

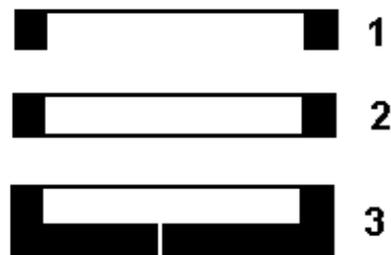
Kapitel 9: Zwei- und dreidimensionale Schwingungserzeuger

Instrumente mit zwei- und dreidimensionalen Schwingungserzeugern sind laut. Sie haben die Fähigkeit, ihre Schwingungsenergie ohne Umschweife optimal an die Luft zu übertragen. Sie sind ihr eigener Lautsprecher. Und sie sind sehr robust und einfach gebaut. Wie schon erwähnt, kann aber nicht erwartet werden, dass ein mehrdimensionaler Schwingungserzeuger „harmonisch“ schwingt. Musikalisch heißt dies, dass die mehrdimensionalen Schwingungserzeuger „von sich aus“ kaum einen Tonhöhen Eindruck hervorrufen. Und, wenn entsprechende Instrumente dies doch tun, dann liegt dies oft nicht am Schwingungserzeuger, sondern an Resonanzeigenschaften des Instrumentenkörpus.

9.1. Eine Membran als Schwingungserzeuger

Eine *Membran* ist das zweidimensionale Gegenstück zur Saite. Sie ist ein zweidimensionaler elastischer Körper. Es gibt drei Möglichkeiten, ein Fell, eine Plastikhaut oder dergleichen als elastische Membran aufzuspannen:

- auf einem offenen Rahmen,
- auf einem durch eine andere Membran abgeschlossenen Rahmen,
- auf einem (fast) geschlossenen Hohlkörper.



Im 1. Fall strahlt die Membran unmittelbar an die Luft ab (Beispiel: Bass Drum). Im 2. Fall schwingen die beiden Membranen als ein über die Innenluft gekoppeltes System und strahlen beide ab (Beispiel Tom-Tom). Im 3. Fall wird die Schwingung der Membran durch die Resonanz des Hohlraumes beeinflusst, strahlt aber im wesentlichen alleine an die Luft ab (Beispiel Kesselpauke). Die kleine Luftöffnung ist zum Druckausgleich notwendig.

Abb. 9.1 Aufspannungen einer Membran

Experiment 9.1a

Wir nehmen Klänge verschiedener Membran-Instrumente auf und sehen uns den Verlauf der an die Luft abgestrahlten Schwingung am Computerbildschirm an. Bei Bass Drum, Tom-Tom und tendenziell Bongos sieht man recht einfache Schwingungsbilder. Die hier verwendete **Bass Drum** mit einem harten Anschlag zeigt in den ersten 6 ms Geräuschanteile, sodann ca. 8 Schwingungsperioden mit schnell abnehmender Amplitude innerhalb 1/10 Sekunde. Eine kleine Quasiperiode (vgl. Abbildung 3.6) ist noch an den „wandernden“ kleinen Einbuchtungen zu erkennen. Dass der Bass Drum trotz dieser Periodizität selten eine Tonhöhe zugeordnet wird, liegt daran, dass bei diesen tiefen Frequenzen die wenigen Schwingungen nicht ausreichen, um vom menschlichen Gehirn als Periode erkannt zu werden. (Ein Glück für die gesamte Rockmusikszene!). Ein ähnliches Schwingungsbild zeigen Bongos, die wegen höherer Grundfrequenz in 100 ms mehr Perioden unterbringen.

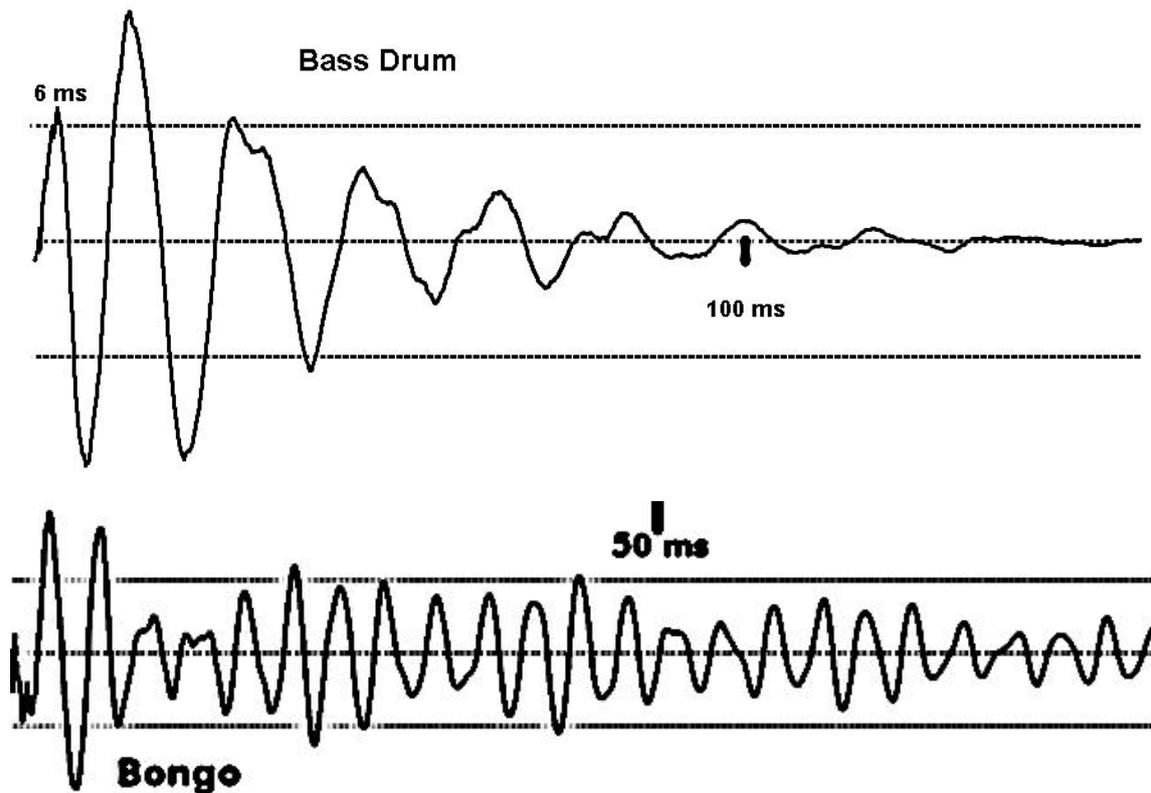


Abb. 9.2 Schwingungsbilder von Bass Drum und Bongo

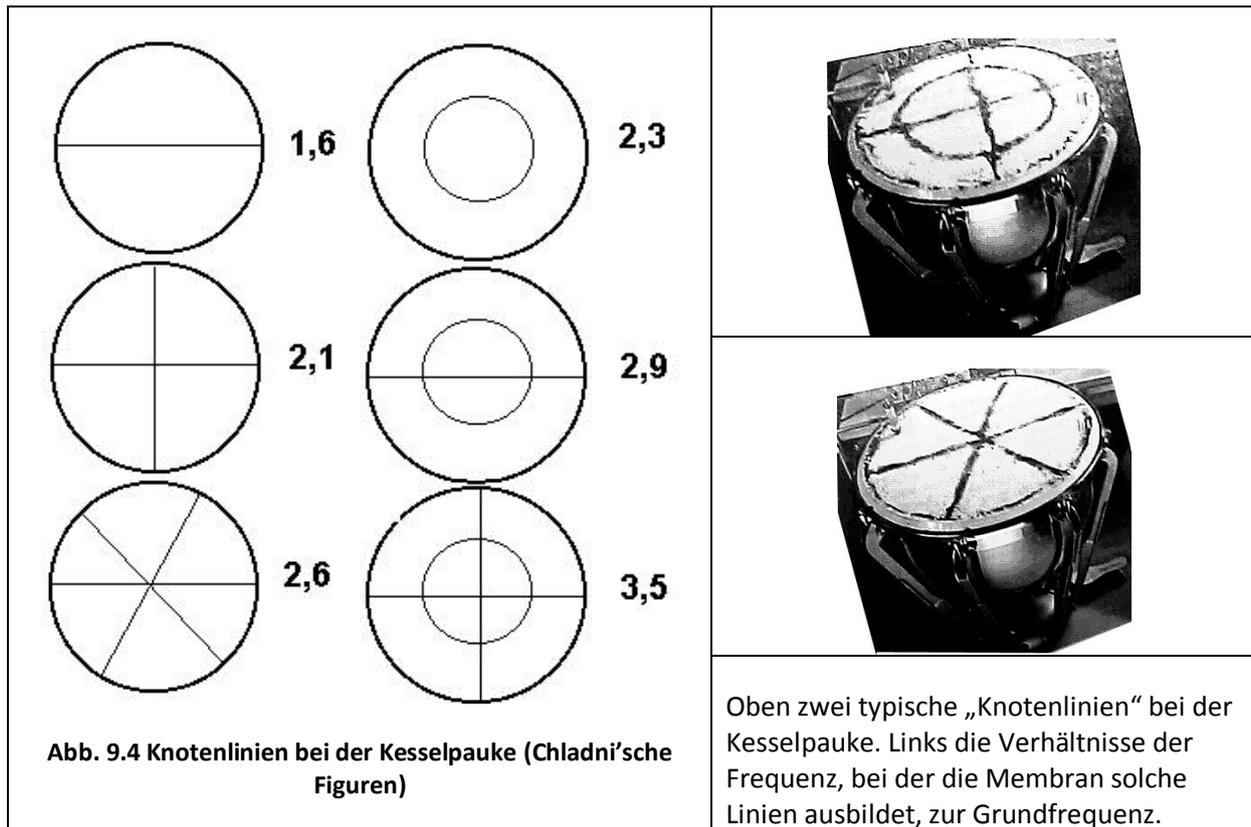
Bei der **Kesselpauke**, Typ 3 von Abbildung 9.1, ist mit etwas komplizierteren Umständen zu rechnen. Hier regt die Membran die Luft im Hohlraum des Kessels zu Eigenschwingungen an, die dann wieder auf die Membran zurückwirken. In einem Experiment, das analog zu Experiment 7.3 aufgebaut ist, können wir die Schwingungsknoten und -bäuche einer Membran einzeln sichtbar machen. Dabei gehen wir wie in Kapitel 5 und 7 davon aus, dass die Gesamtschwingung der Membran sich aus den einzelnen Resonanzschwingungen zusammensetzt.

Experiment 9.1b

Die Membran einer Pauke wird durch einen Sinuston über Lautsprecher erregt. Auf der Membran ist gleichmäßig Weizenkleie (oder geriebene Kreide) verteilt. Wir verändern die Frequenz der die Membran anregenden Sinusschwingung.

Beobachtung: Bei bestimmten Frequenzen stellen sich zweidimensionale Schwingungsmuster (**Chladni'sche Figuren**) ein. Diese Frequenzen sind allerdings nicht immer ganzzahlige Vielfache einer „Grundfrequenz“, d.h. der tiefsten beobachteten Resonanzfrequenz (bei der sich kein Knoten bildet, d.h. in der Membranmitte ein Bauch ist). Die Knotenlinien liegen *nicht* „harmonisch“.

Der relativ gute Tonhöhen-Eindruck der Pauke rührt von einer Wechselwirkung der Fellspannung und damit der für die Knotenlinien zuständigen Grundfrequenz und dem Hohlraum innerhalb des Kessels her. Das Kesselvolumen hat Einfluss darauf, in welcher Stärke die einzelnen „Obertöne“ (die zu den Knotenlinien gehören) vertreten sind.



Dünne Metall- oder Plastikplatten (**Becken**, dünne Gongs) rechnen mit zu den zweidimensionalen Schwingungserzeugern, obwohl sie nicht alle Kriterien von „elastisch“ erfüllen.

Experiment 9.1c

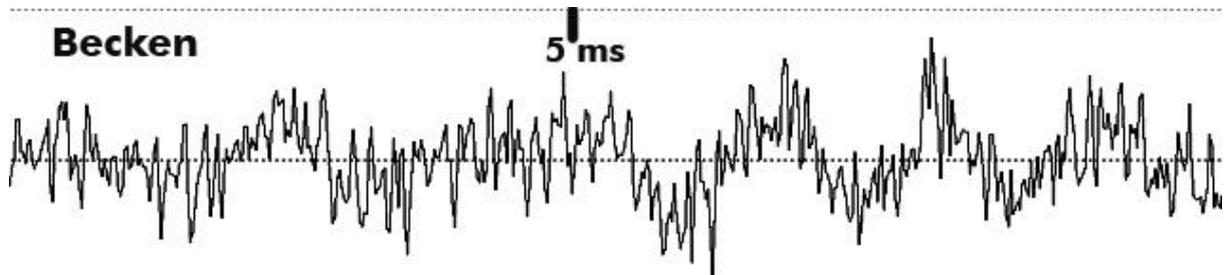
Wir wiederholen das Experiment 9.1b an einem Becken und messen neben der vom Becken abgestrahlten Luftschwingung nun über ein Kontaktmikrofon auch die Schwingung am Beckenrand. Das Experiment lässt sich auch an Gongs durchführen.

Ergebnis:

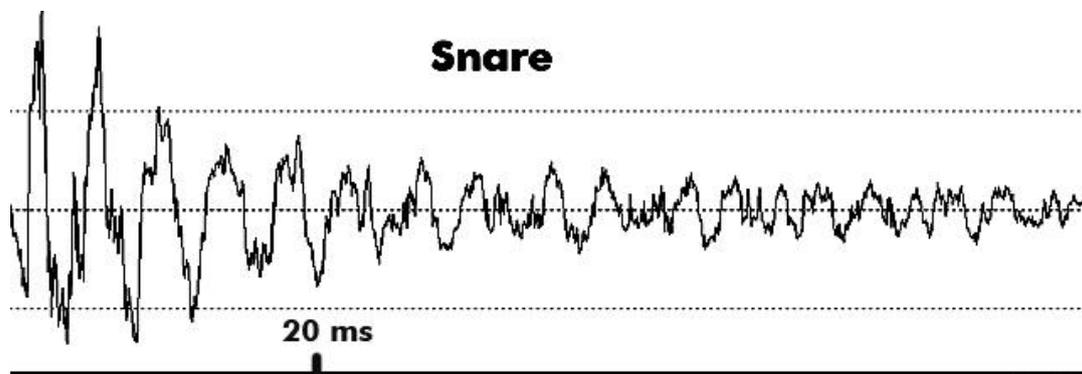
- Bei gewissen Anregungsfrequenzen gerät das Becken in Resonanzschwingung.
- Die Resonanzschwingungen werden am Rand des Beckens als Sinusschwingungen registriert.
- Die Resonanzfrequenzen (und damit die Frequenzen der „nicht-ganzzahligen Obertöne“) zeigt folgende Tabelle:

Resonanzstellen	klein	sehr groß	sehr groß	groß	mittel
Frequenz in Hz	131	366	478	598	768
ganzzahliges Vielfache	2 * 65,5	6 * 61	8 * 59,8	10 * 59,8	13 * 59,1
nicht-ganzzahliges Vielfache	2,2 * 59	6,2 * 59	8,1 * 59	10,1 * 59	13,02 * 59

Das ausklingende Becken zeigt eine Schwingung von 59 Hz. Die hier vorliegenden Resonanzstellen sind „nicht-ganzzahlige Vielfache“ dieser Frequenz, allerdings liegen die Werte stets in der Nähe von ganzen Zahlen, sodass ein „fast harmonisches Spektrum“ vorliegt. Dies kann man auch am Schwingungsbild erkennen:



Mit einiger Phantasie kann man sich das Schwingungsbild einer Snare, bei der das eine Fell mit Metallspiralen versehen ist, bereits ohne Zuhilfenahme eines Computers vorstellen: „geräuschhafte gekräuselte Bongo-Schwingung“.



Und dass eine „Open Hihat“ fast farbig rauscht, aber dennoch eine schwebungsartige Amplitudenmodulation aufweist, bemerkt man hörend eventuell aber erst, nachdem man das Schwingungsbild studiert hat:

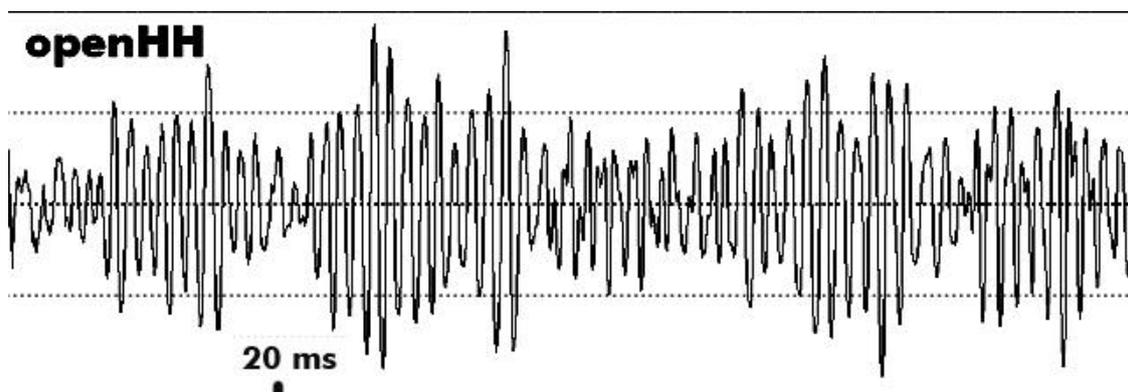


Abb. 9.5 Schwingungsbilder diverser zweidimensionaler Schwingungserzeuger

Ein dritter Typ eines zweidimensionalen Schwingungserzeugers (neben Membranen und dünnen Platten) sind schwingende Metall- oder Bambuszungen: Mundharmonika, Maultrommel, Akkordeon,

Harmonium und **Mbira/Sanza**. Von letzteren gibt es im Überseemuseum Bremen viele nie gespielte Exemplare, die schon fast 100 Jahre alt sind. Bei einem „Klangarchivierungs-Projekt“ wurde ein Instrument aus Kamerun „vermessen“:

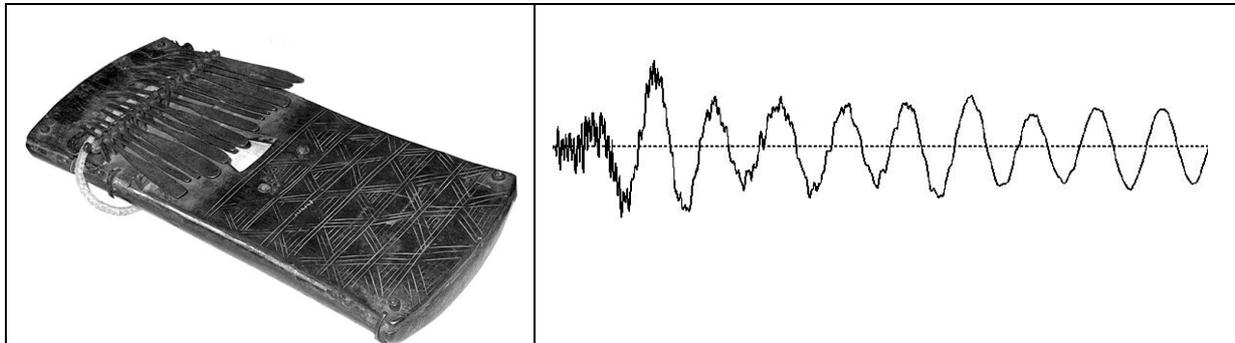


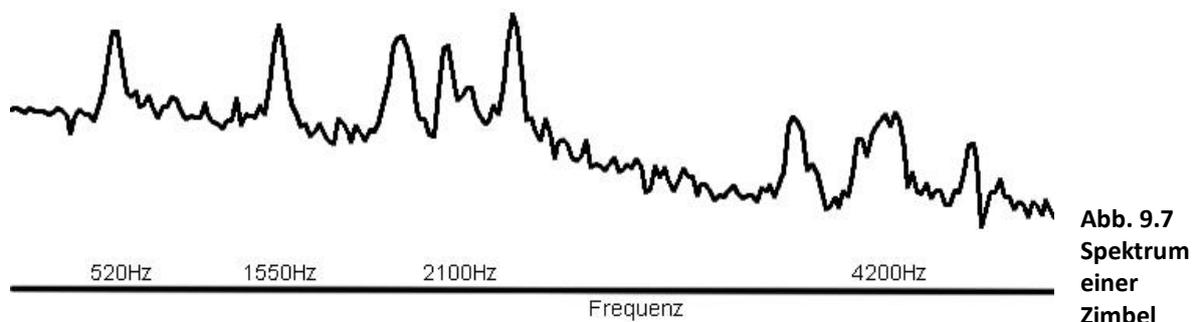
Abb. 9.6 Mbira (Kamerun 1914) : geräuschhafter Einschwingvorgang, sinusförmiges Ausklingen

9.2. Dreidimensionale Schwingungserzeuger (Festkörperinstrumente)

Dass die Schwingungsverhältnisse bei dreidimensionalen Schwingungserzeugern einfacher sind als bei zweidimensionalen, wird niemand erwarten. Glücklicherweise werden sie aber auch nicht wesentlich komplizierter. Das Schwingungsverhalten - so schwer es sich bei Xylophonplatten, chinesischen Glocken, Klangschalen oder Holz-Claves erklären lässt - zeigt alle Mischformen der uns inzwischen bekannten Schwingungen:

- harmonische Bestandteile, oft erst im Ausschwingvorgang,
- quasiperiodische Schwingungen resultierend aus nicht-ganzzahligen Obertönen,
- alle Arten von Rauschen und chaotischen Schwingungen.

Bei **Triangeln** und ähnlich klar klingenden Festkörperinstrumenten ohne definierte Tonhöhe tritt noch ein weiterer Schwingungstyp hinzu, der sich im Spektrum als „Seitenbänder“ äußert. Die Spektrallinien liegen hier teilweise „harmonisch“ an Stellen, die ganzzahlige Vielfache einer Grundfrequenz sind, sind aber begleitet von dicht dabei liegenden, zusätzlichen Spektrallinien (den „Seitenbändern“). Weitere Einzelheiten zu Spektren mit Seitenbändern werden in Abschnitt 10.2 unter dem Stichwort „FM-Synthese“ erörtert. Mit der „Fast Fourier Transformation“, die in „Cubase“ eingebaut ist, wurde folgendes Spektrum einer Zimbel aufgenommen.



Um die Frequenz 2100 und 4200 Hz herum sind Seitenbänder zu sehen, die sich nicht als „harmonische Obertöne“ des Grundtons (520 Hz) deuten lassen. (Das Bild zeigt, dass Spektrallinien in der Realität eine Utopie darstellen: hier sind es kleine Berge!)

Experiment 9.2

Wir sampeln Klänge von verschiedenen Glocken, Gongs, Vibraphonplatten etc. Das Schwingungsbild ist meist komplex. Die Fourieranalyse ergibt bisweilen eine „Grundfrequenz“ und Spektrallinien. Fast immer ändert sich das Spektrum beim Ausklingen. Und oft lässt sich die Schwingung als Überlagerung geräuschhafter und periodischer Vorgänge interpretieren. Im folgenden einige Beispiele.

Die Schwingungsform von **Gongs** ist sehr variabel: Sie ändert sich mit dem Material des Schwingungserregers (Schlegel) und mit der Lautstärke. Die Fourieranalyse eines „Feng-Lui“-Gongs (Johannes Oehlmann) zeigt den musikalisch bekannten Sachverhalt, dass sich (1) die Klangfarbe mit der Lautstärke extrem ändert (nach der Regel: je lauter umso mehr Oberfrequenzen sind aktiv) und (2) der Gong im Ausklingen immer „harmonischer“ und „tiefer“ wird (die hohen nicht-harmonischen Obertonbestandteile klingen schneller ab als die tiefen). In einem 3D-Bild sieht das so aus:

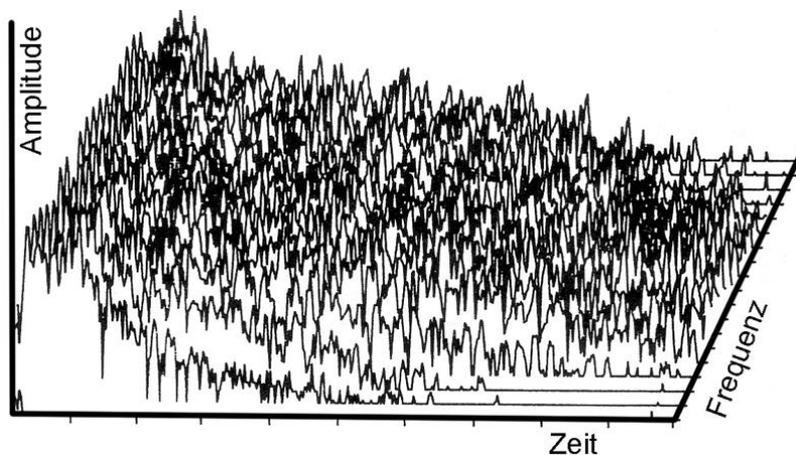


Abb. 9.8 Feng-Luo-Gong-Spektrum im 3D-Bild (nach Johannes Oehlmann)

Derartige Bilder beeindrucken stets außerordentlich. Johannes Oehlmann spricht von einem „Wasserfall“, womit nicht nur das Bild, sondern auch der Klang beschrieben werden soll.

Dass es sehr viele Instrumente mit mehrdimensionalen Schwingungserzeugern gibt, die keine Tonhöhenwirkung hervorrufen und daher kein periodisches Spektrum haben, äußert sich in den meisten Fällen in einem Schwingungsbild, das für „Rauschen“ typisch ist (Abbildung 3.8 Tambourin).

Dreidimensionale Schwingungserzeuger haben Knotenflächen (entsprechend den Knotenlinien zweidimensionaler Schwingungserzeuger). Die „Knotenlinien“ von **Glocken** können in holografischen Laser-Fotografien deutlich gemacht werden. Dabei wird die Oberfläche dreidimensional „gescannt“. Abbildung 9.9 zeigt als Beispiel chinesische Zhong-Glocken (aus dem 5. Jahrhundert v. Chr.), mit denen der Grundton der Regierungsführung festgelegt wurde. Die Schwingungen zeigen Ähnlichkeiten mit der in Abbildung 5.10 dargestellten Schwingung von Decke und Boden der Geige. Beide Bilder stellen die Grundschwingung unterschiedlich geformter Glocken dar.

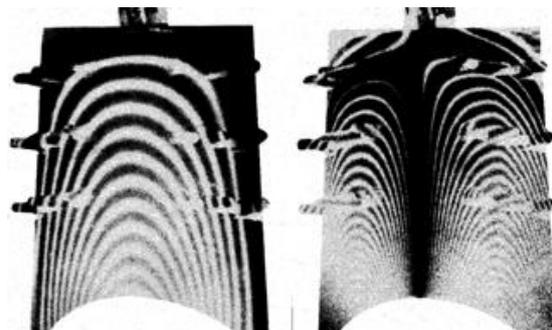


Abb. 9.9 Knotenflächen bei Glocken

Die wichtigsten dreidimensionalen Schwingungserzeuger mit relativ klaren Tonhöhen sind die **Xylophone** (aus Holz oder Metall). In der Regel sind die Xylophonklänge sehr kurz und besitzen einen geräuschhaften Einschwingvorgang, dem sich eine fast sinusförmige Schwingung anschließt. Von großer Bedeutung ist hier (wie auch beim Gong) die Art und Weise, wie die Schwingung erregt wird: an welcher Stelle des Festkörpers und mit welchem

Mechanismus (weicher/harter Schläger usw.). Im Rahmen eines Projekts zur „Vermessung“ und klanglichen Archivierung der nie gespielten und oft über 100 Jahre alten Xylophone des Bremer Überseemuseums sind auch die Schwingungserregungsarten „archiviert“ worden:

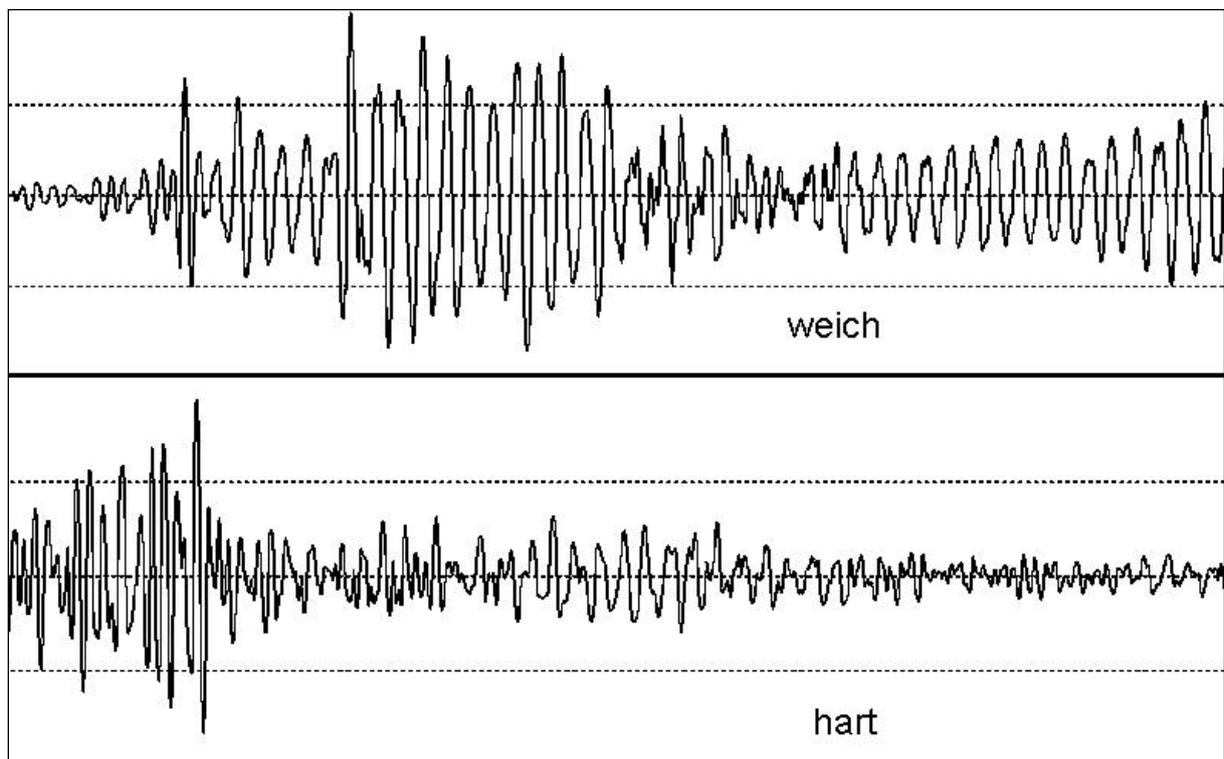


Abb. 9.10 Xylophon aus Kamerun (1914) weich und hart angeschlagen

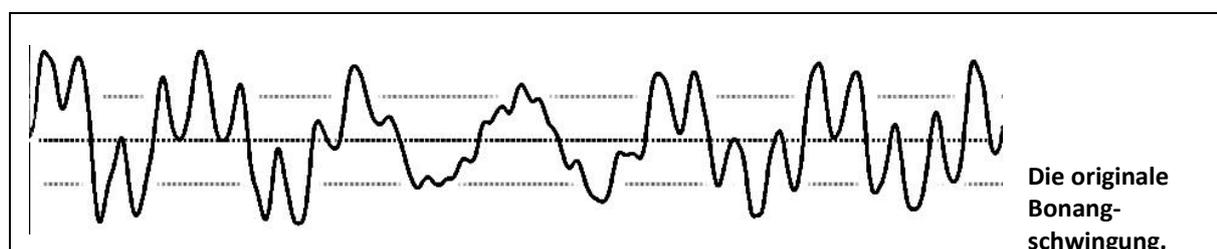
Beim weichem Anschlag „kommt“ der Klang erst langsam und ist weniger geräuschhaft.

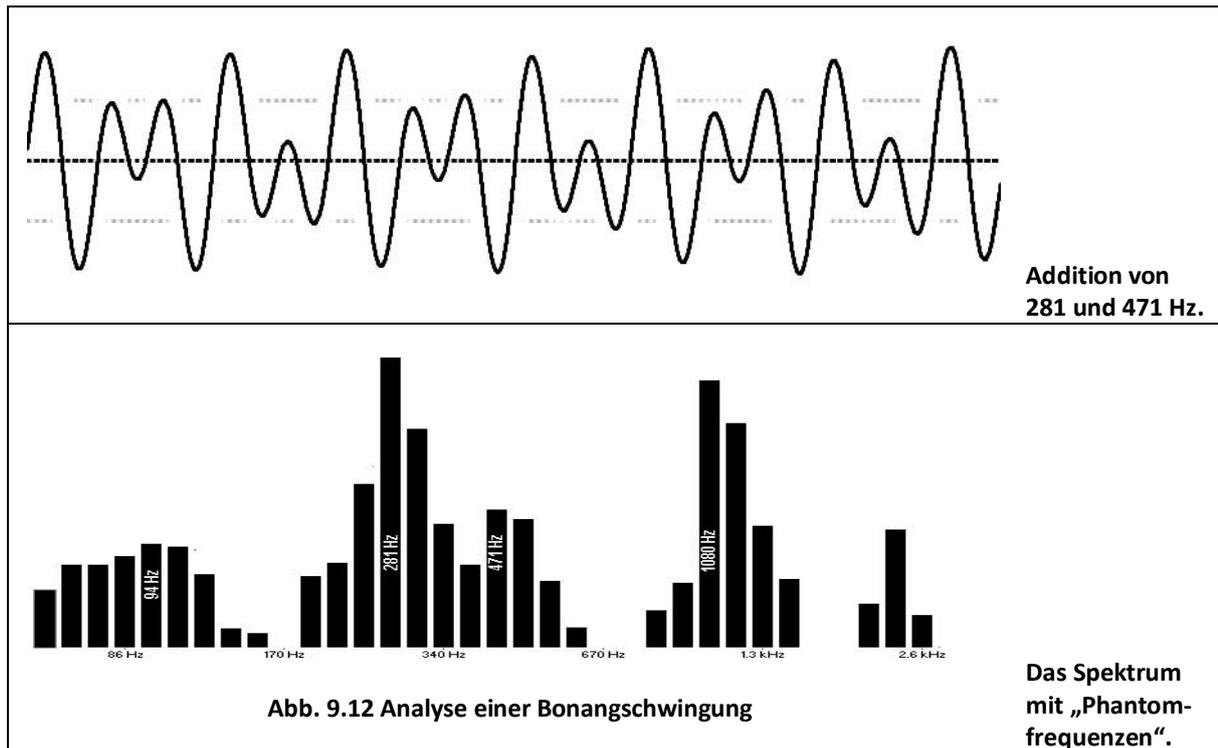
Das Instrumentarium des **Gamelan** besteht aus Xylophonen (Metall und Holz), aus großen Gongs mit unbestimmter Tonhöhe und aus Serien von kleineren Gongs („Bonang“) mit gut erkennbaren Tonhöhen. Der tiefste Gong der Bonang (Abbildung 9.11) hat die Tonhöhe cis' mit 281 Hz. Im



Abb.9.11 Bonang: ein Satz gestimmter Gongs

Spektrum gibt es einen ersten unharmonischen Oberton bei 471 Hz. Im Schwingungsbild sieht man die typische quasiperiodische Schwingung, eine „wandernde“, sehr starke Ausbuchtung. Die grobe Spektralanalyse weist bei ca. 100 Hz Amplituden auf. Dies Phänomen ist so zu erklären, dass sich der Analyse-Algorithmus bei den beiden Frequenzen 281 und 471 Hz „denkt“, dass diese der 3. und 5. Oberton von 95 Hz sein müssten gemäß der Formel $3 \times 95 = 285 \text{ Hz}$ und $5 \times 95 = 475 \text{ Hz}$.





Dreidimensionale schwingende Flüssigkeiten (Kymatik)

Mit technischer Raffinesse ist es Hans Jenny gelungen, ins „Innere“ schwingender dreidimensionaler elastischer Körper (viskoser Flüssigkeiten) zu blicken. Dazu wurde ein entsprechender Stoff (Wasser, Öl, Paraffin usw.) in einen auf einer Glasplatte liegenden Rahmen gefüllt, die Platte von unten mit einem Tongenerator erregt, die Flüssigkeit mit einem Stroboskop beleuchtet und eine Fotografie der schwingenden Flüssigkeit erstellt. Die Frequenz des Stroboskops war ein ganzzahliges Vielfache der anregenden Frequenz des Tongenerators. Im Stroboskoplicht sieht man dann stets dieselbe Phase der sehr schnellen Dichteschwankungen im Innern und an der Oberfläche der Flüssigkeit. Hans Jenny stellte bei seinen Fotografien symmetrische und „harmonikale“ Verteilungen der Flüssigkeitsdichte fest. Diese Beobachtung stand in gewissem Gegensatz zu den eher chaotischen Hologrammen an Glocken und dicken Platten und entsprach den Chladni'schen Figuren an Membranen. Es wurde auch festgestellt, dass es bei kontinuierlicher Änderung der Anregungsamplitude sprunghafte Änderungen des „harmonikalen“ Schwingungsmusters gibt, die an das Überblasen von Luftinstrumenten erinnern.

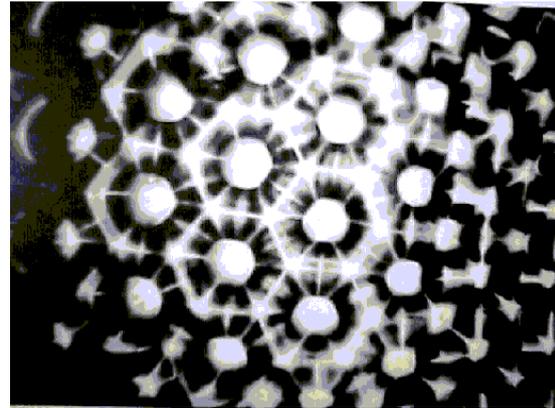


Abb. 9.13 Links: Steeldrums mit Ausbuchtungen, die an Chladni'sche Figuren erinnern.

Rechts eine Fotografie von Hans Jenny („Kymatik“)

9.3. Die menschliche Stimme als Schwingungserzeuger

Die Vokale der menschlichen Stimme werden, wie in Abschnitt 6.4 erörtert, durch ein „Filtersystem“ hervorgebracht, bei dem die Stimmbänder Schwingungserzeuger und der Mund-Rachenraum ein Formantfilter ist. Bei den stimmlosen Konsonanten sind die Stimmbänder inaktiv. Der jeweilige Laut wird durch Operationen der Zunge, der Lippen und durch Windgeräusche hervorgebracht. Hier eine **Systematik der Sprachlaute**:

Signale mit harmonischen Spektrum	m, l, n, ng	sinustonähnlich, kaum Obertöne	stimmhafte Konsonanten
	u, o, a, ö, ä, e, i	obertonreiche Klänge, Formanten	Vokale
Signale mit Geräuschspektren	s, sch, j, ch, w	obertonartige Geräusch-Maxima	stimmhafte Zischlaute
	s, sch, (a)ch, (i)ch, f	obertonfreies Geräuschspektrum	stimmlose Zischlaute
Kurzgeräusche, Impulse	b, d, g	harmonische Impulse	stimmhafte Plosivlaute
	p, t, k	geräuschhafte Impulse	stimmlose Plosivlaute

Kriterium für die erste Gruppe ist, dass man auf alle diese Laute Melodien singen (d.h. *Tonhöhen* produzieren) kann. Kriterium der 2. Gruppe ist, dass man die Laute *beliebig lange* aushalten, aber keine Melodien singen kann. Die letzte Gruppe besteht aus Lauten, die definitionsgemäß sehr kurz sind und auch bei bestem Willen nicht zeitlich ausgedehnt werden können. Bei den stimmhaften Plosivlauten schwingt der Mund-Rachenraum als Formantfilter mit und man kann sogar (wie bei einer Maultrommel) vokalähnliche Laute hervorbringen. Der Mechanismus, der für das Rauschen zuständig ist, ist ein durch einen Lippen- und/oder Zungenspalt dringender Luftstrom.

In der *Sprachanalyse* besonders beliebt ist die Darstellung der Spektren als „Spektrogramm“ (siehe Abbildung 6.10). Reine Geräusche haben dort eine gleichmäßig verteilte Schwärzung zur Folge, während es bei formant- oder obertonartigen Geräuschen Streifen größerer und geringerer

Schwärzung gibt. Bei „u“ und „a“ sieht man solche Streifen, deren Wellung besagt, dass der Sprecher die Tonhöhe verändert hat. Am Schwingungsbild (oben) erkennt man, dass die Konsonanten gegenüber den Vokalen sehr kurz sind.

Die Schwingungsbilder eines stimmlosen und stimmhaften „s“ unterscheiden sich qualitativ. Das Spektrogramm der Konsonanten „s“, „t“ und „f“ ist fast gleichmäßig geschwärzt, „sch“ hat einen Formanten bei 2-3000 Hz.

