Instrumente fachgerecht zu handhaben. Die Tabla-Klänge, die sie für Untersuchungszwecke auf ihren Trommeln erzeugt haben, können deshalb als repräsentativ betrachtet werden. Die Schallsignale wurden in einer normalen Wohn-Umgebung mit einem Kondensator-Mikrofon etwa einen Meter vor dem Spieler aufgenommen, mit einem tragbaren Recorder Sony TCD-D 10 auf *Digital Audio Tape* (DAT) gespeichert und anschließend analysiert. Gegenstand des vorliegenden Kapitels ist die physikalisch motivierte Untersuchung dieser Tabla-Schalle.

4.1. Methode

Das DAT wurde von einem Recorder Sony 300 ES in den internen Speicher eines *Multi Purpose FFT Analyzers* Ono Sokki CF-5210 überspielt und dort einer Schnellen Fourier-Transformation (*Fast Fourier Transformation*, FFT) unterzogen. Die Ergebnisse wurden in mehreren unterschiedlichen Darstellungsarten auf einem Plotter hp 7470 gezeichnet. Als Analysebandbreite wurde einheitlich 1600 Hz gewählt. Mit 1024 Abtastpunkten ist das zugehörige Zeitfenster 250 ms lang; die Frequenzauflösung ergibt sich zu 4 Hz.

Die Anfangsabschnitte derjenigen Aufnahmen, die analysiert wurden, sind zunächst als Zeitfunktion (wobei die Bandbreite auf 1600 Hz beschränkt ist) und zugehöriges Spektrum dargestellt. Die Zeitfunktion wurde für die Analyse stets mit einem Hanning-Fenster gewichtet. Für die grafische Darstellung ist sie auf einen willkürlichen Bezugswert normiert. Im Spektrum sind die Schallpegel im Bereich von 40 dB bis 90 dB über einer linearen Frequenzskale wiedergegeben.

Mit der Funktion „List“ lassen sich die Frequenzen und Schallpegel ausdrucken, bei denen das Schallpegel-Frequenz-Spektrum Spitzen aufweist. Sofern tonale Anteile hinreichend sicher identifiziert werden konnten, sind deren Frequenzen in den folgenden Abschnitten tabellarisch zusammen gestellt.

Einen Eindruck vom zeitlichen Auf- und Abbau der einzelnen Teiltöne vermitteln die Wasserfall-Diagramme der Schallsignale. Das 250 ms lange und *Hanning*-gewichtete Analyse-Zeitfenster wurde über das Schallsignal geschoben und das zugehörige Schallpegel-Frequenz-Spektrum ermittelt. Achtzig dieser Spektren sind zu einer 3D-Darstellung so kombiniert, dass der Schallpegel als Funktion der Frequenz (nach rechts aufgetragen) und der Zeit (nach schräg vorne aufgetragen) erscheint.

4.2. Untersuchte *Tabla*-Klänge

Die Tab. V bis VII geben Listen der Schalle wieder, wie sie die beiden Spieler mit ihren *Tabla*-Paaren erzeugt haben. Unabhängig davon, ob diese Signale eher perkussiven oder tonalen Charakter haben, werden sie im Folgenden als Klänge bezeichnet.

Die Schalle werden mit Silben bezeichnet. Neben einer kurzen verbalen Charakterisierung ist in Tab. V angegeben, welcher der beiden Künstler welchen Klang auf seiner *Tabla* gespielt hat. Die Ergebnisse der objektiven Schalluntersuchungen der *Tabla*-Klänge sind im Kapitel 5 zusammen gestellt.

Tab V. Schalle, welche die beiden Spieler zum Zweck der Analyse auf ihren Tablas erzeugt haben

Bezeichnung	Charakterisierung	gespielt von Parvinder Bharat	gespielt von Harjit Sahota
na (5.1)	lang nachklingender, hoher Ton	•	•
tun (5.2)	lang nachklingender, tiefer Ton	•	•
kalan (5.3)	Mehrfach-Schlag mit tonalem Nachklang	•	
tik (5.4)	schmatzend, rein perkussiv		•
tit (5.5)	ähnlich tik , jedoch mit Vor-Schlag	•	
dhin (5.6)	trocken, kurz, rein perkussiv		•
dhit (5.7)	Vierfach-Schlag, schmatzend, rein perkussiv		•
dhir-dhir (5.8)	schmatzend, rein perkussiv		•

4.3. Kombinations-Klänge

Zwei Klänge, die Harjit Sahota gem. Tab. V nur auf seiner *Tabla* gespielt hat, hat Parvinder Bharat durch synchrones Spiel auf beiden Instrumenten seines *Tabla*-Paares hervorgerufen. Sie sind in Tab. VI aufgeführt. Die zugehörigen Messergebnisse finden sich im Kapitel 6.

Tab VI. Kombinationsschalle, die Parvinder Bharat zum Zweck der Analyse auf seinem *Tabla*-Paar gespielt hat

Bezeichnung	Charakterisierung	gespielt von Parvinder Bharat	gespielt von Harjit Sahota
dhin (6.1)	Kombination <i>Tabla/Bayan</i> ; perkussiver Schlag mit moduliertem Nachklang	•	
dhir-dhir (6.2)	Kombination <i>Tabla/Bayan</i> ; perkussive Vor-Schläge mit moduliertem Nachklang	•	

4.4. *Bayan*-Klänge

Zwei weitere Klänge werden ausschließlich auf der größeren der beiden Trommeln gespielt. Sie sind in Tab. VII zusammen gestellt. Resultate der Schallanalysen sind Kapitel 6 zu entnehmen.

Tab VII. Schalle, welche die beiden Spieler zum Zweck der Analyse auf ihren *Bayans* hervorgerufen haben

Bezeichnung	Charakterisierung	gespielt von Parvinder Bharat	gespielt von Harpit Sahota
<i>ke</i> (6.3)	tiefer Ton, Tonhöhe gleichbleibend bzw. ansteigend	•	•
<i>gin</i> (6.4)	tiefer Ton mit Vor-Schlag, Tonhöhe zunächst abfallend, am Schluss ansteigend		•

4.5. Zusammenfassende Bemerkung

Die beiden Künstler Parvinder Bharat und Harpit Sahota waren aufgefordert worden, repräsentative *Tabla*-Klänge ihrer Wahl zum Zwecke der weiteren Analyse zu spielen. Die Aufnahmen, die dabei entstanden, wurden mittels FFT analysiert und sind im Folgenden (Kapitel 5: *Tabla*; Kapitel 6: *Tabla* und *Bayan* bzw. *Bayan* allein) einander gegenüber gestellt. Damit wird umfangreiches Material geschaffen, mit dessen Hilfe unter anderem die Beziehungen zwischen Schwingung und Schall von *Tabla* und *Bayan* untersucht werden können.

5. OBJEKTIVE ANALYSE DER *TABLA*-KLÄNGE

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der Analysen von Klängen zusammen gestellt, die – abgesehen von einer Ausnahme - auf der kleineren der beiden Trommeln des *Tabla*-Paares erzeugt worden sind. Zuerst werden die Schalldruck-Zeitfunktion und das zugehörige FFT-Spektrum gezeigt, das man für das darüber wiedergegebene Zeitfenster erhält. Die Zeitfunktion ist nach Maßgabe der Analyse-Bandbreite Tiefpass-begrenzt. Zusätzlich ist ein weiteres Schallpegel-Frequenz-Spektrum angegeben, wie es sich zu einem etwas anderen Zeitpunkt ergibt. Mit Hilfe der *List*-Funktion sind Pegelmaxima identifiziert und die zugehörigen Frequenzen ausgedrückt worden. Die wesentlichen Werte samt ihren Intervallen sind angegeben. Um den gesamten Verlauf des Schallsignals besser überblicken zu können, sind danach zusätzlich in dreidimensionaler Darstellung Schalldruck-Frequenz-Spektren als Funktion der Zeit abgebildet.

5.1. *Tabla*-Klang *na*

Der Spieler legt den Ringfinger mit wenig Druck auf das Fell und schlägt es am Rand mit dem Zeigefinger an. Die Zeitfunktionen der auf diese Weise erzeugten Schallsignale zeigen bei beiden Spielern ausgeprägte tonale Anteile und ein exponentielles Abklingen. Der spektrale Gehalt erschließt sich jeweils aus der Abbildung unterhalb der Zeitfunktion sowie einem weiteren Diagramm mit beigefügter Liste der wesentlichen Spektralkomponenten.

5.1.1. *na*, gespielt von Parvinder Bharat

Fig. 23 gibt in mehreren Teildiagrammen und einer Tabelle Ergebnisse der Analysen der Aufnahmen wieder, bei denen Parvinder Bharat einen isolierten *na*-Klang gespielt hat. Wie auch bei den weiteren Auswertungen zeigt sich, dass er für die Tonaufnahmen seine *Tabla* offensichtlich etwa einen Ganzton (entsprechend einem Frequenzzuwachs um 12%) höher gestimmt hatte als für die Vibrometer-Messungen.

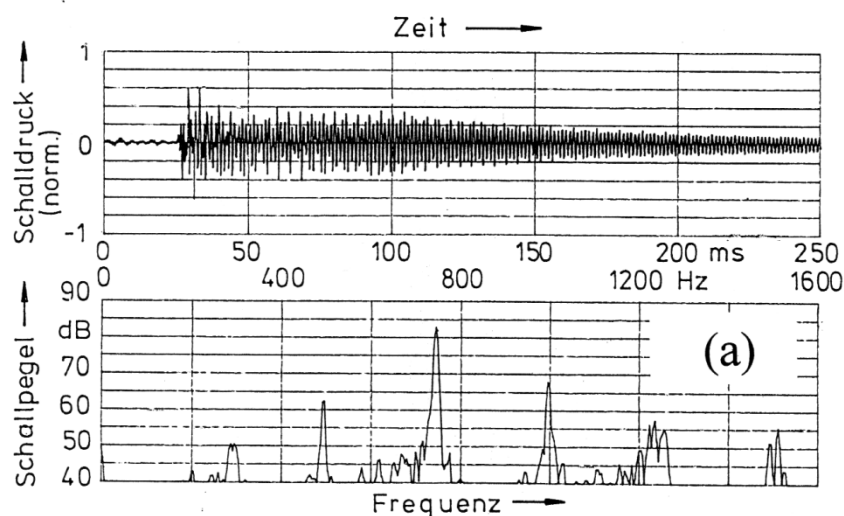
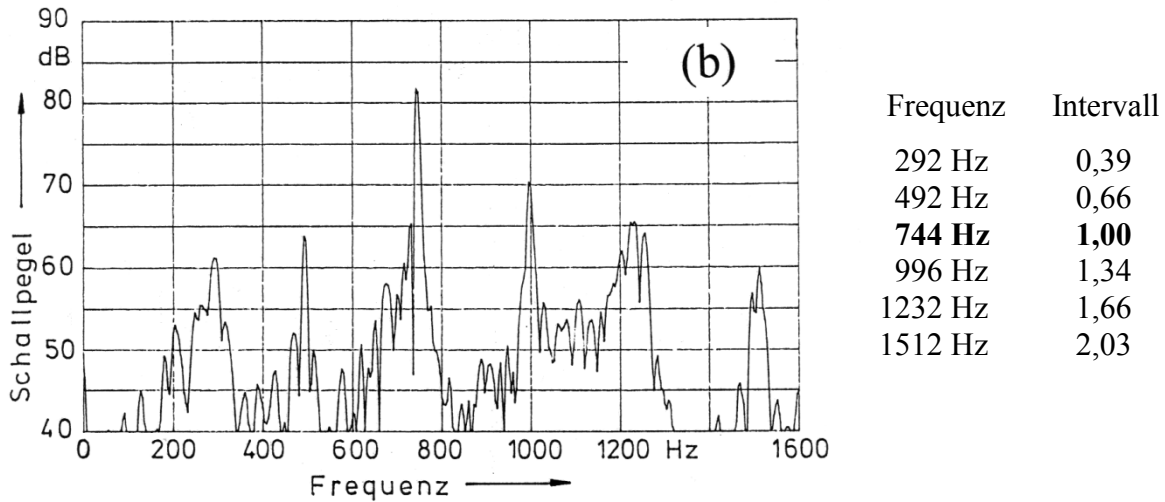


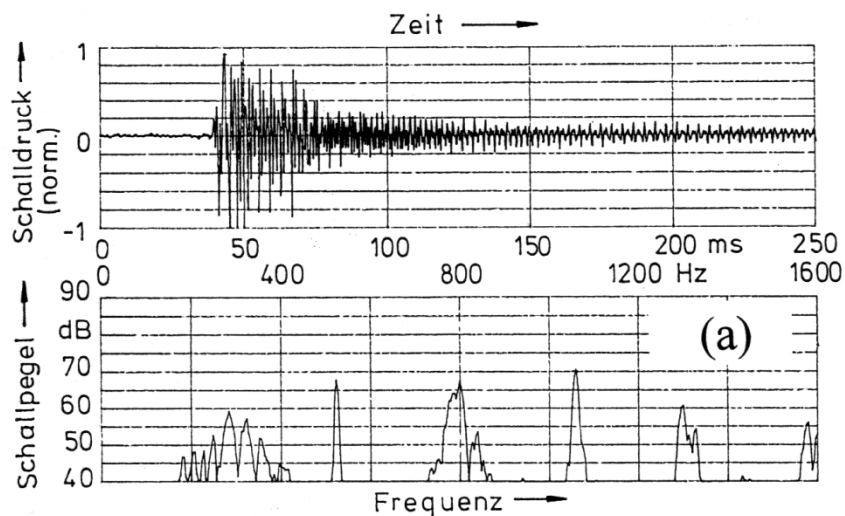
Fig. 23 a. *Tabla*-Klang *na*, Spieler Parvinder Bharat.
Oben: Schalldruck-Zeitfunktion;
unten: zugehöriges Schallpegel-Frequenz-Spektrum.

Fig. 23 b. *Tabla-Klang na*, Spieler Parvinder Bharat.
 Links: Schallpegel-Frequenz-Spektrum;
 rechts: Frequenzen der wesentlichen Teiltöne sowie
 Intervalle bei Normierung auf den dritten Teilton.



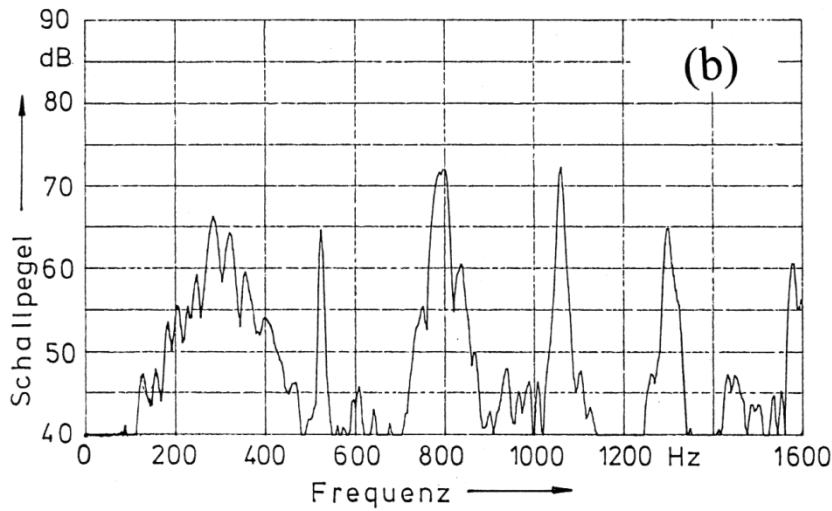
5.1.2. *na*, gespielt von Harpit Sahota

In Fig. 24 ist dargestellt, was sich ergibt, wenn ein anderer Spieler auf einem anderen Instrument den gleichen *Tabla*-Klang hervorruft. Harpit Sahota hat den Klang *na* dreimal hintereinander gespielt. Seine *Tabla* ist offenbar um circa 7%, d.h. um etwas mehr als einen Halbton höher gestimmt als die *Tabla* von Parvinder Bharat. Fig. 24 b lässt erkennen, dass die Intervalle der Teiltöne nahezu dieselben sind wie beim anderen Spieler (23 b). Beide Spieler „greifen“ und schlagen das Fell so an, dass der Pegel des dritten Teiltones (Frequenz 744 Hz bzw. 800 Hz) anfänglich um etwa 10 dB bis 15 dB höher ist als diejenigen der übrigen Teiltöne. Demnach dürfte man dem Klang *na* unmittelbar nach dem Anschlag eine Tonhöhe zurechnen, die im oberen Bereich der fünften Oktave angesiedelt ist. Ab dem dritten Teilton entsteht eine Reihe, die als Folge Prim – Quart – Sext – Oktav aufgefasst werden kann.



Oben: Schalldruck-Zeitfunktion;
 unten: zugehöriges Schallpegel-Frequenz-Spektrum.

Fig. 24 b. *Tabla-Klang na*, Spieler Harpit Sahota.
 Links: Schallpegel-Frequenz-Spektrum;
 rechts: Frequenzen der wesentlichen Teiltöne sowie
 Intervalle bei Normierung auf den dritten Teilton.



Frequenz	Intervall
284 Hz	0,36
524 Hz	0,66
800 Hz	1,00
1060 Hz	1,33
1300 Hz	1,63
1580 Hz	1,98

5.1.3. Wasserfall-Diagramme

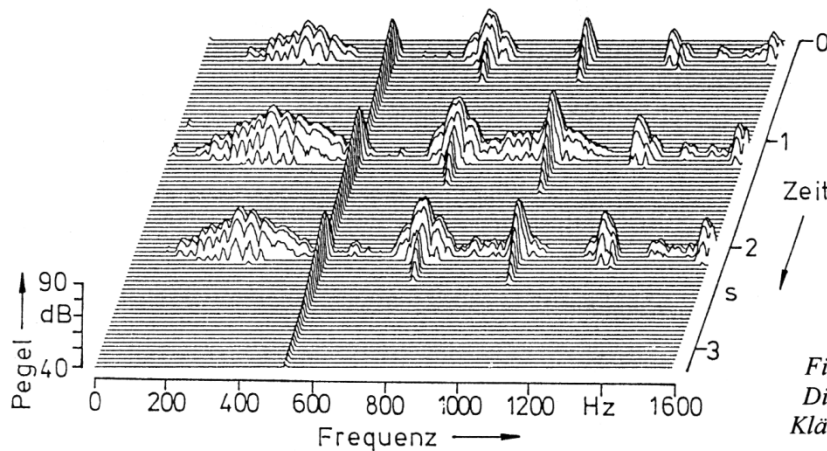


Fig. 25. Schallpegel-Frequenz-Zeit-Diagramm einer Folge von drei *na*-Klängen, gespielt von Harpit Sahota.

Der Gesamtverlauf des Schallsignals lässt sich gut in der dreidimensionalen Schalldruck-Frequenz-Zeit-Darstellung beurteilen. Fig. 25 vermittelt einen Eindruck davon, in welchem Maße bei ein und demselben Spieler aufeinander folgende, gleichartige Anschläge übereinstimmen. Die beiden Diagramme in Fig. 26 erlauben abzuschätzen, inwieweit der gleiche *na*-Klang von der individuellen Spielweise geprägt ist. So erkennt man, dass Parvinder Bharats Anschlag (Fig. 26 oben) den dritte Teilton sehr stark hervortreten lässt. Der dritte Teilton ist für eine längere Zeitdauer von größerem oder etwa gleichem Pegel wie der zweite Teilton, der extrem lange nachklingt.

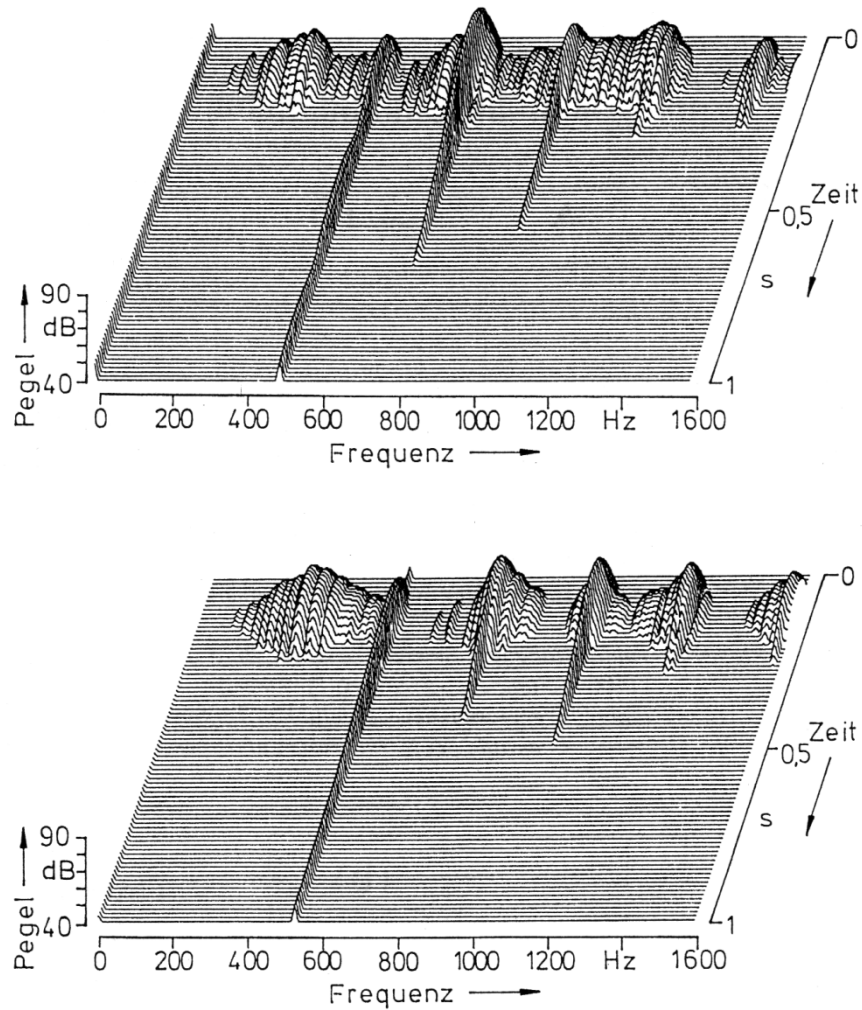


Fig. 26. Schallpegel-Frequenz-Zeit-Diagramm des Tabla-Klages *na*, gespielt von
oben: Parvinder Bharat bzw.
unten: Harpit Sahota.

5.2. Tabla-Klang *tun*

Der Spieler schlägt die *Tabla* „offen“ mit dem Zeigefinger bei einem Drittel der Strecke zwischen Mitte und Rand an. Bei beiden Spielern weist die Zeitfunktion ein langes Nachschwingen und eine ausgeprägte, relativ tieffrequente Oszillation auf. Das Spektrum der Teiltöne folgt aus den Abbildungen darunter sowie aus der jeweils dazu gehörenden Liste.

5.2.1. *tun*, gespielt von Parvinder Bharat

Fig. 27 gibt die Resultate von Analysen der Aufnahmen von Parvinder Bharat wieder, der einen isolierten *tun*-Klang gespielt hat. Wie bereits erkennbar geworden ist, hat er seine *Tabla* für die Tonaufnahmen etwa einen Ganzton höher gestimmt als für die Schwingungsmessungen mit dem Vibrometer.

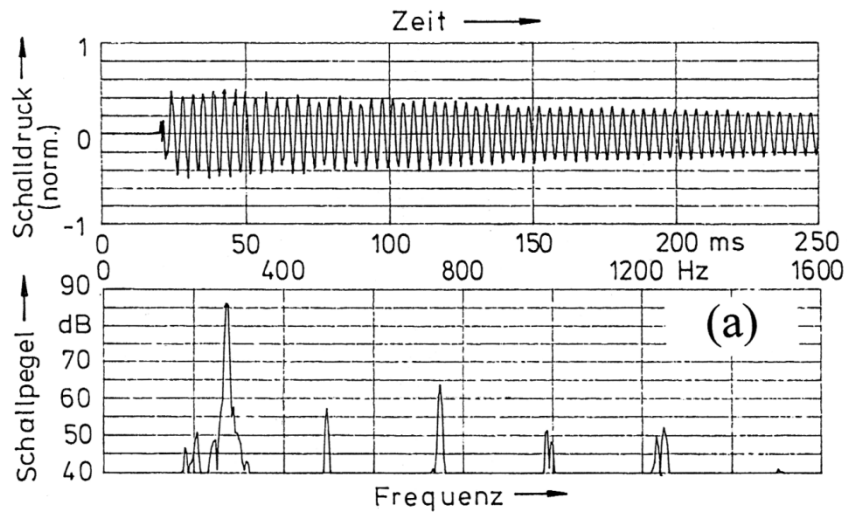
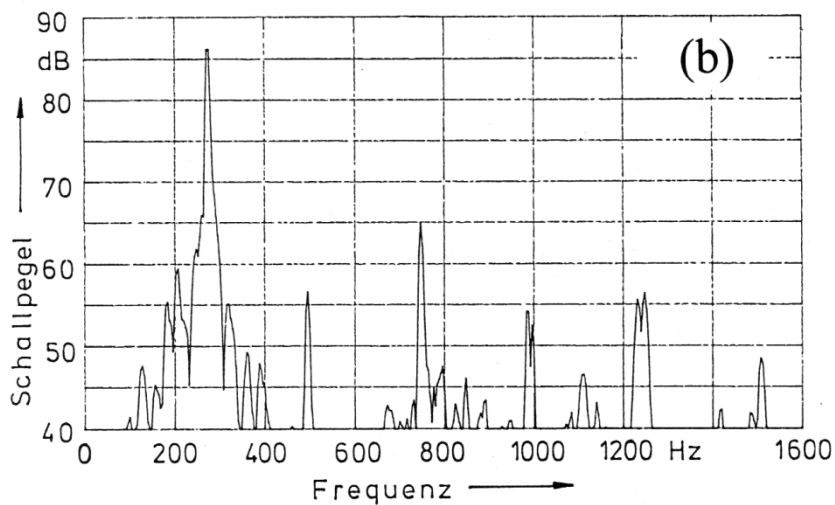


Fig. 27 a. *Tabla-Klang tun*, Spieler Parvinder Bharat.
 Oben: Schalldruck-Zeitfunktion;
 unten: zugehöriges Schallpegel-Frequenz-Spektrum.

Fig. 27 b. *Tabla-Klang tun*, Spieler Parvinder Bharat.
 Links: Schallpegel-Frequenz-Spektrum;
 rechts: Frequenzen der wesentlichen Teiltöne sowie
 Intervalle bei Normierung auf den ersten Teilton.



Frequenz	Intervall
272 Hz	1,00
496 Hz	1,82
748 Hz	2,75
984 Hz	3,62
1248 Hz	4,59
1508 Hz	5,54

5.2.2. *tun*, gespielt von Harpit Sahota

Fig. 28 spiegelt gleichartige Klänge wider, wie sie der andere Spieler erzeugt hat. Harpit Sahota hat den Klang *tun* dreimal in rascher Folge gespielt. Wiederum zeigt sich, dass seine *Tabla* um etwas mehr als einen Halbton höher gestimmt ist als das Instrument von Parvinder Bharat. Die Frequenzliste in Fig. 28 b lässt erkennen, dass die Intervalle der Teiltöne nahezu dieselben sind wie beim ersten Spieler (Fig. 27 b). Beide wählen die Stelle und Art des Anschlags so, dass der Pegel des ersten Teiltones (Frequenz 272 Hz bzw. 288 Hz) um etwa 20 dB bis 35 dB höher ist als diejenigen der übrigen Teiltöne. Da der tiefste Teilton mit Abstand auch der stärkste ist, ordnet man dem Klang *tun* eine Tonhöhe zu, die im unteren Bereich der vierten Oktave angesiedelt ist. Bezüglich dieses Grundtones bilden die übrigen Teiltöne eine schwach harmonische Reihe.

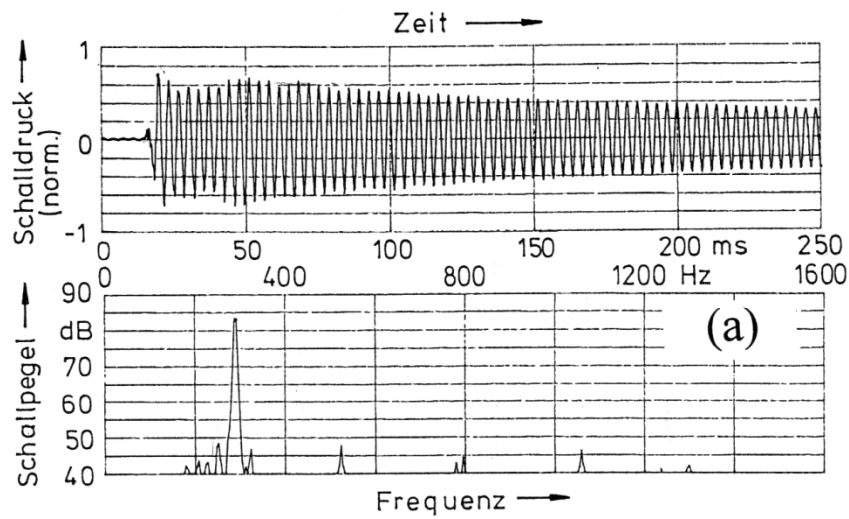
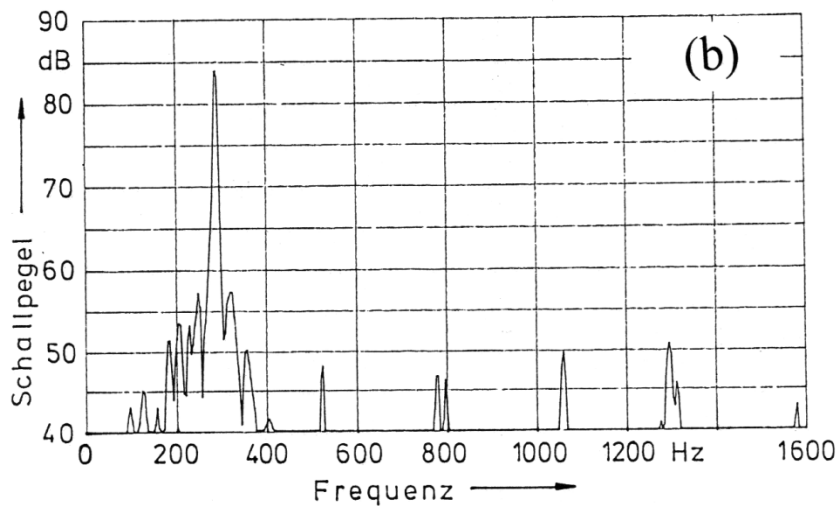


Fig. 28 a. Tabla-Klang *tun*, Spieler Harpit Sahota.
 Oben: Schalldruck-Zeitfunktion;
 unten: zugehöriges Schallpegel-Frequenz-Spektrum.

Fig. 28 b. Tabla-Klang *tun*, Spieler Harpit Sahota.
 Links: Schallpegel-Frequenz-Spektrum;
 rechts: Frequenzen der wesentlichen Teiltöne sowie
 Intervalle bei Normierung auf den ersten Teilton.



Frequenz	Intervall
288 Hz	1,00
524 Hz	1,82
796 Hz	2,76
1060 Hz	3,68
1296 Hz	4,50
1580 Hz	5,49

5.2.3. Wasserfall-Diagramme

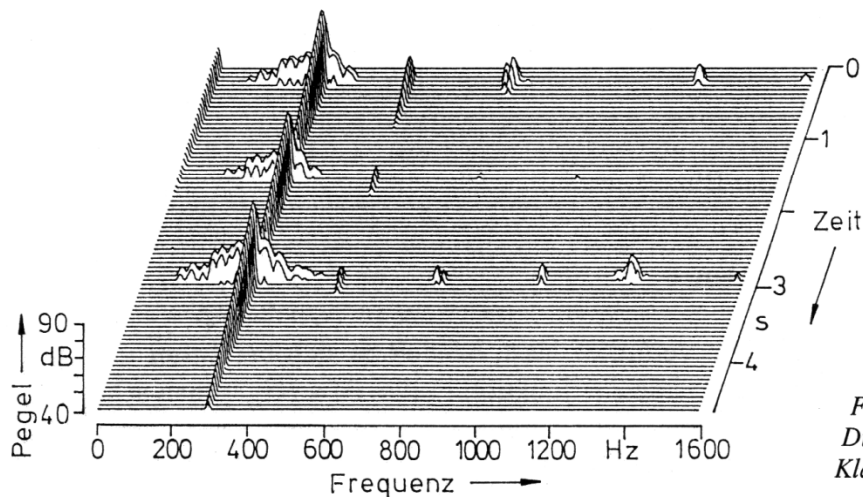


Fig. 29. Schallpegel-Frequenz-Zeit-Diagramm einer Folge von drei *tun*-Klängen, gespielt von Harpit Sahota.

Um den Gesamtverlauf des Schallsignals besser erkennbar zu machen, sind wiederum dreidimensionale Schalldruck-Frequenz-Zeit-Darstellung angefügt. Fig. 29 ermöglicht zu beurteilen, in welchem Maße gleichartige Anschläge übereinstimmen. Harpit Sahota ruft mit seinem *tun*-Schlag praktisch ausschließlich den ersten Teilton hervor. Beim Vergleich der beiden Diagramme in Fig. 30 erkennt man, dass Parvinder Bharats Anschlag (Fig. 30 oben) die höherfrequenten Teiltöne etwas stärker hervorruft als der Anschlag von Harpit Sahota.

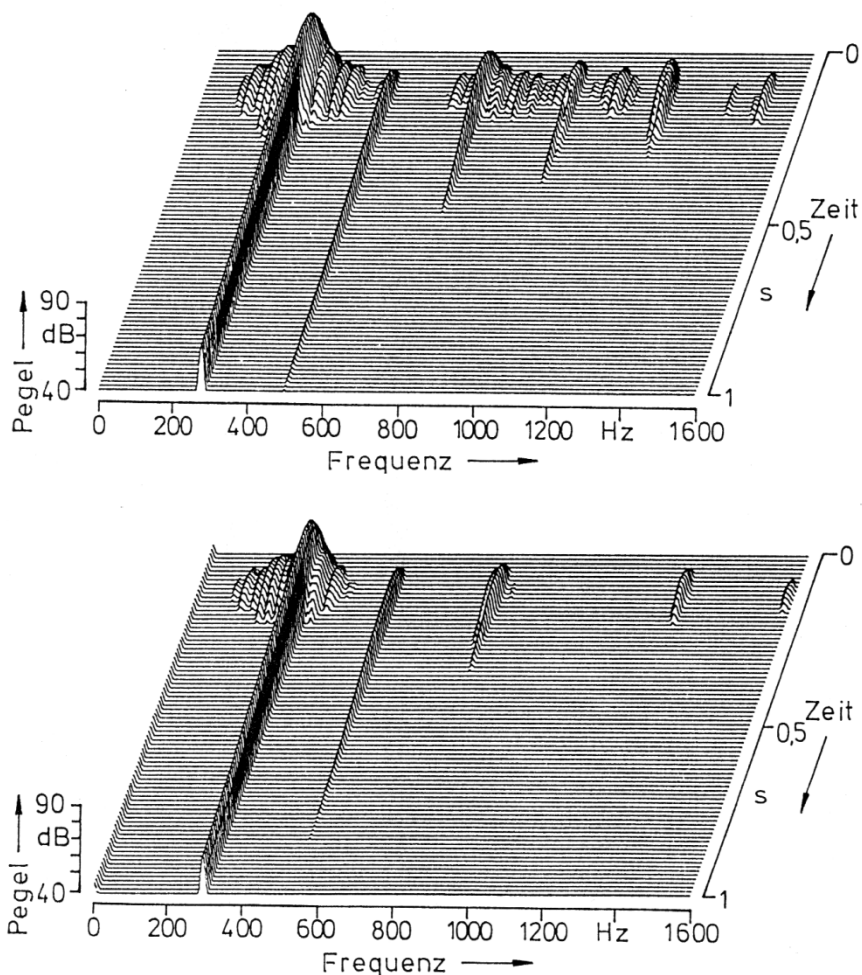


Fig. 30. Schallpegel-Frequenz-Zeit-Diagramm des Tabla-Klances *tun*, gespielt von
oben: Parvinder Bharat bzw.
unten: Harpit Sahota.

5.3. Tabla-Klang *kalan*

Dieser Klang wurde nur von Parvinder Bharat gespielt.

5.3.1. Zeitfunktion und Spektrum

Wie die zweisilbige Bezeichnung schon vermuten lässt, handelt es sich bei *kalan* um einen Mehrfach-Schlag mit tonalem Nachklang. Die Zeitfunktion in Fig. 31 a zeigt einen schwächeren Vor-Schlag sowie nach etwa 150 ms einen stärkeren Nach-Schlag, der perkussiv ist, aber auch tonale Anteile aufweist und exponentiell ausklingt.

Den spektralen Gehalt ersieht man aus der Abbildung darunter. Fig. 31 b gibt die Ergebnisse der Analysen der Aufnahmen eines isolierten *kalan*-Klanges samt einer Liste der Spektralkomponenten wieder. Auch hier sei wiederum darauf hingewiesen, dass die *Tabla* für die Tonaufnahmen etwa einen Ganzton höher gestimmt ist als für die Vibrometer-Messungen.

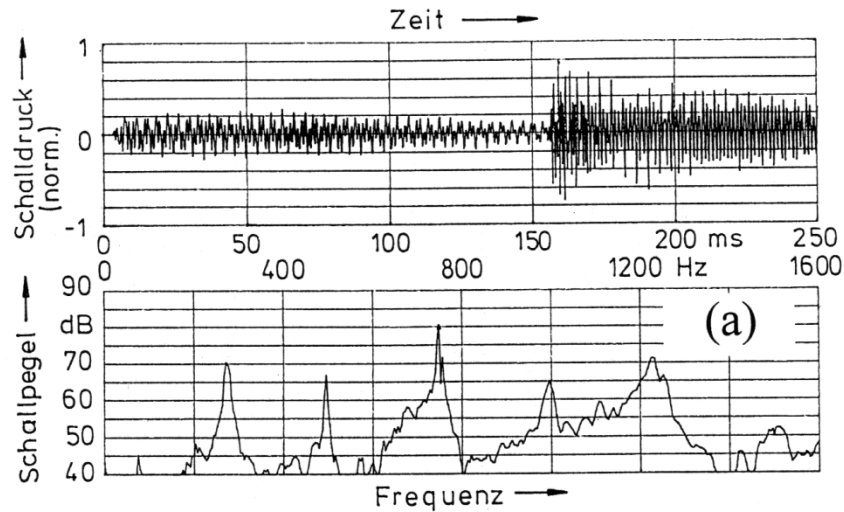
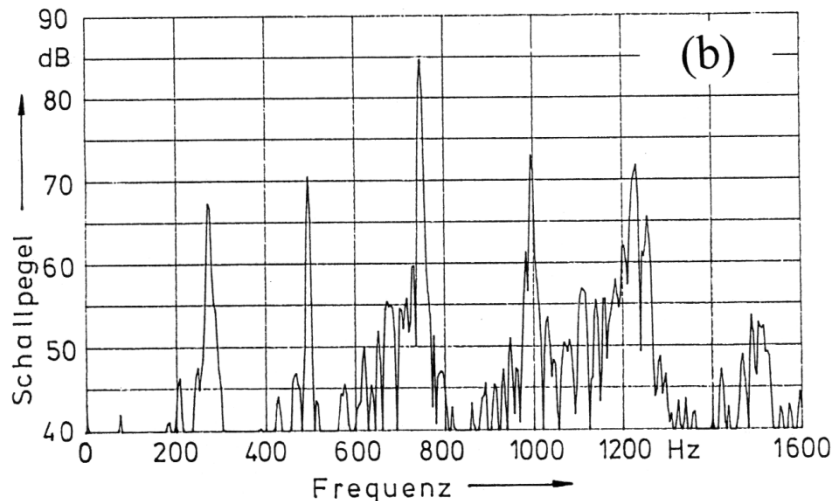


Fig. 31 a. *Tabla*-Klang *kalan*, Spieler Parvinder Bharat.
Oben: Schalldruck-Zeitfunktion;
unten: zugehöriges Schallpegel-Frequenz-Spektrum.

Fig. 31 b. *Tabla*-Klang *kalan*, Spieler Parvinder Bharat.
Links: Schallpegel-Frequenz-Spektrum;
rechts: Frequenzen der wesentlichen Teiltöne sowie
Intervalle bei Normierung auf den dritten Teilton.



Frequenz	Intervall
272 Hz	0,36
496 Hz	0,66
748 Hz	1,00
996 Hz	1,33
1232 Hz	1,65
1488 Hz	1,99

Bei *kalan* handelt es sich um einen Kombinations-Klang (weitere Kombinationsklänge in den Abschnitten 6.1 und 6.2), bei dem auf der *Tabla* zuerst ein *tun* und kurz darauf ein *na* gespielt werden. Offenbar zeitgleich mit dem zweiten *Tabla*-Schlag schlägt der Spieler mit der flachen linken Hand die *Bayan* an, was den perkussivem Anteil liefert. Im ausklingenden, tonalen Teil ist der Pegel des dritten Teiltönes (Frequenz 748 Hz) um über 10 dB höher ist als diejenigen der übrigen Teiltöne. Insofern hat der Klang *kalan* den Charakter eines Klanges *na* (Abschnitt 5.1) mit zusätzlichem Grundton, der vom kurz zuvor gespielten *tun* (Abschnitt 5.2) stammt.

5.3.2. Wasserfall-Diagramm

Der Gesamtverlauf des Schallsignals, das aus mehreren Anteilen besteht, kann gut in der dreidimensionalen Schalldruck-Frequenz-Zeit-Darstellung beurteilt werden. Fig. 32 lässt den Vor-Schlag erkennen, dessen spektraler Gehalt hinsichtlich der Frequenzen dem des zweiten Teiles ähnelt. In beiden Anteilen tritt der dritte Teilton sehr stark auf und besitzt eine geraume Zeit lang einen größeren oder etwa gleichen Pegel wie der zweite Teilton, der – ebenso wie der erste Teilton - deutlich länger als die dargestellte Sekunde nachklingt.

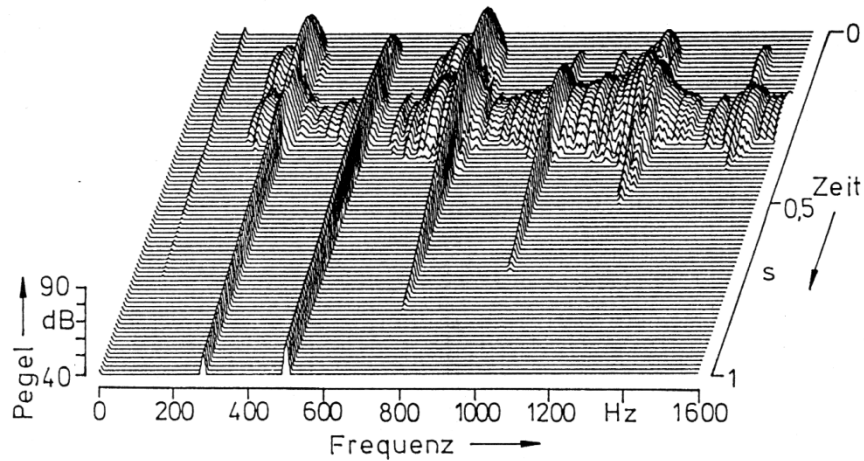


Fig. 32. Schallpegel-Frequenz-Zeit-Diagramm des Tabla-Klanges *kalan*, gespielt von Parvinder Bharat.

5.4. Tabla-Klang *tik*

Dieser Klang wurde von Harpit Sahota gespielt.

5.4.1. Zeitfunktion und Spektrum

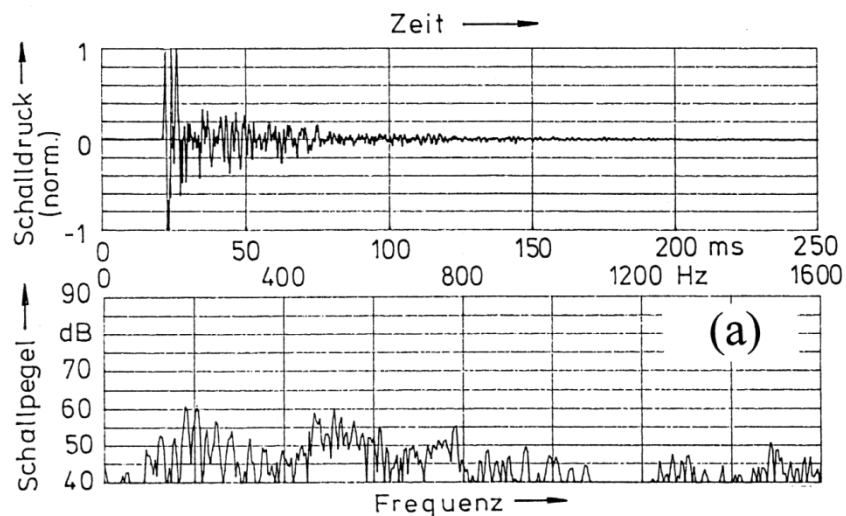


Fig. 33 a. Tabla-Klang *tik*, Spieler Harpit Sahota.
Oben: Schalldruck-Zeitfunktion;
unten: zugehöriges Schallpegel-Frequenz-Spektrum.

Wie die kurze Silbe **tik** vermuten lässt, handelt es sich beim Klang um ein rein perkussives, schmatzendes Geräusch ohne Nachklang. Dieses Schallsignal entspricht am ehesten dem, was von einer Handtrommel zu erwarten ist. Die Zeitfunktion von Fig. 33 a zeigt ein kurzes Signal von etwa 100 ms Dauer. Im zugehörigen Spektrum, das darunter angeordnet ist, sind keine diskreten Linien zu erkennen. Dieses und das weitere Spektrum (Fig. 33 b), das sich auf einen etwas späteren Zeitpunkt bezieht, erscheint vielmehr „verschmiert“. Auf die Extraktion spektraler Maxima wurde deshalb verzichtet.

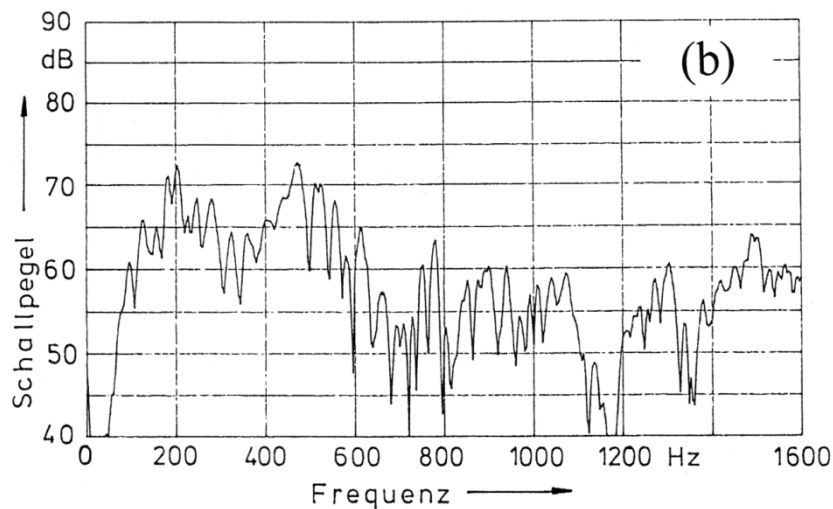


Fig. 33 b. Schallpegel-Frequenz-Spektrum des Tabla-Klanges **tik**, Spieler Harpit Sahota.

5.4.2. Wasserfall-Diagramme

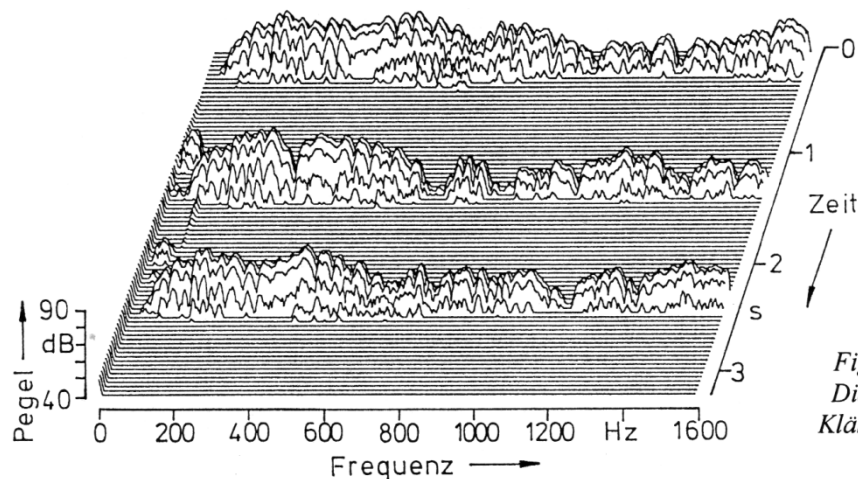


Fig. 34. Schallpegel-Frequenz-Zeit-Diagramm einer Folge von drei **tik**-Klängen, gespielt von Harpit Sahota.

Der Gesamtverlauf des Schallsignals lässt sich an Hand der dreidimensionalen Schalldruck-Frequenz-Zeit-Darstellungen beurteilen. Fig. 34 zeigt drei **tik**-Klänge, von Harpit Sahota im Abstand von etwas mehr als einer Sekunde gespielt. Der Vergleich gibt einen Eindruck davon, in welchem Maße solche gleichartigen Anschläge übereinstimmen bzw. differieren. Fig. 35 zeigt den dritten Anschlag noch einmal über einer Zeitachse, die nun auf die Länge von einer Sekunde gespreizt ist. Es wird deutlich, dass das betrachtete Schallsignal rein perkussiv ist, d.h. sich in der Zeit sehr kurz und im Spektrum sehr breit darstellt.

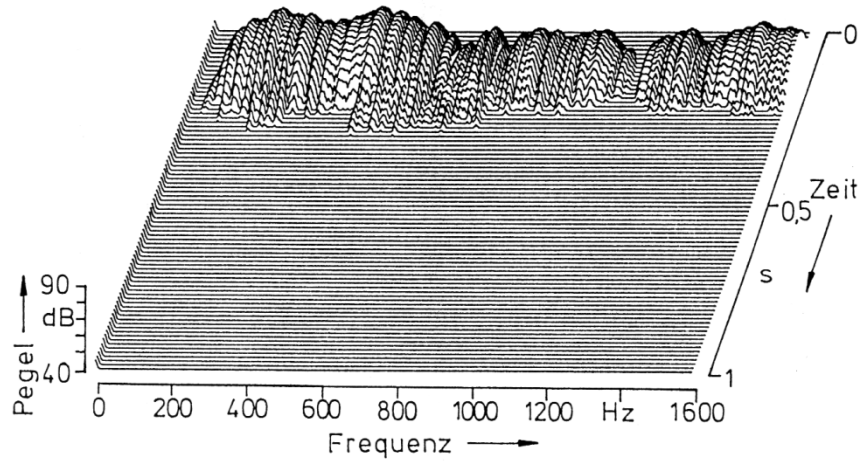


Fig. 35. Schallpegel-Frequenz-Zeit-Diagramm des Tabla-Klanges *tik*, gespielt von Harpit Sahota.

5.5. Tabla-Klang *tit*

Dieser Klang wurde von Parvinder Bharat gespielt.

5.5.1. Zeitfunktion und Spektrum

Wie die lautmalerische Bezeichnung (manchmal auch als *ti-te* geschrieben) vermuten lässt, handelt es sich bei diesem Klang um einen perkussiven Klang (gespielt mit dem Zeigefinger) und einen kurzen Vor-Schlag, den der Mittelfinger erzeugt. Die Zeitfunktion zeigt den einen der beiden Schläge. Dessen Gesamtdauer beträgt etwa 100 ms.

Beide Anteile dieses Klanges sind ähnlich und rein perkussiv. Das Spektrum in Fig. 36 a bezieht sich direkt auf die darüber abgebildete Zeitfunktion des zweiten Teils. Dagegen gilt Fig. 36 b für einen anderen Zeitpunkt, zu dem ein größerer Teil der Zeitfunktion vom Hanning-Analysefenster unbeschnitten verbleibt. Ungeachtet kleiner Unterschiede im Detail erweisen sich beide Spektren als „verschmiert“. Tonale Komponenten sind nicht auszumachen.

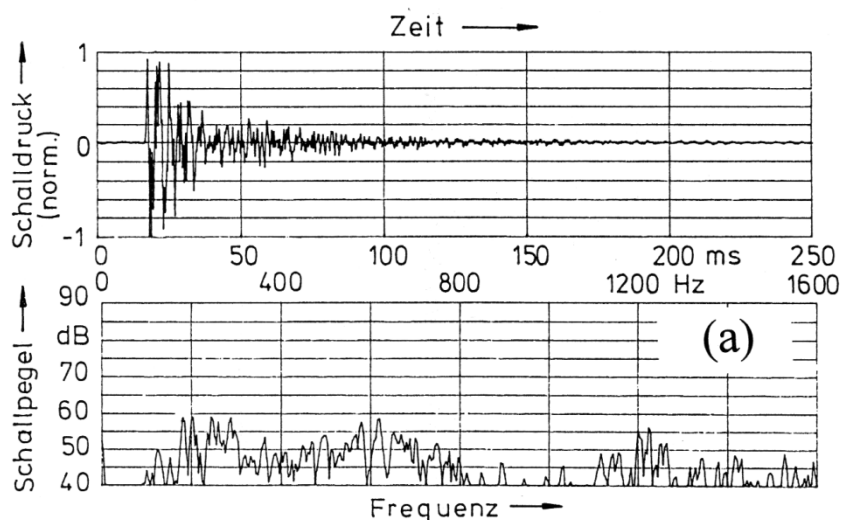


Fig. 36 a. Tabla-Klang *tit*, Spieler Parvinder Bharat.
Oben: Schalldruck-Zeitfunktion;
unten: zugehöriges Schallpegel-Frequenz-Spektrum.

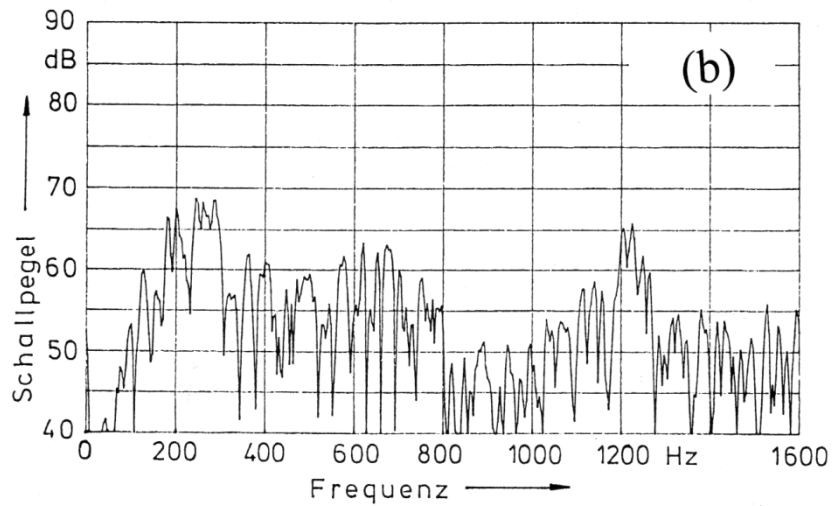


Fig. 36 b. Schallpegel-Frequenz-Spektrum des Tabla-Klanges *tit*, Spieler Parvinder Bharat.

5.5.2. Wasserfall-Diagramme

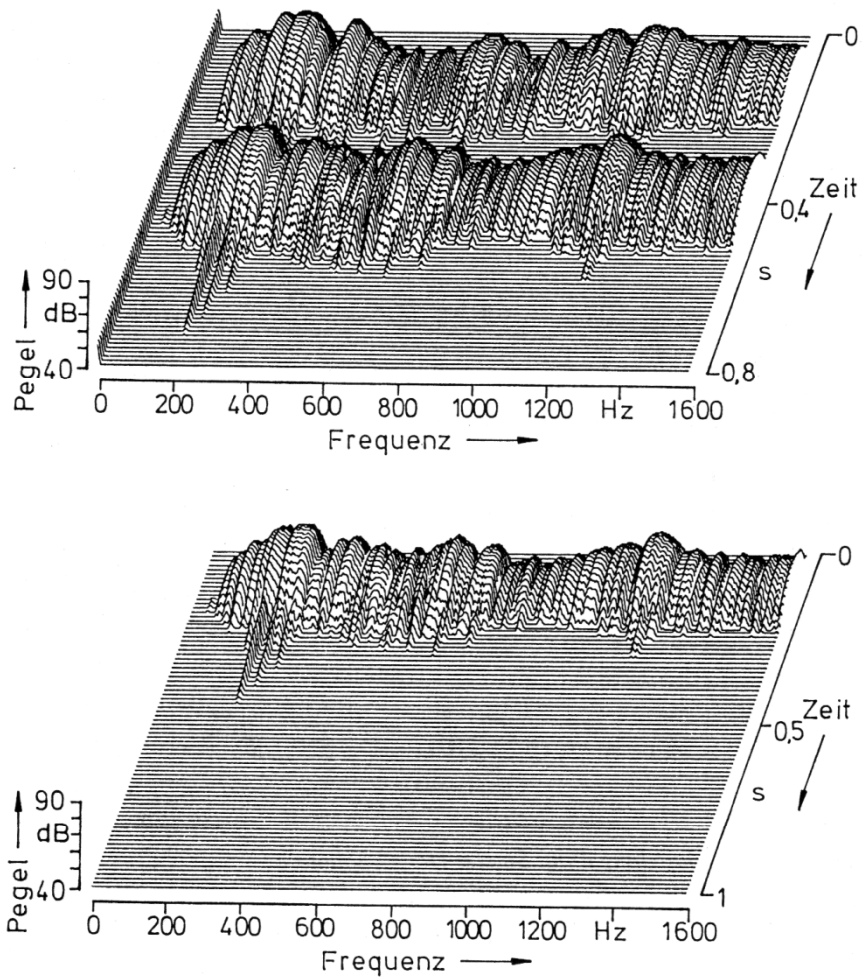


Fig. 37. Schallpegel-Frequenz-Zeit-Diagramm des Tabla-Klanges *tit*, gespielt von Parvinder Bharat.
 Oben: Gesamt-Klang,
 unten: zweiter Teil, dessen Frequenzen analysiert wurden.

Die dreidimensionale Schalldruck-Frequenz-Zeit-Darstellung von Fig. 37 zeigt den Klang *tīt* auf zweierlei Arten und auf zwei leicht unterschiedlichen Zeitskalen. Im oberen Diagramm ist der aus zwei einzelnen Schlägen (zuerst mit dem Mittelfinger und dann mit dem Zeigefinger) bestehende Gesamtklang über eine Zeitdauer von 0,8 s dargestellt. Das untere Diagramm gibt ausschließlich den zweiten der beiden Schläge (Zeigefinger) über die Dauer von 1 s wieder. Da die Frequenzbandbreite klein und damit die Zeitauflösung grob ist, ist die Darstellung in beiden Richtungen „verschmiert“. Erkennbar bleibt aber immerhin die Zweiteilung des Schallsignals und dass die Teile kurz und breitbandig, d.h. perkussiv, sind. Im Ausklingen des zweiten Schlages zeigen sich schwache tonale Anteile bei etwas mehr als 200 Hz.

5.6. *Tabla*-Klang *dhin*

Dieser Klang wurde von Harpit Sahota gespielt.

5.6.1. Zeitfunktion und Spektrum

Beim vorliegenden Schallsignal handelt es sich um einen kurzen, trockenen, rein perkussiven Schlag. Dieser kann auch in Kombination mit einem Klang verwendet werden, der auf der *Bayan* erzeugt wird; vgl. Abschnitt 6.1. Das obere Bild in Fig. 38 a zeigt das Oszillogramm des Schallsignals, dessen Gesamtdauer etwa 100 ms beträgt. Wie bei sämtlichen betrachteten Schallen bezieht sich das Spektrum in Fig. 38 a unmittelbar auf die darüber abgebildete Zeitfunktion. Das Spektrum in Fig. 38 b gilt für einen anderen Zeitpunkt. Die beiden Spektren erweisen sich im Wesentlichen als „verschmiert“, jedoch zeichnen sich einige schmalbandige Komponenten ab. Ein Vergleich der Frequenzen in Fig. 38 b mit denen in Fig. 24 b (*na*) oder 28 b (*tun*) bestätigt die Erwartung, dass es sich dabei um die Eigenfrequenzen des *Tabla*-Felles handelt.

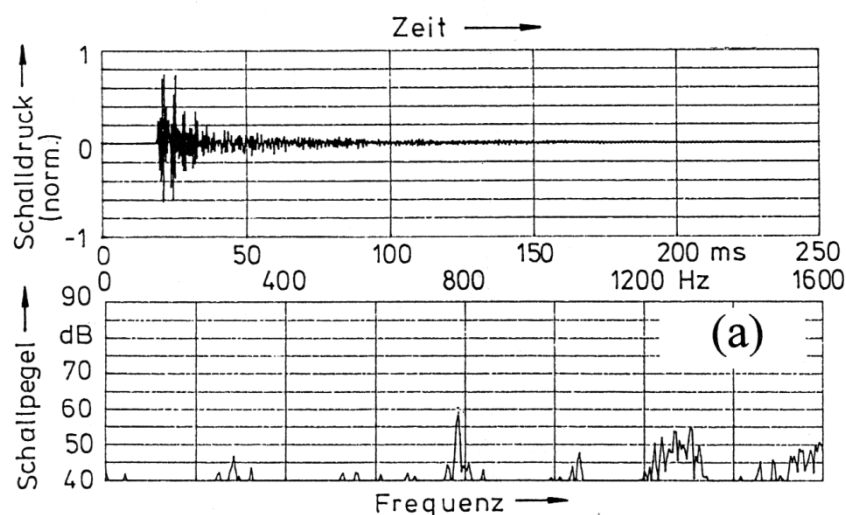


Fig. 38 a. *Tabla*-Klang *dhin*, Spieler Harpit Sahota.
 Oben: Schalldruck-Zeitfunktion;
 unten: zugehöriges Schallpegel-Frequenz-Spektrum.

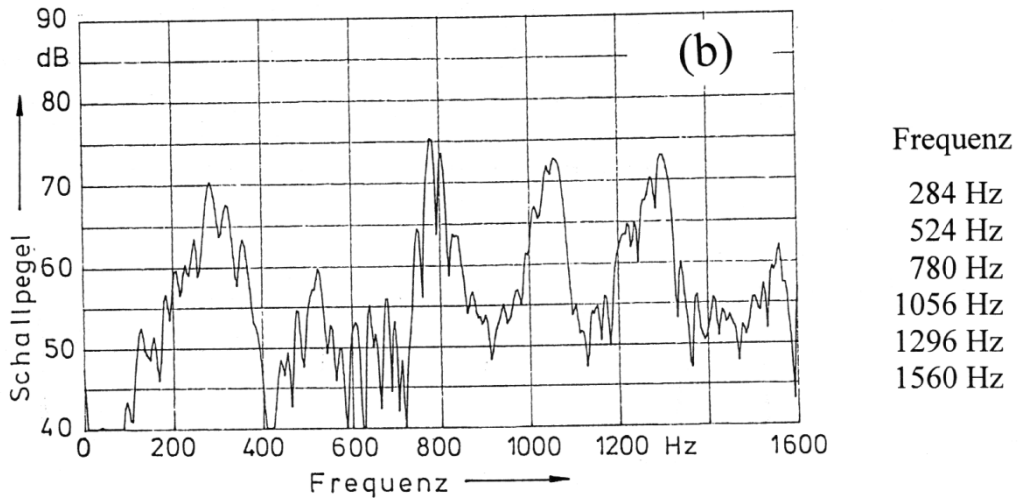


Fig. 38 b. *Tabla-Klang dhin*, Spieler Harpit Sahota.
Links: Schallpegel-Frequenz-Spektrum;
rechts: Frequenzen der wesentlichen tonalen Komponenten.

5.6.2. Wasserfall-Diagramme

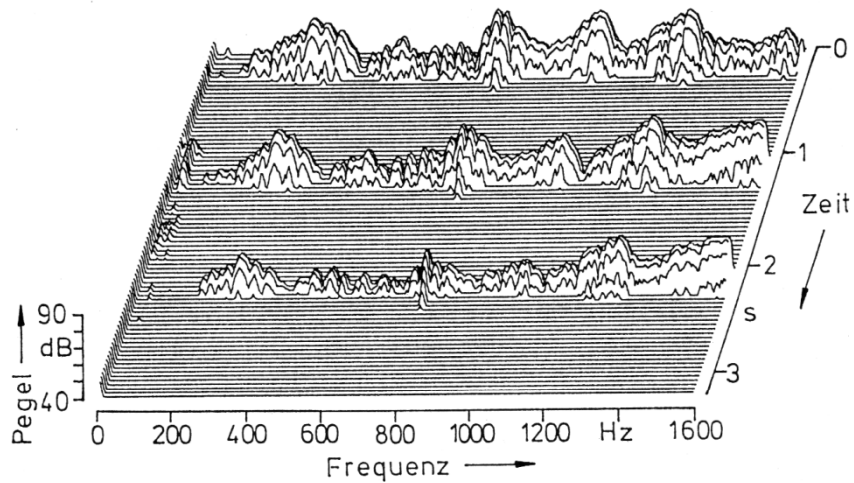


Fig. 39. Schallpegel-Frequenz-Zeit-Diagramm einer Folge von drei *dhin*-Klängen, gespielt von Harpit Sahota.

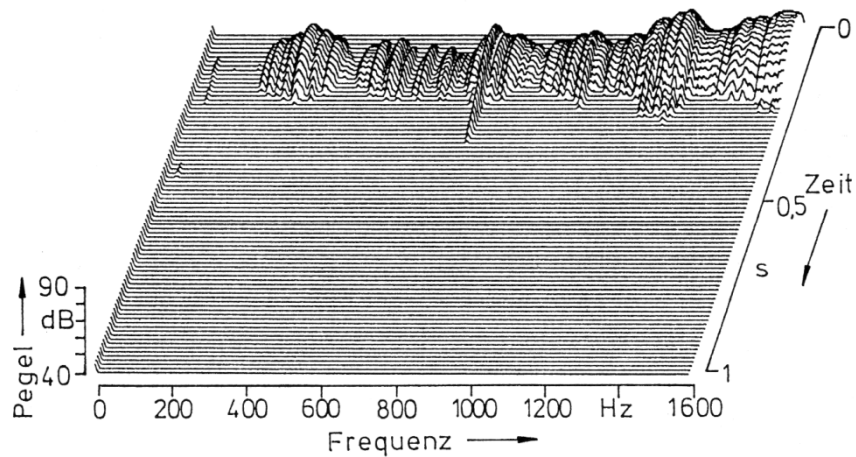


Fig. 40. Schallpegel-Frequenz-Zeit-Diagramm des *Tabla-Klanges dhin*, gespielt von Harpit Sahota.

In dreidimensionaler Schalldruck-Frequenz-Zeit-Darstellung zeigt Fig. 39 drei Anschläge, die im Abstand von etwa einer Sekunde aufeinander folgen. Fig. 40 gibt den letzten *dhin*-Klang auf gedehnter Zeitachse noch einmal wieder. Das Spektrum ist breit ist und geht über die dargestellten 1,6 kHz hinaus. Es ist zu erkennen, dass sich die Schallenergie bei einigen Frequenzen konzentriert, in denen sich offenbar die Eigenmoden des Felles widerspiegeln.

5.7. *Tabla*-Klang *dhit*

Dieser Klang wurde von Harpit Sahota gespielt.

5.7.1. Zeitfunktion und Spektrum

Der Klang besteht aus einer Vierfach-Folge von kurzen, rein perkussiven Schallen. Die Zeitfunktion in Fig. 41 a zeigt einen Ausschnitt, der zwei Einzelschalle umfasst. Die Dauer eines

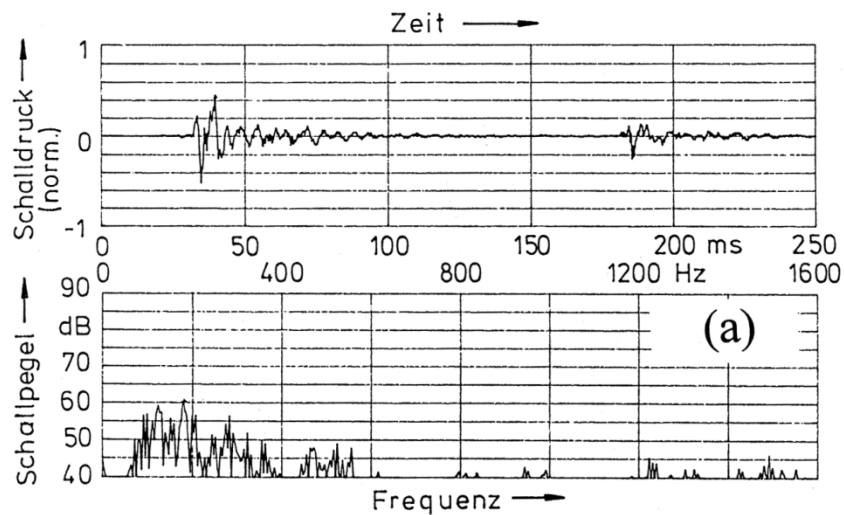
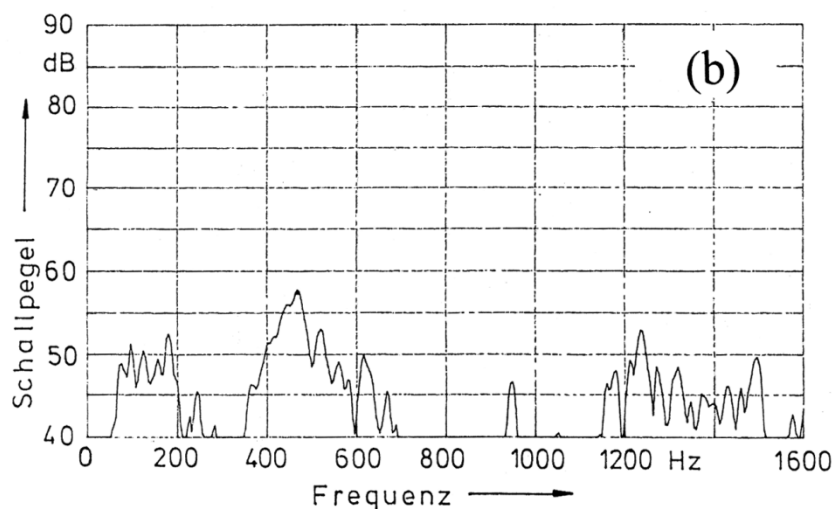


Fig. 41 a. *Tabla*-Klang *dhit*, Spieler Harpit Sahota.
Oben: Schalldruck-Zeitfunktion;
unten: zugehöriges Schallpegel-Frequenz-Spektrum.

Fig. 41 b. Schallpegel-Frequenz-Spektrum des *Tabla*-Klanges *dhit*, Spieler Harpit Sahota.



Einzelschalles beträgt etwa 50 ms, der Abstand ca. 150 ms. Das Spektrum in Fig. 41 a ist direkt der darüber abgebildeten Zeitfunktion zugeordnet, wohingegen sich das Spektrum in Fig. 41 b auf einen anderen Zeitpunkt bezieht. Beide Spektren erweisen sich im Wesentlichen als „verschmiert“, jedoch zeichnen sich einige schmalbandige Komponenten ab. Dabei handelt es sich um andere Frequenzen als diejenigen, welche in Fig. 24 b oder 28 b zusammen gestellt sind, also nicht um die Frequenzen des frei schwingenden Felles.

5.7.2. Wasserfall-Diagramm

Das Schalldruck-Frequenz-Zeit-Diagramm in Fig. 42 gibt einen der drei Vierfach-Schläge wieder. Der Vierfach-Schlag dauert insgesamt deutlich weniger als eine Sekunde. Beim *dhit*-Klang sind tieffrequente Anteile stärker ausgeprägt als solche mit hohen Frequenzen. Möglicherweise ist dies der Grund für die schmatzende Klangfarbe, wie sie ähnlich auch bei *tik* wahrgenommen wird.

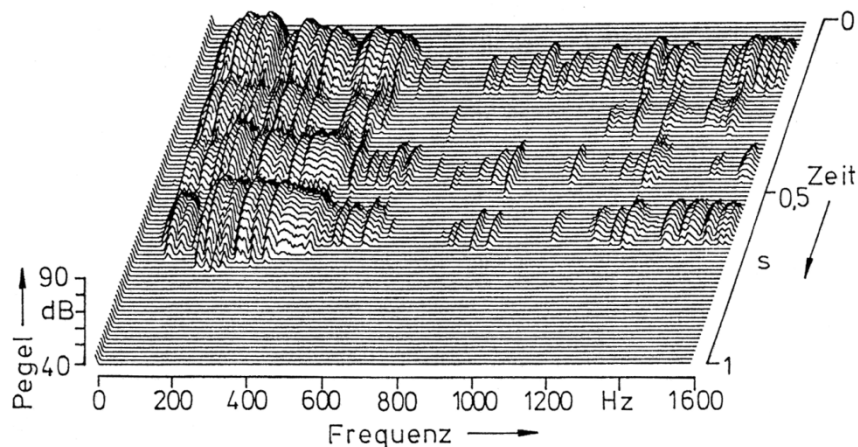


Fig.42. Schallpegel-Frequenz-Zeit-Diagramm des Tabla-Klanges *dhit*, gespielt von Harpit Sahota.

5.8. Tabla-Klang *dhir-dhir*

Dieser Klang wurde von Harpit Sahota gespielt.

5.8.1. Zeitfunktion und Spektrum

Hierbei handelt es sich um einen kurzen, schmatzenden, perkussiven Schall. Dieser Klang wird auch in Kombination mit einem Nach-Schlag verwendet, der mit der *Bayan* erzeugt wird; vgl. Abschnitt 6.2. Fig. 43 a gibt die Zeitfunktion wieder. Die Dauer des Schallsignals beträgt etwa 100 ms. Wie auch bei den übrigen Klängen gehört dazu das unmittelbar darunter abgebildete Spektrum. Dagegen gilt das in Fig. 44 b abgebildete für einen späteren Zeitpunkt. Beide Spektren sind „verschmiert“. Die Maxima liegen nicht bei den Frequenzen, mit denen das *Tabla*-Fell gemäß Fig. 24 b oder 28 b unbelastet schwingt.

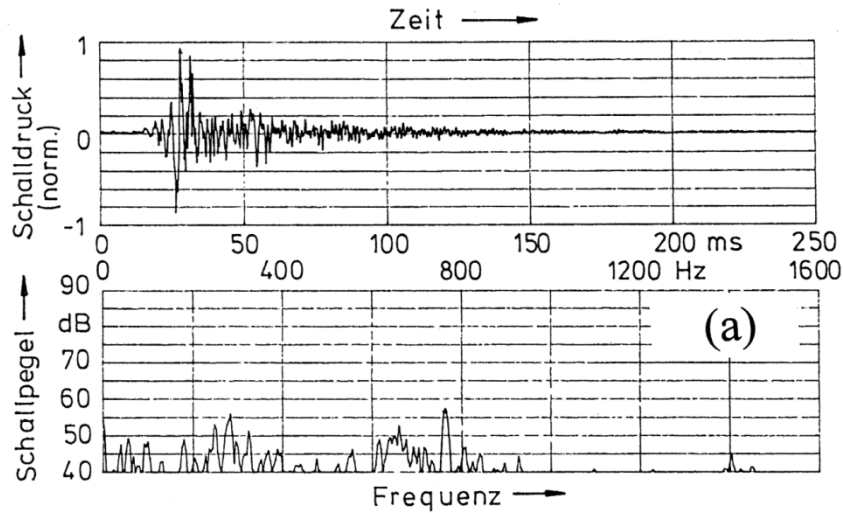


Fig. 43 a. *Tabla-Klang **dhir-dhir**, Spieler Harpit Sahota.*
 Oben: Schalldruck-Zeitfunktion;
 unten: zugehöriges Schallpegel-Frequenz-Spektrum.

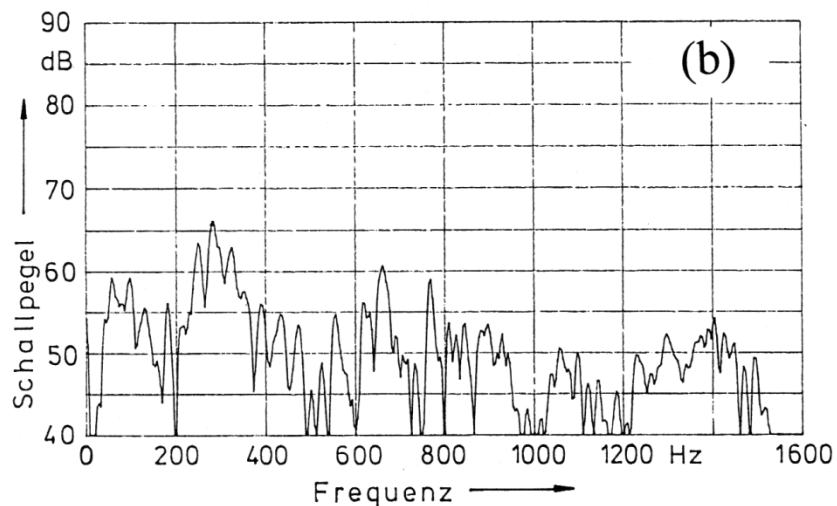


Fig. 43 b. *Schallpegel-Frequenz-Spektrum des Tabla-Klanges **dhir-dhir**, Spieler Harpit Sahota.*

5.8.2. Wasserfall-Diagramme

Fig. 44 repräsentiert in dreidimensionaler Schalldruck-Frequenz-Zeit-Darstellung drei Anschläge, die im Abstand von etwas mehr als einer Sekunde aufeinander folgen. Einer der *dhir-dhir*-Klänge ist isoliert in Fig. 45 auf einer gedehnten Zeitachse wiedergegeben. Offenbar reicht das Spektrum über die dargestellte Bandbreite von 1,6 kHz hinaus. Man erkennt, dass sich die Schallenergie bei bestimmten Frequenzen konzentriert. Die schmatzende Klangfarbe, die der *dhir-dhir*-Klang hervorruft, könnte damit zusammenhängen, dass auch hier die tief-frequenten im Vergleich zu den hochfrequenten Anteilen relativ stark ausgeprägt sind.

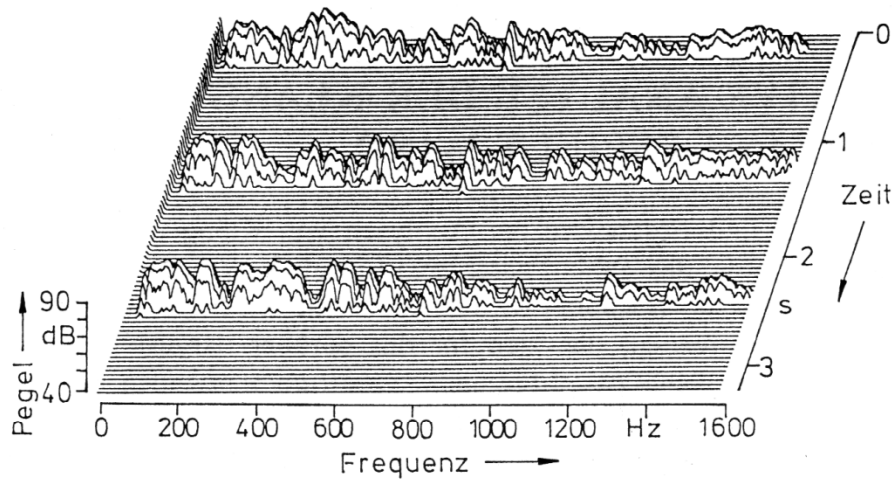


Fig. 44. Schallpegel-Frequenz-Zeit-Diagramm einer Folge von drei *dhir-dhir*-Klängen, gespielt von Harpit Sahota.

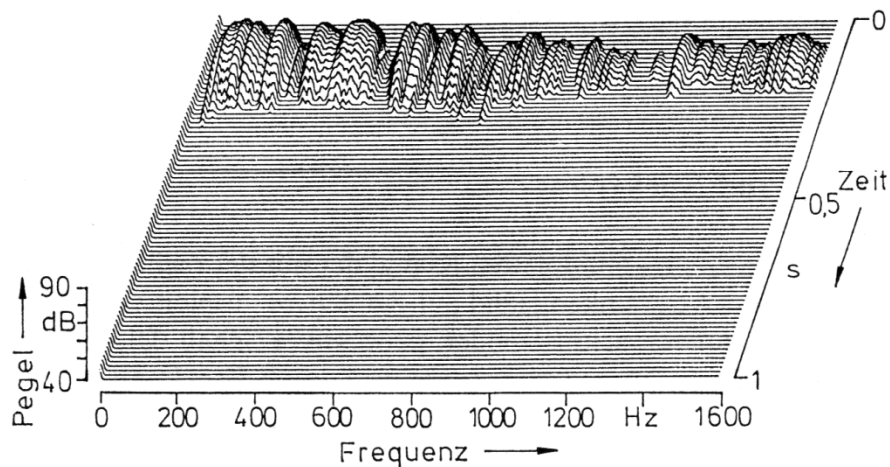


Fig. 45. Schallpegel-Frequenz-Zeit-Diagramm des Tabla-Klanges *dhir-dhir*, gespielt von Harpit Sahota.

5.9. Zusammenfassende Bemerkung

Acht unterschiedliche *Tabla*-Klänge sind hinsichtlich ihrer Zeitfunktionen dargestellt und hinsichtlich ihrer Frequenzspektren analysiert worden. Zwei davon (*na* und *tun*) sind Klänge im musikalischen Sinn und rufen die ausgeprägte Wahrnehmung einer Tonhöhe hervor. Ihre Teiltöne lassen sich Schwingungen des unbelasteten *Tabla*-Felles zuordnen. Für die Zuordnung ist allerdings zu beachten, dass Parvinder Bharats Instrumente bei der Schwingungsmessung tiefer gestimmt waren als bei der Aufnahme der Schallsignale. Die Frequenzen der Teiltöne sind daher um etwa 12% höher als diejenigen der zugehörigen mechanischen Schwingungen. Der Klang *kalan* hat einen perkussiven Anteil, der als Besonderheit von der gleichzeitig gespielten *Bayan* stammt, und einen tonalen Ausklang, der eine Kombination von *na* und *tun* darstellt. Die anderen Schalle (*tik*, *dhin* und *dhir-dhir*) sind rein perkussiv. Mehrfach-Schläge mit perkussivem Charakter sind *tit* (mit Vor-Schlag) sowie *dhit* (ein Vierfach-Schlag). Trotz der abweichenden Stimmungen der Instrumente bei den entsprechenden Messungen sind bereits Beziehungen zwischen Schallkomponenten und Teilschwingungen sichtbar geworden. An Hand ausgewählter Beispiele sollen sie in Kapitel 8 noch näher erläutert und veranschaulicht werden.

6. OBJEKTIVE ANALYSE DER KLÄNGE, BEI DENEN DIE *BAYAN* GESPIELT WIRD

Im folgenden Kapitel sind Ergebnisse der Analysen von Klängen zusammen gestellt, bei denen die größere Trommel des *Tabla*-Paares zum Einsatz kommt und den tonalen Part übernimmt. Wie im vorhergehenden Kapitel wird als erstes die jeweilige Schalldruck-Zeitfunktion mit dem FFT-Spektrum gezeigt, das sich für das darüber dargestellte Zeitfenster ergibt. Ergänzend ist ein weiteres Schallpegel-Frequenz-Spektrum angegeben. Dieses stellt sich ein, wenn die Zeitfunktion so im Analyse-Fenster liegt, dass sich maximale Pegelwerte ergeben. Gegebenenfalls sind Teiltonfrequenzen samt ihren Intervallen angegeben, die mit Hilfe der *List*-Funktion bestimmt worden sind. Um den Ablauf des Schallsignals in seiner Gesamtheit überblicken zu können, sind danach zusätzlich Wasserfall-Diagramme, d.h. dreidimensionale Schalldruck-Frequenz-Spektren über der Zeit dargestellt.

6.1. Kombinations-Klang *dhin*

Spieler ist Parvinder Bharat.

6.1.1. Zeitfunktion und Spektrum

Hierbei handelt es sich um einen kombinierten Klang, der mit der rechten Hand auf der *Tabla* und praktisch gleichzeitig mit der linken Hand auf der *Bayan* gespielt wird. Der *Tabla*-Anteil (vgl. Abschnitt 5.6) ist ein kurzer, schmatzender, perkussiver Schall. Dieser wird durch einen tonalen Klang ergänzt, der auf der *Bayan* entsteht und durch Druck auf deren Fell mit dem Ballen der linken Hand moduliert ist. Fig. 46 a gibt im oberen Diagramm die Zeitfunktion wieder. Wie auch bei den übrigen Klängen gehört dazu das darunter abgebildete Spektrum. Das Spektrum von Fig. 46 b bezieht sich auf einen anderen Zeitpunkt. Während das Spektrum des perkussiven *Tabla*-Anteils „verschmiert“ ist (siehe hierzu auch Fig. 38 a und b), lassen sich

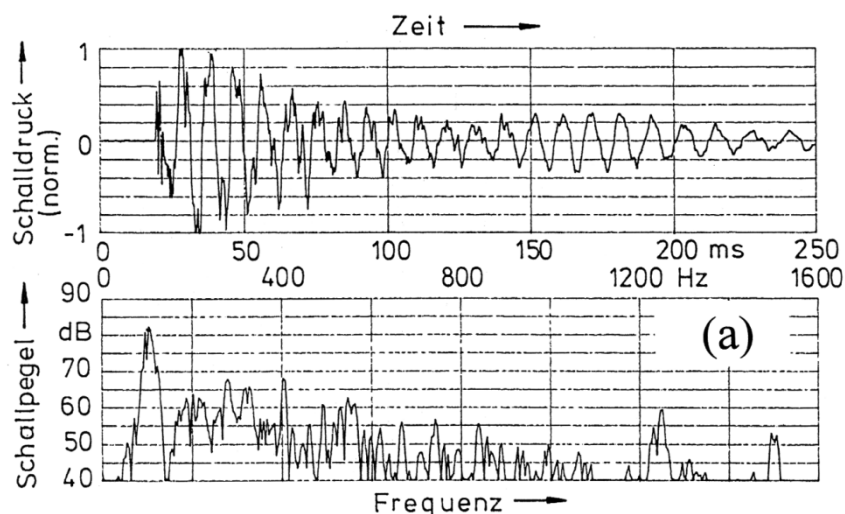
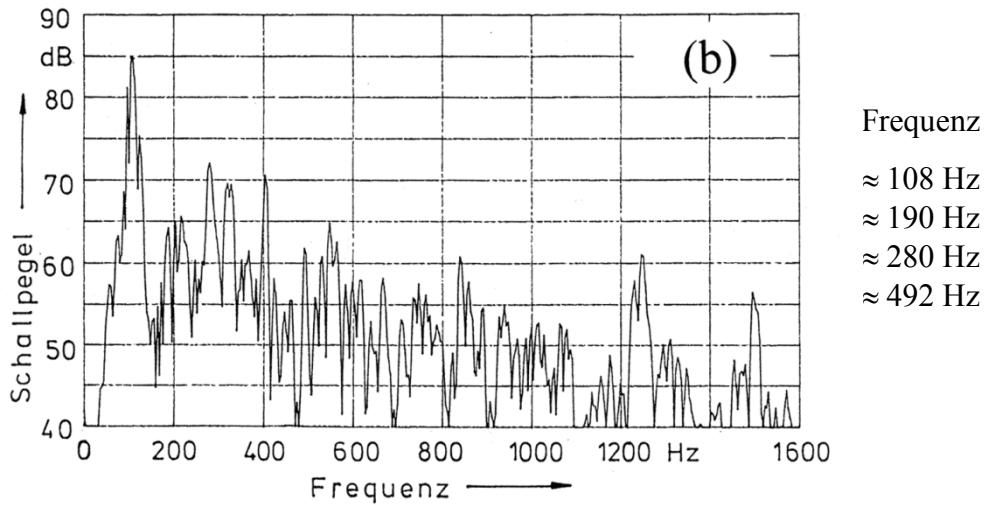


Fig. 46 a. Kombinations-Klang *dhin*, Spieler Parvinder Bharat.
Oben: Schalldruck-Zeitfunktion;
unten: zugehöriges Schallpegel-Frequenz-Spektrum.

Fig. 46 b. Kombinations-Klang *dhin*, Spieler Parvinder Bharat.
 Links: Schallpegel-Frequenz-Spektrum;
 rechts: mittlere Frequenzen der wesentlichen Teiltöne.



im anschließenden *Bayan*-Anteil diskrete Teiltöne ausmachen. Die angegebenen Zahlen stellen Mittelwerte über zeitlich ansteigende Frequenzen dar. Entsprechend der Erwartung liegen sie höher als die Frequenzen, mit denen gemäß Fig. 14 a das *Bayan*-Fell frei schwingt.

6.1.2. Wasserfall-Diagramm

Das Schalldruck-Frequenz-Zeit-Diagramm in Fig. 47 gibt den zeitlichen Verlauf des Kombinationsklages wieder und erlaubt es, tonale Komponenten zu identifizieren. Insgesamt sind zwei Sekunden dargestellt. Der Vor-Schlag auf der *Tabla* ist durch den breitbandigen Anfangsteil gekennzeichnet, der nur sehr kurz andauert. Der daran anschließende *Bayan*-Teil enthält mehrere tonale Komponenten. Der tiefste, stärkste und am längsten anhaltende Teilton hat eine Frequenz von etwa 100 Hz. Diese ist unmittelbar zu Beginn tiefer, steigt aber dadurch an, dass der Spieler das Fell zur Mitte hin niederdrückt. Es kann vermutet werden, dass

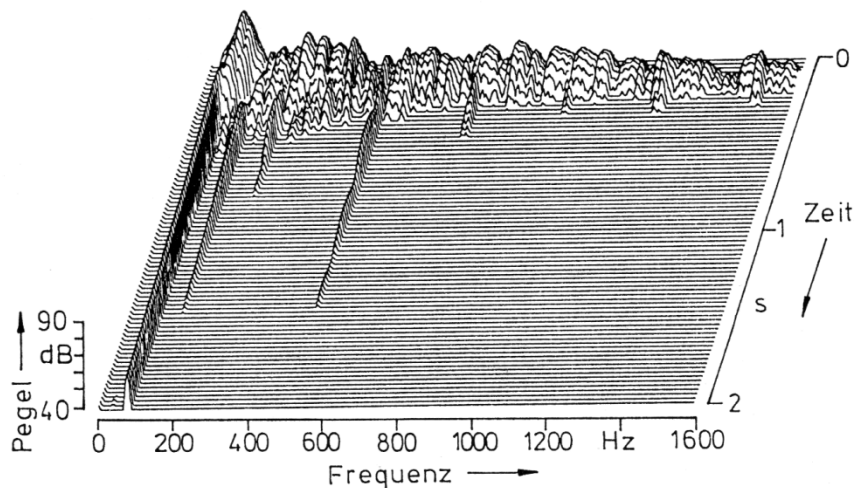


Fig. 47. Schallpegel-Frequenz-Zeit-Diagramm des Kombinations-Klages *dhin*, gespielt von Parvinder Bharat.

die Wahrnehmung einer insgesamt tiefen, mit der Zeit ansteigenden Tonhöhe beim *dhin*-Klang wesentlich durch die erste rotationssymmetrische Teilschwingung des *Bayan*-Felles bestimmt ist. Dabei schwingt das Fell jedoch nicht – wie etwa bei tonalen *Tabla*-Klängen – mit gleichbleibenden Frequenzen. Vielmehr drückt der Spieler es mit dem Handballen nieder und verschiebt den Ballen so, dass die Frequenzen während des Ausschwingens ansteigen. Das führt zu einem ausgeprägten Glissando-Effekt, wie er ähnlich bei der *Talking Drum* auftritt.

6.2. Kombinations-Klang *dhir-dhir*

Spieler ist wiederum Parvinder Bharat.

6.2.1. Zeitfunktion und Spektrum

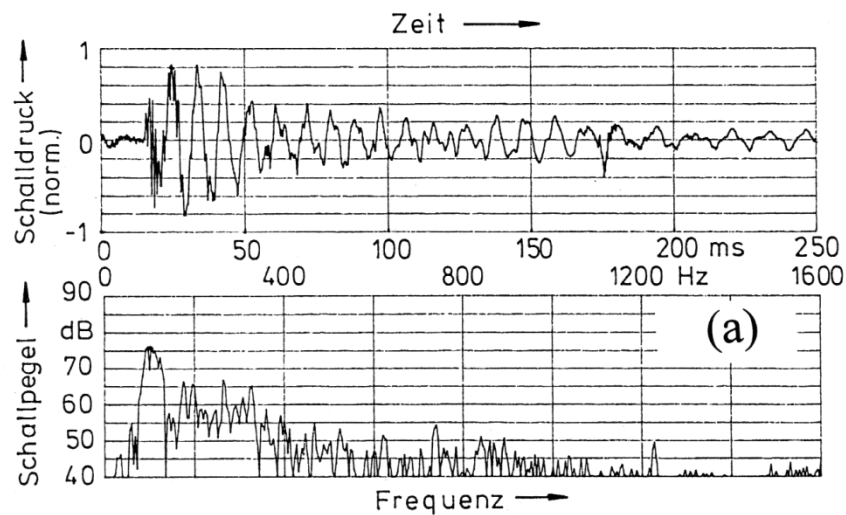
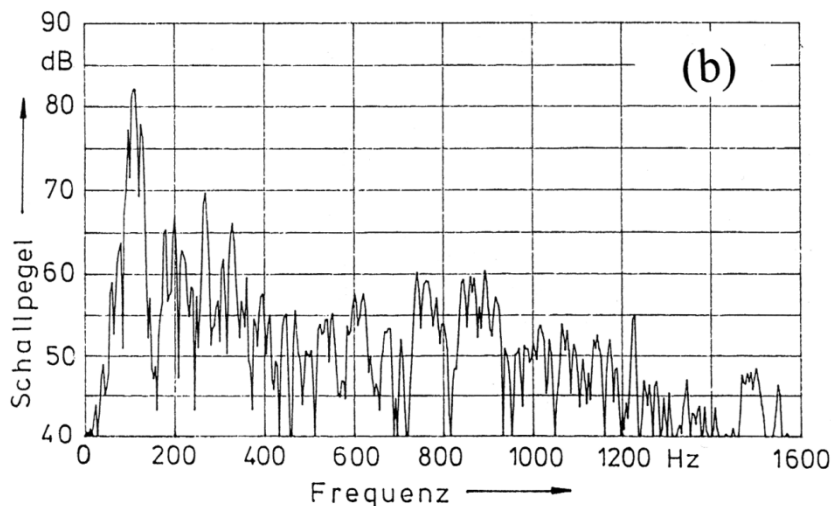


Fig. 48 a. Kombinations-Klang *dhir-dhir*, Spieler Parvinder Bharat.
Oben: Schalldruck-Zeitfunktion;
unten: zugehöriges Schallpegel-Frequenz-Spektrum.

Fig. 48 b. Kombinations-Klang *dhir-dhir*, Spieler Parvinder Bharat.
Links: Schallpegel-Frequenz-Spektrum;
rechts: mittlere Frequenzen der wesentlichen Teiltöne.



Frequenz
 ≈ 108 Hz
 ≈ 190 Hz
 ≈ 268 Hz

Wie beim vorher betrachteten *dhin* handelt es sich bei *dhir-dhir* um einen kombinierten Klang, der mit der rechten Hand auf der kleineren *Tabla* und zeitgleich mit der linken Hand auf der größeren *Bayan* gespielt wird. Die *Tabla* (vgl. Abschnitt 5.8) übernimmt den perkussiven Teil. Auf ihr erzeugt der Spieler einen kurzen Doppel-Schlag. Gleichzeitig zum ersten *Tabla*-Schlag ruft er auf der *Bayan* einen tonalen Klang hervor, den er durch Druck auf das Fell mit dem Ballen der linken Hand moduliert. Dieser Ablauf wiederholt sich. Fig. 48 a zeigt im oberen Diagramm die Zeitfunktion des zweiten Teiles. Die beiden *Tabla*-Schläge folgen so dicht aufeinander, dass sie hier nicht getrennt erscheinen. Das zugehörige Spektrum ist „verschmiert“; vgl. Fig. 43 a und b. Im anschließenden *Bayan*-Anteil zeigen sich dagegen diskrete Teiltöne. Naturgemäß stellen die angegebenen Frequenzen zeitlich gemittelte Werte dar. Da die Hand auf das Fell drückt, entspricht es auch hier der Erwartung, dass die Mittelwerte höher als die Frequenzen sind, mit denen das *Tabla*-Fell gemäß Fig. 14 a unbelastet schwingt.

6.2.2. Wasserfall-Diagramm

Der zeitliche Verlauf der zweiten Hälfte des Kombinationsklanges sowie die darin enthaltenen tonalen Komponenten können dem Schalldruck-Frequenz-Zeit-Diagramm in Fig. 49 entnommen werden. Der Doppel-Schlag auf der *Tabla* ist durch den breitbandigen Anfangsteil gekennzeichnet. Das Analyse-Zeitfenster ist zu lang, als dass die beiden Schläge einzeln aufgelöst werden könnten. Ähnlich wie bei Fig. 47 erkennt man im anschließenden *Bayan*-Teil mehrere tonale Komponenten. Es fällt auf, dass der lang anhaltende Teilton knapp unterhalb von 500 Hz hier fehlt.

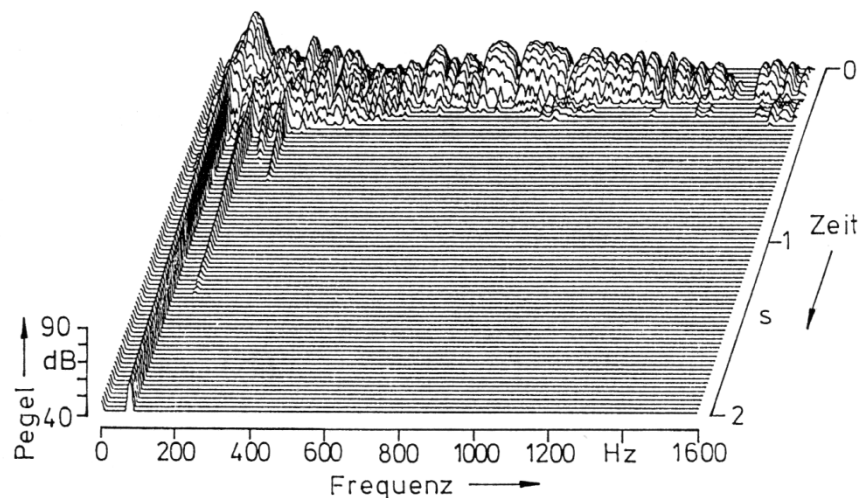


Fig. 49. Schallpegel-Frequenz-Zeit-Diagramm des Kombinations-Klanges *dhir-dhir*, gespielt von Parvinder Bharat.

Wiederum ist es der tiefste Teilton mit einer Frequenz von etwas weniger als 100 Hz, der sich am stärksten ausprägt und am längsten anhält. Dessen Frequenz kann der Spieler verändern, indem er das Fell niederdrückt. Es ist zu vermuten, dass auch im vorliegenden Fall die Wahrnehmung einer musikalischen Tonhöhe vorwiegend durch diesen Teilton bestimmt ist, der von der ersten rotationssymmetrischen Mode des *Bayan*-Felles herrührt. Anders als bei der Vibrometer-Messung (vgl. Kapitel 3) schwingt das Fell nicht frei, sondern der Spieler drückt es mit dem Handballen nieder. Dass er den Ballen zur Mitte hin verschiebt, lässt die Frequenz während des Ausschwingens ansteigen und ruft das in der Tonhöhe modulierte Klangbild hervor, das für die *Dugi* (wie die *Bayan* auch heißt) charakteristisch ist.

6.3. *Bayan-Klang ke*

Der Klang *ke* wird mit der linken Hand auf der *Bayan* gespielt. Es handelt sich um einen vorwiegend tonalen Klang. Dieser kann entweder mit weitgehend gleichbleibender Tonhöhe („unmoduliert“) gespielt werden oder im ausschwingenden Teil durch Druck auf das Fell mit dem Handballen in der Tonhöhe moduliert werden.

6.3.1. *ke*, gespielt von Parvinder Bharat

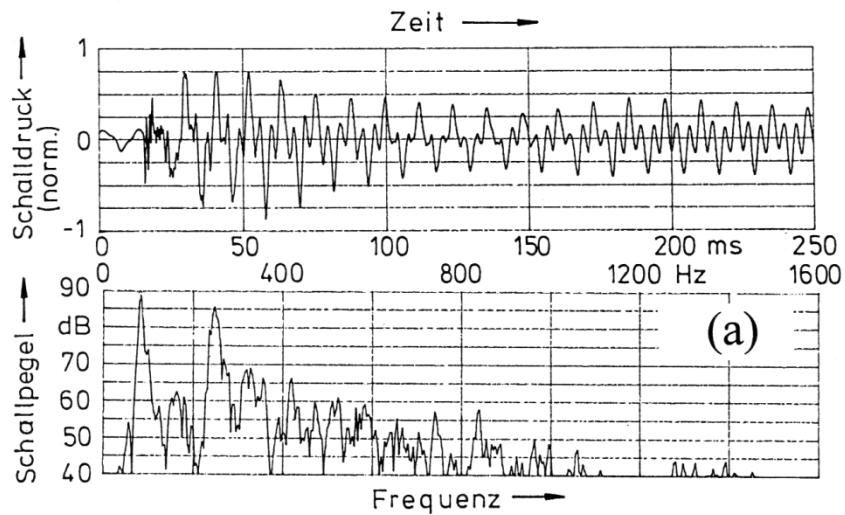
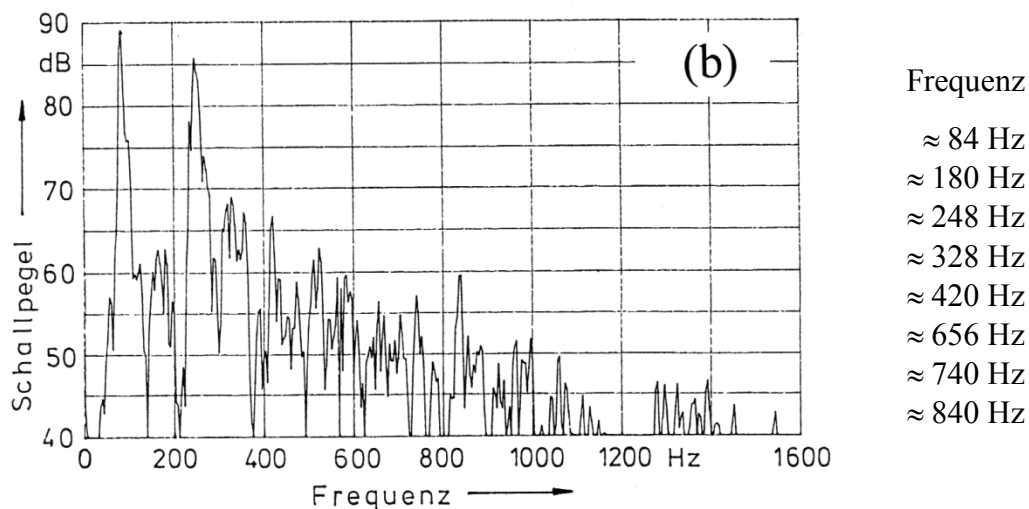


Fig. 50 a. *Bayan-Klang ke* (moduliert), Spieler Parvinder Bharat.
Oben: Schalldruck-Zeitfunktion;
unten: zugehöriges Schallpegel-Frequenz-Spektrum.

Fig. 50 b. *Bayan-Klang ke* (moduliert), Spieler Parvinder Bharat.
Links: Schallpegel-Frequenz-Spektrum;
rechts: Anfangswerte der Frequenzen der wesentlichen Teiltöne.



Parvinder Bharat hat den Klang *ke* im ausschwingenden Teil einmal unmoduliert und einmal mit ansteigender Tonhöhe gespielt. Fig. 50 a zeigt im oberen Diagramm eine Zeitfunktion, die den Beginn des modulierten Klanges wiedergibt. Das zugehörige Spektrum weist mehrere tonale Anteile auf. Da sich die Frequenzen innerhalb des Messfensters ändern, bilden sich die

Maxima relativ breit aus. Wie auch in Fig. 50 b zu erkennen ist, sind die ersten beiden Teiltöne mit etwa 84 Hz bzw. 248 Hz besonders stark ausgeprägt. Zunächst fallen die Frequenzen rasch ab. Danach steigt im Laufe von etwas mehr als einer Sekunde die Frequenz des ersten Teiltones von 84 Hz auf 112 Hz an. Dieser Teilton hat am Ende des Zeitfensters eine um 33% höhere Frequenz als zu Beginn, was dem Intervall einer Quart entspricht.

6.3.2. *ke*, gespielt von Harpit Sahota

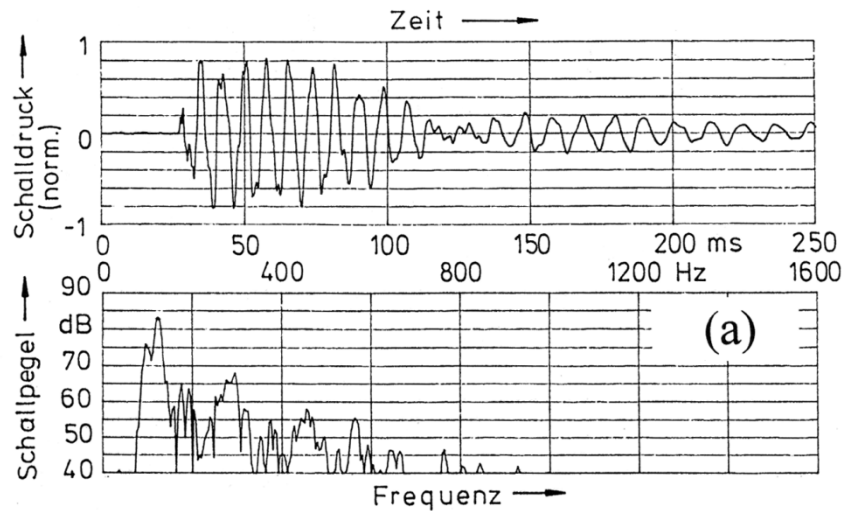
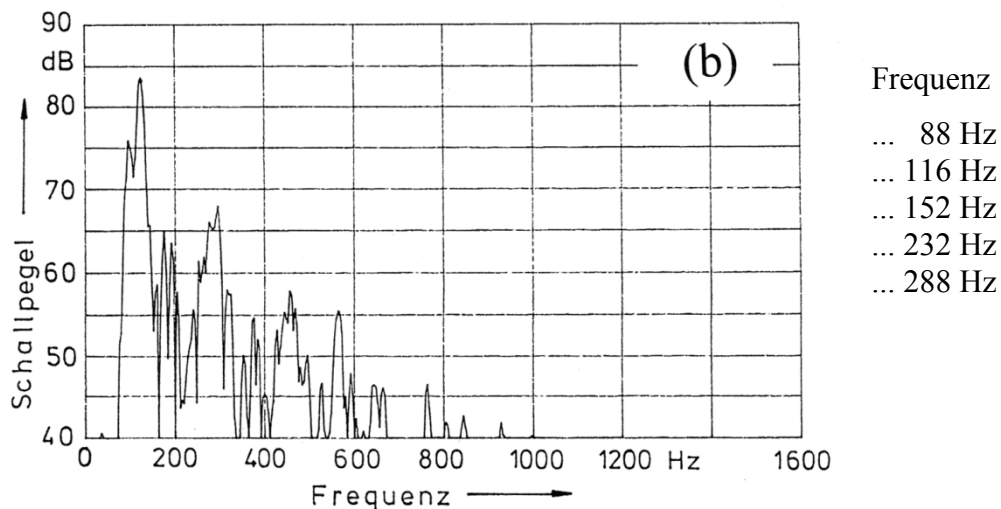


Fig. 51 a. Bayan-Klang *ke* (moduliert), Spieler Harpit Sahota.
Oben: Schalldruck-Zeitfunktion;
unten: zugehöriges Schallpegel-Frequenz-Spektrum.

Fig. 51 b. Bayan-Klang *ke* (moduliert), Spieler Harpit Sahota.
Links: Schallpegel-Frequenz-Spektrum;
rechts: Endwerte der Frequenzen der wesentlichen Teiltöne.



Harpit Sahota hat den Klang *ke* dreimal hintereinander und immer moduliert, d.h. mit anfänglich abfallender Tonhöhe gespielt. Fig. 51 a gibt im oberen Diagramm eine Zeitfunktion wieder, die den Beginn des modulierten Klanges widerspiegelt. Das zugehörige Spektrum weist vor allem Anteile im Bereich tiefer Frequenzen auf. Die tonalen Komponenten zeigen dop-

pelte Spitzen, da die Frequenzen innerhalb des Messfensters nicht gleich bleiben, sondern gezogen werden. Auch in Fig. 51 b ist zu erkennen, dass sich der erste Teilton mit dem Endwert 88 Hz besonders stark ausprägt. Ein Vergleich von Fig. 51 mit Fig. 50 lässt deutliche Unterschiede erkennen. Offenbar spielt jeder der beiden Künstler den Klang *ke* auf seine eigene, individuelle Weise und nutzt dabei einen weiten Freiraum.

6.3.3. Wasserfall-Diagramme

Die zeitlichen Verläufe von *ke*-Klängen, gespielt von Parvinder Bharat, sowie die darin enthaltenen tonalen Komponenten können in zwei Varianten den Schalldruck-Frequenz-Zeit-Diagrammen in den Fig. 52 entnommen werden. Das obere Diagramm zeigt den unmodulierten Klang. Im selben Maßstab gibt das untere Diagramm den modulierten Klang wieder. Deutlich erkennt man, wie insbesondere die zwei starken Teiltöne mit Frequenzen um 84 Hz und 248 Hz im Verlauf der Zeit nach rechts, d.h. in Richtung größerer Werte, wandern. Wird die Frequenz durch Verschieben des Handballens auf dem Fell moduliert, so klingen die wesentlichen Teiltöne rascher ab, als sie das ohne Modulation tun. Offensichtlich wirkt die Hand dämpfend auf die Schwingungen des *Bayan*-Felles.

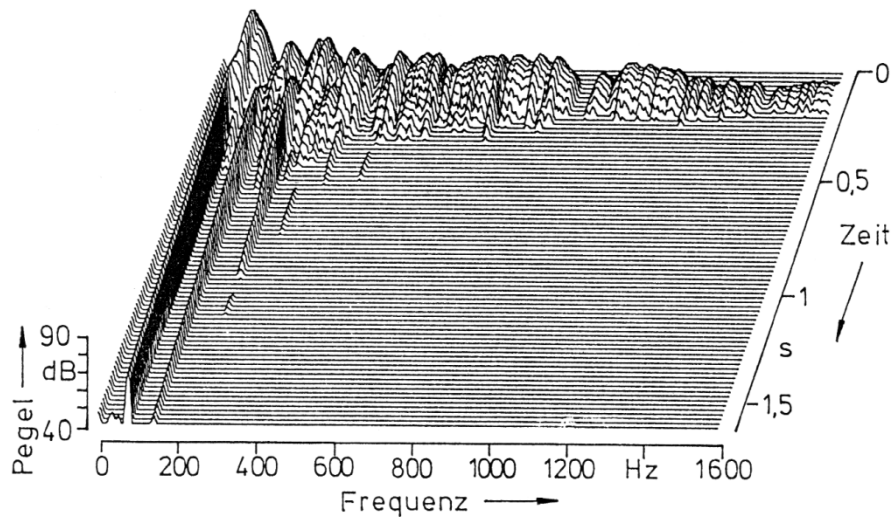
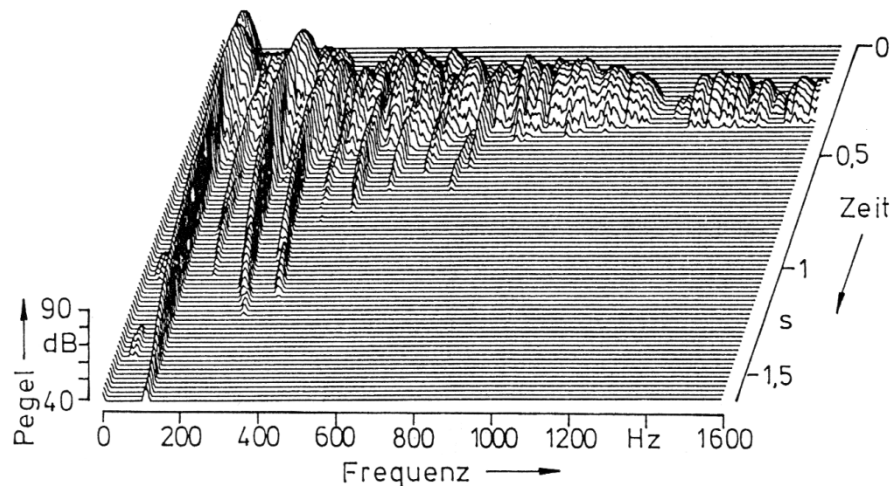


Fig. 52. Schallpegel-Frequenz-Zeit-Diagramm des *Bayan*-Klanges *ke*, gespielt von Parvinder Bharat.
Oben: unmoduliert;
unten: moduliert mit steigender Tonhöhe.



In Fig. 53 sind im oberen Teil drei aufeinander folgende *ke*-Klänge dargestellt, wie sie Harpit Sahota auf seiner *Bayan* erzeugt hat. Der zweite Klang ist im unterem Diagramm von Fig. 53 auf einer gedehnten Zeitachse gezeichnet. Dieses Diagramm ist mit denen von Fig. 52, die von dem anderen Spieler stammen, zu vergleichen. Der Anfangsteil ist in Fig. 53 nicht so breitbandig wie in Fig. 52. Im unteren Diagramm kann nachverfolgt werden, wie die Frequenz des ersten Teiltones zunächst abfällt, um dann im stationären Teil weitgehend gleich zu bleiben. Der Spieler drückt das *Bayan*-Fell mit dem Handballen nieder, den er im Verlauf des Klanges verschieben kann. Dies lässt die Frequenz abfallen oder ansteigen und verursacht das typische tonhöhenmodulierte Klangbild. Wiederum ist zu vermuten, dass die Wahrnehmung einer Tonhöhe durch die erste rotationssymmetrische Teilschwingung dominiert wird.

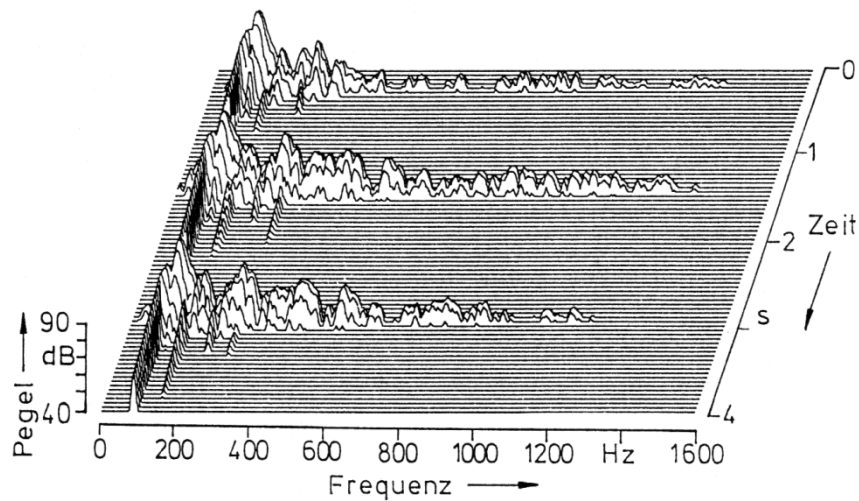
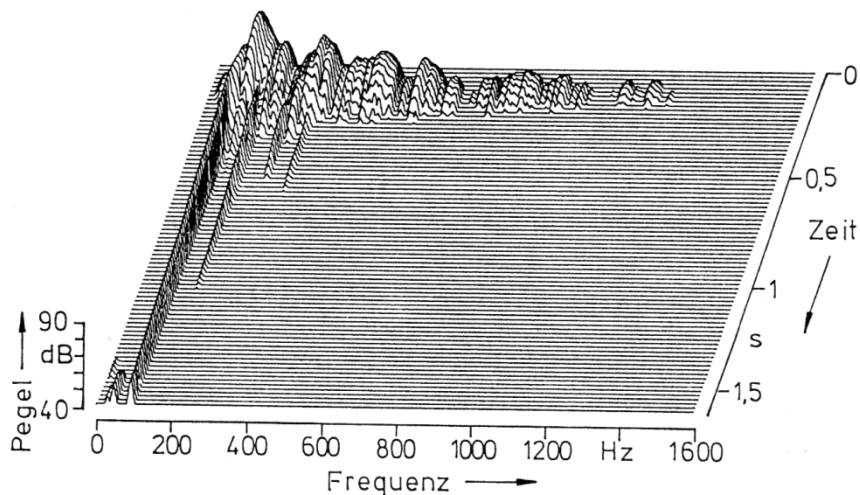


Fig. 53. Schallpegel-Frequenz-Zeit-Diagramm des Bayan-Klages *ke*, gespielt von Harpit Sahota.
 Oben: Folge von drei Schallen, moduliert;
 unten: letzter der drei Schalle, moduliert mit anfänglich abfallender Tonhöhe.



6.4. Bayan-Klang *gin*

Spieler ist Harpit Sahota.

6.4.1. Zeitfunktion und Spektrum

Harpit Sahota hat den Klang *gin* mehrfach gespielt und unterschiedlich moduliert, so dass die Tonhöhe zunächst abfällt und beim letzten Klang schließlich ansteigt. Im oberen Diagramm von Fig. 54 a ist die Zeitfunktion wiedergegeben, die den Anfang des zuletzt gespielten Klanges widerspiegelt. Das zugehörige Spektrum weist starke Anteile im Bereich tiefer Frequenzen auf. Der Pegel des tiefsten Teiltones ist um 15 dB größer als der des nächstgrößeren Teiltones. In Fig. 54 b deutet sich beim tiefsten Teilton bereits eine doppelte Spitze an. Dies lässt vermuten, dass die Frequenz innerhalb des Messfensters nicht gleich bleibt. Die Tabelle zeigt für den ersten Teilton eine Variation der Frequenz zwischen 96 Hz und 108 Hz. Da es sich hierbei um die Mittelwerte handelt, die über ein 250 ms langen Zeitfensters ermittelt wurden, dürfte der Frequenzabfall und -anstieg in Wirklichkeit noch ausgeprägter sein.

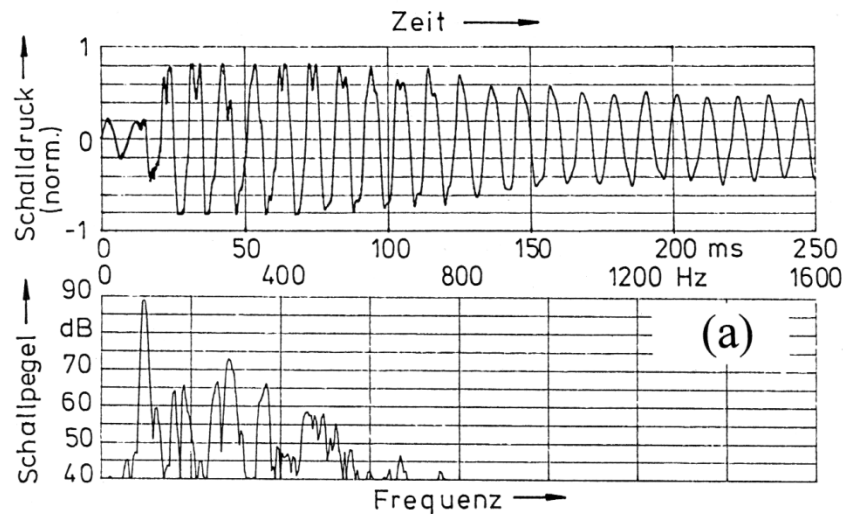
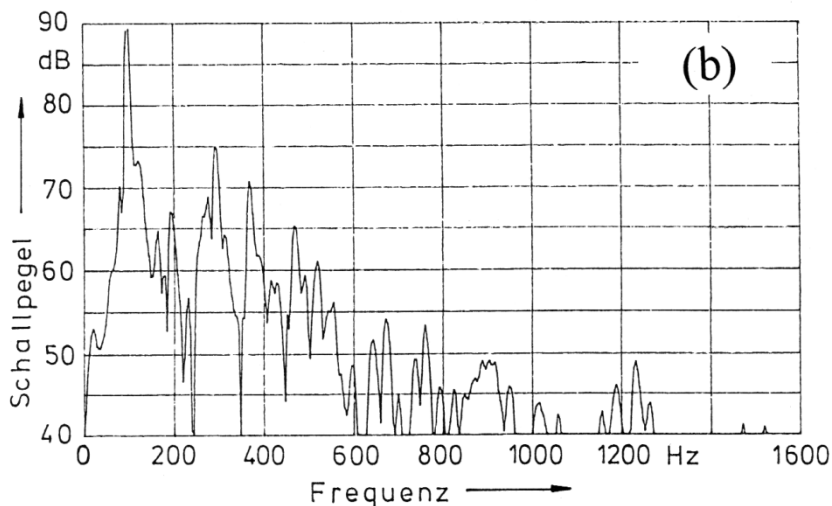


Fig. 54 a. Bayan-Klang *gin*, Spieler Harpit Sahota.
Oben: Schalldruck-Zeitfunktion;
unten: zugehöriges Schallpegel-Frequenz-Spektrum.

Fig. 54 b. Bayan-Klang *gin*, Spieler Harpit Sahota.
Links: Schallpegel-Frequenz-Spektrum;
rechts: mittlere Frequenzen der wesentlichen Teiltöne.



Frequenz
96 ... 108 Hz
292 Hz
368 Hz
468 Hz
672 Hz
760 Hz
904 Hz
1232 Hz

6.4.2. Wasserfall-Diagramme

Der zeitliche Verlauf des Klanges sowie die darin enthaltenen tonalen Komponenten können den Schalldruck-Frequenz-Zeit-Diagrammen von Fig. 55 entnommen werden. Der obere Teil gibt die gesamte Folge über eine Zeitspanne von nicht ganz fünf Sekunden wieder. Im unteren Teil ist einer dieser drei Klänge gesondert dargestellt. Man erkennt einen kurzen Vor-Schlag und einen daran anschließenden längeren Teil. Nach dem perkussiven Anfang klingen die tonalen Komponenten mehr oder weniger rasch ab. Besonders stark und lang anhaltend ist der erste Teilton. Dieser Teilton ist es, dessen Frequenz zum Ende hin auch visuell erkennbar ansteigt.

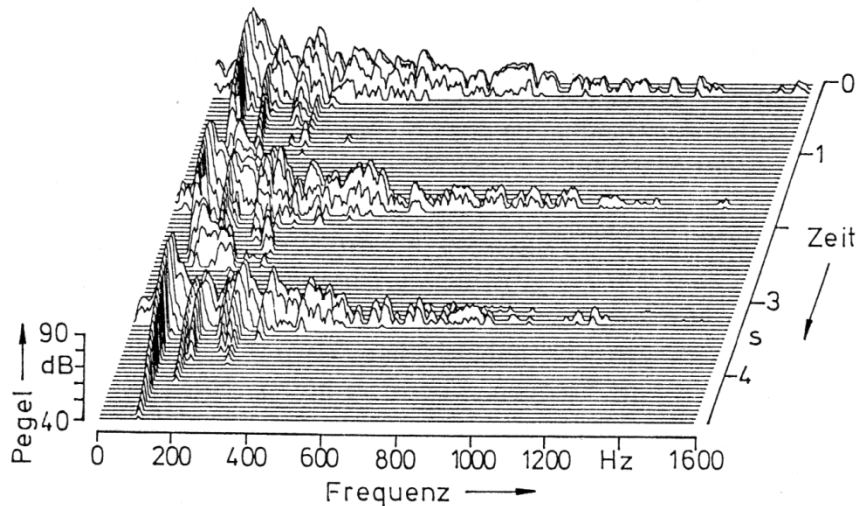
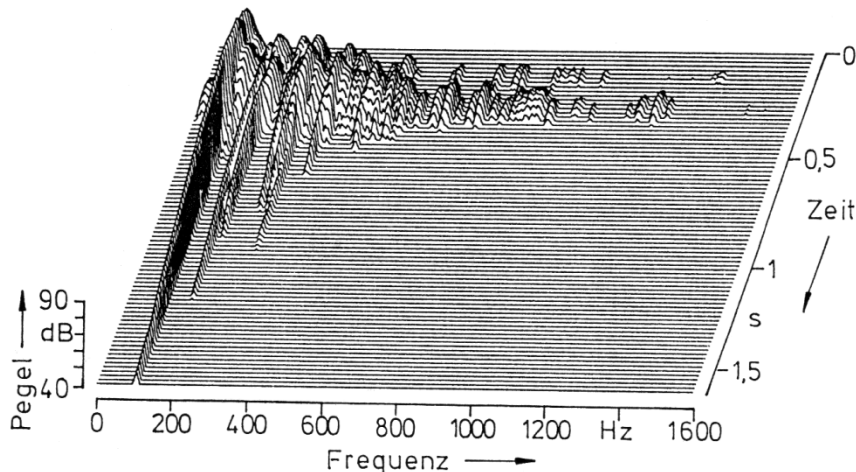


Fig. 55. Schallpegel-Frequenz-Zeit-Diagramm des Bayan-Klanges **gin**, gespielt von Harpit Sahota.
Oben: Folge von drei Schallen, moduliert;
unten: letzter Schall der Folge, moduliert mit steigender Tonhöhe.



Wie bei den anderen bisher betrachteten *Bayan*-Klängen kommt der Anstieg dadurch zu Stande, dass der Spieler das Fell zur Mitte hin niederdrückt. Auch beim **gin**-Klang ist zu vermuten, dass die Wahrnehmung einer zeitlich ansteigenden Tonhöhe in erster Linie durch die erste rotationssymmetrische Teilschwingung des *Bayan*-Felles bestimmt ist. Dabei schwingt das Fell nicht unbelastet, sondern der Spieler drückt es von Anfang an mit dem Handballen nieder. Dies bewirkt, dass die Frequenz bereits zu Beginn des Schlages etwas höher als beim

frei schwingenden Fell ist. Indem er den Ballen unter Druck zur Mitte hin verschiebt, erhöht der Spieler die Frequenz während des Ausschwingens weiter und ruft so das charakteristische modulierte Klangbild hervor.

6.5. Zusammenfassende Bemerkung

Vier unterschiedliche Klänge, bei denen der Spieler tonale Schalle auf der größeren der beiden Trommeln hervorruft, sind in Hinsicht auf ihre Zeitfunktionen und ihre Frequenzspektren analysiert und dargestellt worden. Zwei davon (*dhin* und *dhir-dhir*) sind Kombinationsklänge. Diese Bezeichnung soll ausdrücken, dass neben der *Bayan* auch die *Tabla* geschlagen wird. Den perkussiven Part übernimmt dabei die kleinere *Tabla*, während die größere *Bayan* den tonalen Anteil erzeugt. Der Klang *kalan*, bei dem diese Rollen vertauscht sind (die *Bayan* liefert den perkussiven und die *Tabla* den tonalen Beitrag), wurde bereits in Abschnitt 5.3 behandelt. Die beiden verbleibenden Klänge (*ke* und *gin*) werden ausschließlich auf der *Bayan* gespielt. Da hierbei der Handballen des Spielers stets auf dem Fell lastet, schwingt das Fell anders, als dies bei der Messung mit dem Scanning Vibrometer (Kapitel 3) der Fall war. Es ist daher nicht ganz einfach, direkte Beziehungen zwischen den Schallkomponenten und den gemessenen mechanischen Schwingungen des *Bayan*-Felles herzustellen. Jedoch ist die Aussage möglich, dass der ersten Teilschwingung (rotationssymmetrisch, d.h. ohne Knotendurchmesser und mit nur einem Knotenkreis am Rand) die größte Bedeutung zukommt. Bei der Messung der Schwingungen des unbelasteten *Bayan*-Felles (vgl. Abschnitt 3.2 und Anhang 1) hatte sich hierfür eine Frequenz von etwa 85 Hz ergeben. Offenbar eröffnen die Modulationsmöglichkeiten, die dem Spieler auf der *Bayan* zur Verfügung stehen, ein weites Feld für Variationen.

7. GEHÖRBEZOGENE ANALYSE DER SCHALLSIGNALLE

Die in den beiden vorherigen Kapiteln beschriebene Schallanalyse arbeitet ausschließlich auf der Ebene physikalischer Größen und beschreibt somit einen Aspekt der „Welt der Physik“. Sie liefert eine Reihe aufschlussreicher Ergebnisse. Definitionsgemäß nimmt sie aber keinen Bezug auf Eigenschaften des Gehörs. Wahrgenommen wird ein musikalischer Klang jedoch in der „Welt der Hörempfindungen“. Die komplexen Verknüpfungen zwischen den beiden Welten zu erforschen und zu beschreiben, ist Gegenstand der Psychoakustik.

Grundlegende Erkenntnisse der Psychoakustik finden sich in Lehrbüchern wie Zwicker und Feldtkeller (1967) und Zwicker und Fastl (1999). Um ein Schallsignal „gehörrechtig“ darzustellen, müssen möglichst alle einschlägigen psychoakustischen Gesetzmäßigkeiten bei der Analyse berücksichtigt werden. In Hinsicht auf musikalische Signale gibt Terhardt (1998) die zielführenden Hinweise. Eine geraffte Zusammenstellung von Grundlagen, wie sie für die vorliegende Aufgabenstellung von Bedeutung sind, findet sich bei Fleischer (2002).

7.1. Bisherige Untersuchungen an musikalischen Klängen

Eine erste, umfassende Anwendung gehörbezogener Verfahren für die Analyse von Klavierklängen geht auf Miriam Valenzuela (1998) zurück. Dieselbe Autorin (Valenzuela 1999) hat diese Methodik konsequent auf andere Musikinstrumente erweitert. Die Arbeit von Fleischer (2002) stellt einen Versuch dar, diese Vorgehensweise auf eine Klasse von metallenen Aufschlagsidiophonen, nämlich Buckelgongs, anzuwenden und deren tonale Klänge in enger Anlehnung an die Eigenschaften des Gehörs zu analysieren.

Während Valenzuela bei ihren Untersuchungen auf ein weitläufiges Programmsystem zurückgreifen konnte, das in der Arbeitsgruppe von Ernst Terhardt an der TU München entwickelt worden war, wurde und wird für die eigenen Untersuchungen ein kommerzielles Programmpaket verwendet. Dieses beruht auf dem Gedankengut, wie es Terhardt (1998) zusammengefasst und dargestellt hat. Die Firma Cortex Instruments GmbH, Regensburg, bietet diese Software unter dem Namen VIPER (*VI*sual *PER*ception of Audio Signals) an. Roida (2002) hat sie im Rahmen einer Studienarbeit am Institut für Mechanik erprobt. Darauf aufbauend hat Falk (2003) erste Versuche unternommen, die hier behandelten Tabla-Klänge zu analysieren. Mit der Erfahrung ihrer früheren Untersuchungen war Valenzuela (2003) in der Lage, eine Reihe wertvoller Hinweise für die zielgerichtete Wahl von Analyseparametern zu geben.

7.2. Verarbeitung der Schallsignale im Programm VIPER

Bevor im Weiteren die Ergebnisse dargestellt werden, sind zunächst einige Grundzüge der gehörbezogenen Analyse im Programm VIPER zusammen gestellt und erläutert. Es wurde der VIPER PerceptualXplorer in Version 2.2 verwendet.

7.2.1. Auditorisches Spektrogramm

Der erste Schritt besteht in einer Analyse, die mit der Fourier-Zeit-Transformation nach Terhardt (1998) vergleichbar ist. Das Ergebnis wird als „Auditorisches Spektrogramm“ (*Audi-*

torische *Spectrogram*, ASP) bezeichnet. Es sind bis zu 600 Frequenzkanäle verfügbar und die Zeitauflösung beginnt bei 1 ms. In offensichtlicher Anlehnung an die Art der Präsentation, wie sie Valenzuela (1998, 1999) verwendet hat, werden die Ergebnisse dargestellt. Fig. 56 zeigt als Beispiel den *Tabla*-Klang *na*. Die Zeit läuft nach rechts, die Tonheit ist in Frequenzgruppenbreiten (Einheit Bark) nach oben angetragen. Der Pegel ist ursprünglich in Farben und in Fig. 56 aus drucktechnischen Gründen ersatzweise in einem Bereich von 50 dB in Grautönen kodiert. Je dunkler, desto größer ist der Pegel. Da diese Kodierung nur unzureichend gelingt, empfiehlt sich die Betrachtung entsprechender Diagramme im Anhang in Kombination mit der jeweils beigefügten Farbskala.

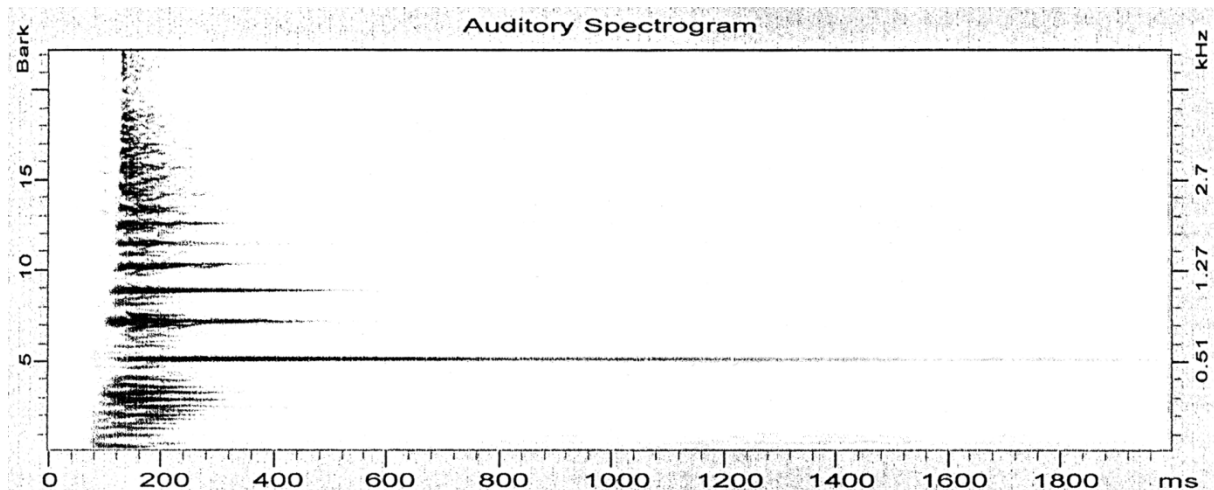


Fig. 56. Auditorisches Spektrogramm (ASP) des *Tabla*-Klanges *na* (Spieler Harpit Sahota), ermittelt mit VIPER. Die Schwärzung ist ein Maß für den Pegel.

Vergleicht man Fig. 56 mit dem entsprechenden Wasserfalldiagramm in Fig. 26 unten, so werden mehrere Unterschiede sichtbar. Während bei der FFT zwangsläufig eine lineare Frequenzskala vorgegeben ist, wird im ASP eine gehörangepasste Bark-Skala (linke Abszisse) verwendet, was bedeutet, dass die Frequenz (rechte Abszisse) zu hohen Werten hin „gestaucht“ ist. Ein Vergleich der beiden Skalen an der Abszisse von Fig. 56 macht dies deutlich. Damit geht einher, dass Analysebandbreite und -zeitfenster beim ASP sich am Auflösungsvermögen des Gehörs orientieren. Im Gegensatz dazu sind sie bei der FFT im gesamten dargestellten Bereich konstant und über die Gesetzmäßigkeiten der Signaltheorie miteinander zwangsgekoppelt.

7.2.2. Frequenzkonturen und Frequenzspuren

Der gehörangepassten Frequenzanalyse schließt sich die Extraktion von „Frequenzkonturen“ (*Frequency Contours*) an, die der von Valenzuela (1998, 1999) beschriebenen Konturierung entspricht. Es entsteht ein Diagramm, das mit dem Teilton-Zeit-Muster (Terhardt 1998) vergleichbar ist. Werden die Analyseparameter so gewählt, wie dies Valenzuela (2003) vorgeschlagen hat und wie dies in Abschnitt 7.3 noch einmal zusammengefasst ist, dann ergeben sich bei der Analyse mit VIPER Frequenzkonturen, die denjenigen ähneln, welche Valenzuela (1998, 1999) angegeben hat. Fig. 57 zeigt als Beispiel eine Weiterverarbeitung des ASP von Fig. 56. Trotz der unbefriedigenden Wiedergabe in Graustufen ist zu erkennen, dass die Maxima im Auditorischen Spektrogramm extrahiert und dargestellt werden. Demnach macht es dieser Bearbeitungsschritt einfacher, tonale Komponenten zu erkennen und zu identifizieren.

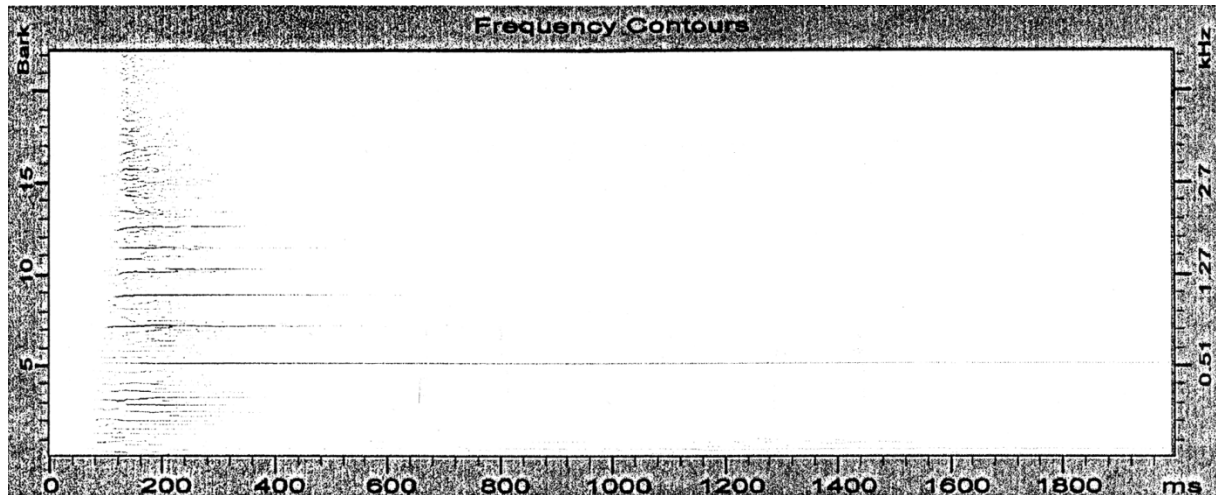


Fig. 57. Frequenzkonturen (Frequency Contours) des Tabla-Klanges *na* (Spieler Harpit Sahota), ermittelt mit VIPER. Die Schwärzung ist ein Maß für den Pegel.

Insbesondere bei Schallsignalen mit starken tonalen Anteilen kann eine weitere Reduktion von Information mittels der Bearbeitungsstufe „Frequency Tracks“ erreicht werden. Teiltöne, die über eine vorzugebende Zeitlänge nicht zu sehr im Pegel abfallen, werden als Frequenzspur erkannt und dargestellt. Damit steht ein Hilfsmittel zur Verfügung, das die tonalen gegenüber den geräuschhaften Anteilen hervorhebt. Fig. 58 zeigt ein Beispiel. Der Vergleich mit Fig. 57 macht einige Unterschiede deutlich, die sich jedoch im vorliegenden Fall nicht sehr stark ausprägen, da der Klang vorwiegend tonalen Charakter hat und kaum perkussive Anteile aufweist.

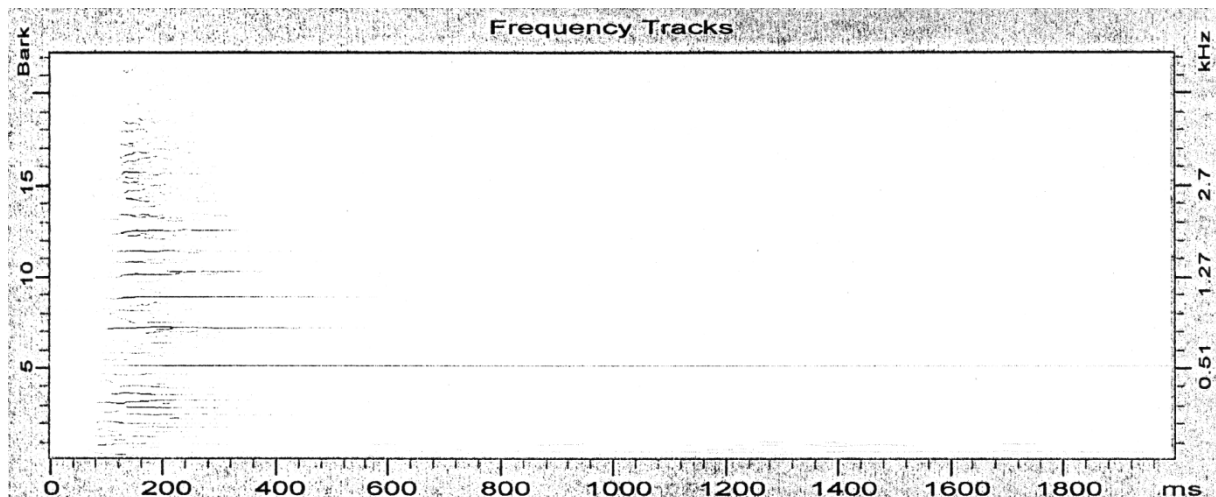


Fig. 58. Frequenzspuren (Frequency Tracks) des Tabla-Klanges *na* (Spieler Harpit Sahota), ermittelt mit VIPER. Die Schwärzung ist ein Maß für den Pegel.

7.2.3. Spektrale Maskierung

Tiefergehende Diskrepanzen zwischen dem originalen Verfahren (Valenzuela 1998, 1999) und der VIPER-Realisierung treten zu Tage, sobald die spektrale Maskierung berücksichtigt werden soll. Im Handbuch findet sich ein Vermerk, dass die nichtlineare Auffächerung der

oberen Flanke der Mithörschwellen (Zwicker und Feldtkeller 1967, Zwicker und Fastl 1999) nicht modelliert ist. Insofern führt die Bezeichnung „*Nonlinear Masking*“ in die Irre. Vermutlich sind auch nicht die für Sinustöne relevanten Verdeckungskurven, sondern vielmehr diejenigen nachgebildet, welche für Schmalbandrauschen gelten (Valenzuela 1999, Abschnitt 2.3, Abb. 2.19). In der Folge wirkt sich die spektrale Maskierung auch nur wenig aus. Immerhin zeigt sich in Fig. 59, dass die Maskierung im Anfangsteil der Frequenzkonturen einige schwächere Spektralanteile eliminiert hat, die in Fig. 57 noch enthalten waren.

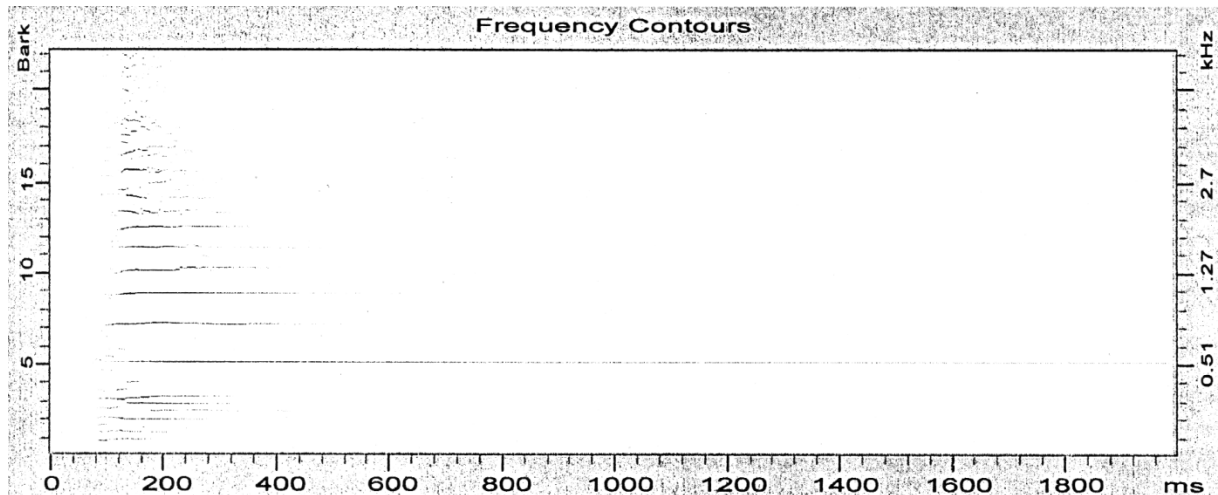


Fig. 59. Frequenzkonturen (*Frequency Contours*) des Tabla-Klanges *na* (Spieler Harpit Sahota), ermittelt mit VIPER unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung. Die Schwärzung ist ein Maß für den Pegel.

Am weitesten geht die Reduktion in der Bearbeitungsstufe *Frequency Tracks* unter Einbeziehung von *Nonlinear Masking*. Fig. 60 gibt ein Beispiel wieder. Im Vergleich zu den Fig. 58 und 59 erkennt man, dass die geräuschhaften Anteile weitgehend unterdrückt worden sind. In Kombination mit dem unbehandelten ASP, das die gesamte Information enthält, wird diese am weitesten gehende Stufe der gehörbezogenen Bearbeitung (*Frequency Tracks* unter Einbeziehung von *Nonlinear Masking*) im Folgenden als Grundlage für die Diskussion der Tabla-Schalle dienen.

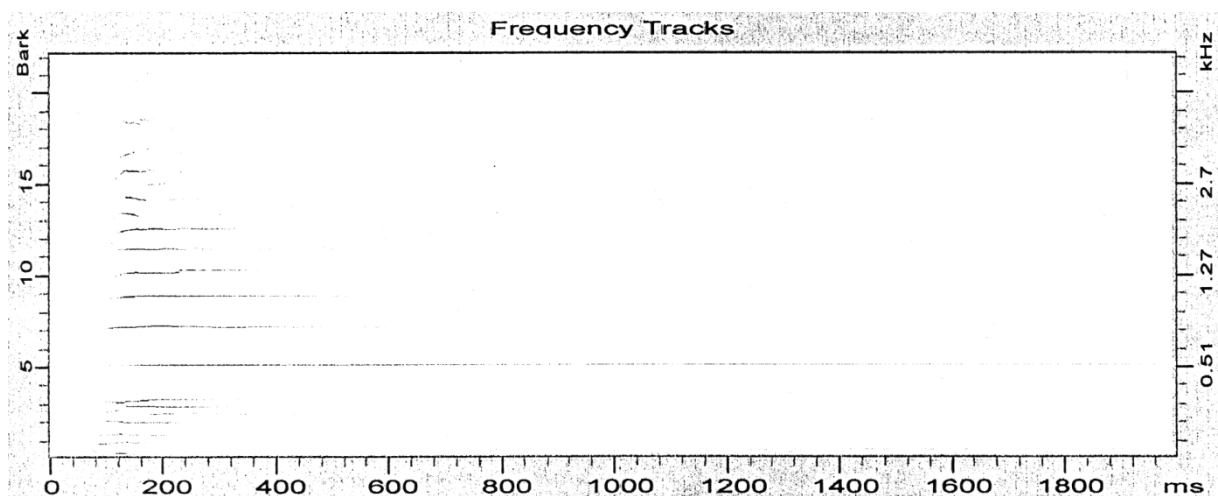


Fig. 60. Frequenzspuren (*Frequency Tracks*) des Tabla-Klanges *na* (Spieler Harpit Sahota), ermittelt mit VIPER unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung. Die Schwärzung ist ein Maß für den Pegel.

Ergänzend sei noch erwähnt, dass VIPER eine Resynthese der Schalle in jedem beliebigen Bearbeitungsstadium vorsieht. Obwohl diese Option im Detail noch verbesserungsfähig ist, erlaubt sie doch eine aurale Kontrolle und damit eine Beurteilung, ob die vorgenommene Reduktion noch akzeptabel ist oder bereits zu einer unzulässig großen Veränderung der Hörwahrnehmung geführt hat.

7.3. Problemorientierte Wahl der Analyseparameter

Auf Hinweis von Valenzuela (2003) wurden folgende Parameter gewählt:

- Im Mittelpunkt der Untersuchungen stehen die tonalen Anteile der Tabla-Klänge. Die *Analysis Bandwidth (Bark)* wurde bei Klängen, denen eine Tonhöhe zugeordnet wird, zu 0,1 Bark gewählt. Damit ist auf jeden Fall berücksichtigt, dass die Grenze für die Wahrnehmung einer Tonhöhe bei simultaner Darbietung weiterer Sinustöne bei tiefen Frequenzen etwa 0,2 Bark beträgt. Bei rein perkussiven Klängen ist die *Analysis Bandwidth* 0,25 Bark.
- Der eben wahrnehmbare Frequenzunterschied bei frequenzmodulierten Sinustönen entspricht etwa 0,02 Bark bis 0,04 Bark. Der Parameter *Frequency Interval (Bark)* wird daher zu 0,03 Bark gewählt.
- Um die Teiltöne zu extrahieren und darzustellen, werden nicht die *Frequency Contours*, sondern die daraus abgeleiteten *Frequency Tracks* verwendet. Beim Übergang werden bereits einige Geräuschanteile, die mit hoher Wahrscheinlichkeit ohne Relevanz für die Hörwahrnehmung sind, eliminiert.
- Die spektrale Maskierung (*Nonlinear Masking*) wird berücksichtigt.
- Das Zeitintervall (*Time Interval*) wird bei vorwiegend tonalen Tabla-Klängen zu 2,5 ms, bei perkussiven Klängen zu 1 ms gewählt.

Für sämtliche betrachteten Tabla-Klänge sind *Auditory Spectrograms* sowie *Frequency Tracks* unter Einbeziehung von *Nonlinear Masking* im Anhang in Farbkodierung zusammen gestellt. Zum einfacheren Vergleich ist das Analyse-Zeitfenster (*Time Range*) einheitlich eine Sekunde lang.

7.4. Anwendung auf Tabla-Klänge

Um die einzelnen Stufen der Bearbeitung noch einmal im Zusammenhang darzustellen, ist in Fig. 61 der Tabla-Klang *tun* in drei Bearbeitungsstufen veranschaulicht. Im oberen Diagramm ist das Ergebnis der gehörbezogenen Spektralanalyse als ASP dargestellt. Ein Extraktionsalgorithmus hat daraus die Frequenzkonturen berechnet, die dem mittleren Diagramm zu entnehmen sind. Das untere Diagramm stellt dar, was davon noch erhalten bleibt, wenn in einer weitergehenden Konturierung die Frequenzspuren berechnet werden und zusätzlich auch – soweit dies in VIPER überhaupt vorgesehen ist - die spektrale Maskierung berücksichtigt wird. Offensichtlich dominiert ein lang anhaltender und starker Teilton bei 289 Hz. In Fig. 28 b war dafür mit einer anderen Frequenzauflösung der Wert 288 Hz ermittelt worden. Bemerkenswert ist, dass der Teilton bei 526 Hz in Folge der spektralen Maskierung verdeckt wird. Er ist zwar physikalisch vorhanden, für die Hörwahrnehmung jedoch ohne Belang. Erst wieder die darauf folgenden Teiltöne sind im Pegel so stark, dass sie für das Hören wirksam werden können.

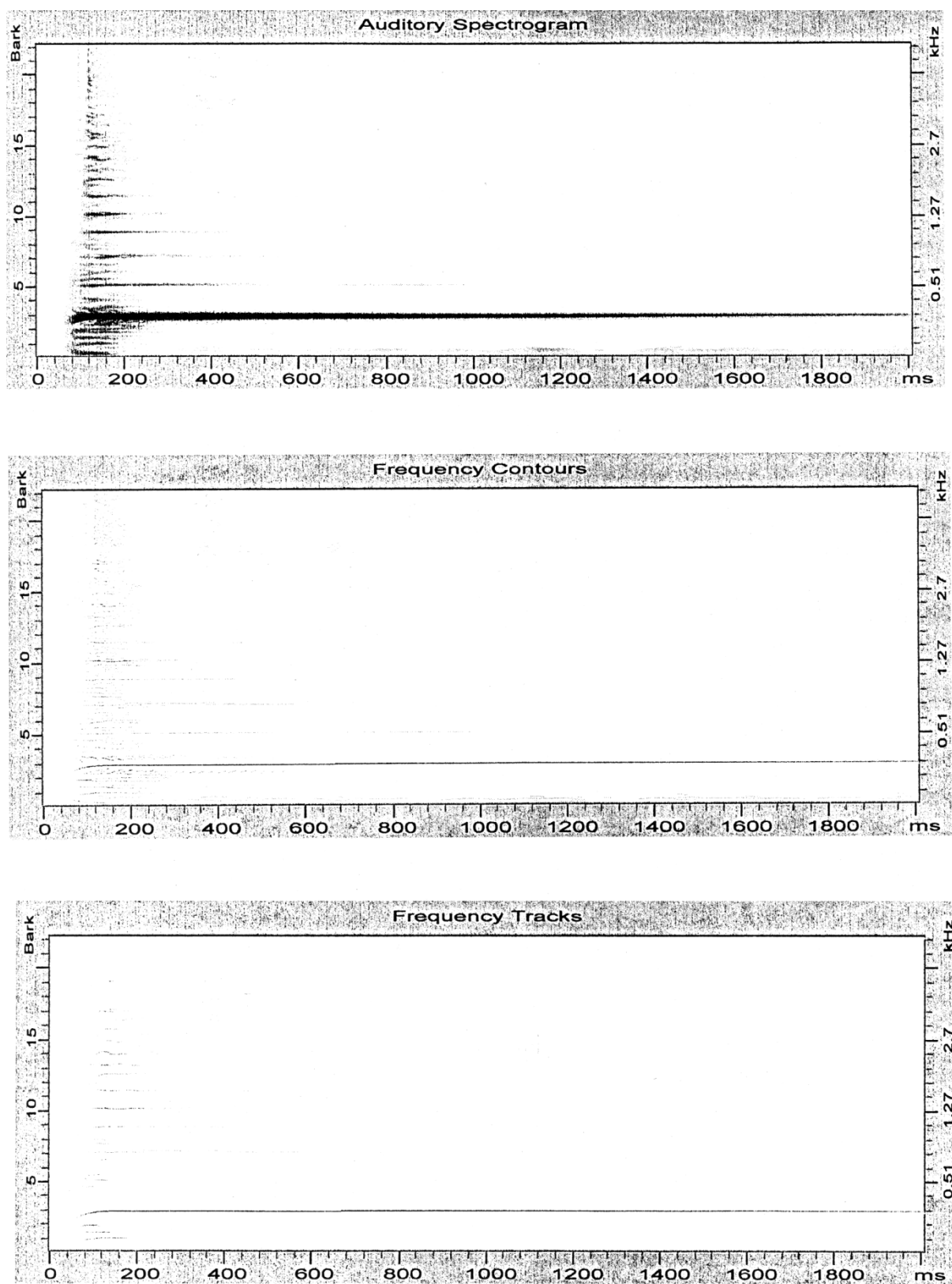


Fig. 61. Tabla-Klang *tun* (Spieler Harpit Sahota), bearbeitet mit VIPER.
 Die Schwärzung ist ein Maß für den Pegel.
 Oben: Auditory Spectrogram (ASP);
 Mitte: Frequency Contours ohne Maskierung;
 unten: Frequency Tracks unter Berücksichtigung von Nonlinear Masking.

Die prinzipielle Vorgehensweise ist im vorliegenden Kapitel an Hand von zwei *Tabla*-Klängen veranschaulicht. Im nächsten Kapitel werden exemplarisch zwei weitere Klänge behandelt und Beziehungen zwischen dem Schallsignal und den Schwingungen des Felles aufgezeigt. Auf dieselbe Art wie die *Tabla*-Klänge wurden auch die Schalle behandelt, bei denen die *Bayan* gespielt wird. Da die Farbe im vorliegenden Fall ein unverzichtbarer Informationsträger ist, sind die wesentlichen Ergebnisse der gehörbezogenen Analysen nicht an dieser Stelle, sondern aus drucktechnischen Gründen im Anhang (A 7 bis A 22) aufgeführt. Eine tabellarische Übersicht ist in A 6 angegeben.

7.5. Zusammenfassende Bemerkung

Ohne Zweifel weist der Grundgedanke, bei der Analyse der Schallsignale die Eigenschaften des Gehörs zu berücksichtigen, den richtigen Weg. Mit dem Programm VIPER ist ein Werkzeug kommerziell verfügbar, das einen Schritt in Richtung auf diese Analyse ermöglicht. Das Programm bildet wesentliche Schritte der auralen Verarbeitung nach und eröffnet dadurch die Möglichkeit, die physikalische Information auf das zu reduzieren, was für das Hören tatsächlich relevant ist. Von großer Bedeutung ist, dass das Signal nach jeder Stufe der Reduktion resynthetisiert und aural mit dem Original verglichen werden kann. Erste Versuche mit Gongklängen haben sich als erfolgreich erwiesen und lassen erwarten, dass die Software sich prinzipiell auch dazu eignen dürfte, Klänge von Tablas zu untersuchen. Die im Schallsignal vorhandene Information lässt sich gehöradäquat analysieren und darstellen, was mit den vorliegenden *Tabla*-Klängen durchgeführt worden ist. Die einschlägigen Resultate sind im Anhang zusammen gestellt.

Naturgemäß bedarf es dabei einer gewissen Erfahrung, die nicht jeder Nutzer mitbringt. Die *default*-Werte der Analyseparameter sind in aller Regel für die vorgegebene Anwendung nicht geeignet. Sie müssen so verändert werden, dass die Teiltöne in ähnlicher Weise separiert werden, wie es beim Hören eines musikalischen Klanges geschieht. Als sehr wertvoll hat sich dabei die Erfahrung von Miriam Noemi Valenzuela erwiesen (Valenzuela 2003). Sofern die Parameter sorgsam gewählt werden, stellt das Programm mit seinen gehörbezogenen Bearbeitungsschritten ein wertvolles Hilfsmittel dar. Die Analysen der *Tabla*-Klänge, die im Anhang zusammen gestellt sind, lassen sich mit Hilfe der beigefügten Farbskale hinsichtlich des Pegels dechiffrieren. Die Ausschnitte sind sowohl bei perkussiven Schallen als auch bei Klängen mit tonalen Komponenten einheitlich 1 s lang. Sie geben damit für jeden Klang den Anfangsteil wieder, der mit Sicherheit für das Hören von größter Bedeutung ist. Neben unbearbeiteten *Auditory Spectrograms*, in denen noch die gesamte physikalische Information enthalten ist, sind stets auch die *Frequency Tracks* unter Einbeziehung von *Nonlinear Masking* zusammen gestellt. Die letztgenannte Verarbeitungsstufe zeigt wesentliche gehörrelevante Merkmale der Schallsignale auf. Nach kurzer Lernphase ist es möglich, die Diagramme im Lichte der Hörempfindung zu interpretieren. Eine Repräsentation im Sinne von „*What you see is what you hear*“ gelingt damit weitergehend, als allein mit der rein physikalisch motivierten Fourier-Darstellung der Kapitel 5 und 6.

8. VERGLEICH EINIGER ERGEBNISSE

In der vorliegenden Studie interessiert der Zusammenhang des Schallsignals mit der Schwingung des Felles. Verbindungen sollen exemplarisch an Hand der zwei tonalen *Tabla*-Klänge *tun* und *na* untersucht werden. Da die Schwingungsmoden der Instrumente von Parvinder Bharat gemessen wurden und daher bekannt sind, werden die Klänge untersucht, die er auf seiner *Tabla* gespielt hat.

8.1. Schwingungsmoden und Teiltöne

Fig. 62 zeigt die beiden tonalen *Tabla*-Klänge. Sie werden in der höchsten Stufe der gehörbezogenen Verarbeitung betrachtet, die das Programm VIPER in der vorliegenden Version leistet. Der Pegel, der in Grautönen kodiert ist, ist hier weniger von Interesse als die Frequenzen, bei denen sich Teiltöne ausbilden. Man erkennt deutliche Parallelen hinsichtlich der höherfrequenten Teiltöne. Ein wesentlicher Unterschied zeigt sich darin, dass der links abgebildete Klang *tun* einen tiefen Teilton bei etwas mehr als 270 Hz aufweist, der im rechts dargestellten *na* fehlt. Umgekehrt fehlt im *tun* ein Teilton bei etwa 490 Hz, der im Klang *na* enthalten ist. Hinsichtlich der hörbaren Teiltöne bestätigt sich nun die Vermutung von Raman (1934 S.188), dass das Fell der *Tabla* „... is loaded and damped in such a manner that all the overtones above the ninth are suppressed ...“.

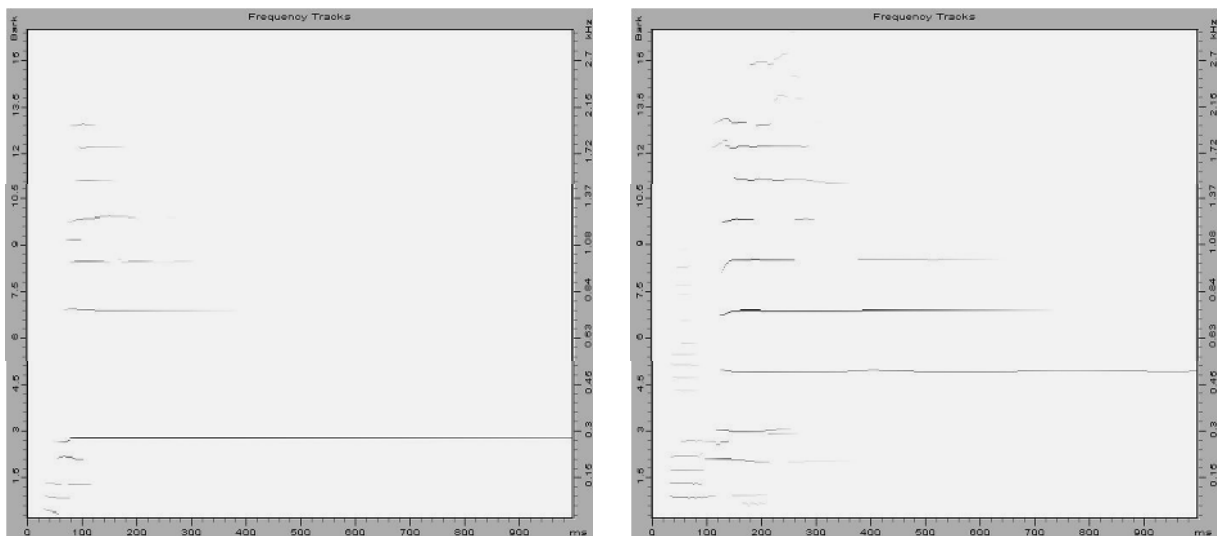
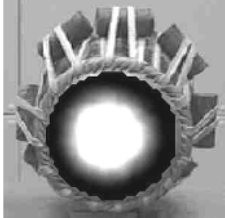
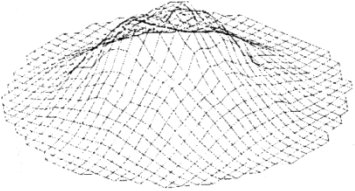
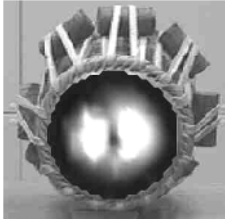
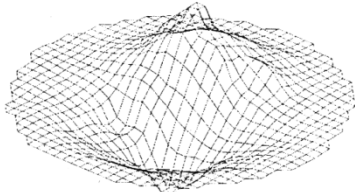
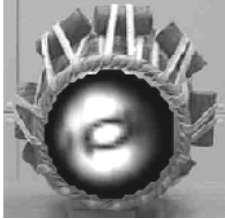
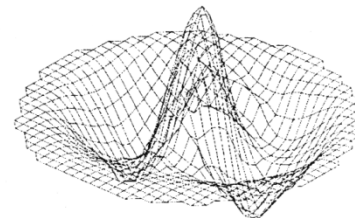
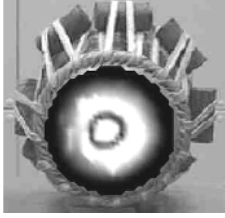
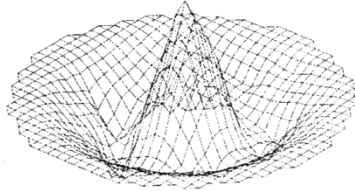
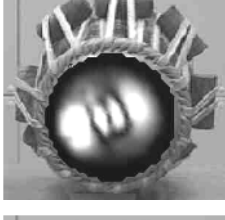
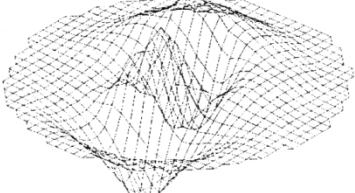
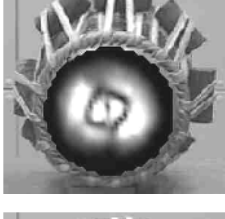
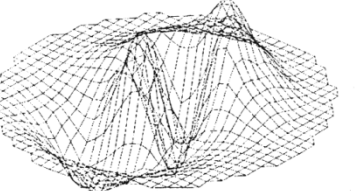
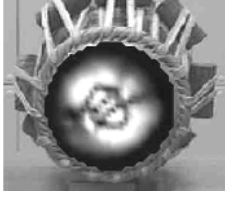
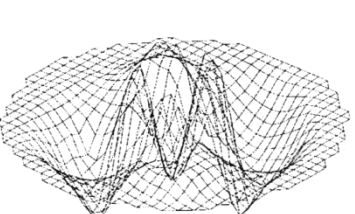


Fig. 62. Frequenzspuren (Frequency Tracks), ermittelt mit VIPER unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung, links: des *Tabla*-Klages *tun*, rechts: des *Tabla*-Klages *na*, beide gespielt von Parvinder Bharat.

Die Schwingungsmoden der *Tabla P* wurden bereits in Kapitel 3 präsentiert. Die Schwingungsmuster derjenigen Moden, die sich in den oben angegebenen Schallsignalen widerspiegeln, sind in Tab. VIII noch einmal zusammen gestellt. Diese Moden werden als „klangbildend“ bezeichnet. Neben den elementaren Schwingungsformen sind auch Misch-Formen (vgl. Fig. 22) aufgeführt, die sich durch Überlagerung ergeben. Zur Visualisierung werden neben den Schwingungsmustern, die dem Videobild überlagert sind (vgl. Fig. 19), ergänzend Schwingungsformen in 3D-Darstellung (vgl. Fig. 17) angegeben.

Tab. VIII. Klangbildende Schwingungsmoden der Tabla P

Mode	Frequenz Vibrometer	Frequenz Schallanalyse	Schwingungsmuster (<i>Magnitude</i>)	Schwingungsform (<i>Instant Value</i>)
0-1	240/260 Hz	272/292 Hz		
1-1	420/440 Hz	492/498 Hz		
Misch- Form	655 Hz	744/748 Hz		
0-2	660 Hz	744/748 Hz		
Misch- Form	870 Hz	984/1000 Hz		
1-2	870/895 Hz	984/1000 Hz		
Misch- Form, 2-2 (?)	1100 Hz	1228/1248 Hz		

Die Zuordnung wird erschwert durch die bereits erwähnte Tatsache, dass Parvinder Bharat seine *Tabla P* bei der Analyse der Schallsignale etwa zwei Halbtöne höher gestimmt hat als bei der Vibrometer-Messung, die an einem anderen Tag stattgefunden hatte. Um sie vergleichbar zu machen, müssen die Frequenzen der Schwingungsmoden um den Faktor 1,12 vergrößert werden, der dem Ganzton-Intervall (Rieländer 1982) entspricht. Damit ergibt sich der Zusammenhang zwischen mechanischen Schwingungen des Felles und den Teiltönen, der den Zeilen von Tab. VIII zu entnehmen ist. Differierende Frequenzen im Zusammenhang mit der Vibrometer-Messung deuten auf Moden-Splitting oder ähnliche Effekte hin. Bei der Schallanalyse bewirken vor allem unterschiedliche Auflösungen, dass die Frequenzen der FFT-Zerlegung von denen der VIPER-Analyse geringfügig abweichen können.

8.2. Schwingung und Schall von *tun*

tun ist ein „offener“ Schlag, d.h. in Analogie zur offenen bzw. leeren Spielweise einer Saite liegt kein Finger auf dem Fell der *Tabla*. Parvinder Bharat schlägt mit dem Zeigefinger der rechten Hand das Fell etwas außermittig auf zwei Dritteln der Strecke zwischen Rand und Mitte an. Manche Spielanleitungen empfehlen auch den Anschlag in der Mitte des schwarzen Flecks. Das Ergebnis der objektiven Analyse ist als Wasserfall in Fig. 63 dargestellt. Es gibt leicht vergrößert das Diagramm wieder, das bereits in Fig. 30 oben zu sehen war.

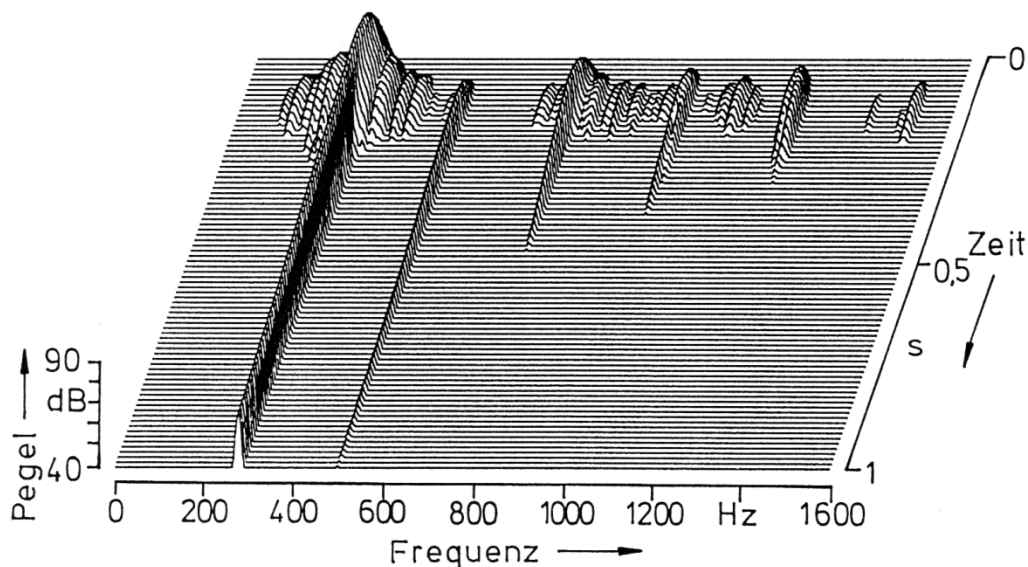


Fig. 63. Schallpegel-Frequenz-Zeit-Diagramm des *Tabla*-Klages *tun*, gespielt von Parvinder Bharat.

Ein Anschlag vermag nie solche Schwingungsmoden des Felles hervorzurufen, die an der Anschlagstelle einen Knoten aufweisen. So würde ein Schlag auf das Zentrum des schwarzen Flecks der *Tabla* alle rotationssymmetrischen Schwingungen ($m = 0$), jedoch keine antisymmetrischen Moden ($m = 1, 2, 3, \dots$) anregen. Ein etwas außermittiger Anschlag, wie ihn Parvinder Bharat gebraucht, ruft jedoch eine sehr große Zahl von Schwingungsmoden hervor. Wie Fig. 63 zeigt, ergibt die FFT-Analyse im Bereich bis 1,6 kHz etwa sechs Teiltöne, die unterschiedliche Anfangsamplituden haben und unterschiedlich schnell abklingen. Besonders stark prägt sich der erste Teiltöne aus, der auch am längsten nachklingt.

Die Tatsache, dass ein Teilton physikalisch vorhanden und objektiv nachweisbar ist, bedeutet noch nicht, dass er für die Hörempfindung tatsächlich von Belang ist. Dies wird in Fig. 64 am Beispiel des zweiten Teiltones besonders deutlich. Die VIPER-Analyse ergibt, dass dieser Teilton sich subjektiv nicht auswirkt, da er in Folge der spektralen Maskierung verdeckt wird. Es verbleiben vier wesentliche Teiltöne. Es sind dies:

- 0-1-Ton mit etwas mehr als 270 Hz, hervorgerufen von der rotationssymmetrischen 0-1-Mode; wird sehr stark angeregt und klingt sehr lange nach.
- 0-2-Ton mit ca. 745 Hz, hervorgerufen von der rotationssymmetrischen 0-2-Mode; wird weniger stark angeregt und klingt nicht sehr lange nach.
- 1-2-Ton mit etwas weniger als 1000 Hz, höchstwahrscheinlich hervorgerufen von der antimetrischen 1-2-Mode; wird nicht stark angeregt und klingt nicht sehr lange nach.
- 2-2-Ton mit ca. 1230 Hz, höchstwahrscheinlich hervorgerufen von der antimetrischen 2-2-Mode; wird nur schwach angeregt und klingt auch nicht sehr lange nach.

Darüber hinaus liegen noch einige weitere Teiltöne von untergeordneter Bedeutung vor.

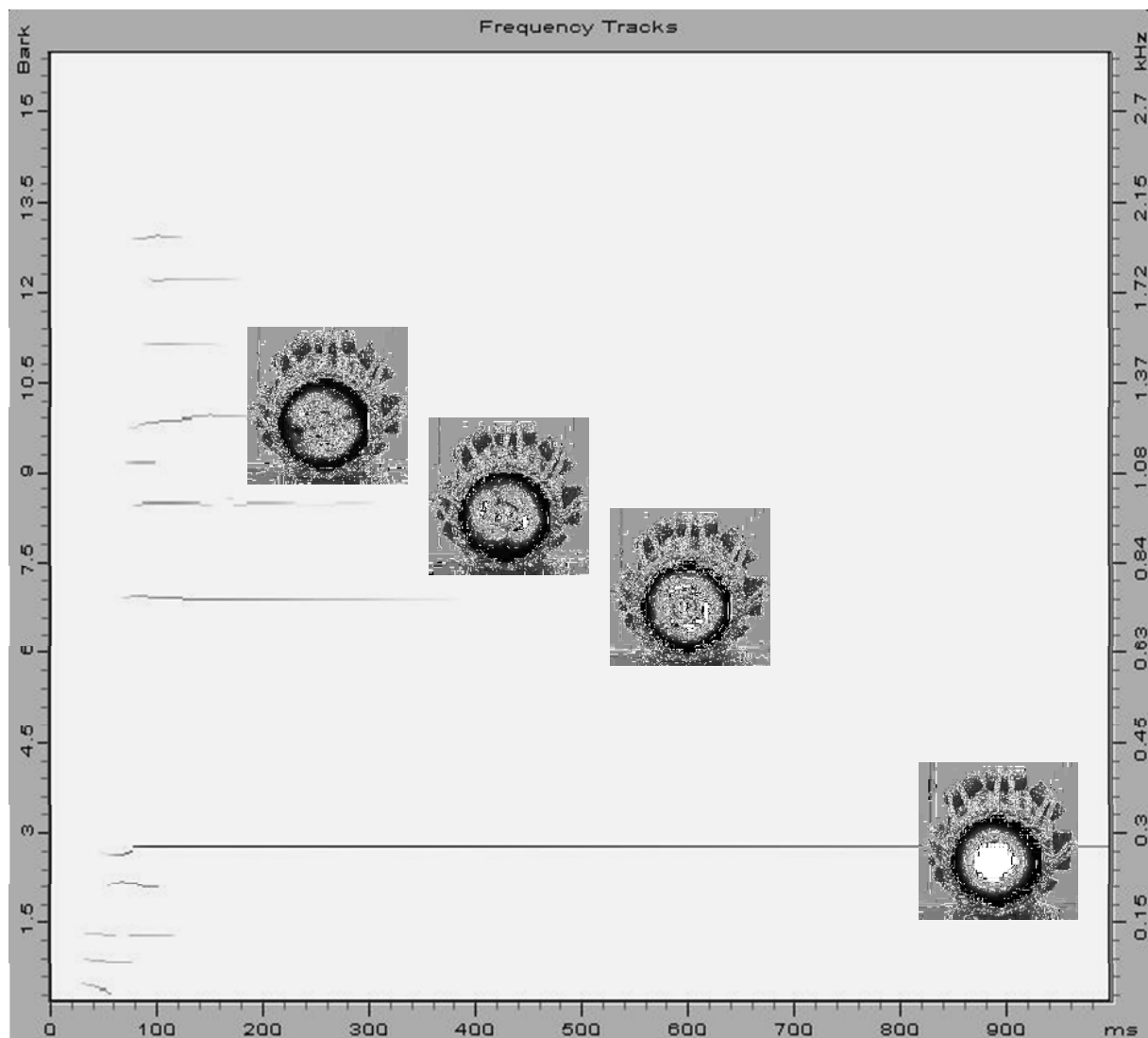


Fig. 64. Frequenzspuren (Frequency Tracks) des Tabla-Klangeres *tun* (Spieler Parvinder Bharat), ermittelt mit VIPER unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung. Die Schwärzung ist ein Maß für den Pegel. Die Schwingungsmuster der klangbildenden Moden sind eingefügt.

Die in Fig. 64 eingefügten Schwingungsmuster machen deutlich, wie das Fell sich bewegt, wenn es den zugeordneten Teilton erzeugt. Durch die spezielle Art und den Ort des Anschlags evoziert Parvinder Bharat demnach vor allem die 0-1-Mode und dadurch einen sehr starken Grundton mit etwas mehr als 270 Hz. Dessen Spektraltonhöhe dürfte die Tonhöhe des Gesamtklanges *tun* bestimmen. Die übrigen Teiltöne rühren von der 0-2-, der 1-2- und vermutlich von der 2-2-Schwingung her. Die zugehörigen Teiltöne bilden über diesem Grundton ein unvollständiges, geringharmonisches komplexes Spektrum (Terhardt 1998) mit den Intervallen 1 : 2,75 : 3,67 : 4,59. Auf diese Weise entsteht ein Klang, der lange anhält und dem man eine relativ tiefe Tonhöhe zuordnet. Klänge dieser Art haben bezüglich der Tonhöhe Terhardt (1972 a und b) im Allgemeinen sowie Houtsma und Eggen (1990) im Besonderen untersucht.

8.3. Schwingung und Schall von *na*

Im Gegensatz zum vorher betrachteten Fall wird bei diesem Klang das Fell nicht „leer“ gespielt. Vielmehr wird es in ähnlicher Weise „gegriffen“, wie dies bei der Erzeugung von Flageolett-Tönen bei Saiten geschieht. Nach Aussagen von Parvinder Bharat liegt der Ringfinger der rechten Hand ohne Druck auf dem Fell der *Tabla*. Manchen Anleitungen zufolge (z.B. *Basic Strokes and Bols*, Courtney 2002) hat zusätzlich auch der kleine Finger drucklosen Kontakt mit dem Instrument. Währenddessen schlägt der Zeigefinger derselben Hand das Fell am Rand an. Das Ergebnis der FFT-Analyse ist im Wasserfalldiagramm von Fig. 65 dargestellt. Dies ist die leicht vergrößerte Version des oberen Teilbildes von Fig. 26.

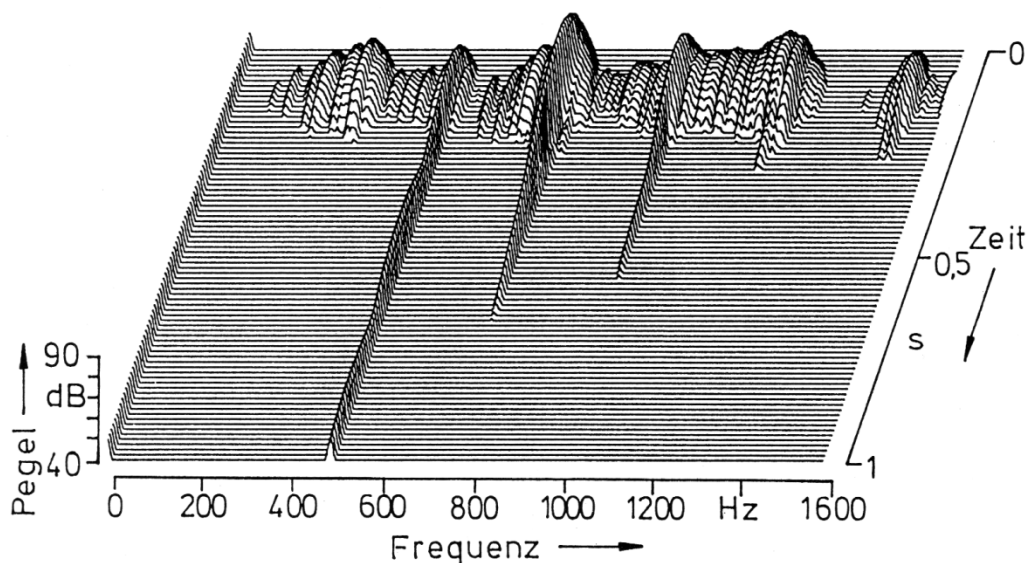


Fig. 65. Schallpegel-Frequenz-Zeit-Diagramm des *Tabla*-Klanges *na*, gespielt von Parvinder Bharat.

Offenbar verhindert der sanft aufliegende Ringfinger, ggf. zusammen mit dem kleinen Finger, dass das Fell der *Tabla* an der Kontaktstelle schwingt und erzwingt somit einen Knotenradius. Rotationssymmetrischen Schwingungen ($m = 0$) werden demzufolge gar nicht oder höchstens sehr schwach hervorgerufen. Zusätzlich bewirkt der Anschlag am Rand, dass antimetrische Moden ($m = 1, 2, 3, \dots$) sehr stark hervortreten. Die FFT-Analyse im Bereich bis 1,6 kHz zeigt in Fig. 65 ungefähr sechs Teiltöne. Diese haben unterschiedliche Anfangsamplituden und klingen verschieden rasch ab.

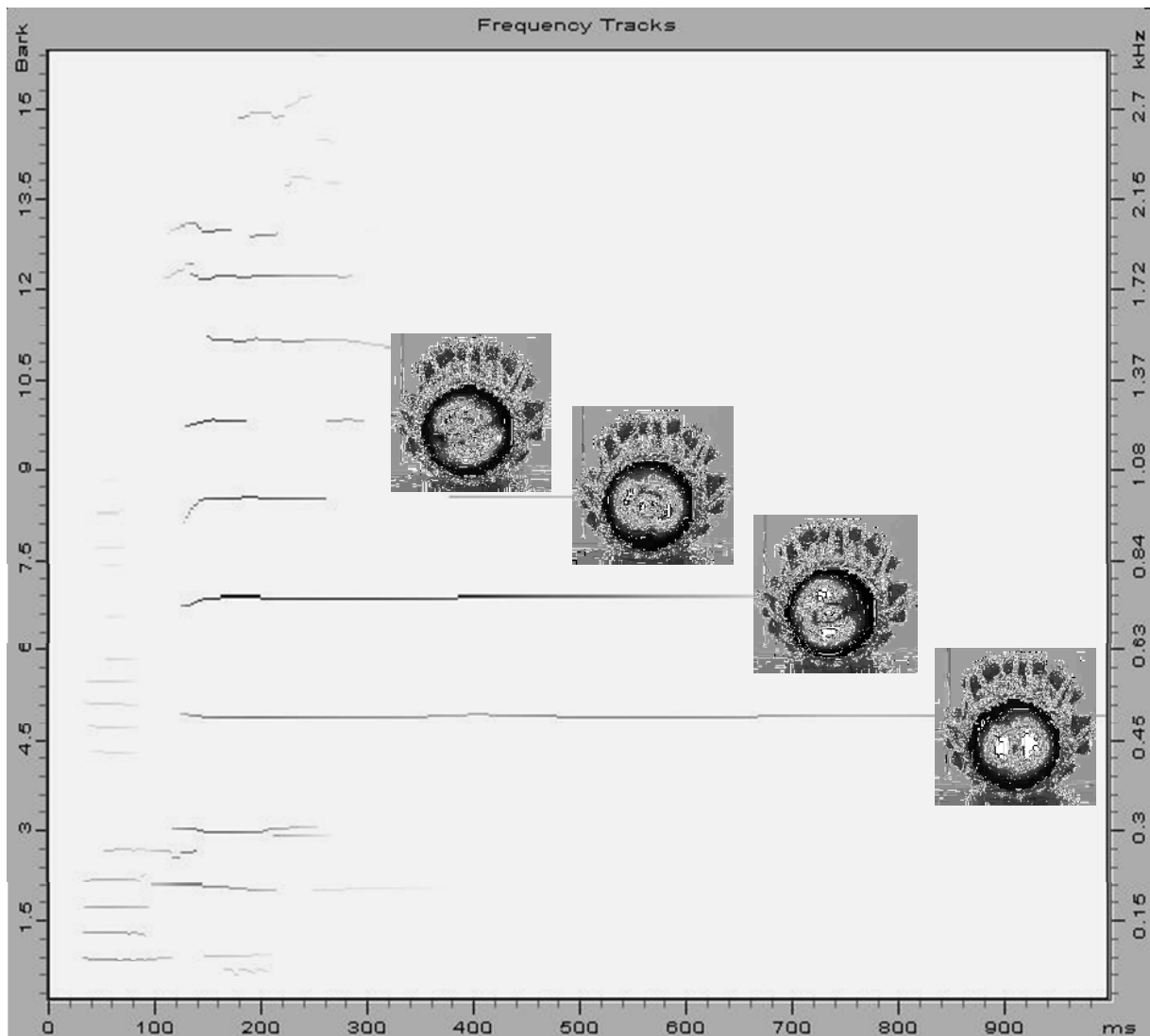


Fig. 66. Frequenzspuren (Frequency Tracks) des Tabla-Klanges *na* (Spieler Parvinder Bharat), ermittelt mit VIPER unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung. Die Schwärzung ist ein Maß für den Pegel. Die Schwingungsmuster der klangbildenden Moden sind eingefügt.

Fig. 66 zeigt das Ergebnis der VIPER-Analyse, in das wiederum die Schwingungsmuster eingefügt sind. Es werden ausschließlich Schwingungen mit Knotenradien evoziert. So wird erwartungsgemäß die 0-1-Mode kaum angeregt, so dass der zugehörige Teilton bei diesem Klang praktisch nicht in Erscheinung tritt. Am längsten klingt der Teilton nach, den die 1-1-Mode hervorruft, weist aber nur eine geringe Amplitude auf. Sehr stark ist ein weiterer Teilton ausgeprägt, der eine große Anfangsamplitude besitzt, jedoch relativ schnell an Pegel verliert. Insgesamt verbleiben vier wesentliche Teiltöne. Dies sind:

- 1-1-Ton mit etwas weniger als 500 Hz, hervorgerufen von der antimetrischen 1-1-Mode; wird nicht sehr stark angeregt, klingt aber sehr lange nach.
- „Misch“-Ton mit ca. 745 Hz, höchstwahrscheinlich hervorgerufen von der zugehörigen Misch-Mode; wird sehr stark angeregt, klingt jedoch nicht sehr lange nach.
- 1-2-Ton mit etwas weniger als 1000 Hz, hervorgerufen von der antimetrischen 1-2-Mode; klingt etwa so lang nach wie obiger „Misch“-Ton, wird jedoch nicht so stark angeregt.

- „Misch“-Ton mit ca. 1230 Hz, höchstwahrscheinlich hervorgerufen von der Misch-Form, zu der u.a. auch die 2-2-Mode beiträgt; wird nur schwach angeregt und klingt nicht sehr lange nach.

Daneben lassen sich noch einige wenige Teiltöne von untergeordneter Bedeutung nachweisen.

Die Frequenzspuren in Fig. 66 machen diejenigen Teiltöne deutlich, welche zur Hörempfindung beitragen können. Die eingefügten Schwingungsmuster veranschaulichen, wie sich das Fell bewegt, wenn es den entsprechenden Teilton erzeugt. Offensichtlich unterdrückt Parvinder Bharat durch das Auflegen eines Fingers die 0-1-Mode samt zugehörigem Grundton. Er erzeugt einen lang anhaltenden Teilton mit etwa 500 Hz und einen anfänglich sehr starken Teilton bei etwa 745 Hz. Weitere Teiltöne rühren von der 1-2-Mode und eventuell von der 2-2-Schwingung her. Die zugehörigen Teiltöne fügen sich in eine weitestgehend harmonische Reihe ein, deren „*Missing Fundamental*“ bei etwa 250 Hz liegt. Ganzheitlich wird dem Gesamtklang *na* jedoch eine hohe Tonhöhe zugeordnet, die vor allem vom stärksten Teilton bei etwa 745 Hz dominiert zu sein scheint.

8.4. Zusammenfassende Bemerkung

Wenn beim Tabla-Paar der Zusammenhang zwischen Schwingung und Schall untersucht werden soll, ist die *Bayan* derzeit das weniger geeignete Objekt. Bei der Schwingungsmessung war das Fell unbelastet. Im Gegensatz dazu drückt beim Spielen der Ballen der linken Hand auf das Fell des Instruments. Dadurch kann der Spieler Fellspannung und Schwingungsformen beeinflussen und somit insbesondere die Frequenz des Grundtones modulieren. Da folglich bei der Schallmessung andere Bedingungen als bei der Schwingungsmessung vorlagen, sind die Ergebnisse nicht direkt miteinander vergleichbar.

Bei der *Tabla* sind die Verhältnisse insofern einfacher, als das Fell nicht gedrückt wird, sondern mehr oder weniger frei schwingen kann. Vor allem die beiden tonalen Klänge *tun* und *na* eignen sich dazu, die Zusammenhänge zwischen den Teiltönen des akustischen Signals und den Teilschwingungen der mechanischen Bewegung aufzuzeigen. Offenbar wird zwar nicht jedes der Schwingungsmuster, die nach Raman (vgl. Abschnitt 3.5) „gegriffen“ werden können, in der Spielpraxis tatsächlich genutzt. Der „offene“ Klang *tun* sowie der nach Flageolett-Art drucklos gegriffene Klang *na* gehören jedoch zum Standard-Repertoire eines jeden Tabla-Spielers. Für die Diskussion erweist es sich als zielführend, die physikalische (beispielsweise im FFT-Wasserfall-Diagramm dargestellte) Information hörgerecht darzustellen und auf diejenigen Bestandteile zu reduzieren, die für das Hören bedeutsam sind. Die zwar physikalisch vorhandenen, aber nicht hörbaren Anteile interessieren in diesem Zusammenhang nicht und brauchen demzufolge auch nicht diskutiert zu werden. Das mit VIPER ermittelte Frequenzspuren-Zeit-Muster, bei dem die spektrale Verdeckung berücksichtigt ist, erweist sich hierfür als geeignet.

Am Beispiel dieser beiden Klänge konnte belegt werden, dass es mit Kenntnis der Schwingungsmoden möglich ist, die hörbaren Teiltöne den Schwingungen des Felles zuzuordnen. Damit wird deutlich, welche Moden (und Teiltöne) der Spieler mittels geschickter Technik evoziert und welche er unterdrückt. Dabei ist zunächst wesentlich, wo auf dem Fell Knotenlinien erzwungen werden und wo das Fell angeregt wird. Darüber hinaus ist auch von Bedeutung, wie das Fell in Hinsicht auf die örtliche Verteilung und den zeitlichen Verlauf angeschlagen wird. All dies bei der Untersuchung der übrigen Tabla-Klänge zu berücksichtigen, wäre eine zeitaufwendige, aber lohnende Aufgabe. Den hier gegebenen Rahmen würde sie allerdings sprengen.

9. ABSCHLIESSENDE DISKUSSION

Membranophone - das sind Instrumente mit schwingendem Fell - werden in der abendländischen Musik vorwiegend perkussiv eingesetzt. Den Schallen, die sie erzeugen, lässt sich mit ganz wenigen Ausnahmen nur eine sehr diffuse Tonhöhe zuordnen. Daher ist ihnen üblicherweise die Aufgabe zugeteilt, mit Schlägen der Pauke Akzente zu setzen oder mit Schlagfolgen der Trommel Rhythmus zu schaffen. Dieser spielt in der abendländischen Musik keine sehr hervorgehobene Rolle, was schon daran erkennbar ist, dass ein klassisches Orchester in vielen Fällen völlig ohne Membranophone instrumentiert ist.

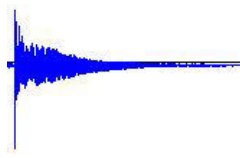
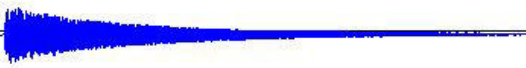
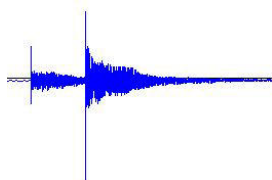
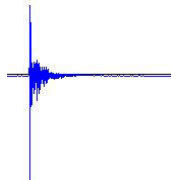
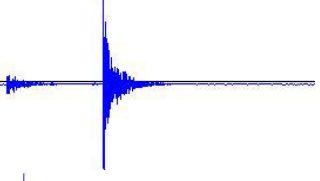
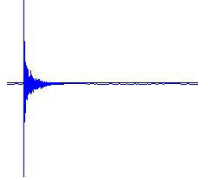

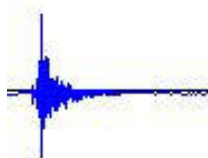
Pop-Musik ist dagegen ohne Schlagzeug, d.h. eine Ansammlung vorwiegend von Membranophonen oder ihren elektronischen Surrogaten, schlichtweg nicht denkbar. Einen gewissen Höhepunkt der Darbietung dieser Musik stellt immer das Solo des Schlagzeugers dar. Ähnliches, wenngleich mit geringerer Lautstärke, vermag ein Tabla-Spieler allein mit seinen Händen auf zwei kleinen Trommeln zu leisten. Diese - die zierlichere *Tabla* und die etwas voluminösere *Bayan* - sind Gegenstand des vorliegenden Berichts. Mit ihnen erzeugt der Spieler eine Vielzahl von Schallen, die nicht nur perkussiven Charakter haben, sondern auch die Empfindung unterschiedlicher Tonhöhen hervorrufen können. Verkürzt ausgedrückt: Einem Pop-Schlagzeuger eine Stunde lang zuzuhören, strengt etwas mehr an und erbaut nicht ganz so sehr, wie ebenso lange einem Tabla-Spieler zu lauschen.

Im Kreise fernöstlicher Kulturen kommt seit jeher Perkussionsinstrumenten und insbesondere Membranophonen eine wesentlich größere Bedeutung zu, als dies in der klassischen Musik des Abendlandes der Fall ist. In der traditionellen Musik Nordindiens gilt dies in hohem Maße für das Tabla-Paar. Die Kunst, diese zwei Instrumente allein mit den Händen auf eine äußerst vielfältige Art zu bedienen, hat sich zu einem Stand entwickelt, der einem Erstaunen abnötigt.

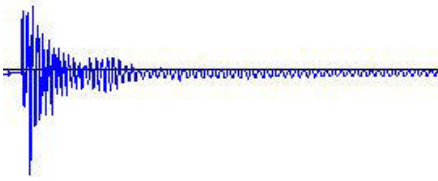

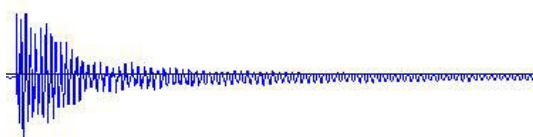

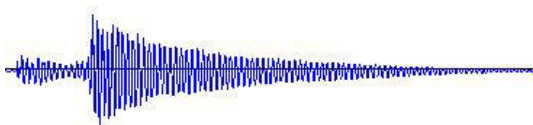
Im Sommer 2002 bot sich die Gelegenheit, Schwingungsmessungen an einem Tabla-Paar durchzuführen und einige Klänge aufzunehmen, die zwei professionelle Tabla-Spieler indischer Herkunft auf ihren Instrumenten erzeugt haben. Die Schwingungen des Felles einer *Tabla* und einer *Bayan* wurden berührungsfrei mit dem Laser-Vibrometer gemessen. Die Ergebnisse sind im dritten Kapitel zusammen gestellt. Während das Fell der größeren *Bayan* beim Spielen – anders als bei der Messung - mit dem Handballen gedrückt wird, schwingt das der kleineren *Tabla* weitgehend frei. Für einen Vergleich zwischen der gemessenen Schwingung und dem Schallsignal eignet sich demzufolge die *Tabla* besser als ihre große Schwester. Sie wurde deshalb besonders intensiv betrachtet.

Das *Tabla*-Fell ist mehrschichtig aufgebaut und besitzt einen zentralen schwarzen Fleck, der die Massebelegung zur Mitte hin ansteigen lässt. Dieser spezielle Aufbau in Kombination mit der Luft, die im Kessel eingeschlossen ist, bewirkt, dass die Schwingungsfrequenzen teilweise beträchtlich von denjenigen differieren, welche die Theorie für die homogene *in-vacuo*-Membran ergibt. Die Intervalle der Frequenzen nähern sich einer harmonischen Reihe an. Es gehört zum Wesen der *Tabla*, dass unterschiedliche Schwingungsmoden annähernd die gleichen Frequenzen haben können. Die Misch-Formen, die daraus resultieren, erweisen sich geradezu als der Normalfall und als kennzeichnend für die *Tabla*. Die Fluid-Struktur-Interaktion, den mehrschichtigen Aufbau der Membran und deren ungleichmäßige Massenbelegung theoretisch zu erfassen, würde einen extrem hohen Aufwand bedeuten. So zeigt sich, dass das Experiment der geeignete Weg ist, die Frequenzen des *Tabla*-Felles und ihre Zuordnung zu den Schwingungsformen zu untersuchen.

Tab IX. Schalle, welche die Spieler ausschließlich auf ihren Tablas erzeugt haben

Bezeichnung	Zeitfunktion	gespielt von	
		Parvinder B.	Harpit S.
<i>na</i> (5.1)		(A 7)	(A 8)
<i>tun</i> (5.2)		(A 9)	(A 10)
<i>kalan</i> (5.3)		(A 11)	
<i>tik</i> (5.4)			(A 12)
<i>tit</i> (5.5)		(A 13)	
<i>dhin</i> (5.6)			(A 14)
<i>dhit</i> (5.7)			(A 15)
<i>dhir-dhir</i> (5.8)			(A 16)

Tab X. Schalle, welche die Spieler mittels ihrer Bayans erzeugt haben

Bezeichnung	Zeitfunktion	gespielt von Parvinder B. Harpit S.	
<i>dhin</i> <i>Tabla + Bayan</i> (6.1)		(A 17)	
<i>dhir-dhir</i> <i>Tabla + Bayan</i> (6.2)		(A 18)	
<i>ke</i> <i>Bayan (unmod.)</i> (6.3)		(A 19)	
<i>ke</i> <i>Bayan (moduliert)</i> (6.3)		(A 20)	(A 21)
<i>gin</i> <i>Bayan (moduliert)</i> (6.4)			(A 22)

Der nächste Block der Studie ist den *Tabla*-Klängen gewidmet, welche die beiden Spieler auf ihren Instrumenten erzeugt hatten. Die Tab. IX und X geben noch einmal eine Zusammenstellung der Schalldruck-Zeitfunktionen der *Tabla*-Klänge (Tab. IX) bzw. der Kombinationsklänge (*Tabla* mit *Bayan*) sowie der reinen *Bayan*-Klänge (Tab. X). Diese Schallsignale wurden mit Hilfe der *Fast Fourier Transformation* (FFT) analysiert, einem Verfahren, das rein mathematisch-physikalisch motiviert ist und demzufolge keinen Bezug auf die Eigenschaften des Gehörs nimmt. Es zeigt die gesamte Information auf, die das analysierte Signal enthält. Die Ergebnisse für die Klänge, die von der *Tabla* dominiert sind, finden sich im fünften Kapitel. Klänge, bei denen die *Bayan* den tonalen Part übernimmt, sind im sechsten Kapitel behandelt. Insbesondere die „Wasserfall“-Darstellung der Schallsignale, in denen das Schallpegel-Frequenz-Spektrum über der Zeit aufgetragen ist, gewährt Einblick in perkussive und

tonale Anteile der Klänge. Sie veranschaulicht, welche Teiltöne im Schallsignal enthalten sind, wie stark diese angeregt werden und wie lange sie „stehen“.

Für die tonalen Klänge der mit der linken Hand gespielten *Bayan* (vgl. Tab. X) ergibt die objektive Analyse, dass vor allem der Grundton den Höreindruck bestimmen wird. Solange das Fell unbelastet ist, liegt dessen Frequenz etwas unterhalb von 100 Hz. Der Spieler kann sie „ziehen“, indem er mit dem Handballen auf das Fell drückt. Dabei variiert er die Stärke des Drucks und den Ort. Die Spektraltonhöhe, die dieser variable Grundton hervorruft, ist charakteristisch für den Klang der *Bayan*.

Bei der mit der rechten Hand gespielten *Tabla* liegen die Verhältnisse komplizierter. Dieses Instrument kann zahlreiche Teiltöne erzeugen, von denen einige annähernd harmonische Frequenzintervalle bilden. Der Spieler hat und nutzt mehrere Möglichkeiten, das Schallsignal zu formen:

- Zum einen schlägt der Spieler seine *Tabla* mit unterschiedlichen *T e c h n i k e n* (z.B. mit der flachen Hand, mit einem einzelnen Finger, mit langem oder kurzem Kontakt usw.) an. Dadurch variiert er die Zeitfunktion der Anregung und vermag neben verschiedenartigen perkussiven Schallen auch tonale Klänge hervorzurufen.
- Zum anderen variiert der Spieler auch den *O r t*, an dem er seine *Tabla* anschlägt. Da eine Schwingung nie im Knoten angeregt werden kann, ruft er auf diese Weise manche Schwingungsmoden (und Teiltöne) nicht hervor. Gleichzeitig evoziert er andere Schwingungsformen, die er im Schwingungsbauch anregt, besonders stark. Durch Unterdrücken und Hervorheben beeinflusst er das Spektrum der Schwingungsmoden. Dies versetzt ihn in die Lage, neben perkussiven Schallen auch tonale Klänge unterschiedlicher Tonhöhe und Klangfarbe zu erzeugen.
- Darüber hinaus kann der Spieler das Fell „*g r e i f e n*“. Das bedeutet, dass er es entweder „offen“ spielt oder auch ohne Druck einen oder mehrere Finger an bestimmte Stellen des Felles legt. Dies entspricht der Erzeugung von Flageolett-Tönen bei Saiteninstrumenten. Wo der Finger liegt, wird ein Schwingungsknoten erzwungen. All diejenigen Schwingungsformen, die an der betreffenden Stelle keinen Knoten aufweisen, werden überhaupt nicht erst hervorgerufen bzw. kommen sehr rasch zum Erliegen. Innerhalb gewisser Grenzen lässt sich damit die musikalische Tonhöhe der Klänge kontrollieren.

Diese drei Möglichkeiten, aus der Fülle möglicher Schwingungsformen des *Tabla*-Felles gezielt welche zu unterdrücken bzw. hervorzuheben, werden auf mannigfache Weise miteinander kombiniert. Dies ergibt vielfältige Schläge, die ihrerseits wiederum eine Vielfalt von perkussiven und tonalen Klängen hervorrufen; was sich bereits in den Zeitfunktionen von Tab. IX abzeichnet. Um den Teiltongehalt dieser Klänge fundiert interpretieren zu können, erweist sich die Kenntnis der zum jeweiligen Teilton gehörenden Teilschwingung als unerlässlich.

Wird für die Interpretation das Schallpegel-Frequenz-Zeitdiagramm herangezogen, ist diese Aufgabe unter Umständen schwieriger, als sie eigentlich sein müsste: Die FFT zeigt in aller Regel mehr, als für die Hörempfindung relevant ist. Diesen Nachteil, der bei der Analyse musikalischer Schalle häufig auftritt, behebt die gehörbezogene Analyse. Deren Motivation ist es, das Schallsignal in einer Weise zu verarbeiten, die derjenigen des Gehörs möglichst nahe kommt. Es steht ein kommerzielles Programmpaket (VIPER der Firma Cortex) zur Verfügung, das hierfür eingesetzt wurde. Es berücksichtigt das Auflösungsvermögen des Gehörs, bildet die Extraktion von Teiltönen nach und simuliert – wenn derzeit bedauerlicherweise auch noch nicht in vollem Umfang, - die spektrale Maskierung. Im siebenten Kapitel sind die einzelnen Bearbeitungsschritte erläutert und an Beispielen illustriert. Die erste Stufe ist das ASP (*Auditory Spectrogram*), das Endergebnis sind die Frequenzspuren (*Frequency Tracks*) unter Einschluss der spektralen Maskierung (*Nonlinear Masking*). Für jeden Klang sind ASP und Frequenzspuren in farbiger Darstellung im Anhang aufgeführt. Die Tab. IX und X weisen

auf die entsprechenden Seiten im Anhang hin; eine weitere Zusammenstellung mit kurzer Charakterisierung der Klänge findet sich in A 6.

Am Beispiel der zwei tonalen *Tabla*-Klänge **tun** und **na** ist im achten Kapitel die Verbindung zwischen den wahrnehmbaren Teiltönen und den entsprechenden Teilschwingungen des *Tabla*-Felles hergestellt. Dabei zeigt sich Folgendes:

Der Klang **tun** (vgl. Abschnitt 8.2) entsteht, wenn das Fell nicht „gegriffen“, sondern „offen“ gespielt wird. Der Anschlagpunkt liegt nicht weit von der Mitte entfernt. Besonders stark werden demnach rotationssymmetrische Teilschwingungen angeregt. Der tiefste, stärkste und am längsten anhaltende Teilton ist derjenige, welcher von der 0-1-Schwingung herrührt. Er dominiert den Klangeindruck und bestimmt mit seiner Spektraltonhöhe die musikalische Tonhöhe des Gesamtklages.

Wenn er den Klang **na** (vgl. Abschnitt 8.3) hervorrufen will, „greift“ der Spieler das Fell seiner *Tabla*. Der Ringfinger liegt ohne Druck auf dem Fell, was der Erzeugung eines Flageolett-Tones bei einem Saiteninstrument gleichkommt. Schwingungsformen, die an der Auflagestelle keinen Knoten aufweisen, werden nicht hervorgerufen. Dies gilt insbesondere für die 0-1-Teilschwingung und den zugehörigen Teilton. Der tiefste hörbare Teilton stammt von der antimetrischen 1-1-Schwingung. Relativ rasch abklingend, aber mit hohem Anfangspegel stellt sich ein Teilton ein, der höchstwahrscheinlich von einer Misch-Form herrührt. Diese entsteht durch die Überlagerung der 2-1- und der 0-2-Mode und wurde bereits im Jahre 1934 von Raman beschrieben. Die Spektraltonhöhe dieses hohen Teiltones bestimmt die musikalische Tonhöhe des Gesamtklages. Möglicherweise wirkt daneben noch im Sinne von „*Missing Fundamental*“ eine Virtuelle Tonhöhe, die etwas weniger als einen Ganzton unterhalb der musikalischen Tonhöhe des vorher betrachteten Klages **tun** wahrgenommen wird.

Diese beiden Schalle sind nur eine kleine Auswahl aus der Vielzahl der Klänge, die ein *Tabla*-Spieler für seine Kunst nutzt. Sie machen aber bereits wesentliche Erkenntnisse deutlich, die auch für die übrigen Schallsignale gelten:

- Die Interpretation des Teiltonaufbaus gelingt an Hand der gehörbezogenen Darstellung vor allem dann zielgerichtet, wenn die spektrale Maskierung berücksichtigt und damit die physikalische Information auf denjenigen Anteil reduziert ist, der für das Hören tatsächlich von Belang ist. So ist z.B. im Klang **tun** der zweite Teilton physikalisch vorhanden und nachweisbar, wirkt sich in Folge der spektralen Maskierung jedoch nicht auf die Hörempfindung aus.
- Neben der geeigneten Analyse des Schallsignals ist die Kenntnis der Schwingungsformen des Felles unabdingbare Voraussetzung für das Verständnis der Vorgänge beim Spielen. Erst sobald bekannt ist, mit welcher Ortsfunktion das Fell schwingt, wenn es einen Teilton bestimmter Frequenz erzeugt, lassen sich Fingersatz und Anschlagtechnik des *Tabla*-Spielers zielführend interpretieren. Diese grundlegende Erkenntnis hat bereits Raman in der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts formuliert. Er hat sie genutzt, um die tradierte Spielweise – insbesondere der kleineren der beiden Trommeln, der *Tabla*, - zu analysieren und weiterführende Hinweise zu geben. Ramans Vorgehensweise ist immer noch aktuell. Die Schwingungsformen, die den Schlüssel zum Verständnis darstellen, schnell und schonend zu erfassen, stellt angesichts der heute verfügbaren Laser-Techniken keine Schwierigkeit mehr dar.

Das *Tabla*-Paar ist ein faszinierendes Instrument. Wenn er seine beiden Trommeln *Tabla* und *Bayan* richtig zu bedienen versteht, kann der Spieler lediglich mit den Händen eine unerwartete Fülle von völlig unterschiedlichen Klängen erzeugen. Das Ergebnis seiner Kunst anzuhören, ruft Erstaunen hervor und bereitet große Freude. Dem Spieler darüber hinaus bei der Ausübung seiner Kunst zuzusehen, steigert den ästhetischen Genuss noch weiter. Der Gipfel des intellektuellen Vergnügens ist es jedoch, darüber hinaus verstehen zu können, wie die

Klangerzeugung vonstatten geht. Moderne Mess- und Analyseverfahren, mit denen sich die physikalischen Hintergründe untersuchen lassen, sind verfügbar und erweisen sich als geeignet für diese Aufgabe. Sie ermöglichen den Blick auf wesentliche Zusammenhänge. Je mehr man sich mit dem vibroakustischen Hintergrund befasst, desto mehr Hochachtung empfindet man. Die Bewunderung gilt sowohl den indischen Instrumentenmachern, die dieses scheinbar schlichte Instrument so weit entwickelt haben, als auch den Spielern, die ihre Spielkunst zu einem derart hohen Niveau verfeinert haben.

Neben den Besitzern und virtuosen Spielern der beiden Tabla-Paare, den Herren Parvinder Bharat und Harpit Sahota von der Gruppe „El Nombre“ aus Liverpool, gebührt drei Damen Dank für ihre Mitarbeit. Es sind dies Frau Dipl.-Phys. Sieglinde Iosif, die Internet-Recherchen durchgeführt und das Manuskript durchgesehen hat, Frau Dipl.-Ing. Karin Danneberg, die sämtliche VIPER-Analysen ausgeführt hat, und Frau Dr.-Ing. Miriam Valenzuela, die hierzu aus dem Schatz ihrer Erfahrungen heraus Hinweise für die geeignete Auswahl der Analyseparameter beigetragen hat.

LITERATUR

- Banerjee, B.M. und Nag, D., *The acoustical character of sounds from Indian twin drums. Acustica* 75 (1991), 206-208.
- Buchner, A., *Handbuch der Musikinstrumente. Verlag Werner Dausien, 3. Aufl., 1995.*
- Chladni, E.F.F., *Entdeckungen über die Theorie des Klanges. Weidmanns Erben und Reich, Leipzig 1787.*
- Courtney, D., *Chandra and David's Tablasite – <http://chandrakantha.com/tablasite>. Insbesondere: „The tabla pudi“ und „Psychoacoustics of the musical pitch of tabla“. WWW 2002.*
- De, S., *Vibration of a kettledrum, J. Acoust. Soc. Amer.* 51 (1972 a), 1768-1770.
- De, S., *Vibration of a loaded kettledrum. Journal of Sound and Vibration* 20 (1972 b), 79-92.
- De, S., *Experimental study of the vibration characteristics of a loaded kettledrum, Acustica* 40 (1978), 206-210.
- Falk, A. *Gehörbezogene Analyse von akustischen Signalen. Diplomarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 2003.*
- Fastl, H. und Fleischer, H., *Über die Ausgeprägtheit der Tonhöhe von Paukenklängen. In: Fortschritte der Akustik (DAGA '92). DPG-GmbH, Bad Honnef 1992, 237 - 240.*
- Fleischer, H., *Die Pauke. Mechanischer Schwinger und akustischer Strahler. Forschungsbericht 01/88 aus dem Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 1988.*
- Fleischer, H., *Die Pauke. Theoretische und experimentelle Untersuchungen an einem Musikinstrument. Hochschulkurier der UniBw München, Neubiberg Juni 1990 a.*
- Fleischer, H., *Schwingung und Schallfeld eines Paukenfelles. In: Fortschritte der Akustik (DAGA '90). DPG-GmbH, Bad Honnef 1990 b, 549-552.*
- Fleischer, H., *Akustische Untersuchungen an Orchesterpauken. Forschungsbericht 02/91 aus dem Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 1991.*
- Fleischer, H., *Zur Rolle des Kessels bei Pauken. Forschungsbericht 01/92 aus dem Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 1992.*
- Fleischer, H., *Zur Tonhöhe von Paukenklängen. Forschungsbericht 02/94 aus dem Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 1994 a.*
- Fleischer, H., *Spinning Modes. Forschungs- und Seminarberichte aus dem Gebiet Technische Mechanik und Flächentragwerke 1/94. Hrsg. F.A. Emmerling und A.H. Heinen, UniBw München, Neubiberg 1994 b.*
- Fleischer, H., *Experiments on concert timpani. Acustica - acta acustica* 82 (1996), Suppl. 1, 107.

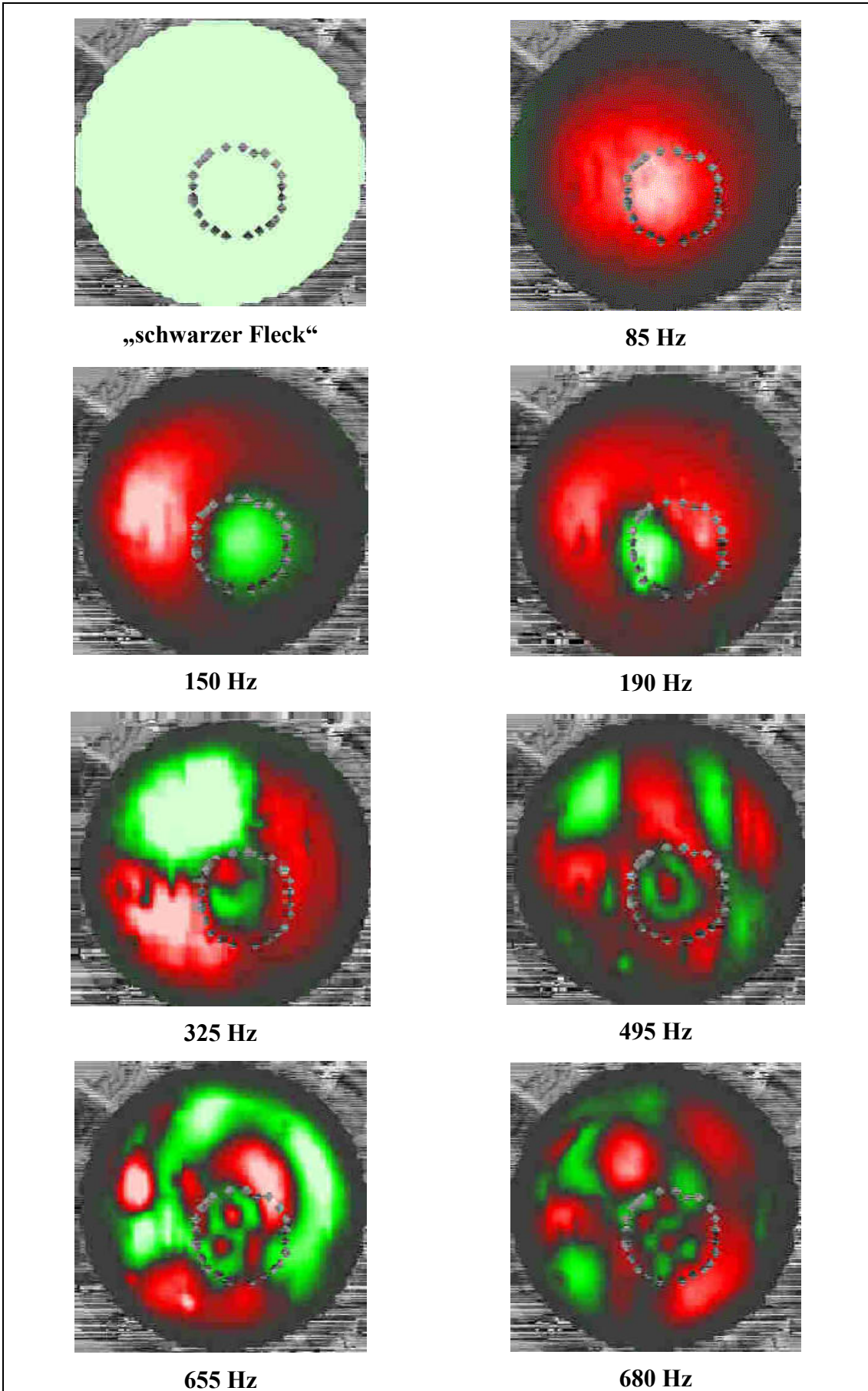
- Fleischer, H., *Glockenschwingungen. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/97*. Hrsg. H. Fleischer und H. Fastl, Universität der Bundeswehr und Technische Universität München, Neubiberg 1997.
- Fleischer, H., *Gehörbezogene Analyse von Gongklängen. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 2/02*. Hrsg. H. Fleischer und H. Fastl, Universität der Bundeswehr und Technische Universität München, Neubiberg 2002.
- Fleischer, H. und Fastl, H., *Untersuchungen an Konzertpauken*. In: *Fortschritte der Akustik (DAGA '91)*. DPG-GmbH, Bad Honnef 1991, 885 - 888.
- Fleischer, H. und Rotter, R., *Das Phänomen der Spinning Modes*. In: *Fortschritte der Akustik (DAGA '94)*. DPG-GmbH, Bad Honnef 1994, 737 - 740.
- Fletcher, N.H. und Rossing, T.D., *The physics of musical instruments*. 2. Aufl. Springer Verlag, New York 1998.
- Hornborstel, E.M. und Sachs, C., *Systematik der Musikinstrumente*. *Zeitschrift für Ethnologie* 46 (1914).
- Houtsma, A.J.M. und Eggen, J.H., *Indian drums and Chinese bells: Measured spectrum and perceived pitch*. In: *Subjective and objective evaluation of sound*. E. Ozimek (Hrsg.), World Scientific, Singapore 1990.
- Moosrainer, M., *Fluid-Struktur-Kopplung am Beispiel der Pauke*. In: *Fortschritte der Akustik (DAGA '98)*. DEGA, Oldenburg 1998, 674 - 675.
- Moosrainer, M. und Fleischer, H., *Application of BEM and FEM to musical instruments*. In: *Estorff, O. v. (Hrsg.), Boundary Elements in Acoustics - Advances and Applications*, WIT Press, Southampton/Boston 2000, 377 - 410.
- Raman, C.V. und Kumar, S., *Musical drums with harmonic overtones*. *Nature* 104 (1920), 500.
- Raman, C.V., *Musikinstrumente und ihre Klänge. Kapitel 8 in: Handbuch der Physik Bd. VIII: Akustik*. Hrsg. H. Geiger und K. Scheel. Springer, Berlin 1927, 354 - 424. Insbesondere: Abschnitt 61 (Trommeln mit harmonischen Obertönen) und 62 (Schwingungen inhomogener Membranen).
- Raman, C.V., *The Indian musical drums*. *Proceedings of the Indian Academy of Science A1* (1934), 179-188.
- Ramakrishna, B.S. und Sondhi, M.M., *Vibrations of Indian musical drums regarded as composite membranes*. *J. Acoust. Soc. Amer.* 26 (1954), 523-529.
- Rieländer, M.M. (Hrsg.), *Reallexikon der Akustik*. Verlag E. Bochinsky, Frankfurt 1982.
- Rossing, T.D. und Sykes, W.A., *Acoustics of Indian drums*. *Percussive Notes* 19 Nr. 3 (1983), 58 - 67.
- Terhardt, E., *Zur Tonhöhenwahrnehmung von Klängen. I. Psychoakustische Grundlagen*. *Acustica* 26 (1972 a), 173-186.
- Terhardt, E., *Zur Tonhöhenwahrnehmung von Klängen. II. Ein Funktionsschema*. *Acustica* 26 (1972 b), 187-199.
- Terhardt, E., *Akustische Kommunikation*. Springer, Berlin 1998.
- Valenzuela, M.N., *Untersuchungen und Berechnungsverfahren zur Klangqualität von Klaviertönen*. Herbert Utz Verlag Wissenschaft, München 1998.

Valenzuela, M.N., Zur Rolle des Gehörs bei akustischen Untersuchungen an Musikinstrumenten. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/99. Hrsg. H. Fleischer und H. Fastl, UniBw und TU München, Neubiberg 1999.

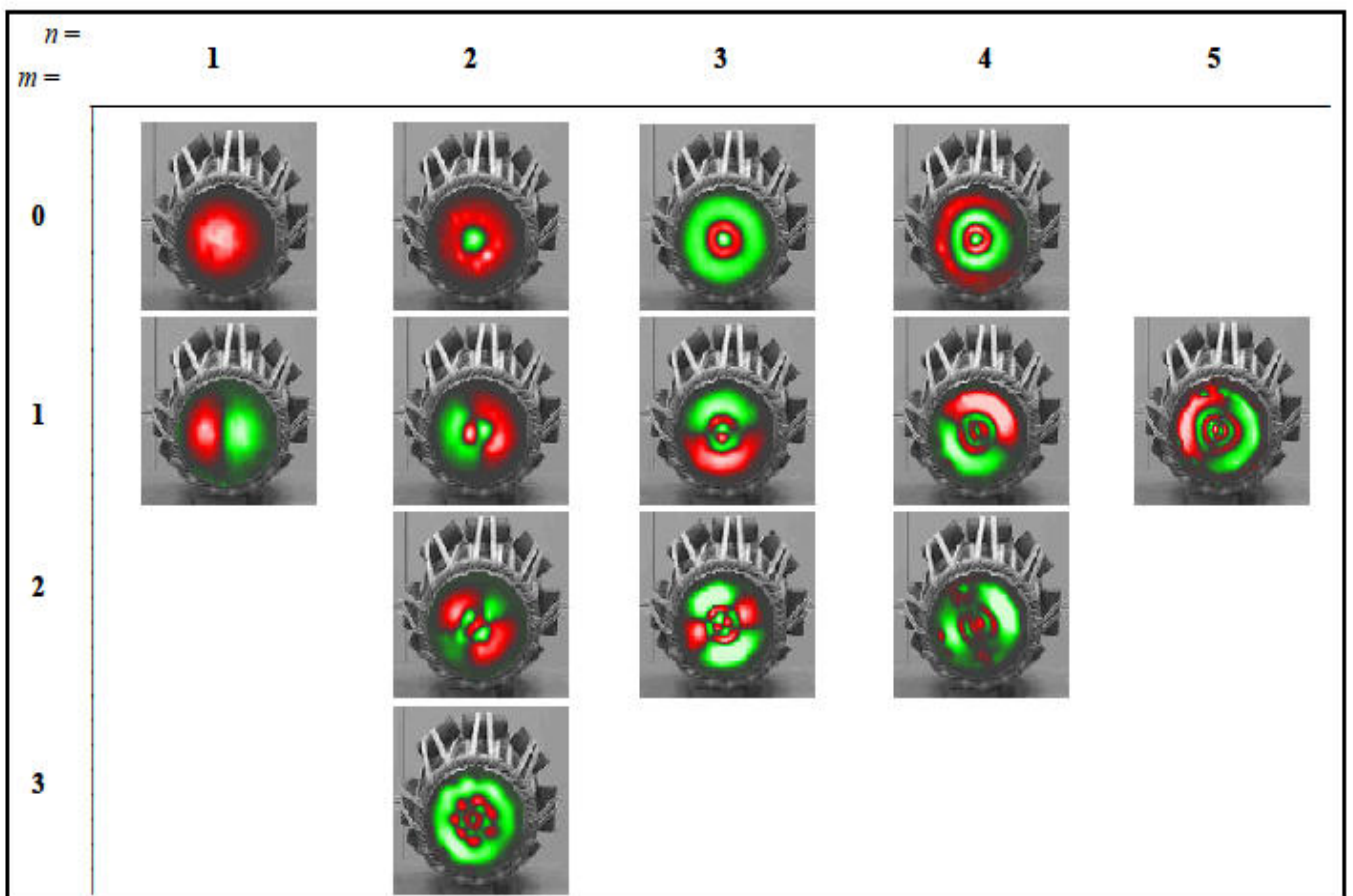
Valenzuela, M.N., Persönliche Kommunikation (2003).

Zwicker, E. und Feldtkeller, R., Das Ohr als Nachrichtenempfänger, 2. Aufl. Hirzel Verlag, Stuttgart 1967.

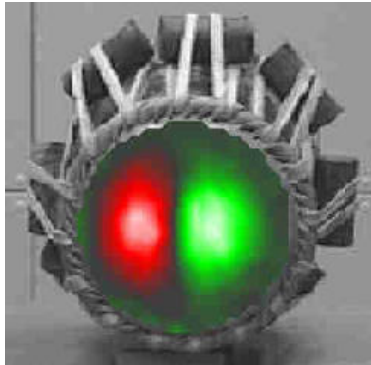
Zwicker, E. und Fastl, H., Psychoacoustics. 2. Aufl. Springer Verlag, Heidelberg 1999.



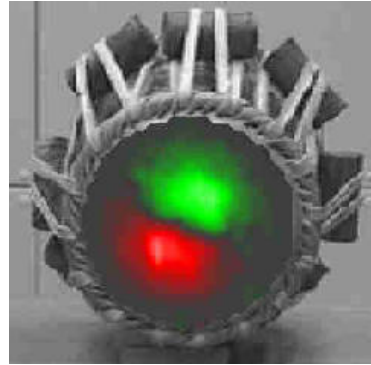
Anhang 1: Einige Schwingungsformen und -frequenzen der Bayan P.



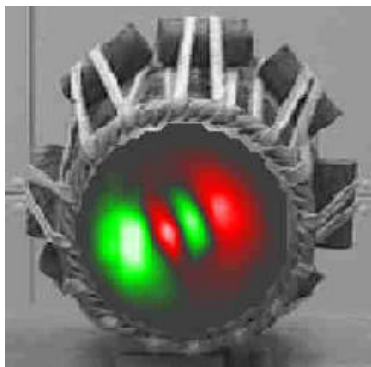
Anhang 2: Schwingungsformen der Tabla .



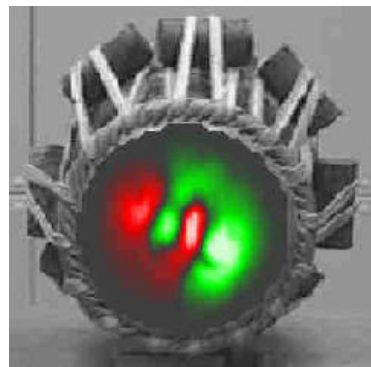
420 Hz



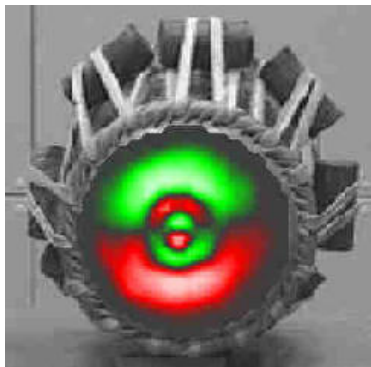
440 Hz



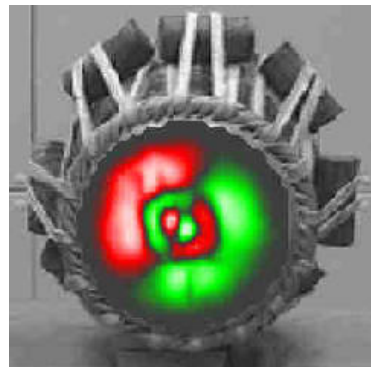
870 Hz



880 Hz

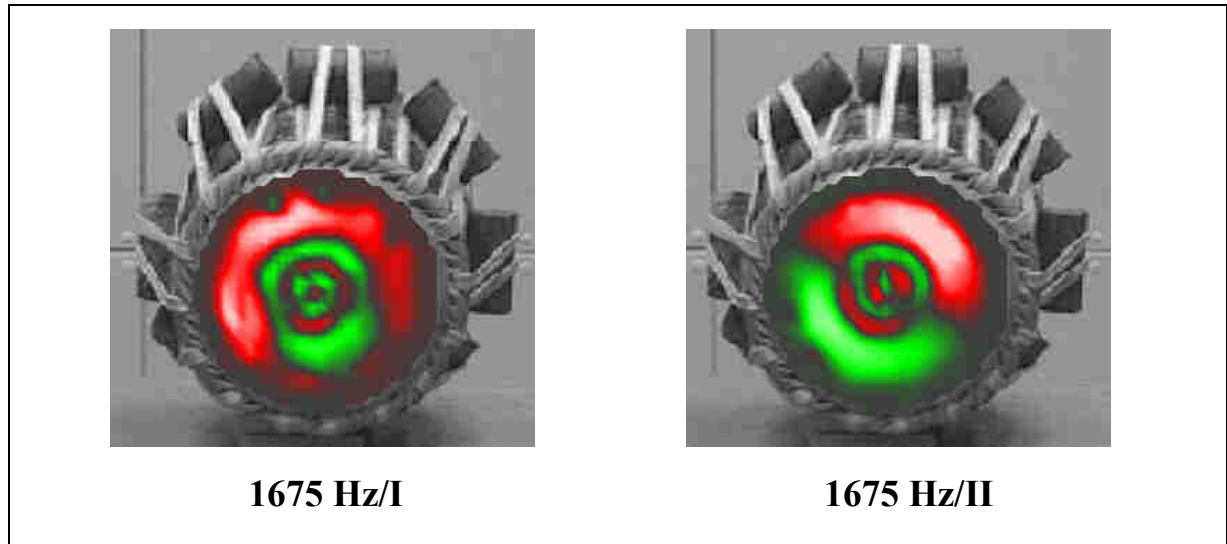


1295 Hz

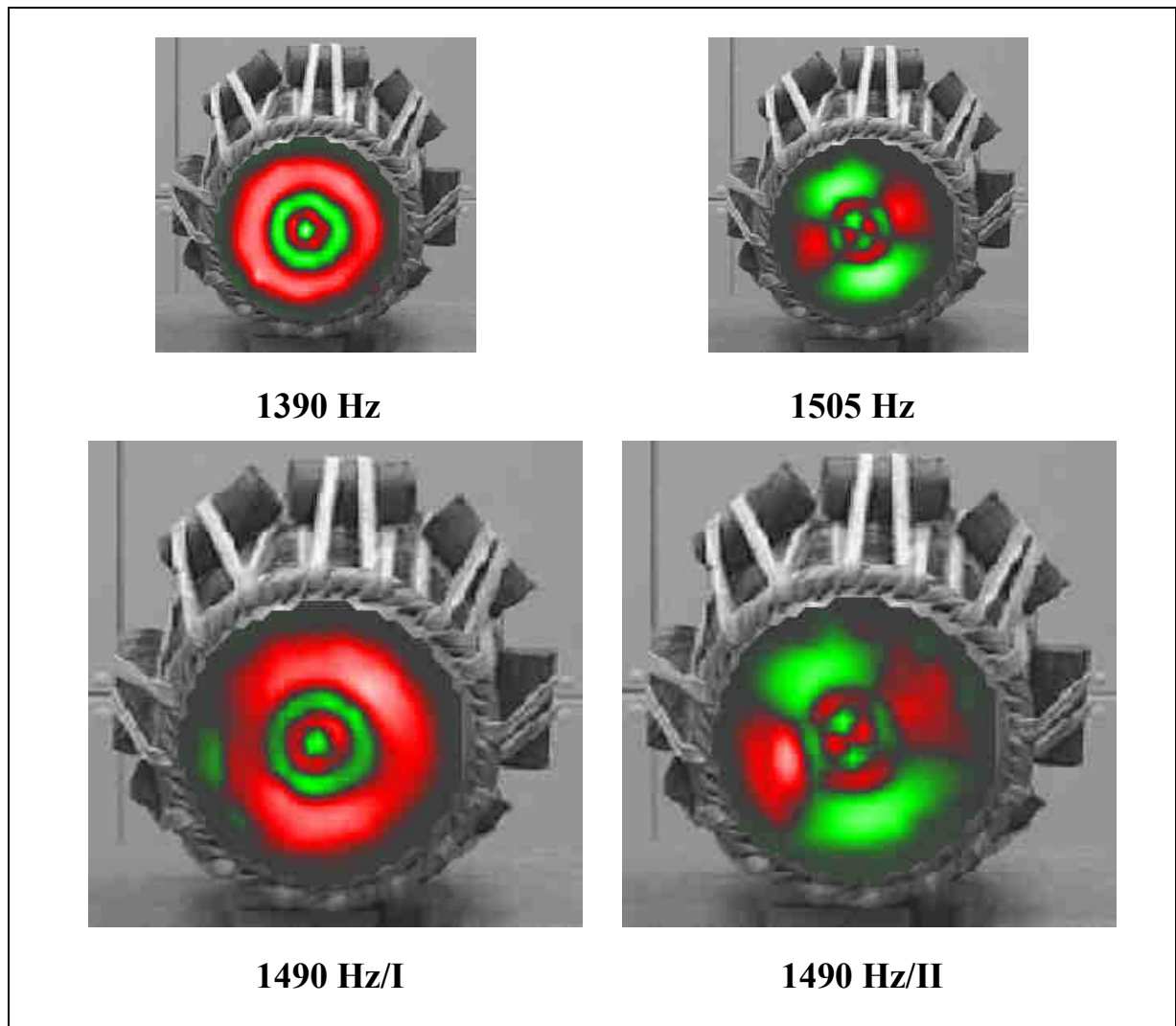


1300 Hz

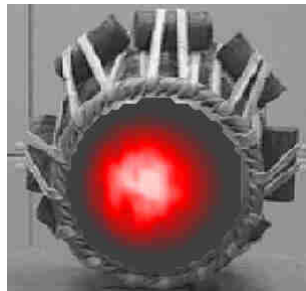
*Anhang 3: Moden-Splitting bei der Tabla P.
Oben: 1-1-Schwingungsform; Mitte: 1-2-Schwingungsform; unten: 1-3-Schwingungsform.*



Anhang 4: Misch-Form bei 1675 Hz zu unterschiedlichen Zeitpunkten.

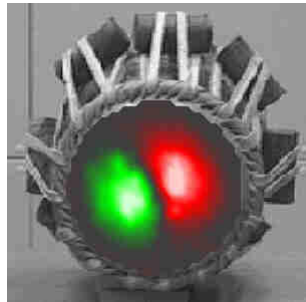


*Anhang 5: Schwingungsformen der Tabla P.
Überlagerung von Moden ähnlicher Frequenz:
Links oben 0-4-Mode (1390 Hz); rechts oben: 2-3-Mode, (1505 Hz).
Große Bilder darunter: Misch-Form bei 1490 Hz zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten.*



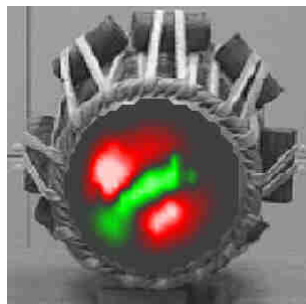
260 Hz

entspricht FIG. 3 bei Raman (1934)
0-1-Grundmode



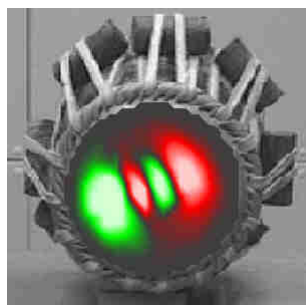
440 Hz

entspricht FIG. 4 bei Raman (1934)
1-1-Grundmode



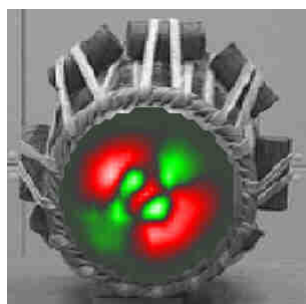
655 Hz

entspricht FIG. 5 bei Raman (1934)
Kombination aus 2-1- und 0-2-Mode



870 Hz

entspricht FIG. 6 bei Raman (1934)
Kombination aus 3-1- und 1-2-Mode



1100 Hz

bei Raman (1934) nicht dargestellt
Kombination aus
4-1-, 2-2- und 0-3-Mode

Die folgende Tabelle gibt eine Auflistung der reinen *Tabla*-Klänge wieder, wie sie im Weiteren mit VIPER analysiert worden sind.

Bezeichnung	Charakterisierung	Parvinder Bharat	Harpit Sahota	Diagramme in
<i>na</i>	lang nachklingender, hoher Ton	•	•	Anhang 7 + 8
<i>tun</i>	lang nachklingender, tiefer Ton	•	•	Anhang 9 + 10
<i>kalan</i>	Mehrfach-Schlag mit tonalem Nachklang	•		Anhang 11
<i>tik</i>	schmatzend, rein perkussiv		•	Anhang 12
<i>tit</i>	ähnlich <i>tik</i> , jedoch mit Vor-Schlag	•		Anhang 13
<i>dhin</i>	trocken, kurz, rein perkussiv		•	Anhang 14
<i>dhit</i>	Vierfach-Schlag, schmatzend, rein perkussiv		•	Anhang 15
<i>dhir-dhir</i>	schmatzend, rein perkussiv		•	Anhang 16

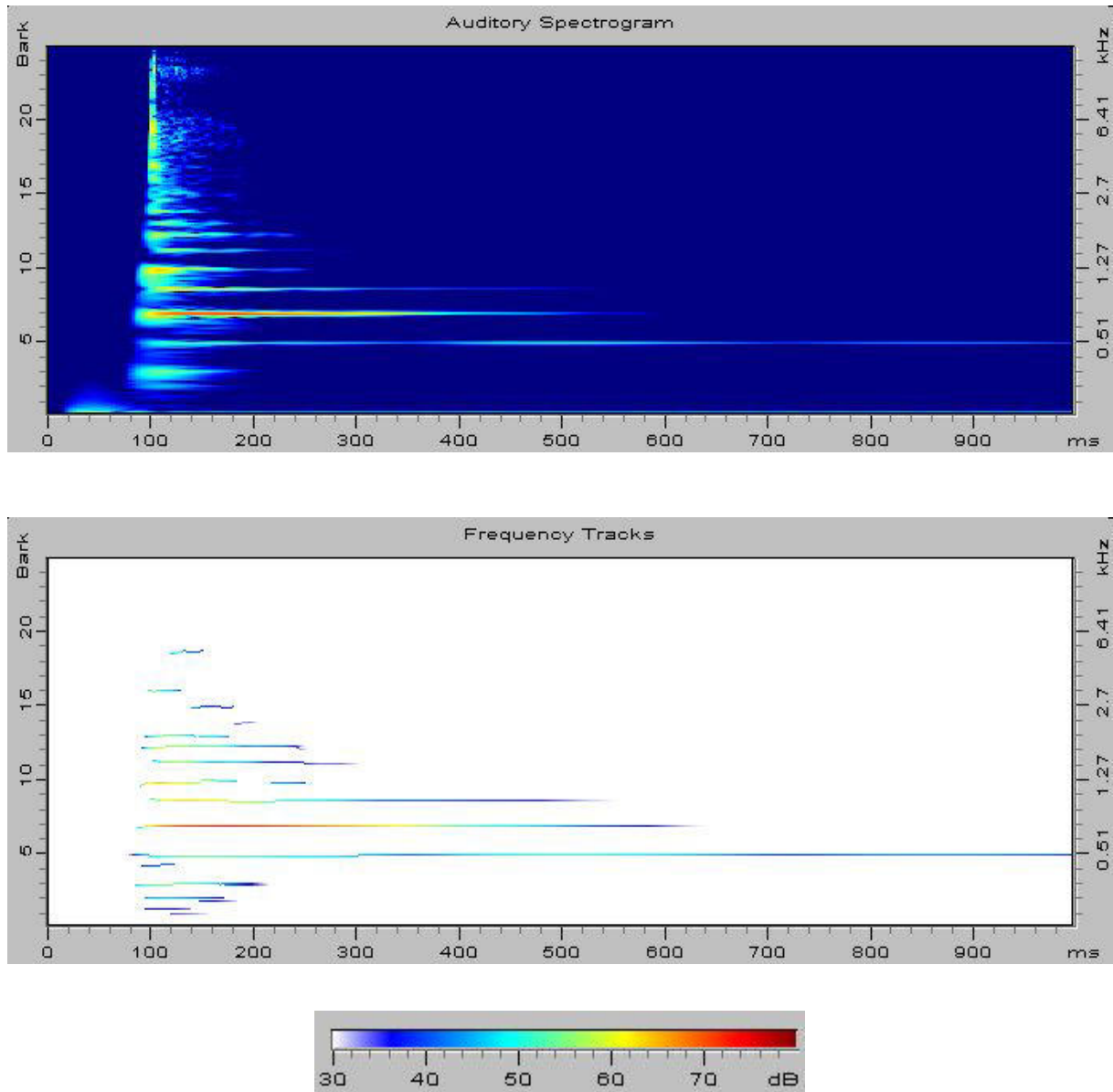
Die folgende Tabelle gibt eine Auflistung der Kombinations-Klänge (*Tabla* mit *Bayan*) wieder, wie sie im Weiteren mit VIPER analysiert worden sind.

Bezeichnung	Charakterisierung	Parvinder Bharat	Harpit Sahota	Diagramme in
<i>dhin</i>	perkussiver Schlag mit moduliertem Nachklang	•		Anhang 17
<i>dhir-dhir</i>	perkussive Vor-Schläge mit moduliertem Nachklang	•		Anhang 18

Die folgende Tabelle gibt eine Auflistung der reinen *Bayan*-Klänge wieder, wie sie im Weiteren mit VIPER analysiert worden sind.

Bezeichnung	Charakterisierung	Parvinder Bharat	Harpit Sahota	Diagramme in
<i>ke</i>	tiefer Ton, unmoduliert bzw. Tonhöhe ansteigend	•	•	Anhang 19 bis 21
<i>gin</i>	tiefer Ton mit Vor-Schlag, Tonhöhe zunächst abfallend, am Schluss ansteigend		•	Anhang 22

A 7



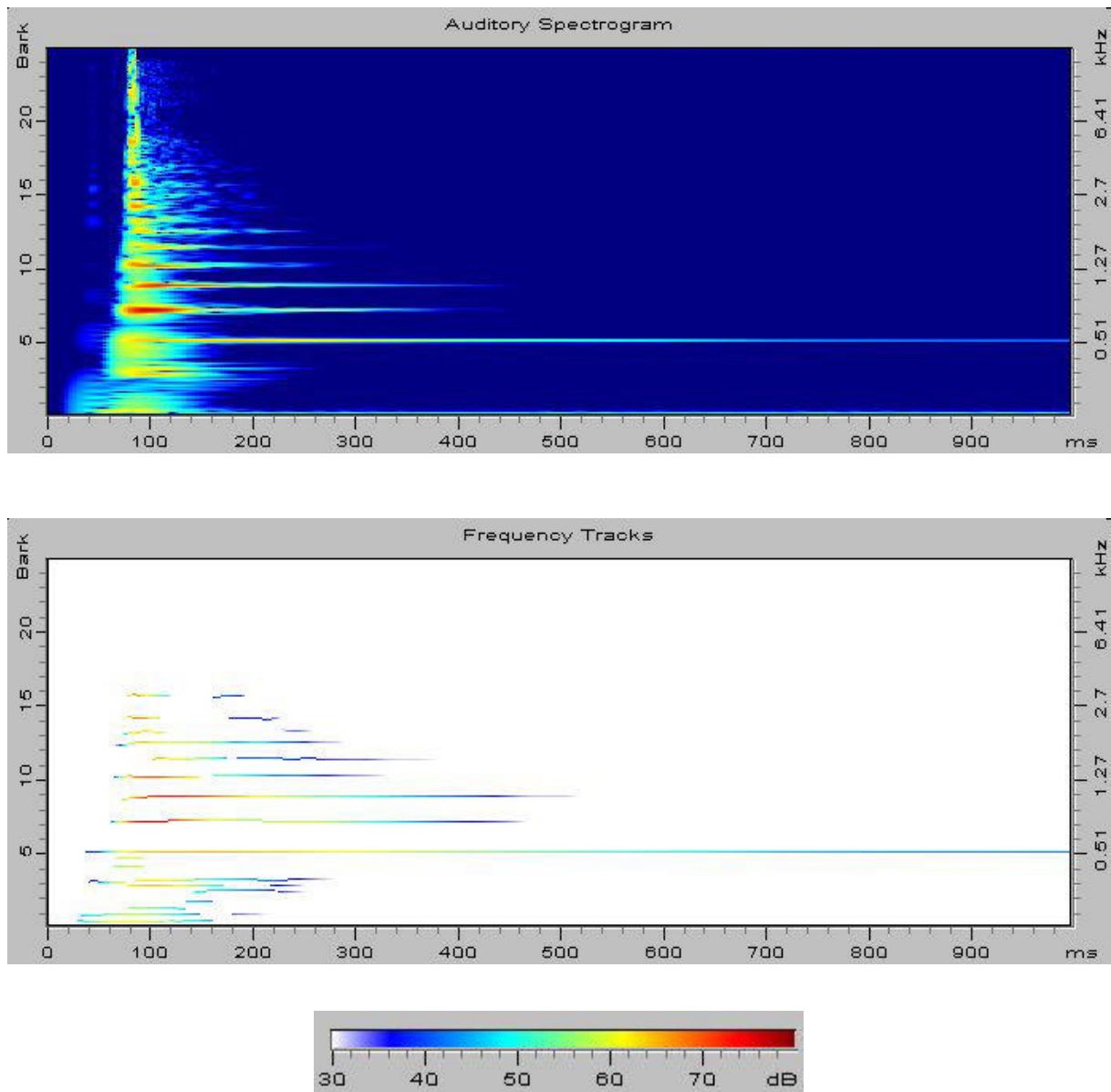
Anhang 7: *Tabla-Klang na*, gespielt von Parvinder Bharat.

Oben: Auditorisches Spektrogramm (Auditory Spectrogram), ermittelt mit VIPER.

Mitte: Frequenzspuren (Frequency Tracks) unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung (Nonlinear Masking).

Die unten angefügte Farbskala zeigt, wie der Pegel kodiert ist: Die Folge weiß (mittleres Diagramm) – dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot bedeutet ansteigenden Pegel.

Auditorisches Spektrogramm und Frequenzspuren sind die gehöradäquaten Entsprechungen zum Wasserfalldiagramm in Fig. 26 oben. Sie geben einen hohen Klang wieder, dessen Tonhöhe wesentlich durch den anfänglich stärkeren, aber kurzen Teilton bei 745 Hz und den anfänglich schwächeren, aber lang anhaltenden Teilton bei 498 Hz bestimmt ist. Weitere Teiltöne treten bei 996 Hz und 1228 Hz auf. Sie bilden eine praktisch perfekte harmonische Reihe auf der Basis einer *Missing Fundamental* von 249 Hz.



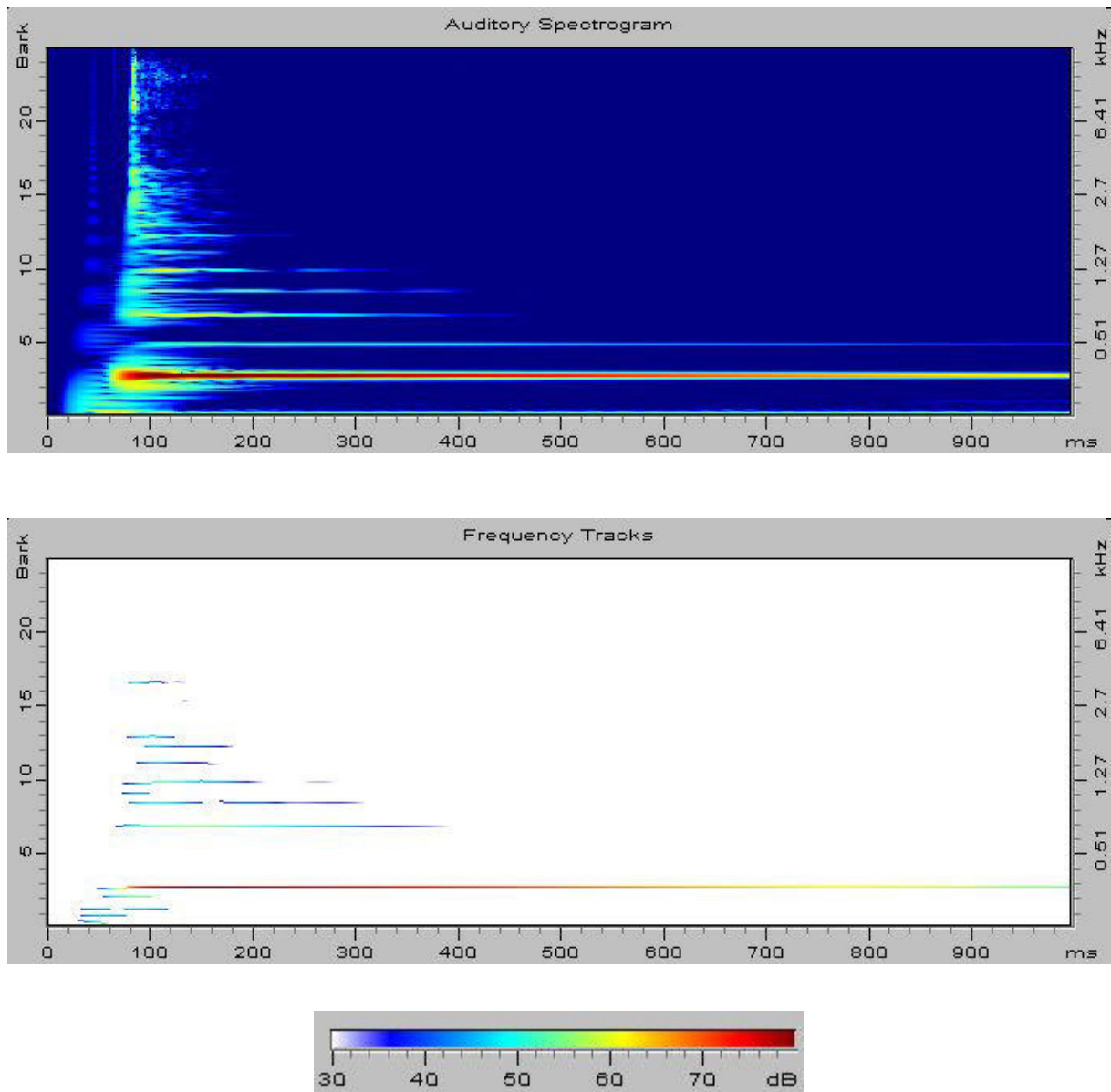
Anhang 8: Tabla-Klang *na*, gespielt von Harpit Sahota.

Oben: Auditorisches Spektrogramm (Auditory Spectrogram), ermittelt mit VIPER.

Mitte: Frequenzspuren (Frequency Tracks) unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung (Nonlinear Masking).

Die unten angefügte Farbskala zeigt, wie der Pegel kodiert ist: Die Folge weiß (mittleres Diagramm) – dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot bedeutet ansteigenden Pegel.

Auditorisches Spektrogramm und Frequenzspuren sind die gehöradäquaten Entsprechungen zum Wasserfalldiagramm in Fig. 26 unten. Sie spiegeln einen hohen Klang wider, der durch den anfänglich schwächeren, aber lang anhaltenden Teilton bei 525 Hz geprägt wird. Die Tonhöhe ist wesentlich durch den anfänglich stärkeren, aber kurzen Teilton bei 800 Hz bestimmt. Ein ähnlich starker Teilton von vergleichbarer Länge tritt bei 1061 Hz, weitere Teiltöne bei etwa 1300 Hz und 1573 Hz auf. Sie bilden eine nahezu perfekte harmonische Reihe, wobei die *Missing Fundamental* hier etwa die Frequenz 263 Hz hat.



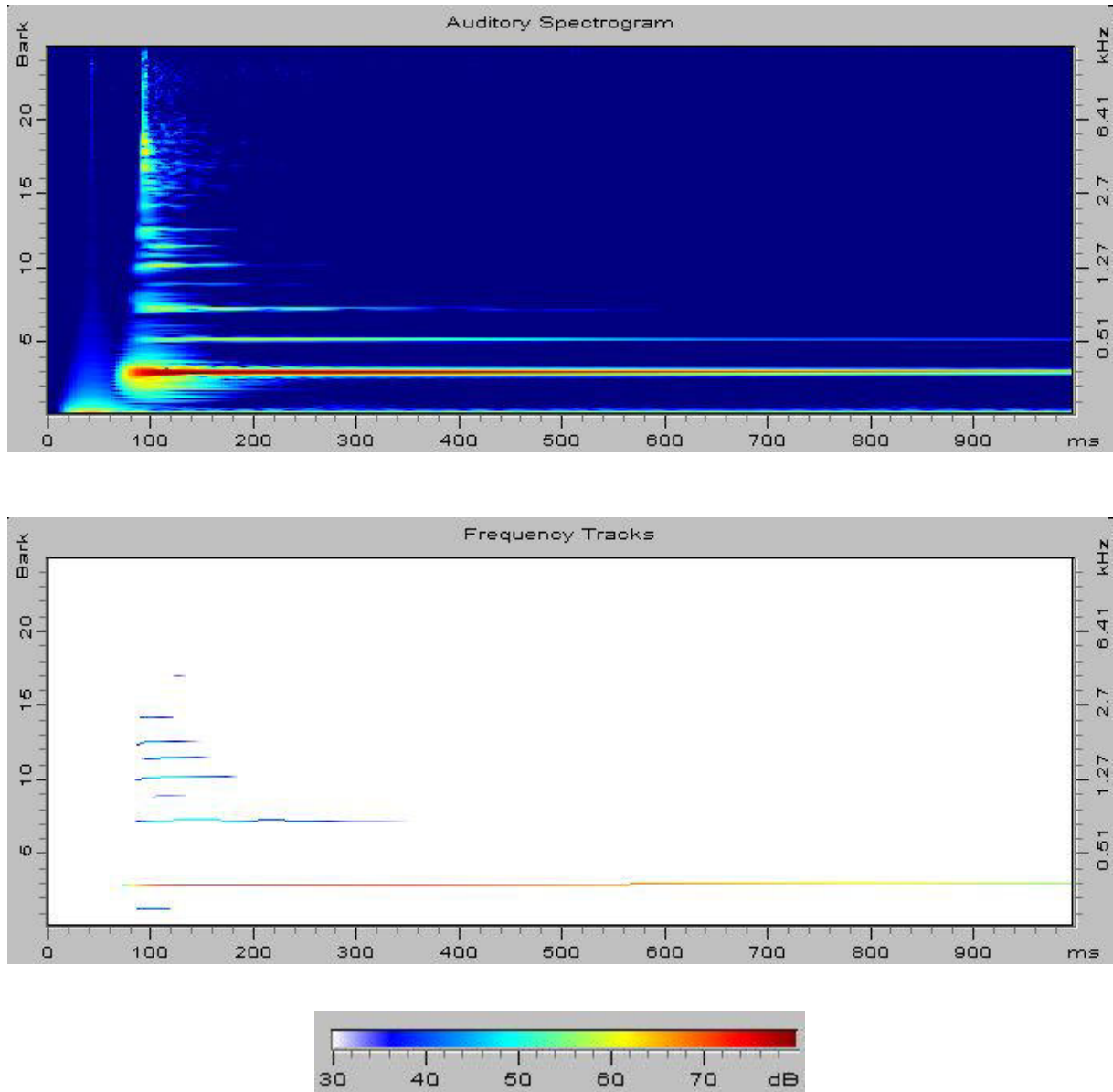
Anhang 9: Tabla-Klang *tun*, gespielt von Parvinder Bharat.

Oben: Auditorisches Spektrogramm (Auditory Spectrogram), ermittelt mit VIPER.

Mitte: Frequenzspuren (Frequency Tracks) unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung (Nonlinear Masking).

Die unten angefügte Farbskala zeigt, wie der Pegel kodiert ist: Die Folge weiß (mittleres Diagramm) – dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot bedeutet ansteigenden Pegel.

Auditorisches Spektrogramm und Frequenzspuren sind die gehöradäquaten Entsprechungen zum Wasserfalldiagramm in Fig. 30 oben. Sie geben einen relativ tiefen Klang wieder, dessen Tonhöhe wesentlich durch den lang anhaltenden Teilton bei 275 Hz bestimmt ist. Der nächste Teilton bei etwa 500 Hz ist verdeckt, so dass erst wieder die Komponente mit 748 Hz eine Spektraltonhöhe hervorrufen könnte.



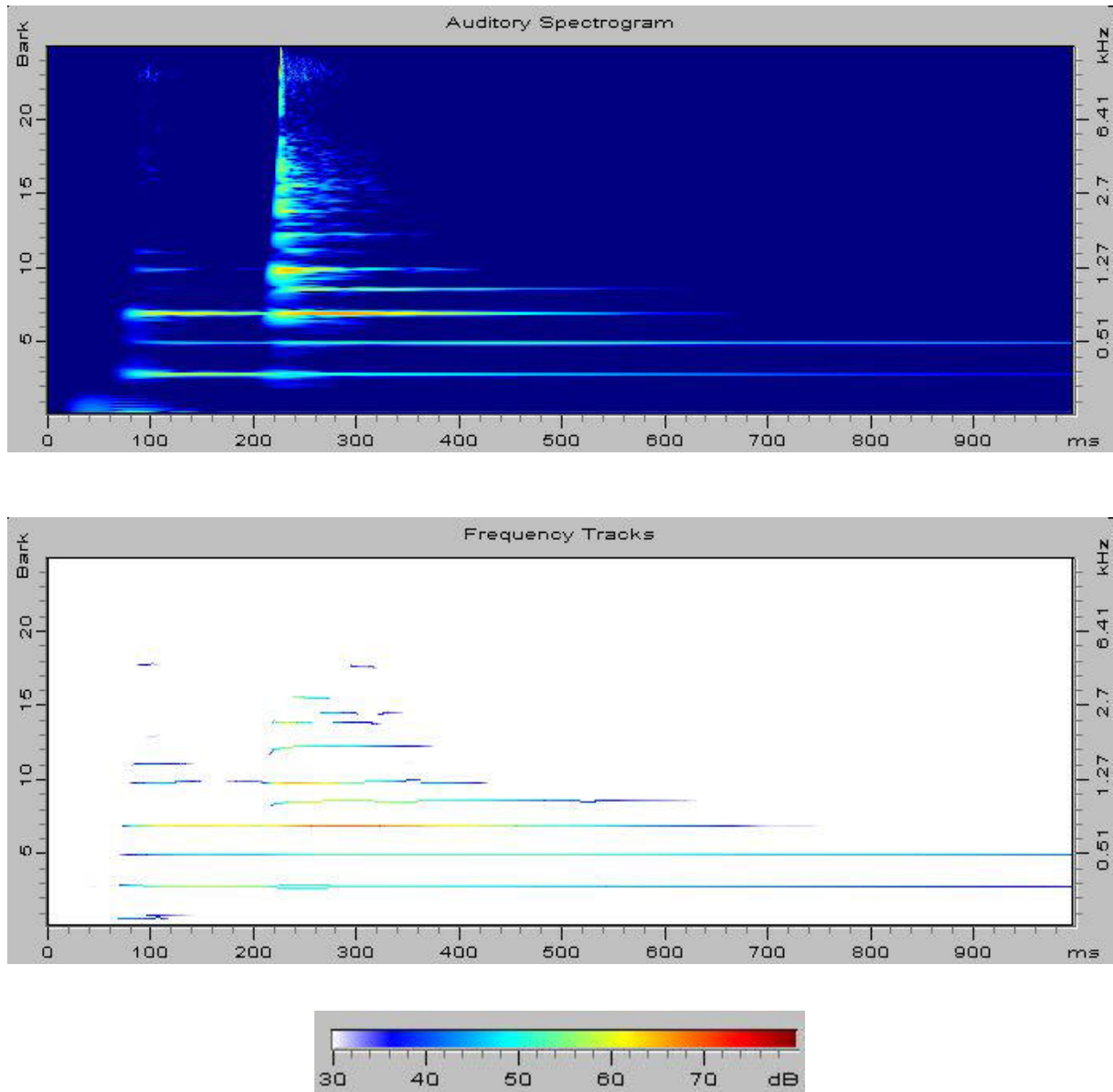
Anhang 10: Tabla-Klang **tun**, gespielt von Harpit Sahota.

Oben: Auditorisches Spektrogramm (Auditory Spectrogram), ermittelt mit VIPER.

Mitte: Frequenzspuren (Frequency Tracks) unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung (Nonlinear Masking).

Die unten angefügte Farbskala zeigt, wie der Pegel kodiert ist: Die Folge weiß (mittleres Diagramm) – dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot bedeutet ansteigenden Pegel.

Auditorisches Spektrogramm und Frequenzspuren sind die gehöradäquaten Entsprechungen zum Wasserfalldiagramm in Fig. 30 unten. Sie geben einen tiefen Klang wieder, dessen Tonhöhe wesentlich durch den starken und lang anhaltenden Teilton bei 289 Hz dominiert wird. Der nächste Teilton bei 525 Hz ist verdeckt. Erst wieder die Komponente mit 795 Hz, d.h. bei nicht ganz der dreifachen Frequenz des ersten Teiltones, wäre in der Lage, eine Spektraltonhöhe hervorzurufen.



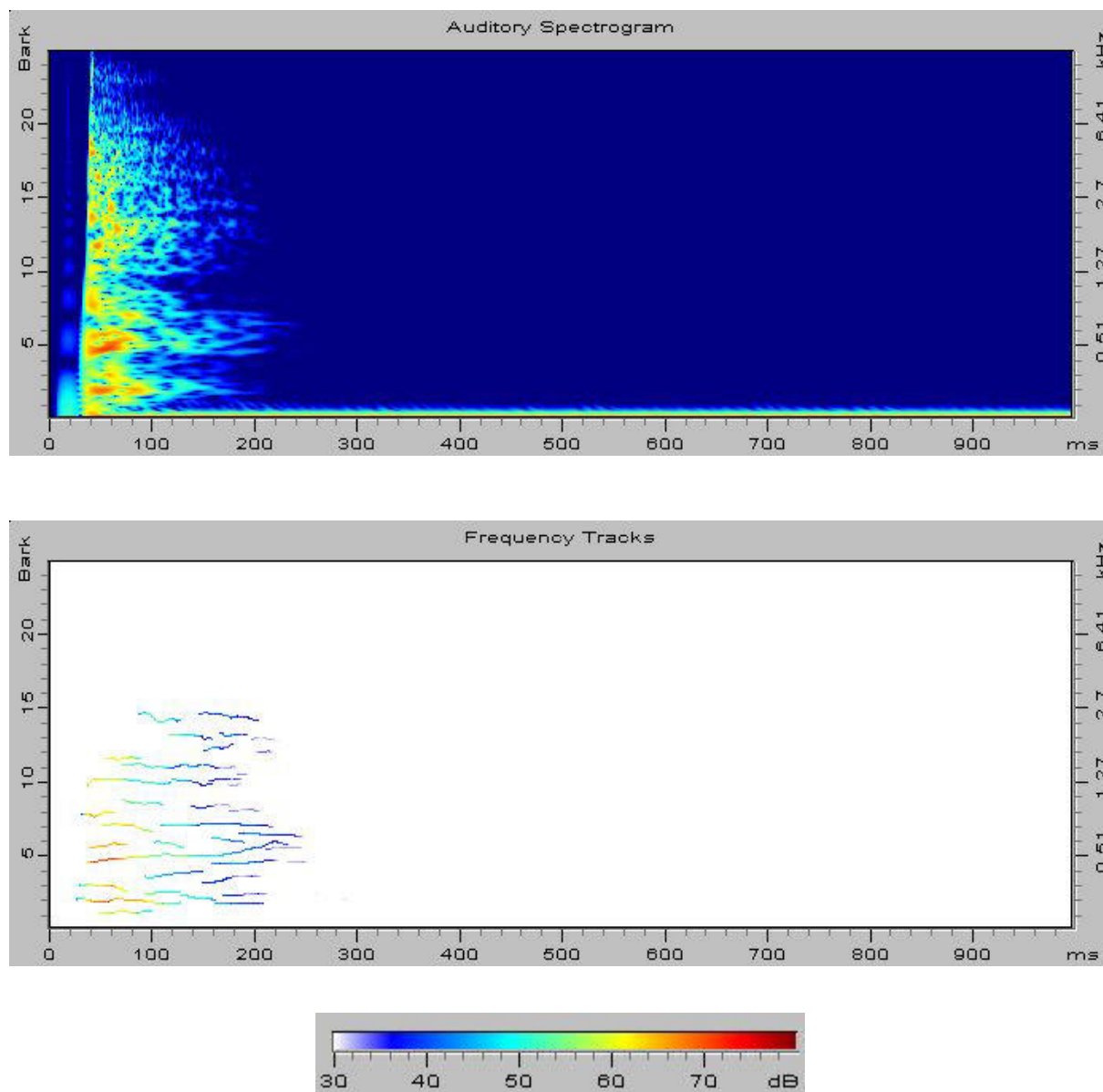
Anhang 11: *Tabla-Klang **kalan***, gespielt von Parvinder Bharat.

Oben: Auditorisches Spektrogramm (Auditory Spectrogram), ermittelt mit VIPER.

Mitte: Frequenzspuren (Frequency Tracks) unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung (Nonlinear Masking).

Die unten angefügte Farbskala zeigt, wie der Pegel kodiert ist: Die Folge weiß (mittleres Diagramm) – dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot bedeutet ansteigenden Pegel.

Auditorisches Spektrogramm und Frequenzspuren sind die gehöradäquaten Entsprechungen zum Wasserfalldiagramm in Fig. 32. Sie geben als Kombination von *tun* und *na* einen tonalen Doppel-Schlag wieder, dessen Nachklang wesentlich durch den lang anhaltenden Teilton bei 275 Hz bestimmt ist. Der nächsten Teiltöne treten bei 501 Hz, 748 Hz, 995 Hz und 1238 Hz auf. Begleitend zum tonalen *Tabla*-Klang wird ein perkussiver *Bayan*-Schlag gespielt. Dass die Frequenzen geringfügig von denen des Klages *na* (Anhang 7) abweichen, dürfte damit zusammenhängen, dass der Spieler das *Tabla*-Fell in unterschiedlicher Weise berührt. Auch hier liegt wiederum eine nahezu harmonische Reihe vor, deren virtueller Grundton mit 249 Hz allerdings etwas tiefer liegt als der erste Teilton mit 275 Hz.



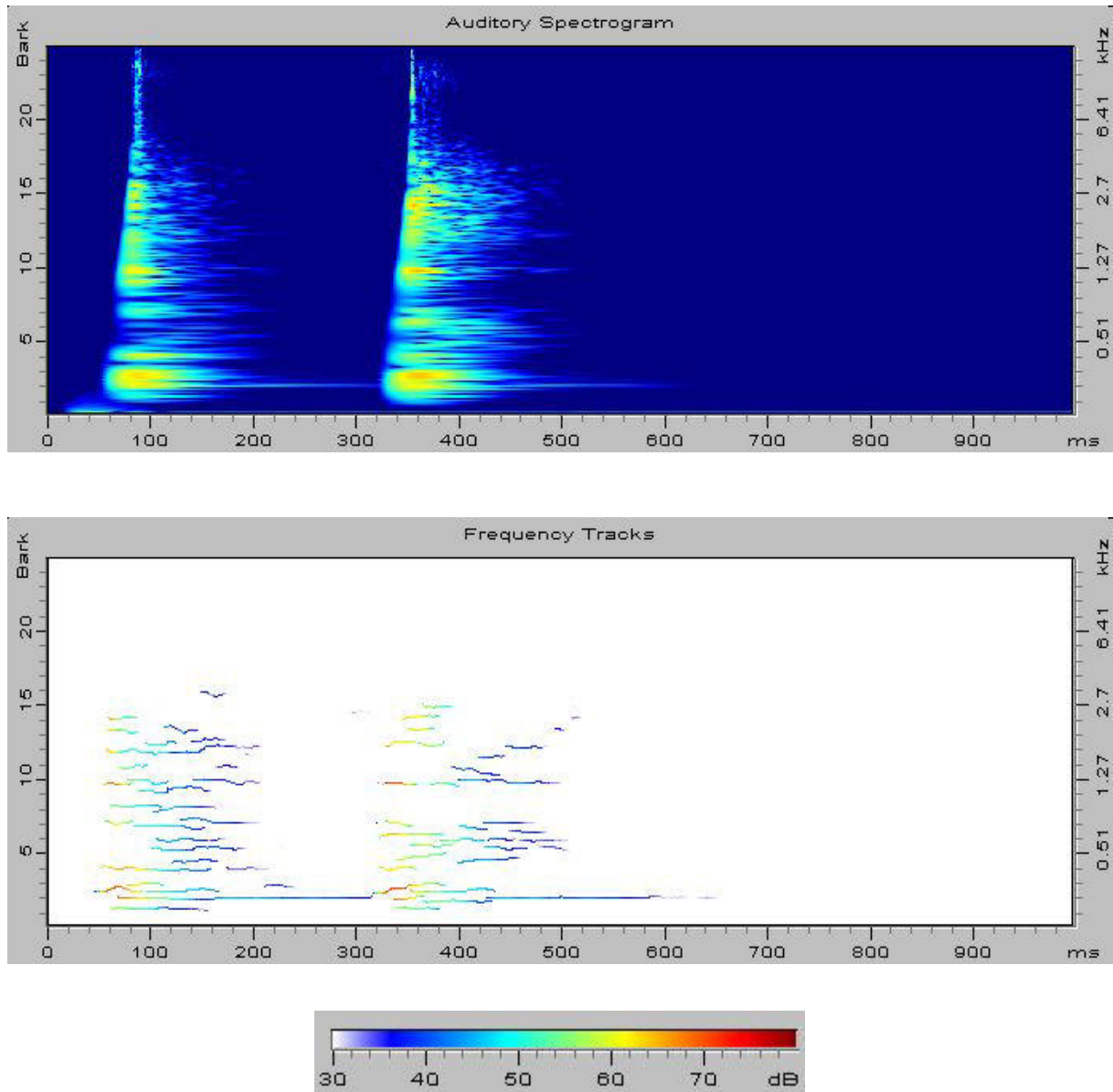
Anhang 12: Tabla-Klang **tik**, gespielt von Harpit Sahota.

Oben: Auditorisches Spektrogramm (Auditory Spectrogram), ermittelt mit VIPER.

Mitte: Frequenzspuren (Frequency Tracks) unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung (Nonlinear Masking).

Die unten angefügte Farbskala zeigt, wie der Pegel kodiert ist: Die Folge weiß (mittleres Diagramm) – dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot bedeutet ansteigenden Pegel.

Auditorisches Spektrogramm und Frequenzspuren sind die gehöradäquaten Entsprechungen zum Wasserfalldiagramm in Fig. 35. Sie geben einen schmatzenden, rein perkussiven Schlag ohne tonalen Nachklang wieder, der durch ein kurz andauerndes Spektrum gekennzeichnet ist. Zahlreiche Komponenten liegen dicht beieinander. Tonale Komponenten sind praktisch nicht auszumachen.



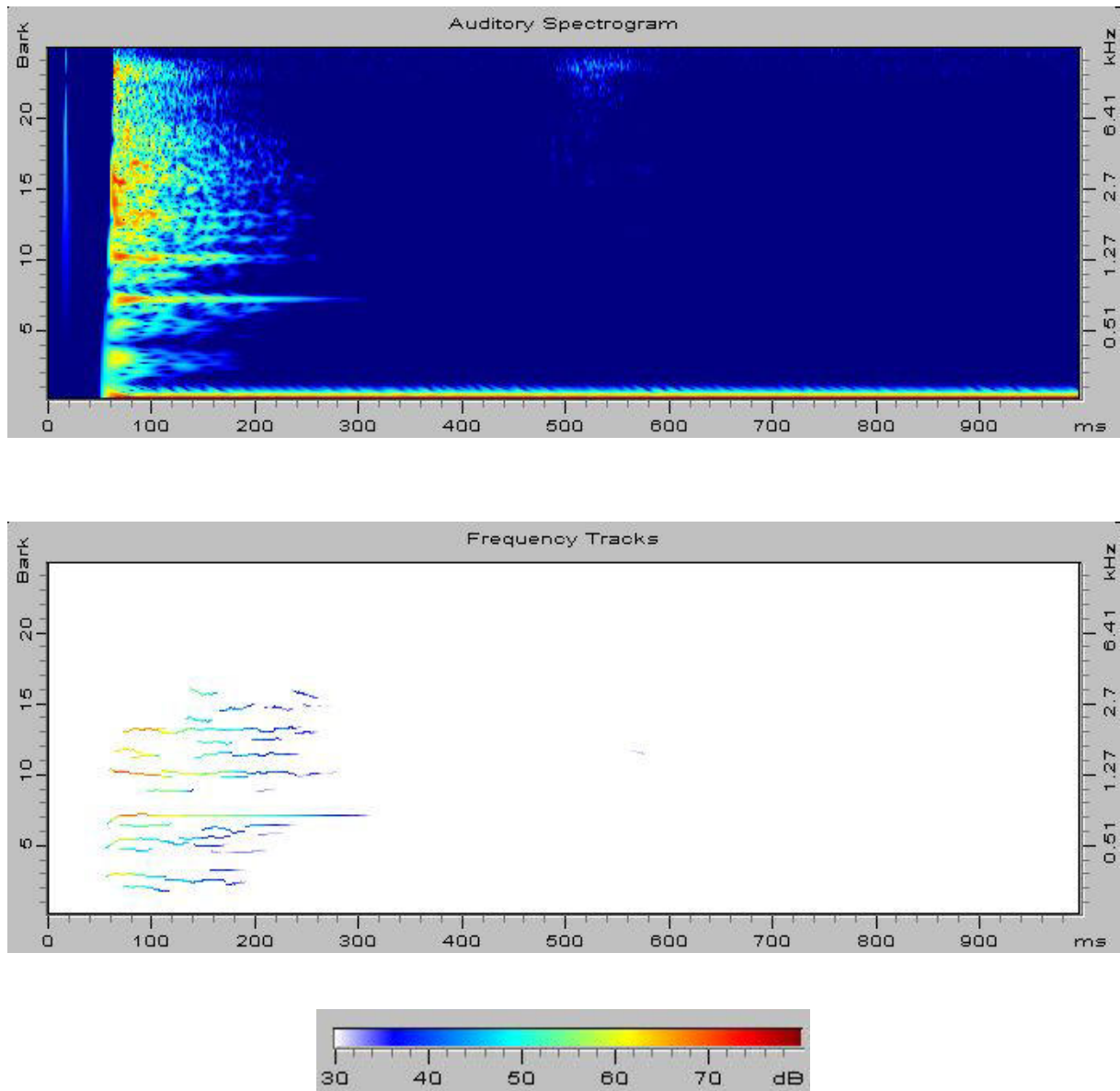
Anhang 13: Tabla-Klang *tīt*, gespielt von Parvinder Bharat.

Oben: Auditorisches Spektrogramm (Auditory Spectrogram), ermittelt mit VIPER.

Mitte: Frequenzspuren (Frequency Tracks) unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung (Nonlinear Masking).

Die unten angefügte Farbskala zeigt, wie der Pegel kodiert ist: Die Folge weiß (mittleres Diagramm) – dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot bedeutet ansteigenden Pegel.

Auditorisches Spektrogramm und Frequenzspuren sind die gehöradäquaten Entsprechungen zum Wasserfalldiagramm in Fig. 37 oben. Der Klang *tīt* ähnelt dem vorher betrachteten *tik* mit einem zusätzlichen Vor-Schlag. Den ersten Teil schlägt der Mittelfinger, den zweiten der Zeigefinger. Der Klang hat perkussiven Charakter und weist einen geringen tonalen Nachklang bei etwa 206 Hz auf.



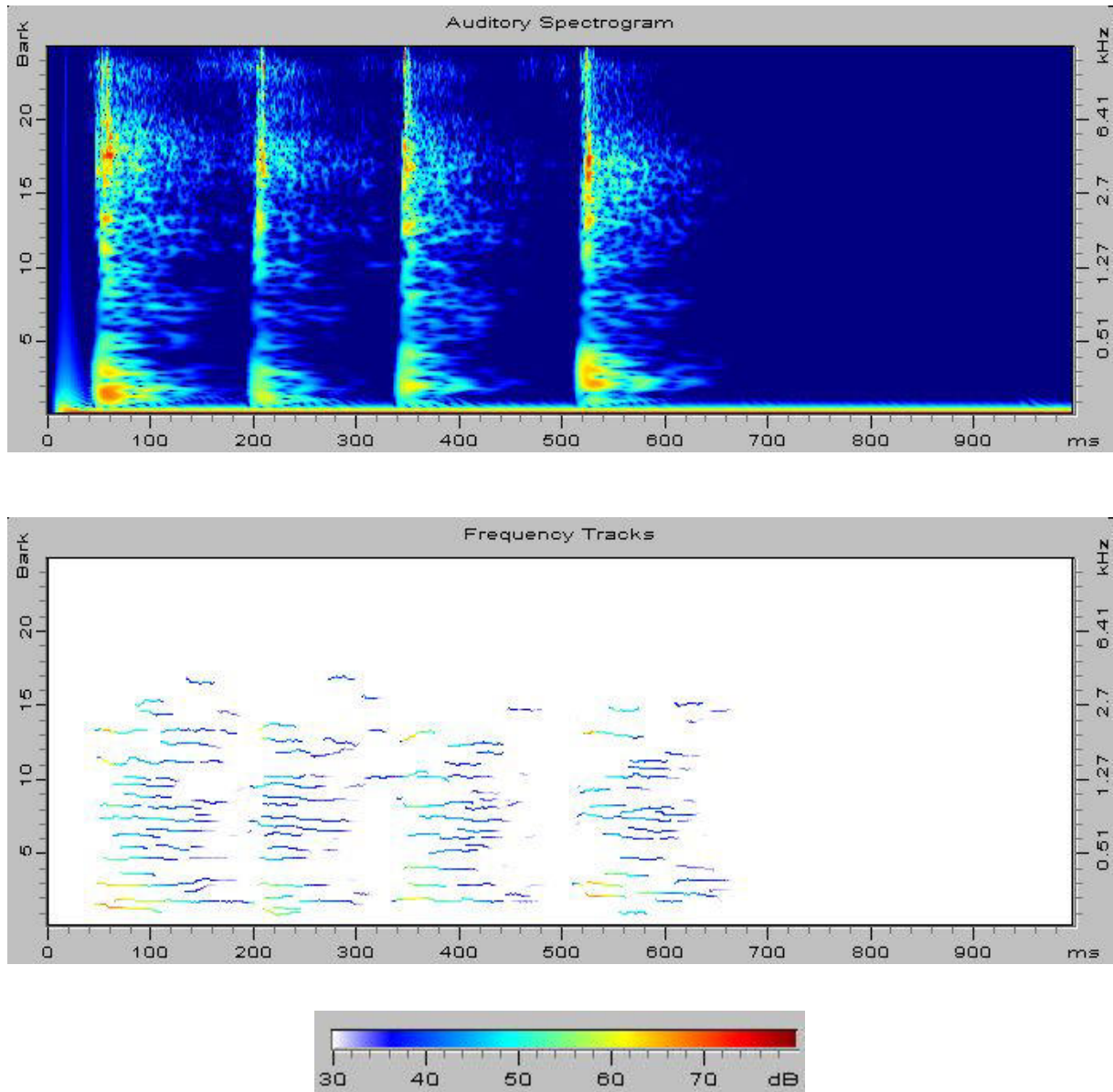
Anhang 14: Tabla-Klang **dhin**, gespielt von Harpit Sahota.

Oben: Auditorisches Spektrogramm (Auditory Spectrogram), ermittelt mit VIPER.

Mitte: Frequenzspuren (Frequency Tracks) unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung (Nonlinear Masking).

Die unten angefügte Farbskala zeigt, wie der Pegel kodiert ist: Die Folge weiß (mittleres Diagramm) – dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot bedeutet ansteigenden Pegel.

Auditorisches Spektrogramm und Frequenzspuren sind die gehöradäquaten Entsprechungen zum Wasserfalldiagramm in Fig. 40. Der Klang **dhin** ist ein kurzer, trockener Schlag. Er hat perkussiven Charakter und kann mit einem *Bayan*-Klang kombiniert werden; vgl. Anhang 17. Eine schwache tonalen Komponente prägt sich bei 782 Hz aus.



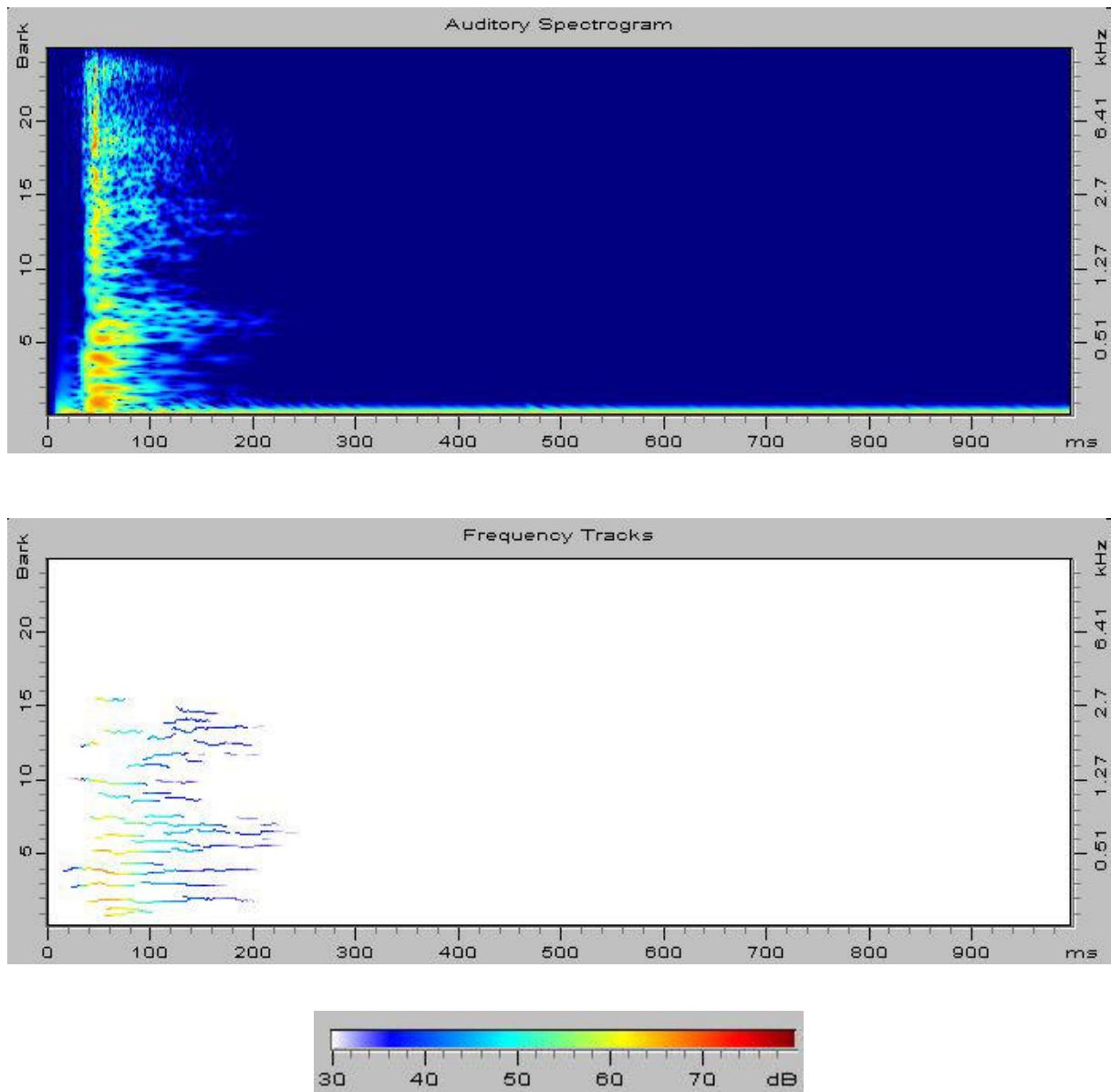
Anhang 15: Tabla-Klang **dhit**, gespielt von Harpit Sahota.

Oben: Auditorisches Spektrogramm (Auditory Spectrogram), ermittelt mit VIPER.

Mitte: Frequenzspuren (Frequency Tracks) unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung (Nonlinear Masking).

Die unten angefügte Farbskala zeigt, wie der Pegel kodiert ist: Die Folge weiß (mittleres Diagramm) – dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot bedeutet ansteigenden Pegel.

Auditorisches Spektrogramm und Frequenzspuren sind die gehöradäquaten Entsprechungen zum Wasserfalldiagramm in Fig. 42. Der Klang **dhit** ist ein Vierfach-Schlag. Der Klang hat rein perkussiven Charakter, klingt schmatzend und ist ohne jeglichen tonalen Nachklang.



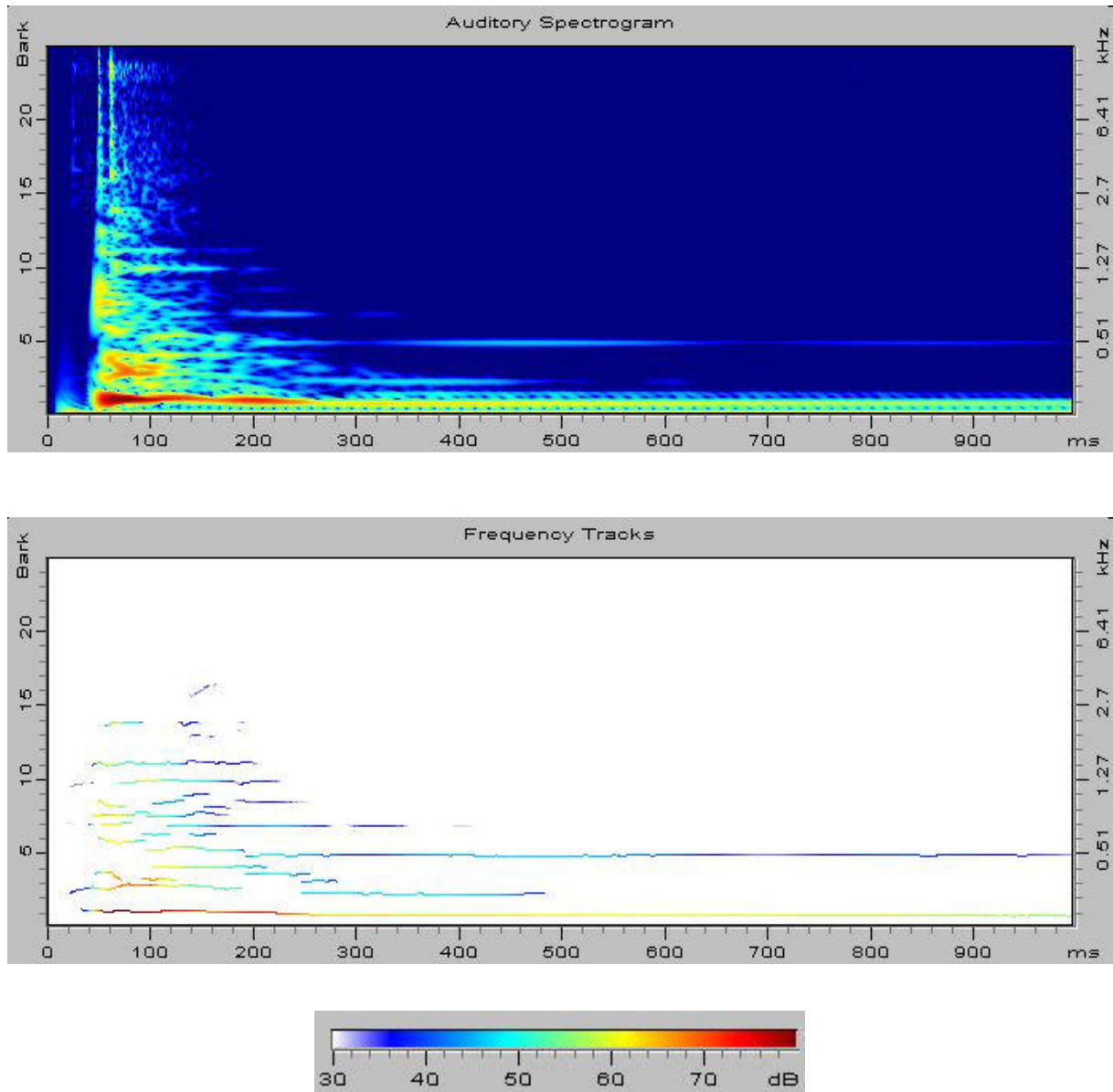
Anhang 16: *Tabla-Klang **dhir-dhir**, gespielt von Harpit Sahota.*

Oben: Auditorisches Spektrogramm (Auditory Spectrogram), ermittelt mit VIPER.

Mitte: Frequenzspuren (Frequency Tracks) unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung (Nonlinear Masking).

Die unten angefügte Farbskala zeigt, wie der Pegel kodiert ist: Die Folge weiß (mittleres Diagramm) – dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot bedeutet ansteigenden Pegel.

Auditorisches Spektrogramm und Frequenzspuren sind die gehöradäquaten Entsprechungen zum Wasserfalldiagramm in Fig. 45. Der Klang **dhir-dhir** ist ein kurzer, trockener *Tabla*-Schlag von rein perkussivem Charakter. Er ist ohne jeglichen tonalen Nachklang und kann mit einem *Bayan*-Klang verbunden werden. Der Kombinationsklang, der dann entsteht, kann Anhang 18 entnommen werden.



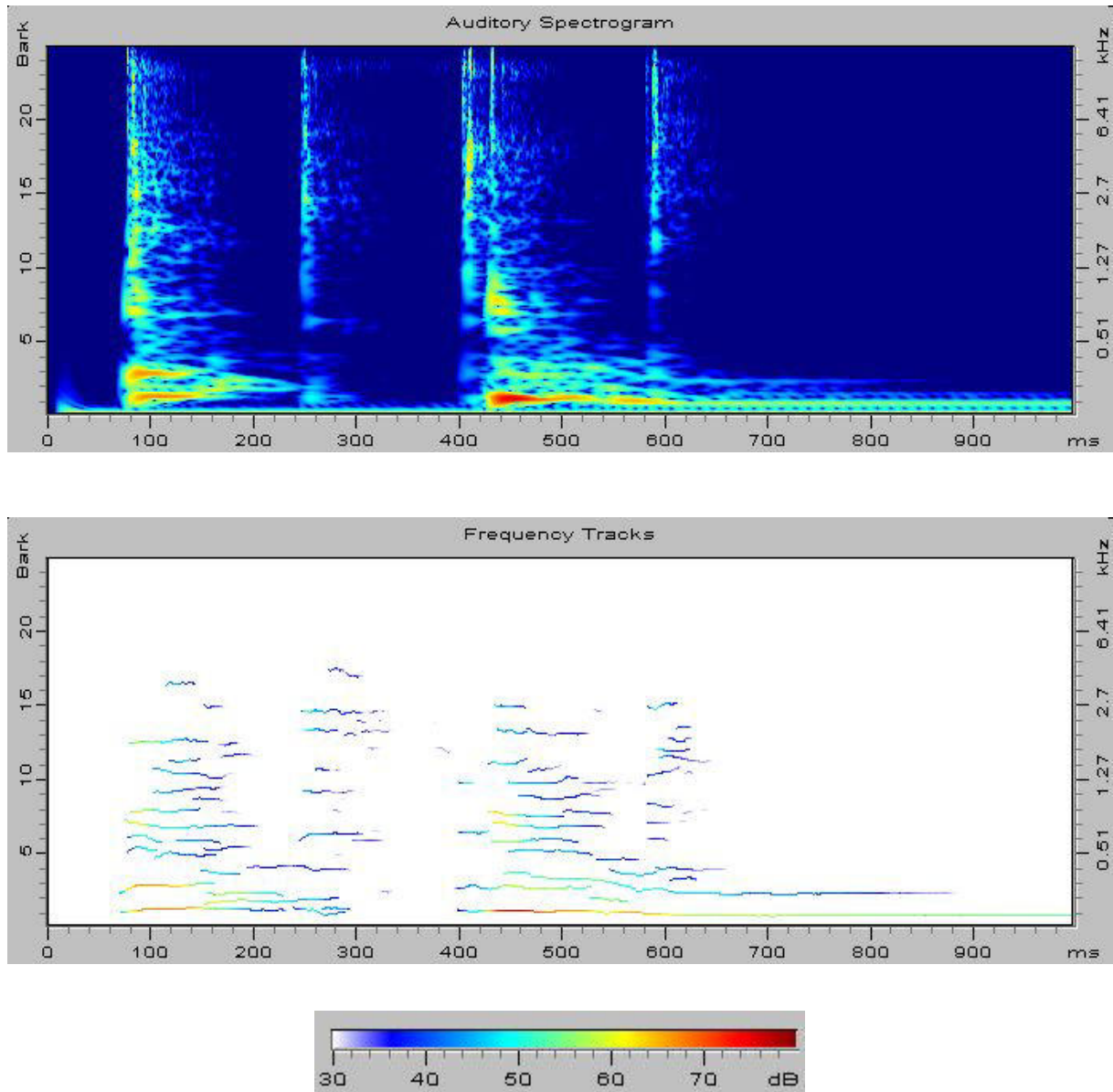
Anhang 17: Kombinations-Klang **dhin**, gespielt von Parvinder Bharat.

Oben: Auditorisches Spektrogramm (Auditory Spectrogram), ermittelt mit VIPER.

Mitte: Frequenzspuren (Frequency Tracks) unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung (Nonlinear Masking).

Die unten angefügte Farbskala zeigt, wie der Pegel kodiert ist: Die Folge weiß (mittleres Diagramm) – dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot bedeutet ansteigenden Pegel.

Auditorisches Spektrogramm und Frequenzspuren sind die gehöradäquaten Entsprechungen zum Wasserfalldiagramm in Fig. 47. Sie stellen **dhin** als einen rein perkussiven Schlag dar, der auf der *Tabla* gespielt wird. Praktisch zur selben Zeit erzeugt der Spieler einen tiefen Klang auf der *Bayan*. Dessen Tonhöhe wird wesentlich durch den lang anhaltenden Teilton bei etwa 80 Hz bestimmt. Der nächste Teilton bei etwas mehr als 200 Hz ist größtenteils verdeckt, so dass erst wieder die lang anhaltende Komponente mit 501 Hz eine Spektraltonhöhe hervorzurufen in der Lage wäre.



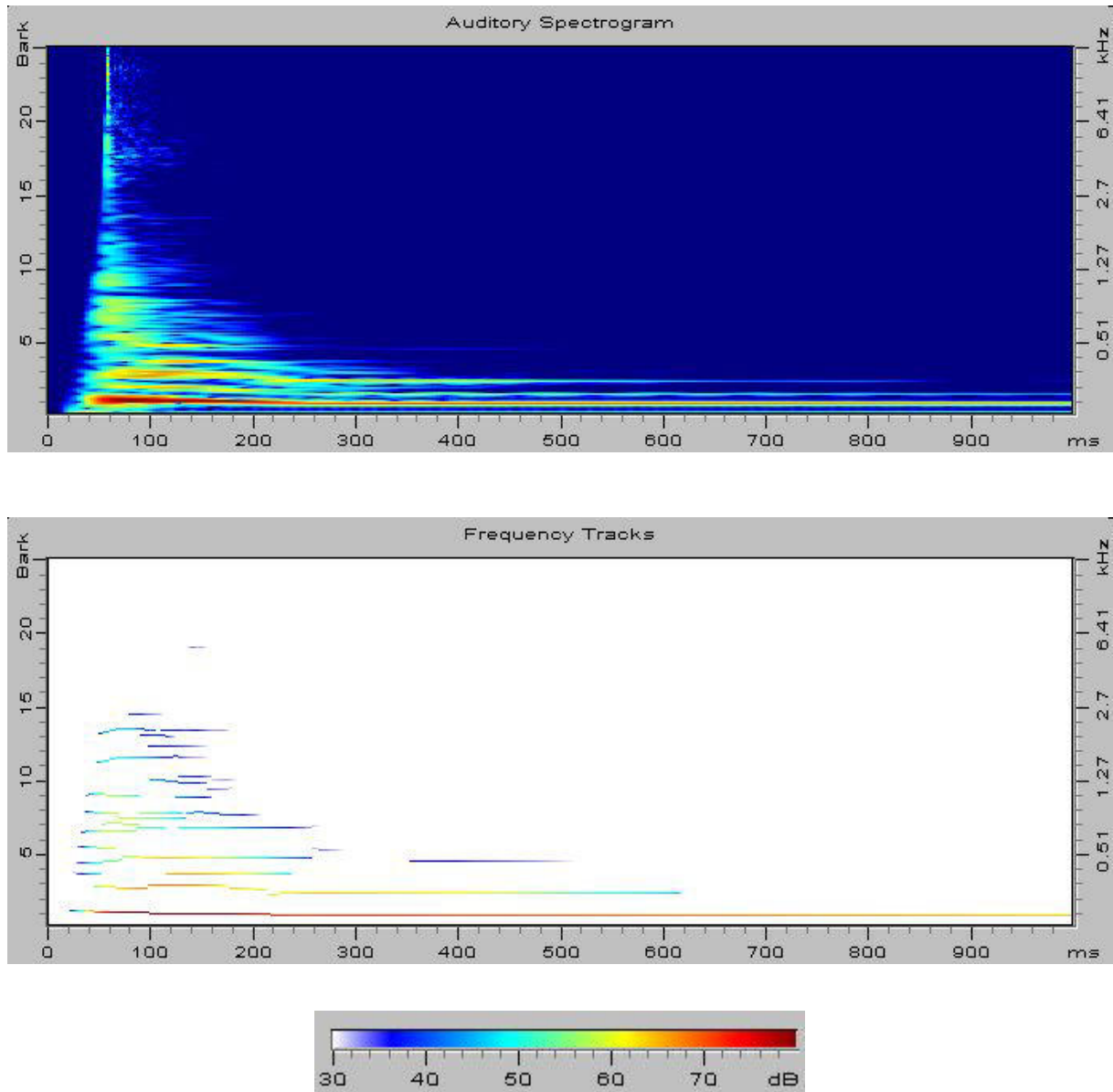
Anhang 18: Kombinations-Klang *dhir-dhir*, gespielt von Parvinder Bharat.

Oben: Auditorisches Spektrogramm (Auditory Spectrogram), ermittelt mit VIPER.

Unten: Frequenzspuren (Frequency Tracks) unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung (Nonlinear Masking).

Die unten angefügte Farbskala zeigt, wie der Pegel kodiert ist: Die Folge weiß (mittleres Diagramm) – dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot bedeutet ansteigenden Pegel.

Auditorisches Spektrogramm und Frequenzspuren entsprechen dem Wasserfalldiagramm in Fig. 49. Wie die Bezeichnung *dhir-dhir* vermuten lässt, handelt es sich um einen zweifachen Doppel-Schlag. Den rein perkussiven Part übernimmt die *Tabla*; vgl. Anhang 16. Praktisch gleichzeitig mit dem ersten Teil-Schlag wird auf der *Bayan* ein tiefer Klang gespielt, dem der tonale Part zukommt. Dessen Tonhöhe wird wesentlich durch den lang anhaltenden Teilton bei 78 Hz bestimmt. Der nächste Teilton, der eine Spektraltonhöhe hervorzurufen in der Lage wäre, ist die Komponente mit der Frequenz 233 Hz. Wie die Frequenzspuren zeigen, können die Frequenzen im stationären Teil andere Werte als zu Beginn annehmen, da sie von zwei unterschiedlichen Instrumenten stammen.



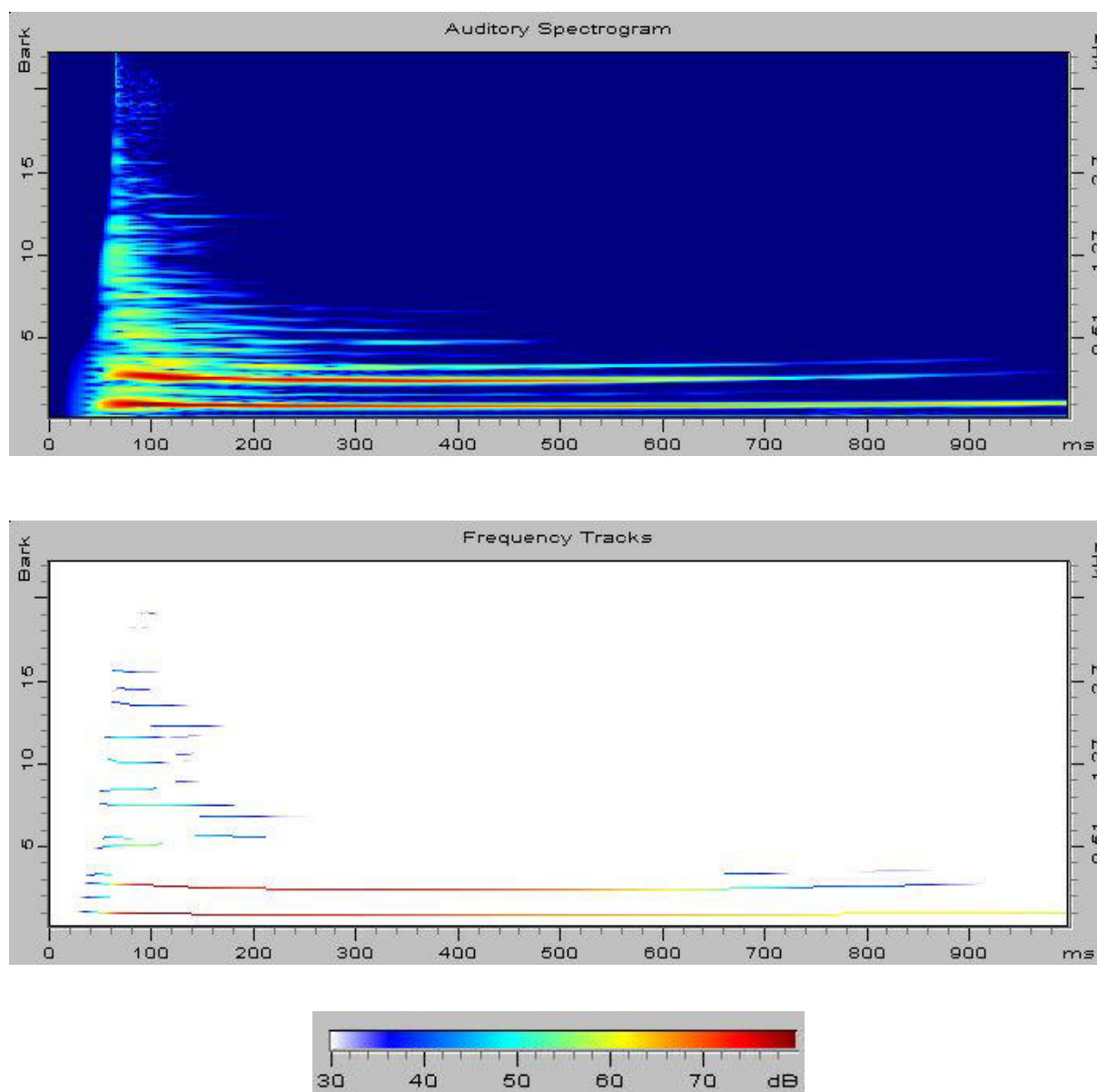
Anhang 19: Bayan-Klang *ke*, unmoduliert gespielt von Parvinder Bharat.

Oben: Auditorisches Spektrogramm (Auditory Spectrogram), ermittelt mit VIPER.

Mitte: Frequenzspuren (Frequency Tracks) unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung (Nonlinear Masking).

Die unten angefügte Farbskala zeigt, wie der Pegel kodiert ist: Die Folge weiß (mittleres Diagramm) – dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot bedeutet ansteigenden Pegel.

Auditorisches Spektrogramm und Frequenzspuren sind die gehöradäquaten Entsprechungen zum Wasserfalldiagramm des unmodulierten Klangs in Fig. 52 oben. Der Schlag *ke* wird nur auf der *Bayan* gespielt. Im dargestellten Beispiel sinken die Frequenzen zunächst rasch ab. Da der Spieler den Handballen, der auf das Fell drückt, hier nach dem Einschwingen an derselben Stelle belassen hat, bleibt die Tonhöhe im stationären Teil gleich. Sie ist wesentlich durch den lang anhaltenden Teilton bestimmt, dessen Frequenz im ausschwingenden Teil konstant 78 Hz beträgt. Der nächste Teilton bei 147 Hz ist verdeckt, so dass erst wieder die Komponenten mit der Endfrequenz 236 Hz eine Spektraltonhöhe hervorzurufen in der Lage wäre.



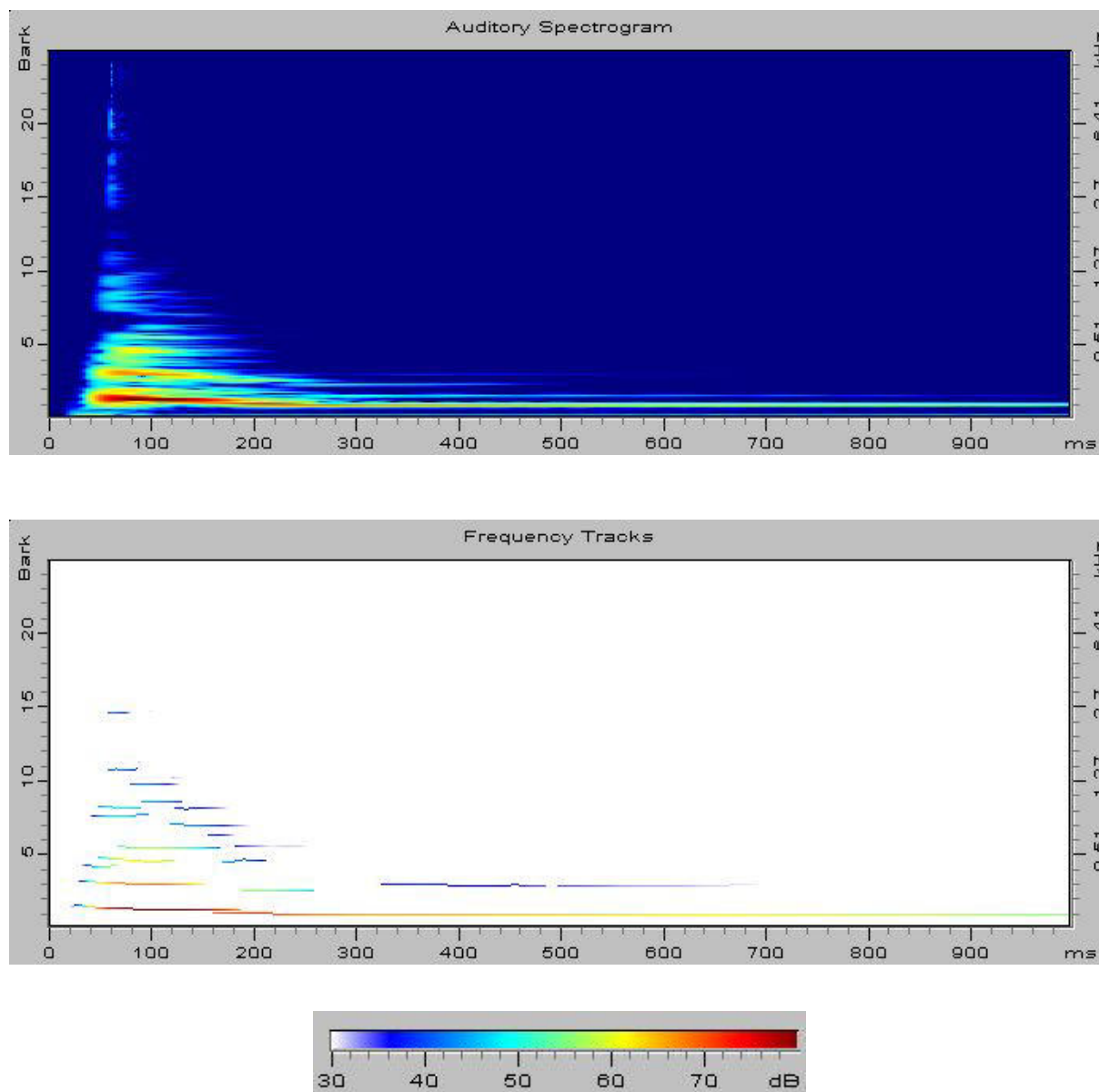
Anhang 20: Bayan-Klang *ke*, moduliert gespielt von Parvinder Bharat.

Oben: Auditorisches Spektrogramm (Auditory Spectrogram), ermittelt mit VIPER.

Mitte: Frequenzspuren (Frequency Tracks) unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung (Nonlinear Masking).

Die unten angefügte Farbskala zeigt, wie der Pegel kodiert ist: Die Folge weiß (mittleres Diagramm) – dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot bedeutet ansteigenden Pegel.

Auditorisches Spektrogramm und Frequenzspuren des Klanges *ke*, der auf der *Bayan* gespielt wird, sind die gehöradäquaten Entsprechungen zum Wasserfalldiagramm des modulierten Schlags in Fig. 52 unten. Die Tonhöhe wird durch den lang anhaltenden Teilton unterhalb von 100 Hz bestimmt. Der nächste Teilton von etwas weniger als 200 Hz ist infolge der Maskierungswirkung des ersten Teiltones unwirksam, so dass erst wieder die Komponente mit etwa 250 Hz eine Spektraltonhöhe hervorrufen kann. Im Gegensatz zum vergleichbaren *ke*-Klang in Anhang 19 hat hier der Spieler durch Verschieben des Handballens auf dem Fell die Tonhöhe moduliert, was sich in der allmählichen Verschiebung der Frequenzspuren widerspiegelt. So fällt im betrachteten Zeitfenster die erste Frequenz von zunächst 94 Hz auf 81 Hz ab, um nach 1 s bis auf 100 Hz und später wahrscheinlich noch weiter anzusteigen. Analog beginnt der zweite hörbare Teilton mit 269 Hz, fällt auf 236 Hz ab und steigt bis auf 290 Hz an.



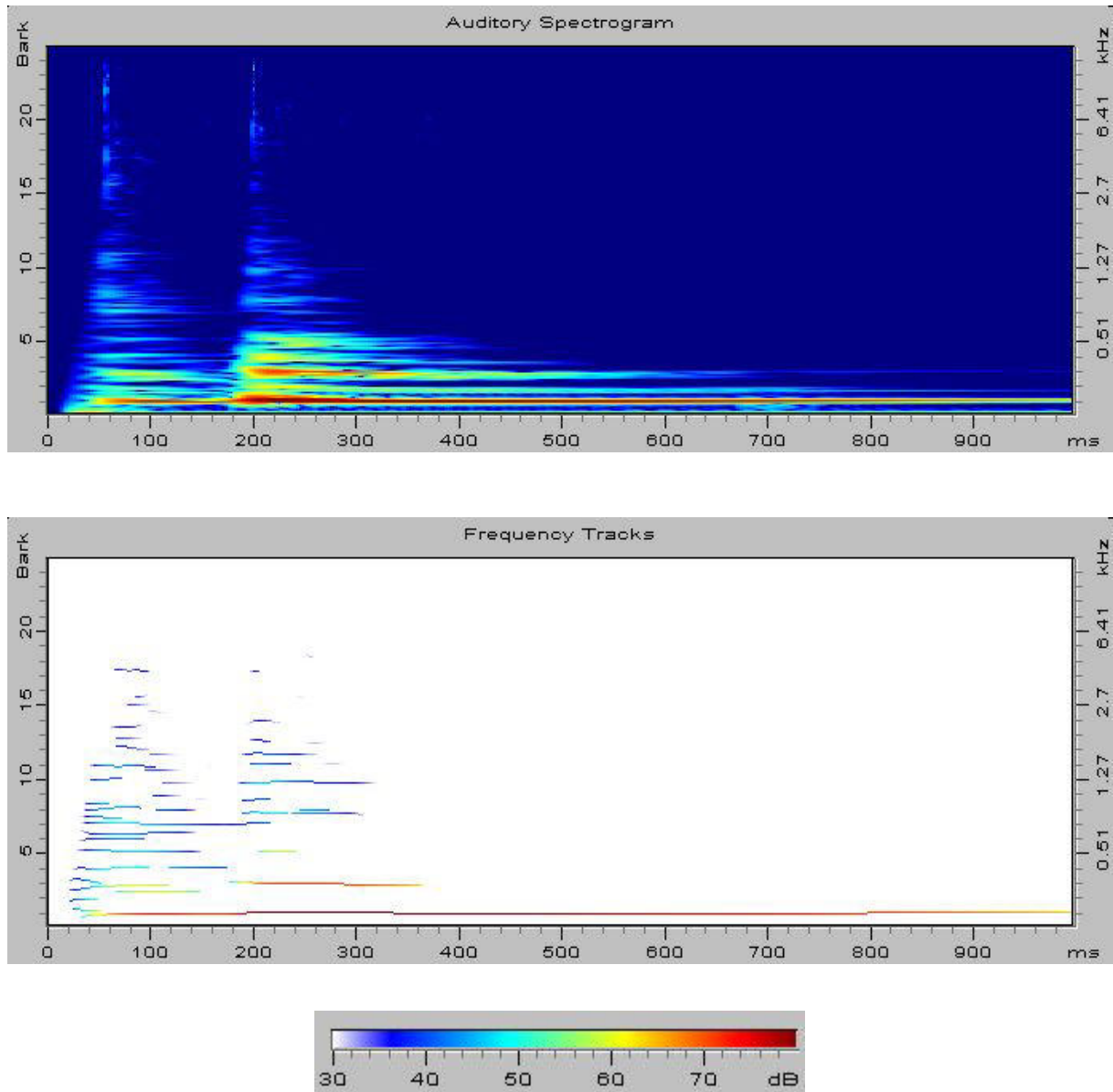
Anhang 21: *Bayan-Klang ke*, gespielt von Harpit Sahota.

Oben: Auditorisches Spektrogramm (Auditory Spectrogram), ermittelt mit VIPER.

Mitte: Frequenzspuren (Frequency Tracks) unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung (Nonlinear Masking).

Die unten angefügte Farbskala zeigt, wie der Pegel kodiert ist: Die Folge weiß (mittleres Diagramm) – dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot bedeutet ansteigenden Pegel.

Auditorisches Spektrogramm und Frequenzspuren sind die gehöradäquaten Entsprechungen zum Wasserfalldiagramm in Fig. 53 unten. Der Klang *ke*, ein tief klingender Ton, wird auf der *Bayan* gespielt. Seine Tonhöhe ist wesentlich durch den lang anhaltenden Teilton von etwa 100 Hz bestimmt, dessen Frequenz von anfänglich 103 Hz bis auf etwa gleichbleibende 90 Hz gezogen wird. Die nächsten Teiltöne sind verdeckt. Ein nicht verdeckter weiterer Teilton nimmt die Endfrequenz 289 Hz an. Offenbar bestimmt vor allem die tiefste Komponente mit ihrer Spektraltonhöhe, die zunächst abfällt und im Beispiel während des Ausklings dann fast gleich bleibt, die Tonhöhe des Gesamtklages.



Anhang 22: *Bayan-Klang gin*, gespielt von Harpit Sahota.

Oben: Auditorisches Spektrogramm (Auditory Spectrogram), ermittelt mit VIPER.

Mitte: Frequenzspuren (Frequency Tracks) unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung (Nonlinear Masking).

Die unten angefügte Farbskala zeigt, wie der Pegel kodiert ist: Die Folge weiß (mittleres Diagramm) – dunkelblau – hellblau – grün – gelb – orange – dunkelrot bedeutet ansteigenden Pegel.

Auditorisches Spektrogramm und Frequenzspuren sind die gehöradäquaten Entsprechungen zum Wasserfalldiagramm in Fig. 55 unten. Sie geben einen Vor-Schlag mit einem darauf folgenden tiefen Klang wieder. Der Teilton bei etwa 170 Hz ist verdeckt, so dass erst wieder die Komponente mit etwa 290 Hz eine Spektraltonhöhe hervorzurufen in der Lage wäre. Die Tonhöhe ist moduliert und wird ganz wesentlich durch den lang anhaltenden Teilton bei etwa 100 Hz bestimmt. Dessen Frequenz ist am Anfang 93 Hz, beträgt am Ende des 1 s langen Zeitfensters 100 Hz und steigt dann offenbar noch weiter an.

**In der Reihe
Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik
sind bisher erschienen:**

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

ISSN 1430-936X

Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik