

**BEITRÄGE  
ZUR  
VIBRO- UND PSYCHOAKUSTIK**

**Herausgeber: Helmut Fleischer und Hugo Fastl**

---

**Helmut Fleischer**

**PHYSIKALISCHE UND  
GEHÖRBEZOGENE ANALYSE  
VON PAUKENKLÄNGEN**

# **PHYSIKALISCHE UND GEHÖRBEZOGENE ANALYSE VON PAUKENKLÄNGEN**

von

**Helmut Fleischer**

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

**Heft 2/08 der Reihe**

**Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik**

**Herausgeber: Helmut Fleischer und Hugo Fastl**

**ISSN 1430-936X**

**Herausgeber:**

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

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

**Postanschrift:**

LRT 4 UniBwM  
85577 Neubiberg  
Deutschland

---

Fleischer, Helmut:  
Physikalische und gehörbezogene Analyse von Paukenklängen  
Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 2/08  
Neubiberg 2008  
**ISSN 1430-936X**

**Postanschrift des Verfassers:**

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

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

# PHYSIKALISCHE UND GEHÖRBEZOGENE ANALYSE VON PAUKENKLÄNGEN

## *Zusammenfassung*

*Umfangreiches Material aus Experimenten, die sich auf das Schallsignal von Kesselpauken beziehen, ist zusammen gestellt. Schalle professioneller Orchesterinstrumente der Größen Nr. 2 (große Pauke) und Nr. 4 (kleine Pauke) wurden untersucht. Psychoakustische Tests und eine gehörbezogene Analyse haben ergeben, dass der Hauptton, hervorgerufen durch die 11-Schwingung des Felles, die wichtigste Rolle spielt. Seine Spektraltonhöhe definiert die musikalische Tonhöhe des Paukenklanges. Weitere klangbildende Töne sind die Quinte, die charakteristisch für die Pauke ist, und die Oktave, welche die musikalische Tonhöhe festigt. Sie stammen von der 21- bzw. 31-Mode. Der 01-Ton, den die erste axialsymmetrische Mode hervorruft, fügt sich nicht in diese nahezu harmonische Struktur ein.*

*Die weiteren Betrachtungen konzentrieren sich auf diese vier Teiltöne. FFT-Analyse wurde dafür verwendet, den zeitlichen Verlauf und den spektralen Gehalt der Schallsignale sichtbar zu machen. Zwei Arten von „Wasserfall“-Diagrammen werden präsentiert für eine Vielzahl von Pauken mit verschiedenen Kesseln, Kunststoff- und Naturfellen und in wechselnden Stimmungen. Im gesamten Stimmbereich, der bis zu eine Oktav umfasst, wurden die Frequenzen der ersten vier Teiltöne ermittelt und in Abhängigkeit von der Frequenz des Haupttones dargestellt. In aller Regel ist die Frequenz der Quinte nahe dem Eineinhalbfachen der Haupttonfrequenz, und die Frequenz der Oktave ist nahe dem Doppelten der Haupttonfrequenz. In Hinsicht auf die Intervalle zeigen sich die Instrumente Nr. 2 auf einem hohen Qualitätsniveau. Die Pauke Nr. 4 erweist sich den Exemplaren Nr. 2 geringfügig unterlegen.*

*Um seine Rolle zu klären, wurde der Kessel entfernt. Die Teiltonfrequenzen wurden bestimmt und mit denjenigen einer vollständigen Pauke mit Kessel verglichen. Der Kessel erweist sich als wesentlich für das Abklingen und die Intervalle der Teiltöne. In einem weiteren Experiment wurden Kessel teilweise mit Wasser (oder mit Dämpfungsmaterial) gefüllt und die Frequenzen gemessen. Das Volumen der eingeschlossenen Luft beeinflusst die Intervalle der Teiltöne, in besonders hohem Maße die Frequenz des 01-Tones. Damit dieser unharmonische Ton unhörbar bleibt, sollte der Kessel klein sein. In Hinsicht auf die Intervalle von Hauptton, Quinte und Oktave gibt es jedoch ein optimales Volumen. Dieses liegt im Bereich von 128 l bis 143 l bei der Pauke Nr. 2 und von 60 l bis 75 l bei der Pauke Nr. 4.*

# PHYSICAL AND AURALLY RELATED ANALYSIS OF TIMPANI SOUNDS

## *Summary*

*Comprehensive material is compiled based on experiments related to the acoustic signal of kettledrums (timpani). Sounds of professional orchestral instruments of sizes No. 2 (large timpani) and No. 4 (small timpani) were investigated. Psychoacoustic tests and an aurally-related analysis have revealed that the main tone, generated by the 11 mode of the head, plays the most important role. Its spectral pitch defines the musical pitch of the timpani note. Further sound-constitutive tones are the quint, which is characteristic for the timpani, and the octave, which strengthens the musical pitch. They originate from the 21 and 31 mode, respectively. The 01 tone arising from the first axi-symmetric mode does not fit into this approximately harmonic structure.*

*The further considerations focus on these four partial tones. FFT analysis was used for visualising the temporal history and spectral content of the acoustic signals. Two types of “water-fall” diagrams are presented for a wide variety of timpani with different kettles, plastic or natural heads and in varying tunings. In the whole tuning range, which covers up to an octave, the frequencies of the four first partial tones were ascertained and displayed as a function of the main tone frequency. As a rule, the frequency of the quint is close to 1.5 times the main tone frequency, and the frequency of the octave is close to twice the main tone frequency. In terms of the intervals, the No. 2 instruments prove to be of a very high quality level. The No 4 timpani shows up to be a little bit inferior to the No. 2 items.*

*In order to clarify its role, the kettle was removed. The partial frequencies were ascertained and compared to those of a complete timpani with kettle. The kettle proves as essential for the decay and the intervals of the partial tones. In a further experiment, kettles were partially filled with water (or with damping material) and the frequencies measured. The volume of the air enclosed influences the intervals of the partial tones, to an especially high extent the frequency of the 01 tone. To keep this inharmonic tone inaudible, the kettle should be small. With respect to the intervals of main tone, quint and octave, however, there is an optimum volume. This is in the region of 128 l up to 143 l for the No. 2 and of 60 l up to 75 l for the No. 4 timpani.*

# INHALT

## VORWORT

<b>1.</b>	<b>EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>DIE BETRACHTETEN PAUKEN</b> .....	<b>7</b>
2.1.	Kleine Orchesterpauke .....	7
2.2.	Große Orchesterpauke.....	7
2.2.1.	Die verfügbaren Kessel .....	8
2.2.2.	Pauke mit Kessel A .....	9
2.2.3.	Pauke mit Kessel B .....	10
2.2.4.	Pauke mit Kessel C .....	11
2.3.	Zusammenfassende Bemerkung.....	12
<b>3.</b>	<b>GEHÖRBEZOGENE UNTERSUCHUNGEN</b> .....	<b>13</b>
3.1.	Musikalische Tonhöhe eines Paukenklanges .....	13
3.2.	Näherungsweise Berücksichtigung der Maskierung .....	14
3.3.	Berücksichtigung der Maskierung im Teilton-Zeit-Muster .....	15
3.4.	Untersuchungen mit dem Analyseprogramm VIPER .....	20
3.5.	Zusammenfassende Bemerkung.....	25
<b>4.</b>	<b>FFT-ANALYSEN</b> .....	<b>27</b>
4.1.	Langzeit-Wasserfalldiagramme für unterschiedliche Kessel der großen Pauke .....	27
4.1.1.	Stimmung A .....	27
4.1.2.	Verschiedene Stimmungen.....	30
4.2.	Kurzzeit-Wasserfalldiagramme für unterschiedliche Kessel der großen Pauke .....	33
4.2.1.	Stimmung A .....	33
4.2.2.	Verschiedene Stimmungen.....	35
4.3.	Zusammenfassende Bemerkung.....	38
<b>5.</b>	<b>WASSERFALLDIAGRAMME VERSCHIEDENER PAUKEN</b> .....	<b>40</b>
5.1.	Große Kolberg-Pauke mit Kessel A und Kunstfell.....	40
5.1.1.	Analyse des Paukenschlages .....	40
5.1.2.	Analyse des Paukenklanges .....	42
5.2.	Große Kolberg-Pauke mit Kessel A und Naturfell .....	44
5.3.	Große Kolberg-Pauke (Uhingen) mit flachem Kessel .....	46
5.4.	Große Kolberg-Pauke (Uhingen) mit tiefem Kessel .....	47
5.5.	Große Ringer-Pauke (Uhingen) .....	48
5.6.	Zusammenfassende Bemerkung.....	49
<b>6.</b>	<b>FREQUENZEN UND INTERVALLE DER TEILTÖNE</b> .....	<b>50</b>
6.1.	Die Frequenzlage des 01-Tones .....	50
6.2.	Die Frequenzen der klangbildenden Teiltöne .....	52
6.3.	Messungen an der großen Kolberg-Pauke .....	55
6.3.1.	Pauke mit Kessel A .....	56

6.3.2. Pauke mit Kessel B .....	58
6.3.3. Pauke mit Kessel C .....	60
6.4. Messungen an anderen großen Pauken .....	62
6.5. Messungen an der kleinen Kolberg-Pauke.....	66
6.6. Vergleiche .....	67
6.7. Zusammenfassende Bemerkung.....	71
<b>7. FREQUENZEN DER TEILTÖNE MIT UND OHNE KESSEL.....</b>	<b>73</b>
7.1. Messungen an der kleinen Pauke .....	73
7.1.1. Der Kessel ist ausgebaut .....	73
7.1.2. Der Kessel ist eingebaut.....	75
7.2. Messungen an der großen Pauke.....	76
7.2.1. Der Kessel ist ausgebaut .....	76
7.2.2. Der Kessel ist eingebaut.....	78
7.3. Zusammenfassende Bemerkung.....	80
<b>8. KLEINE WASSERPAUKE .....</b>	<b>82</b>
8.1. Vorgehen bei der Variation des Kesselvolumens .....	82
8.1.1. Verringerung des Volumens.....	82
8.1.2. „Vergrößerung“ des Volumens .....	83
8.2. Variation des Volumens der Luft im Kessel .....	85
8.3. Zusammenfassende Bemerkung.....	89
<b>9. GROSSE WASSERPAUKEN .....</b>	<b>92</b>
9.1. Volumen des Kessels .....	92
9.2. Variation des Volumens beim Kessel A .....	93
9.2.1. Einzelresultate .....	93
9.2.2. Gesamtergebnis .....	97
9.3. Variation des Volumens beim Kessel C.....	99
9.3.1. Einzelresultate .....	99
9.3.2. Gesamtergebnis .....	102
9.4. Zusammenfassende Bemerkung.....	104
<b>10. ABSCHLIESSENDE DISKUSSION.....</b>	<b>108</b>
<b>LITERATUR.....</b>	<b>114</b>

## VORWORT

Im vorliegenden Band der Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik setzt Helmut Fleischer seine Berichte über seine umfassenden Studien der Pauke als "mechanischer Schwinger und akustischer Strahler" fort.

Während in früheren Ausgaben der "Beiträge", wie beispielsweise in Heft 1/05 oder in Heft 1/08, vor allem physikalische Beschreibungsformen im Mittelpunkt der Forschungsarbeiten standen, spannt Helmut Fleischer im vorliegenden Band den Bogen von der physikalischen Analyse von Paukenklängen zu deren hörbezogener Analyse. Diese Betrachtungsweise hat sich im Fachgebiet Psychoakustik als äußerst erfolgversprechend erwiesen: Zunächst werden mit modernsten physikalischen Meßmethoden die Schallreize nach allen Regeln der Kunst analysiert. Basierend auf solch einem soliden Fundament kann dann die von den Schallreizen hervorgerufene Hörempfindung quantitativ beschrieben werden. Ziel ist dabei, mathematisch beschreibbare Zusammenhänge zwischen Schallreiz und Hörempfindung zu entwickeln. Dies ist für musikalische Klänge nicht immer einfach, da das geschulte Gehör der Musiker feinste Nuancen zu unterscheiden vermag, deren Nachweis im Schallsignal - trotz modernster Messtechnik - nicht immer einfach ist.

Um so mehr ist es Helmut Fleischer zu danken, dass er den Versuch wagt, von professionellen Paukern wahrgenommene Unterschiede im Klangbild von Paukenklängen auf deren physikalische Ursachen zurück zu führen. Den Ausgangspunkt bildet dabei seine wohl einmalige, äußerst umfangreiche Sammlung von Daten für eine Vielzahl von Pauken. Er studiert bei hochwertigen, professionellen Instrumenten Einflüsse unterschiedlicher Kesselformen und Kesselgrößen bis hin zur Analyse von Paukenklängen, wenn der Kessel vollständig entfernt wird („Kesselpauken ohne Paukenkessel“). Darüber hinaus untersucht Helmut Fleischer mit wissenschaftlichen Methoden Vor- und Nachteile von Naturfellen gegenüber Kunstfellen.

In detaillierten Studien weist Helmut Fleischer nach, dass der Hauptton (11-Mode), die Quinte (21-Mode) und die Oktave (31-Mode) den Paukenklang positiv beeinflussen. Im Gegensatz dazu ist die 01-Mode musikalisch unerwünscht; allerdings wird diese rotationsymmetrische Mode praktisch immer mit angeregt und tritt insbesondere dann störend in Erscheinung, wenn die Pauke sehr hoch gestimmt wird.

Die Ergebnisse von Helmut Fleischers wissenschaftlichen Untersuchungen, dass kleinere Paukenkessel zu besonders reinen Paukenklängen führen, decken sich mit den praktischen Erfahrungen von Instrumentenbauern. Insgesamt können die im vorliegenden Band der Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik beschriebenen wissenschaftlichen Ergebnisse dem Praktiker Hinweise geben, in welcher Richtung Veränderungen an Instrumenten vorangetrieben werden sollten, um deren Klangbild weiter zu optimieren.

Obwohl die in diesem Band beschriebenen Analysen Musiker bereits in ihrer Entscheidung unterstützen können, unter welchen Bedingungen Naturfelle oder Kunstfelle zu bevorzugen sind, wären für zukünftige Bände der "Beiträge" darüber hinaus wissenschaftliche Untersuchungen wünschenswert, wie unterschiedliche Schlegel das Klangbild von Pauken beeinflussen.

München, im Juli 2008

Hugo Fastl



# 1. EINLEITUNG

Die Pauke besteht im Grundsatz aus einem Fell, das über einen Kessel gespannt ist und das der Spieler außermittig mit einem Schlegel anschlägt. Dadurch verformt er das Fell und prägt ihm eine Anfangsgeschwindigkeit auf, woraufhin das Fell gedämpfte freie Schwingungen ausführt. Um die physikalischen Vorgänge verstehen zu können, sind diese Anfangsverteilungen gedanklich in die Eigenformen des Felles zu zerlegen, die spätestens seit den theoretischen Überlegungen von Euler (1764) und den Experimenten von Chladni (1787) bekannt sind. Eine Zusammenstellung neuerer Untersuchungen zu den Schwingungsformen, unter anderem mittels Laser-Vibrometrie, findet sich bei Fleischer (2005).

Die mechanischen Schwingungen des Felles setzen sich in Luftschwingungen um. Die Frequenzen, die zu den Eigenformen gehören, finden sich im Schallsignal wieder. Sie bleiben bei der Ausbreitung, dem Durchgang durch Wände, bei der Reflexion usw. unverändert. Somit stellen sie die wesentlichen Invarianten und die primären Informationsträger des musikalischen Signals dar. Da ihnen folglich eine ganz zentrale Rolle zukommt, werden sie im vorliegenden Band der „Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik“ ausführlich untersucht.



Abb. 1.1.  
Ältere  
Kesselpauke.

Markantes optisches Merkmal der europäischen Pauke ist ihr Kessel. Sie wird daher häufig als „Kesselpauke“, im Englischen als „*kettledrum*“ (neben „*timpani*“, vgl. Fletcher und Rossing 1998), bezeichnet. Da er im Namen Berücksichtigung findet, muss der Kessel ein wesentlicher Bestandteil der Pauke sein. Dass er der Pauke ein unverwechselbares Aussehen verleiht, zeigt Abb. 1.1. Das Foto gibt eine ältere Orchesterpauke mit Kurbelmechanismus wieder, an der früher im Institut für Mechanik Messungen durchgeführt worden sind. Sofort springt der große, matt kupferfarbene glänzende Kessel ins Auge.

Bei traditionell gefertigten Pauken besteht der Kessel – so auch derjenige der Pauke von Abb. 1.1 – tatsächlich aus Kupfer. Dass dieses Material verwendet wird, hat seinen Grund wohl weniger in akustischen Überlegungen als vielmehr in der Tatsache, dass sich Kupfer sehr gut kalt verformen lässt. Deshalb wurden von alters her Behälter für Brauereien, Küchen, Brenne-  
reien usw. aus diesem Metall gefertigt. In jüngerer Zeit ist man dazu übergegangen, Pauken-  
kessel auch aus anderen Materialien wie Aluminium oder glasfaserverstärktem Kunststoff  
herzustellen. Obwohl gegen die Verwendung dieser Werkstoffe keine ernstzunehmenden  
Gründe sprechen, werden sie oftmals als „künstlicher“ Ersatz des „natürlichen“ Kupfers ange-  
sehen. Um eine höherwertige Anmutung hervorzurufen, werden solche Kessel häufig kupfer-  
farben lackiert.

Die Frage nach dem Material des Kessels soll hier nicht behandelt werden. Jedoch wird häu-  
fig danach gefragt, wie der Kessel beschaffen und wie er im Paukengestell gelagert sein sollte.  
So ist in älteren Anleitungen für Paukenbauer die Rede davon, der Kessel müsse frei schwin-  
gen können. Diese Vorgabe könnte die Vorstellung nähren, dass der Kessel aktiv zur Ab-  
strahlung von Schall beiträgt, ähnlich wie dies der Korpus einer Violine tut. Aus solch einer  
Anschauung heraus sind möglicherweise auch die Schalltrichter entstanden, die innen an die  
Öffnung im Kessel von Barockpauken eingebaut wurden. Näheres hierzu findet sich in einem  
Band der Michaelsteiner Konferenzberichte (siehe z.B. Fleischer 2008c), der Beiträge einer  
Arbeitstagung und eines Musikinstrumentenbau-Symposiums vom Oktober 2007 zum Thema  
Schlaginstrumente wiedergibt. Zum Zeitpunkt der Drucklegung des vorliegenden Bandes war  
die Bearbeitung dieses Bandes im Gange, jedoch noch nicht abgeschlossen.

Wissenschaftliche Untersuchungen stützen diese Vorstellung nicht. Bereits die Überlegungen  
von Rossing (1983) haben gezeigt, dass der Kessel keineswegs eine aktive Funktion hat. Seine  
Rolle ist in keiner Weise mit der des „Resonanzkörpers“ einer Violine oder einer Gitarre zu  
vergleichen. Auch eigene Untersuchungen (z.B. Fleischer 1988 und 2008a) haben ergeben,  
dass nicht der Kessel, sondern ausschließlich das Fell der abstrahlende Teil des Instruments  
ist. Dies spiegelt sich ja auch in der Gattungsbezeichnung „Membranophon“ bzw. „Fell-  
klinger“ (Hornbostel und Sachs 1914) für die Pauke wider.

Gleichwohl kommt dem Kessel eine wichtige, allerdings ausschließlich passive Rolle zu, die  
im vorliegenden Band der „Beiträge“ untersucht werden soll. Der Kessel wirkt in mehrererlei  
Hinsicht. Elektroakustiker könnten eine wesentliche Funktion mit der einer geschlossenen  
Box vergleichen, in die ein Tiefton-Lautsprecher eingebaut ist. Primäre Aufgabe der Box  
(hier: des Kessels) ist es, den „akustischen Kurzschluss“ zwischen der Luft auf der Vorder-  
seite des Lautsprechers (hier: des Felles) und derjenigen auf der Rückseite zu unterbinden.  
Dadurch ändert sich die Charakteristik der Schallstrahlung. Insbesondere erhöht der Einbau in  
eine Box den Abstrahlgrad. Analoges gilt auch für die Pauke. Eine bessere Schallabstrahlung  
geht auch immer mit einem schnelleren Abklingen einher. Das Paukenfell führt gedämpfte,  
freie Schwingungen aus. Die mechanische Energie, die der Spieler mit dem Schlegel auf das  
Fell einbringt, ist begrenzt. Durch den Kessel wird der Paukenklang lauter, „steht“ aber weni-  
ger lang, da die mechanische Energie schneller ins Schallfeld abfließt. Von den vielen Teil-  
tönen trifft dies in stärkstem Maße auf die erste rotationssymmetrische Eigenschwingung des  
Felles zu. Untersuchungen hierzu sind in einer früheren Arbeit (Fleischer 2008a) beschrieben.

Neben der veränderten Schallabstrahlung zeigt sich ein weiterer Einfluss. Die Luft im Kessel  
beeinflusst die Schwingungen des Felles (z.B. Gottlieb und Aebischer 1987, Moosrainer und  
Fleischer 1998). Dieser Effekt verändert die Frequenzen, mit denen das Fell schwingt, und  
soll im Folgenden näher untersucht werden. Für einen Lautsprecher ist er eher unerwünscht:  
Der Lautsprecher schwingt als Ganzes und komprimiert die eingeschlossene Luft. Bei tiefen

Frequenzen ist die Wellenlänge des Schalles groß. Die Luft in der Box wirkt wie eine Feder und hebt die Feder-Masse-Resonanz des Lautsprechers an. Aus einer Erscheinung mit demselben physikalischen Hintergrund zieht man dagegen bei der Pauke Nutzen. Um zu verstehen, wie die im Kessel eingeschlossene Luft auf die Schwingungen des Paukenfelles zurückwirkt, ist allerdings die Kenntnis der Schwingungsformen (Fleischer 2005) unerlässlich.

Das Fell ist ein Kontinuumsschwinger und hat unendlich viele Schwingungsmoden. Diese Vielfalt muss zunächst zielgerichtet eingeschränkt werden. Um die Betrachtungen auf wesentliche Teilschwingungen zu beschränken, werden die wichtigen Teiltöne identifiziert. Mit diesem Ziel wird den physikalischen Untersuchungen in Kapitel 3 eine gehörbezogene Analyse vorgeschaltet. Es ist die naturgegebene Aufgabe eines Musikinstruments, denjenigen Schall, welchen der Spieler hervorrufen will, dem Empfänger „zu Gehör“ zu bringen. Daher muss für die Bewertung des Schalles das Gehör den Maßstab liefern, mit dem der Klang des Instruments letztlich zu bewerten ist (Valenzuela 1999). Bevor weitere Untersuchungen begonnen werden, ist den Komponenten im Schallsignal ihre Wertigkeit in Hinsicht auf das Hören zuzuordnen. Ziel dieser Analyse ist es, diejenigen Anteile, welche von größter Relevanz für die aurale Wirkung des Paukenschalles sind, von zu solchen unterscheiden, welche für das Hören von nachrangiger Bedeutung sind.

Einige tieffrequente Teiltöne werden sich als „klangbildend“ erweisen. Es sind dies

- der Hauptton, dessen Spektraltonhöhe die musikalische Tonhöhe des Paukenklanges definiert,
- die Quinte, deren Bezeichnung besagt, dass ihre Frequenz etwa das Eineinhalbfache derjenigen des Haupttones beträgt und
- die Oktave, deren Bezeichnung vermuten lässt, dass sie etwa die doppelte Frequenz des Haupttones hat.

Frühere Untersuchungen (z.B. Fletcher und Rossing 1998, Fleischer 2005) haben gezeigt, dass die Schwingungsformen des Felles, die diese Teiltöne hervorrufen, neben dem Knotenkreis am Rand ( $n = 1$ ) mindestens einen Knotendurchmesser ( $m \geq 1$ ) aufwiesen. Daneben muss noch der so genannte 01-Ton, der von der ersten rotationssymmetrischen Schwingung ( $m = 0, n = 1$ ) herrührt, betrachtet werden. Dieser Ton reiht sich nicht in das annähernd harmonische Raster der klangbildenden Teiltöne ein. Pauker bezeichnen ihn, wenn er denn hörbar ist, als „Unterton“. Damit sind nun drei klangbildende und ein weiterer Teilton samt den zugehörigen Schwingungsformen identifiziert. Erstere sind musikalisch nutzbar, letzterer ist unerwünscht.

Ganz gleich wo der Spieler das Fell anschlägt, er kann nie vermeiden, dass er die erste rotationssymmetrische Eigenschwingung hervorruft, die außer dem Knotenkreis am Rand keine weitere Knotenlinie aufweist. Da diese Fellschwingung unweigerlich auftritt, bleibt nur ein Weg um zu verhindern, dass sich beim Hören der zugehörige 01-Teilton störend auswirkt. Dieser Weg besteht darin, die Frequenz dieser Schwingung so weit anzuheben, dass der Teilton infolge des auralen Verdeckungseffektes „unschädlich“ gemacht wird. In diese Richtung wirkt die Steifigkeit der im Kessel eingeschlossenen Luft auf die erste rotationssymmetrische Eigenschwingung des Felles: Die zusätzliche Luftfeder hebt selektiv deren Frequenz an.

Schwingt das Fell dagegen antimetrisch, wie dies bei den klangbildenden Teiltönen der Fall ist, wird Luft im Kessel hin- und herbewegt. Die eingeschlossene Luft erhöht nunmehr nicht die Steifigkeit, sondern die Masse des Felles. Dieser weitere Nutzeffekt des Kessels lässt sich mit der Lautsprecher-Box-Analogie jedoch nicht mehr veranschaulichen. Im Zusammenwirken mit der Luft vor dem Paukenfell findet eine Art „Fein-Abstimmung“ der Frequenzen der antimetrischen Fellschwingungen statt. Die Folge ist, dass die Pauke nicht etwa ein Bes-

sel-Spektrum erzeugt, das zwar perkussiv, nie aber melodios nutzbar wäre (Fleischer 2008b). Vielmehr ist dem Klang einer guten Pauke erstaunlicherweise eine Tonhöhe zuzuordnen, die sich aus einem nahezu harmonischen Spektrum der klangbildenden Teiltöne herleitet. Die beobachtete Harmonizität des Schwingungs- und Schallspektrums steht in einem deutlichen Gegensatz zu den Erwartungen, die sich aus der Theorie der idealen Membran speisen.

Insbesondere die vorstehenden Überlegungen lassen vermuten, dass sich nicht jedes Fell und jeder Kessel im selben Maße dafür eignen werden, ein Bessel-Spektrum zu einem musikalisch nutzbaren Spektrum umzuformen, in dem wichtige Teiltöne nahezu harmonische Frequenzverhältnisse aufweisen. Im vorliegenden Band der „Beiträge“ soll das Schallsignal der Pauke unter diesem Aspekt untersucht werden. Die Schallsignale werden unter besonderer Beachtung der tieffrequenten Teiltöne analysiert, wofür die Schnelle Fourier-Transformation (FFT) Anwendung findet. Diese Untersuchungen wurden an professionellen Orchesterpauken durchgeführt. Um dem perkussiven Charakter des Paukenschlages Rechnung zu tragen, werden zunächst Wasserfalldiagramme erzeugt. In den Kapiteln 4 und 5 wird damit das Entstehen und Abklingen der Teiltöne unter verschiedenen Blickwinkeln betrachtet. Um eine breite Datenbasis zu schaffen, sind Ergebnisse für zahlreiche Orchesterpauken mit unterschiedlichen Kesseln und Fellen nicht nur bei mittlerer, sondern auch bei tiefer und hoher Stimmung zusammen gestellt.



*Abb. 1.2. Moderne Pauke Nr. 2 im Vierersatz der Firma Kolberg Percussion bei einer Messung im Labor.*

In den Versuchsreihen von Kapitel 6 werden – aufbauend auf den gehörbezogenen Analysen – ausschließlich die wichtigsten Schallkomponenten, d.h. die klangbildenden Teiltöne und der 01-Ton, untersucht. Im gesamten Stimmbereich der Pauke werden die Frequenzen und Inter-

valle gemessen und dargestellt. Diese Untersuchungen beziehen sich auf handelsübliche, professionelle Orchesterpauken. Dabei ist berücksichtigt, dass die Pauke im Lauf der Zeit einige Modifikationen erfahren hat wie z.B.

- die Verwendung von Plastikfellen anstelle der früher üblichen Naturfelle,
- die Vergrößerung des Kesselvolumens und vor allem
- den Einbau von Vorrichtungen, die es ermöglichen, sehr schnell das Fell im Bereich von etwa einer Oktav umzustimmen.

Bei diesen Untersuchungen wird der Frage nachgegangen, wie es sich auf das Frequenzspektrum der Pauke auswirkt, wenn unterschiedliche Felle sowie unterschiedliche Kessel Verwendung finden und das Fell in einem weiten Bereich umgestimmt wird. Im Blickpunkt sind mögliche Zusammenhänge zwischen physikalischen des Instruments und dem musikalischen Signal. FFT-Messtechnik wird dazu genutzt werden, das Schallsignal zu untersuchen und Hinweise darauf zu finden, ob es beispielsweise ein optimales Volumen für den Kessel gibt.

Für die systematischen Untersuchungen von Kapitel 6 standen dem Institut über längere Zeit zwei hochwertige Orchesterpauken zur Verfügung. Es handelt sich um Instrumente der Firma Kolberg Percussion in Udingen. Die meisten Messungen beziehen sich auf eine Konzertpauke der Größe 2 im Vierersatz mit nominalem Stimmbereich D bis d. Eine solche „große Pauke“ ist in Abb. 1.2 inmitten eines Experimentalaufbaus abgebildet. In dieses Instrument konnten drei verschiedene Kupferkessel (vgl. Kapitel 3) sowie zwei unterschiedliche Felle eingebaut werden.



*Abb. 1.3. Moderne Pauke Nr. 4 im Vierersatz der Firma Kolberg Percussion bei einer Messung im Labor.*

Daneben konnten Messungen auch mit einer Pauke der Größe 4 im Vierersatz vorgenommen werden. Diese „kleine Kolberg-Pauke“ war mit einem Kunstfell und dem Kupferkessel be-

stückt. Sie hat den nominalen Stimmbereich H bis h und ist in Abb. 1.3 abgebildet. Außer an den Instrumenten der Abb. 1.2 und 1.3 konnten punktuelle Untersuchungen auch an einigen weiteren Pauken der Größe Nr. 2 durchgeführt werden. Diese Instrumente befanden sich in den Werkstätten der Firma Kolberg und waren nur begrenzt zugänglich. Auch ihr Schallsignal wurde analysiert; die Frequenzen der wichtigen Teiltöne sind dokumentiert.

Bisher waren die Pauken „naturbelassen“. Um gezielt den Einfluss des Kessels zu erforschen, konnten an einigen Instrumenten im Folgenden sehr weitgehende Modifikationen vorgenommen werden. So war es möglich, den Kessel vollständig zu entfernen und das Schallsignal einer Kesselpauke ohne Paukenkessel (Fleischer 2008b) zu untersuchen. In Kapitel 7 werden unter diesem Aspekt sowohl eine große wie auch eine kleine Pauke betrachtet. Die Gegenüberstellung der entsprechenden Ergebnisse mit bzw. ohne Kessel macht den prinzipiellen Einfluss des Kessels auf die Frequenzen der Teiltöne sichtbar.

Darüber hinaus wurden bei der großen und der kleinen Pauke die Kessel so modifiziert, dass Wasser eingefüllt und kontrolliert wieder abgelassen werden konnte. Abb. 1.3 lässt den Schlauch und einen Wassereimer erkennen, mit denen es möglich war, in weiteren Experimenten das Volumen der hinter dem Fell eingeschlossenen Luft zu variieren. Die Messungen an der kleinen Pauke sind in Kapitel 8, die an zwei großen Pauken in Kapitel 9 zusammengefasst. Der Zusammenhang zwischen dem Luftvolumen einerseits und der Harmonizität von Quinte und Oktave andererseits wird deutlich. Daneben wird auch erkennbar, wie sich über den Stimmbereich der Pauke die Frequenz des unerwünschten 01-Tones verschiebt.

Sämtliche Testreihen an den „Wasserpauken“ sind im vorliegenden Band der „Beiträge“ ausführlich dokumentiert. Sie gewähren Einblicke in die Rolle, die der Luft im Kessel für die Frequenzen und Intervalle der wichtigsten Teiltöne zukommt. So wird nicht nur der prinzipielle Einfluss des Kessels beschrieben, sondern es sind auch detaillierte Ergebnisse wiedergegeben. Diese werden letztlich auch Hinweise auf die optimale Größe des Kessels geben. Damit lässt sich aussagen, welches Volumen ein Kessel haben sollte, damit der Paukenklang über einen möglichst großen Stimmbereich als möglichst rein empfunden wird.

## 2. DIE BETRACHTETEN PAUKEN

Dank dem Entgegenkommen der Firma Kolberg Percussion (Uhingen) standen dem Institut für Mechanik zwei hochwertige Orchesterpauken für Messungen zur Verfügung; vgl. Fleischer (2005 und 2008a). An diesen beiden Instrumenten konnten über einen teilweise langen Zeitraum die verschiedensten Untersuchungen durchgeführt werden.

### 2.1. Kleine Orchesterpauke

Die kleine Pauke („hohe Pauke“) dieses Herstellers ist in Abb. 2.1 wiedergegeben. Im Vierersatz trägt sie die Nr. 4. Nach Angaben des Herstellers kann diese Pauke problemlos im Bereich der Noten d bis h gestimmt werden, was Haupttonfrequenzen zwischen 147 Hz und 247 Hz entspricht. Notfalls kann als tiefste Note auch H (124 Hz) genutzt werden. Wie die Fotografie zeigt, war das untersuchte Instrument mit einem Kunstfell und einem gehämmerten Kupferkessel bestückt. Angaben zum Kessel finden sich in der letzten Zeile von Tab. I.



Abb. 2.1. Kleine Pauke im reflexionsarmen Raum.

### 2.2. Große Orchesterpauke

Über einen noch längeren Zeitraum stand eine hochwertige Konzertpauke Nr. 2 im Vierersatz („A-Pauke“) zur Verfügung. Diese „große Pauke“ ist in Abb. 2.2 abgebildet. Sie hat einen maximalen Stimmbereich von D bis d, was Haupttonfrequenzen von 73 Hz bis 147 Hz entspricht. Dieses Instrument konnte wahlweise mit einem Naturfell *Kalfo Super Timpani* oder

mit dem Kunstfell *Remo Weather King Timpani* bespannt werden, das in Abb. 2.2 aufgezogen ist. Im Laufe von Jahren konnten hiermit unterschiedlichste Messungen durchgeführt werden.



*Abb. 2.2. Große Pauke mit Kessel A.*

### **2.2.1. Die verfügbaren Kessel**

Durch zahlreiche Untersuchungen (z.B. Fleischer 2008a) hat sich die Vorstellung gefestigt, dass der Kessel nicht aktiv Schall abstrahlt. Jedoch zeigte sich, dass der Kessel wichtige passive Funktionen hat: Er interagiert mit den Schwingungen des Felles und beeinflusst das Schallfeld.



*Abb. 2.3. Von links nach rechts: Kessel A, B und C der großen Pauke.*

Um diesem Aspekt nachgehen zu können, hat die Firma Kolberg Percussion dem Institut für Mechanik für dieses Instrument unterschiedliche Kessel überlassen. Da die Orchesterpauken so konstruiert sind, dass der Kessel gewechselt oder ganz entfernt werden kann, ließen sich an ein und demselben Instrument interessante Studien anstellen. Für die große Pauke Nr. 2 waren drei verschiedene Kupferkesseln verfügbar; die in das Gestell eingehängt werden konnten. Sie sind in Abb. 2.3 nebeneinander abgebildet. In die Pauke, die Abb. 2.2 wiedergibt, ist der Kessel A eingebaut.

Sämtliche drei Kessel bestanden aus Kupferblech: Sie wurden *en bloc* auf der Drückbank gefertigt oder aus Kegelstümpfen und Unterteilen zusammen geschweißt, die beispielsweise Kugelkalotten darstellen. Fertigungsbedingt wiesen sie am tiefsten Punkt eine kreisförmige Öffnung von der ungefähren Größe eines Zwei-Euro-Stücks auf. Am Rand waren die Kessel umgebördelt. Mit ihrem Bördelrand ruhten sie zunächst lose auf dem Stützring. Sobald das Fell mit dem Druckreifen gespannt wurde, drückte es den Kessel gegen den Stützring und sorgte somit für eine schlüssige Verbindung zwischen Fell, Kessel und Paukengestell. Die Kessel von Abb. 2.3 waren durch die Kenndaten charakterisiert, die in Tab. I zusammen gestellt sind.

Tab. I. Geometrische und physikalische Kennwerte der Paukenkessel

Bezeichnung	Durchmesser in cm	Höhe in cm	Masse in kg	Volumen in l	Oberflächen- bearbeitung
Große Pauke: Kessel A	73	50	12,0	142	glatt
Große Pauke: Kessel B	73	53	8,3	143	gehämmert
Große Pauke: Kessel C	73	47	11,2	133	gehämmert
Kleine Pauke	60	45	10,4	91	gehämmert

### 2.2.2. Pauke mit Kessel A

Um den Kessel zu wechseln, war das Fell zu entspannen und abzunehmen. Nun konnte der vorhandene Kessel herausgehoben und durch einen anderen ersetzt werden. Danach musste das Fell wieder aufgelegt werden. Der Druckreifen wurde aufgesetzt und mittels der langen Spansschrauben angezogen, bis das Fell wieder gleichmäßig gespannt war. Abb. 2.4 zeigt die große Pauke in der Seitenansicht. In den Stützring ist, wie auch in Abb. 2.2, der glatte Kessel A eingehängt. Der Kessel ist von stumpfer Form und mit 12 kg relativ schwer. seine Oberfläche ist nicht mechanisch nachbehandelt.

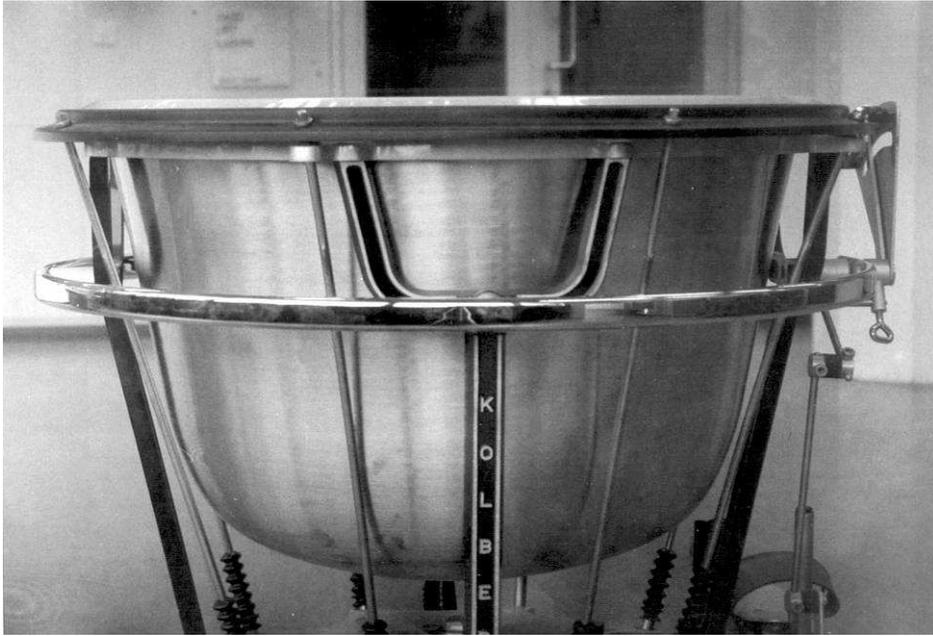


Abb. 2.4. Seitenansicht des Kessels A in der großen Pauke.

### 2.2.3. Pauke mit Kessel B



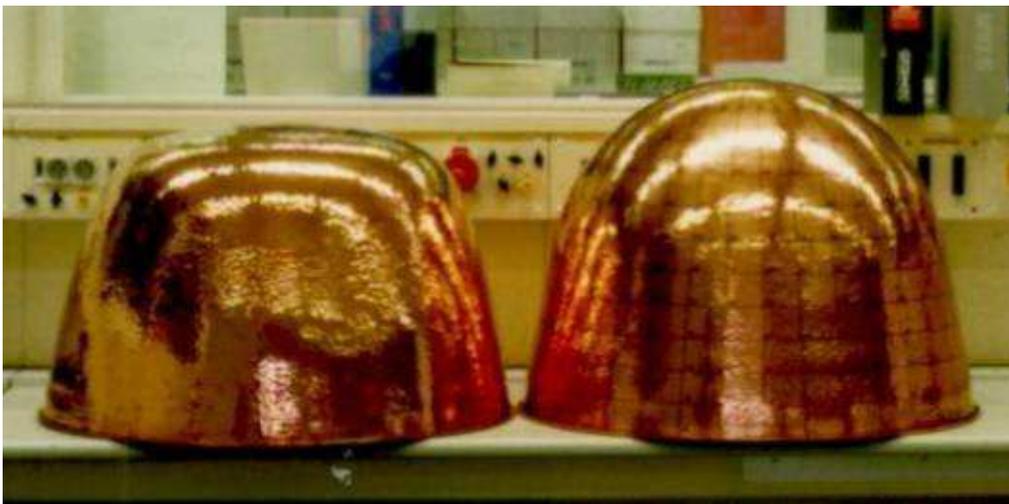
Abb. 2.5. Kessel B der großen Pauke.

Der Kessel, mit dem die Pauke ursprünglich angeliefert worden war, ist in Abb. 2.5 dargestellt. Er besteht offensichtlich aus einem nahezu zylindrischen Kegelstumpf und einer angeschweißten Kugelkalotte. Die Wand ist relativ dünn, so dass die Gesamtmasse lediglich 8,3 kg beträgt. Die Oberfläche ist von Hand gehämmert. Abb. 2.6 gibt die komplette Pauke mit Kessel B wieder. Dieser Kessel ist tiefer als Kessel A, hat aber nahezu dasselbe Volumen. Für Zwecke der Modalanalyse ist ein Messgitter aufgezeichnet.



*Abb. 2.6. Kessel B in der großen Pauke.*

#### **2.2.4. Pauke mit Kessel C**



*Abb. 2.7. Kessel C (links) und B (rechts) der großen Pauke.*

Im Vergleich zwischen den beiden Kesseln B und C in Abb. 2.7 wird deutlich, dass der linke Kessel C wesentlich flacher als der rechte ist. Da seine Wandung dicker ist, hat dieser Kessel trotz geringem Volumen (133 l) eine um nahezu 3 kg größere Masse als der Kessel B. Abb. 2.8 zeigt ihn im eingebauten Zustand. An der Pauke wird gerade die mechanische Admittanz bzw. Impedanz des Felles gemessen; vgl. Kapitel 5 in Fleischer (2005).



*Abb. 2.8. Kessel C in der großen Pauke.*

### **2.3. Zusammenfassende Bemerkung**

Für die Messungen standen zwei hochwertige Orchesterpauken unterschiedlicher Größe zur Verfügung. Die kleine Pauke war mit einem Kunstfell und einem Kessel des Volumens 91 l ausgestattet. Für die große Pauke war neben dem Kunstfell auch ein Naturfell verfügbar. Darüber hinaus konnten drei verschiedene Kessel mit 133 l bis 143 l Rauminhalt eingesetzt werden, womit schon sechs Kombinationen möglich waren. Um den Einfluss der Luft im Kessel auf die Teiltonfrequenzen zu untersuchen, wurden ergänzende Experimente durchgeführt, über die in den Kapiteln 7 bis 9 berichtet wird. Die Kessel wurden ganz entfernt bzw. teilweise mit Wasser gefüllt. Auf diesem Wege war es möglich, die Luftmenge im Kessel gezielt zu variieren und zu beobachten, wie sich die Frequenzen und Intervalle der wichtigen Teiltöne verändern.

Bevor mit physikalischen Messreihen begonnen wird, war zunächst einmal zu klären, welche Teiltöne im Folgenden überhaupt betrachtet werden sollten. Sinnvollerweise sind die Untersuchungen auf diejenigen Komponenten des Paukenschalles zu fokussieren, welchen die größte Bedeutung für den musikalischen Klang zukommt. Um Willkür so weit wie möglich auszuschalten, wurde eine Auswahl getroffen, für die das Gehör den Maßstab liefert. Diese wohlbegründete Konzentration auf das Wesentliche ist das Ziel des nächsten Kapitels.

### 3. GEHÖRBEZOGENE UNTERSUCHUNGEN

Die Pauke ist ein Musikinstrument. Zweck eines Musikinstruments ist es, Klänge „zu Gehör zu bringen“. Von fundamentaler Bedeutung ist daher, welche der physikalisch vorhandenen Teiltöne in der Lage sind, eine aurale Wirkung zu entfalten. Die für das Hören maßgeblichen Komponenten von denjenigen zu unterscheiden, welche von untergeordneter Bedeutung oder gar gänzlich irrelevant sind, ist die Voraussetzung für eine zielgerichtete Analyse. Den Weg dazu weist die Psychoakustik.

#### 3.1. Musikalische Tonhöhe eines Paukenklanges

Von größter Bedeutung ist bei einem musikalischen Signal die Tonhöhe. Für die ganzheitliche Tonhöhe eines perkussiven Klanges ist nach Terhardt (1972a und b sowie 1998) vor allem die erste Sekunde nach dem Anschlag maßgebend. In Abb. 3.1 ist oben das Anfangsspektrum des Paukenklanges für die Note A dargestellt. Als schmale Spitzen erkennt man zahlreiche Teiltöne. Es ist zu erwarten, dass nicht alle, sondern nur Teiltöne mit hohen Pegeln zur Hörempfindung beitragen werden.

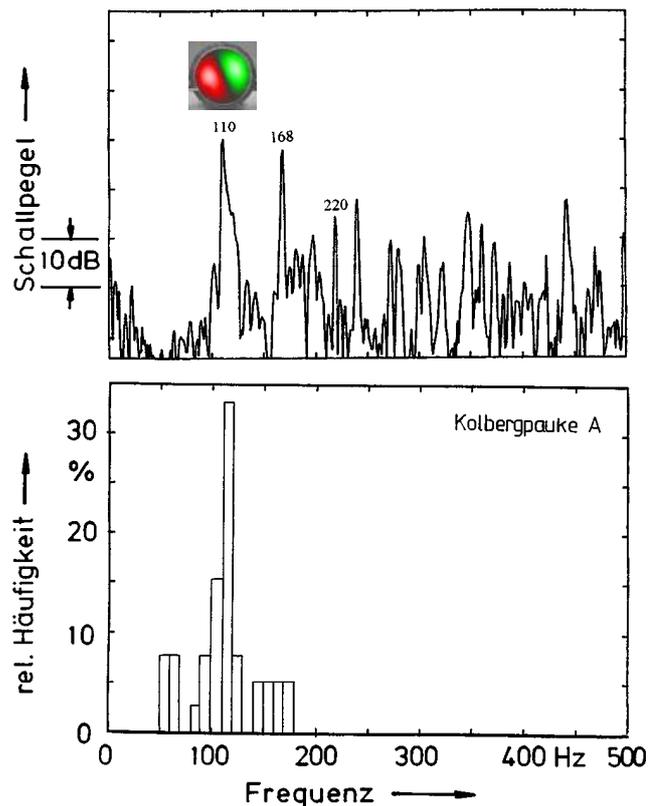


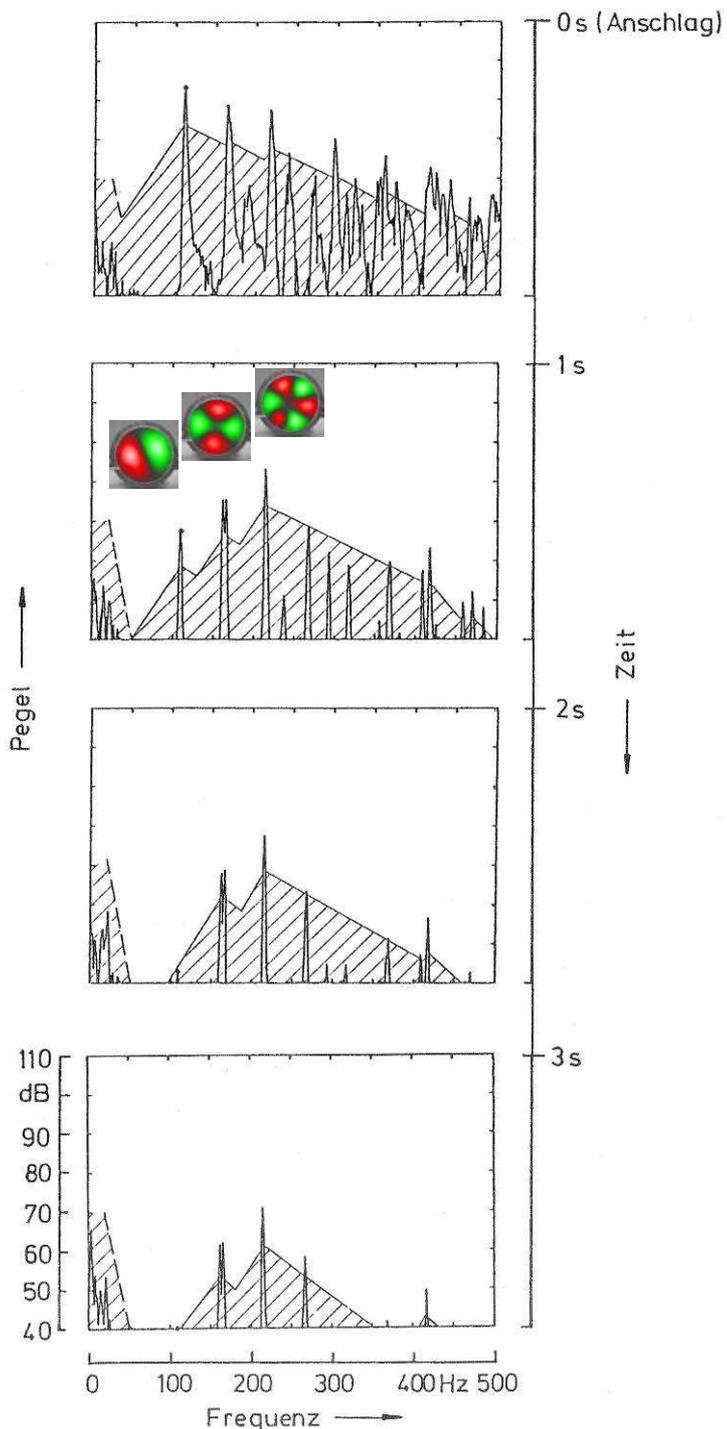
Abb. 3.2. Oben: Schallpegel-Frequenz-Spektrum eines Paukenklanges A mit den Frequenzen wichtiger Teiltöne in Hz.  
Unten: Häufigkeitsverteilung beim Tonhöhenvergleich.

Im unteren Diagramm von Abb. 3.1 sind die Ergebnisse eines psychoakustischen Tonhöhenvergleichs mit zahlreichen Versuchspersonen angegeben. Es ist die relative Häufigkeit vermerkt, mit der Versuchspersonen die Tonhöhe des Paukenklanges durch einen Sinuston ge-

kennzeichnet haben, den sie als gleich hoch einstufen. Die Häufigkeitsverteilung zeigt ein deutliches Maximum: In einem Drittel aller Fälle wird ein Sinuston der Frequenz 110 Hz als gleich hoch wie der Paukenklang empfunden. Offenbar trägt die Komponente bei 110 Hz den Namen „Hauptton“ zu Recht. Die Spektraltonhöhe des Haupttones - und nicht etwa eine Virtuelle Tonhöhe (Terhardt 1998) bei 55 Hz - bestimmt die musikalische Tonhöhe des Paukenklanges. Ergebnisse für weitere Stimmungen der Pauke finden sich bei Fleischer (1994). Sie alle bestätigen die tonhöhenbestimmende Rolle des Haupttones. Das eingefügte Vibrometer-Bild (Fleischer 2005) lässt erkennen, dass der Hauptton von der antimetrischen Schwingung des Felles mit einem Knotenkreis am Rand und einem Knotendurchmesser herrührt.

### 3.1. Näherungsweise Berücksichtigung der Maskierung

Abb. 3.2. FFT-Spektren eines Paukenklanges (Stimmung A) zu mehreren Zeitpunkten. Gestrichelt ist die Ruheshwelle, durchgezogen sind die Mithörschwellen der Teiltöne eingezeichnet.



Einen ersten Versuch, bei der Bewertung von Spektren psychoakustische Erkenntnisse zu berücksichtigen (Fleischer 1992), zeigt Abb. 3.2. Dargestellt sind FFT-Spektren, welche die Teiltöne des Paukenklanges zu verschiedenen Zeitpunkten wiedergeben. Das obere Diagramm entspricht demjenigen von Abb. 3.1. Es sind zwei Arten von Schwellen eingezeichnet. Die gestrichelte Gerade gibt näherungsweise die Hörschwelle wieder, die zu tiefen Frequenzen hin stark ansteigt (Fastl und Zwicker 2007). Schallkomponenten im schraffierten Gebiet unterhalb der Hörschwelle sind unhörbar. Die durchgezogenen Geraden approximieren die Mithörschwellen (Fastl und Zwicker 2007) der einzelnen Teiltöne. Dadurch soll der Effekt der spektralen Maskierung berücksichtigt werden, der im folgenden Abschnitt 3.3 noch detaillierter besprochen wird. Dieser wirkt zu höheren Frequenzen in weit stärkerem Maße als zu tiefen Frequenzen hin. Schallkomponenten, die im schraffierten Bereich unterhalb dieser Kurven liegen, werden maskiert und können als unhörbar gelten. Somit sind sie für ein musikalisches Signal irrelevant und brauchen nicht weiter betrachtet zu werden.

Wie Abb. 3.2 zu entnehmen ist, sind beim Anschlagen des Felles etwa zehn Teiltöne überschwellig. Bereits kurze Zeit später hat sich deren Anzahl halbiert und nach wenigen Sekunden auf drei bis vier Komponenten reduziert. Von besonderer Bedeutung sind dabei offenbar die ersten drei Teiltöne. Dass diesen Komponenten Gewicht zukommt, ist schon daran zu erkennen, dass ihnen der Pauker eigene Namen (Hauptton, Quinte und Oktave) gibt. Die Schwingungsformen des Felles, die sie hervorrufen, sind als Vibrometer-Bilder (Fleischer 2005) eingefügt, bei denen Rot und Grün für unterschiedliche Vorzeichen stehen. Dunkel zeichnen sich Knotenlinien ab.

Die Frequenzen dieser Teiltöne stehen bei der Pauke nicht in den mathematisch exakten Zahlenverhältnissen  $1 : 2 : 3 : 4 : \dots$ , wie sie beispielsweise von Saiten her bekannt sind. Vielmehr ist das Spektrum nach Terhardt (1998) „gering harmonisch“. Bei einer guten Pauke bilden die Frequenzen der klangbildenden Teiltöne jedoch zumindest annähernd harmonische Intervalle. Für die „musikalisch genutzten“ Teiltöne sind deshalb folgende Bezeichnungen gebräuchlich:

- Hauptton (im Beispiel 110 Hz); dies ist derjenige der klangbildenden Teiltöne, dessen Frequenz  $f_{HT}$  am kleinsten ist;
- Quinte (im Beispiel 168 Hz) mit der Frequenz  $f_{QU} \approx 1,5 f_{HT}$ ; sie gilt als charakteristisch für die Klangfarbe der Pauke;
- Oktave (im Beispiel 220 Hz); deren Frequenz ist  $f_{OK} \approx 2 f_{HT}$ .

Um die musikalischen Bezeichnungen der Teiltöne von den Frequenzintervallen unterscheiden zu können, wird ein Vorschlag aufgenommen, den Schad (1996) im Zusammenhang mit Glocken gemacht hat:

Für die **T e i l t ö n e**

- Quinte (Schallsignal der 21-Schwingung) und
- Oktave (Schallsignal der 31-Schwingung)

wird ein mit End-*e* verwendet.

Sind dagegen die **I n t e r v a l l e**

- Quint (Frequenzverhältnis  $3:2 = 1,5$ )
- Oktav (Frequenzverhältnis  $2:1 = 2$ )

gemeint, wird das End-*e* weggelassen.

### 3.3. Berücksichtigung der Maskierung im Teilton-Zeit-Muster

Eine im Vergleich zu Abb. 3.1 sehr viel genauere Möglichkeit, hörbare von unhörbaren Schallkomponenten zu unterscheiden, bietet die Untersuchung mit Hilfe des Teilton-Zeit-

Musters. Fastl und Zwicker (2007) haben die psychoakustischen Grundlagen zusammen gefasst. Der geistige Vater des Verfahrens ist Ernst Terhardt, der seine Ideen in einem Buch (Terhardt 1998) dargestellt hat. Miriam Noemi Valenzuela (1999) hat diese gehörbezogene Analyse am Institut für Mechanik auf verschiedene Instrumente angewandt.

In den Abb. 3.3 bis 3.6 sind Ergebnisse der Analysen von Paukenklängen dargestellt, die mit diesem Verfahren durchgeführt wurden. Sie beziehen sich auf die große Pauke mit Kunstfell und Kessel B. Details dazu, welche Verarbeitungsschritte zu diesen Diagrammen führen, können Valenzuela (1999) entnommen werden. Das obere Diagramm gibt jeweils das Teilton-Zeit-Muster wieder, wie es aus der gehörbezogenen Analyse als direktes Ergebnis folgt. Im unteren Diagramm ist die Verdeckung berücksichtigt, der in Abb. 3.2 näherungsweise durch die eingezeichneten Mithörschwellen Rechnung getragen wurde.

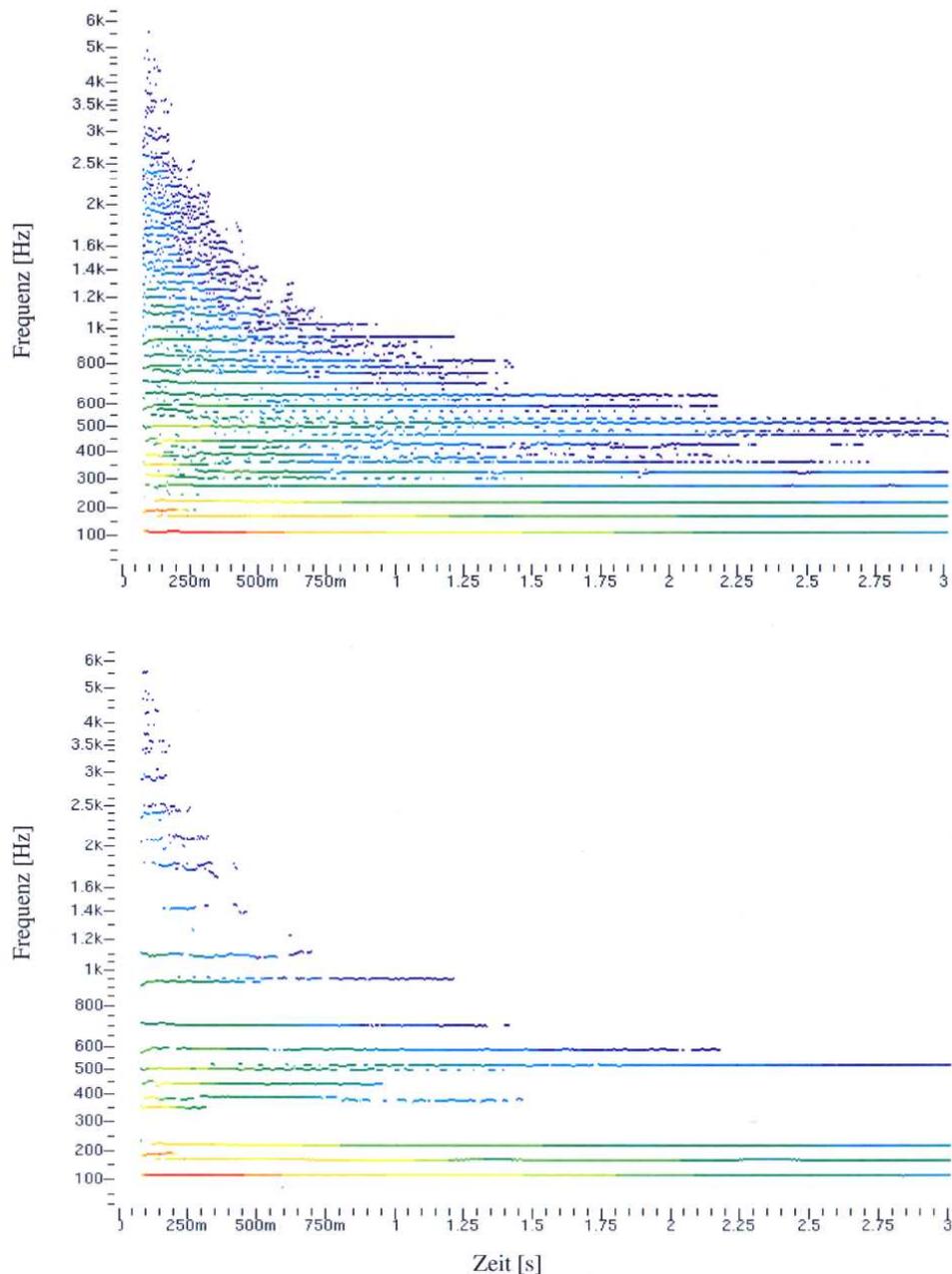


Abb. 3.3. Teilton-Zeit-Muster des Klanges A (Hauptton 110 Hz) der großen Kolberg-Pauke mit Kunstfell und Kessel B; oben: ohne Maskierung; unten: mit Maskierung.

Der psychoakustische Effekt der Verdeckung, auch als spektrale Maskierung, im Englischen *spectral masking* (Fastl und Zwicker 2007) bezeichnet, ist von zentraler Bedeutung für das Hören. Er reduziert die im Schallsignal enthaltene Information ganz erheblich dadurch, dass starke Schallkomponenten schwächere Komponenten verdecken bzw. maskieren. Dies hat zur Folge, dass ein Großteil der physikalisch im Schallsignal vorhandenen Anteile keine Hörwahrnehmung hervorruft. Demzufolge spielen diese Anteile für das Hören keine Rolle und brauchen nicht weiter berücksichtigt zu werden. Diese Erkenntnis bildet das Fundament für moderne Datenreduktionsverfahren, wie sie beispielsweise in MP3-Playern zur Anwendung kommen. Während die Maskierung in Abb. 3.2 für Einzelspektren und nur in grober Näherung berücksichtigt werden konnte, wird sie hier weitgehend exakt und für alle Zeiten erfasst.

Abb. 3.3 bezieht sich auf die mittlere Stimmung der Pauke auf die Note A; der Hauptton hat die Frequenz 110 Hz. Nach rechts läuft die Zeit, wobei die ersten drei Sekunden dargestellt sind. Nach oben ist die Frequenz an einer Skale aufgetragen, die entsprechend der Frequenzgruppenbreite (Bark-Skale; siehe Fastl und Zwicker 2007) unterteilt ist. Der Pegel ist in Farben kodiert, wobei Rot einen großen und Violett einen geringen Pegel bedeutet. Beim Anschlag ist das Spektrum sehr breitbandig und umfasst Frequenzanteile bis etwa 5 kHz. Diese Anteile, die das „Perkussive“ zu Beginn des Paukenklanges charakterisieren, klingen umso rascher ab, je höher ihre Frequenz ist. Nach etwa einer Sekunde geht der perkussive dann in den tonalen Bereich des Paukenklanges über. Einige wenige Teiltöne „stehen“ relativ lang und sind auch dann noch nachweisbar, wenn alle übrigen Komponenten bereits verschwunden sind.

Der Vergleich der beiden Diagramme macht deutlich, welche „bereinigende“ Wirkung die Maskierung ausübt. Das untere Diagramm, das den hörbaren Kern des Schallsignals repräsentiert, enthält deutlich weniger Schallkomponenten als das obere. Die horizontalen Linien repräsentieren Teiltöne. Aus der Änderung der Färbung (rot – gelb – grün – blau – violett) kann auf das Abklingen geschlossen werden. Die Teiltöne stehen unterschiedlich lang; teilweise klingen sie relativ rasch ab. Nach etwa 1,5 s sind noch fünf Teiltöne erkennbar, nach 2,2 s sind es noch vier. Dass darunter Hauptton, Quinte und Oktave sind, unterstreicht erneut die hervorgehobene Rolle dieser drei Teiltöne.

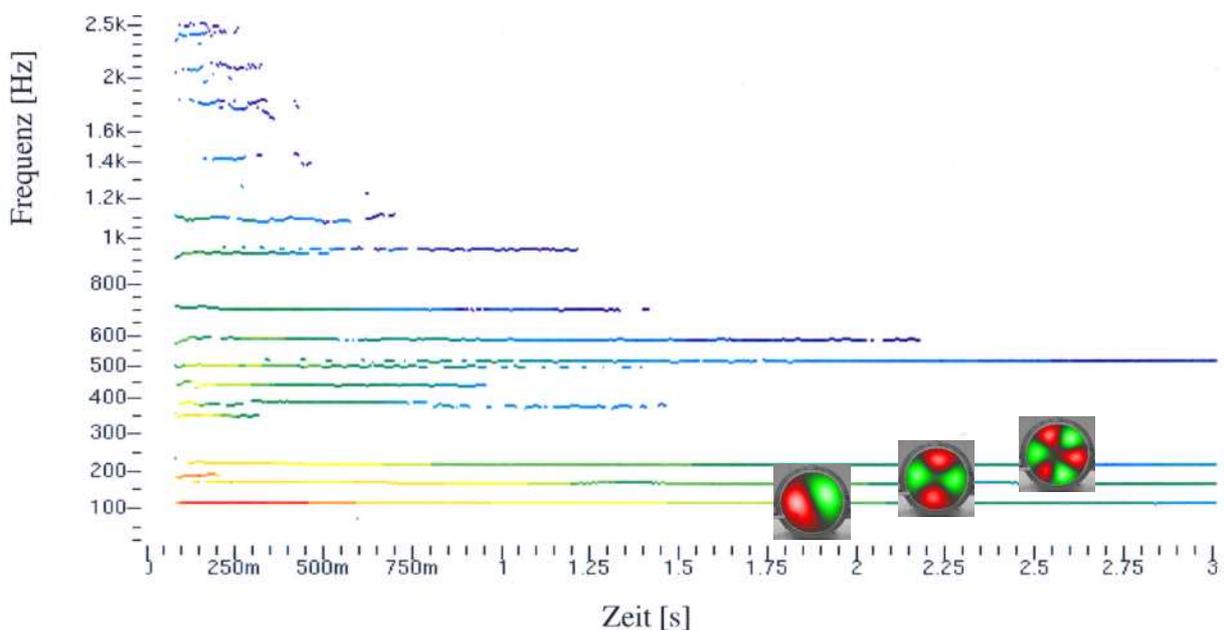


Abb. 3.4. Maskiertes Teilton-Zeit-Muster des Klanges der großen Kolberg-Pauke mit Kunstfell und Kessel B in der Stimmung A (Hauptton 110 Hz).

Abb. 3.4 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt des unteren Diagramms von Abb. 3.3. Der Frequenzbereich ist auf 2,5 kHz beschnitten. Die drei klangbildenden Teiltöne sind durch die eingefügten Vibrometer-Bilder (Fleischer 2005) hervorgehoben. Dadurch wird die Zuordnung der wesentlichen Schallkomponenten zu den Teilschwingungen des Felles, die sie verursachen, deutlich gemacht.

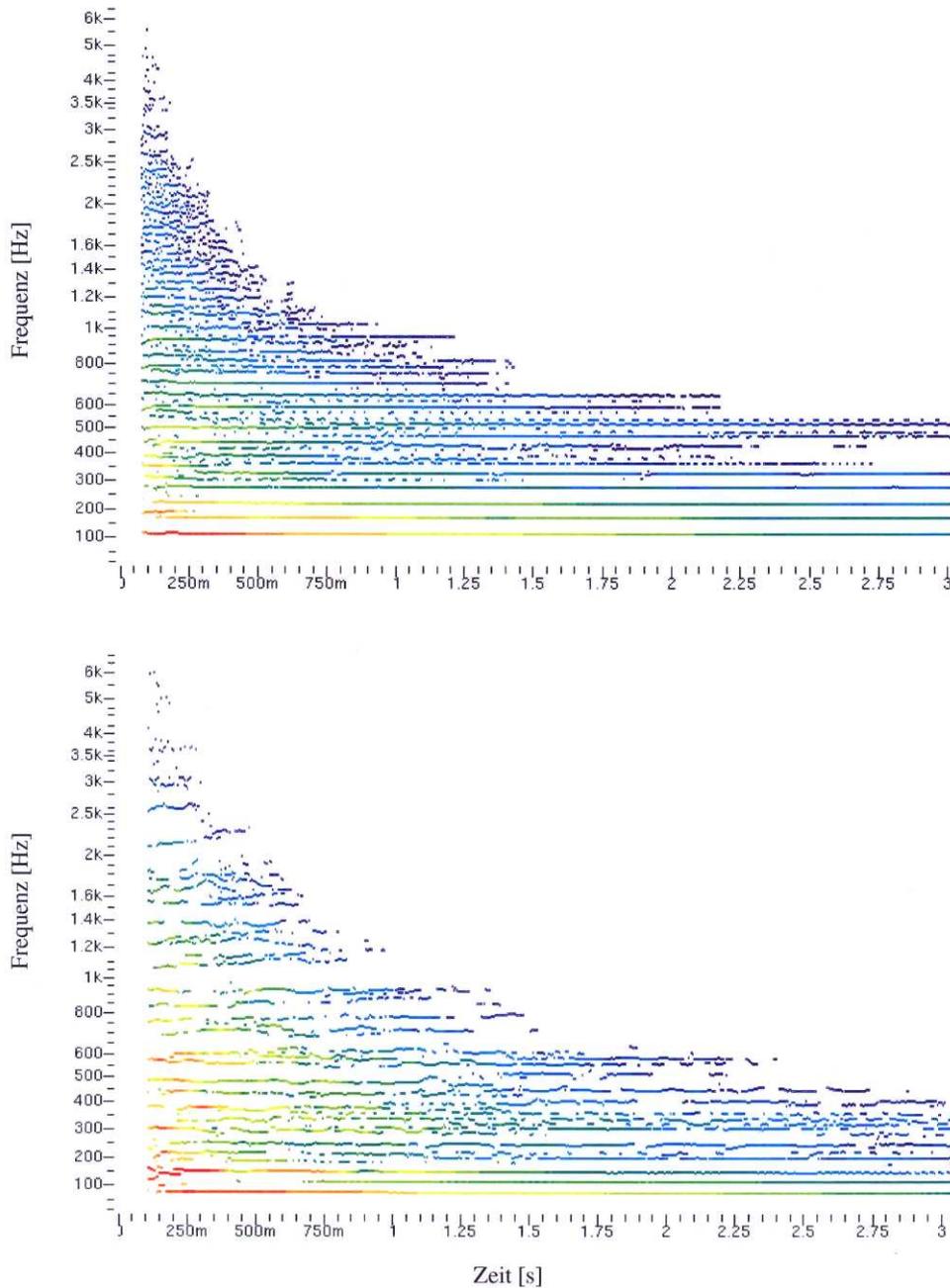


Abb. 3.5. Teilton-Zeit-Muster des Klanges D (Hauptton 73 Hz) der großen Kolberg-Pauke mit Kunstfell und Kessel B; oben: ohne Maskierung; unten: mit Maskierung.

Teilton-Zeit-Muster für den Klang der tief gestimmten Pauke finden sich in Abb. 3.5. Da bei der Stimmung D die Frequenz des Haupttones nun 73 Hz ist, liegen die Schallkomponenten naturgemäß dichter als im vorherigen Beispiel. Die Maskierung bewirkt, dass zahlreiche der Schallanteile, die physikalisch nachweisbar sind (oberes Diagramm), im unteren Diagramm

nicht mehr erscheinen. Bei der tiefen Stimmung fällt auf, dass die meisten Schallkomponenten sich nicht als durchgehende horizontale Linien darstellen, was auf ausgeprägte Tonalität hindeuten würde. Vielmehr zeigen sich zahlreiche Anteile mit unregelmäßigem Frequenz- und Pegelverlauf, wie er für Rauschsignale typisch ist. Dies spiegelt wider, dass bei tiefer Stimmung die Pauke – zumindest mit dem hier verwendeten Kunstfell – nicht sehr viel anders klingt als ein Donnerblech.

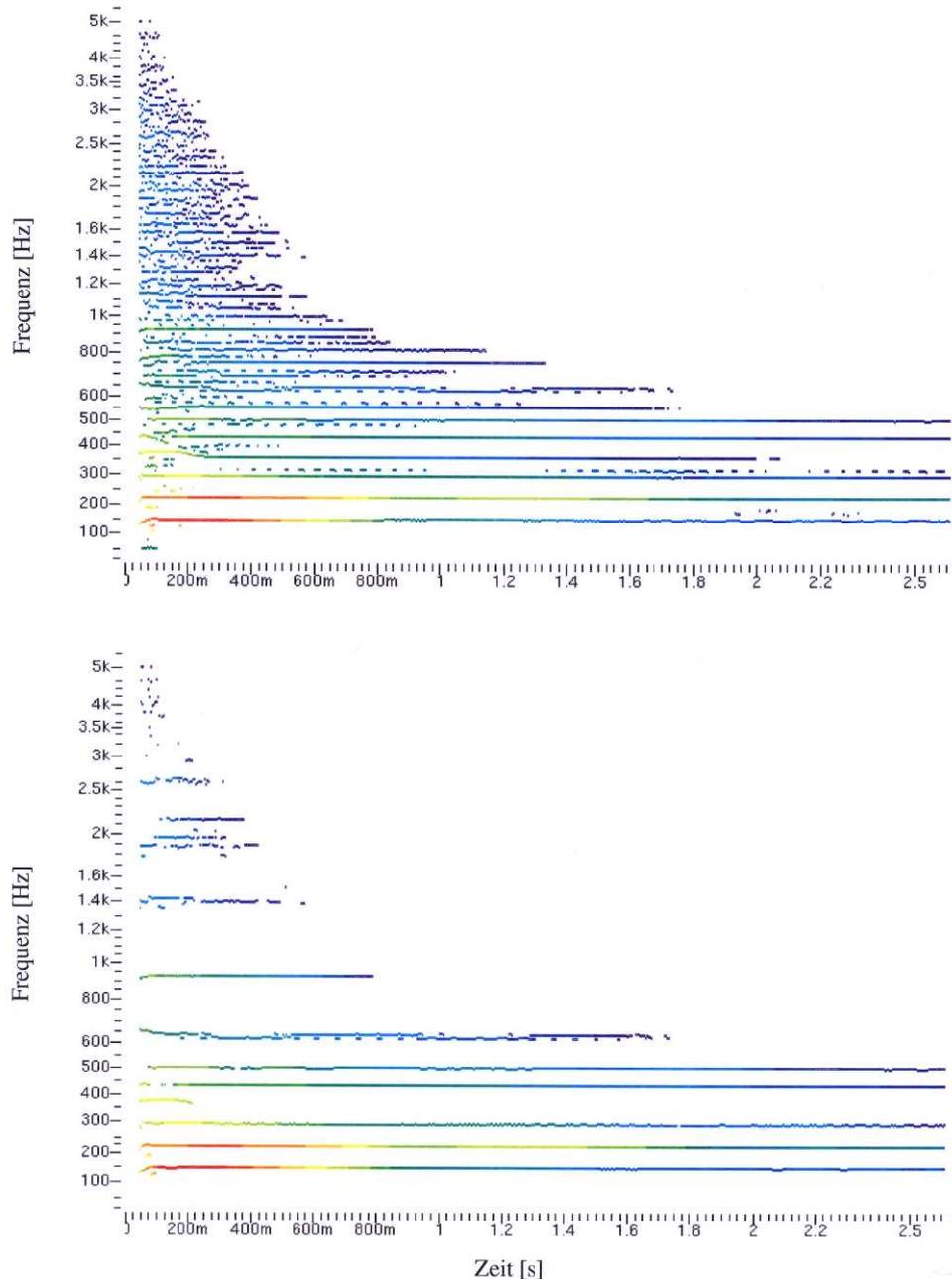


Abb. 3.6. Teilton-Zeit-Muster des Klanges d (Hauptton 147 Hz) der großen Kolberg-Pauke mit Kunstfell und Kessel B; oben: ohne Maskierung; unten: mit Maskierung.

Wenn die Pauke auf den hohen Hauptton d (Frequenz 147 Hz) gestimmt wird, erhält man das Teilton-Zeit-Muster von Abb. 3.6. Im tonalen Abschnitt, der nach etwa einer halben Sekunde einsetzt, sind die Frequenzabstände zwischen den Teiltönen nun groß. Insbesondere dann,

wenn die Maskierung berücksichtigt ist (unteres Diagramm von Abb. 3.6) sind deutlich fünf parallele Linien zu erkennen. Die drei Teiltöne mit den tiefsten Frequenzen sind wiederum der Hauptton, die Quinte und die Oktave. Die Frequenzen dieser Teiltöne verhalten sich näherungsweise wie  $2 : 3 : 4 : 6 : 7$ . Somit liegt ein nahezu harmonischer Klang vor, bei dem der Grundton sowie ein Oberton fehlen. Wesentlich ist, dass auch hier wiederum der Hauptton, die Quinte und die Oktave die tiefsten und über lange Zeiten auch die stärksten Teiltöne sind.

### 3.4. Untersuchungen mit dem Analyseprogramm VIPER

Das Programmpaket VIPER (*Visual PERception of audio signals*), das früher von der Firma Cortex Instruments kommerziell vertrieben worden ist, erlaubt die gehörbezogene Analyse von Schallsignalen. Die Analyse beruht auf den Erkenntnissen nach Zwicker und Feldtkeller (1967) sowie Fastl und Zwicker (2007). Hinsichtlich der Verarbeitung musikalischer Klänge basiert es auf den Überlegungen, die Terhardt (1998) zusammen gefasst hat.

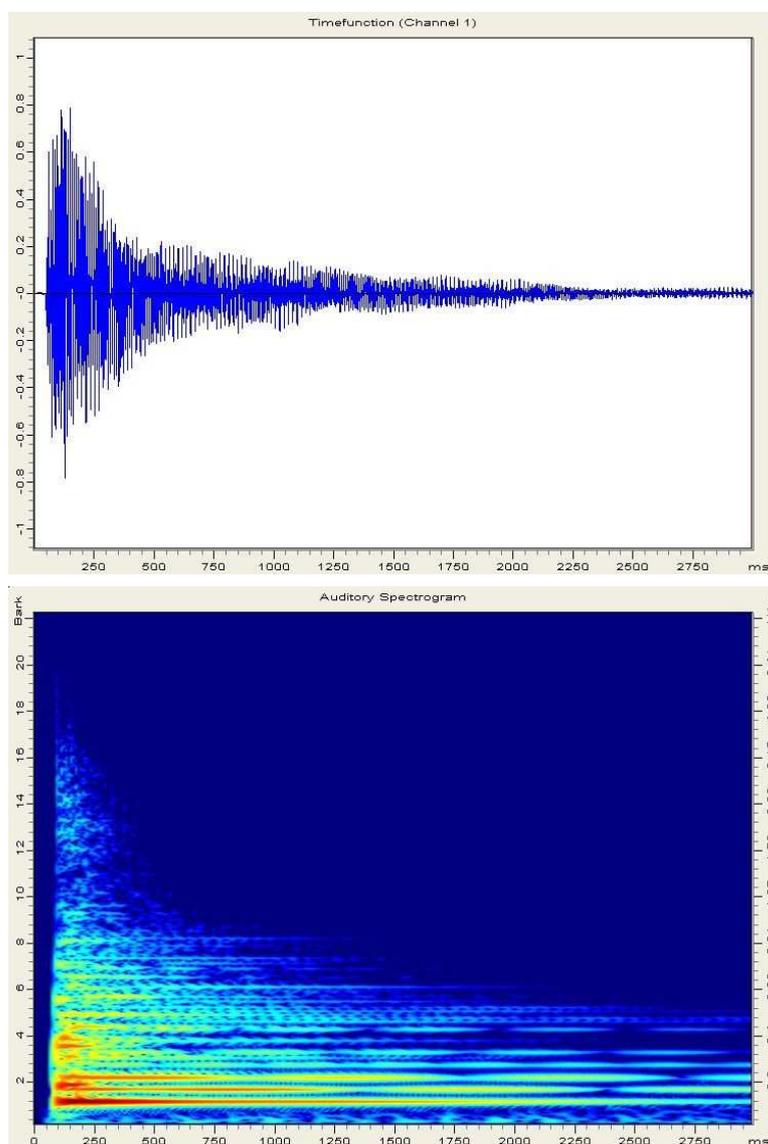


Abb. 3.7. Schalldruck-Zeitfunktion (oben) und Auditorisches Spektrogramm (ASP; unten) des Klanges A (Hauptton 110 Hz) der großen Kolberg-Pauke mit Naturfell und Kessel B, ermittelt mit VIPER.

Dazu wurde der VIPER *PerceptualXplorer* in Versionen von 1.1 bis 2.12 mit dem Handbuch zur Version 1.11 (VIPER 2000) verwendet. In einem Zeitschriftenartikel hat Lemme (2000) knapp und doch anschaulich dargelegt, welche Absicht mit der verwendeten Vorgehensweise verfolgt wird. Der erste Schritt besteht in einer Analyse des Schallsignals, die mit der Fourier-Zeit-Transformation nach Terhardt (1998) vergleichbar ist. Das Ergebnis wird als „Auditorisches Spektrogramm“ (*Auditory SPectrogram, ASP*) bezeichnet. Bis zu 600 Frequenzkanäle sind verfügbar und die Zeitauflösung reicht bis zu 1 ms. Abb. 3.7 zeigt ein Beispiel. Im oberen Bild ist das Oszillogramm des Schallsignals wiedergegeben. Darunter ist im ASP der Pegel in Farben kodiert, wobei das Blau für einen geringen und Rot für einen hohen Wert steht.

Der nächste Schritt nach der gehöradäquaten Frequenzanalyse ist die Extraktion von „Frequenzkonturen“ (*Frequency Contours*), die der von Valenzuela (1999) beschriebenen Konturierung entspricht. Es entsteht ein Diagramm, das mit dem Teilton-Zeit-Muster vergleichbar ist. Ein Beispiel hierfür ist in Abb. 3.8 gezeigt: Die Zeit läuft nach rechts. Die Abszisse ist links mit der Tonheit in Bark und rechts mit der zugehörigen Frequenz in Kilohertz geteilt. Es ist der Bereich bis 22 Bark bzw. 10 kHz dargestellt. Der Pegel ist in Farben kodiert. Es ist eine Spanne von 70 dB gewählt. Dunkles Rot bedeutet einen hohen, helles Blau einen niedrigeren und Weiß einen sehr geringen Pegel.

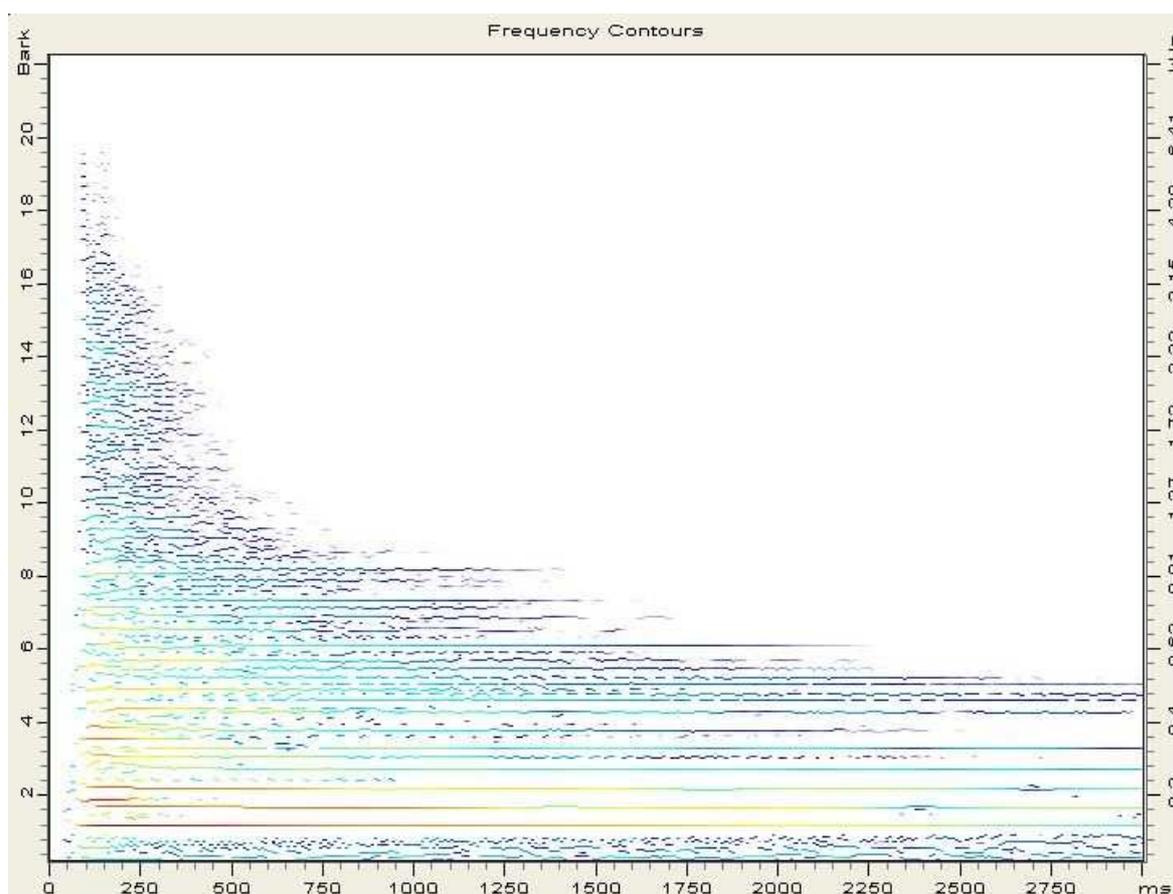


Abb. 3.8. Frequenzkonturen (*Frequency Contours*) des Klanges A (Hauptton 110 Hz) der großen Kolberg-Pauke mit Naturfell und Kessel B, ermittelt mit VIPER.

In Abb. 3.8 sind in dieser Darstellung die ersten drei Sekunden nach dem Anschlagen der Pauke dargestellt. Nach rechts ist die Zeit in Millisekunden, nach oben sind die Tonheit sowie die Frequenz aufgetragen. Es sind zahlreiche Signalanteile mit geringen Pegeln zu erkennen,

die blau eingefärbt sind und sich nur wenig über den weißen Bereich erheben. So zeigt sich am unteren Rand, d.h. bei tiefen Frequenzen, ein regelloses Rauschband, das von Lüftungsgeräuschen im Laborraum herrührt.

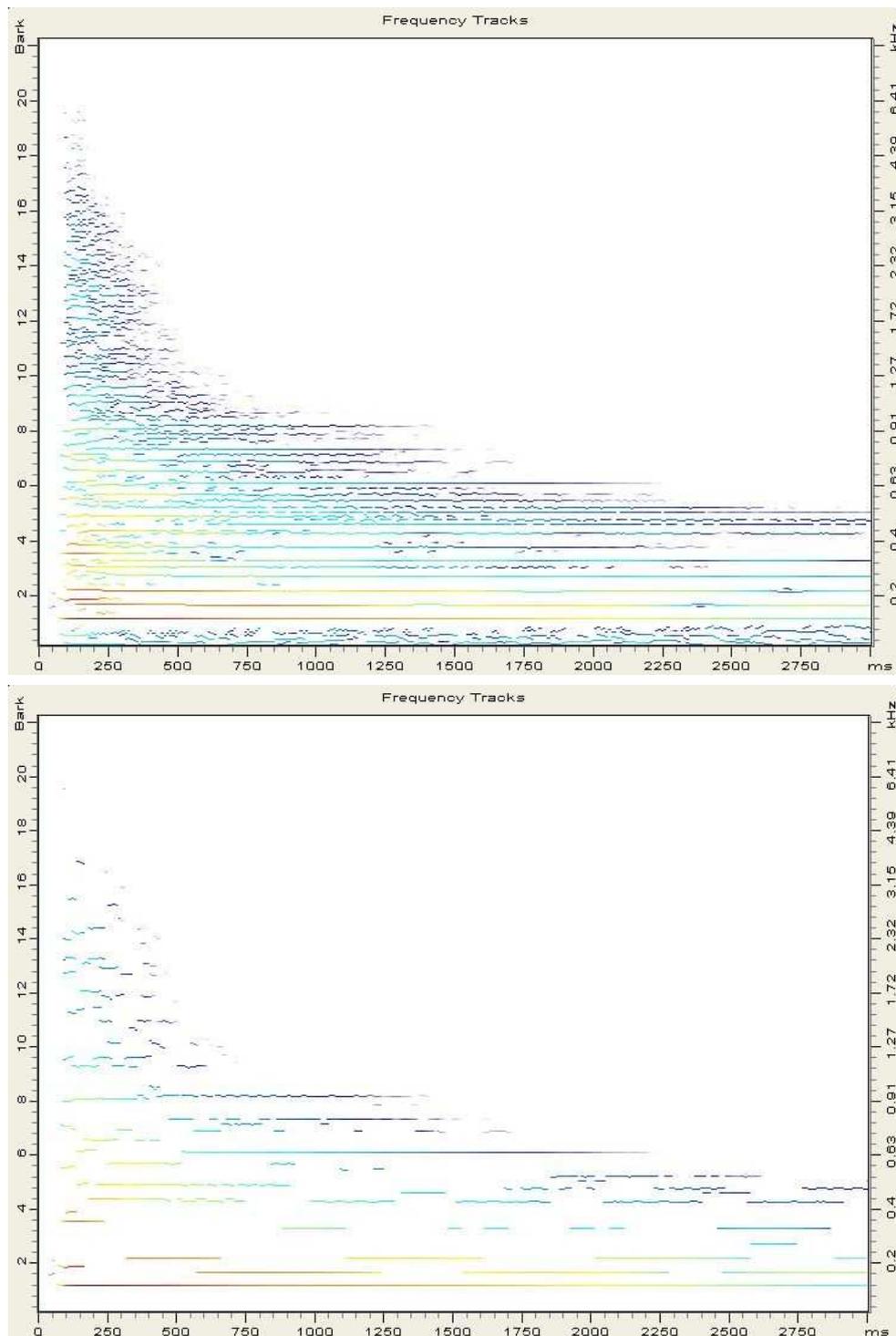


Abb. 3.9. Frequenzspuren (Frequency Tracks) des Klanges A (Hauptton 110 Hz) der großen Kolberg-Pauke mit Naturfell und Kessel B ohne (oben) bzw. mit (unten) Berücksichtigung der Maskierung, ermittelt mit VIPER.

Eine Möglichkeit der Weiterverarbeitung besteht darin, mit der Funktion *Frequency Tracks* länger anhaltende Teiltöne aufzufinden und von kurzzeitigen, perkussiven Schallanteilen zu trennen. Die Unterschiede zwischen den Frequenzkonturen in Abb. 3.8 und den Frequenz-

spuren im oberen Teil von Abb. 3.9 sind im betrachteten Beispiel allerdings äußerst gering. Sie sind – wenn überhaupt – beim Anschlag und unmittelbar danach erkennbar.

Deutliche Unterschiede zeigen sich jedoch, sobald die Resultate der Analyse noch weiter bearbeitet werden. Zusätzlich zur ursprünglichen Analyse, deren Ergebnis der obere Teil von Abb. 3.9 wiedergibt, ist im unteren Teil die Funktion *Nonlinear Masking* gewählt. Damit wird die spektrale Verdeckung (Zwicker und Feldtkeller 1967, Fastl und Zwicker 2007) berücksichtigt. Obwohl die Bezeichnung „Nichtlinear“ eine Pegelabhängigkeit suggeriert, ist eine solche in VIPER nicht nachgebildet. Der Vergleich zeigt, dass die meisten der Signalanteile mit geringem Pegel nun nicht mehr dargestellt sind, da sie maskiert bzw. verdeckt werden. Dies gilt auch für die tieffrequenten Umgebungsgeräusche. Das Bild wirkt dadurch deutlich „bereinigt“, dass einige schwache Teiltöne in Folge der Maskierung unhörbar werden und nicht mehr visualisiert sind. Diese „Bereinigung“ erfolgt nicht willkürlich, sondern auf der Basis psychoakustischer Erkenntnisse. Es darf darauf vertraut werden, dass im unteren Diagramm von Abb. 3.9 gegenüber dem oberen Teil nur solche Information weggelassen ist, die für das Hören unerheblich ist. Oder anders ausgedrückt: Das untere Diagramm von Abb. 3.9 enthält diejenige akustische Information, welche für das Hören tatsächlich relevant ist.

In Abb. 3.10 sind unter Berücksichtigung der Maskierung Frequenzspuren zusammen gestellt, wie man sie für drei unterschiedliche Stimmungen der großen Pauke erhält. Die Frequenz reicht bis 3 kHz, die Dynamik ist 70 dB. Obwohl mit einer anderen Analyse-Software ermittelt, zeigen die drei Diagramme große Ähnlichkeit mit den entsprechenden Bildern unten in den Abb. 3.3, 3.5 und 3.6. Ein Unterschied liegt darin, dass das Paukenfell bei den hier betrachteten Messungen offenbar nicht ganz gleichmäßig gespannt war, so dass Schwebungen der klangbildenden Teiltöne auftreten. Dies kann dazu führen, dass der Hauptton (die jeweils unterste Frequenzspur, beispielsweise in Abb. 3.10 oben für die hohe Stimmung d) zeitweise einen so kleinen Pegel annimmt, dass die Spur unterbrochen erscheint. Mit dem Pegel eines Teiltones schwankt seine Maskierungswirkung, so dass aus diesem Grunde auch die Spuren der weiteren klangbildenden Teiltöne unterbrochen sein können.

Das obere Diagramm von Abb. 3.10 bezieht sich darauf, dass das Fell auf die hohe Note d (Hauptton 147 Hz) gestimmt ist. Über längere Zeit sind fünf parallele Spuren zu erkennen. Die drei Teiltöne mit den tiefsten Frequenzen sind der Hauptton, die Quinte und die Oktave. Der konstanten Abnahme der Pegel sind langsame Schwankungen überlagert. Diese drei Töne sind die tiefsten und über lange Zeiten auch die stärksten Schallkomponenten. Daneben sind noch zwei höherfrequente Teiltöne zu erkennen. Wie bereits Abb. 3.6 gezeigt hat, liegt über längere Zeit ein nahezu harmonischer Klang vor, dessen Teiltöne näherungsweise in den Frequenzintervallen 2 : 3 : 4 : 6 : 7 stehen.

Für die Stimmung A (Hauptton 110 Hz; mittleres Diagramm von Abb. 3.10) sind bei tiefen Frequenzen fünf Spuren zu erkennen. Sieht man von den periodischen Pegelschwankungen mit etwa 1 Hz Schwebungsfrequenz ab, sind über die gesamte Zeitdauer von drei Sekunden auch hier Hauptton, Quinte und Oktave hörbar.

Bei der tiefen Stimmung D (Hauptton 73 Hz; unteres Diagramm von Abb. 3.10) sind nur wenige Schallkomponenten als durchgehende Spuren zu erkennen. Die meisten Anteile stellen sich mit unregelmäßigen Frequenz- und Pegelverläufen dar und haben damit den Charakter von Rauschsignalen. Darin spiegelt sich wider, dass die Pauke bei tiefer Stimmung weniger einen Klang als eher ein Geräusch erzeugt. Die drei tiefsten Teiltöne bilden sich als Spuren ab. Der Hauptton ist durchgängig zu erkennen. Die Quinte bleibt die ersten eineinhalb Sekunden vom Hauptton verdeckt und wird erst dann hörbar. Im Gegensatz dazu ist die Oktave ganz am Anfang wahrnehmbar und wird erst nach etwa eineinhalb Sekunden unhörbar.

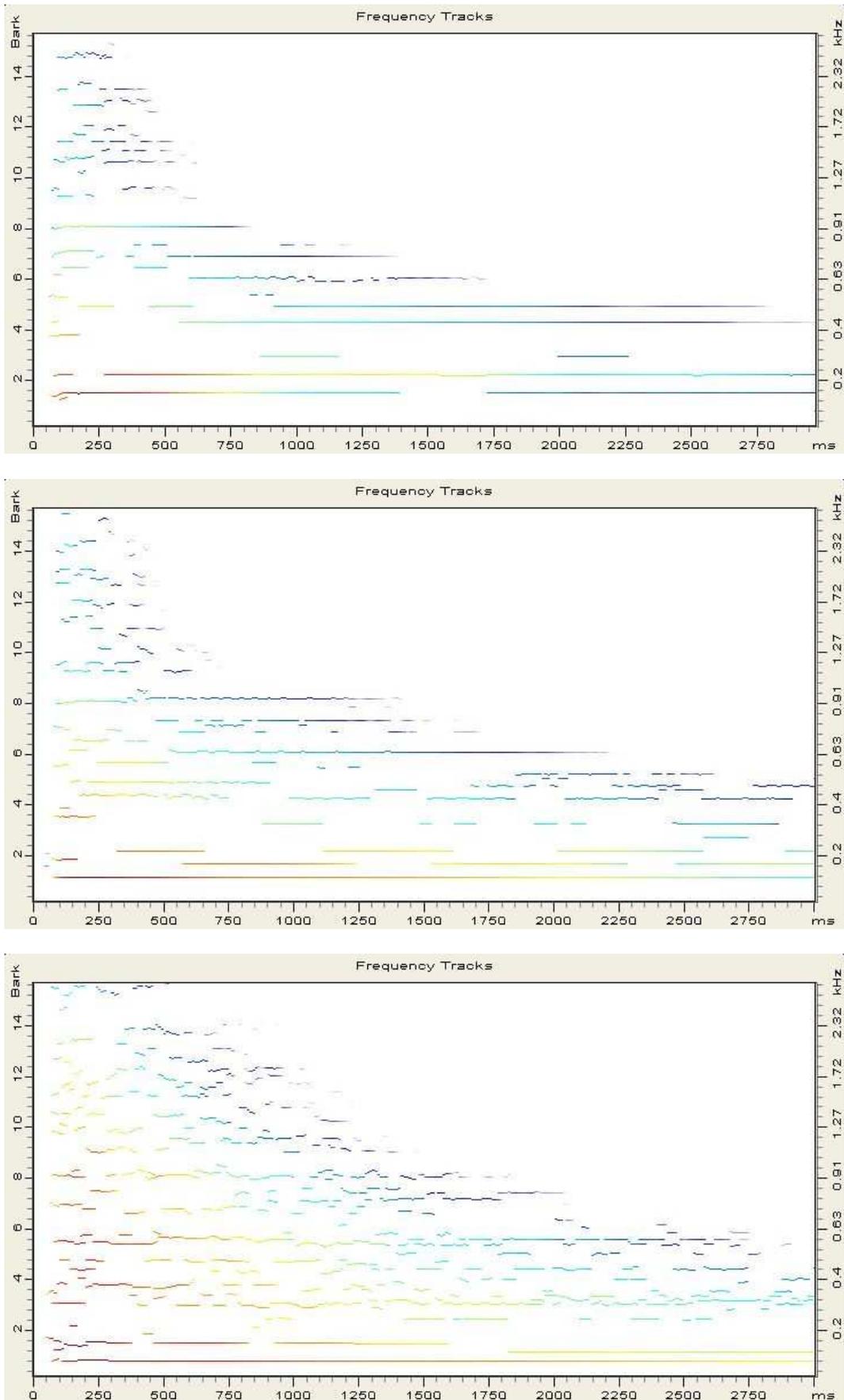


Abb. 3.10. Frequenzspuren (Frequency Tracks) des Klages *d* (oben), *A* (Mitte) und *D* (unten) der großen Kolberg-Pauke mit Kunstfell und Kessel *B* mit Berücksichtigung der Maskierung (Nonlinear Masking), ermittelt mit VIPER.

### 3.5. Zusammenfassende Bemerkung

Übereinstimmend haben die gehörbezogenen Analysen ergeben, dass bei jeder Stimmung der Pauke drei Teiltöne besonders hervortreten. Es sind dies der Hauptton, die Quinte und die Oktave, die in aller Regel nicht nur die tiefsten, sondern in weiten Bereichen auch die stärksten Schallkomponenten sind. Hörexperimente mit Versuchspersonen haben gezeigt, dass es die Spektraltonhöhe des Haupttones ist, welche die musikalische Tonhöhe des Paukenklanges bestimmt. Diesem Teilton kommt die größte musikalische Bedeutung zu. Pauker betonen, dass der Paukenklang einen möglichst starken Hauptton enthalten muss. Daneben erweisen sich die Quinte und die Oktave als wesentlich. Die Quinte ist mit dem Hauptton musikalisch verwandt. Sie ist charakteristisch für den Paukenklang und erlaubt es, einen Paukenklang von den anderen Klängen im Orchester zu unterscheiden. Eine starke Quinte darf im Paukenklang enthalten sein. Weitere Harmonische machen den Klang obertonreich und damit lebendig. Insbesondere die Oktave festigt die Tonhöhenempfindung, die der Hauptton hervorruft.

Diese drei Teiltöne werden von antimetrischen Schwingungen des Felles hervorgerufen, die neben dem Knotenkreis an der Randeinspannung unterschiedlich viele Knotendurchmesser aufweisen (Fleischer 2005 und 2008a). Da ihnen ein Großteil der musikalischen Relevanz zukommt, werden sie bei den folgenden Betrachtungen im Vordergrund stehen. Durch die Beschränkung auf wenige Teiltöne lässt sich die Fülle der physikalisch erhältlichen Information auf denjenigen Kern reduzieren, welcher für das Hören die größte Bedeutung hat. Dies besagt unter Anderem, dass von der Vielfalt der Schwingungsformen eines Paukenfelles diejenigen Moden die wichtigste Rolle spielen, die in Abb. 3.11 dunkel hervorgehoben sind. Die Teiltöne, die von den hell gezeichneten Moden generiert werden, sind dagegen von so untergeordneter Bedeutung, dass sie im Folgenden nicht weiter behandelt werden.

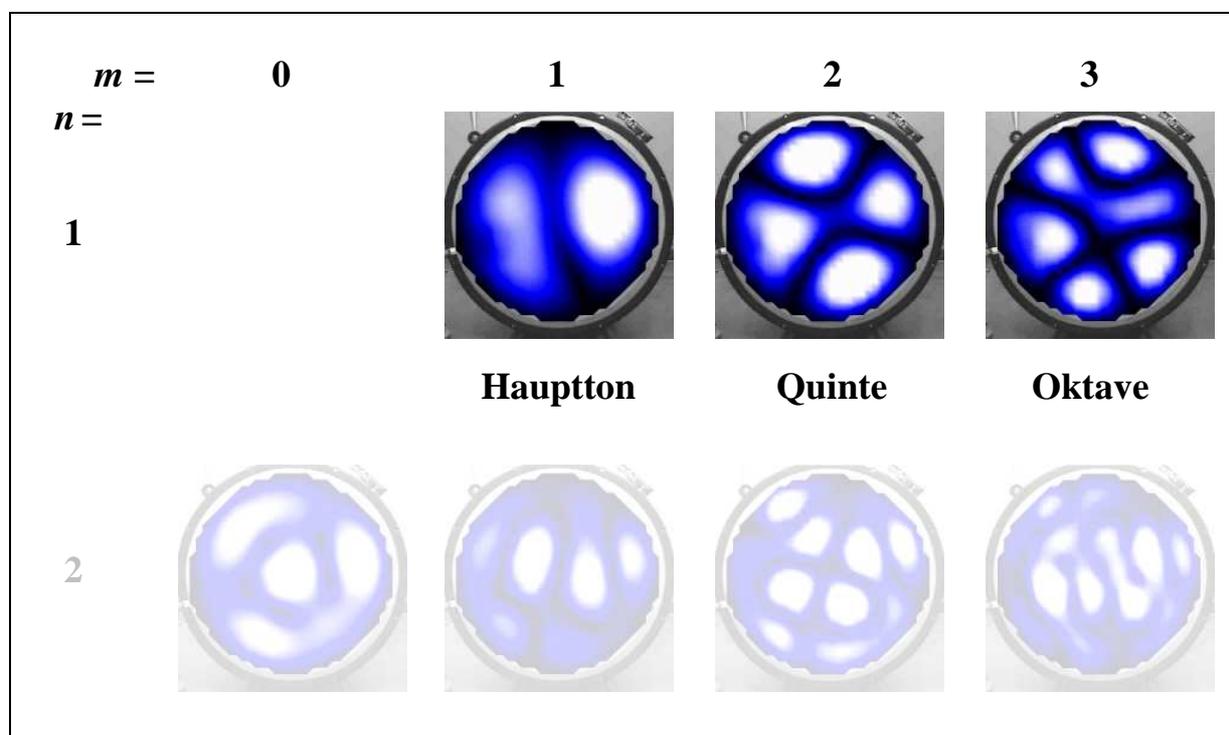


Abb. 3.11. Drei klangbildende Schwingungsformen (oben) des Felles, ermittelt mittel Laser-Vibrometrie. Dargestellt nach Art Chladni'scher Klangfiguren ist der Betrag; helle Stellen stehen für Schwingungsbäuche, dunkle Linien für Schwingungsknoten. Die musikalischen Bezeichnungen der zugehörigen Teiltöne sind eingefügt.

Vor allem die antimetrischen Schwingungen mit einem Knotenkreis am Rand ( $n = 1$ ), die in der oberen Zeile zusammen gestellt sind, können relevant werden. Tonhöhenbestimmend, so haben Hörversuche gezeigt, ist der Hauptton, hervorgerufen von der Mode mit  $m = 1$  Knotendurchmesser. Für das musikalische Signal der Pauke ist er am wichtigsten. Die Schwingungen mit  $m = 2$  bzw.  $m = 3$  Knotendurchmessern generieren die Quinte bzw. die Oktave. Von zusätzlichem Interesse könnte auch die Duodezime ( $m = 4$  Knotendurchmesser) sowie weitere Teiltöne mit noch mehr Knotendurchmessern sein. Alle bisherigen und die folgenden Untersuchungen zeigen übereinstimmend, dass die zugehörigen Teiltöne zwar keine exakte, aber eine doch nahezu harmonische Reihe bilden. Die drei ersten werden fortan als „klangbildend“ bezeichnet und sollen im Weiteren betrachtet werden. Die zugehörigen Schwingungen sind in der oberen Zeile von Abb. 3.11 angesiedelt. Sie sind allesamt antimetrisch und dadurch gekennzeichnet, dass einander gegenüber liegende Bereiche gegensinnig schwingen.

Eine eher negative Rolle spielt ein Teilton, der bei den gehörbezogenen Untersuchungen nur versteckt zutage tritt. Er wird von einer rotationssymmetrischen Schwingung mit  $n = 1$  Knotenkreis hervorgerufen, die nicht in Abb. 3.11 dargestellt ist. Dass er sich im akustischen Signal nicht deutlich widerspiegelt, ist äußerst erstaunlich. Unabhängig davon, wo der Musiker das Fell anschlägt, wird er die 01-Teilschwingung - und damit den zugehörigen Teilton - immer anregen. So ist auch für die Note d (Abb. 3.6 und Abb. 3.10 oben) unmittelbar nach dem Anschlag für kurze Zeit eine Komponente unterhalb des Haupttones zu erkennen.

Gesprächen mit Musikern zufolge dürfte der 01-Ton die Ursache für einen „Unterton“ sein, der sich nicht in das weitgehend harmonische Raster der klangbildenden Töne einfügt. Wenn dieser Ton tiefer als der Hauptton liegt, dann klingt der Paukenschall den Musikern zufolge „träge, dunkel, schwerfällig“. Um sicherzustellen, dass der 01-Ton beim Hören eine möglichst geringe Rolle spielt, sollte seine Frequenz oberhalb derjenigen des Haupttones liegen. Er wird dann vom Hauptton maskiert. Darüber hinaus sollte er nicht stehen, sondern möglichst schnell abklingen. Dass Letzteres erfüllt ist, wurde in Fleischer (2008b) dargelegt. Es zeigt sich auch an der sehr kurzen Zeitdauer, die in den Abb. 3.6 unten und Abb. 3.10 oben unmittelbar nach dem Anschlag zu erahnen ist. Ob und unter welchen Bedingungen der 01-Ton bei den hier betrachteten Pauken der tiefste Teilton ist, wird im Folgenden ausführlich untersucht werden.

Alle bisherigen Untersuchungen zu diesem Thema (siehe z.B. Fletcher und Rossing 1998, Fleischer 1988) haben zweifelsfrei ergeben, dass sämtliche für die Musik wichtigen Teiltöne auf antimetrische Moden zurückgehen. Wie Abb. 9.9 zeigt, stammt der Hauptton, der die musikalische Tonhöhe definiert, von der 11-Mode, die Quinte von der 21-Mode und die Oktave von der 31-Mode. Dass die zugehörigen Frequenzen in Intervallen nahe  $1 : 1,5 : 2$  stehen und damit die entsprechenden Teiltöne ihre musikalischen Bezeichnungen zu Recht tragen, ist für eine Membran zunächst nicht zu erwarten. Es wird erst plausibel, wenn die Wirkung der umgebenden Luft in die Überlegungen mit einbezogen wird. Harmonische Frequenzverhältnisse sind zu einem großen Teil auf die Massewirkung der Luft im Kessel zurückzuführen. Es wird sich zeigen, dass es dieser Fluid-Struktur-Interaktion bedarf, um die zunächst unharmonischen Frequenzverhältnisse zu einer annähernd harmonischen Folge zu ordnen.

## 4. FFT-ANALYSEN

Die gehörbezogenen Untersuchungen des Schallsignals von Kapitel 3 haben gezeigt, dass für die große Pauke ein Frequenzbereich von 500 Hz, im äußersten Fall bis 1 kHz, von primärem Interesse ist. Für diese beiden Frequenzbereiche sollen im vorliegenden Kapitel so genannte „Wasserfall“-Diagramme“ gezeigt werden. Diese Diagramme sind aus einzelnen Schallpegel-Frequenz-Spektren zusammen gesetzt und zeigen, wie sich das Schallspektrum im Lauf der Zeit aufbaut (was sehr rasch geschieht) und wieder abbaut (was mehrere Sekunden dauern kann). Als Untersuchungsobjekt diente die große Kolberg-Pauke, die mit verschiedenen Kesseln versehen war. Es wird veranschaulicht, wie sich das Spektrum von einem perkussiven Anfangsteil zu einem quasi-stationären tonalen Teil wandelt.

### 4.1. Langzeit-Wasserfalldiagramme für unterschiedliche Kessel der großen Pauke

#### 4.1.1. Stimmung A

Im vorhergehenden Kapitel hat Abb. 3.2 isolierte Schallpegel-Frequenz-Spektren zu unterschiedlichen Zeitpunkten gezeigt. Man konnte erkennen, bei welchen Frequenzen sich Teiltöne ausbilden und feststellen, dass sie unterschiedlich schnell abklingen. Um zu verdeutlichen, wie sich Teiltöne entwickeln und wie lange sie stehen, ist eine Darstellung als Wasserfalldiagramm gut geeignet.

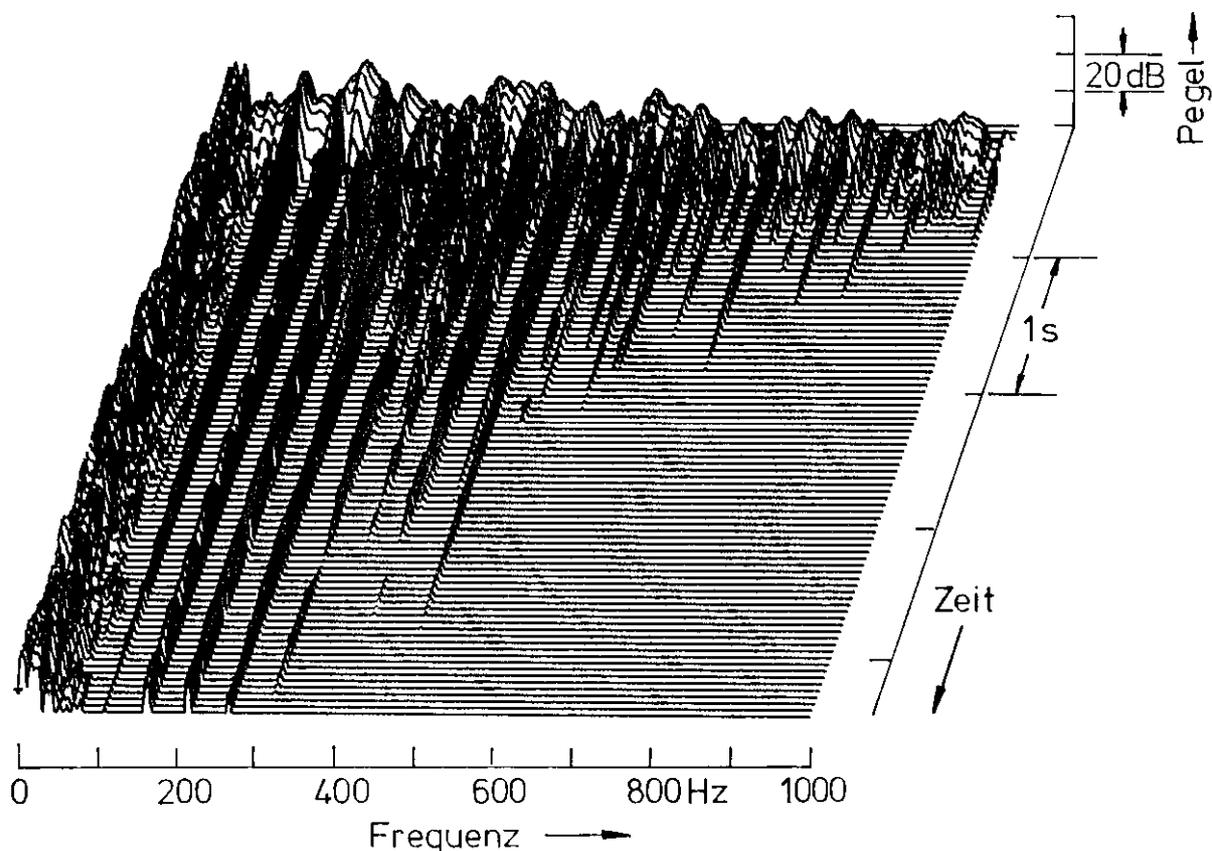


Abb. 4.1. Wasserfalldiagramm (Schallpegel über der Frequenz bis 1 kHz und der Zeit bis 4,5 s) der großen Kolberg-Pauke mit Kunstfell und Kessel A in der Stimmung A (Hauptton 110 Hz).

Die Abb. 4.1 bis 4.3 beziehen sich auf die große Kolberg-Pauke mit Kunstfell *Remo Weather King Timpani*, das auf die musikalische Note A gestimmt war und an der Normalstelle mit einem Filzschlegel angeschlagen wurde. Nacheinander waren die Kessel A, B und C eingebaut, die in Abschnitt 2.2 näher beschrieben worden sind. Nach oben ist in einer Spanne von 60 dB der Schallpegel, nach rechts zwischen 0 Hz und 1 kHz die Frequenz aufgetragen. Voreinander und gegeneinander seitlich versetzt sind 90 Kurzzeitspektren zusammen gefügt. Die Zeit, vom Anschlag bis 4,5 s danach betrachtet, läuft nach vorn. Auf diese Weise entsteht ein dreidimensionales Bild, das deutlich macht, wie aus dem zunächst breitbandigen Paukenschlag der Paukenklang erwächst. Die meisten Schallanteile verschwinden rasch wieder, so dass nach einigen Sekunden nur noch eine Handvoll Teiltöne nachweisbar sind. Dass die Messung in normaler Laborumgebung gemacht wurde, ist bei tiefen Frequenzen, d.h. am linken Rand des Diagramms, zu erkennen. Die regellosen Signalanteile, die sich dort abzeichnen, stellen insbesondere das Geräusch der Klimaanlage dar; sie haben mit dem Paukenklang nichts zu tun.

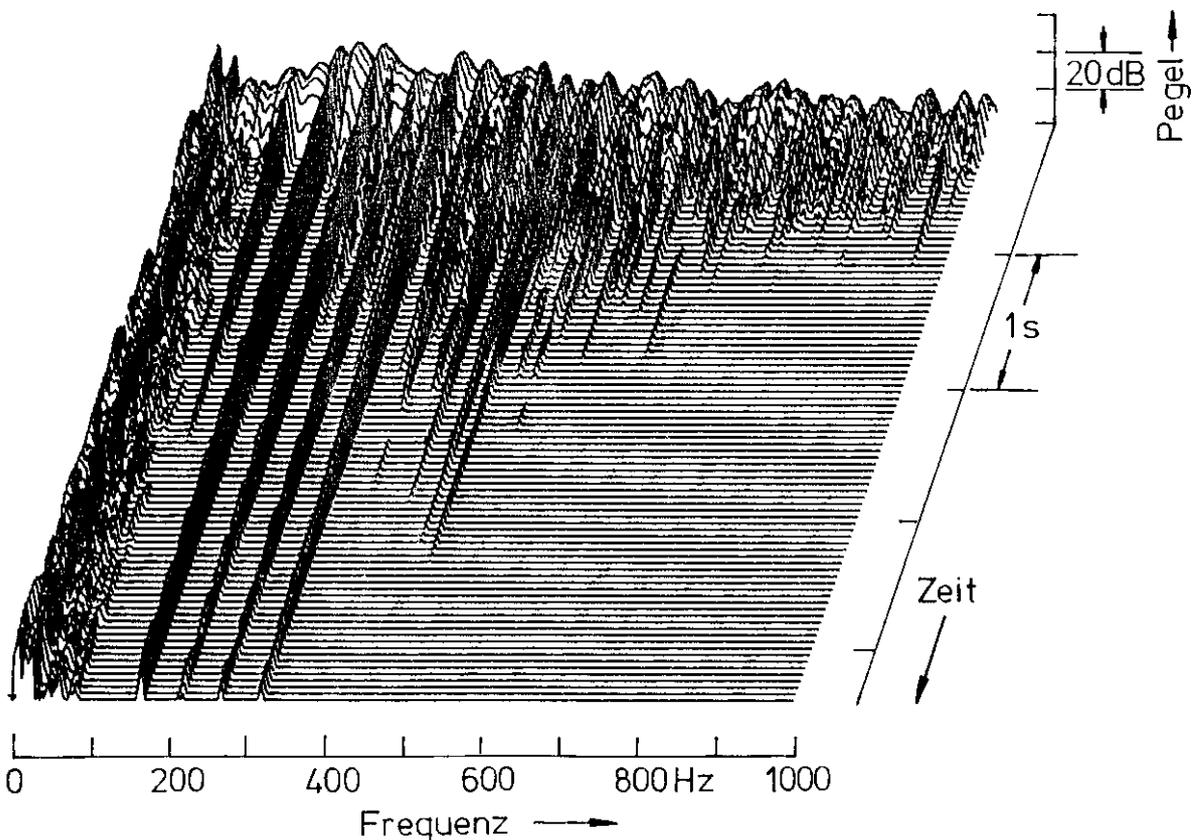


Abb. 4.2. Wasserfalldiagramm (Schallpegel über der Frequenz bis 1 kHz und der Zeit bis 4,5 s) der großen Kolberg-Pauke mit Kunstfell und Kessel B in der Stimmung A (Hauptton 110 Hz).

Der Vergleich der Langzeit-Diagramme für die drei verschiedenen Kessel zeigt, dass die Teiltöne sich in jeweils unterschiedlichem Maße ausprägen. Ob diese Unterschiede allerdings vom Kessel herrühren oder andere Ursachen haben, lässt sich im Nachhinein nicht mehr feststellen. Vermutlich hängen sie vor allem damit zusammen, dass der Schlegel mit nicht gleichbleibender Stärke und/oder an nicht immer denselben Stellen auf das Fell traf.

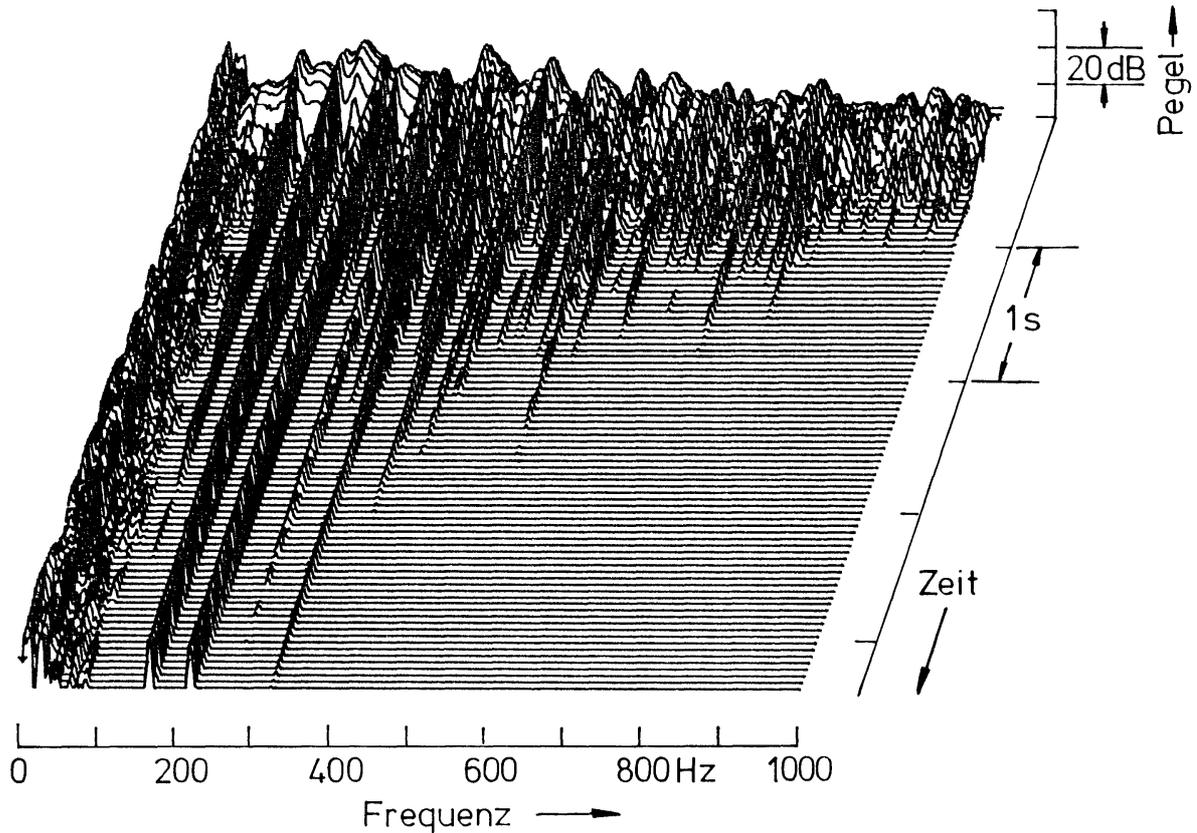


Abb. 4.3. Wasserfalldiagramm (Schallpegel über der Frequenz bis 1 kHz und der Zeit bis 4,5 s) der großen Kolberg-Pauke mit Kunstfell und Kessel C in der Stimmung A (Hauptton 110 Hz).

Die Langzeitdiagramme von Abb. 4.1 bis 4.3 gelten allesamt für die musikalische Note A des Felles, d.h. wenn der Hauptton die Frequenz 110 Hz hat. Für diese mittlere Tonlage der großen Pauke bieten sie insbesondere Einblick in die Teiltöne, die den Klang der Pauke dann bestimmen, wenn der perkussive Teil abgeklungen ist. Durch Verändern der Spannkraft lässt sich das Fell im Bereich einer Oktav stimmen. Es ist daher von Interesse, auch Klänge anderer Tonlagen zu untersuchen. In den folgenden Abb. 4.4 bis 4.6 finden sich Zusammenstellungen von Langzeitdiagrammen für jeden der drei Kessel. Es wurde stets dasselbe Kunstfell *Remo* verwendet. Es war auf die Noten D (Hauptton 73 Hz), A (Hauptton 110 Hz) und d (Hauptton 147 Hz) gestimmt.

### 4.1.2. Verschiedene Stimmungen

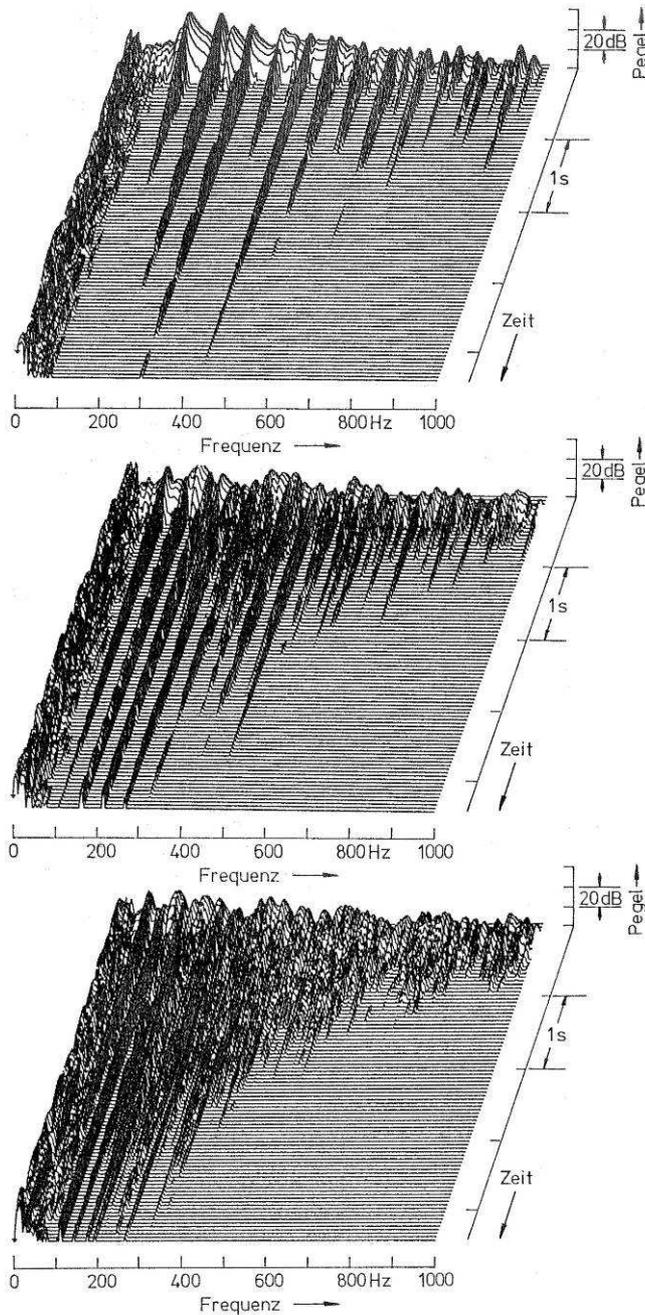


Abb. 4.4. Schallsignale der großen Kolberg-Pauke mit Kessel A und Kunstfell: Schallpegel (nach oben) als Funktion der Frequenz (bis 1 kHz nach rechts) und der Zeit (bis 4,5 s nach vorn); Stimmung d (oben), A (Mitte) und D (unten).

Die Zusammenstellung von Abb. 4.4 gilt für Klänge der Pauke, die mit dem Kessel A (142 l) bestückt war. Der Schallpegel ist in einer Spanne von 60 dB dargestellt, die Frequenz reicht von 0 Hz bis 1 kHz und die Zeit läuft von hinten nach vorn vom Anschlag bis 4,5 s. Bei der tiefen Stimmung D (unteres Diagramm) treten sehr viele Teiltöne auf, deren tieferfrequente sehr lange nachklingen. Das mittlere Diagramm stimmt mit Abb. 4.1 überein. Im oberen Diagramm (Stimmung d) liegen die Teiltöne so weit auseinander, dass sie einzeln zu erkennen und ohne Schwierigkeiten voneinander zu trennen sind.

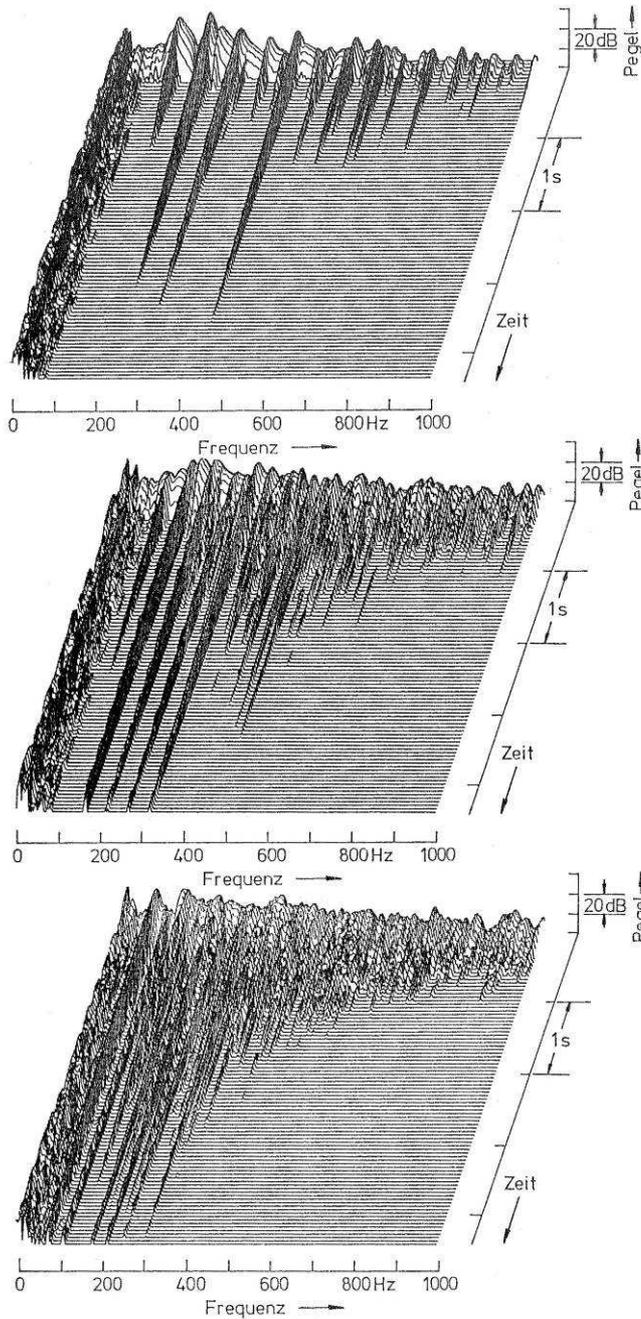


Abb. 4.5. Schallsignale der großen Kolberg-Pauke mit Kessel B und Kunstfell: Schallpegel (nach oben) als Funktion der Frequenz (bis 1 kHz nach rechts) und der Zeit (bis 4,5 s nach vorn); Stimmung d (oben), A (Mitte) und D (unten).

Abb. 4.5 bezieht sich auf die Klänge der Pauke, in die der größte Kessel B (143 l) eingehängt war. Die Skalen für Pegel (60 dB), Frequenz (bis 1 kHz) und Zeit (0 s bis 4,5 s) sind dieselben wie in der vorherigen Abbildung. Bei der tiefen Stimmung D scheinen die Teiltöne etwas rascher abzuklingen als im vergleichbaren Diagramm von Abb. 4.4. Das mittlere Diagramm ist identisch mit Abb. 4.2. Auch hier wirkt das obere Diagramm für die hohe Stimmung d am übersichtlichsten, da sich die einzelnen Teiltöne gut identifizieren lassen.

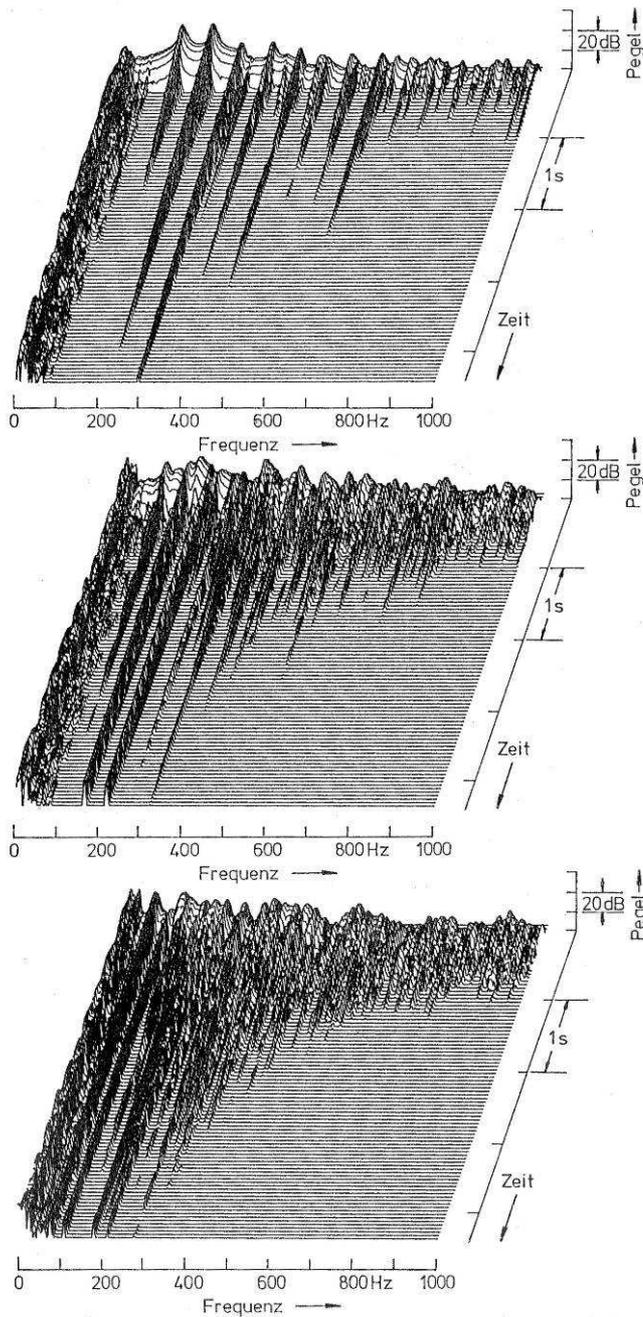


Abb. 4.6. Schallsignale der großen Kolberg-Pauke mit Kessel C und Kunstfell: Schallpegel (nach oben) als Funktion der Frequenz (bis 1 kHz nach rechts) und der Zeit (bis 4,5 s nach vorn); Stimmung d (oben), A (Mitte) und D (unten).

Die Diagramme von Abb. 4.6 entstehen, wenn die Pauke mit dem flachen Kessel C (133 l) versehen ist. Von den Abb. 4.4 und 4.5 her ist bekannt, dass bei der tiefen Stimmung D (unteres Diagramm) sehr viele Teiltöne so dicht beieinander liegen, dass sie nur schwer voneinander zu separieren sind. Das mittlere Diagramm war bereits in Abb. 4.3 vergrößert dargestellt. Den übersichtlichsten Eindruck vermittelt naturgemäß auch hier das obere Diagramm (Stimmung d).

Die Langzeitdiagramme von Abb. 4.1 bis 4.6 dienen der Übersicht und gewähren bevorzugt Einblick in die Komponenten, die den tonalen Anteil des Paukenschalles bestimmen. So machen sie den „Paukenklang“ sichtbar. Wegen der begrenzten Frequenzauflösung können sie jedoch keine Details aufzeigen. Wenn beispielsweise die Existenz und Lage von Teiltönen wie dem 01-Ton interessieren, kann es von Vorteil sein, sozusagen durch die Lupe ein kleineres Zeit- und Frequenzgebiet hervorzuheben. Hierauf bezieht sich der folgende Abschnitt.

## 4.2. Kurzzeit-Wasserfalldiagramme für unterschiedliche Kessel der großen Pauke

### 4.2.1. Stimmung A

Die Abb. 4.7 bis 4.9 gelten für dieselbe große Kolberg-Pauke mit Kunstfell. Dieses war auf die musikalische Note A gestimmt und einer der Kessel A, B oder C eingebaut. Diese Diagramme stellen gewissermaßen Ausschnittsvergrößerungen der Abb. 4.1 bis 4.3 dar. An der Ordinate ist in einer Spanne von nunmehr 50 dB der Schallpegel aufgetragen. Die Abszisse nach rechts bezieht sich auf die Frequenz zwischen 0 Hz und 500 Hz; die Frequenzspanne ist somit halbiert worden. Gegenüber den vorherigen Diagrammen ist nun die Zeitachse umgedreht. Bei den „Kurzzeitdiagrammen“ läuft die Zeit nach hinten, d.h. in die Zeichenebene hinein, und zeigt den Anschlag bis 1 s danach. Da das dreidimensionale Bild des Paukenschalles nun von der anderen Seite her betrachtet wird, werden auch Teiltöne sichtbar, die von sehr kurzer Dauer sind und die in den Langzeitdiagrammen wegen der anderen Perspektive nicht sichtbar geworden sind. Allerdings ist zu bemerken, dass die erhöhte Frequenzauflösung dadurch erkauft werden muss, dass das Zeitfenster nun länger ist, als es bei der vorherigen Messung war. Der Preis für eine bessere Frequenzauflösung ist eine schlechtere Zeitauflösung.

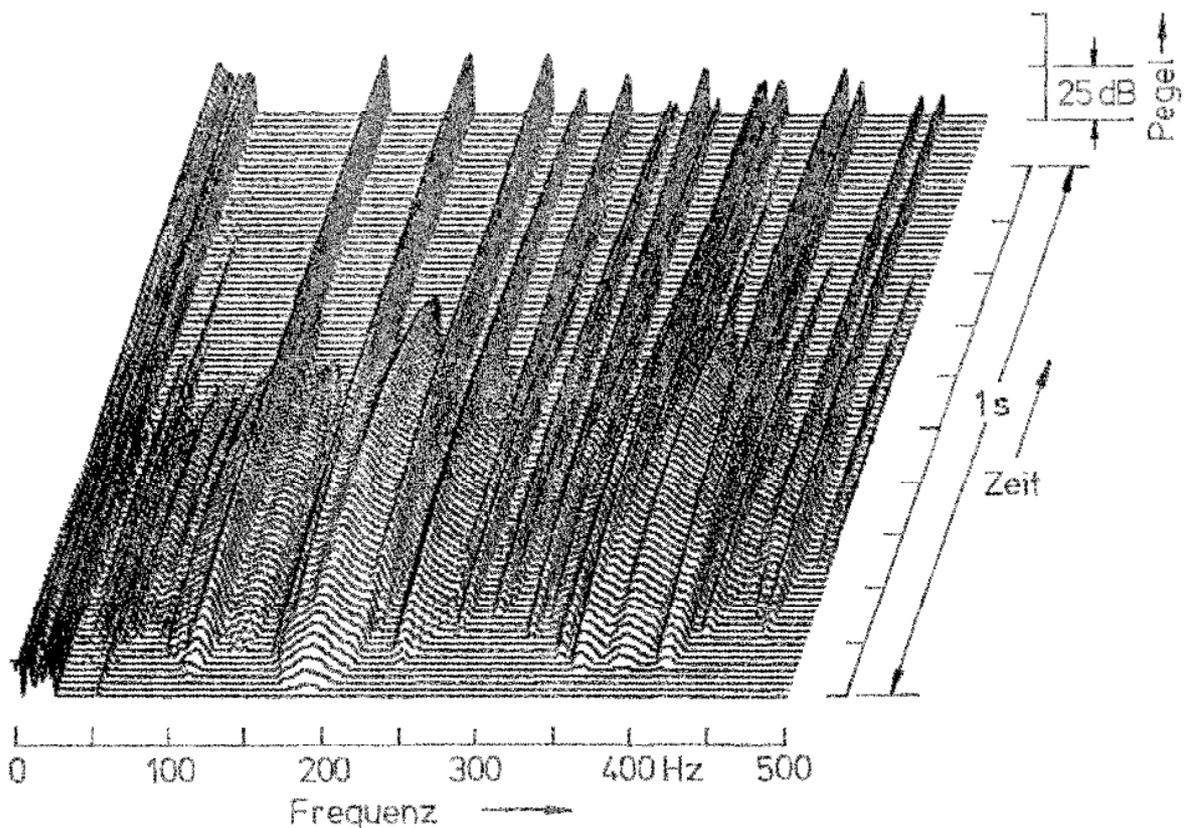


Abb. 4.7. Wasserfalldiagramm (Schallpegel über der Frequenz bis 500 Hz und der Zeit bis 1 s) der großen Kolberg-Pauke mit Kunstfell und Kessel A in der Stimmung A (Hauptton 110 Hz).

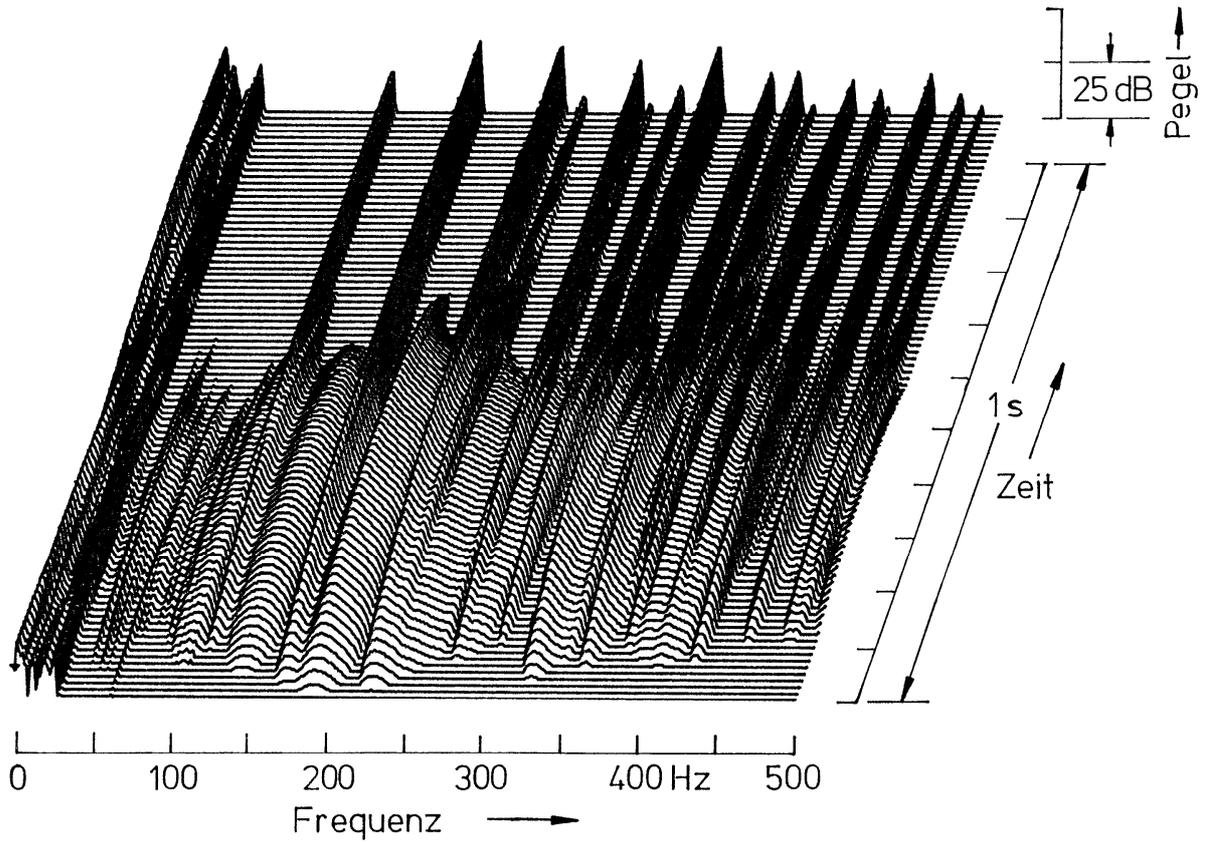


Abb. 4.8. Wasserfalldiagramm (Schallpegel über der Frequenz bis 500 Hz und der Zeit bis 1 s) der großen Kolberg-Pauke mit Kunstfell und Kessel B in der Stimmung A (Hauptton 110 Hz).

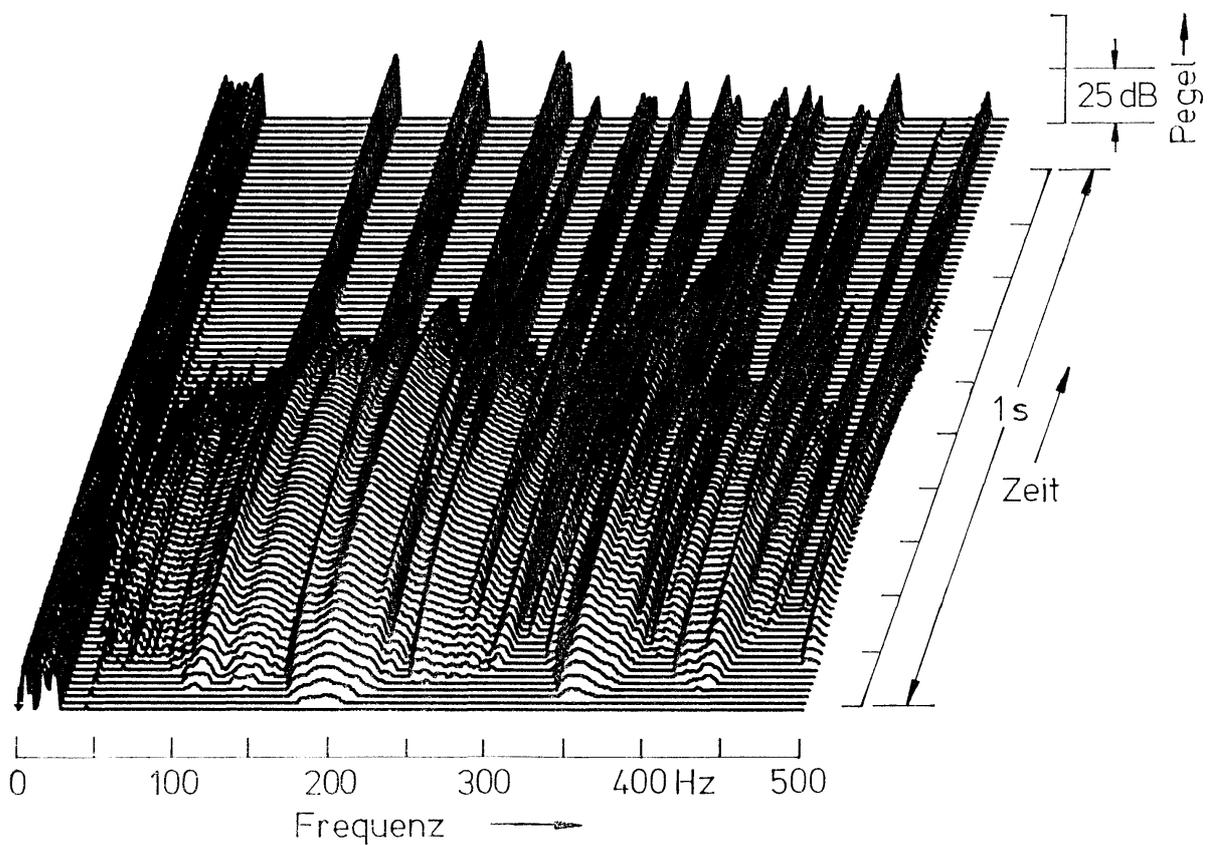


Abb. 4.9. Wasserfalldiagramm (Schallpegel über der Frequenz bis 500 Hz und der Zeit bis 1 s) der großen Kolberg-Pauke mit Kunstfell und Kessel C in der Stimmung A (Hauptton 110 Hz).

Die Kurzzeitdiagramme von Abb. 4.7 bis 4.9 gewähren Einblick in Details. Sie erlauben es, den perkussiven Anteil des Paukenschalles näher zu untersuchen, der den „Paukenschlag“ definiert. Diese Darstellung eignet sich beispielweise dafür, den 01-Ton aufzuspüren, der von der ersten rotationssymmetrischen Fellschwingung stammt und sich üblicherweise nicht in das harmonische Schema der klangbildenden Teiltöne einfügt; vgl. beispielsweise die Kapitel 3 und 6.

#### 4.2.2. Verschiedene Stimmungen

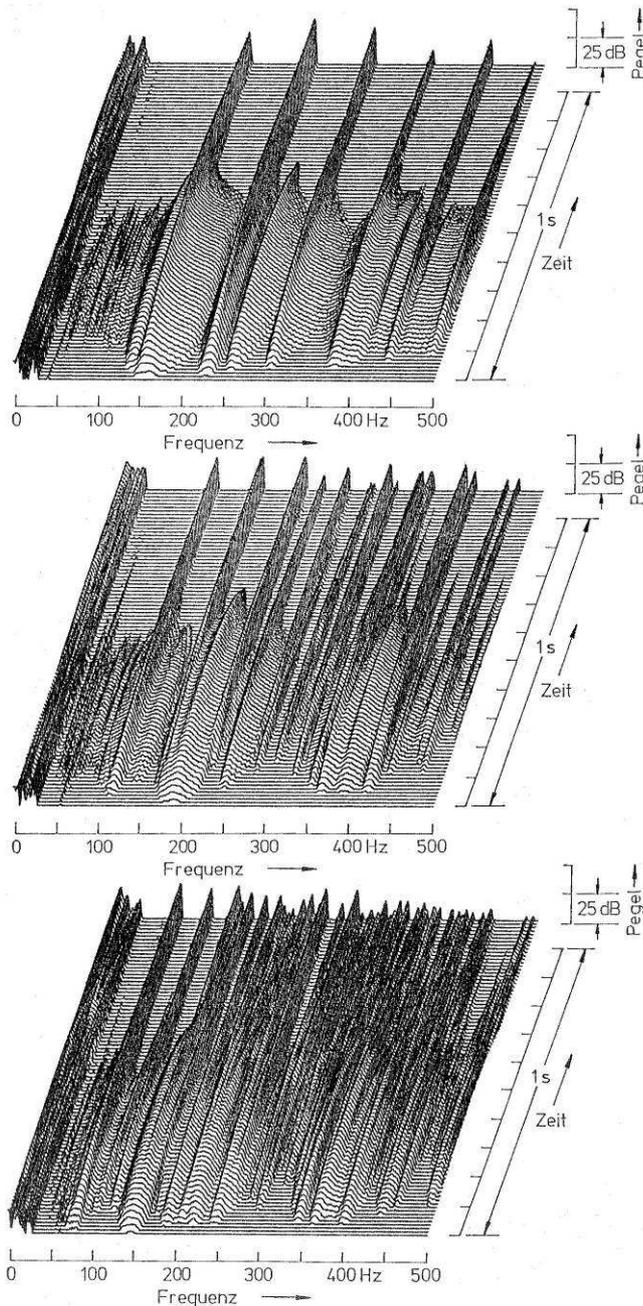


Abb. 4.10. Schallsignale der großen Kolberg-Pauke mit Kessel A und Kunstfell: Schallpegel (nach oben) als Funktion der Frequenz (bis 500 Hz nach rechts) und der Zeit (bis 1 s nach hinten); Stimmung d (oben), A (Mitte) und D (unten).

Die neue Art Darstellung der Analyseergebnisse erlaubt es, solche Teiltöne besser zu erkennen, die nur unmittelbar nach dem Anschlag existieren und dann zum Teil äußerst rasch abklingen. So lässt sich mit Abb. 4.10 beispielsweise für die große Pauke, in der sich der Kessel A (142 l) befand, der 01-Ton finden und verfolgen. Dieser liegt bei der hohen Stimmung d unterhalb des Haupttones, der von der 11-Schwingung herrührt. Wenn das Fell umgestimmt

wird, dann verschiebt sich die Lage des 01-Tones relativ zu den übrigen Teiltönen. Je tiefer das Fell gestimmt wird, desto weiter wandert der 01-Ton im Spektrum nach rechts. In der mittleren Stimmung A ist er nicht zu identifizieren, da er mit dem Hauptton praktisch verschmilzt. Dies war auch Abb. 4.7 in stärkerer Vergrößerung zu entnehmen. Im unteren Diagramm (tiefe Stimmung D) von Abb. 4.10 ist der 01-Ton wieder zu erkennen; er liegt nun zwischen dem Hauptton und der Quinte.

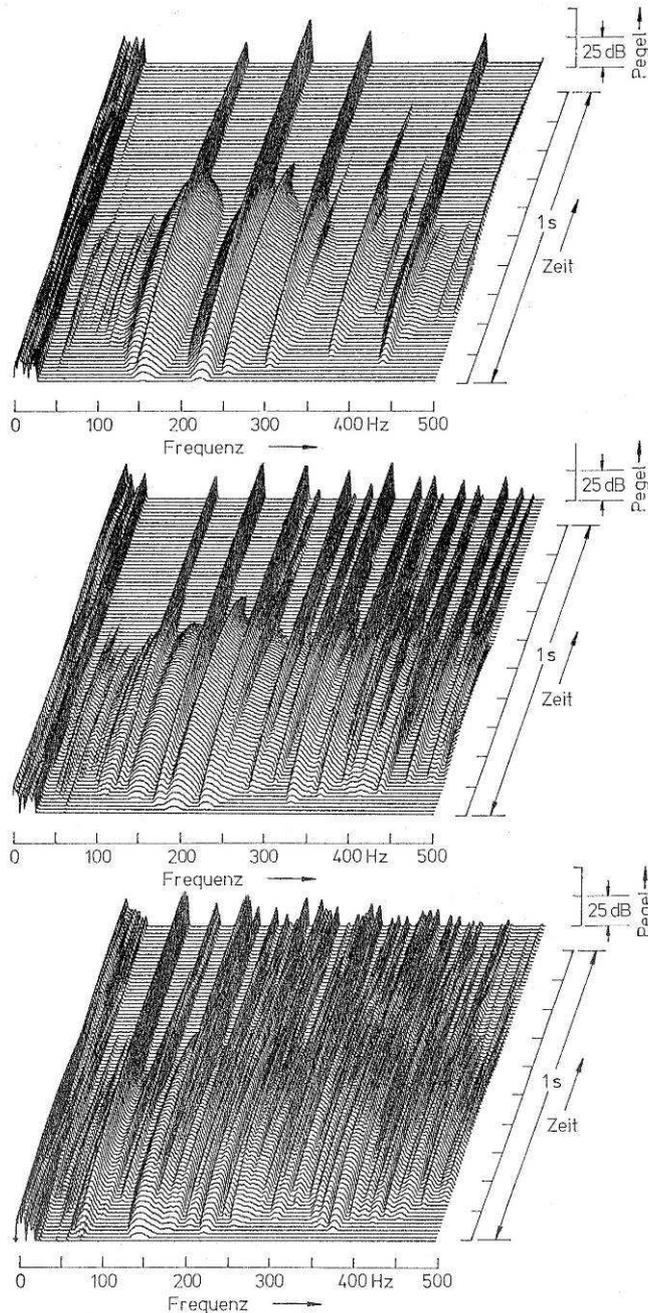


Abb. 4.11. Schallsignale der großen Kolberg-Pauke mit Kessel B und Kunstfell: Schallpegel (nach oben) als Funktion der Frequenz (bis 500 Hz nach rechts) und der Zeit (bis 1 s nach hinten); Stimmung d (oben), A (Mitte) und D (unten).

Abb. 4.11 bezieht sich auf die Klänge der Pauke, in die nun der Kessel B (143 l) eingesetzt war. Die Skalen für Pegel (50 dB), Frequenz (bis 500 Hz) und Zeit (0 s bis 1 s) stimmen mit denen der vorherigen Abbildung überein. Wiederum ist bei der tiefen Stimmung D eine sehr große Anzahl von Teiltönen zu erkennen, die zu Beginn des Paukenschalles vorliegen. Im mittleren Diagramm für die Stimmung A, das identisch mit Abb. 4.8 ist, ist der 01-Ton nicht auffindbar. Im oberen Diagramm für die hohe Stimmung d zeigt er sich dagegen als tiefster Teilton.

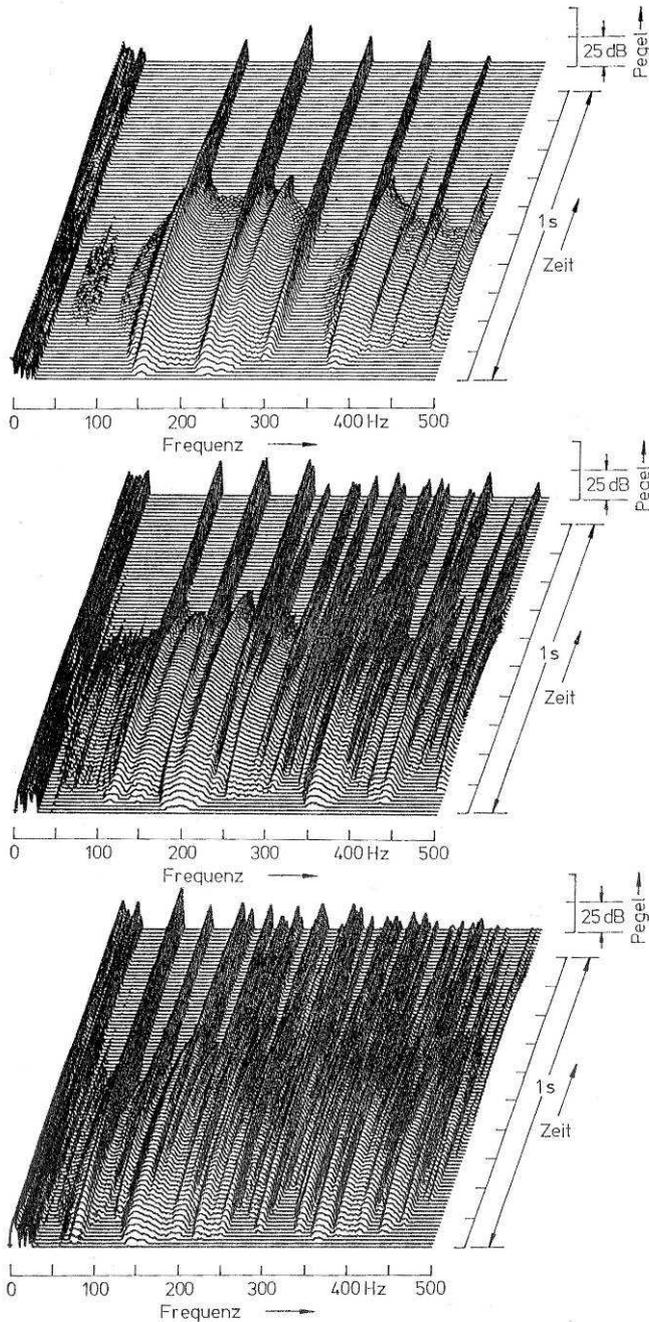


Abb. 4.12. Schallsignale der großen Kolberg-Pauke mit Kessel C und Kunstfell: Schallpegel (nach oben) als Funktion der Frequenz (bis 500 Hz nach rechts) und der Zeit (bis 1 s nach hinten); Stimmung d (oben), A (Mitte) und D (unten).

Die Diagramme von Abb. 4.12 gehen auf Messungen an der Pauke zurück, in die der flache Kessel C (133 l) eingebaut ist. Auch in dieser Zusammenstellung zeigen sich Unterschiede im Vergleich zu den beiden vorhergehenden. Jedoch geht die Auflösung der betrachteten Diagramme offenbar nicht so weit, dass eine Systematik erkennbar wäre, die direkt den Kesseln zugeordnet werden kann.

Sowohl die Bilder des Paukenklanges in Abschnitt 4.1 wie auch die des Paukenschlages im vorliegenden Abschnitt 4.2. erweisen sich als instruktiv. Sie vermitteln einen visuell ansprechenden Eindruck vom raschen Aufbau vieler Schallkomponenten und dem langsamen Abklingen der klangbildenden Teiltöne. Der Vollständigkeit halber sollen im folgenden Kapitel noch weitere Wasserfalldiagramme präsentiert werden, die an anderen Pauken und auch mit einem Naturfell anstelle des Kunstfelles gemessen wurden.

### 4.3. Zusammenfassende Bemerkung

Werden einzelne Pegel-Frequenz-Spektren zu Wasserfalldiagrammen zusammen gefügt, so erhält man anschauliche Bilder vom „Aufstieg und Fall“ des Paukenschalles. In einer Darstellung, die durch Hinzufügen der Zeitachse dreidimensional geworden ist, lässt sich verfolgen, wie die einzelnen Schallanteile sich im Lauf der Zeit entwickeln. Abb. 4.13 demonstriert noch einmal, dass zahlreiche dieser Komponenten äußerst kurzlebig sind und praktisch ebenso rasch verschwinden, wie sie entstanden sind. Sie zu erkennen und den „Paukenschlag“ zu analysieren, gelingt gut mit den Kurzzeitdiagrammen. Einige Teiltöne stehen jedoch relativ lang. Sie definieren den tonalen Anteil des Paukenschalles, den „Paukenklang“, und stellen sich deutlicher in den Langzeitdiagrammen dar.

Die Intervalle der klangbildenden Teiltöne (nicht jedoch das Ausschwingen!) erweisen sich als weitgehend unabhängig von der Stimmung des Felles. Eine prominente Ausnahme macht der 01-Ton, dessen Frequenzlage am besten den Kurzzeitdiagrammen entnommen werden kann. Wie sich diese Lage im Spektrum mit der Stimmung verändert, kann aus den Zusammenstellungen mehrerer Kurzzeitdiagramme ersehen werden: Bei tiefer Stimmung liegt der 01-Ton oberhalb und bei hoher Stimmung unterhalb des Haupttones. Auf diese Beobachtung wird in späteren Kapiteln noch ausführlich eingegangen.

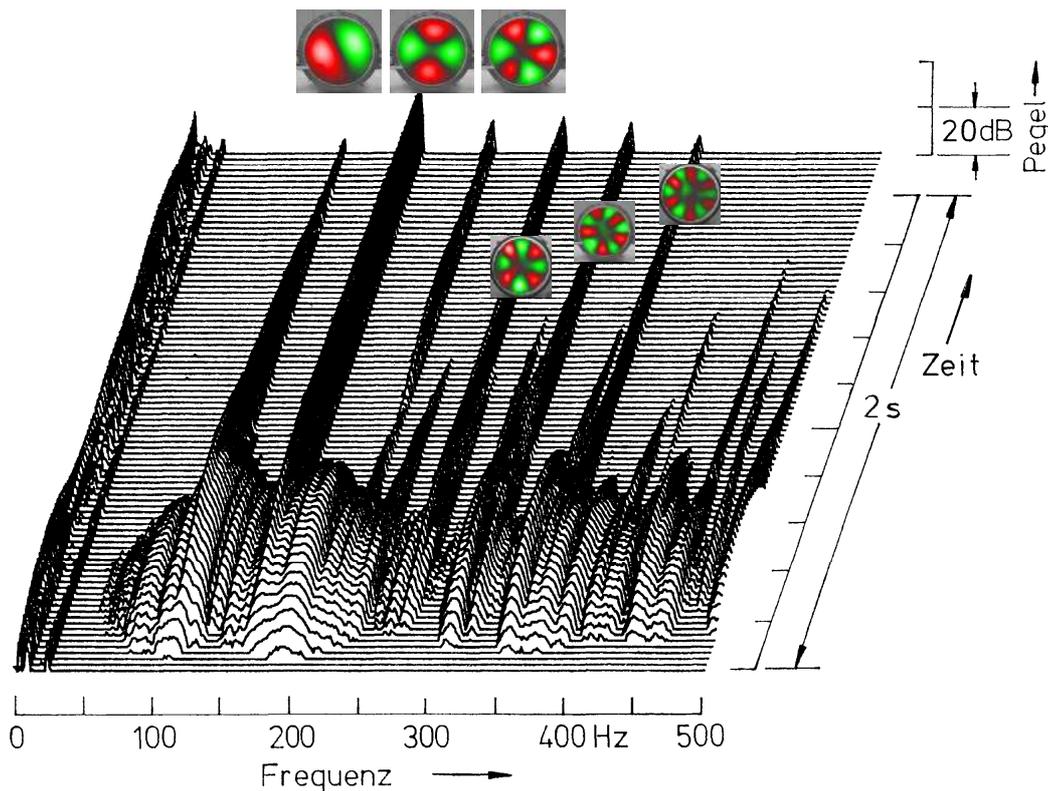


Abb. 4.13. Wasserfalldiagramm (Schallpegel über der Frequenz bis 500 Hz und der Zeit bis 2 s) der großen Kolberg-Pauke mit Kunstfell und Kessel B in der Stimmung A (Hauptton 110 Hz). Die Schwingungsbilder klangbildender Teiltöne sind eingefügt.

Abb. 4.13 enthält Vibrometer-Bilder der Fellschwingungen, welche die entsprechenden Teiltöne hervorrufen; vgl. Fleischer (2005). Im untersuchten Frequenzbereich halten sechs Schallkomponenten so lang an, dass sie als tonal angesehen werden können. Die Schwingungsbilder der wichtigsten klangbildenden Teiltöne sind groß am oberen Bildrand eingefügt. Sie stehen

für diejenigen Schwingungen mit einem Knotenkreis am Rand, welche sich bei der gehörbezogenen Analyse als besonders bedeutsam erwiesen haben. Es ist dies vor allem der Hauptton, hervorgerufen von der Mode mit einem Knotendurchmesser. Daneben spielen die Quinte (mit zwei Knotendurchmessern) und die Oktave (mit drei Knotendurchmessern) weitere tragende Rollen. Diese drei Teiltöne werden bei allen nachfolgenden Untersuchungen im Mittelpunkt des Interesses stehen. Die übrigen Teiltöne, die auf die (verkleinert eingefügten) antisymmetrischen Schwingungen zurückgehen, werden höchstens am Rande betrachtet werden. Die Darstellung als Wasserfalldiagramm mit der gewählten Auflösung erweist sich zwar als wenig geeignet, solche Unterschiede sichtbar zu machen, die auf den Kessel zurück gehen. Da sie jedoch das Verständnis vom zeitabhängigen spektralen Aufbau eines Paukenschalles fördert, sind der Vollständigkeit halber im folgenden Kapitel noch einige weitere Ergebnisse zusammen gestellt.

## 5. WASSERFALLDIAGRAMME VERSCHIEDENER PAUKEN

Im Vorangegangenen hatte sich herausgeschält, welche Art von Wasserfalldiagramm gut geeignet ist, den perkussiven Anteil – den Paukenschlag – bzw. den tonalen Anteil – den Paukenklang – des Schallsignals einer Pauke anschaulich zu machen. Im vorliegenden Kapitel sind einige Ergebnisse von entsprechenden Reihenuntersuchungen zusammen gestellt. Sie beziehen sich ausschließlich auf Instrumente der Größe Nr. 2 im Vierersatz, die sich jedoch unter anderem im Kessel und der Bespannung unterschieden.

### 5.1. Große Kolberg-Pauke mit Kessel A und Kunstfell

In die Pauke war der tiefe Kessel A mit den Volumen 142 l eingehängt (vgl. Tab. I) und - wie im vorhergehenden Kapitel - das Kunstfell *Remo Weather King Timpani* aus Mylar aufgespannt. Der Visualisierung des Paukenschlages dienen Kurzzeitdiagramme (5.1.1), zur Visualisierung des Paukenklanges werden Langzeitdiagramme (5.1.2) herangezogen.

#### 5.1.1. Analyse des Paukenschlages

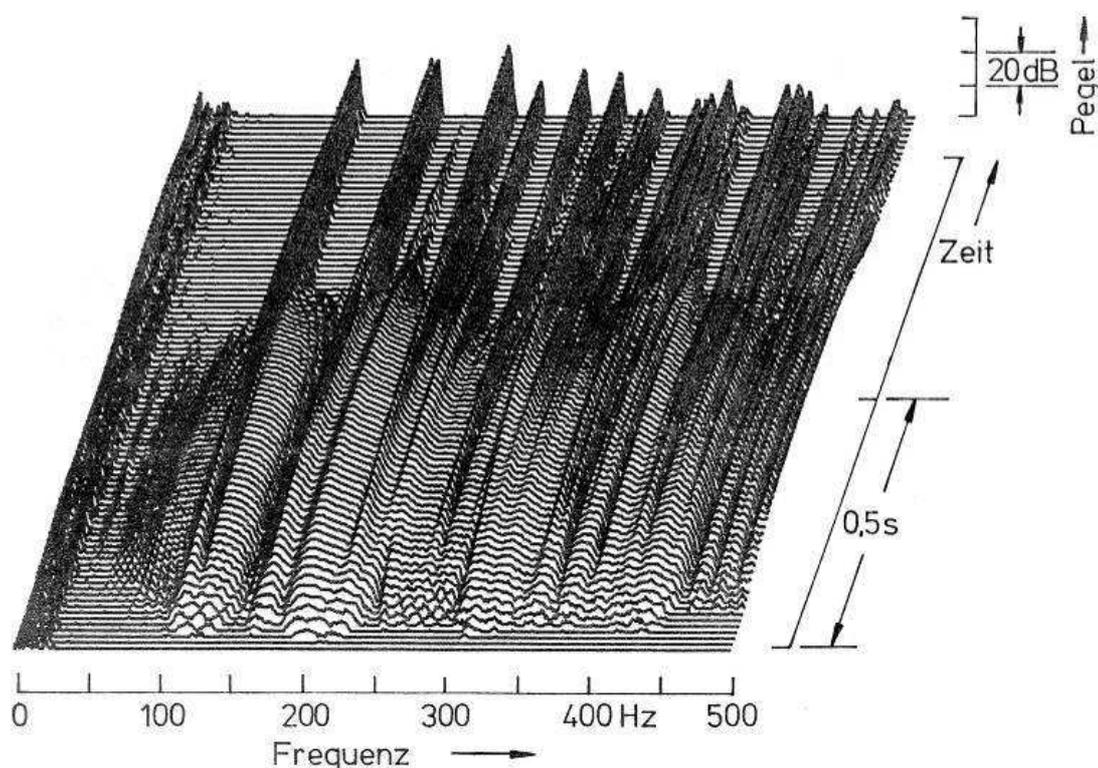
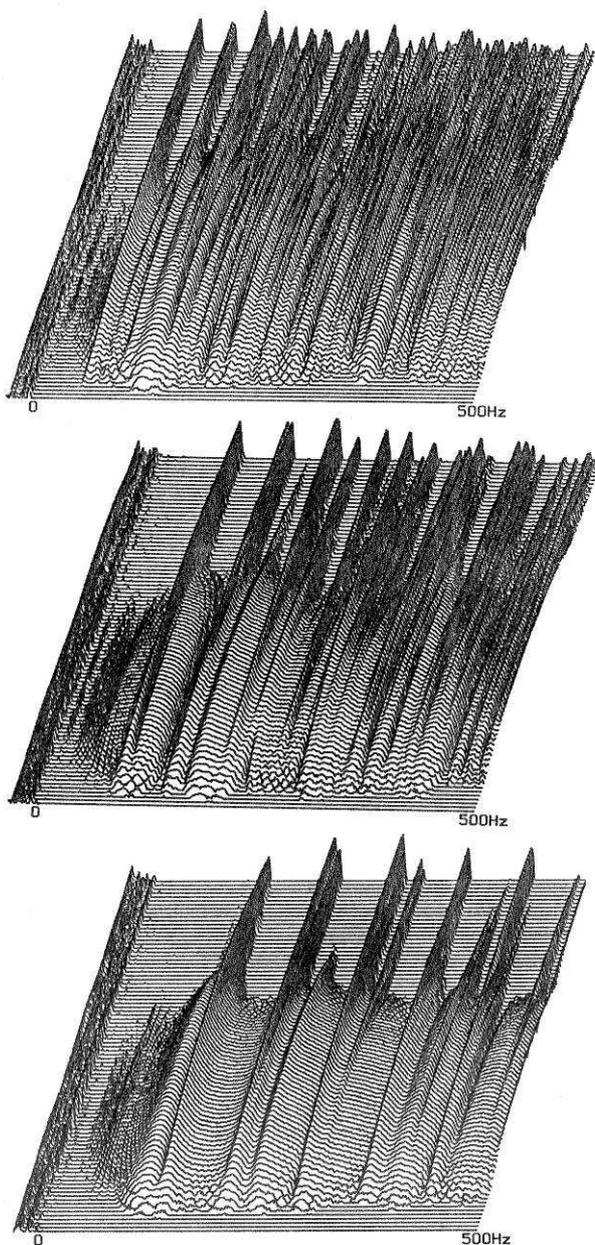


Abb. 5.1. Schallsignal der großen Kolberg-Pauke mit Kessel A und Kunstfell in Stimmung A, gemessen im reflexionsarmen Raum: Schallpegel (nach oben) als Funktion der Frequenz (0 Hz bis 500 Hz nach rechts) und der Zeit (0 s bis 1 s nach hinten).

Bei den folgenden Zusammenstellungen von jeweils drei Diagrammen für die Stimmungen D, A und d sind die Zeit- und die Pegelachse nicht beschriftet. Zur Orientierung ist deshalb Abb. 5.1 vorgeschaltet. Es kann entnommen werden, wie die Achsen der übrigen Kurzzeitdiagramm-

me in diesem Kapitel skaliert sind. Abb. 5.1 entspricht dem mittleren Diagramm von Abb. 5.2. Der Pegel wird üblicherweise in einer Spanne von 60 dB dargestellt.

Die Zusammenstellung von Abb. 5.2 geht auf Messungen in reflexionsarmer Umgebung zurück. Sie verdeutlicht die Unterschiede, die aus der geänderten Vorspannung des Felles resultieren. Bei tiefer Stimmung D (Hauptton 73 Hz, oben) ist unmittelbar nach dem Anschlag ein dicht belegtes Spektrum zu erkennen, das sehr viele Anteile enthält. Je höher das Fell gestimmt wird, desto weiter rücken die Spektralkomponenten auseinander und desto klarer werden Details erkennbar. So sind bei hoher Stimmung d (unten, Hauptton 147 Hz) alle Komponenten deutlich voneinander zu unterscheiden.



*Abb. 5.2. Schallsignale der großen Kolberg-Pauke mit Kessel A und Kunstfell im reflexionsarmen Raum: Schallpegel (nach oben) als Funktion der Frequenz (0 Hz bis 500 Hz nach rechts) und der Zeit (0 s bis 1 s nach hinten); Stimmung D (oben), A (Mitte) und d (unten).*

### 5.1.2. Analyse des Paukenklanges

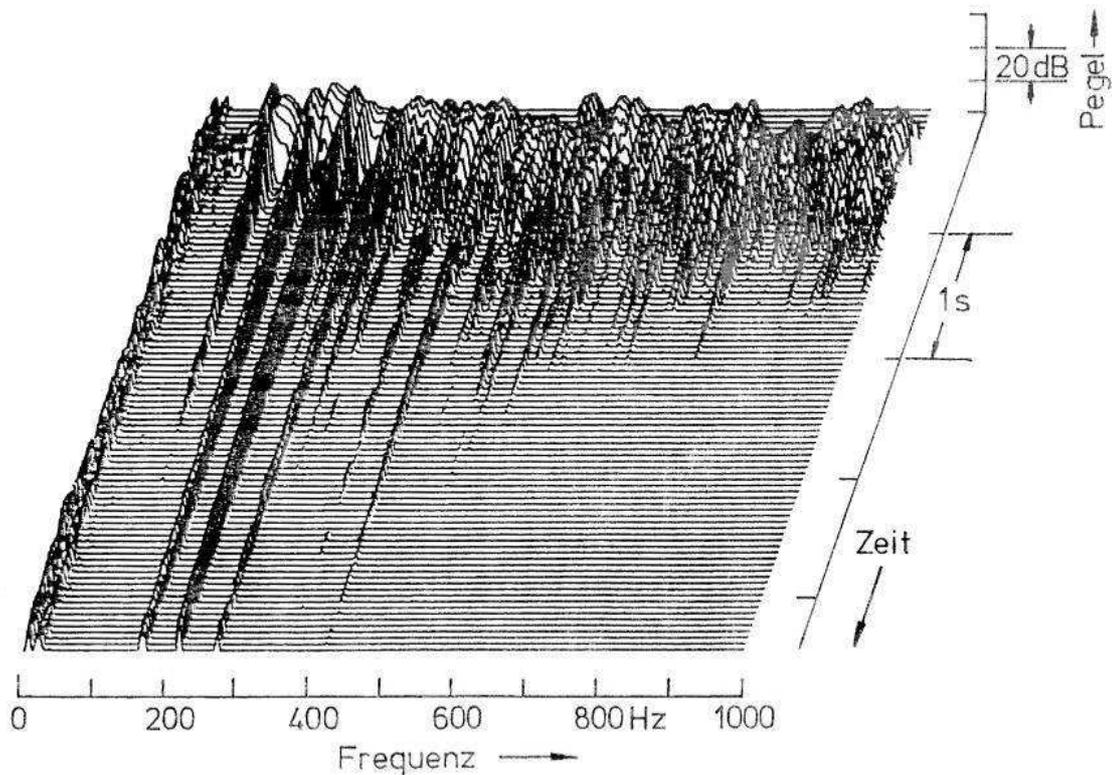
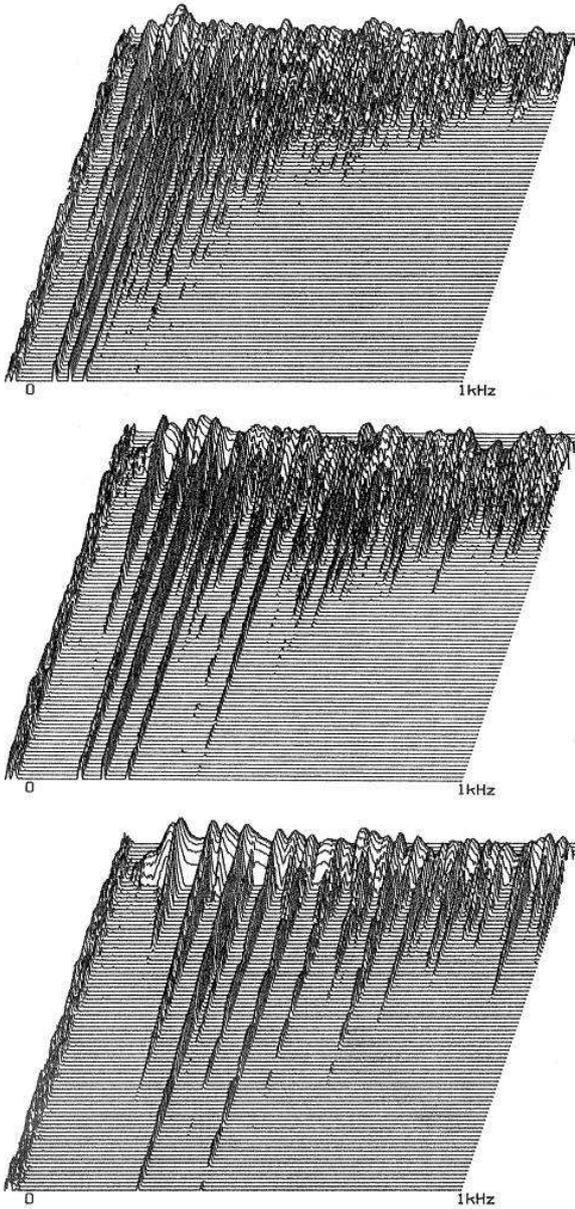


Abb. 5.3. Schallsignal der großen Kolberg-Pauke mit Kessel A und Kunstfell in Stimmung A, gemessen im reflexionsarmen Raum: Schallpegel (nach oben) als Funktion der Frequenz (0 Hz bis 1kHz nach rechts) und der Zeit (0 s bis 4,5 s nach vorn).

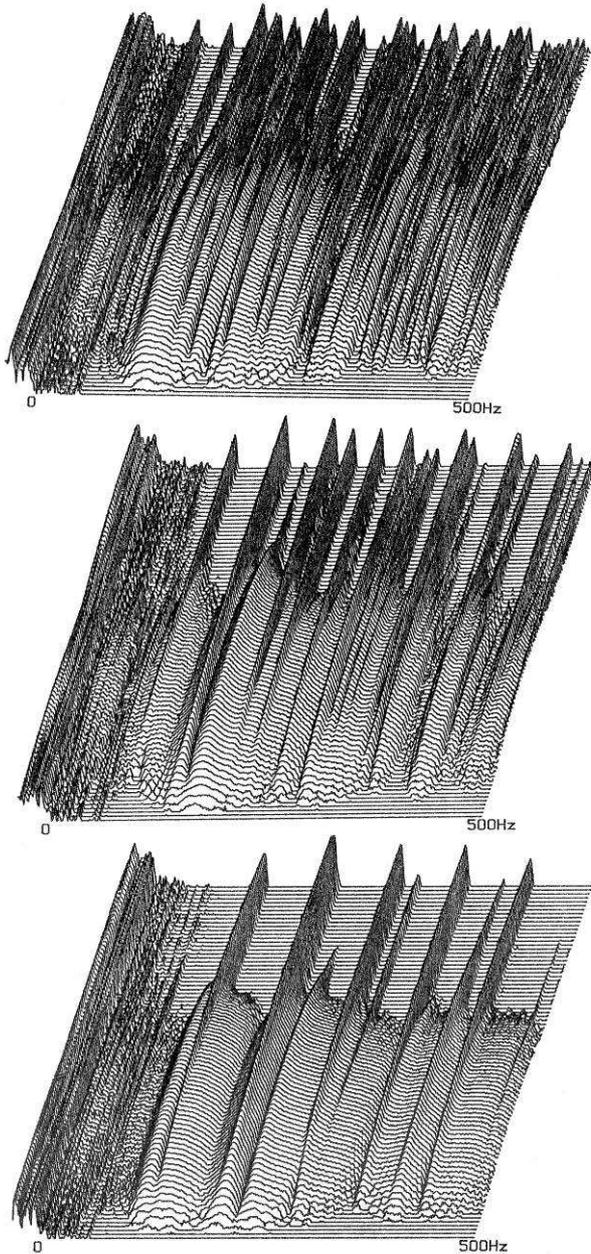
Da auch an diesen Diagrammen für die drei Stimmungen D, A und d die Achsen für die Zeit und den Pegel nicht beschriftet sind, ist Abb. 5.3 vorgeschaltet. Sie dient der Orientierung und zeigt, wie die übrigen Langzeitdiagramme in diesem Kapitel skaliert sind. Abb. 5.3 bezieht sich auf die Stimmung A und gibt den Sachverhalt des mittleren Diagramms von Abb. 5.4 wieder. Auch hier war der Pegelbereich 60 dB.

Bei tiefer Stimmung D (Hauptton 73 Hz, oben) und mittlerer Stimmung A (110 Hz, Mitte) sind vier Sekunden nach dem Anschlag noch drei Teiltöne nachweisbar. Der Vergleich mit dem unteren Diagramm (d, Hauptton 147 Hz) zeigt, dass bei hoch gestimmtem Fell die Töne in aller Regel rascher abklingen und daher weniger lang stehen. Unterschiede zwischen hoher und tiefer Stimmung zeigen sich demnach nicht nur in Hinsicht auf die Frequenzen der Teiltöne, sondern ganz eklatant auch beim Ausschwingen.



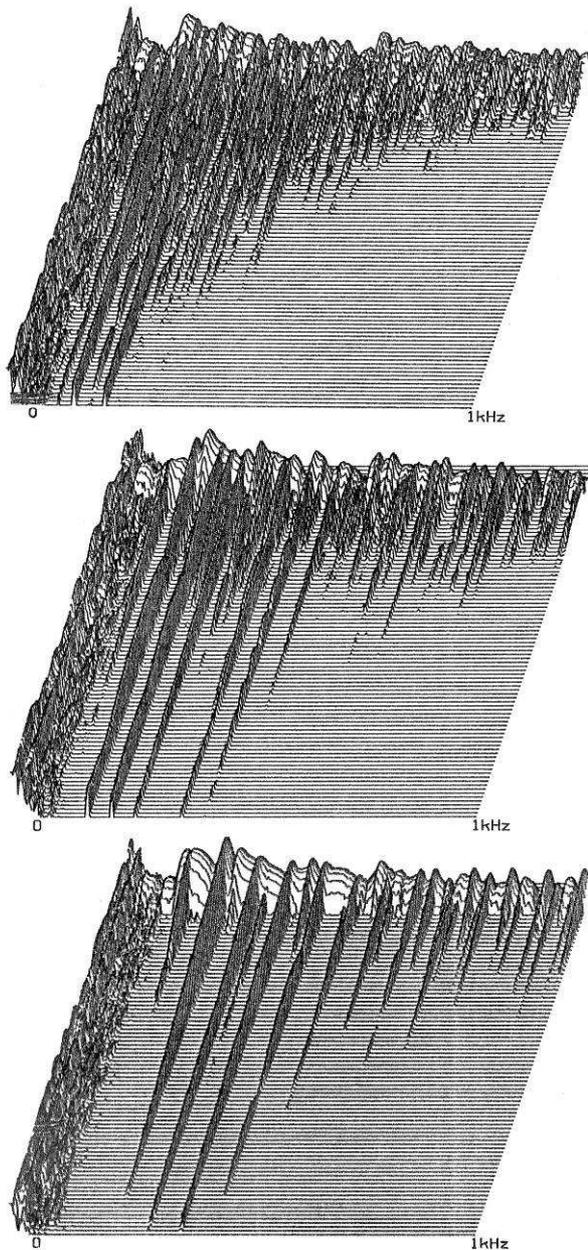
*Abb. 5.4. Schallsignale der großen Kolberg-Pauke mit Kessel A und Kunstfell im reflexionsarmen Raum: Schallpegel (nach oben) als Funktion der Frequenz (0 Hz bis 1 kHz nach rechts) und der Zeit (0 s bis 4 s nach vorn); Stimmung D (oben), A (Mitte) und d (unten).*

## 5.2. Große Kolberg-Pauke mit Kessel A und Naturfell



*Abb. 5.5. Schallsignale der großen Kolberg-Pauke mit Kessel A und Naturfell in halliger Umgebung: Schallpegel (nach oben) als Funktion der Frequenz (0 Hz bis 500 Hz nach rechts) und der Zeit (0 s bis 1 s nach hinten); Stimmung D (oben), A (Mitte) und d (unten).*

Die Ergebnisse von Abb. 5.5 und die weiteren gehen auf Messungen in normalen Labor- oder Werkstattträumen zurück. Abb. 5.5 zeigt ein Beispiel für die im Institut befindliche Kolberg-Pauke mit Kessel A, auf die nun nicht mehr das künstliche Fell (vgl. hierzu Kapitel 4), sondern ein Kalbfell *Kalfo Super Timpani* aufgezogen war. Die Achsen sind wie in Abb. 5.1 geteilt. Probeweise wurde jedoch der Pegelbereich auf 70 dB vergrößert. Das hat zur Folge, dass Umgebungsgeräusche, insbesondere diejenigen der Klimaanlage, bei tiefen Frequenzen deutlich erkennbar werden und die Auswertung insbesondere bei tiefer Stimmung erschweren. Ein Vergleich mit Abb. 5.2 für das andere Fell zeigt im Detail Unterschiede, die jedoch wiederum keine allgemeine Systematik erkennen lassen.



*Abb. 5.6. Schallsignale der großen Kolberg-Pauke mit Kessel A und Naturfell in halliger Umgebung: Schallpegel (nach oben) als Funktion der Frequenz (0 Hz bis 1 kHz nach rechts) und der Zeit (0 s bis 4 s nach vorn); Stimmung D (oben), A (Mitte) und d (unten).*

Die Ergebnisse von Abb. 5.6 für dieselbe Kolberg-Pauke visualisieren den Paukenklang aus geänderter Perspektive. Die Achsen entsprechen denen von Abb. 5.3, jedoch mit 70 dB als Pegelbereich. Wiederum zeigt sich die Tendenz, dass Höherstimmen das Abklingen der Teiltöne beschleunigt. Während die klangbildenden Teiltöne bei der tief gestimmten Pauke länger als vier Sekunden lang sichtbar – und auch hörbar – sind, erweist sich der Paukenklang als umso kürzer, je höher das Fell gestimmt wird.

### 5.3. Große Kolberg-Pauke (Uhingen) mit flachem Kessel

Die Ergebnisse der folgenden Abschnitte beziehen sich auf Messungen in den Werkstattträumen der Firma Kolberg Percussion in Uhingen. Um die tieffrequenten Störgeräusche, die sich in solch einer Umgebung nicht vermeiden lassen, nicht allzu groß darzustellen, wurde der Pegelbereich auf 50 dB verringert. Ansonsten sind die Achsen so unterteilt, wie es Abb. 5.1 zu entnehmen ist. Abb. 5.7 zeigt ein Kurzzeitdiagramm für eine Kolberg-Pauke von einem ähnlichen Typ wie diejenige, die sich im Institut befand. Die Pauke war mit einem extrem flachen Kessel versehen.

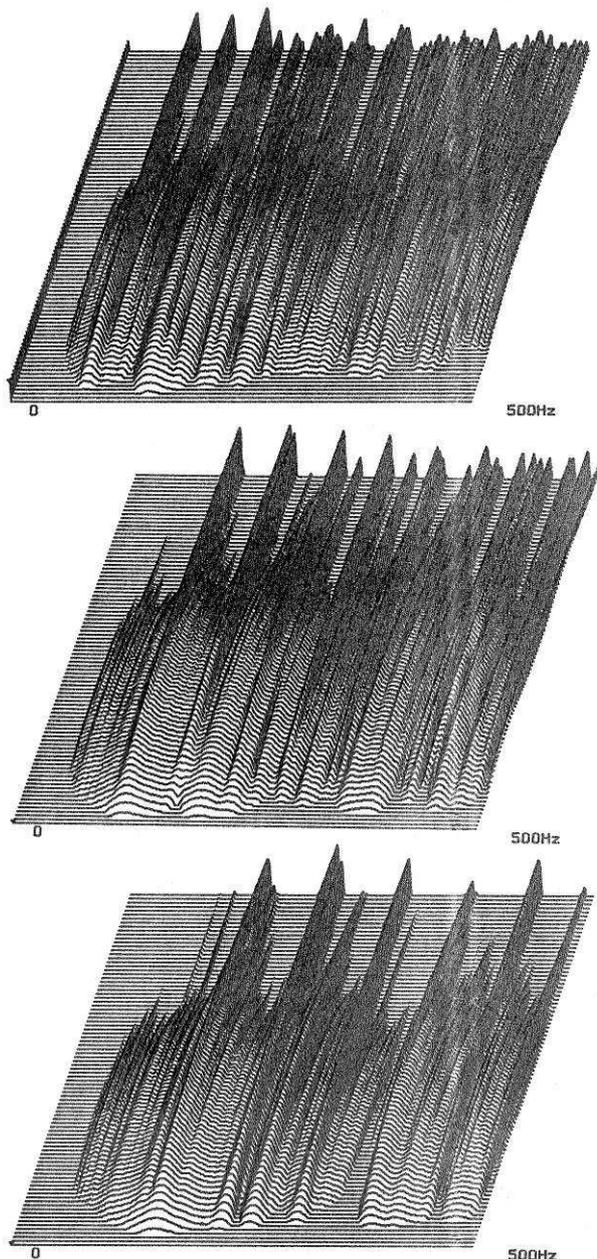


Abb. 5.7. Schallsignale einer großen Kolberg-Pauke mit flachem Kessel und Kunstfell in der Uhinger Werkstatt: Schallpegel (nach oben) als Funktion der Frequenz (0 Hz bis 500 Hz nach rechts) und der Zeit (0 s bis 1 s nach hinten); Stimmung D (oben), A (Mitte) und d (unten).

Mit dieser Messung wurde überprüft, ob der Paukenschlag auf einem anderen Instrument zu deutlich anderen Wasserfalldiagrammen führt. Dies ist offensichtlich nicht der Fall. Die schwachen tonalen Anteile um 100 Hz, die sich beispielsweise im unteren Diagramm zeigen, könnten die Folge elektromagnetischer Einstreuungen sein oder auf das Mitschwingen von Gegenständen zurückgehen, die sich in der Werkstatt befanden. Sie haben keinen Bezug zum

untersuchten Instrument. Auch hier zeigen sich gewisse Diskrepanzen zu vergleichbaren Ergebnissen wie etwa denen von Abb. 5.2. Jedoch lassen sich keine systematischen Unterschiede gegenüber den Resultaten erkennen, die bei den Messungen im eigenen Labor gewonnen wurden.

#### 5.4. Große Kolberg-Pauke (Uhingen) mit tiefem Kessel

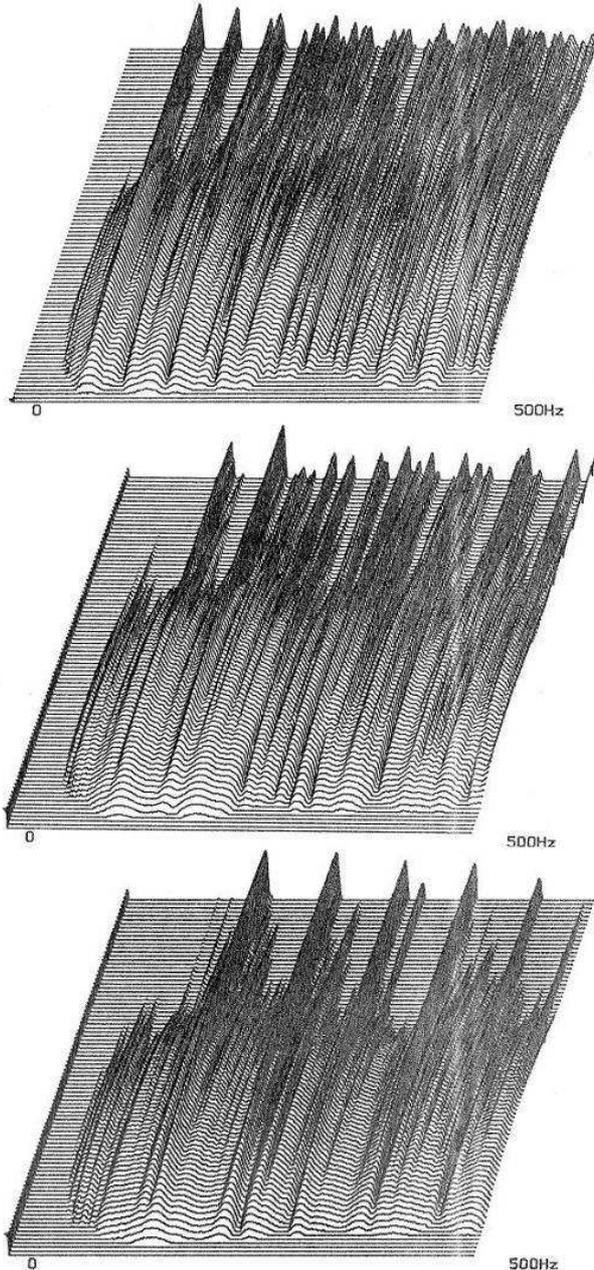
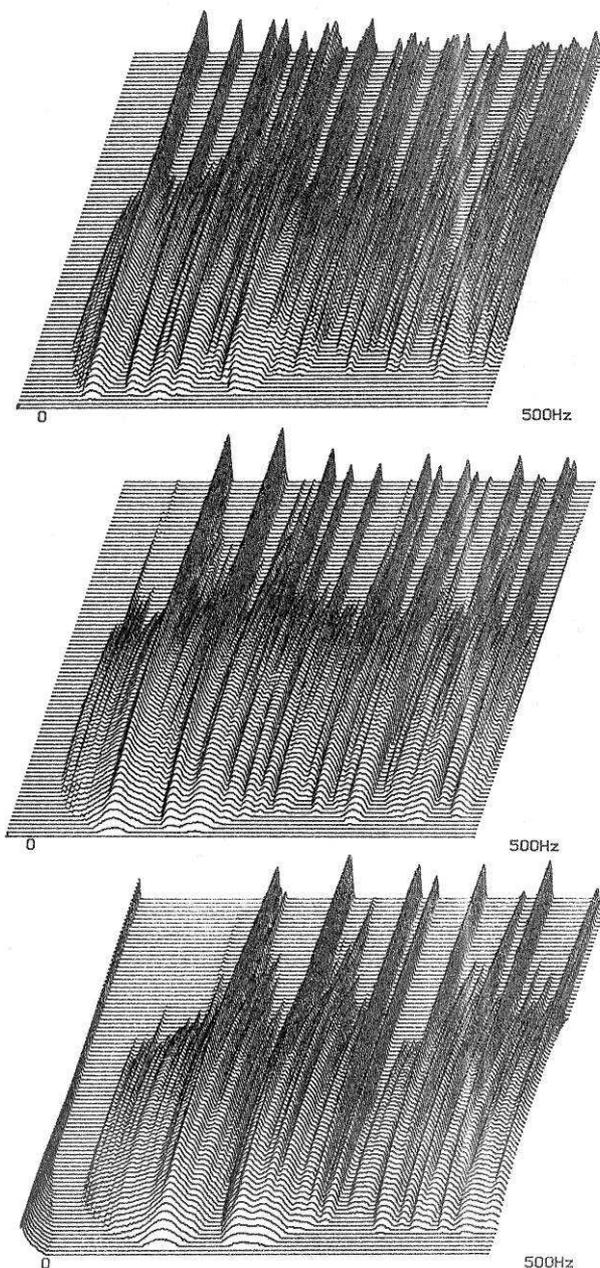


Abb. 5.8. Schallsignale einer großen Kolberg-Pauke mit tiefem Kessel und Kunstfell in der Uhinger Werkstatt: Schallpegel (nach oben) als Funktion der Frequenz (0 Hz bis 500 Hz nach rechts) und der Zeit (0 s bis 1 s nach hinten); Stimmung D (oben), A (Mitte) und d (unten).

Auch die Messung, die zu Abb. 5.8 führt, fand in den Werkstatträumen der Firma Kolberg statt. Das Kurzzeitdiagramm repräsentiert den Paukenschlag. Der dargestellte Pegelbereich ist 50 dB. Im Übrigen sind die Achsen in der Weise unterteilt, wie sie Abb. 5.1 zu entnehmen ist. Es liegen Messungen an einer Kolberg-Pauke zugrunde, die mit einem sehr tiefen Kessel versehen war. Gegenüber vergleichbaren Resultaten zeigen sich auch hier kleinere Unterschiede, jedoch keine systematischen Diskrepanzen.

## 5.5. Große Ringer-Pauke (Uhingen)



*Abb. 5.9. Schallsignale einer großen Ringer-Pauke mit Kunstfell in der Uhinger Werkstatt: Schallpegel (nach oben) als Funktion der Frequenz (0 Hz bis 500 Hz nach rechts) und der Zeit (0 s bis 1 s nach hinten); Stimmung D (oben), A (Mitte) und d (unten).*

Das einzige Instrument dieser Messreihe, das nicht aus der Fertigung der Firma Kolberg Percussion stammt, war eine Pauke Nr. 2 des Herstellers Ringer mit mittelgroßem Kupferkessel. Abb. 5.9 zeigt das Kurzzeitdiagramm. Die Achsen sind wie in Abb. 5.1 unterteilt mit der einen Abweichung, dass der Pegelbereich auf 50 dB verringert ist. Wie auch bei den übrigen Untersuchungen anhand von Wasserfalldiagrammen sind Unterschiede zwischen den Paukenschlägen abzulesen. In Hinsicht auf die verschiedenen Instrumente wird jedoch keine Systematik erkennbar.

## 5.6. Zusammenfassende Bemerkung

In diesem Kapitel sind Wasserfalldiagramme zusammen gestellt, wie sie sich für die Stimmungen D, A und d ergaben, wenn das Fell an der Normalstelle mit einem geeigneten Filzschlegel angeschlagen wurde. Zwei Perspektiven wurden gewählt, um den perkussiven Anfang („Paukenschlag“) bzw. den tonalen Teil („Paukenklang“) vorteilhaft darzustellen. Für die Messungen standen in den Laboren des Instituts für Mechanik bzw. in den Werkstätten der Firma Kolberg mehrere Instrumente derselben Größe Nr. 2 zur Verfügung.

Ein Vergleich zeigt gewisse Unterschiede, die aber keine Systematik und keinen direkten Zusammenhang mit Eigenschaften des jeweiligen Instruments erkennen lassen. Diskrepanzen, die sich eventuell abzeichnen, könnten beispielsweise auf kleine Unterschiede beim Anschlag zurückgehen. Offenbar sind die untersuchten Pauken von vergleichbar hohem Niveau und damit von großer Ähnlichkeit. Auch wenn sich die gezeigten Wasserfalldiagramme nicht dafür eignen sollten, Unterschiede zwischen verschiedenen Instrumenten aufzudecken, so vermitteln sie doch ein plastisches Bild von der allgemeinen Struktur eines Paukenschalles. Der perkussive Teil mit einem sehr breiten Spektrum, der mit den gewählten Analyseparametern höchstens eine halbe Sekunde lang ist, lässt sich gut anhand der Kurzzeitdiagramme interpretieren. Daran schließt sich ein quasi-stationärer Teil an, der sich am besten in den Langzeitdiagrammen darstellt. In diesem Teil sind Teiltöne zu erkennen, die unterschiedlich lang nachklingen: Bei den klangbildenden Teiltönen sind Nachhallzeiten von mehreren Sekunden die Regel. Je tiefer eine Pauke gestimmt wird, desto länger stehen die Teiltöne im Allgemeinen.

Diese Teiltöne, die auch noch einige Zeit nach dem Anschlagen hörbar sind, haben sich bei der gehörbezogenen Analyse als besonders wichtig erwiesen. Es ist dies vor allem der Hauptton (Schwingung mit einem Knotendurchmesser), der die musikalische Tonhöhe bestimmt. Daneben spielen die Quinte (mit zwei Knotendurchmessern) und die Oktave (mit drei Knotendurchmessern) wichtige Rollen. Bei den weiteren Betrachtungen werden diese drei Teiltöne im Mittelpunkt stehen. Von den übrigen Teiltönen kommt erhöhte Aufmerksamkeit lediglich dem 01-Ton zu. Die Frequenzen und Intervalle dieser Teiltöne werden im Folgenden über den gesamten Stimmbereich einer Pauke verfolgt.

## 6. FREQUENZEN UND INTERVALLE DER TEILTÖNE

Nachdem feststeht, dass den tieffrequenten Teiltönen eine wesentliche Rolle zukommt, sollen im vorliegenden Kapitel für eine möglichst große Anzahl von Pauken zwei Fragenstellungen behandelt werden:

- Welche Intervalle weisen die klangbildenden Teiltöne Quinte und Oktave mit Bezug auf den Hauptton auf?
- Welche Frequenz hat der unerwünschte 01-Ton?

Die betrachteten Teiltöne wurden aus den Paukenklängen mit einem FFT-Analysator Ono Sokki CF 350 extrahiert. Bei der Mehrzahl der Untersuchungen betrug die Auflösung 1,25 Hz.

### 6.1. Die Frequenzlage des 01-Tones

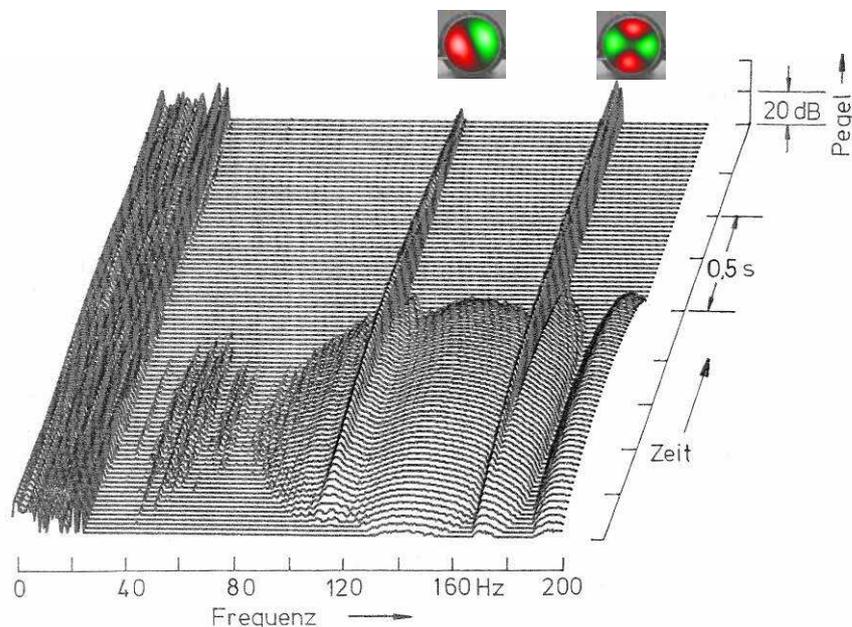


Abb. 6.1. Wasserfalldiagramm (Schallpegel über der Frequenz bis 200 Hz und der Zeit bis 2,25 s) der großen Kolberg-Pauke mit Naturfell und Kessel B in der Stimmung A (Hauptton 110 Hz). Schwingungsbilder des Haupttones und der Quinte sind eingefügt.

Die Abb. 6.1 bis 6.3 sollen demonstrieren, an welcher Stelle des Spektrums der 01-Ton lokalisiert ist. Die Frequenzachse reicht von 0 Hz bis 200 Hz. Die hohe Frequenzauflösung wird durch eine geringe Zeitauflösung erkauft. Der Zeitraum, über den das Signal verfolgt wird, beträgt 2,25 s.

In Abb. 6.1 ist die Stimmung auf die Note A betrachtet. Diese liegt in der Mitte des Stimmereiches und gibt dem Instrument Nr. 2 die Bezeichnung „A-Pauke“. Der tiefste Teilton ist der Hauptton mit der Frequenz 110 Hz; als weiterer starker Teilton zeigt sich die Quinte beim etwa Eineinhalbfachen dieser Frequenz. Der 01-Ton ist nicht zu erkennen. Dies hat seinen Grund darin, dass er nahezu die gleiche Frequenz wie der Hauptton besitzt und mit diesem verschmilzt.

Abb. 6.2 bezieht sich auf die tiefe Stimmung D (Frequenz des Haupttones 73 Hz). Es sind drei bis vier Teiltöne zu erkennen, die länger „stehen“. Daneben treten einige Komponenten auf,

die sehr rasch abklingen. Bei dem Teilton, der nun zwischen dem Hauptton und der Quinte zu erkennen ist, handelt es sich um den 01-Ton. Offenbar ist dessen Frequenz größer als die des Haupttones. Die Überlegungen von Kapitel 3 lassen erwarten, dass der 01-Ton vom Hauptton maskiert wird und deshalb nicht hörbar ist.

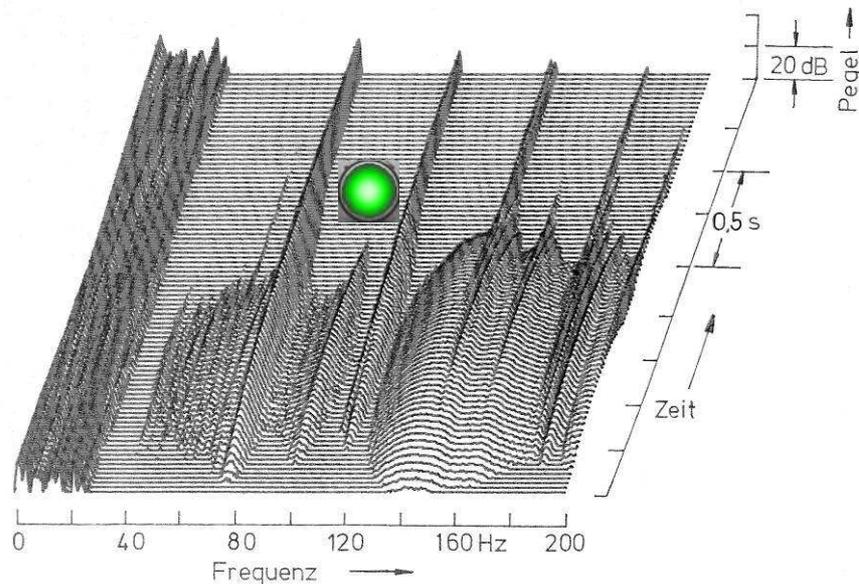


Abb. 6.2. Wasserfalldiagramm (Schallpegel über der Frequenz bis 200 Hz und der Zeit bis 2,25 s) der großen Kolberg-Pauke mit Naturfell und Kessel A in der Stimmung D (Hauptton 110 Hz). Das Schwingungsbild des 01-Tones ist eingefügt.

Abb. 6.3 entsteht, wenn das Fell auf die hohe Note d gestimmt ist und der Hauptton die Frequenz 147 Hz annimmt. Im dargestellten Bereich liegt als einzige klangbildende Komponente der Hauptton. Dieser klingt sehr schnell ab. Bei einer etwas tieferen Frequenz zeigt sich der 01-Ton. Der (in Frequenzrichtung) breite und (in Zeitrichtung) kurze „Bergrücken“ deutet auf große Dämpfung hin und zeigt, dass dieser Teilton nicht sehr lang anhält. Da er jedoch unterhalb des Haupttones liegt, ist die Vermutung begründet, dass er hörbar wird. Dies dürfte die Ursache dafür sein, dass Paukenspieler den Klang der Pauke in den hohen Lagen als „dumpf“ und „dunkel“ bezeichnen.

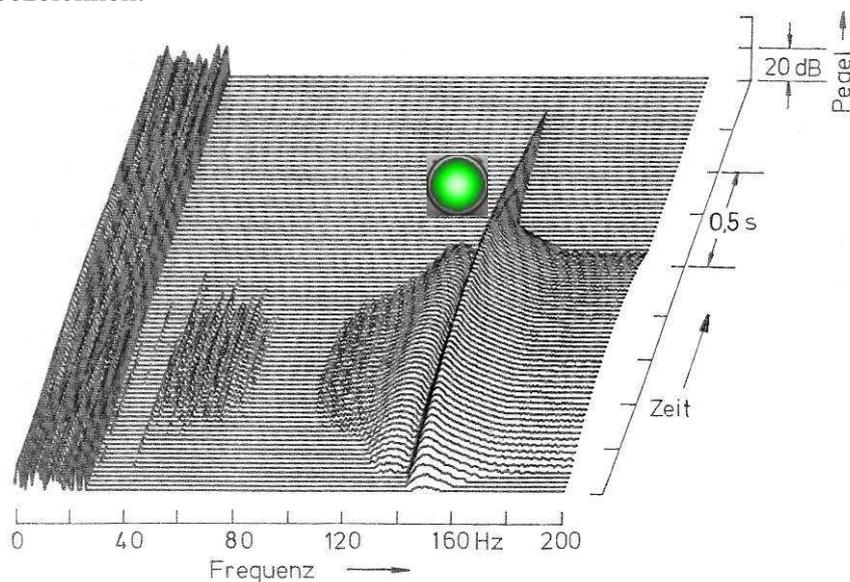


Abb. 6.3. Wasserfalldiagramm (Schallpegel über der Frequenz bis 200 Hz und der Zeit bis 2,25 s) der großen Kolberg-Pauke mit Naturfell und Kessel A in der Stimmung d (Hauptton 147 Hz). Das Schwingungsbild des 01-Tones ist eingefügt.

## 6.2. Die Frequenzen der klangbildenden Teiltöne

Bei den übrigen Teiltönen, die als klangbildend bezeichnet werden können, spielen die Intervalle eine große Rolle, in denen die Frequenzen zueinander stehen. Deshalb sind in den folgenden Diagrammen als Geraden die exakten Intervalle eingezeichnet. An der Abszisse, die im Stimmbereich der großen Pauke von 70 Hz bis 150 Hz bzw. 170 Hz reicht, ist die Frequenz des Haupttones aufgetragen. Die Ordinate ist entsprechend den Frequenzen der Teiltöne geteilt. Zu Orientierung sind zunächst die zugehörigen Schwingungsbilder eingefügt. Die Teiltöne sind durch unterschiedliche Symbole repräsentiert.

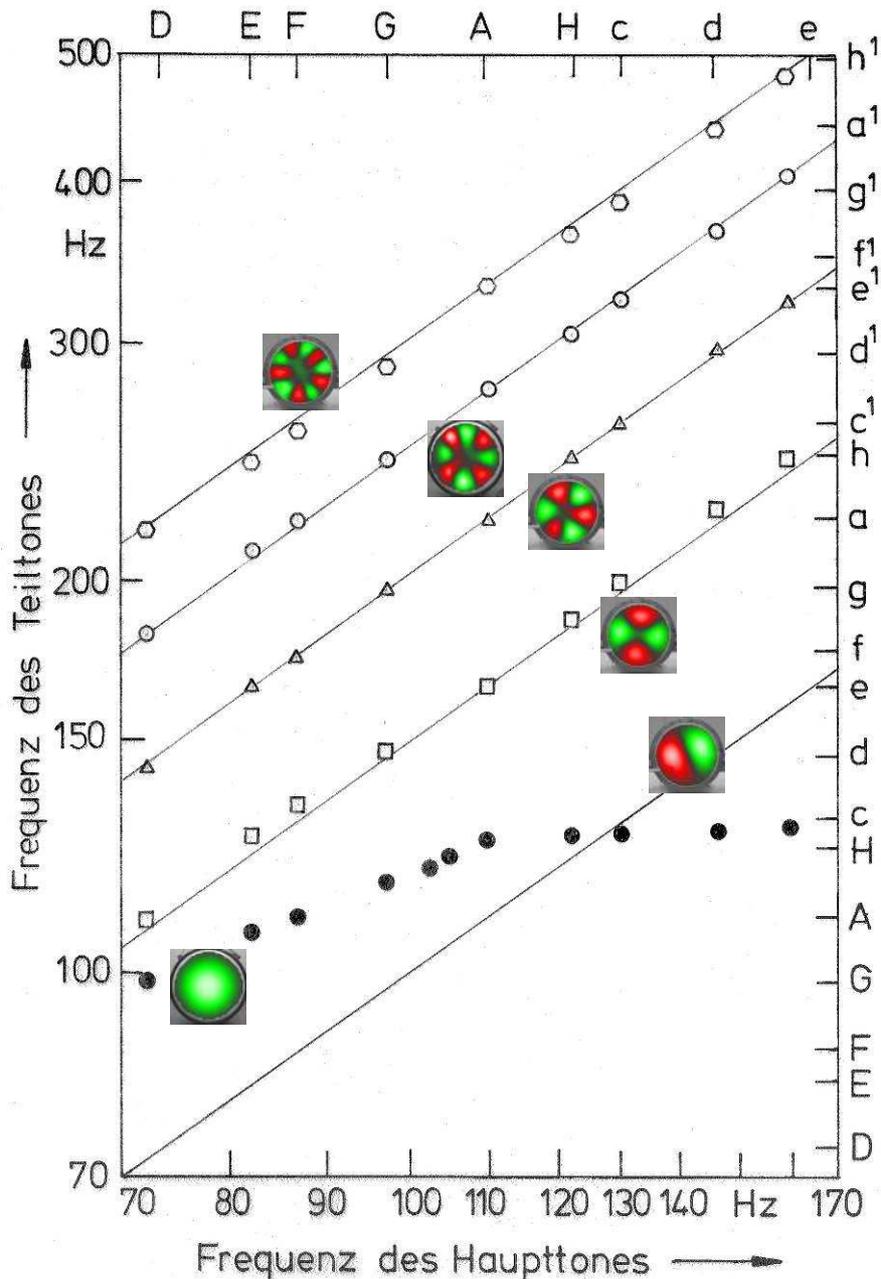


Abb. 6.4. Frequenzen der Teiltöne als Funktion der Frequenz  $f_{HT}$  des Haupttones im Stimmbereich der großen Pauke mit Kunstfell und Kessel C, teilweise gefüllt mit Bauschaum. Die Geraden stehen für Hauptton (unten) sowie reine Quint ( $1,5 f_{HT}$ ), Oktav ( $2 f_{HT}$ ), Dezim ( $2,5 f_{HT}$ ) und Duodezim ( $3 f_{HT}$ ). Die zugehörigen Schwingungsformen des Felles sind eingefügt.

Abb. 6.4 erfasst fünf klangbildende Teiltöne und den unharmonischen 01-Ton. Die exakten Harmonischen sind durch Geraden repräsentiert, die im doppelt-logarithmischen Maßstab parallel verlaufen. Die untere Gerade steht für den Hauptton (11-Mode), dessen Frequenz den Bezug darstellt. Die nächste Gerade entspricht der eineinhalbfachen Frequenz. Die Quadrate markieren die Messwerte für den entsprechenden Teilton Quinte, zu dem die 21-Fellschwingung gehört. Nach oben hin folgen Geraden für das Doppelte, Zweieinhalbfache bzw. Dreifache der Frequenz des Haupttones. Die Messwerte für die Teiltöne Oktave, Dezime bzw. Duodezime sind durch Dreiecke, Kreise bzw. Sechsecke gekennzeichnet. Um die Orientierung zu erleichtern, sind Vibrometer-Bilder (Fleischer 2005) der Fellschwingungen eingefügt, die den jeweiligen Teilton hervorrufen. Im gesamten Stimmbereich der großen Pauke liegen die Messwerte nahe bei den Geraden. Dies besagt, dass die tatsächlichen Werte den reinen Intervallen sehr nahe kommen.

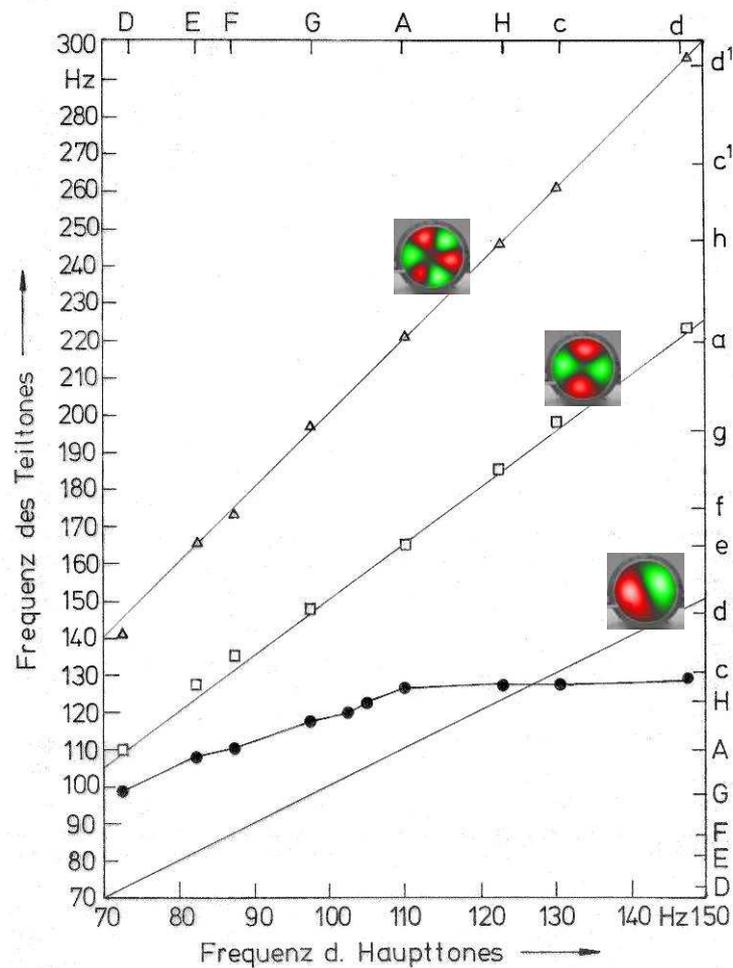


Abb. 6.5. Frequenzen der Quinte (Quadrate), Oktave (Dreiecke) und des 01-Tones (gefüllte Kreise) im Stimmbereich der großen Pauke mit Kunstfell und Kessel C, teilweise gefüllt mit Bauschaum als Funktion der Frequenz  $f_{HT}$  des Haupttones.

Die Geraden stehen für Hauptton (unten) sowie reine Quint ( $1,5 f_{HT}$ ) und Oktav ( $2 f_{HT}$ ).

Die Schwingungsformen der klangbildenden Teiltöne sind eingefügt.

Zwar klingt der 01-Ton sehr schnell ab, trotzdem ist nicht auszuschließen, dass er hörbar ist. In Abb. 6.4 sind die Messwerte als schwarz gefüllte Kreise eingezeichnet. In den tiefen Lagen liegt der 01-Ton über (Abb. 6.2) und in der mittleren Lage nahe dem Hauptton (Abb. 6.1). Er verschmilzt mit dem Hauptton oder wird von diesem maskiert, so dass er nicht zu hören ist. In den hohen Lagen ist seine Frequenz jedoch kleiner als die des Haupttones (Abb. 6.3). Es besteht dann die Gefahr, dass er sich – da unharmonisch – störend bemerkbar macht.

Als Beispiele für die Darstellungsweise, wie sie im Folgenden verwendet wird, sollen die beiden Abb. 6.5 und 6.6 dienen. Die große Kolberg-Pauke trägt den Kessel C, dessen Volumen für ein anderes Experiment mit Hilfe von Bauschaum verkleinert worden ist. Abb. 6.5 gilt für den Fall, dass das Mylar-Fell aufgezogen ist. Abb. 6.6 nimmt Bezug auf ein Experiment mit derselben Pauke, die nun mit einem Kalbfell bespannt war.

Im Weiteren sind die Achsen linear unterteilt. Es sind die drei Geraden eingezeichnet, die den wichtigsten klangbildenden Teiltönen Rechnung tragen. In Abb. 6.5 sind die Bilder der Fellschwingungen eingefügt, die den jeweiligen klangbildenden Teiltönen hervorrufen. Als Referenz dient wiederum die Frequenz des Haupttones, auf die das Fell gestimmt worden ist und die an der Abszisse aufgetragen ist. Die Messwerte für die Quinte sind durch Quadrate, diejenigen für die Oktave durch Dreiecke repräsentiert. Auch in dieser Darstellung liegen die Messwerte nahe bei den Geraden für das exakte Quint- bzw. Oktavintervall.

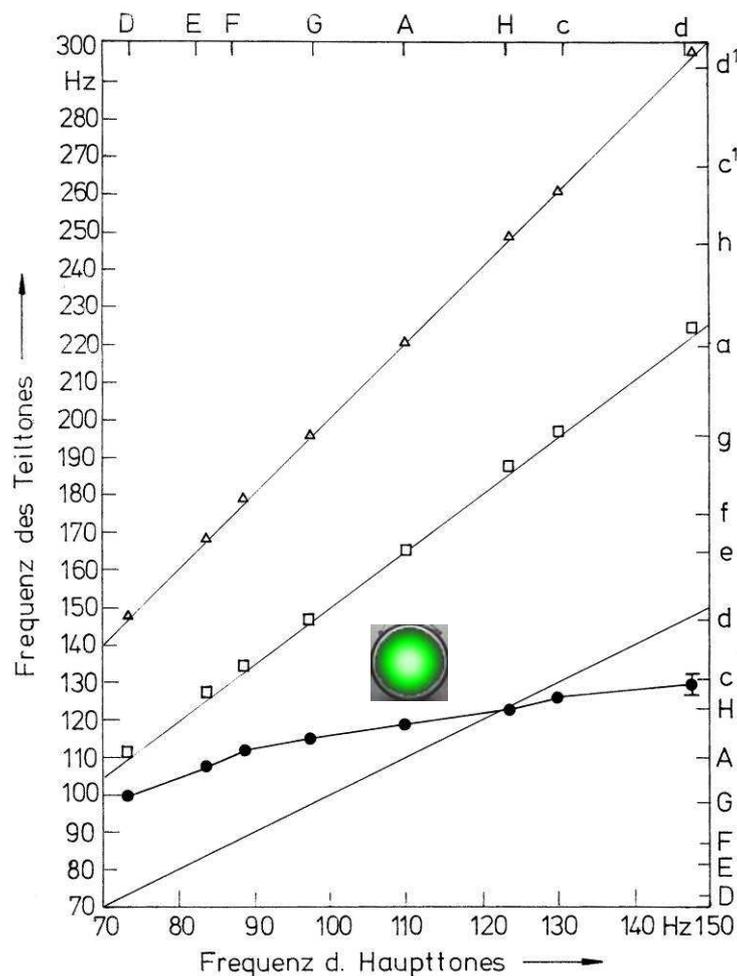
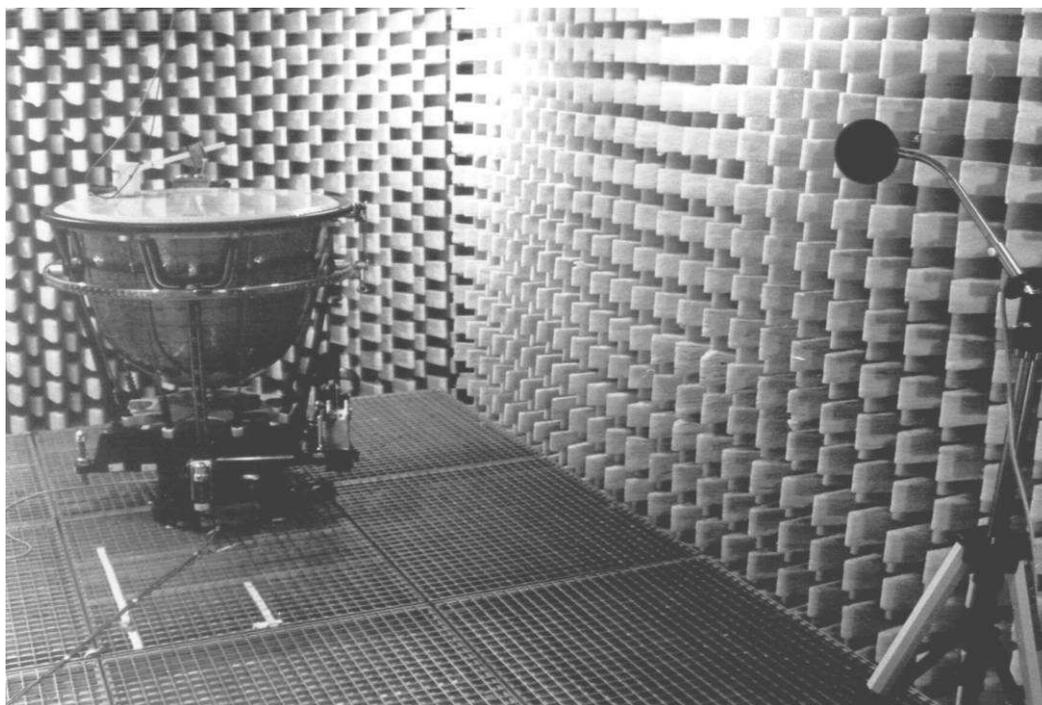


Abb. 6.6. Frequenzen der Quinte (Quadrate), Oktave (Dreiecke) und des 01-Tones (gefüllte Kreise) im Stimmbereich der großen Pauke mit Naturfell und Kessel C, teilweise gefüllt mit Bauschaum als Funktion der Frequenz  $f_{HT}$  des Haupttones.  
Die Geraden stehen für Hauptton (unten) sowie reine Quint ( $1,5 f_{HT}$ ) und Oktav ( $2 f_{HT}$ ).  
Die Schwingungsform der 01-Mode ist eingefügt.

Neben klangbildenden Teiltönen ist auch der 01-Ton erfasst, dem keine konstruktive musikalische Bedeutung zukommt. Schwarze Kreise stehen für die gemessenen Frequenzwerte. In Abb. 6.6 ist das Vibrometer-Bild der 01-Schwingung eingefügt. Wie sich bereits in Abschnitt

6.1 gezeigt hatte, ist die Frequenz des 01-Tones in den tiefen Lagen größer und in den hohen Lagen kleiner als die Frequenz des Haupttones. Im betrachteten Beispiel schneiden sich die zugehörigen Kurven etwa bei der Note H (Haupttonfrequenz 123 Hz).

### 6.3. Messungen an der großen Kolberg-Pauke



*Abb. 6.7. Große Pauke mit Kessel B im reflexionsarmen Raum; im Vordergrund ist das Messmikrofon zu erkennen.*

In die Orchesterpauke Nr. 2 des Herstellers Kolberg Percussion, die in Abb. 6.7 bei einer Messung im reflexionsarmen Raum gezeigt ist, wurden wechselweise die Kessel A, B und C (siehe Kapitel 2) eingehängt. Bespannt wurde die Pauke entweder mit dem Mylar-Fell *Remo Weather King Timpani* (Kunstfell) oder mit dem Kalbfell *Kalfo Super Timpani* (Naturfell). Nachdem das Fell aufgezo-gen und dessen Spannung egalisiert worden war, wurde es auf Noten im Betriebsbereich dieser Pauke gestimmt.

Die Resultate werden wie in den Abb. 6.5 und 6.6 dargestellt. An der Abszisse ist die Frequenz des Haupttones, die zwischen etwa 70 Hz und etwa 150 Hz eingestellt wurde, abzulesen. Die Frequenzen weiterer Teiltöne sind an der Ordinate aufgetragen. Durch Quadrate sind die Messwerte für die Quinte, durch Dreiecke diejenigen für die Oktave repräsentiert. Haben wiederholte Messungen zu unterschiedlichen Resultaten geführt, markieren Balken den Streubereich. Die beiden oberen Geraden entsprechen den exakten Intervallen Quint und Oktav, wobei als Referenz – wie immer – die Frequenz des Haupttones (untere Gerade) diene.

Die ausgefüllten Kreise stehen für den 01-Ton, dessen Frequenzlage stark davon abhängt, wie das Fell gestimmt ist. Wie bereits mehrfach beobachtet, liegt seine Frequenz bei tiefer Stimmung stets oberhalb, bei hoher Stimmung stets unterhalb der Frequenz des Haupttones. Da

der 01-Ton nur sehr kurz anhält, ist er nicht immer klar zu lokalisieren. Dies gilt vor allem dann, wenn er nahe beim Hauptton liegt. Im Folgenden wird von Interesse sein, bei welcher Frequenz des Haupttones sich die Kurven für den Hauptton und den 01-Ton schneiden. Wird das Fell höher gestimmt, ist nicht mehr der Hauptton, sondern der 01-Ton der tiefste Teilton.

### 6.3.1. Pauke mit Kessel A

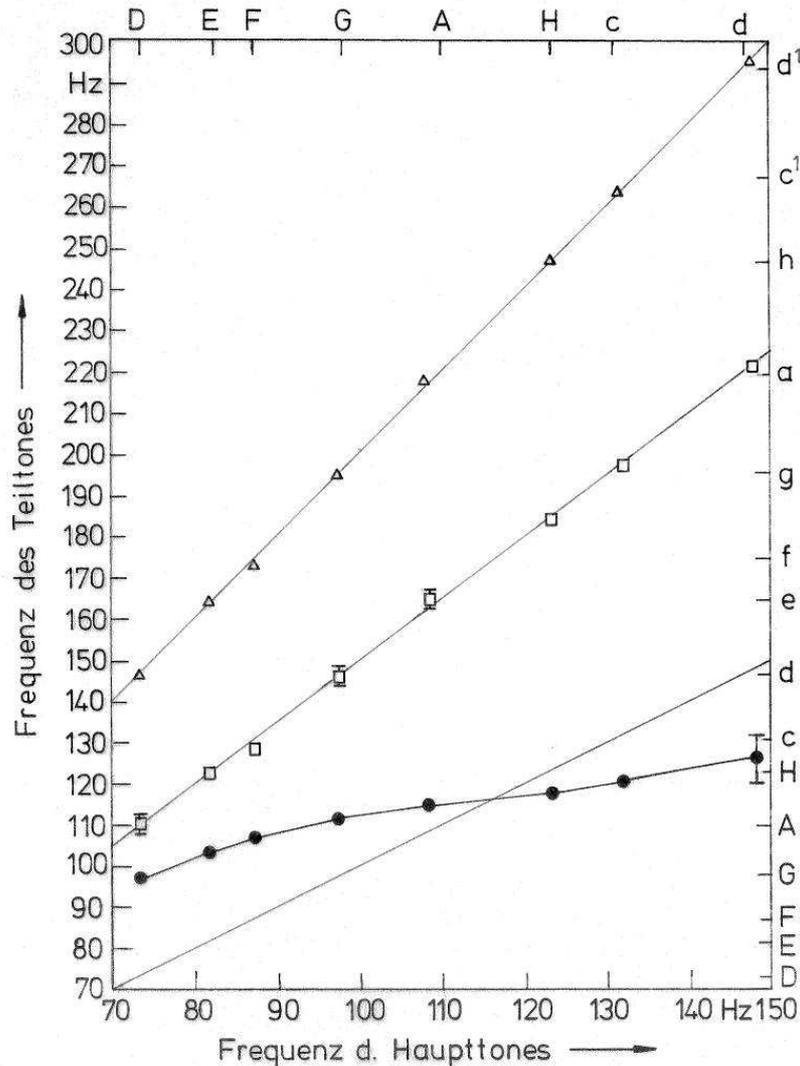


Abb. 6.8. Frequenzen der Quinte (Quadrate), Oktave (Dreiecke) und des 01-Tones (gefüllte Kreise) im Stimmbereich der großen Kolberg-Pauke mit Kunstfell und Kessel A als Funktion der Frequenz  $f_{HT}$  des Haupttones.  
Die Geraden stehen für Hauptton (unten) sowie reine Quint ( $1,5 f_{HT}$ ) und Oktav ( $2 f_{HT}$ ).

Abb. 6.8 gibt die Ergebnisse der Messung an der Pauke mit dem Kessel A (Volumen 142 l) wieder, über dessen Rand das Kunstfell gezogen war. Die Messwerte für die Quinte (Quadrate) und die Oktave (Dreiecke) liegen sehr nahe bei den reinen Intervallen, die durch die Geraden markiert sind. Die Verbindungskurve der gemessenen Frequenzen des 01-Tones schneidet die Gerade für den Hauptton bei etwa der Note B (Haupttonfrequenz 115 Hz).

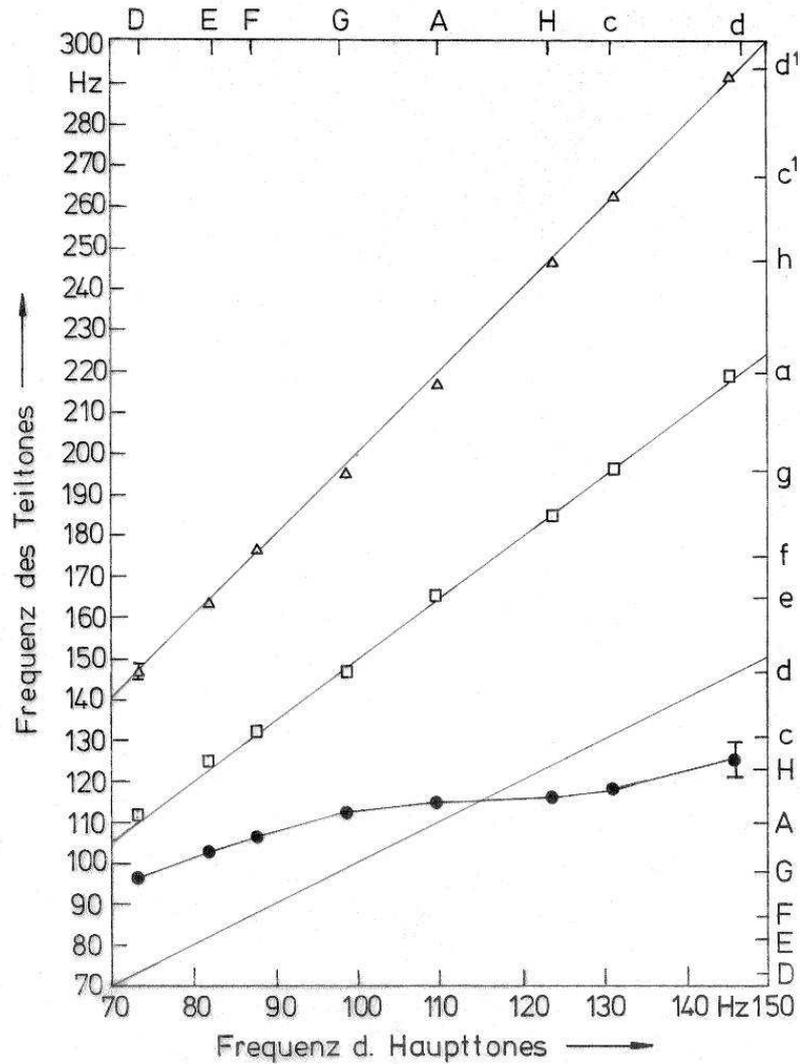


Abb. 6.9. Frequenzen der Quinte (Quadrate), Oktave (Dreiecke) und des 01-Tones (gefüllte Kreise) im Stimmbereich der großen Kolberg-Pauke mit Naturfell und Kessel A als Funktion der Frequenz  $f_{HT}$  des Haupttones. Die Geraden stehen für Hauptton (unten) sowie reine Quint ( $1,5 f_{HT}$ ) und Oktav ( $2 f_{HT}$ ).

Abb. 6.9 nimmt Bezug auf die Messung an der Pauke mit dem Kessel A, der nun mit dem Naturfell bespannt war. Auch bei Betrieb mit diesem Fell weichen die Messwerte für die Quinte (Quadrate) und die Oktave (Dreiecke) nicht wesentlich von den exakten Intervallen ab, wie sie durch die Geraden gekennzeichnet sind. Etwa bei 113 Hz haben Hauptton (untere Gerade) und 01-Ton (ausgefüllte Kreise) die gleiche Frequenz. Ein markanter Unterschied zwischen Kunst- und Naturfell zeigt sich in dieser Hinsicht nicht. Ist die Pauke tiefer gestimmt, so liegt der 01-Ton oberhalb und wird von diesem verdeckt. Wird sie höher gestimmt, könnte der 01-Ton hörbar werden.

### 6.3.2. Pauke mit Kessel B

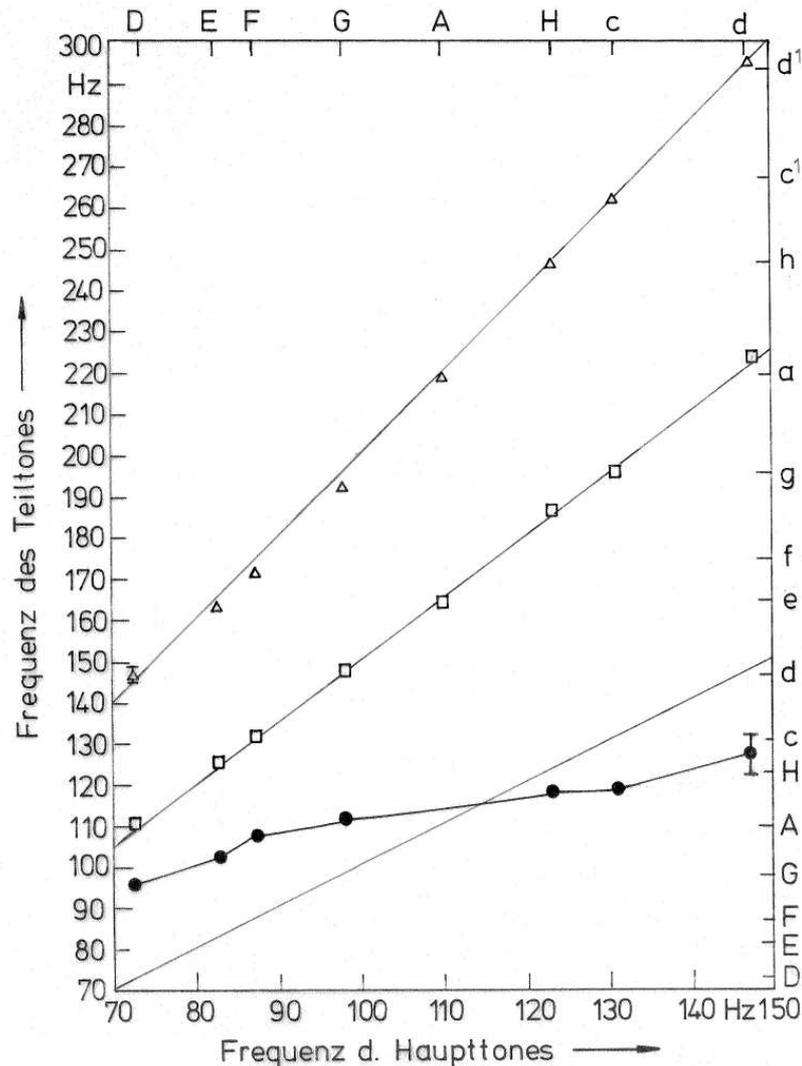


Abb. 6.10. Frequenzen der Quinte (Quadrate), Oktave (Dreiecke) und des 01-Tones (gefüllte Kreise) im Stimmbereich der großen Kolberg-Pauke mit Kunstfell und Kessel B als Funktion der Frequenz  $f_{HT}$  des Haupttones.

Die Geraden stehen für Hauptton (unten) sowie reine Quint ( $1,5 f_{HT}$ ) und Oktav ( $2 f_{HT}$ ).

In Abb. 6.10 sind die Ergebnisse der Messung an der Pauke mit dem Kessel B (Volumen 143 l) zusammen gestellt, wenn diese das Kunstfell trägt. Auch in diesem Fall stimmen die gemessenen Werte für die Quinte (Quadrate) und die Oktave (Dreiecke) weitgehend mit den exakten Intervallen überein, welche die Geraden markieren. Lediglich für die Oktave liegen bei mittlerer Stimmung die Messwerte etwas unterhalb der zugehörigen Geraden. Der Schnittpunkt der Verbindungskurve zwischen den gemessenen Frequenzen des 01-Tones und der Geraden für den Hauptton liegt etwa bei 114 Hz. Wird die Pauke höher gestimmt, dann ist nicht mehr der Hauptton, sondern der 01-Ton die Schallkomponente mit der tiefsten Frequenz.

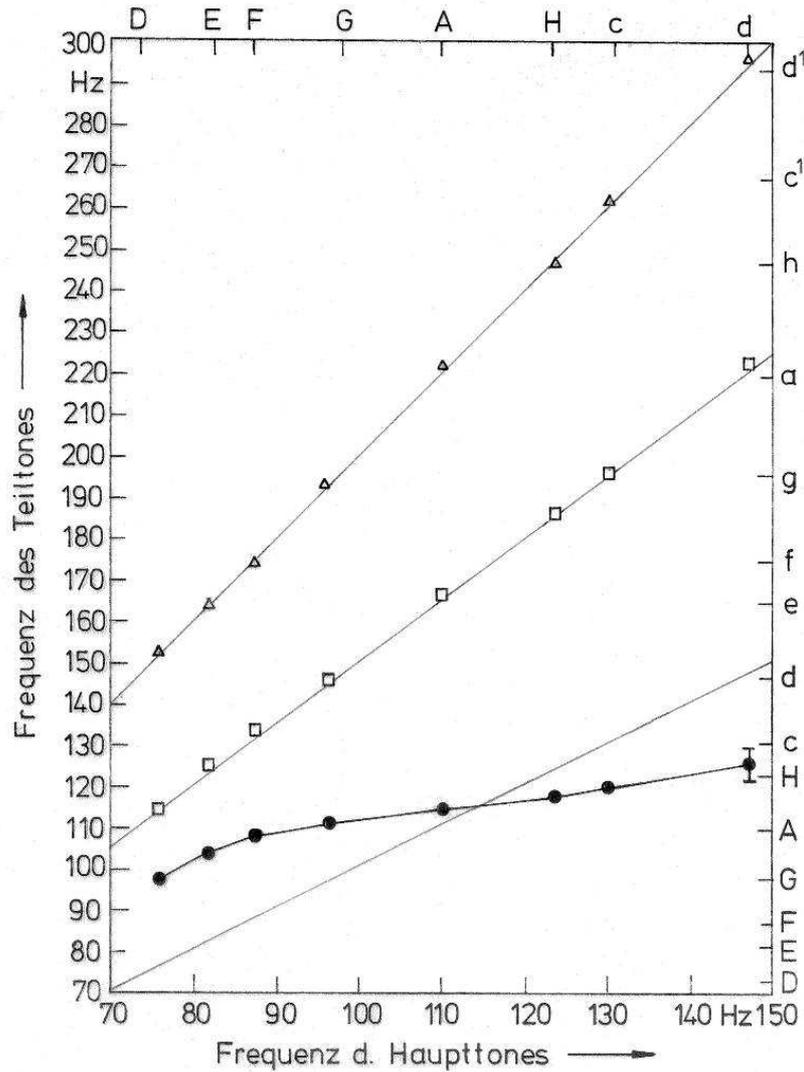


Abb. 6.11. Frequenzen der Quinte (Quadrate), Oktave (Dreiecke) und des 01-Tones (gefüllte Kreise) im Stimmbereich der großen Kolberg-Pauke mit Naturfell und Kessel B als Funktion der Frequenz  $f_{HT}$  des Haupttones. Die Geraden stehen für Hauptton (unten) sowie reine Quint ( $1,5 f_{HT}$ ) und Oktav ( $2 f_{HT}$ ).

Abb. 6.11 ist zu entnehmen, dass auch für den Kessel B, der bei dieser Messung in die Pauke eingesetzt war, mit Naturfell die Messwerte dem exakten Quint- bzw. Oktavintervall etwas näher kommen als bei Verwendung des Kunstfelles (Abb. 6.10). In Hinsicht auf den 01-Ton zeigt sich dagegen kein Unterschied zwischen den Bespannungen. In beiden Fällen liegt bis zur Haupttonfrequenz 114 Hz der 01-Ton oberhalb des Haupttones. Erst wenn die Pauke höher gestimmt ist, wird die Frequenz des 01-Tones allmählich kleiner als die des Haupttones.

### 6.3.3. Pauke mit Kessel C

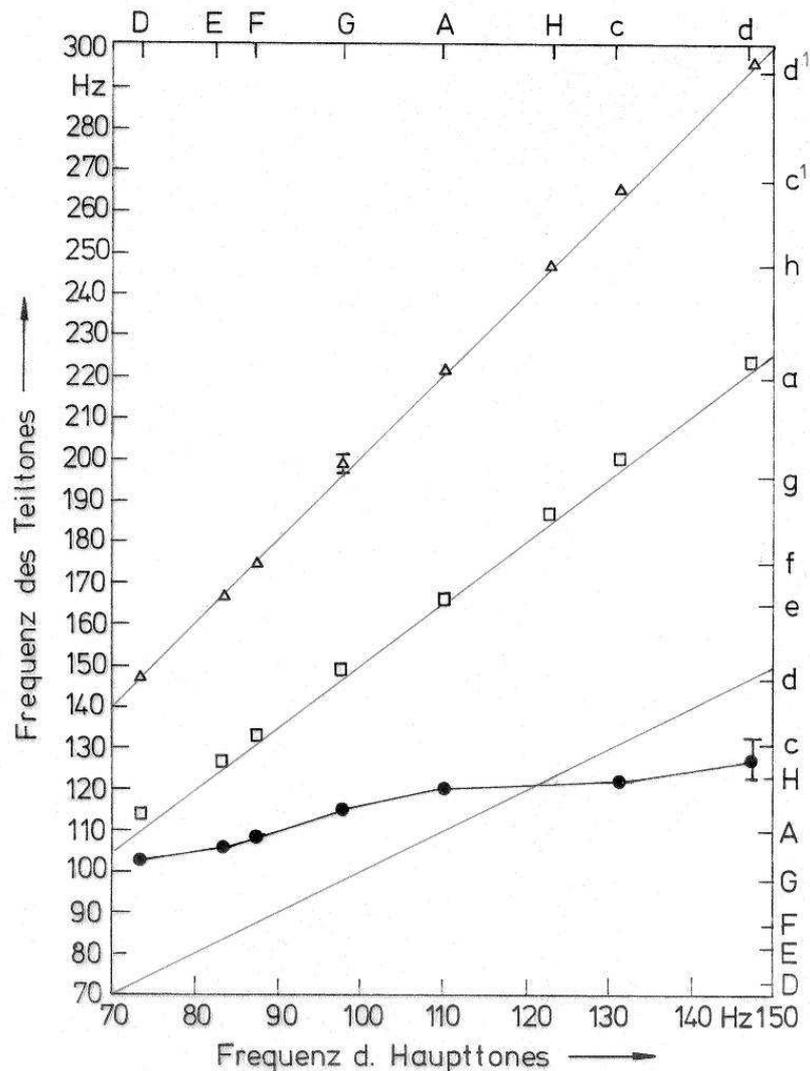


Abb. 6.12. Frequenzen der Quinte (Quadrate), Oktave (Dreiecke) und des 01-Tones (gefüllte Kreise) im Stimmbereich der großen Kolberg-Pauke mit Kunstfell und Kessel C als Funktion der Frequenz  $f_{HT}$  des Haupttones. Die Geraden stehen für Hauptton (unten) sowie reine Quint ( $1,5 f_{HT}$ ) und Oktav ( $2 f_{HT}$ ).

In Abb. 6.12 sind die Resultate der Messung mit dem flachen Kessel C (Volumen 133 l) dargestellt, der mit dem Kunstfell versehen war. Die Messwerte für die Quinte (Quadrate) liegen etwas oberhalb der mittleren Geraden, die das exakte Intervall markiert. Dies besagt, dass die gemessenen Frequenzen etwas größer als das 1,5-Fache der Frequenz des Haupttones sind. Die Frequenzen der Oktave (Dreiecke) entsprechen weitgehend dem Doppelten der Haupttonfrequenz. Beim 01-Ton schneidet die Verbindungskurve der Messwerte die Gerade für den Hauptton bei etwa 120 Hz.

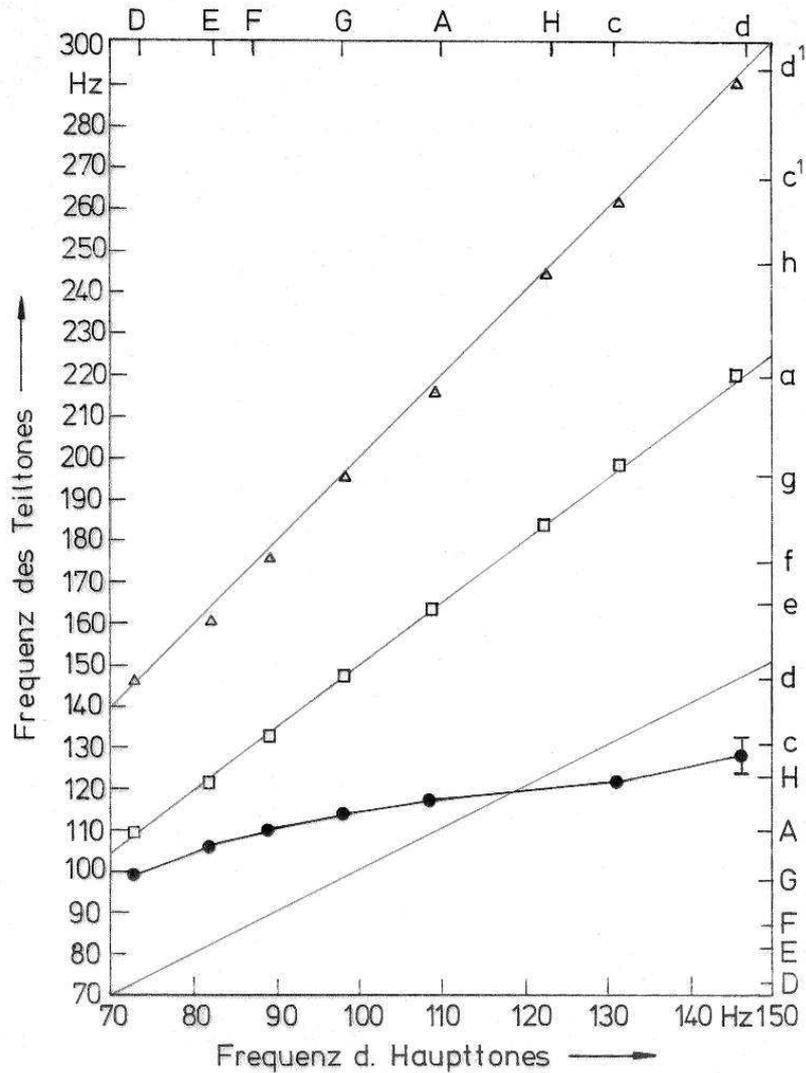


Abb. 6.13. Frequenzen der Quinte (Quadrate), Oktave (Dreiecke) und des 01-Tones (gefüllte Kreise) im Stimmbereich der großen Kolberg-Pauke mit Naturfell und Kessel C als Funktion der Frequenz  $f_{HT}$  des Haupttones. Die Geraden stehen für Hauptton (unten) sowie reine Quint ( $1,5 f_{HT}$ ) und Oktav ( $2 f_{HT}$ ).

Abb. 6.13 bezieht sich auf die Messung an der Pauke mit Kessel C, nunmehr bespannt mit dem Naturfell. Mit diesem Fell liegen die Messwerte für die Quinte (Quadrate) nahe dem exakten Quint-Intervall, gekennzeichnet durch die mittlere Gerade. Die Messwerte für die Oktave (Dreiecke) sind etwas kleiner als durch die obere Gerade vorgegeben, die dem Doppelten der Haupttonfrequenz entspricht. Das Intervall Oktave-Hauptton ist damit enger als das exakte Frequenzverhältnis 2:1. Etwa bei 118 Hz haben Hauptton (untere Gerade) und 01-Ton (ausgefüllte Kreise) die gleiche Frequenz. Solange die Pauke tiefer gestimmt ist, liegt der 01-Ton oberhalb des Haupttones und wird von diesem verdeckt. Eine eklatante Differenz zwischen Kunst- und Naturfell ist in dieser Hinsicht auch bei diesem Kessel nicht zu erkennen.

## 6.4. Messungen an anderen großen Pauken

Während eines Aufenthalts bei der Firma Kolberg Percussion in Uhingen bestand die Möglichkeit, Messungen an weiteren Orchesterpauken der Größe Nr. 2 durchzuführen. Alle diese Pauken waren mit Kunstfellen des Typs *Kalfo Super Timpani* bespannt. Auch für diese Untersuchungen wurde ein FFT-Analysator Ono Sokki CF 350 verwendet, mit dem die Frequenzen der wichtigen Teiltöne ermittelt wurden. Die Frequenzauflösung war 1,25 Hz.

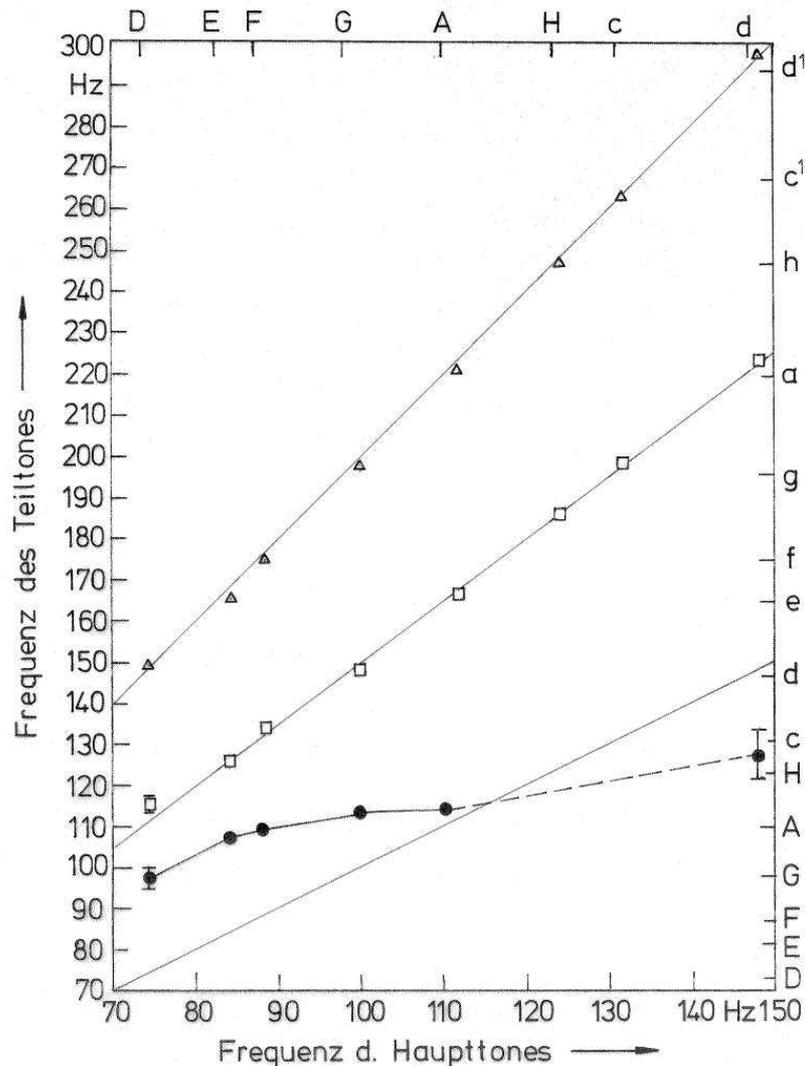


Abb. 6.14. Frequenzen der Quinte (Quadrate), Oktave (Dreiecke) und des 01-Tones (gefüllte Kreise) im Stimmbereich einer großen Kolberg-Pauke mit tiefem Kessel (Uhingen) als Funktion der Frequenz  $f_{HT}$  des Haupttones.  
Die Geraden stehen für Hauptton (unten) sowie reine Quint ( $1,5 f_{HT}$ ) und Oktav ( $2 f_{HT}$ ).

Abb. 6.14 gibt die Ergebnisse für eine Kolberg-Pauke wieder, die mit einem tiefen Kessel versehen war; vgl. auch Abschnitt 5.4. Die Messwerte unterscheiden sich praktisch nicht von denjenigen, welche in den Laboren des Instituts für Mechanik an einer ähnlichen Pauke mit den Kesseln A oder B gewonnen wurden; vgl. Abb. 6.8 und 6.10. Die Messwerte für die Quinte (Quadrate) liegen sehr nahe an der Geraden und dem exakten Intervall 3:2. Die Dreiecke befinden sich etwas unterhalb der Geraden, was bedeutet, dass der dritte klangbildende Teilton nicht ganz die doppelte Frequenz des Haupttones hat. Der 01-Ton konnte nicht bei allen Stimmungen identifiziert werden. Die zugehörige Verbindungskurve schneidet die Ge-

rade für den Hauptton schätzungsweise bei der Frequenz 112 Hz. Insgesamt bestätigen die Daten von Abb. 6.14 die Ergebnisse der Abb. 6.8 und 6.10.

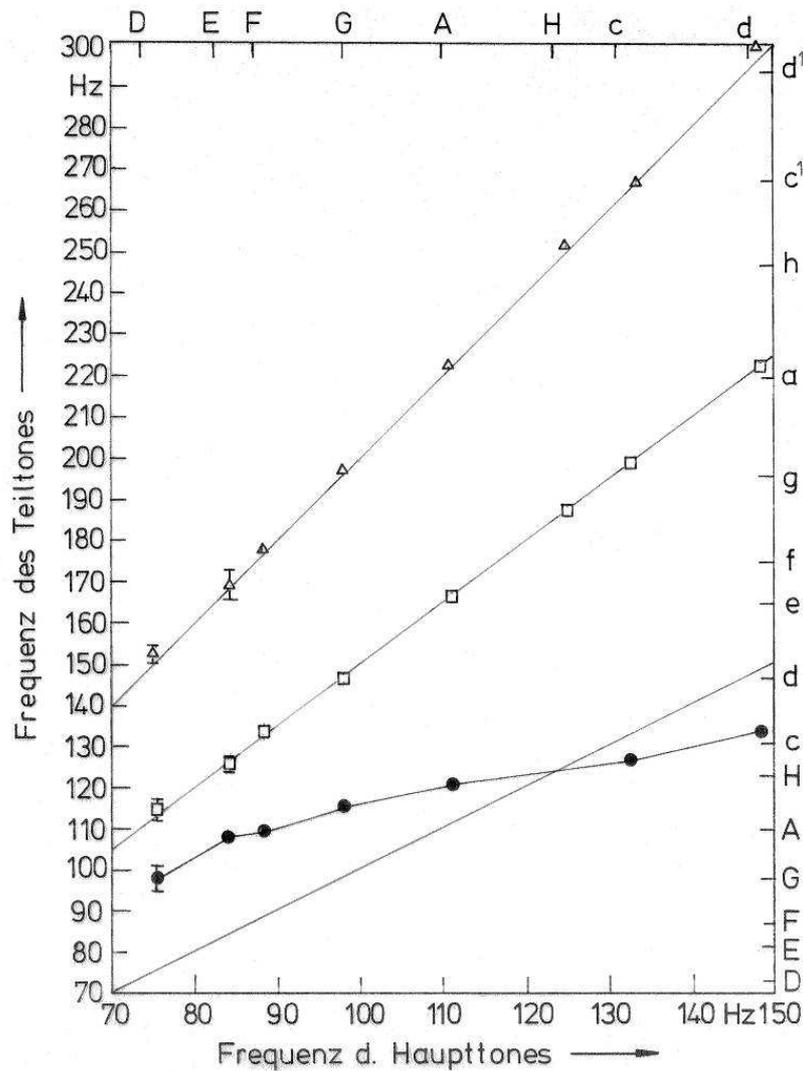


Abb. 6.15. Frequenzen der Quinte (Quadrate), Oktave (Dreiecke) und des 01-Tones (gefüllte Kreise) im Stimmbereich einer großen Kolberg-Pauke mit flachem Kessel (Uhingen) als Funktion der Frequenz  $f_{HT}$  des Haupttones. Die Geraden stehen für Hauptton (unten) sowie reine Quint ( $1,5 f_{HT}$ ) und Oktav ( $2 f_{HT}$ ).

Die Resultate der Messung an einer Kolberg-Pauke mit flachem Kessel (vgl. Abschnitt 5.3), über den ein Kunstfell gespannt war, sind in Abb. 6.15 zusammen gestellt. Die betrachtete Pauke ähnelt dem Instrument mit Kessel C (Abb. 6.12). Sowohl die Messwerte für die Quinte (Quadrate) wie auch diejenigen für die Oktave (Dreiecke) liegen nahe bei den Geraden, welche die exakten Intervalle markieren. Die Verbindungskurve der Messwerte für den 01-Ton schneidet die Linie für den Hauptton bei etwa bei 122 Hz. In dieser Hinsicht unterscheiden sich die Ergebnisse nicht von denen, die von Abb. 6.12 her bekannt sind. Auch bezüglich der Intervalle sind sich die Resultate sehr ähnlich.

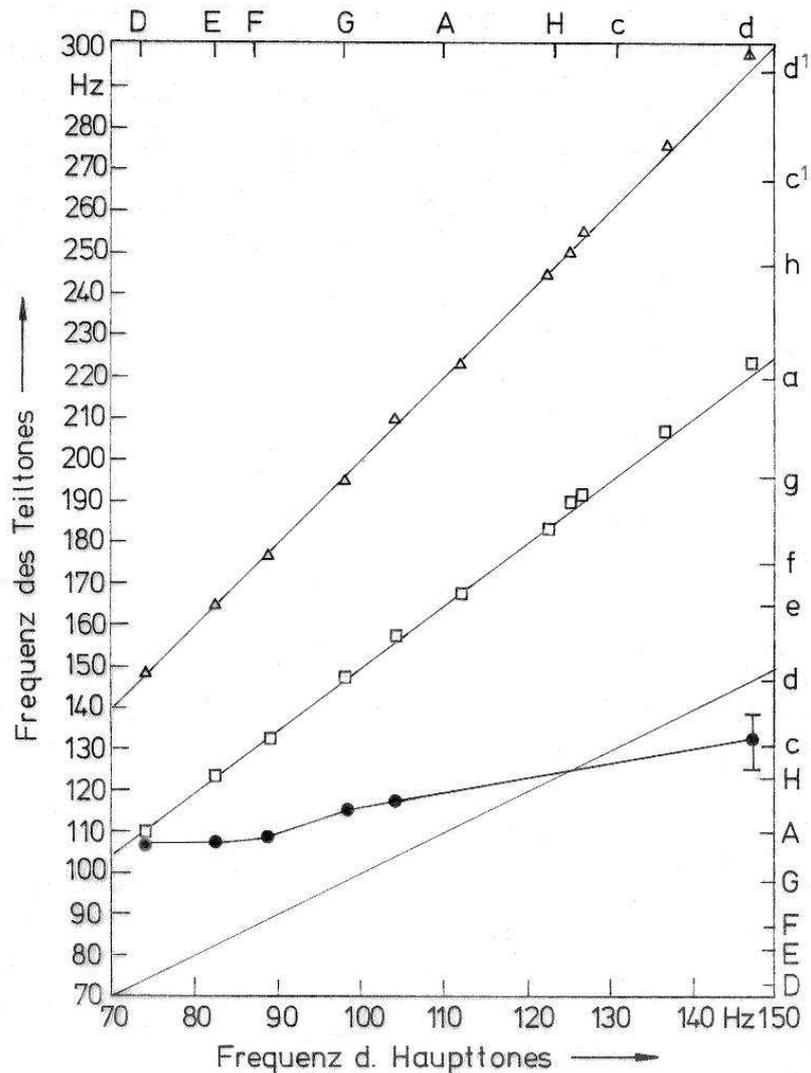


Abb. 6.16. Frequenzen der Quinte (Quadrate), Oktave (Dreiecke) und des 01-Tones (gefüllte Kreise) im Stimmbereich einer großen Kolberg-Pauke mit extrem flachem Kessel (Uhingen) als Funktion der Frequenz  $f_{HT}$  des Haupttones. Die Geraden stehen für Hauptton (unten) sowie reine Quint ( $1,5 f_{HT}$ ) und Oktav ( $2 f_{HT}$ ).

Ein noch flacherer Kessel war in die Pauke eingehängt, für die Abb. 6.16 gilt. Dieser Kessel war nur 43 cm tief und hatte ein noch geringeres Volumen als der Kessel C. Auch hier liegen die Messresultate für die Quinte (Quadrate) und für die Oktave (Dreiecke) nahe bei den Geraden, die für die exakten Intervalle stehen. Im mittleren Stimmbereich konnte der 01-Ton oftmals nicht mit letzter Sicherheit identifiziert werden. Die Interpolation lässt erwarten, dass bei etwa 127 Hz seine Frequenz so groß wie die des Haupttones sein wird. Somit dürfte der Kreuzungspunkt der zugehörigen Kurven etwas oberhalb der Note H liegen. Dies ist der höchste Wert, der bei den Messungen an Pauken der Größe Nr. 2 festgestellt wurde. Offenbar gilt: Je weniger Luft der Kessel einschließt, desto höher kann die Pauke gestimmt werden, ohne dass der 01-Ton zum tiefsten Teilton wird.

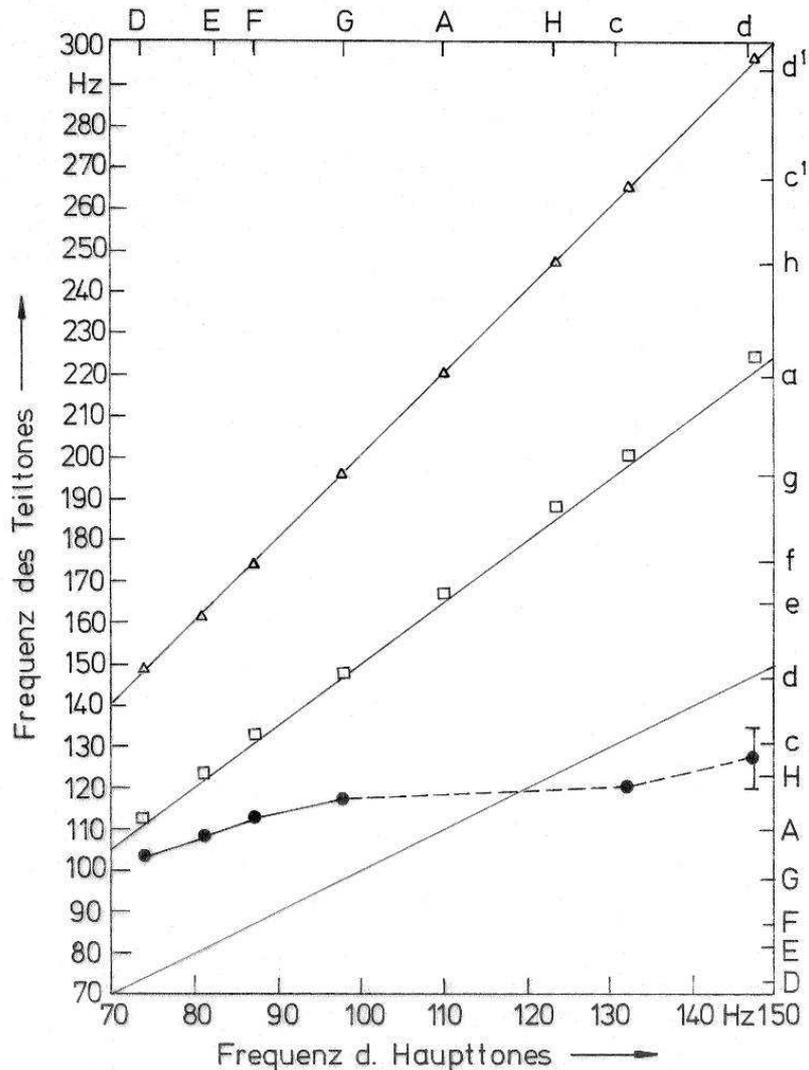


Abb. 6.17. Frequenzen der Quinte (Quadrate), Oktave (Dreiecke) und des 01-Tones (gefüllte Kreise) im Stimmbereich einer großen Ringer-Pauke (Uhingen) als Funktion der Frequenz  $f_{HT}$  des Haupttones. Die Geraden stehen für Hauptton (unten) sowie reine Quint ( $1,5 f_{HT}$ ) und Oktav ( $2 f_{HT}$ ).

In Uhingen bestand auch die Möglichkeit, eine Pauke eines anderen Herstellers zu untersuchen. Es handelte sich dabei um eine Ringer-Pauke mit Kunstfell (vgl. Abschnitt 5.5), die sich zur Überholung in der Werkstatt der Firma Kolberg Percussion befand. Die Ergebnisse sind Abb. 6.17 zu entnehmen. Die Quinte ist etwas „gespreizt“, d.h. das gemessene Frequenzverhältnis des zweiten klangbildenden Teiltones, bezogen auf den Hauptton, ist etwas größer als 3:2. Die Oktave (Dreiecke) hat im gesamten Stimmbereich weitgehend die doppelte Frequenz des Haupttones. Der 01-Ton war sehr schwierig nachzuweisen. Da auch bei dieser Messung die Zeit drängte, konnte er nicht bei jeder Stimmung aufgesucht und identifiziert werden. Die Verbindungskurve der Messwerte schneidet die Gerade für den Hauptton schätzungsweise bei der Frequenz 119 Hz.

## 6.5. Messungen an der kleinen Kolberg-Pauke

Zum Abschluss wird auf eine Messung an der kleinen Kolberg-Pauke Nr. 4 eingegangen, deren Foto Abb. 6.18 zeigt. Auf dem Bild befindet sich das Instrument im reflexionsarmen Raum des Instituts für Mechanik. Sein Kessel hat das Volumen 91 l; vgl. Tab. I in Kapitel 2. Das Fell ist aus Mylar gefertigt. Im Vordergrund ist der FFT-Analysator zu erkennen, mit dem überprüft wurde, ob das Fell auf den gewünschten Hauptton gestimmt war. Eingestellt wurden Frequenzen innerhalb der Oktav zwischen H (Hauptton 123 Hz) und h (Hauptton 247 Hz).



*Abb. 6.18. Kleine Pauke im reflexionsarmen Raum. Im Vordergrund ist ein FFT-Analysator, im Hintergrund das Messmikrofon zu erkennen.*

Abb. 6.19 zeigt Ergebnisse für die wichtigen Teiltöne. Die Messwerte für die Quinte (Quadrate) liegen auf oder nahe bei der Geraden, die für das exakte Intervall steht. Die Frequenzen der Oktave (Dreiecke) weichen jedoch systematisch von den angestrebten Werten ab. Die Messwerte liegen unterhalb der zugehörigen Geraden. Demnach erweist sich die Oktav als etwas „zu eng“: Der dritte und der erste klangbildende Ton stehen nicht im gewünschten Intervall 2:1, sondern in einem etwas kleineren Frequenzverhältnis. Die Verbindungskurve der Messwerte für den 01-Ton schneidet die Gerade für den Hauptton bei 139 Hz. Wenn die Pauke höher gestimmt wird, ist der 01-Ton der tiefste Teilton. Wie bereits mehrfach erwähnt, steht er zwar nur kurz, könnte aber hörbar werden und - da er in Bezug auf die klangbildenden Teiltöne unharmonisch liegt - als Unterton stören. Bei der kleinen Pauke besteht diese Möglichkeit in einem deutlich größeren Teil des Stimmbereiches, als es bei den großen Pauken zu beobachten war.

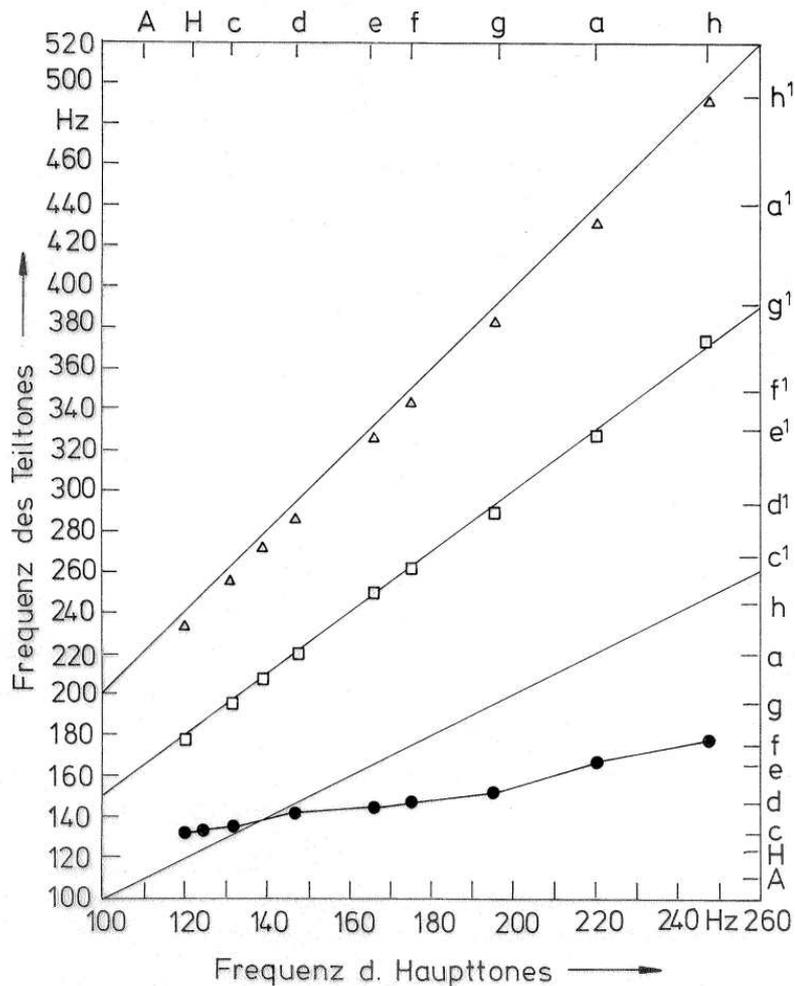


Abb. 6.19. Frequenzen der Quinte (Quadrate), Oktave (Dreiecke) und des 01-Tones (gefüllte Kreise) im Stimmbereich der kleinen Kolberg-Pauke als Funktion der Frequenz  $f_{HT}$  des Haupttones. Die Geraden stehen für Hauptton (unten) sowie reine Quint ( $1,5 f_{HT}$ ) und Oktav ( $2 f_{HT}$ ).

## 6.6. Vergleiche

Im vorliegenden Kapitel sind Frequenzverhältnisse der wesentlichen Teiltöne ermittelt und zusammen gestellt worden. Bei deren Bewertung muss berücksichtigt werden, dass die Ausgangsdaten mittels Schneller Fourier-Transformation (FFT) gewonnen worden sind. Da dieses Verfahren mit Diskretisierung arbeitet, war zwangsläufig die Frequenzauflösung beschränkt; sie betrug üblicherweise 1,25 Hz. Prozentual macht sich diese „Rasterung“ der Frequenzwerte sehr stark beim Hauptton bemerkbar. Bei der Stimmung d (Haupttonfrequenz 147 Hz) beträgt sie etwa 0,9%, bei A (110 Hz) 1,1% und bei D (73 Hz) 1,7%. Sie kann sich gravierend bemerkbar machen, da die Haupttonfrequenz als Bezug bei der Berechnung der Intervalle dient. Am schwersten wiegt sie, wenn das Fell tief gestimmt ist. Je höher die Frequenzlage wird, desto weniger wirkt sich eine mögliche Abweichung der gemessenen von der wahren Frequenz aus. Dieser Einfluss der Rasterung der Frequenzwerte muss bei der Bewertung der ermittelten Teiltonintervalle beachtet werden.

Unter Berücksichtigung möglicher Toleranzen lassen die Messergebnisse für die großen Pauken hinsichtlich der Intervalle von Hauptton, Quinte und Oktave insgesamt ein hohes Niveau

erkennen. Es kann festgestellt werden, dass die klangbildenden Teiltöne ihre musikalischen Bezeichnungen zu Recht tragen. Ihre Frequenzen gehorchen weitgehend den Verhältnissen 3:2 bzw. 2:1. Für die kleine Pauke trifft dies nicht ganz im selben Maße zu. Die Quinte hat zwar ziemlich genau die eineinhalbfache Frequenz des Haupttones, jedoch hat die Oktave weniger als die doppelte Frequenz des Haupttones. Für sämtliche Pauken gilt dies in einem weiten Stimmbereich, in dem sich diese Relationen nicht erwähnenswert ändern. Für die klangbildenden Teiltöne wurden praktisch gleichbleibende Frequenzintervalle gemessen, wenn das Fell innerhalb einer Oktav umgestimmt wurde.

Für einen weiteren Teilton, der bei diesen Untersuchungen in Erscheinung trat, trifft dies jedoch keineswegs zu. Seine Lage im Spektrum der Teiltöne hängt in äußerst starkem Maße davon ab, wie das Fell gestimmt ist. Dieser Teilton wird von einer rotationssymmetrischen Schwingung des Felles hervorgerufen. Zwar kann der Pauker durch geschickte Wahl des Anschlagpunktes dafür sorgen, dass diejenigen Schwingungen nicht oder höchstens schwach angeregt werden, die Knotenkreise beim oder nahe dem Anschlagpunkt haben. Es lässt sich jedoch nie vermeiden, dass er die 01-Form hervorruft, weil diese neben dem Knoten am Rand keine weitere Knotenlinie aufweist.

Da die 01-Schwingung immer angeregt wird, enthält das Schallspektrum auch immer einen 01-Ton. In Bezug auf diese Schwingung des Felles hat der Kessel unterschiedliche Funktionen (Fleischer 2008b): Eine Funktion besteht darin, dass er die Vorderseite des Felles von der Rückseite trennt und damit die Schallabstrahlung beeinflusst. Dadurch wird der zugehörige 01-Ton – etwas vereinfacht ausgedrückt – lauter abgestrahlt, klingt aber auch viel rascher ab. Da die spontan empfundene Tonhöhe eines Paukenschalles nach Untersuchungen von Terhardt (1998) jedoch sehr rasch gebildet wird, ist anzunehmen, dass auch ein Teilton, der nur kurz steht, eine Hörwahrnehmung hervorrufen kann. Demzufolge ist die Frequenz des 01-Tones nicht ohne Bedeutung.

Dessen Frequenz ändert sich stark, so dass dieser Ton in aller Regel unharmonisch in Bezug auf die klangbildenden Teiltöne liegt. Hierbei zeigt sich nun ein weiterer Einfluss des Kessels. In welche Richtung und in welchem Maße sich die 01-Frequenz beim Umstimmen der Pauke verschiebt, kann nur erklärt werden, wenn man berücksichtigt, dass die Luft im Kessel die Schwingung des Felles beeinflusst. Die ideale Membran schwingt im Vakuum; die Theorie lässt dann ein Bessel-Spektrum erwarten. Dass sich dies beim Fell der realen Pauke nicht wiederfindet, ist zum großen Teil dem Einfluss der Luft im Kessel zuzuschreiben. Über Fluid-Struktur-Interaktion verändert diese die Frequenzen der Fellschwingung. Bewegt sich das Fell antimetrisch, was bei den klangbildenden Teiltönen der Fall ist (vgl. Abb. 3.11), wird die Luft im Kessel hin- und herbewegt. Auf das schwingende Fell wirkt sie als zusätzliche Masse.

Ganz anders liegt der Fall bei der 01-Schwingung. Das Fell bewegt sich rotationssymmetrisch und „pumpt“ als Ganzes. Die vom Kessel umschlossene Luft wird komprimiert und stellt eine Zusatzsteifigkeit dar, die selektiv auf die 01-Schwingung des Felles wirkt. Dies hat zur Folge, dass die Frequenz des 01-Tones angehoben wird. Wie steif die Zusatzfeder ist, hängt von der Frequenz und der Geometrie des Kessels ab. Es leuchtet ein, dass dabei das Volumen des Kessels eine zentrale Rolle spielt. Die Frequenz des 01-Tones wird umso mehr angehoben, je kleiner der Kessel im Vergleich zur Wellenlänge des 01-Tones ist. Sie wird umso weniger angehoben, je größer der Kessel im Vergleich zur Wellenlänge des 01-Tones wird. Mit anderen Worten: Je höher die Frequenz der 01-Schwingung ist, desto kleiner wird die Schallwellenlänge und desto größer, gemessen an dieser Wellenlänge, ist dann der Kessel. Mit steigender Frequenz nimmt die Steifigkeit des zusätzlichen Luftpolsters zwischen Fell und Kessel immer weiter ab, bis bei hoher Stimmung des Felles schließlich nicht mehr der Hauptton,

sondern der 01-Ton die Schallkomponente mit der tiefsten Frequenz ist. Wie bereits mehrfach angesprochen wurde, besteht dann die Gefahr, dass er als Unterton hörbar wird und dem Paukenschall eine Klangfärbung verleiht, die Pauker als „dunkel und stumpf“ bezeichnen.

Neben den Frequenzen der Quinte und der Oktave kann den Diagrammen dieses Kapitels stets auch die Frequenz dieses 01-Tones entnommen werden. Abb. 6.20 soll zeigen, ob sich hierbei Unterschiede nachweisen lassen, die auf die Bespannung zurückzuführen sind. Die drei Diagramme von Abb. 6.20 beziehen sich auf die Kolberg-Pauke Nr. 2, die im Institut verfügbar war. Sie geben Ergebnisse für die drei Kessel wieder. Die eingezeichnete Gerade entspricht der Frequenz des Haupttones, die auch an der Abszisse aufgetragen ist. Die Ordinate zeigt die Frequenz des 01-Tones. Durch unterschiedliche Symbole sind die Messwerte gekennzeichnet, die man mit Kunstfell bzw. Naturfell erhält. Eine systematische Abhängigkeit der Messergebnisse von der Art des verwendeten Felles ist nicht zu erkennen.

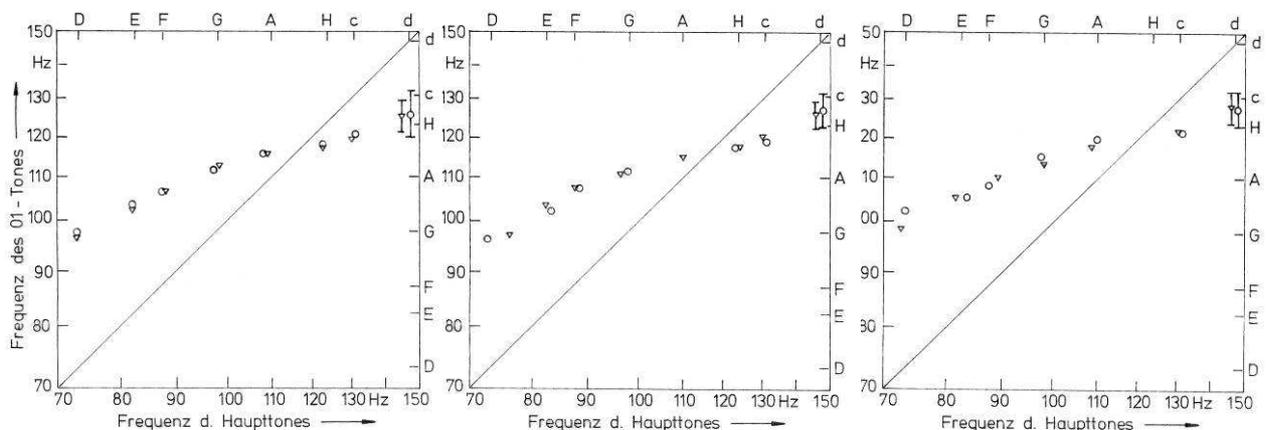


Abb. 6.20. Frequenz des 01-Tones der großen Kolberg-Pauke mit Kessel A (links), B (Mitte) bzw. Kessel C (rechts) als Funktion der Frequenz  $f_{HT}$  des Haupttones.  
Die Gerade steht für den Hauptton.  
Kreise: Kunstfell; Dreiecke: Naturfell.

Es deuten sich jedoch Unterschiede zwischen den drei Diagrammen an, die vom Kessel herühren. Um diese Abweichungen deutlich zu machen, sind in Abb. 6.21 für Pauken mit vier voneinander verschiedenen Kesseln Ergebnisse zusammen gestellt. Sie wurden in der Werkstatt der Firma Kolberg ermittelt und beziehen sich allesamt auf Pauken Nr. 2, bespannt mit Kunstfell. Diese vier Instrumente waren mit Kesseln unterschiedlicher Größe bestückt.

Wiederum ist an der Abszisse die Frequenz des Haupttones aufgetragen. Die Ordinate zeigt die Frequenz des 01-Tones; die Gerade entspricht dem Hauptton. Die Werte, die für den 01-Ton gemessen wurden, sind durch Kreise, gegebenenfalls mit Toleranzbalken, markiert. Naturgemäß kann der 01-Ton nicht mehr separiert werden, wenn er nahe beim Hauptton liegt, so dass die Messung hier lückenhaft war. Ist die Pauke tief gestimmt, liegen die Messpunkte oberhalb der Geraden. Der 01-Ton hat hier eine höhere Frequenz als der Hauptton; der Hauptton ist der tiefste Teilton. Wird die Pauke sehr hoch gestimmt, ist die Frequenz des 01-Tones kleiner als die des Haupttones; der Hauptton ist dann nicht mehr der tiefste Teilton. Ein Vergleich der vier Diagramme zeigt hierin Unterschiede. Diejenige Stimmung, bei der beide Frequenzen gleich groß sind, hängt vom Rauminhalt des Kessels ab. Dieser ist bei den beiden oberen Diagrammen größer war als bei den beiden unteren. Beim Höherstimmen liegt der 01-Ton umso länger oberhalb des Haupttones, je kleiner der Paukenkessel ist.

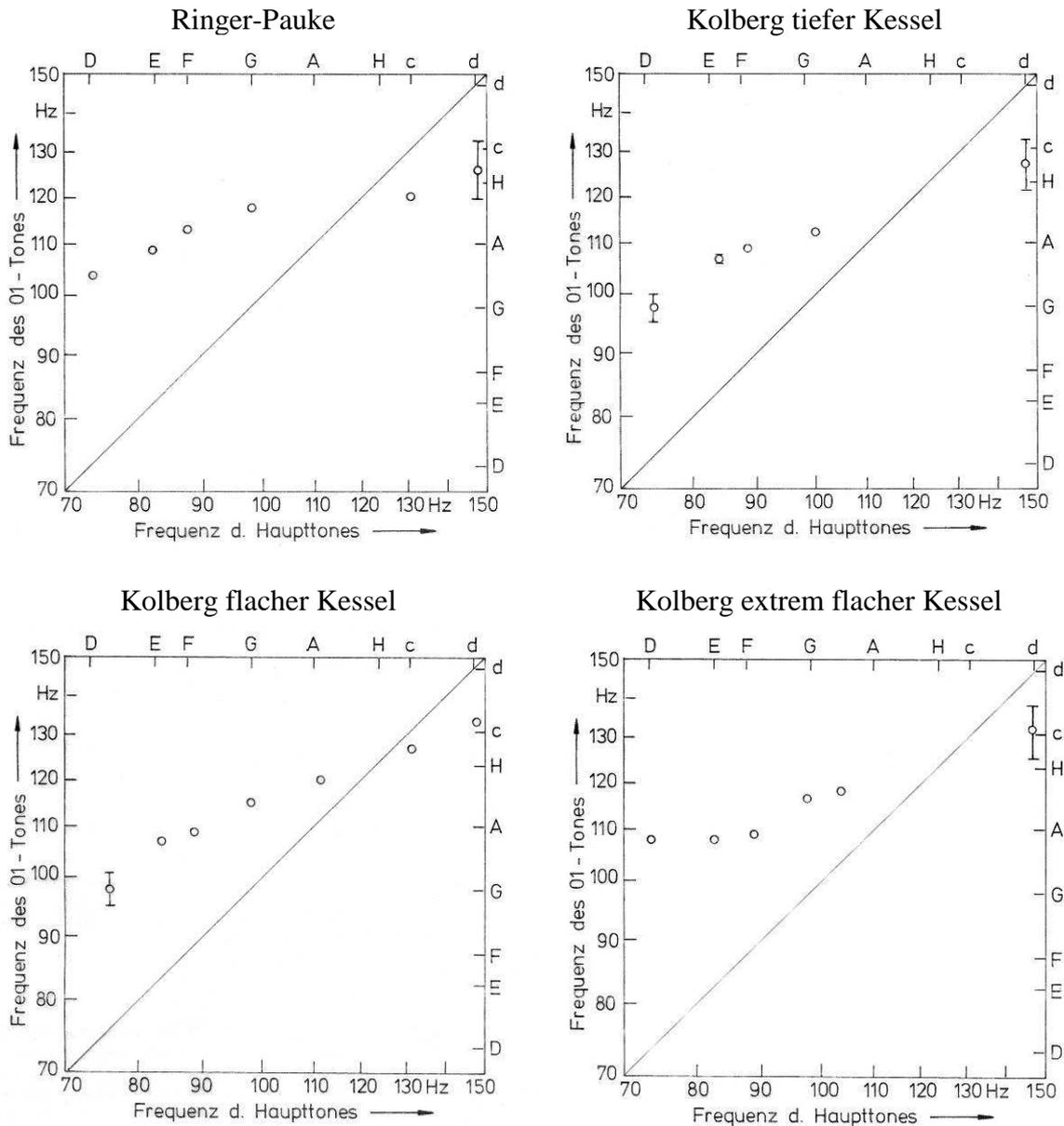


Abb. 6.21. Frequenz des 01-Tones im Stimmbereich von Pauken Nr. 2 mit verschiedenen großen Kesseln als Funktion der Frequenz  $f_{HT}$  des Haupttones; die Gerade steht für den Hauptton.

Offenbar hat das Fell weniger, die Größe des Kessels mehr Einfluss darauf, welche Frequenz der 01-Ton bei einer bestimmten Stimmung der Pauke hat. Dieser Sachverhalt soll noch einmal gesondert herausgearbeitet werden. Abb. 6.22 enthält zwei Diagramme. Das linke gilt für das Kunstfell, das rechte für das Naturfell. Die eingezeichneten Geradenzüge, gekennzeichnet durch verschiedenartige Stricharten, entsprechen den Verbindungslinien der Messwerte der 01-Frequenz. Sie beruhen auf Experimenten mit den Kesseln A (142 l Volumen), B (143 l) bzw. C (133 l). Im linken Diagramm ist zusätzlich ein besonders kleiner Kessel erfasst.

Erwartungsgemäß stimmen die Messkurven für die beiden großen Kessel (durchgezogen und strich-punktiert) für beide Arten von Fellen weitgehend überein. Die gestrichelte Kurve für den kleinen Kessel liegt darüber. Bezieht man die Messung mit einem extrem flachen Kessel (punktierte Kurve im linken Diagramm), wie sie in der Uhinger Werkstatt gemacht worden war, mit in die Betrachtungen ein, dann wird die Tendenz noch deutlicher: Je geringer das Vo-

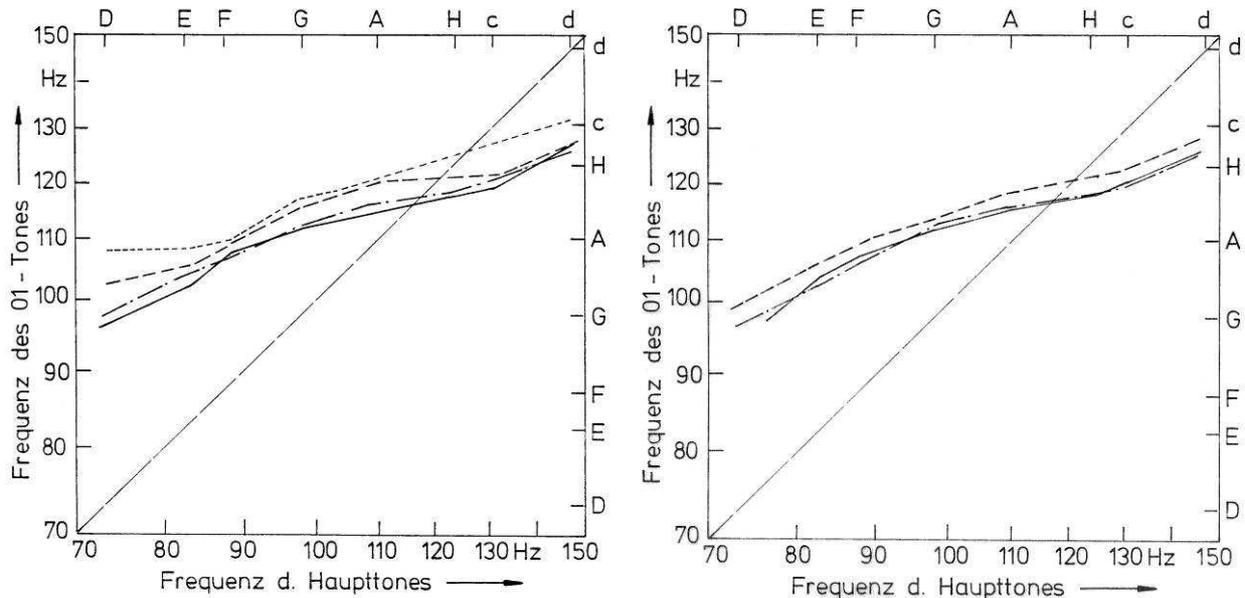


Abb. 6.22. Frequenz des 01-Tones der großen Kolberg-Pauke mit Kunstfell (links) bzw. Naturfell (rechts) als Funktion der Frequenz  $f_{HT}$  des Haupttones. Die unterbrochene Gerade steht für den Hauptton.  
Durchgezogen: Kessel A; strich-punktiert: Kessel B, gestrichelt: Kessel C;  
punktiert im linken Diagramm: extrem flacher Kessel, gemessen in Uhingen.

lumen des Kessels ist, desto größer ist die Frequenz des 01-Tones. Umso höher kann auch die Pauke gestimmt werden, ohne dass der 01-Ton der tiefste Ton im Schallspektrum wird und eine mögliche Störwirkung entfalten kann. Diese Beobachtung ist in vollem Einklang mit theoretischen Überlegungen, wie sie in früheren Arbeiten (Fleischer 1988) formuliert sind.

## 6.7. Zusammenfassende Bemerkung

Hinsichtlich des Unterschiedes zwischen Kunstfell und Naturfell kann Folgendes festgehalten werden: Hinweise auf gewisse Unterschiede, die von der Bespannung herrühren, haben frühere Untersuchungen von Fleischer und Fastl (1992) gegeben. Dort hatte sich auch gezeigt, dass die Lautheit von Paukenklängen über den gesamten Stimmbereich sich bei einem Naturfell weniger ändert als bei einem Kunstfell. Dies dürfte mit andersartigen Dämpfungseigenschaften der Fellmaterialien zusammenhängen, die hier nicht untersucht worden sind.

Die innere Harmonie hängt offenbar in gewissem, aber geringem Maße davon ab, womit die Pauke bespannt ist. Wird ein Naturfell verwendet, dann scheinen die Quinte und die Oktave etwas besser mit den exakten Intervallen überein zu stimmen, als wenn ein Kunstfell aufgezo-gen wird. Die Unterschiede sind gering, spiegeln sich jedoch in der auralen Beurteilung wider. Frühere psychoakustische Versuche mit großen Pauken Nr. 2 hatten ergeben, dass sich die Tonhöhe bei einem Naturfell über den gesamten Stimmbereich etwas deutlicher ausprägt als bei einem Kunstfell. In den physikalisch motivierten Untersuchungen der Frequenzinter-valle, wie sie im vorliegenden Kapitel beschrieben sind, ließen sich bei den großen Pauken lediglich marginale Unterschiede feststellen. Insgesamt war bei sämtlichen großen Pauken bezüglich der Intervalle von Hauptton, Quinte und Oktave festzustellen, dass diese Teiltöne ihre musikalischen Bezeichnungen zu Recht tragen; ihre Frequenzen entsprechen weitgehend den Verhältnissen 3:2 bzw. 2:1. Bei der kleinen Pauke Nr. 4, bespannt mit einem Kunstfell,

konnte dies nicht ganz im selben Maße beobachtet werden. Die Oktav erwies sich als etwas zu eng.

In Hinsicht auf den 01-Ton waren keine signifikanten Unterschiede zwischen Kunst- oder Naturfell festzustellen. Hier zeigte der Vergleich verschiedener Kessel die folgende Tendenz: Je kleiner der Kessel ist, desto höher kann die Pauke gestimmt werden, ohne dass das Gefüge der Teiltöne gravierend geändert wird. Sobald das Fell sehr hoch gestimmt ist, wird anstelle des Haupttones der 01-Ton der tiefste Teilton. Diejenige Stimmung der Pauke, ab der nicht mehr der Hauptton, sondern der 01-Ton der tiefste Teilton ist, hängt deutlich erkennbar vom Volumen des Kessels ab. Bei der Pauke Nr. 2 tritt dies bei einer Note etwas oberhalb der nominalen Stimmung A ein. Bei den Kesseln A (142 l) und B (143 l) ist dies der Fall, wenn der Hauptton die Frequenzen 113 Hz bis 115 Hz überschreitet. Beim kleineren Kessel C (133 l) zeigt sich die Gleichheit der 01- mit der 11-Frequenz erst zwischen 118 Hz und 120 Hz. Bei einem ganz extrem flachen Kessel, der in Uhingen untersucht worden war, liegt dieser Übergang bei einer noch etwas höheren Frequenz.

Wenn die Frequenz des 01-Tones, den die Pauker als Unterton bezeichnen, als Kriterium herangezogen wird, lässt sich folgende Schlussfolgerung ziehen: Pauken Nr. 2 mit Kesseln handelsüblicher Größe sollten nicht zu hoch gestimmt werden. Eine sinnvolle obere Grenze könnte beispielsweise die Note c (Haupttonfrequenz 131 Hz) sein. Hierbei ist die 01-Frequenz nur soviel tiefer als die Haupttonfrequenz, dass der Hauptton den 01-Ton eben noch verdeckt. Wird angestrebt, die Pauke noch etwas höher zu stimmen, wäre es dann zu empfehlen, einen kleineren Kessel zu verwenden.

Nachdem sich der Rauminhalt des Kessels als ein wesentlicher Kennwert erwiesen hat, erscheint es aufschlussreich, das Volumen in einer weiteren Spanne zu variieren, als es durch die marktüblichen Kessel vorgegeben ist. Zuvor sollen jedoch noch die Eigenschaften untersucht werden, die eine Pauke haben würde, wenn sie überhaupt keinen Kessel hätte.

## 7. FREQUENZEN DER TEILTÖNE MIT UND OHNE KESSEL

Die Frage, welche Rolle der Kessel für die Funktion einer Pauke spielt, wurde beispielsweise von Fleischer (2008b) behandelt. Im vorliegenden Kapitel sind die Ergebnisse von Experimenten gesammelt, die deutlich machen sollen, welchen grundlegenden Einfluss der Kessel insbesondere auf die Frequenzen und Intervalle, wie sie bereits im vorhergehenden Kapitel betrachtet worden sind, ausübt.

### 7.1. Messungen an der kleinen Pauke

#### 7.1.1. Der Kessel ist ausgebaut

Bei den untersuchten Kolberg-Pauken lässt sich der Kessel auf einfache Weise entfernen. Das Fell wird entspannt und abgenommen. Danach kann der Kessel aus dem Stützring gehoben werden. Das Fell wird wieder aufgezogen. Es liegt nun direkt auf dem Stützring auf und wird mit den langen Spanschrauben gespannt und gestimmt. Abb. 7.1 zeigt die Pauke Nr. 4 in diesem Zustand. Auf die Unterschiede im Ausschwingen der Teiltöne, wie sie beim Betrieb ohne bzw. mit Kessel zu beobachten sind, wird hier nicht eingegangen. Sie sind bereits in früheren Arbeiten (Fleischer 2008a und b) ausführlich behandelt worden.



Abb. 7.1. Kleine Pauke ohne Kessel.

Abb. 7.2 gibt in der Darstellung, die bereits im vorherigen Kapitel erläutert und verwendet worden ist, die Frequenzen der wichtigen klangbildenden Teiltöne für die kleine Pauke ohne Kessel wieder. Im gesamten Stimmbereich sind in Abhängigkeit von der Frequenz des Haupttones die Frequenzen der Quinte (Quadrate) und der Oktave (Dreiecke) aufgetragen; sie sind sie mit den Bildern der zugehörigen Fellschwingungen (Fleischer 2005) gekennzeichnet. Die Geraden stehen für die exakten Intervalle mit dem Hauptton als Bezug; sie dienen der leichteren Orientierung. Als ausgefüllte Kreise sind die Frequenzen des 01-Tones eingefügt.

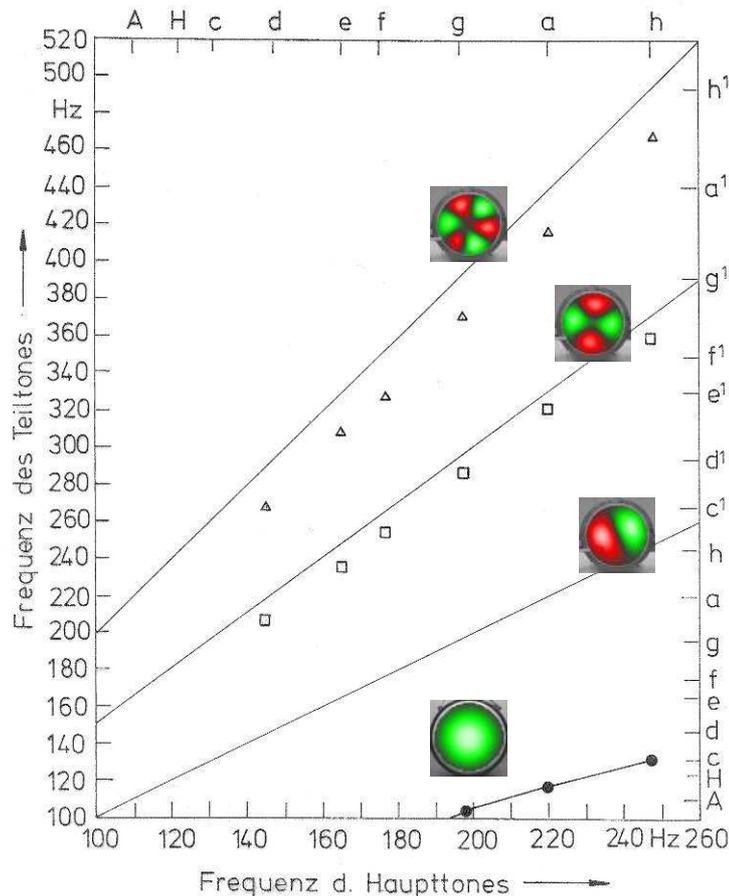
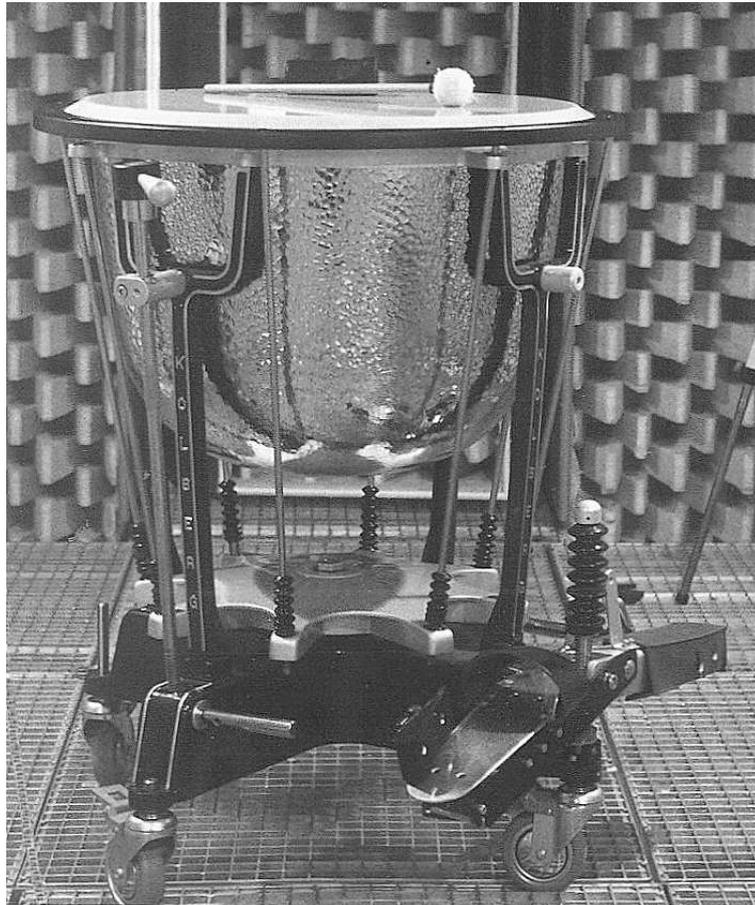


Abb. 7.2. Frequenzen der Quinte (Quadrate), Oktave (Dreiecke) und des 01-Tones (gefüllte Kreise) als Funktion der Frequenz  $f_{HT}$  des Haupttones im Stimmbereich der kleinen Pauke mit Kunstfell und ohne Kessel. Die Geraden stehen für Hauptton (unten) sowie reine Quint ( $1,5 f_{HT}$ ) und Oktav ( $2 f_{HT}$ ). Die zugehörigen Schwingungsformen des Felles sind eingefügt

Über den ganzen untersuchten Stimmbereich ist der 01-Ton (ausgefüllte Kreise) der tiefste Teilton. Er liegt zwischen 75 Hz und 131 Hz und damit so tief, dass er sich zum großen Teil auf der gewählten Ordinate nicht darstellen lässt. Die Intervalle der Quinte (Quadrate) und Oktave (Dreiecke) sind enger als die anzustrebenden Frequenzverhältnisse  $1 : 1,5 : 2$ , wie sie die Geraden markieren. Ein Zahlenbeispiel für die Note e ( $f_{HT} = 165$  Hz) soll dies verdeutlichen: Mit dem Hauptton als Referenz bilden die Teiltöne die Intervalle  $1 : 1,42 : 1,86$ . In Hinsicht auf diese drei Teiltöne ist der Klang, den die Pauke ohne Kessel hervorruft, nicht harmonisch. Zudem ist im gesamten untersuchten Bereich die Frequenz des 01-Tones deutlich kleiner als die des Haupttones. Im Beispiel der Note e ist seine Frequenz das 0,53-Fache der Haupttonfrequenz. Es ist damit zu rechnen, dass der 01-Ton im gesamten Stimmbereich gehört werden kann. Es muss daher in Zweifel gezogen werden, ob es überhaupt sinnvoll ist, den Hauptton als Bezug zu wählen. Wahrscheinlich würde sich dafür der 01-Ton als der tiefste Teilton in diesem Fall besser eignen.

### 7.1.2. Der Kessel ist eingebaut



*Abb. 7.3. Kleine Pauke mit Kessel im reflexionsarmen Raum.*

Mit dem Betrieb ohne Kessel wird nun der Zustand verglichen, wie er bei der kompletten Pauke mit eingebautem Kessel vorliegt, die in Abb. 7.3 wiedergegeben ist. Abb. 7.4 zeigt die Ergebnisse der Messung; vgl. auch Abb. 6.19. Mit dem 1,95- bis 1,98-Fachen der Haupttonfrequenz liegt die Oktave im gesamten Stimmbereich etwas unterhalb, jedoch nahe der Geraden, die das exakte Oktavintervall markiert. Die Quinte hat die 1,49- bis 1,51-fache Frequenz des Haupttones und entspricht damit fast genau dem Quintintervall. Besonders auffällig ist, dass der 01-Ton (siehe eingefügtes Schwingungsbild) im Vergleich zu Abb. 7.2 nun deutlich höher liegt. Solange das Fell tief gestimmt ist, liegt er oberhalb des Haupttones. Erst wenn das Fell höher als auf die Note d (Haupttonfrequenz 147 Hz) gestimmt ist, wird die Frequenz des 01-Tones kleiner als die des Haupttones.

Zwei wesentliche Effekte, die der Kessel auf die Frequenzen der Teiltöne hat, werden hiermit deutlich: Zum Einen bewirkt der Kessel, dass die Frequenzen der klangbildenden Teiltöne sich den Quint- und Oktavintervallen annähern. Die physikalische Ursache dafür ist die Masse der eingeschlossenen Luft, die auf der Rückseite des Felles zwischen gegenphasig schwingenden Bereichen hin- und herbewegt wird. Bei der rotationsymmetrischen 01-Schwingung wirkt die Luft im Kessel dagegen nicht als zusätzliche Masse, sondern als Feder. Deren Steifigkeit hat zum Anderen einen Einfluss, der selektiv auf die 01-Schwingung wirkt. Demnach wirkt die Luft hier mit entgegengesetzter Tendenz auf die Frequenz der 01-Schwingung: Infolge der zusätzlichen Steifigkeit wird die 01-Frequenz angehoben und liegt in weiten Bereichen oberhalb der Frequenz des Haupttones. Somit ist nicht mehr – wie ohne Kessel – der 01-Ton die tiefste Komponente, sondern der Hauptton übernimmt nun diese Rolle.

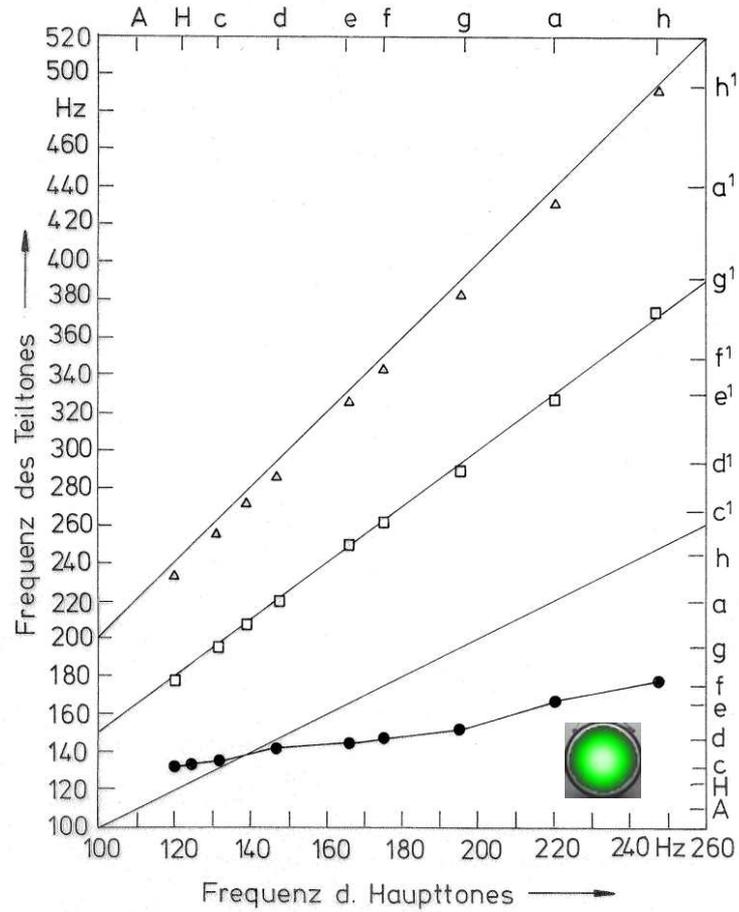


Abb. 7.4. Frequenzen der Quinte (Quadrate), Oktave (Dreiecke) und des 01-Tones (gefüllte Kreise) als Funktion der Frequenz  $f_{HT}$  des Haupttones im Stimmbereich der kleinen Pauke mit Kunstfell und mit Kessel. Die Geraden stehen für Hauptton (unten) sowie reine Quint ( $1,5 f_{HT}$ ) und Oktav ( $2 f_{HT}$ ). Die Form der 01-Schwingung des Felles ist eingefügt.

## 7.2. Messungen an der großen Pauke

### 7.2.1. Der Kessel ist ausgebaut

Das Foto von Abb. 7.5 zeigt die große Kolberg-Pauke, deren Kessel entfernt worden ist. Die Frequenzen der Teiltöne, die sich für diese Konfiguration ergeben, sind in Abb. 7.6 dargestellt. Über der Frequenz des Haupttones, die sich von etwa 70 Hz bis etwa 150 Hz spannt, sind als Quadrate die gemessenen Frequenzen der Quinte und als Dreiecke die der Oktave eingetragen. Die exakten Intervalle entsprechen den Geraden. Die Vibrometer-Bilder der zugehörigen Fellschwingungen sind eingefügt. Für die Frequenzen, die sich für den 01-Ton ergeben, stehen die ausgefüllten Kreise.



*Abb. 7.5. Große Pauke ohne Kessel.*

Das Bild, das sich bei den Experimenten mit der kleinen Pauke eingestellt hat, verfestigt sich: Die gemessenen Intervalle weichen von den exakten Frequenzverhältnisse  $1 : 1,5 : 2$  ab; sie erweisen sich stets als enger. Beispielsweise bei der Note G ( $f_{HT} = 98$  Hz) bilden die klangbildenden Teiltöne die Intervalle  $1 : 1,45 : 1,90$ . Das Schallsignal, das die Pauke ohne Kessel generiert, ist nicht harmonisch. Allerdings weichen die Frequenzverhältnisse nicht ganz so stark von den angestrebten Intervallen ab, wie dies bei der kleinen Pauke zu beobachten war. Nahezu im gesamten betrachteten Stimmbereich liegt der 01-Ton so weit unterhalb des Haupttones, dass er im Diagramm nicht mehr erfasst wird. Es wurden Werte zwischen 39 Hz und 79 Hz gemessen. Damit ist die Frequenz des 01-Tones etwa halb so groß wie die des

Haupttones. Im Beispiel der Note G beträgt sie das 0,54-Fache der Haupttonfrequenz. Auch hier ist davon auszugehen, dass das harmonische Gefüge des Klanges – und damit die Tonhöhen- und Klangfarbeempfindung – sich völlig anders darstellt, wenn nicht mehr der 11-Ton (Hauptton), sondern der 01-Ton die Komponente mit der tiefsten Frequenz ist und den Grundton bildet.

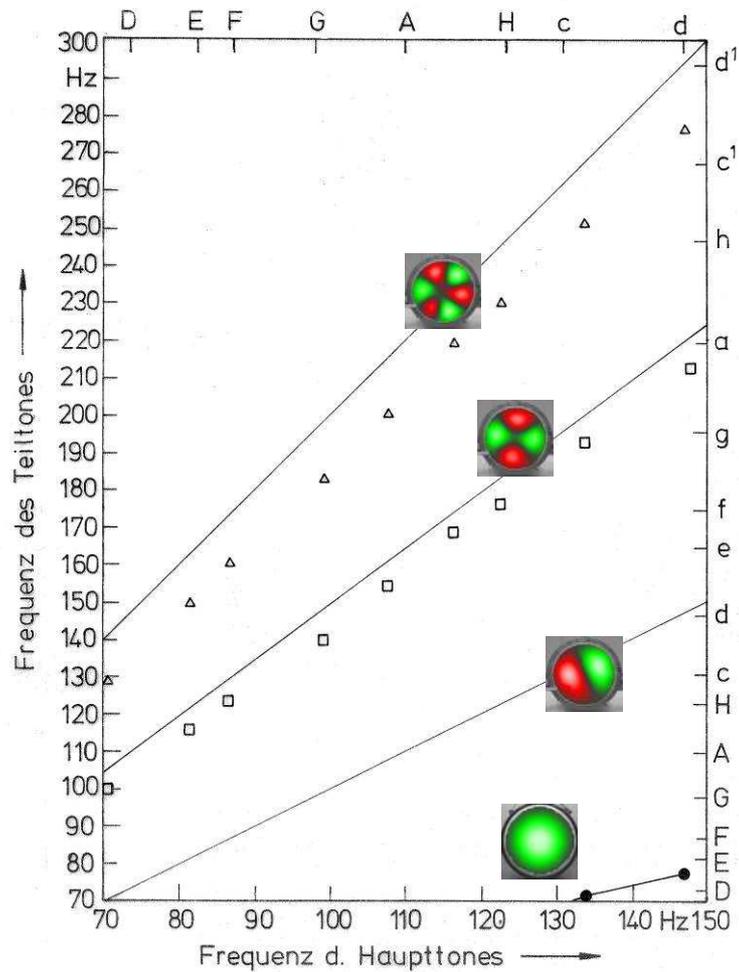


Abb. 7.6. Frequenzen der Quinte (Quadrate), Oktave (Dreiecke) und des 01-Tones (gefüllte Kreise) als Funktion der Frequenz  $f_{HT}$  des Haupttones im Stimmbereich der großen Pauke mit Kunstfell und ohne Kessel. Die Geraden stehen für Hauptton (unten) sowie reine Quint ( $1,5 f_{HT}$ ) und Oktav ( $2 f_{HT}$ ). Die zugehörigen Schwingungsformen des Felles sind eingefügt

## 7.2.2. Der Kessel ist eingebaut

Erwartungsgemäß ändert sich dieses Bild nachhaltig, sobald der Kessel eingesetzt worden ist und das Instrument sich im regulären Spielzustand befindet. Abb. 7.7 zeigt die große Kolberg-Pauke mit dem Kessel B. Auf dem Fell liegen die Filzschlegel. Mit einem davon wurde das Kunstfell angeschlagen und die Frequenzen der Teiltöne mittels FFT-Analyse bestimmt. Die Ergebnisse sind auf die übliche Art in Abb. 7.8 zusammen gestellt.



*Abb. 7.7. Große Pauke mit Kessel B.*

Die experimentellen Resultate, die man für die komplette Pauke mit Kessel (Abb. 7.7) erhält, sind in Abb. 7.8 zusammen gestellt; vgl. auch Abb. 6.10. Der Stimmbereich ist derselbe wie in Abb. 7.6. Sobald der Kessel eingesetzt ist, kommt die Quinte dem exakten Intervall  $2 : 3$  sehr nahe. Analoges gilt für die Oktave, deren Frequenz manchmal etwas kleiner, meist aber praktisch ebenso groß wie die doppelte Haupttonfrequenz ist. Der 01-Ton (hervorgehoben durch das Schwingungsbild) liegt bei tiefer Stimmung oberhalb des Haupttones, bei mittlerer Stimmung nahe beim Hauptton und lediglich bei sehr hoher Stimmung unterhalb. Erst wenn das Fell höher als auf die Note A (Hauptton bei 110 Hz) gestimmt ist, wird die Frequenz des 01-Tones allmählich kleiner als die des Haupttones.

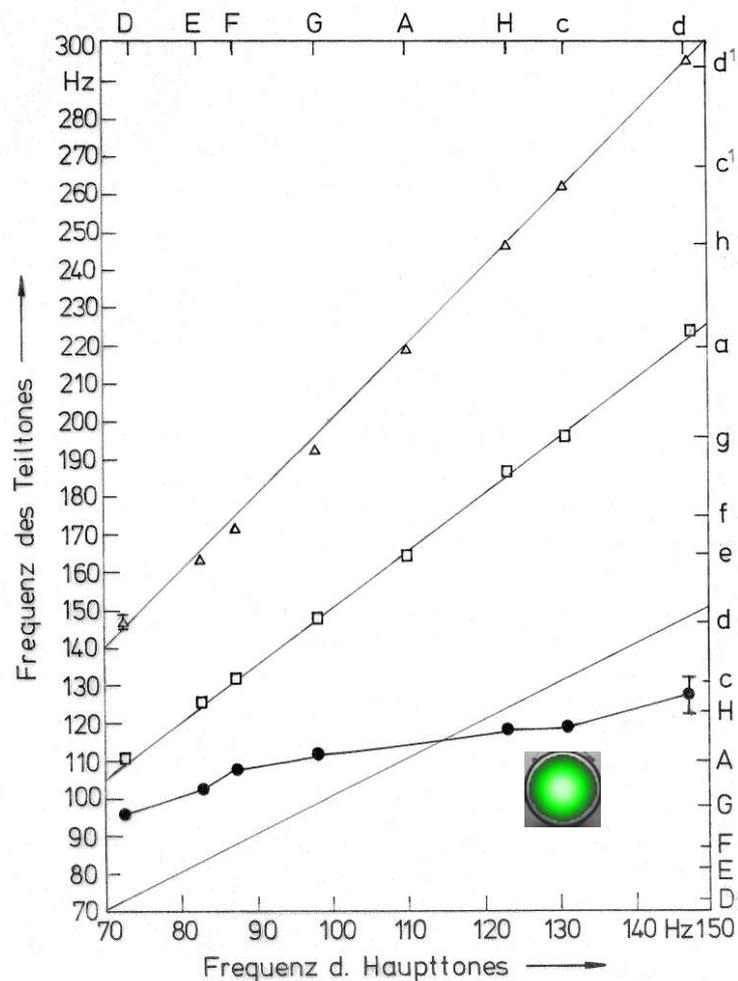


Abb. 7.8. Frequenzen der Quinte (Quadrate), Oktave (Dreiecke) und des 01-Tones (gefüllte Kreise) als Funktion der Frequenz  $f_{HT}$  des Haupttones im Stimmbereich der großen Pauke mit Kunstfell und mit Kessel B. Die Geraden stehen für Hauptton (unten) sowie reine Quint ( $1,5 f_{HT}$ ) und Oktav ( $2 f_{HT}$ ). Die Form der 01-Schwingung ist eingefügt.

### 7.3. Zusammenfassende Bemerkung

Dadurch, dass er die Vorder- von der Rückseite des Felles trennt, beeinflusst der Kessel die Abstrahlung von Schall. Er verändert die Strahlungsimpedanz bzw. den Abstrahlgrad des Paukenfelles. Die mechanische Energie, die der Spieler beim Anschlagen mit dem Schlegel auf das Fell überträgt, wird mit Kessel effektiver ins Schallfeld abgegeben als ohne Kessel. Dadurch wird der Paukenschlag lauter, aber auch kürzer. Der Musiker sagt, er steht nicht mehr so lange, wie er das ohne Kessel täte. Auf diesen Effekt ist bereits in früheren Arbeiten (Fleischer 2008a und b) eingegangen worden. Er wird hier nicht noch einmal behandelt.

Im vorliegenden Kapitel ist vielmehr untersucht worden, welchen Einfluss die Luft, die der Kessel einschließt, auf die Frequenzen der Fellschwingung hat. Zwei unterschiedlich große Pauken wurden einmal mit Kessel, einmal ohne Kessel betrieben und die Frequenzen der Teiltöne gemessen. Hierbei traten zwei wesentliche Auswirkungen klar zutage, die der Kessel auf die Teilton-Frequenzen hat:

- Der Kessel bewirkt, dass die klangbildenden Teiltöne sich den Quint- und Oktavintervallen weitgehend annähern. Dies ist äußerst erstaunlich, da die Frequenzverhältnisse

der Teilschwingungen des Felles an sich absolut unharmonisch liegen. Bei der idealen Membran sind sie durch die Nullstellen von Bessel-Funktionen gegeben. Die Ursache für die Abweichungen ist, dass sich das Fell nicht – wie in der Theorie angenommen – im Vakuum, sondern in Luft bewegt. Neben der Luft vor dem Fell wirkt insbesondere die Masse der Luft im Kessel, die das Fell an seiner Rückseite mitbewegt, auf die Schwingungen des Felles. Dies hat die musikalisch äußerst erwünschte Folge, dass die Frequenzverhältnisse der klangbildenden Schwingungen sich zu einer nahezu harmonischen Tonfolge ordnen.

- Es gibt allerdings eine markante Ausnahme: Die vom Kessel umschlossene Luft wirkt dann nicht wie eine Masse, sondern wie eine Feder, wenn sie komprimiert wird. Dies ist lediglich bei der symmetrischen 01-Form der Fall. Diese Steifigkeit der Luft, die sich im Kessel befindet, hebt die Frequenz der 01-Schwingung an. Die zugehörige Schwingung ruft einen Teilton hervor, der sich nicht in das harmonische Raster der klangbildenden Töne einfügt. Unter dem Einfluss der Steifigkeit der Luft im Kessel erhöht sich die Frequenz dieser Schwingung, so dass sie größer als die des Haupttones werden kann. Der unerwünschte Ton wird dann maskiert und wirkt sich nicht auf das Hören aus. Jedoch gelingt dies nicht im gesamten Stimmbereich einer Orchesterpauke. Wird das Fell zu hoch gestimmt, dann ist der 01-Ton der tiefste Teilton.

Damit ist der Einfluss, den die Luft im Kessel ausübt, im Prinzip klar. Das Ausmaß der Beeinflussung wurde allerdings noch nicht im Detail untersucht. Um zu klären, welche Rolle das Volumen der im Kessel befindlichen Luft auf die Frequenzen der Teiltöne hat, wurden weitere Studien durchgeführt, bei denen das Luftvolumen schrittweise verändert wurde.

## 8. KLEINE WASSERPAUKE

Wie bereits im vorherigen Kapitel betont wurde, spielt die im Kessel eingeschlossene Luft eine wichtige Rolle für die Frequenzen der Fellschwingungen und damit der Teiltöne. Im vorliegenden Kapitel wird beschrieben, wie das „aktive“ Volumen des Kessels durch Einfüllen von Wasser verringert wurde und die Frequenz des 01-Tones sowie die Intervalle der klangbildenden Teiltöne untersucht wurden.

### 8.1. Vorgehen bei der Variation des Kesselvolumens

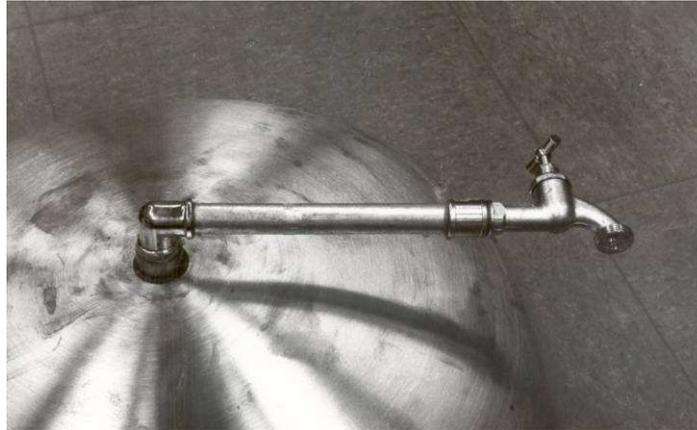
#### 8.1.1. Verringerung des Volumens

Allen bisherigen Überlegungen zufolge spielt die Luft auf der Rückseite des Felles eine große Rolle. Um deren Volumen kontrolliert verkleinern zu können, wurde der Kessel mehr oder weniger mit Wasser gefüllt. Abb. 8.1 lässt am Beispiel der großen Pauke erkennen, wie dies im Einzelnen bewerkstelligt wurde. Bei der kleinen Pauke, die im vorliegenden Kapitel behandelt wird, wurde dieselbe Methode angewandt.



*Abb. 8.1. Pauke im Laborraum. Im Vordergrund links ist das abgenommene Fell mit dem Druckreifen zu erkennen.*

Abb. 8.1 zeigt die Pauke in der Gesamtschau. Links hinten ist der Wasseranschluss des Laborraumes zu erkennen. Der Druckreifen (links am Labortisch lehnd), die langen Spannschrauben (vorn auf dem Boden liegend) und das Fell (ebenfalls am Labortisch lehnd) sind abgenommen. In die Öffnung, die der Kessel am Scheitelpunkt unten aufweist, ist eine Rohrleitung mit Ablasshahn eingeschraubt und abgedichtet; Abb. 8.2 zeigt dieses Detail. Um die Anordnung fotografieren zu können, ist der Kessel aus dem Gestell genommen und umgedreht worden.



*Abb. 8.2. Unterseite des Kessels mit angeflanschter Rohrleitung und mit Absperrhahn.*

Unter Zuhilfenahme von Eimern wurde der am unteren Ende dicht verschlossene Kessel zunächst vollständig mit Wasser gefüllt. Bei der kleinen Pauke waren hierzu 91 l Wasser nötig. Nachdem der Kessel bis zum Rand gefüllt war, wurde der Hahn gezielt geöffnet, Wasser über den Schlauch abgelassen und gewogen. Aus der Menge des abgelassenen Wassers konnte auf das Volumen der Luft zwischen Fell und Kessel geschlossen werden.



*Abb. 8.3. Blick in den Kessel bei abgenommenem Fell. Die spiegelnde Oberfläche des Wassers ist zu erkennen.*

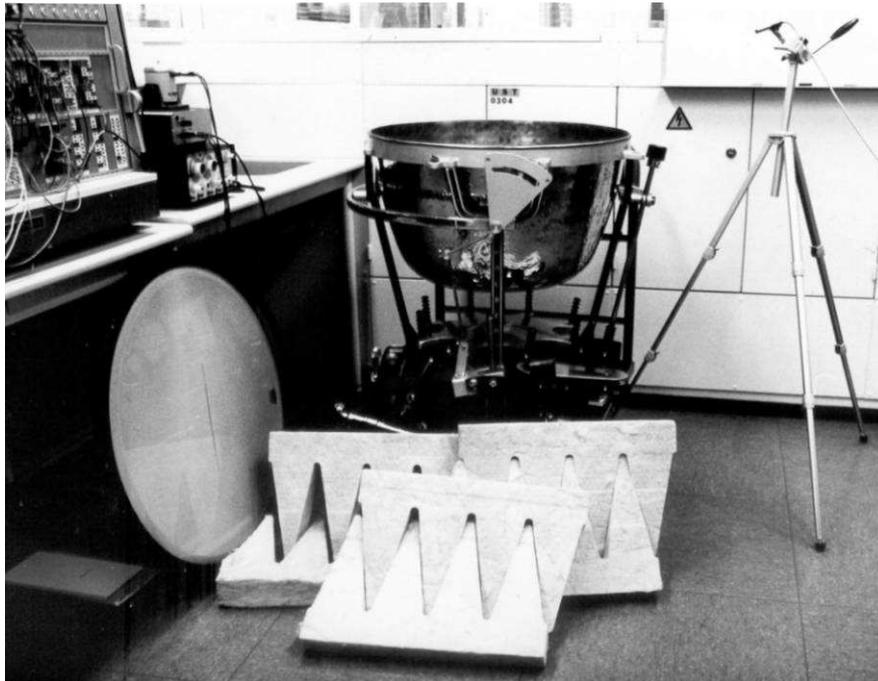
Abb. 8.3 gibt den Kessel wieder, wie er teilweise gefüllt ist. Das Fell wurde wieder montiert und gespannt. Auf diese Weise war es möglich, den Rauminhalt der Luft zwischen Fell, Wasserspiegel und nicht benetzter Kesselwandung beliebig einzustellen. Wenn die Pauke wieder in spielbereitem Zustand war, wurde sie gestimmt. Für jede Note im vorgesehenen Bereich wurden die Frequenzen des Haupttones, der Quinte, des Oktave und des 01-Tones gemessen.

### **8.1.2. „Vergrößerung“ des Volumens**

Naturgemäß ist der maximale Rauminhalt, der mit dieser Methode realisiert werden kann, das Volumen des leeren Kessels. Es wäre jedoch auch von Interesse zu erkunden, wie sich eine Vergrößerung des Volumens auf die Frequenzen und Intervalle der Teiltöne auswirkt. Im vorhergehenden Kapitel hatte sich gezeigt, dass der Kessel den akustischen Kurzschluss zwischen dem Schall an der Vorder- und der Rückseite des Felles verhindert. Deshalb kann man das Vo-

lumen nicht einfach dadurch sehr groß machen, dass man den Kessel entfernt. Um die Wirkung eines vergrößerten Kesselvolumens nachzubilden, wurde ein anderer Weg beschritten.

Ein Kundt'sches Rohr verhält sich bekanntlich dann so, als wäre es „unendlich lang“, wenn es mit einem vollständig absorbierenden Abschluss versehen ist. Es existieren dann ausschließlich Wellen, die von der Schallquelle fortlaufen und keine mehr, die vom Abschluss reflektiert und wieder zur Quelle zurückgeleitet werden. Diese Überlegung wurde auf den Kessel (modelliert als Kundt'sches Rohr) und das Fell (die Quelle) übertragen.



*Abb. 8.4. Pauke im Laborraum. Im Vordergrund links ist das abgenommene Fell mit dem Druckreifen zu erkennen; vor der Pauke liegen Zahnplatten aus Dämpfungsmaterial.*

Abb. 8.4 zeigt eine geöffnete Pauke, vor der Dämpfungsmaterial liegt. Dabei handelt es sich um Zahnplatten aus Mineralfaser, wie sie auch zur reflexionsmindernden Auskleidung akustischer Spezialräume verwendet werden. Die sägezahnartig strukturierte Oberfläche absorbiert akustische Energie, so dass die Zahnplatten als „akustischer Sumpf“ wirken. Die Ausbildung von stehenden Wellen und von Resonanzen wird dadurch mehr oder weniger unterbunden. Bringt man Mineralfaserplatten in den Hohlraum des Kessels ein, dann wird die Rückwirkung der eingeschlossenen Luft auf das Fell kleiner. Es werden nicht mehr die Feder- oder Masseigenschaften der Luft, sondern vielmehr die dämpfenden Eigenschaften des Fasermaterials dominieren. Dies führt zwar zum deutlich rascheren Ausschwingen des Felles (was hier nicht untersucht wurde), beeinflusst die Frequenzen der Teiltöne aber in ähnlicher Weise, wie dies ein sehr großer Kessel tun würde.

In Abb. 8.5 sind mehrere Zahnplatten in den Kessel eingebracht. Da zwei dieser Zahnplatten ohne Verschnitt aus einer Rechteckplatte gestanzt sind, lässt sich das Volumen einer Platte, ebenso wie das eines einzelnen Zahnes, leicht bestimmen. Eine jeweils unterschiedliche Menge von Dämpfungsmaterial wurde in den Kessel gelegt. Das Fell wurde über den Rand gespannt und die Spannung egalisiert. Danach wurde ebenso verfahren wie bei den bisherigen

Untersuchungen, d.h. für jede Stimmung im vorgesehenen Bereich wurden mittels FFT die Frequenzen des Haupttones, der Quinte, des Oktave und des 01-Tones ermittelt.

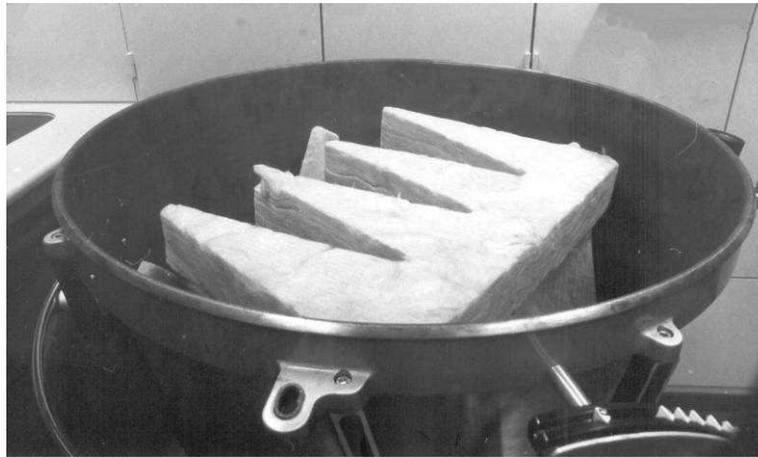


Abb. 8.5. Blick in den Kessel bei abgenommenem Fell. Das eingebrachte Dämpfungsmaterial ist zu erkennen.

## 8.2. Variation des Volumens der Luft im Kessel

Im Originalzustand hatte der Kessel der kleinen Pauke, die Abb. 8.6 zeigt, das Volumen 91 l. Durch Einfüllen von Wasser war es möglich, den Rauminhalt der eingeschlossenen Luft in engen Stufen zu verändern. Die dazu notwendige Vorrichtung ist in Abb. 8.6 zu erkennen. Zuerst wurde der am unteren Ende dicht verschlossene Kessel bis zum Rand mit 91 l Wasser gefüllt. Danach wurde durch Öffnen des Hahnes gezielt Wasser aus dem Kessel in den abgebildeten 10-l-Eimer abgelassen und gewogen. Die Menge des abgelassenen Wassers entsprach dem Volumen der Luft im Kessel.

Abb. 8.7 besteht aus zahlreichen Teildiagrammen. Die Zusammenstellungen in Abb. 8.7.a und b beziehen sich auf die eigentliche „Wasserpauke“. Hier ist das Volumen der Luft hinter dem Paukenfell tatsächlich zwischen 20 l und 91 l, was der Pauke im Originalzustand entspricht, variiert worden. Für die beiden Diagrammen von Abb. 8.7.c ist die Vergrößerung des Volumens zwar nicht realisiert, mittels Dämpfungsmaterials jedoch simuliert worden. Die Messwerte lassen die Tendenz erkennen, dass das Einbringen des dämpfenden Materials tatsächlich Auswirkungen zeigt, wie sie bei einer Vergrößerung des Kessels zu erwarten sind.

In Hinsicht auf die Quinte und die Oktave besagen die beiden ersten Diagramme (20 l und 40 l Luft; Abb. 8.7.a), dass bei kleinem Luftvolumen die Intervalle zu groß sind. Erst wenn sich mehr Luft auf der Rückseite des Felles befindet, nähern sich die Messwerte den Geraden für das exakte Quint- bzw. Oktavintervall und werden dann sogar kleiner. Dies gilt auch dann noch, wenn wenig Dämpfungsmaterial (12 l; Abb. 8.7.c links) im Kessel ist. Wenn sich 32 l dämpfendes Material im Kessel befindet (Abb. 8.7.c rechts), werden die Intervalle wieder deutlich größer, als es den anzustrebenden Verhältnissen entsprechen würde.

Die Frequenz des 01-Tones steigt in allen Fällen beim Höherstimmen des Felles an, allerdings in geringerem Maße als die der übrigen Teiltöne. In aller Regel schneidet die Messkurve für den 01-Ton Kurven für andere Teiltöne. Während die Luft im Kessel die Intervalle der klangbildenden Teiltöne zwar merklich, aber nicht sehr stark verschiebt, zeigt sich beim 01-Ton ein dramatischer Einfluss. In hohem Maße wirkt sich das Volumen der Luft auf das Niveau der



*Abb. 8.6. Kleine „Wasserpauke“; im Vordergrund ist der Eimer, in den das Wasser aus dem Kessel über den Schlauch abgelassen werden konnte.*

01-Frequenz aus: Ist das Luftvolumen sehr klein (20 l Luft; Abb. 8.7.a), so liegt der 01-Ton nahe bei der Quinte. Je mehr Luft der Kessel enthält, desto niedriger wird das Niveau der 01-Frequenz. Befinden sich 32 l Dämpfungsmaterial im Kessel (Abb. 8.7.c), dann ist schließlich der 01-Ton durchgängig der tiefste Teilton. Das bedeutet: Ist wenig Luft hinter dem Fell eingeschlossen, dann hebt die zusätzliche hohe Steifigkeit die Frequenz des 01-Ton sehr stark an. Enthält der Kessel sehr viel Luft, dann hat die Luftfeder eine geringere Steifigkeit und hebt die 01-Frequenz nicht sehr stark an.

Zwei Effekte sind zu beobachten:

- Ist der Kessel zu klein oder ist er zu groß, dann sind die Intervalle der klangbildenden Teiltöne weit von den exakten Intervallen der Quint und der Oktav entfernt. Daher erscheint weder ein sehr großer, noch ein sehr kleiner Kessel als geeignet.
- Ist der Kessel sehr groß, dann wäre der 01-Ton immer der tiefste Teilton.

In Hinblick auf reine Intervalle zeichnet sich ein optimaler Bereich für das Kesselvolumen ab. Da ein zu großer Kessel in zweifacher Hinsicht ungeeignet wäre, ist bezüglich der Hörbarkeit des 01-Tones der kleinere Kessel prinzipiell zu bevorzugen.

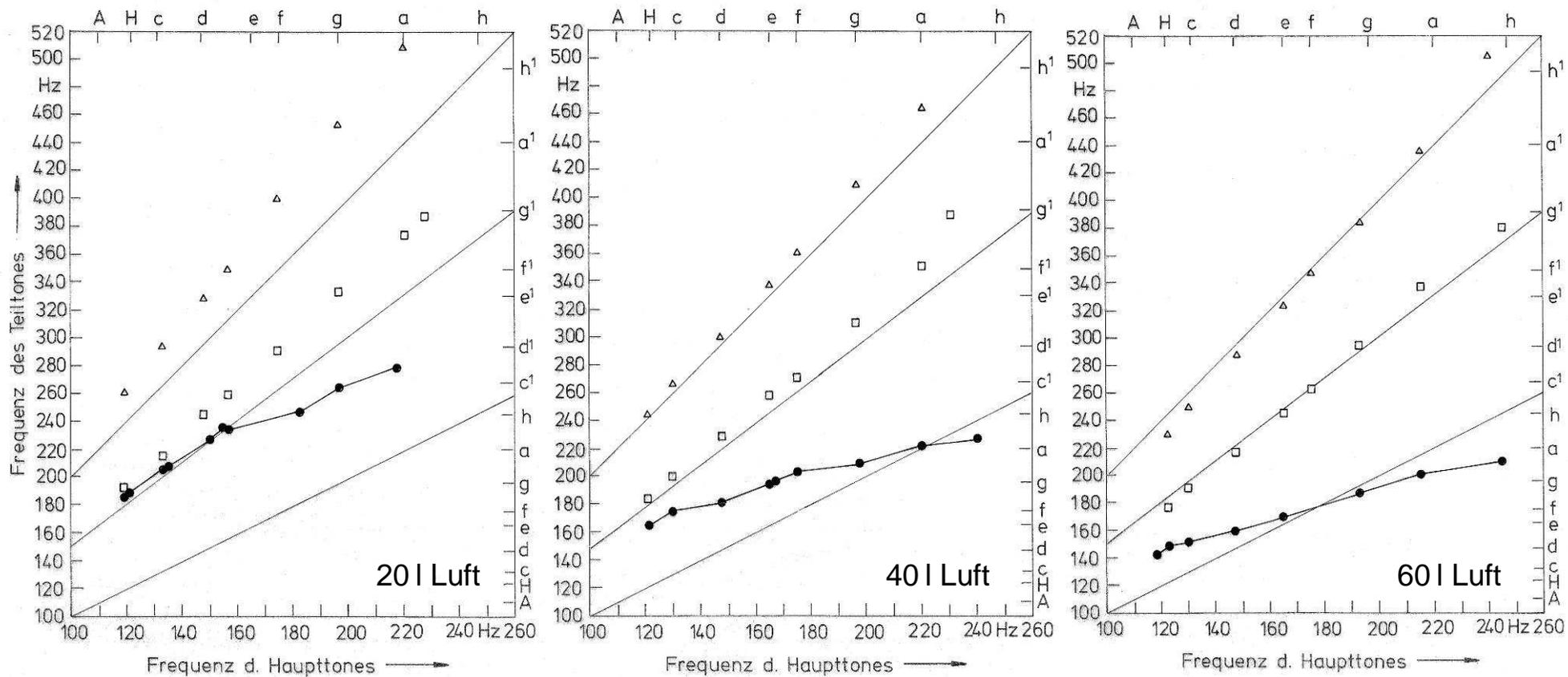


Abb. 8.7.a. Große Pauke mit unterschiedlich viel Luft im Kessel: Frequenzen der Quinte (Quadrate), Oktave (Dreiecke) und des 01-Tones (gefüllte Kreise) bei unterschiedlicher Stimmung des Felles in Abhängigkeit von der Frequenz des Haupttones.

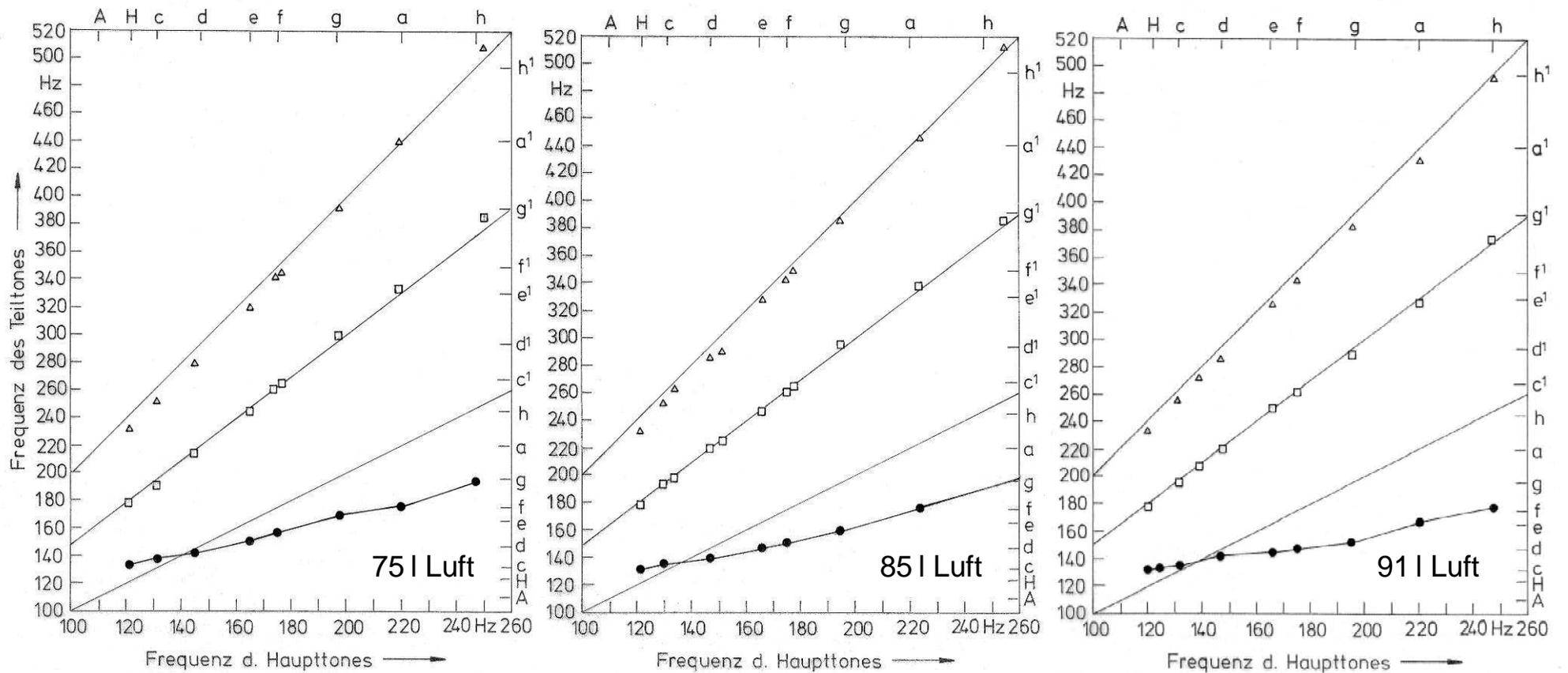


Abb. 8.7.b. Große Pauke mit unterschiedlich viel Luft im Kessel: Frequenzen der Quinte (Quadrate), Oktave (Dreiecke) und des 01-Tones (gefüllte Kreise) bei unterschiedlicher Stimmung des Felles in Abhängigkeit von der Frequenz des Haupttones.

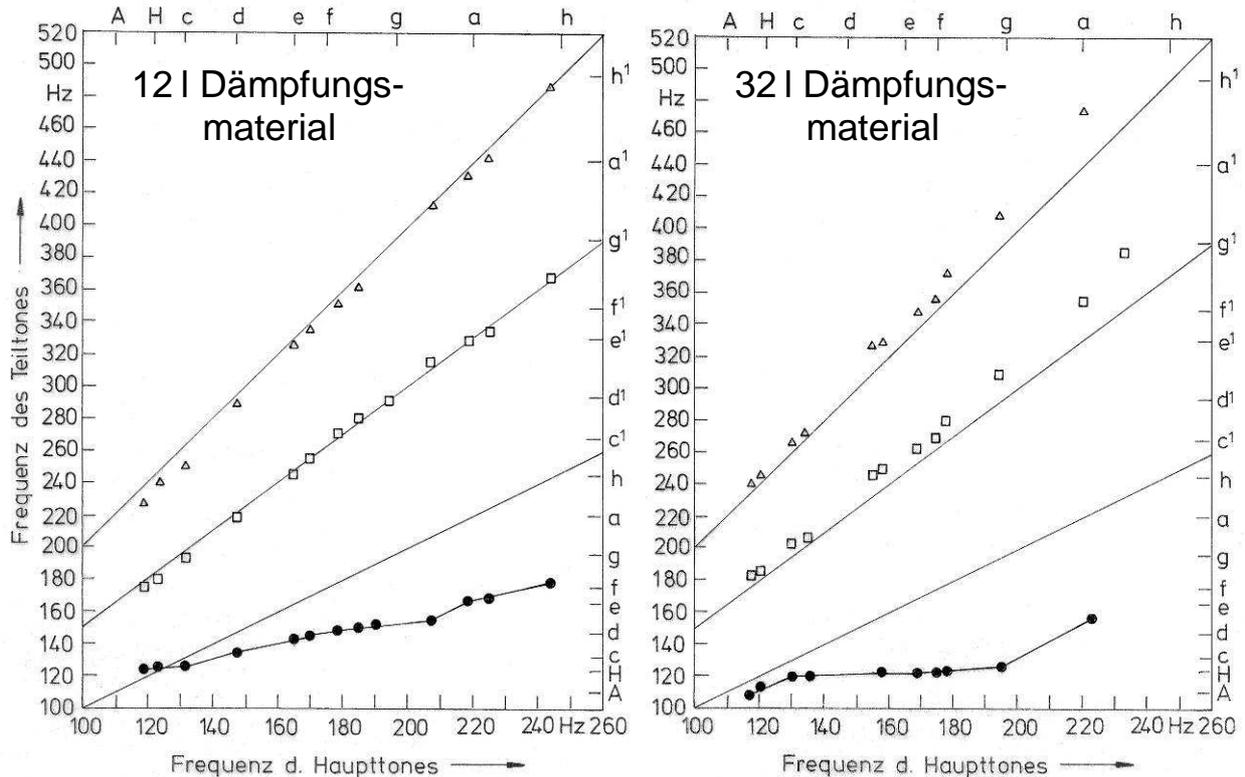


Abb. 8.7.c. Kleine Pauke mit unterschiedlich viel Dämpfungsmaterial im Kessel:  
 Frequenzen der Quinte (Quadrate), Oktave (Dreiecke) und des 01-Tones (gefüllte Kreise)  
 bei unterschiedlicher Stimmung des Felles in Abhängigkeit von der Frequenz des Haupttones.

### 8.3. Zusammenfassende Bemerkung

Diese Beobachtungen legen es nahe, nach einem Kesselvolumen zu suchen, das sich in Hinblick auf beide Kriterien als vorteilhaft erweist. Dieser Gedanke soll in der Gesamtschau der Messergebnisse am Beispiel der kleinen Pauke überprüft werden.

Wie bereits das eingefügte Schwingungsbild erkennen lässt, bezieht sich Abb. 8.8 auf den 01-Ton. Für diesen Teilton sind Messergebnisse zusammen gestellt, die den Diagrammen von Abb. 8.7 entnommen sind. Scharparameter ist das Volumen der Luft hinter dem Fell bzw. der Rauminhalt des Dämpfungsmaterials (Kennbuchstabe D) im 91-Liter-Kessel. Allen Kurven ist die Tendenz zu eigen, dass die 01-Frequenz ansteigt, wenn das Fell höher gestimmt wird.

Dass dies beim 01-Ton in geringerem Maße als beim Hauptton der Fall ist, hat seinen Grund in der unterschiedlichen Frequenzabhängigkeit der Parameter, welche die Schwingung des Felles bestimmen. Es sind dies zunächst

- die Masseigenschaften des Felles und
- die Federeigenschaften des Felles,

die nicht von der akustischen Umgebung abhängen. Daneben wirken

- die Masse der Luft, die auf der Vorderseite des Felles mitbewegt wird, und
- die Reaktion der Luft auf dessen Rückseite.

Letztere hängt ganz wesentlich davon ab, ob das Fell rückseitig offen oder durch ein begrenztes Luftvolumen abgeschlossen ist. Auf die Dämpfung im Material des Felles, an den Fügestellen, durch Schallstrahlung usw. wird hier nicht eingegangen, da ihr Einfluss auf die Frequenzen nicht sehr groß ist.

Bewegt sich das Fell in seiner rotationssymmetrischen 01-Form und ist auf der Rückseite offen (siehe Kapitel 7), erfährt es eine zusätzliche Massebelastung. Deren Ausmaß ist frequenzabhängig, führt aber immer dazu, dass das Fell mit einer kleineren Frequenz schwingt, als es ohne diesen zusätzlichen Einfluss der Fall wäre. Ist das Fell dagegen über einen Kessel gezogen, „sieht“ es auf seiner Rückseite eine zusätzliche Steifigkeit. Diese bewirkt in der Tendenz, dass das Fell schneller schwingt, als es ohne diesen zusätzlichen Einfluss der Fall wäre. Wie steif die zusätzliche Luftfeder ist, hängt von der Frequenz und vor allem vom Volumen der eingeschlossenen Luft ab.

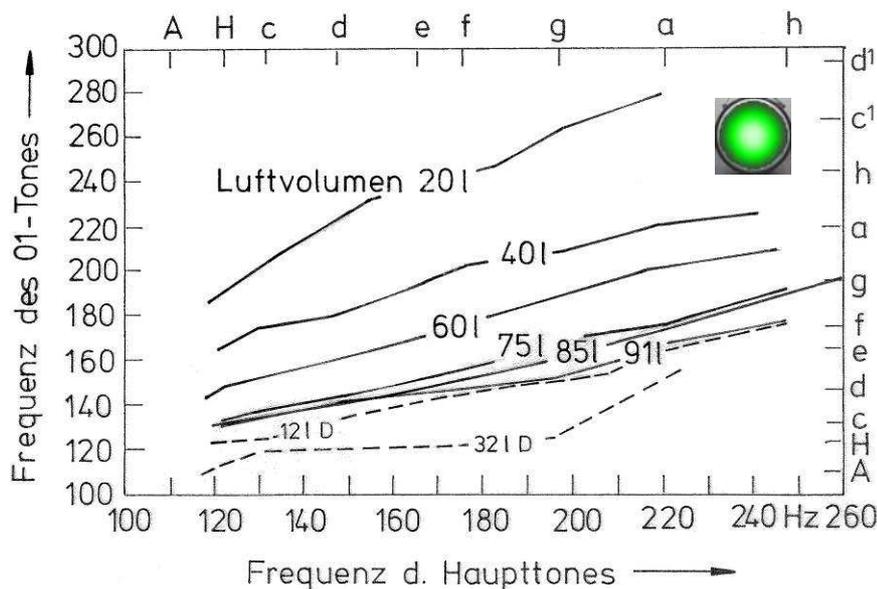


Abb. 8.8. Frequenz des 01-Tones der kleinen Pauke in Abhängigkeit von der Frequenz des Haupttones. Parameter ist das Volumen der Luft im Kessel (durchgezogen) bzw. das Volumen des eingebrachten Dämpfungsmaterials (gestrichelt).

Aus der Argumentation, dass der 01-Ton nicht in das harmonische Gefüge der klangbildenden Teiltöne passt, folgt die Forderung, dass seine Frequenz möglichst groß sein sollte. Er sollte nicht der tiefste Teilton sein, sondern nach Möglichkeit oberhalb des Haupttones liegen. Infolge der spektralen Verdeckung (Fastl und Zwicker 2007) kann er dann keine Störwirkung entfalten und folglich auch die musikalische Tonhöhe (Terhardt 1998) nicht nachteilig beeinflussen. Wie Abb. 8.8 lehrt, wären aus diesem Grunde kleine Kessel zu bevorzugen.

Allzu klein darf der Kessel allerdings auch nicht sein, da sich sonst die Intervalle der klangbildenden Teiltöne zu weit von den exakten Intervallen der Quint und der Oktav entfernen. Bei welchem Volumen die Frequenzen der drei klangbildenden Teiltöne den Intervallen 1 (Hauptton) : 1,5 (Quinte) : 2 (Oktave) am nächsten kommen, zeigt Abb. 8.9. Über dem Volumen der Luft (bzw. des Dämpfungsmaterials) im Kessel sind die Relationen der Frequenzen aufgetragen, wobei die Haupttonfrequenz als Bezug dient. Die Schwingungsbilder kennzeichnen die Messwerte, die sich um die reine Quint (strich-punktiert) bzw. die reine Oktav (gestrichelt) gruppieren. Die Quadrate gelten für eine tiefe, die Kreise für eine mittlere und die Dreiecke für eine hohe Stimmung des Felles.

Die Messpunkte für die drei unterschiedlichen Tonlagen weichen nicht sehr stark voneinander ab. In aller Regel beobachtet man, dass die Intervalle etwas größer sind, wenn die Pauke hoch gestimmt ist (Dreiecke) und etwas kleiner, wenn sie tief gestimmt wird (Quadrate). Die Messdaten liegen bei sehr kleinen Volumina (links) und mit viel Dämpfungsmaterial (rechts), was einen großen Kessel simulieren soll, höher als die anzustrebenden Werte. Dies besagt, dass die Intervalle zu weit sind. Dazwischen liegen die Messwerte tiefer, d.h. die Intervalle sind zu eng. Es gibt zwei Volumina, bei denen die Intervalle den exakten Werten sehr nahe kommen. Dies ist der Fall beim Luftvolumen 60 l bis 75 l sowie bei 15 l Dämpfungsmaterial im Kessel. Den vorher angestellten Überlegungen zum 01-Ton zufolge ist der kleinere dieser zwei möglichen Rauminhalte zu favorisieren.

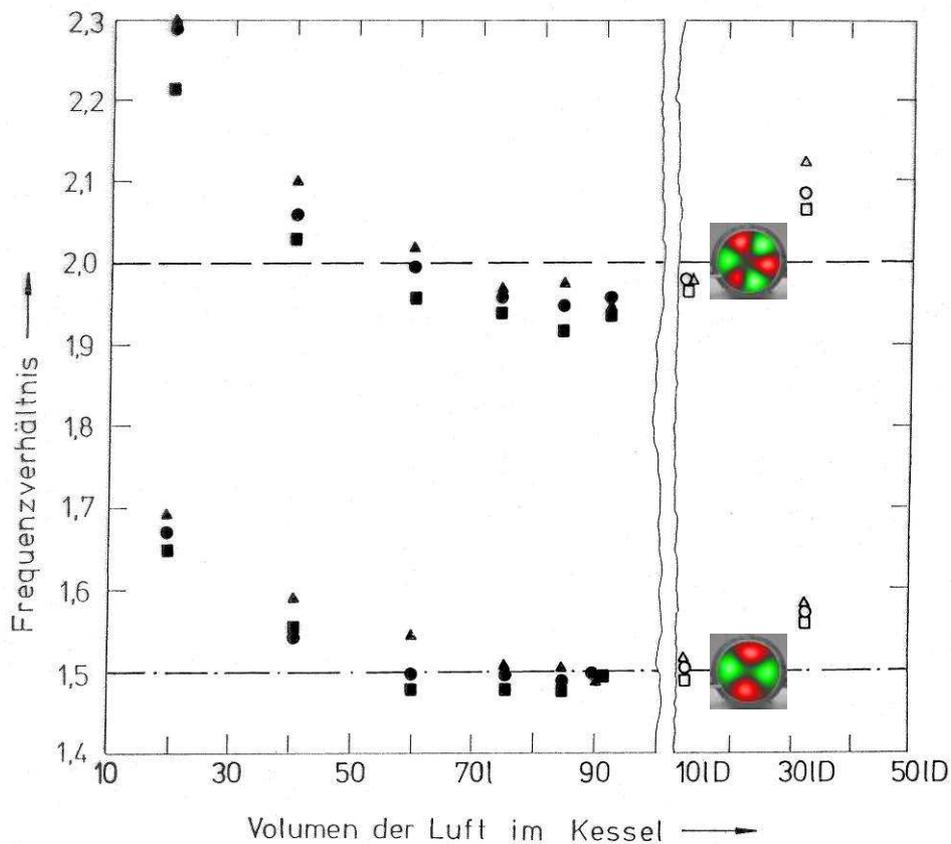


Abb. 8.9. Verhältnis der Frequenz der Quinte bzw. der Oktave zu der des Haupttones in Abhängigkeit vom Volumen der Luft im Kessel der kleinen Pauke (linker Teil; ausgefüllte Symbole) bzw. des Volumens des eingebrachten Dämpfungsmaterials (rechter Teil; leere Symbole).

Quadrate: Note d;  
Kreise: Note f;  
Dreiecke: Note a.

Das reine Quintintervall ist strich-punktiert und das reine Oktavintervall gestrichelt gezeichnet.

Wie bereits von Fleischer (1992) ausgeführt wurde, ergeben die Messungen dieses Kapitels ein optimales Volumen des Kessels zwischen 60 l und 75 l. Der 91-l-Kessel der untersuchten Pauke Nr. 4 dürfte damit um bis zu 20 l kleiner sein, ohne dass Qualitätsverluste in Bezug auf die Intervalle zu befürchten wären. Je kleiner der Kessel wird, als desto größer hat sich darüber hinaus der Bereich erwiesen, in dem der 01-Ton nicht der tiefste Teilton ist. Somit könnte der kleinere Kessel nicht nur Material, Gewicht und Kosten sparen, sondern würde zu weitgehend reinen Intervallen führen und böte zudem Vorteile hinsichtlich des 01-Tones.

## 9. GROSSE WASSERPAUKEN

Allen bisherigen Überlegungen zufolge spielt der Rauminhalt der Luft, die der Kessel einschließt, eine wichtige Rolle für die Frequenzen der Fellschwingungen und damit der Teiltöne. Um die Erkenntnisse zur Rolle des Luftvolumens zu festigen, wurden weitere Experimente durchgeführt. Wie bereits am Beispiel der kleinen Pauke gezeigt, kann das Volumen durch Einfüllen von Wasser verringert werden. Darüber hinaus wurde versucht, auch eine Vergrößerung des Volumens zu simulieren. Im vorliegenden Kapitel werden auf diese Weise die Teiltonfrequenzen der großen Pauke mit zwei unterschiedlichen Kesseln verfolgt.

### 9.1. Volumen des Kessels



*Abb. 9.1. Bestimmung des Volumens (hier: des Kessels A) durch Füllen mit Wasser und Messen der Gewichtszunahme.*

In Abb. 9.1 ist zu erkennen, wie das Volumen eines Paukenkessels gemessen wurde. Die Pauke stand auf einer Waage. Das Fell war abgenommen und der zu untersuchende Kessel in den Stützring eingehängt. Die Öffnung am tiefsten Punkt des Kessels war verschlossen. In diesem Zustand wurde die Pauke gewogen. Abb. 9.1 zeigt am Beispiel der großen Pauke mit Kessel A, wie danach der Kessel bis zum Rand mit Wasser gefüllt wurde. Das Volumen des Kessels ergab sich aus der gemessenen Zunahme des Gewichts infolge des eingefüllten Wassers.

*Tab. II. Volumina der leeren Kessel der Kolberg-Pauken*

Pauke	Große Kolberg Nr. 2			Kleine Kolberg
Kessel	A	B	C	
Volumen	142 l	143 l	133 l	91 l

In Tab. II sind die Volumina der Kessel, die auf diese Weise bestimmt wurden, noch einmal zusammen gestellt. Die drei Kessel der Pauke Nr. 2 sind in Abb. 8.2 so fotografiert, dass die Unterschiede in der Größe erkennbar werden. Der rechte Kessel C ist deutlich kleiner als die Kessel A und B, die von unterschiedlicher Form, aber etwa gleicher Größe sind.



Abb. 9.2. Kessel A (links; angeschnitten) und Kessel C (rechts; angeschnitten).

## 9.2. Variation des Volumens beim Kessel A

### 9.2.1. Einzelresultate

Der Kessel war abgedichtet. Der Rauminhalt der Luft auf der Rückseite des Felles wurde schrittweise dadurch verringert, dass der Kessel zu einem Teil mit Wasser gefüllt war. Dieses Verfahren ist in Abschnitt 8.1.1 beschrieben. Eine Vergrößerung des Volumens wurde mit Hilfe von Dämpfungsmaterial nachgebildet (siehe Abschnitt 8.1.2). Dadurch sollte erreicht werden, dass Schallwellen auf der Rückseite des Felles im „akustischen Sumpf“ verschwinden und die Luft im Kessel nur noch wenig auf das Fell zurückwirkt.

Die Messungen beziehen sich auf die Kolberg-Pauke Nr. 2 mit Kunstfell und dem großen Kessel A. Die Frequenzen des 01-Tones sowie der klangbildenden Teiltöne Quinte und Oktave sind über der Frequenz des Haupttones aufgetragen. Jedes der Diagramme in den Abb. 9.3.a und b bezieht sich auf unterschiedlich viel Wasser im Kessel. Angegeben ist jeweils der Rauminhalt der eingeschlossenen Luft, der zwischen 37 l und 142 l, was der Pauke im Originalzustand entspricht, variiert worden ist.

Bezüglich der Quinte und der Oktave zeigt vor allem das erste Diagramme (37 l Luft; Abb. 9.3a), dass bei kleinem Luftvolumen die Intervalle zu groß sind. Sobald sich etwas mehr Luft auf der Rückseite des Felles befindet, nähern sich die experimentellen Werte den Geraden für das genaue Quint- bzw. Oktavintervall immer mehr. Die weiteren Diagramme lassen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den angestrebten Intervallen erkennen.

In den drei Diagrammen von Abb. 9.3.c ist eine Vergrößerung des Volumens mittels Dämpfungsmaterials simuliert worden. Die Messwerte lassen die Tendenz erkennen, dass die Intervalle wieder umso größer werden, je mehr dämpfendes Material in den Kessel eingebracht worden ist. Diese sind dann wieder deutlich geweitet und größer, als es den exakten Verhältnissen 1 : 1,5 : 2 entsprechen würde.

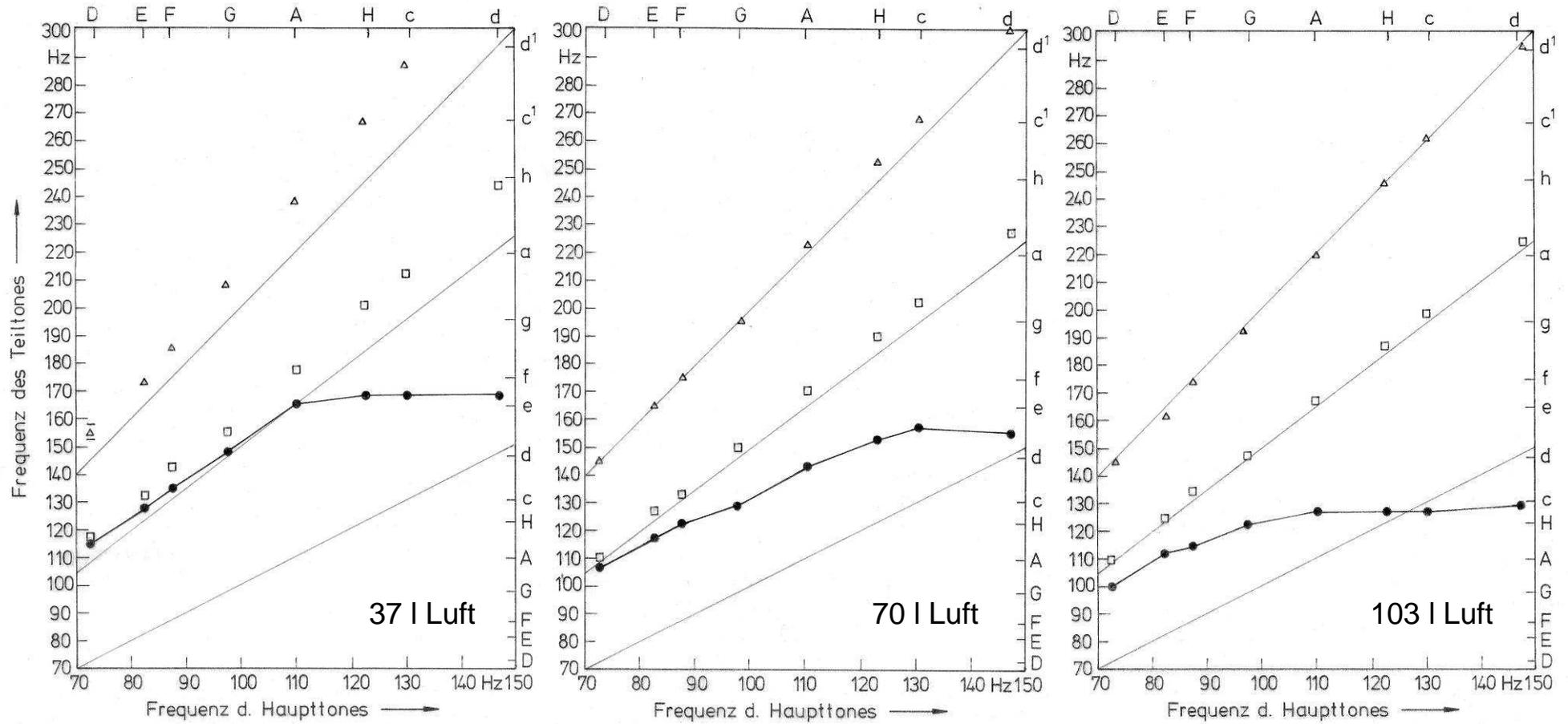


Abb. 9.3.a. Große Pauke mit Kessel A, der unterschiedlich viel Luft enthält: Frequenzen der Quinte (Quadrate), Oktave (Dreiecke) und des 01-Tones (gefüllte Kreise) bei unterschiedlicher Stimmung des Felles in Abhängigkeit von der Frequenz des Haupttones.

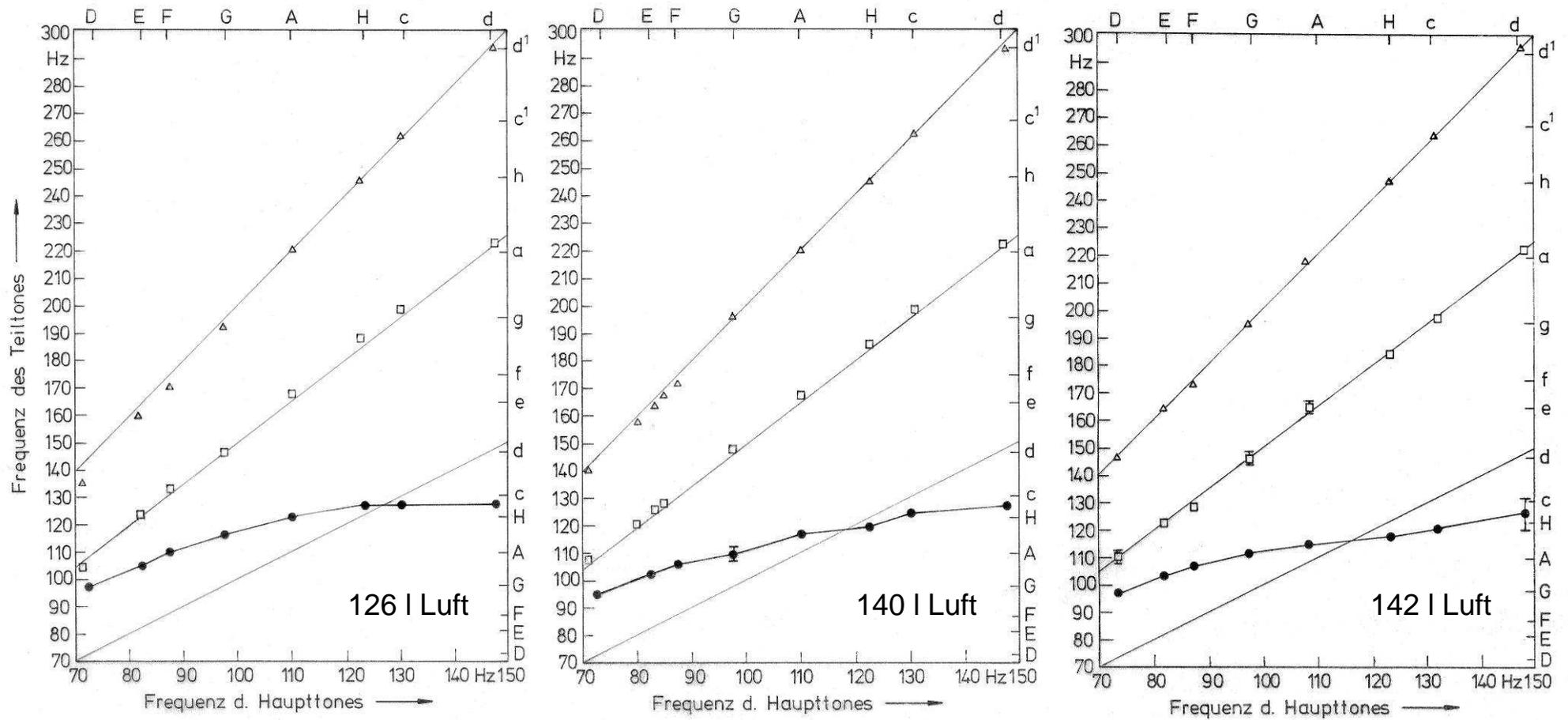


Abb. 9.3.b. Große Pauke mit Kessel A, der unterschiedlich viel Luft enthält: Frequenzen der Quinte (Quadrate), Oktave (Dreiecke) und des 01-Tones (gefüllte Kreise) bei unterschiedlicher Stimmung des Felles in Abhängigkeit von der Frequenz des Haupttones.

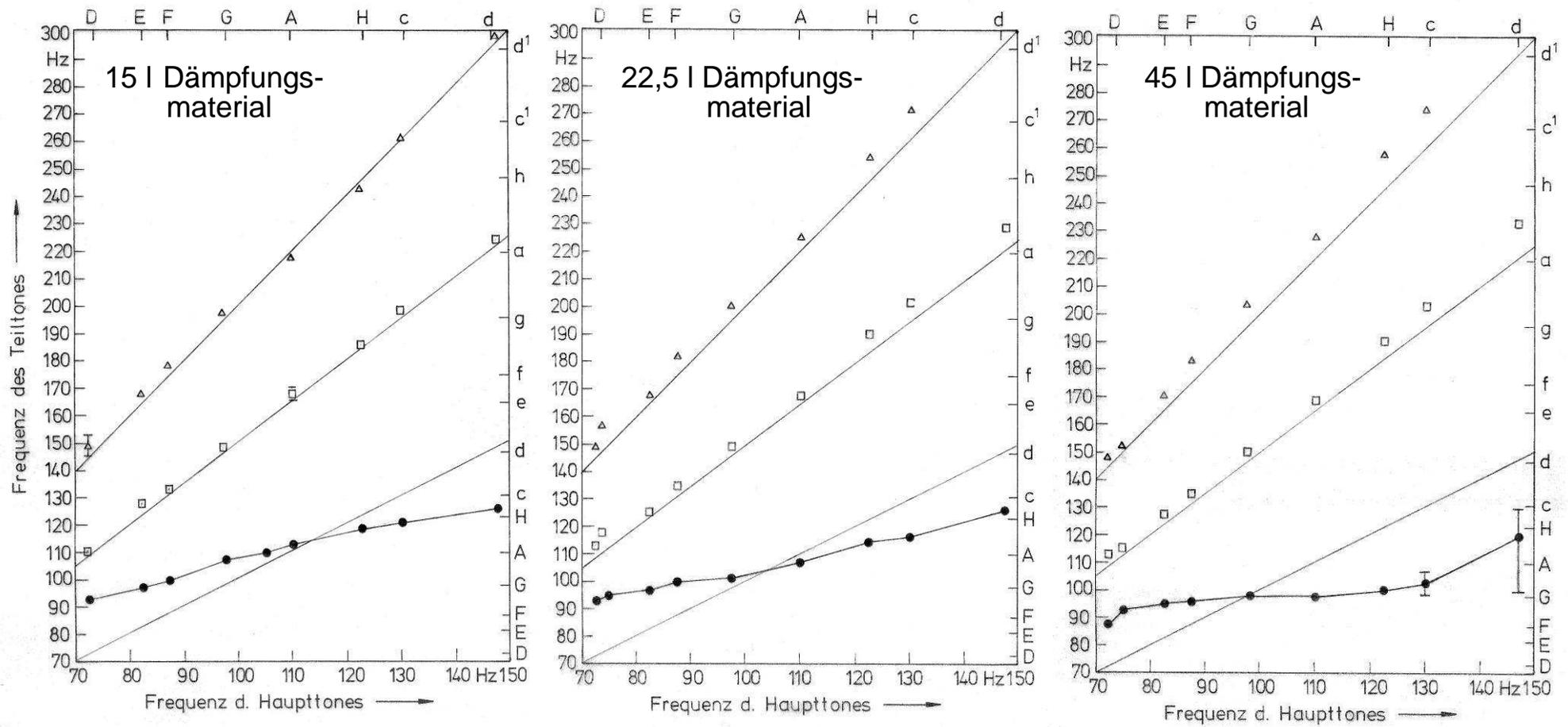


Abb. 9.3.c. Große Pauke mit Kessel A, der unterschiedlich viel Dämpfungsmaterial enthält: Frequenzen der Quinte (Quadrates), Oktave (Dreiecke) und des 01-Tones (gefüllte Kreise) bei unterschiedlicher Stimmung des Felles in Abhängigkeit von der Frequenz des Haupttones.

Sehr deutlich zeigt sich der Einfluss, den das Volumen der eingeschlossenen Luft auf den 01-Ton hat. Befinden sich 70 l oder weniger Luft im Kessel, dann hat der 01-Ton immer eine höhere Frequenz als der 11-Ton (Hauptton). Somit ist der Hauptton stets der tiefste Teilton. Je mehr Luft sich hinter dem Fell befindet, desto weniger wirkt sich deren zusätzliche Steifigkeit auf die Frequenz der 01-Schwingung aus. Mit 45 l Dämpfungsmaterial im Kessel (Abb. 9.3.c) ist schließlich der 01-Ton der tiefste Teilton, sobald der Hauptton auf eine Frequenz von mehr als etwa 100 Hz gestimmt wird. Ein Vergleich mit den Resultaten für die kleine Pauke (Abb. 8.8) zeigt hierbei einen Unterschied: Die großen Pauke erweist sich der kleinen Pauke in Hinsicht auf den 01-Ton überlegen. Sie kann in einem weiteren Bereich gestimmt werden, ohne dass der 01-Ton zum tiefsten Teilton wird.

## 9.2.2. Gesamtergebnis

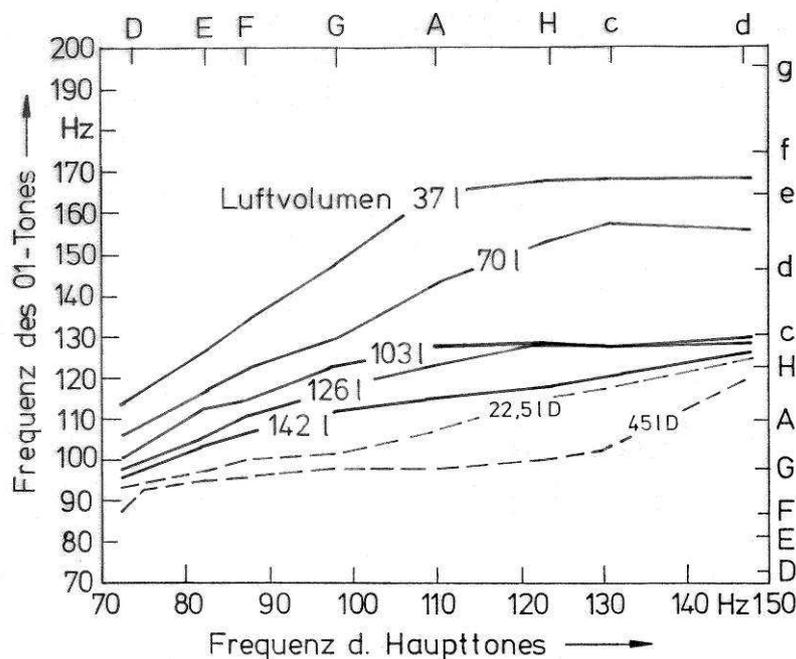


Abb. 9.4. Frequenz des 01-Tones der großen Pauke mit Kessel A in Abhängigkeit von der Frequenz des Haupttones. Parameter ist das Volumen der Luft im Kessel (durchgezogen) bzw. das Volumen des eingebrachten Dämpfungsmaterials (gestrichelt).

Abb. 9.4 fasst die Ergebnisse zur Frequenz des 01-Tones zusammen. Diese ist als Funktion der Haupttonfrequenz aufgetragen, wofür das Volumen der Luft bzw. des Dämpfungsmaterials als Parameter fungiert. Je mehr Luft sich im Kessel befindet, umso tiefer liegt der 01-Ton und desto weniger hängt seine Frequenz von der Stimmung des Felles ab. Auch hier führt die Überlegung, dass der 01-Ton nicht der tiefste Teilton sein sollte, zu der Prämisse, so wenig Luft wie möglich im Kessel einzuschließen.

Abb. 9.5 kann entnommen werden, bei welchem Volumen die Frequenzen der drei klangbildenden Teiltöne den exakten Intervallen 1 : 1,5 : 2 am nächsten kommen. In Abhängigkeit vom Rauminhalt der Luft (bzw. des Dämpfungsmaterials) im Kessel sind die Frequenzverhältnisse aufgetragen. Auch hier dient der Hauptton als Referenz. Die waagerechten Geraden stehen für die reine Quint (strich-punktiert) bzw. die reine Oktav (gestrichelt). Die Quadrate beziehen sich auf eine tiefe Stimmung, die Kreise auf eine mittlere und die Dreiecke auf eine

hohe Stimmung des Felles. Zusätzlich zu den Messungen, die in diesem Kapitel beschrieben sind, konnte auch ein Experiment in den Räumen der Firma Kolberg Percussion in Uhingen durchgeführt werden. Der Kessel einer großen Orchesterpauke wurde sukzessive mit Wasser gefüllt und das Volumen der Luft von 143 l in Stufen auf 63 l verringert. Die leeren Sechsecke in Abb. 9.5 repräsentieren diese Ergebnisse.

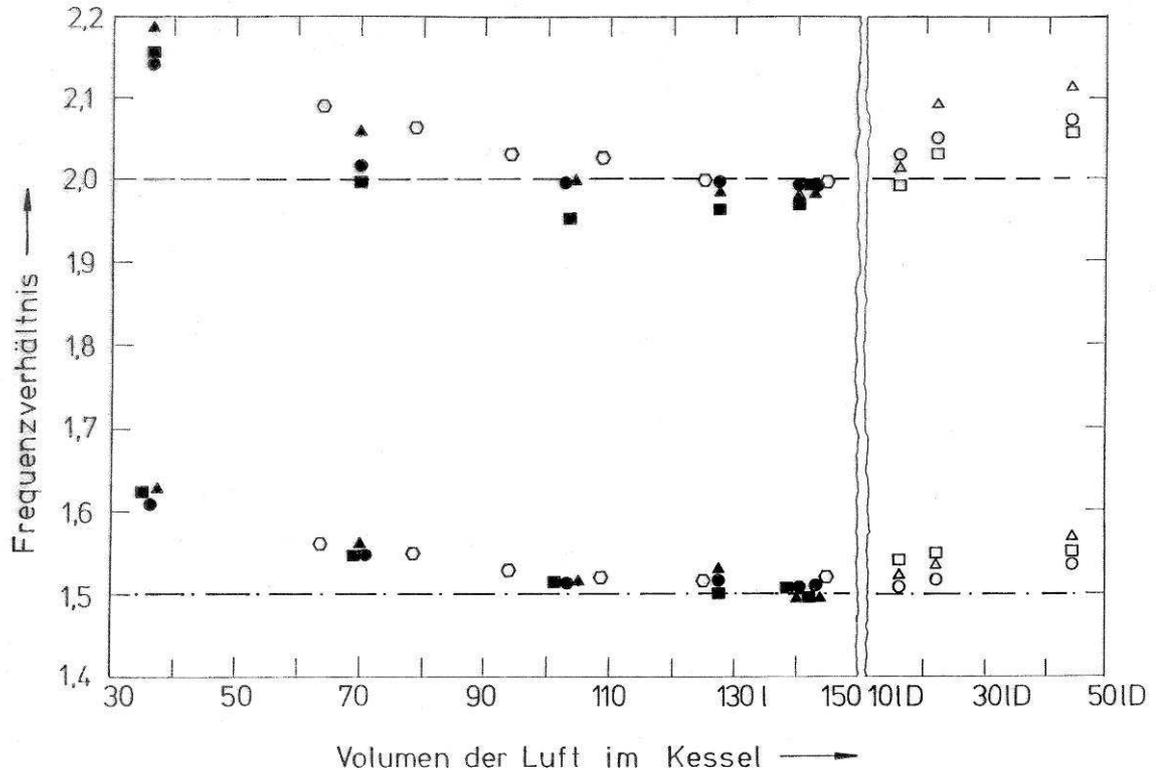


Abb. 9.5. Verhältnis der Frequenz der Quinte bzw. der Oktave und des Haupttones in Abhängigkeit vom Volumen der Luft im Kessel der Pauke mit Kessel A (linker Teil; ausgefüllte Symbole) bzw. des Volumens des eingebrachten Dämpfungsmaterials (rechter Teil; leere Symbole).

Quadrate: Note E;

Kreise: Note A;

Dreiecke: Note c;

Sechsecke: Note A; Messung in Uhingen.

Das reine Quintintervall ist strich-punktiert und das reine Oktavintervall gestrichelt.

Bei der Quinte differieren die Messpunkte für die drei unterschiedlichen Tonlagen nur sehr wenig. Bei der Oktave zeigen sich dagegen etwas größere Abweichungen. Die Messdaten liegen bei kleinem Volumen (links) und nach Einbringen von viel Dämpfungsmaterial (rechts) höher als die anzustrebenden Werte. Demnach sind die Intervalle der klangbildenden Teiltöne zu weit. Bei mittleren Volumina „hängen die Messkurven durch“, d.h. die Intervalle sind hier enger. In einem ziemlich weiten Bereich des Volumens kommen die gemessenen Intervalle den exakten Werten sehr nahe. Ein hinreichend genaues Oktavintervall ist für Volumina zwischen etwa 130 l und 150 l zu erwarten. Hinsichtlich der Quinte erweisen sich etwa 100 l bis 150 l als optimal. Bei zwei Möglichkeiten ist im Hinblick auf die potentielle Störwirkung des 01-Tones ist ein möglichst kleiner Rauminhalt zu favorisieren. Es spricht demzufolge nichts dagegen, die Pauke Nr. 2 mit einem Kessel zu betreiben, der weniger als 142 l Volumen hat. Die Ergebnisse der Messungen mit dem Kessel C (Volumen 133 l; vgl. Abschnitt 6.3.3) haben dies bereits bestätigt. Derzeit liegen keine Erkenntnisse vor, die gegen einen noch etwas kleineren Kessel sprechen würden.

### 9.3. Variation des Volumens beim Kessel C

Dies soll anhand zusätzlicher Messungen mit dem Kessel C weiter überprüft werden, der das kleinste Volumen der Originalkessel aufweist. Die Vorgehensweise war dieselbe, wie in Kapitel 8 beschrieben. Der Kessel war zunächst mit 92 l Wasser gefüllt, so dass 41 l Luft hinter dem Fell eingeschlossen waren. Über die Rohrleitung mit Absperrhahn, die an der Öffnung am unteren Ende angeflanscht war, konnte Wasser abgelassen werden. Der Rauminhalt der Luft wurde schrittweise dadurch vergrößert, dass der Hahn geöffnet und die Menge des Wassers im Kessel verkleinert wurde.

#### 9.3.1. Einzelresultate

Abb. 9.6 zeigt die einzelnen Ergebnisse. Befand sich die Pauke im originalen Zustand, d.h. wenn sie leer war, enthielt der Kessel 133 l Luft. Das mittlere Diagramm von Abb. 9.6b bezieht sich auf diese Situation. Einfüllen von Wasser verringerte das Volumen der Luft, Einbringen von Dämpfungsmaterial sollte eine Vergrößerung des Volumens simulieren. Vier Diagramme (Abb. 9.6a und 9.6b links) gelten für verkleinertes Volumen, ein Diagramm für Dämpfungsmaterial im Kessel (Abb. 9.6b rechts) und ein Diagramm (Abb. 9.6ab Mitte) für den Kessel ohne Wasser und ohne Dämpfungsmaterial. Im Gegensatz zum üblichen Spielbetrieb war allerdings bei dieser Messung die kleine Öffnung im Kessel verschlossen.

Die Untersuchungen mit dem kleineren Paukenkessel bestätigen die Erkenntnisse von Abschnitt 9.2 im Wesentlichen. In Abb. 9.6 sind wiederum die Frequenzen der klangbildenden Teiltöne sowie des 01-Tones als Funktion der Frequenz des Haupttones aufgetragen. Hinsichtlich der Quinte und der Oktave belegen die beiden ersten Diagramme (41 l und 74 l Luft; Abb. 9.6.a), dass die Intervalle dann zu groß sind, wenn sehr wenig Luft auf der Rückseite des Felles eingeschlossen ist. Sobald sich dort etwas mehr Luft befindet, nähern sich die gemessenen Werte den Geraden für das exakte Quint- bzw. Oktavintervall. Die weiteren Diagramme lassen eine weitgehende Übereinstimmung zwischen den experimentellen und den angestrebten Intervallen erkennen. Abweichungen, die zwischen benachbarten Messergebnissen in einigen Diagrammen zu beobachten sind, rühren daher, dass mehrere Versuchsreihen durchgeführt worden sind, bei denen jeweils etwas andere Haupttonfrequenzen eingestellt waren. Dass sich bei Verfahren wie der FFT, die mit Diskretisierung arbeiten, als Folge der Rasterung der Frequenzwerte Diskrepanzen ergeben können, lässt sich nicht vermeiden.

Im rechten Diagramm von Abb. 9.6.b ist eine Vergrößerung des Volumens mittels Dämpfungsmaterials nachgebildet worden. Hierbei wird wieder die Tendenz erkennbar, dass sich die Intervalle aufweiten, wenn Dämpfungsmaterial in den Kessel eingebracht worden ist. Die Intervalle sowohl der Quinte als auch der Oktave sind dann wieder größer, als es den exakten Verhältnissen entspricht.

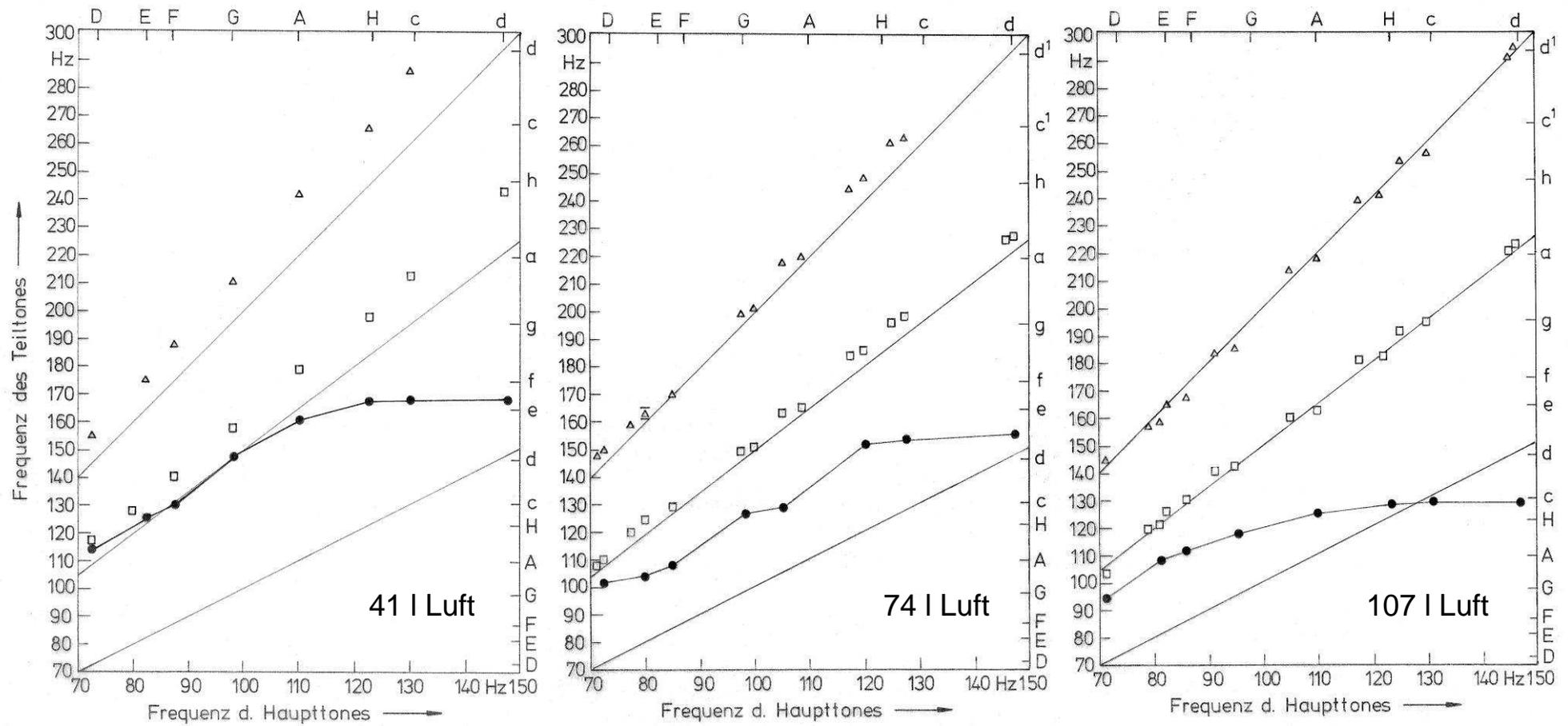


Abb. 9.6.a. Große Pauke mit Kessel C, der unterschiedlich viel Luft enthält: Frequenzen der Quinte (Quadrate), Oktave (Dreiecke) und des 01-Tones (gefüllte Kreise) bei unterschiedlicher Stimmung des Felles in Abhängigkeit von der Frequenz des Haupttones.

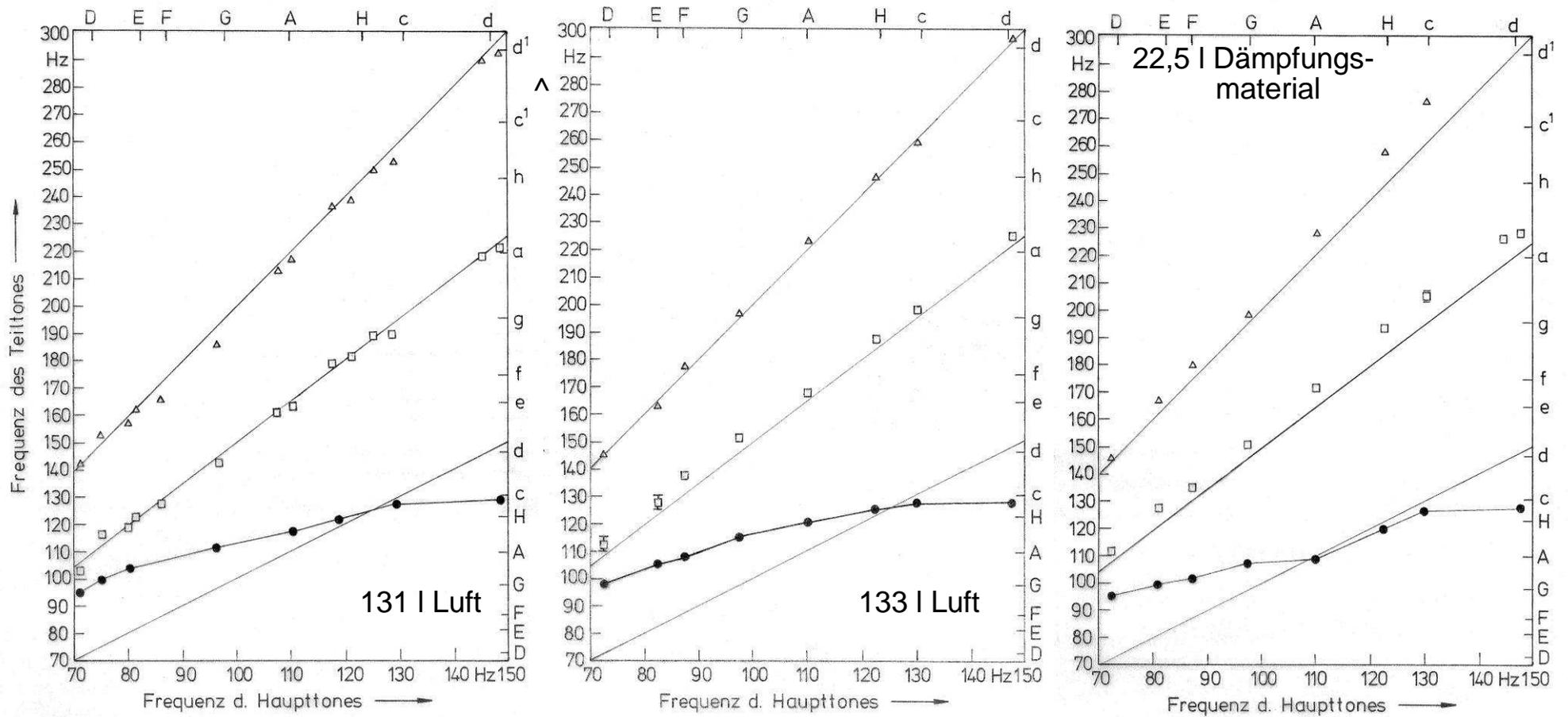


Abb. 9.6.b. Große Pauke mit Kessel C, der unterschiedlich viel Luft bzw. Dämpfungsmaterial enthält: Frequenzen der Quinte (Quadrate), Oktave (Dreiecke) und des 01-Tones (gefüllte Kreise) bei unterschiedlicher Stimmung des Felles in Abhängigkeit von der Frequenz des Haupttones.

### 9.3.2. Gesamtergebnis

Abb. 9.7 gibt wieder, wie die Frequenz des 01-Tones für verschiedene Volumina von der Frequenz des Haupttones abhängt. Sie ähnelt Abb. 9.4 und bestätigt die Weise, in welcher die 01-Frequenz vom Volumen abhängt: Je mehr Luft sich im Kessel befindet, umso tiefer liegt der 01-Ton und desto weniger hängt seine Frequenz von der Tonlage ab. Wenn angestrebt wird, dass der 01-Ton nicht der tiefste Teilton ist, folgt daraus die bereits mehrfach formulierte Forderung, dass der Kessel so wenig Luft wie möglich einschließen sollte.

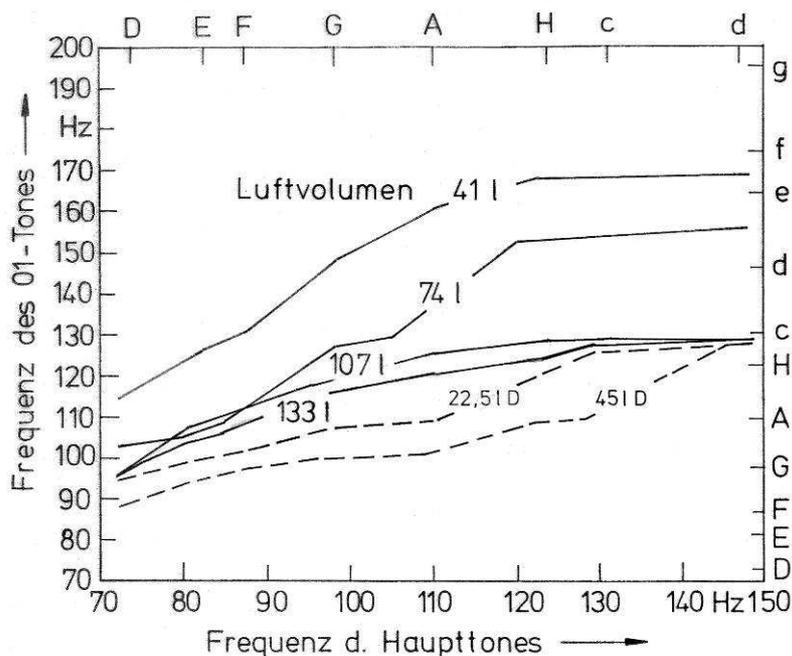


Abb. 9.7. Frequenz des 01-Tones der großen Pauke mit Kessel C in Abhängigkeit von der Frequenz des Haupttones. Parameter ist das Volumen der Luft im Kessel (durchgezogen) bzw. das Volumen des eingebrachten Dämpfungsmaterials (gestrichelt).

Abb. 9.8 bezieht sich auf die Intervalle der drei klangbildenden Teiltöne. Es sind die Frequenzverhältnisse in Abhängigkeit vom Volumen der Luft (bzw. des Dämpfungsmaterials) im Kessel aufgetragen. Die Geraden repräsentieren die reine Quint (strich-punktiert) bzw. die reine Oktav (gestrichelt), wobei wiederum der Hauptton als Referenz dient. Es ist zu entnehmen, wie die Quinte und die Oktave im Vergleich zu den exakten Intervallen 1 : 1,5 : 2 liegen. Die Quadrate beziehen sich auf eine tiefe Stimmung, die Kreise auf eine mittlere und die Dreiecke auf eine hohe Stimmung des Felles. Wie bereit erwähnt, wurde ein ergänzendes Experiment auch in den Räumen der Firma Kolberg Percussion in Uhingen durchgeführt, bei dem das Volumen der Luft im Kessel einer großen Orchesterpauke in Schritten von 143 l in Stufen auf 63 l verringert wurde. Die Ergebnisse sind als leere Sechsecke ergänzend in Abb. 9.8 eingefügt.

Bei der Quinte wie auch bei der Oktave weichen die Messpunkte für die drei unterschiedlichen Tonlagen nur wenig voneinander ab. Lediglich die Messungen an der anderen Pauke, durchgeführt in Uhingen und gekennzeichnet durch die Sechsecke, haben bei der Oktave etwas größere Intervalle als bei der Pauke mit Kessel C ergeben. Wiederum liegen die Messdaten für kleines Luftvolumen (links) und für Dämpfungsmaterial (rechts) höher als die anzustrebenden Werte. Dies besagt, dass bei zu kleinem und zu großem Kessel die Intervalle zu

weit sind. Bei mittleren Volumina werden sie enger. Die Messwerte schneiden bzw. berühren dann die Geraden und kommen den exakten Werten sehr nahe. Ein gut angenähertes Oktavintervall kann für Rauminhalte zwischen etwa 130 l und 150 l erwartet werden. In Bezug auf die Quinte erweisen sich etwa 120 l bis 150 l als vorteilhaft.

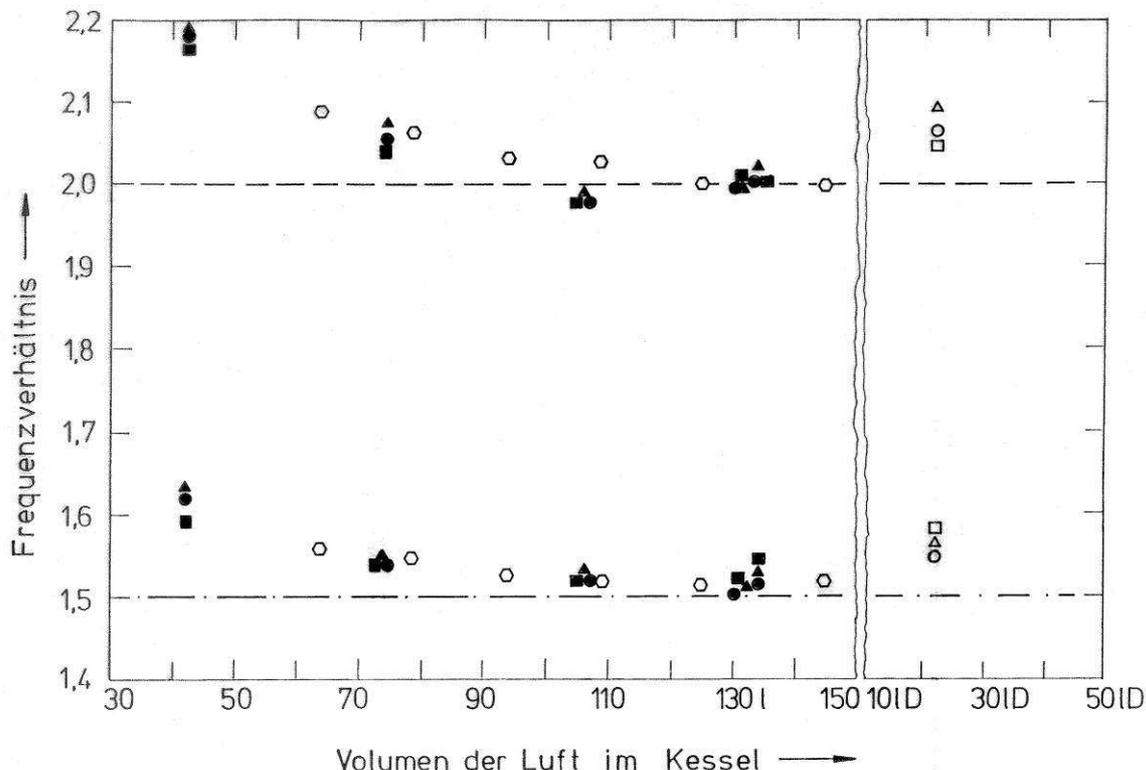


Abb. 9.8. Verhältnis der Frequenz der Quinte bzw. der Oktave und des Haupttones in Abhängigkeit vom Volumen der Luft im Kessel der Pauke mit Kessel C (linker Teil; ausgefüllte Symbole) bzw. des Volumens des eingebrachten Dämpfungsmaterials (rechter Teil; leere Symbole).

Quadrate: Note E;  
 Kreise: Note A;  
 Dreiecke: Note c;  
 Sechsecke: Note A; Messung in Uhingen.

Das reine Quintintervall ist strich-punktiert und das reine Oktavintervall gestrichelt.

Diese Untersuchungen münden in die Empfehlung, die große Pauke mit einem Kessel zu betreiben, der etwa zwischen 130 und 150 l Volumen hat. Um eine mögliche Störwirkung des 01-Tones zu vermeiden, ist der Rauminhalt klein zu wählen. Die Ergebnisse der Messungen mit dem Kessel C (Volumen 133 l) bestätigen im Vergleich mit den Kesseln A (143 l) und B (142 l), dass sich mit einem kleineren Volumen durchaus brauchbare Ergebnisse erzielen lassen.

## 9.4. Zusammenfassende Bemerkung

Die Luft, die der Kessel auf der Rückseite des Felles einschließt, kann sich auf die Fellschwingungen in zweierlei Weise auswirken:

- Als Zusatzmasse kann sie die Schwingungen des Felles verlangsamen oder
- als Zusatzfeder dessen Schwingungen schneller machen.

Als Masse wirkt sie dann, wenn das Fell in der betreffenden Schwingungsform das Verschiebungsvolumen Null hat und zwischen gegenphasig schwingenden Bereichen des Felles Luft „hin- und hergeschaukelt“ wird. Dies trifft auf die Mehrzahl aller Fälle zu, insbesondere auf diejenigen Moden, welche die klangbildenden Teiltöne hervorrufen. Eine markante Ausnahme bildet die erste rotationssymmetrische Schwingung, die lediglich an der Einspannung einen Knotenkreis aufweist. Da diese 01-Mode keinen Knotendurchmesser ausbildet, ist das Verschiebungsvolumen von Null verschieden: Das Fell drückt die Luft im Kessel zusammen, worauf diese wie eine Feder reagiert.

Sämtliche bisherigen Untersuchungen haben ergeben, dass die für die Musik wichtigen Teiltöne auf antimetrische Moden zurückgehen. Der Hauptton, der die musikalische Tonhöhe definiert, rührt von der 11-Mode her, die Quinte stammt von der 21-Mode und die Oktave von der 31-Mode. In manchen Fällen kann auch die Duodezime, hervorgerufen durch die 41-Mode, eine Rolle spielen. Abb. 9.9 zeigt die Bilder dieser Schwingungen in der linken Spalte; zur Ergänzung sind daneben einige weitere, musikalisch nicht genutzte Moden hinzugefügt. Dass die zugehörigen Frequenzen in Intervallen nahe  $1 : 1,5 : 2$  stehen und damit die entsprechenden Teiltöne ihre musikalischen Bezeichnungen zu Recht tragen, ist zu einem Teil auf die Massewirkung der Luft im Kessel zurückzuführen. Erst infolge der Zusatzmassen, die daraus resultieren, ordnen sich die zunächst unharmonischen Frequenzverhältnisse zu einer annähernd harmonischen Folge. Wie viel Luft zwischen Fell und Kessel mitbewegt wird, spielt demnach eine wichtige Rolle.

Links oben in Abb. 9.9 ist die erste rotationssymmetrische Schwingung dargestellt. Sie tritt immer auf, da es keinen Ort auf dem Fell gibt, an dem der Schlegel anschlagen könnte, ohne die 01-Mode anzuregen. Die einzige Möglichkeit, diese Schwingung zu unterdrücken, wäre, einen Finger in die Mitte des Felles zu legen. Da die 01-Mode dort einen Bauch aufweist, würde die zugehörige Schwingung behindert. Die antimetrischen Schwingungen blieben davon unbeeinflusst, da sie radiale Knotenlinien ausweisen, die durch die Mitte führen.

Da sich der 01-Ton nicht vermeiden lässt, muss er in seiner auralen Bedeutung neutralisiert werden. Bei fachgerechtem, außermittigem Anschlag hat er keinen sehr großen Pegel. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, aus der spektralen Verdeckung (*spectral masking*; Fastl und Zwicker 2007) Nutzen zu ziehen. Dies geschieht bei der Kesselpauke dadurch, dass die Frequenz des 01-Tones so weit angehoben wird, dass er in die Nähe des starken 11-Tones kommt und von diesem maskiert wird. Das ist regelmäßig dann der Fall, wenn die 01-Frequenz größer als die 11-Frequenz (in einigen Kapiteln auch als Haupttonfrequenz  $f_{HT}$  bezeichnet) ist.

Die Maskierung entfaltet ihre Wirkung vor allem zu hohen Frequenzen hin. Sie wirkt sich aber auch dann noch aus, wenn die 01-Frequenz etwas unterhalb der 11-Frequenz liegt. Der 01-Ton wird unhörbar bleiben, solange seine Frequenz nicht wesentlich kleiner als die Frequenz des Haupttones ist. Für den „zulässigen Frequenzabstand“ wurde in einer früheren Arbeit (Fleischer 1992) ein erster Schätzwert genannt. Psychoakustische Erkenntnisse von Fastl und Zwicker (2007) lassen bei großzügiger Auslegung erwarten, dass der 01-Ton erst dann hörbar werden dürfte, sobald er mehr als 20 Hz unterhalb des Haupttones liegt. Der weiteren

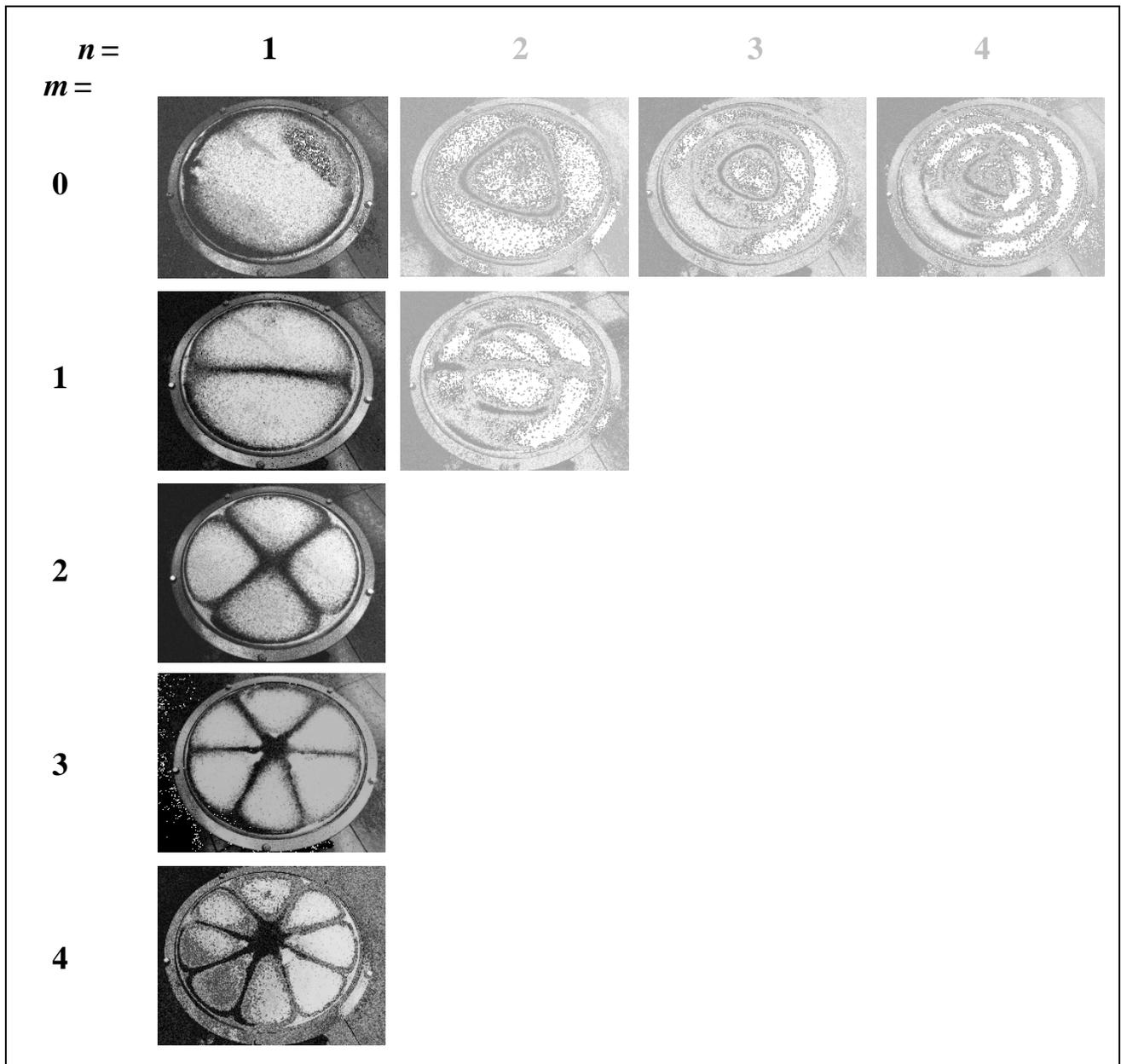


Abb. 9.9. Chladni'sche Klangfiguren der Schwingungsformen eines Paukenfelles, erzeugt mit Mohn auf einem hellen Fell. Die dunkel wiedergegebenen Schwingungen sind von hervorgehobener Bedeutung.

Betrachtung in diesem Berichtsband liegt die strengere Vorgabe zugrunde, dass es toleriert werden kann, wenn die 01-Frequenz um bis zu 10 Hz kleiner als die 11-Frequenz ist. Hierbei erweisen sich die tiefen und mittleren Lagen als unkritisch. Bei der hohen Stimmung c deutet sich dagegen an, dass der Frequenzabstand die vorgegebenen 10 Hz überschreitet, sobald der Kessel ein Volumen von mehr als etwa 143 l hat. Dass die hohen Lagen sich als kritisch erweisen, stimmt mit der Wahrnehmung von Musikern überein. Gesprächen mit Spielern und Instrumentenbauern zufolge ist manchmal ein „Unterton“ zu beobachten, der sich nicht in das weitgehend harmonische Raster der übrigen relevanten Töne einfügt. Wenn dieser Ton tiefer als der Hauptton liegt, dann klingt der Paukenschall den Musikern zufolge „träge, dunkel, schwerfällig“. Dies tritt bei hoher Stimmung des Felles ein.

Offensichtlich kommt dem Volumen des Kessels für die Teiltonfrequenzen zentrale Bedeutung zu. Ist der Kessel zu groß, dann reicht die Steifigkeit der Luft nicht aus, um die 01-Fre-

quenz weit genug anheben zu können. Der daraus resultierenden Forderung nach einem möglichst kleinen Kessel steht die andere Prämisse entgegen, dass das Volumen die richtige Größe haben muss, um die klangbildenden Teiltöne in harmonische Intervalle zu bringen. Hierbei ist es nicht zielführend, nur die exakten Intervalle zuzulassen. Vielmehr wurde in einer früheren Arbeit (Fleischer 1992) unter Anwendung psychoakustischer Erkenntnisse begründet, dass Abweichungen um  $\pm 1\%$  vom genauen Quint- bzw. Oktavintervall hingenommen werden können. Auch die Überlegungen von Abschnitt 6.6 zur Diskretisierung der Frequenzwerte sprechen dafür, kleine Abweichungen der Messwerte von den genauen Intervallen zu tolerieren.

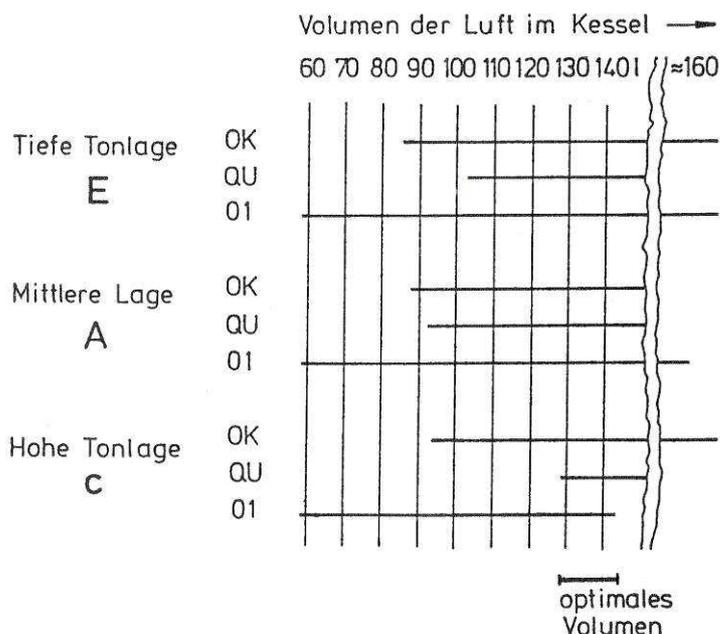


Abb. 9.10. Luftvolumen der großen Pauke, bei denen die Quinte (QU) bzw. die Oktave (OK) innerhalb zugelassener Abweichungen mit den exakten Intervallen übereinstimmen und bei denen die Frequenz des O1-Tones nicht unzulässig weit unterhalb der Haupttonfrequenz liegt.

Nach den Untersuchungen von Kapitel 8 für die kleine Pauke und nach denen des vorliegenden Kapitels für die große Pauke sind die zugehörigen Spannen nunmehr bekannt. Abb. 9.10 deutet eine Möglichkeit an, wie mit diesen Untersuchungsergebnissen das Optimierungsproblem gelöst werden könnte. Den Messdiagrammen ist entnommen und in Abb. 9.10 durch waagerechte Balken markiert, innerhalb welcher Luftvolumina die gemessenen Intervalle im Rahmen der vorgegebenen Toleranz mit dem Quintintervall (QU) bzw. Oktavintervall (OK) übereinstimmen. Dies ist für verschiedene Tonlagen (Stimmung E, A und c) durchgeführt. Als optimal kann ein Volumen gelten, bei dem alle drei Kriterien erfüllt sind. Im betrachteten Beispiel wäre dies ein Kessel mit 128 l bis 143 l. Die Kessel, die für die große Pauke zur Verfügung standen, liegen innerhalb der angegebenen Spanne, zwei davon (Kessel A und B) allerdings an der oberen Grenze. Aus den Überlegungen zum O1-Ton folgt, dass geringere Rauminhalte den größeren vorzuziehen sind, so dass im Zweifelsfall der Kessel lieber kleiner als größer sein sollte. Abb. 9.10 macht auch deutlich, dass Pauken näher am Optimum bleiben, wenn der Tonbereich, in dem sie gestimmt werden, nach oben hin eingeschränkt wird.

Bei den hier beschriebenen Überlegungen war unterstellt worden, dass nicht die *Form*, sondern primär das *Volumen* des Kessels von Bedeutung ist. Bisher wurden auch keine Hinweise gefunden, die dieser Arbeitshypothese entgegen stehen. Demnach scheint vor allem aus-

schlaggebend zu sein, wie viel Luft auf der Rückseite des Felles eingeschlossen ist. Gleichwohl ist nicht mit letzter Sicherheit auszuschließen, dass auch bei gleichem Rauminhalt unterschiedliche Kesselformen zu unterschiedlichen Paukenklängen führen können. Der Grund hierfür dürften allerdings weniger die Teiltonintervalle, als vielmehr die Abklingzeiten sein. Das „Eigenleben“ der Kessel könnte von der Form, der Dicke und dem Material des Kessels abhängen. Resonanzeffekte und Dämpfung von Teiltönen infolge von Mitschwingen des Kessels könnten auftreten. Aus der Schalentheorie ist bekannt, dass mit demselben Materialaufwand unterschiedlich steife Kessel gefertigt werden können. Dies äußert sich dann in Unterschieden in den Eigenfrequenzen, evt. auch den Eigenformen des Kessels und könnte beeinflussen, wie lange die einzelnen Teiltöne stehen.

Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass es von Vorteil ist, wenn der Kessel der Pauke Nr. 2 ein Volumen zwischen 128 l und 143 l hat. Zu bevorzugen ist – wegen des 01-Tones – ein möglichst kleiner Kessel. Ohne sein Gewicht zu erhöhen, könnte der Kessel dann aus dickerem Blech gefertigt werden. Dies hätte den weiteren Vorteil, dass die Schwingungen des Kessels bei höheren Frequenzen auftreten. Wenn sie im Idealfall außerhalb des Bereiches liegen, in dem die wesentlichen Teiltöne des Paukenklanges liegen, dann werden die Teiltöne des Paukenklanges auch einheitlicher und länger stehen.

## 10. ABSCHLIESSENDE DISKUSSION

Dass der Kessel vermutlich eine große Bedeutung für die Pauke haben wird, erschließt sich bereits aus der Bezeichnung „Kesselpauke“. Die Rolle, die der Kessel für die Teiltöne des Paukenklanges spielt, wurde in der vorliegenden Arbeit anhand einer Reihe von Experimenten überprüft. Untersuchungsobjekte waren ausschließlich Orchesterpauken aus der Produktion oder aus den Beständen der Firma Kolberg Percussion in Ugingen. Im Unterschied zu den bisherigen Arbeiten, die in dieser Reihe erschienen sind (Fleischer 2005 und 2008a), wurden somit ausschließlich hochwertige, professionelle Instrumente betrachtet. Es handelte sich dabei um Konzertpauken der Größe Nr. 2 (große Pauke) und Nr. 4 (kleine Pauke) im Vierersatz. Offenbar befanden sich die Instrumente allesamt auf einem hohen Qualitätsniveau. Es darf daher nicht verwundern, dass bei den Messungen keine sehr großen Unterschiede zutage traten.

Hörversuche und eine gehörbezogene Analyse von Paukenklängen lenken den Blick auf diejenigen Teiltöne, welche für die Hörwahrnehmung von primärer Bedeutung sind: Der Hauptton, hervorgerufen durch die 11-Mode des Felles, definiert die musikalische Tonhöhe. Eigene psychoakustische Untersuchungen (Fleischer 1994) haben dies belegt. Die Quinte (21-Mode) gilt als typisch für die Klangfärbung, und die Oktave (31-Mode) verstärkt die Tonhöhenempfindung. Durch geeignete Wahl des Ortes, an dem er das Fell mit dem Schlegel anschlägt, kann der Pauker weitgehend vermeiden, solche Teiltöne hervorzurufen, die sich nicht in das harmonische Raster der klangbildenden Teiltöne einfügen. Was er jedoch immer anregen wird, ist der Teilton, der von der rotationssymmetrischen 01-Mode des Felles herrührt. Dieser Ton steht zwar nur kurz, ist aber in manchen Fällen die Schallkomponente mit der tiefsten Frequenz. Er könnte daher die Tonhöhe des Paukenklanges beeinflussen.

Nach Aussagen von Paukern wird die ganzheitliche musikalische Tonhöhe des Paukenklanges unmittelbar nach dem Anschlagen in weniger als einer Sekunde gebildet. Diese Beobachtung stimmt mit psychoakustischen Erkenntnissen (z.B. Terhardt 1998) überein. Bei *forte* dauert der Erkennungsprozess etwas länger als bei *piano*, spielt sich aber immer innerhalb so kurzer Zeit ab, dass dabei der 01-Ton möglicherweise von Bedeutung ist. Da er sich in aller Regel nicht in einem harmonischen Frequenzverhältnis zu den übrigen Teiltönen befindet, ist nicht auszuschließen, dass der 01-Ton den musikalischen Wohlklang stört.

Wenn sie den Paukenklang beschreiben, sprechen Spieler und Instrumentenbauer immer wieder vom „Unterton“, einem Ton, der tiefer als der tonhöhenbestimmende Hauptton liegt. Ist er hörbar, dann klingt die Pauke „dunkel, träge, schwerfällig“. (Durch Anführungszeichen sind im vorliegenden Kapitel Äußerungen von Paukenbauern und –spielern gekennzeichnet). Er kann vor allem dann wahrnehmbar werden, wenn die Pauke sehr hoch gestimmt ist. Die Tonhöhe wird dann nicht mehr eindeutig vom Hauptton dominiert. Hierfür bieten sich zwei Erklärungsmodelle an. Nach Fleischer und Fastl (1991) prägt sich in den hohen Lagen die Quinte zunehmend stärker aus. Es wäre denkbar, dass sich aus Hauptton, Quinte und möglicherweise Oktave sowie weiteren Teiltönen eine Virtuelle Tonhöhe (Terhardt 1998) ableitet, die eine Oktav unterhalb des Haupttones liegt. Da naturgemäß diese Tonhöhe sich ins harmonische Raster der klangbildenden Teiltöne einfügt, ist von ihr keine Störwirkung zu erwarten. Daher tendiert der Autor eher zu der Vorstellung, dass in den hohen Lagen der 01-Ton als tiefste Komponente hörbar wird und störend wirken kann, da er unharmonisch liegt. Bei den hier geschilderten Untersuchungen nimmt diese potentielle Störquelle breiten Raum ein.

Zum Einfluss des Kessels gibt es ein numerisches Modell (Moosrainer 1998, Moosrainer und Fleischer 1998 und 2000), mit dem sehr wirklichkeitsnahe Berechnungen durchgeführt worden sind. In der vorliegenden Arbeit wurde jedoch ausschließlich auf Experimente eingegangen, in denen die Schallsignale mittels *Fast Fourier Transformation* (FFT) analysiert wurden. Die Ergebnisse sind zunächst dreidimensional in Form von Wasserfalldiagrammen dargestellt. Dabei offenbaren sich sowohl der spektrale Gehalt des Schallsignals wie auch dessen zeitliche Verlauf. Zwei Arten der Präsentation wurden gewählt und ausführlich angewandt. Bei der einen wird der *P a u k e n s c h l a g* veranschaulicht; das Anschwingen des Schallsignals mit seinen perkussiven Komponenten ist hervorgehoben. Die andere Darstellungsart verdeutlicht eher den *P a u k e n k l a n g*, zeigt also mehr die tonalen Anteile, die längere Zeit anhalten. Ergebnisse von Messungen im eigenen Labor mit zahlreichen Kombinationen von Kesseln und Fellen sowie auch Experimente mit weiteren Pauken, die in der Werkstatt des Herstellers durchgeführt wurden, sind zusammen gestellt und geben einen breiten Überblick.

Nach Angaben des Herstellers ist es möglich, die Felle moderner Orchesterpauken innerhalb eines Bereiches zu stimmen, der mehr als eine Oktav umfasst. Hinsichtlich des Abklingens bei unterschiedlichen Stimmungen ist den Wasserfalldiagrammen Folgendes zu entnehmen: Bei tiefen und mittleren Tonlagen sind die Abklingzeiten deutlich größer als in den hohen Lagen. Wie in anderen Arbeiten ausgeführt (siehe beispielsweise Fleischer 2008a oder 2008b), strahlt das Fell Schall umso effektiver ab, je höher die Frequenz wird. Der Preis dafür ist, dass die Teiltöne schneller ausschwingen. Wenn das Fell zu hoch gestimmt ist, wird der Klang deshalb möglicherweise als nicht lang genug beurteilt. Die Pauke klingt dann „träge, dunkel, schwerfällig und kurz“.

Neben dieser allgemeinen Tendenz, die beim Höherstimmen erkennbar wird, deuten sich in Hinsicht auf das Ausschwingen auch Unterschiede zwischen Kunst- und Naturfellen an. Früher waren Pauken ausnahmslos mit den Fellen von Ziegen oder Kälbern bespannt, heute gibt es auch Felle aus Kunststoffen. Schlägt man ein sehr tief gestimmtes Kunstfell an, dann hat der der Schall eher den Charakter „eines Geräusches als eines Klanges“. Ist ein Kunstfell aufgezogen, so stehen in aller Regel die Quinte und die Oktave wesentlich länger als der Hauptton. Bei einem Naturfell sind Unterschiede dagegen weniger ausgeprägt. Zum Einen klingen die einzelnen Teiltöne eines Paukenklanges, zum Anderen auch die Gesamtklänge in den unterschiedlichen Tonlagen gleichmäßiger ab. Hierin könnte einer der Gründe liegen, warum manche Pauker Naturfelle bevorzugen: Sie antworten ausgeglichener und lassen sich in einem weiteren Stimmbereich betreiben.

An dieser Stelle sei kurz auf weitere Einflüsse des Fellmaterials eingegangen werden, wie sie bei den bisherigen Untersuchungen sichtbar geworden sind. Physikalische Unterschiede zwischen natürlichen und künstlich hergestellten Fellen lassen sich unter Anderem bei der Biegesteifigkeit und der inneren Reibung vermuten. Hinsichtlich der Frequenzen der Teiltöne haben die Messungen keine gravierend anderen Resultate für das Kunstfell *Remo Weather King Timpani* als für das Naturfell *Kalfo Super Timpani* gezeigt. Unterschiede sind jedoch beim Ausschwingen gefunden worden; vgl. Fleischer (2008a und b). Frühere psychoakustische Studien haben ergeben, dass die Lautheit (Fleischer und Fastl 1991) sicherlich nicht das einzige, aber zumindest e i n Kriterium für die Unterscheidung sein könnte. Für den Spieler ist wichtig, dass das Fell über den gesamten Stimmbereich gleichmäßig antwortet, so dass vorher absehbar ist, wie laut ein Paukenschlag wird. Zwar ist die Lautheit beim Naturfell insgesamt geringer als beim Kunstfell, jedoch in allen Lagen etwa gleich. Ein Kunstfell klingt in den hohen Lagen dagegen lauter als in den tiefen Lagen. Zudem hat sich beim Naturfell ein ausgeglicheneres Ausschwingen der einzelnen Teiltöne bei allen Stimmungen gezeigt, während

sich beim Kunstfell die Nachhallzeiten der einzelnen Teiltöne teilweise stark unterschieden. Pauker bezeichnen den Klang des Naturfelles als „weicher“ mit „reicherer Klangfarbe“. Beim Kunstfell überwiegt dagegen das Perkussive; der Klang ist „sauberer“, aber „ärmer an Klangfarbe“.

Auch wenn das Kunstfell in den tiefen Lagen eher „blechern“ klingt, so hat es im Vergleich zum Naturfell doch stabilere physikalische Eigenschaften: Es ist nicht feuchte- und kaum temperaturempfindlich. Dagegen ändern sich die Eigenschaften des Naturfelles stark mit der Temperatur und sehr stark mit der Luftfeuchte. Beim Konzert wird im Laufe eines Abends die Luft wärmer und feuchter. Da es in dieser Hinsicht ein stabileres Verhalten zeigt, wäre das Kunstfell zu bevorzugen. Trotzdem ziehen manche Pauker das Naturfell vor, obwohl es bezüglich Feuchte- und Temperaturempfindlichkeit deutlich im Nachteil ist. Sie betrachten es als über einen weiteren Stimmbereich verwendbar und sagen aus, „das Naturfell auch bei Extremen (*fortissimo*, sehr hohe und sehr tiefe Lagen) einsetzen zu können“. Es ist zu vermuten, dass diese Präferenz vielleicht auch darin begründet liegt, dass ein Kunstfell eben als Plastik eingestuft wird, während ein Kalbsfell ein gewachsenes Naturprodukt darstellt und deshalb als höherwertig betrachtet wird.

Der Instrumentenmacher lässt für seine Pauken eine weite Spanne zu, in der das Fell gestimmt werden kann. Wenn die Frequenzen um den Faktor zwei, d.h. im Bereich einer Oktav, variiert werden sollen, dann bedeutet dies eine Erhöhung der Vorspannkraft, die auf das Fell wirkt, um das Vierfache. Innerhalb dieser zugelassenen Spanne wurden die Klänge analysiert. Dabei trat immer wieder zutage, dass das Fell in den sehr tiefen und sehr hohen Tonlagen teilweise deutlich andersartige Klänge erzeugt als in der mittleren Lage. Da die Pauke nicht in allen Lagen „gleich gut klingt“, betrachten Paukenspieler lediglich einen mittleren Bereich als optimal und vermeiden nach Möglichkeit Extreme. Die hier beschriebenen sowie frühere Untersuchungen (Fleischer 2008a und b) stützen diese Selbstbeschränkung.

In den sehr tiefen Lagen ist das Fell hinsichtlich der Abgabe von Schall - vereinfacht gesprochen - ‚klein‘. Da seine Abmessungen gering im Vergleich zu den Wellenlängen der wichtigen Teiltöne sind, ist es ein schlechter Schallstrahler. Das Fell gibt seine Energie relativ leise und relativ langsam ins Schallfeld ab. Im akustischen Signal existieren starke Anteile unmittelbar nach dem Anschlag, die teilweise lang anhalten; vgl. Fleischer (2008a). Insbesondere beim Kunstfell führt dies zu einem Höreindruck ähnlich wie bei einem „Donnerblech“. In den sehr hohen Lagen, beispielsweise eine Oktav über der tiefsten Stimmung, sind die Abklingzeiten sehr kurz. Das Fell ist dann effektiv größer; d.h. in Relation zur Schallwellenlänge haben sich seine Abmessungen verdoppelt. Da es nun ein besserer Schallstrahler ist, setzt es die mechanische Schwingung wirkungsvoller in Schall um. Das Schallsignal ist laut, aber um den Preis, dass es sehr rasch abklingt. Darüber hinaus tritt bei hoher Stimmung ein weiterer Effekt auf, der nichts mit dem Ausschwingen zu tun hat: Der 01-Ton wird tiefster Teilton. Wie bereits oben erwähnt besteht die Gefahr, dass er hörbar wird und den Klang „dunkel und schwerfällig“ macht.

Als ganz wesentlich für das Abklingen hat sich bei früheren Untersuchungen (Fleischer 2008a und b) erwiesen, dass die Wandung des Kessels die Vorder- von der Rückseite des Felles trennt. Damit verhindert sie den akustischen Kurzschluss. Darüber hinaus ist die Luft, die der Kessel einschließt, von Bedeutung. Die hier beschriebenen Studien zeigen einen Einfluss auf die Intervalle der Teiltöne. Darüber hinaus haben Computer-Simulationen (Moosrainer 1998, Moosrainer und Fleischer 1998 und 2000) aufgezeigt, dass der Kessel wegen einer Helmholtz-Resonanz bei sehr tiefen Frequenzen (ca. 10 Hz bis 20 Hz) auch Einfluss auf die Spielbarkeit des Instruments nimmt. Diese Resonanz tritt nur auf, wenn der Kesselboden ein kleines Loch aufweist.

Die Rolle dieser Öffnung am unteren Ende des Kessels wird häufig diskutiert. Dazu wurden auch Experimente mit der Pauke Nr. 2 gemacht, die mit dem Kessel C versehen war. Der Kessel enthielt im originalen Zustand 133 l Luft. Im akustischen Spektrum ließen sich keinerlei Unterschiede zwischen Messungen feststellen, bei denen das Loch offen war, und solchen, bei denen die Öffnung verschlossen worden war. Auch klang die Pauke dem laienhaften Urteil des Autors zufolge mit geschlossenem Kessel nicht anders, als wenn die Öffnung frei war. Ein professioneller Spieler (in diesem Fall Dieter Dyke, erster Solopauker des Tonhalle-Orchesters Zürich) konnte jedoch bereits beim ersten Anschlagen erkennen, dass die Öffnung zu war. Nach seiner Aussage reagiert das Fell dann erkennbar anders. Offensichtlich hört der Spieler den Unterschied zwar nicht, fühlt jedoch den veränderten „Rebound“ des Felles. Somit ist festzuhalten, dass bisher keine Hinweise darauf gefunden wurden, dass die Öffnung im Kessel das Schallsignal beeinflusst. Es steht jedoch außer Frage, dass sie sich über die Helmholtz-Resonanz auf die Spielbarkeit des Instruments auswirkt.

Während in der vorliegenden Arbeit physikalische Details des Schallsignals analysiert worden sind, wurden bereits früher auch verschiedene Merkmale der Wahrnehmung studiert. Untersuchungen zur Ausgeprägtheit der Tonhöhe (Fastl und Fleischer 1992) haben gezeigt, dass bei Paukenklängen sich die Tonhöhe nicht immer im selben Maße ausprägt. In der Gesamtschau ist sie beim Naturfell stärker ausgeprägt als beim Kunstfell; in den mittleren und hohen Frequenzlagen ist sie stärker ausgeprägt als in den tiefen Lagen (Fastl und Fleischer 1992). Dies hängt auch davon ab, welcher Kessel verwendet wird. Die Unterschiede in der Ausgeprägtheit der Tonhöhe sind von derselben Größenordnung, wenn zwischen Kunst- und Naturfell bzw. zwischen den drei Kesseln A, B oder C gewechselt wird. In der mittleren Stimmung um A prägen sich diese Unterschiede am deutlichsten aus. Für diesen Fall führen Fastl und Fleischer (1992) aus: Versieht man die Pauke wechselweise mit den drei – offenbar ähnlich gut gestalteten – Kesseln, so ändert sich die Ausgeprägtheit der Tonhöhe im Mittel etwa im selben Maße, wie wenn man anstelle eines Kunstfelles ein Naturfell oder umgekehrt verwendet.

Gemessen an den objektiven Kriterien, insbesondere in Hinsicht auf die Frequenzintervalle, zeigt die große Pauke Nr. 2 in den untersuchten Varianten ein insgesamt sehr hohes Niveau. Bezüglich der hier untersuchten Kriterien waren nur marginale Unterschiede festzustellen. Für die kleine Pauke Nr. 4 bleibt festzuhalten, dass sich das Intervall, in dem die Oktave zum Hauptton steht, als etwas zu eng erwiesen hat. Dass die Frequenzen der klangbildenden Teiltöne möglichst nahe bei den Intervallen liegen sollten, die ihnen die Bezeichnungen Quinte und Oktave gegeben haben, hat nicht nur damit zu tun, dass der Gesamtklang als möglichst rein empfunden werden sollte. Es gibt noch einen weiteren Grund, der mit dem Stimmen der Pauke zusammen hängt. Normalerweise wird das Fell auf den Hauptton gestimmt. In tiefen Lagen ist dies hin und wieder nicht möglich; ersatzweise wird dann auf die Quinte gestimmt. Selbstverständlich kann dies nur dann gelingen, wenn die Quinte auch möglichst exakt die eineinhalbfache Frequenz des Haupttones hat.

Bei der Klärung der Frage, ob es ein optimales Volumen für den Kessel gibt, bei dem die Pauke einen besonders reinen Klang erzeugt, haben sich relativ kleine Kessel als gut geeignet erwiesen. Dies ist in Übereinstimmung mit der Aussage des Paukers und Instrumentenmachers Bernhard Kolberg, dass „die Tendenz zu kleineren Kesseln“ hin geht, da zu große Kessel „topfig“ klingen. Der kleinste Kessel, der in die Pauke Nr. 2 eingehängt werden konnte, war der Kessel C mit dem Volumen 133 l, das versuchsweise durch Einbringen von Bauschaum noch etwas verkleinert worden war. Die Ergebnisse der Messung an dieser Pauke waren bereits in Abb. 6.4 präsentiert worden. In Abb. 10.1 sind die Frequenzen von vier klangbildenden Teiltönen über der Frequenz des Haupttones, die den Bezug bildet, aufgetragen. Die exakten Intervalle sind mit den Toleranzen von  $\pm 1\%$  (vgl. Abschnitt 9.4) zu

Bändern erweitert, innerhalb derer die Messergebnisse liegen sollten. In weiten Bereichen ist dies für alle vier betrachteten höheren Teiltöne der Fall.

Die ausgefüllten Kreise stehen für den 01-Ton. Der schraffierte Bereich in Abb. 10.1 reicht bis 10 Hz unterhalb der Frequenz des Haupttones. Es wird davon ausgegangen, dass dieser Teilton erst dann nicht mehr maskiert und damit hörbar wird, wenn er außerhalb der Schraffur liegt. Dies tritt ein, sobald das Fell höher als auf die Note cis gestimmt wird. In den ganz hohen Lagen ist damit zu rechnen, dass der Klang nicht nur sehr kurz steht, sondern auch als „träge, dunkel und schwerfällig“ empfunden wird.

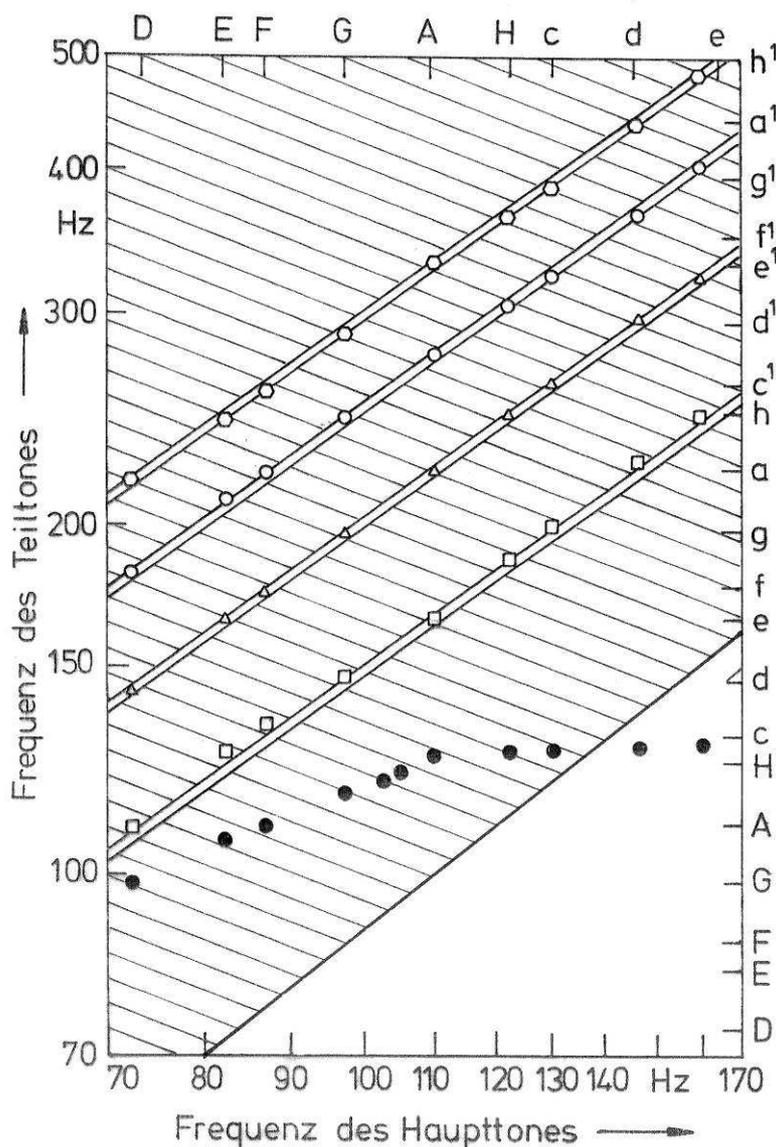


Abb. 10.1. Frequenzen der Teiltöne als Funktion der Frequenz  $f_{HT}$  des Haupttones im Stimmbereich der großen Pauke mit Kunstfell und verkleinertem Kessel C. Die für die klangbildenden Teiltöne „verbotenen“ Bereiche sind schraffiert, die zulässigen Bereiche für Quinte (Quadrate), Oktave (Dreiecke), Duodezime (Kreise) und Doppeloktave (Sechsecke) sind freigelassen. Der 01-Ton (ausgefüllte Kreise) sollte im schraffierten Bereich liegen.

Dass der Paukenklang vom Volumen der Luft beeinflusst wird, die der Kessel und das Fell umschließen, ist inzwischen vielfach belegt worden. Wie der Klang von der Gestalt

des Kessels abhängt, wurde nach Kenntnis des Autors allerdings bisher nicht systematisch untersucht. Diesbezügliche Studien sind zwar angekündigt (Tubis und Davis 1986), nach Kenntnis des Autors aber nicht publiziert worden. Hier eröffnet sich ein Feld für weitere Betätigung, wobei ‚numerische Experimente‘ mittels Computersimulation eine aussichtsreiche Option bieten könnten. Dabei sollte erwogen werden, noch mehr Teiltöne als bei den bisherigen Studien zu untersuchen. Sinnvoll ist dabei aber eine Beschränkung auf solche, die sich bei den gehörbezogenen Analysen als hörbar erwiesen haben. Da das „Perkussive“ den Klangeindruck des Paukenschalles wesentlich prägt und auch seine ganzheitliche, spontan empfundene Tonhöhe sehr rasch gebildet wird, sollte in weiteren Untersuchungen darüber hinaus dem Abklingen und vor allem dem *Onset* des Schallsignals mehr Gewicht beigemessen werden. So ist zu erwarten, dass das faszinierende Instrument Pauke und seine musikalischen Klänge auch in Zukunft noch breiten Raum für vielerlei naturwissenschaftliche Experimente und Berechnungen bieten werden.

Erfahrungsgemäß stellt es eine große Herausforderung dar, die Aussagen von Musikern mit den objektiven Ergebnissen physikalischer Messungen in Übereinstimmung zu bringen. Dies muss – obwohl schwierig - gelingen. Zwar stellen die Physik und die Wahrnehmung des Künstlers bzw. des Zuhörers parallelen Welten dar. Diese existieren jedoch nicht voneinander unabhängig, sondern sind eng miteinander verknüpft. Diese Verknüpfung ist nicht von einfacher Art, aber doch so, dass die Zusammenhänge aufgedeckt, modelliert und nachgebildet werden können. Die Psychoakustik (Zwicker und Feldtkeller 1967, Fastl und Zwicker 2007) liefert den Schlüssel hierzu. Ergebnisse physikalischer Messungen sind immer im Lichte psychoakustischer Erkenntnisse zu gewichten und zu interpretieren. Dies wurde im vorliegenden Band praktiziert und sollte weiter fortgesetzt werden. Thema könnte dabei zum Beispiel sein, Unterschiede zwischen dem Anschlagen des Felles mit Filzschlegeln, wie es diesem Bericht zugrunde liegt, und mit Holzschlegeln zu untersuchen. Dabei werden sich Abweichungen in der Zeitfunktion sowie der spektralen Hüllkurve des Schallsignals finden lassen, die hörbare Unterschiede widerspiegeln. Darüber hinaus lässt sich sicherlich auch geänderte Mensch-Maschine-Interaktion (Zusammenspiel zwischen dem Musiker und seinem Instrument) nachweisen und physikalisch analysieren. Während die Betrachtungen im vorliegenden Bericht sich mehr an den Instrumentenbauer wenden, könnten Untersuchungen dieser Art auch den Spieler ansprechen.

*Der Autor dankt seiner Ehefrau Hiltrud für das geduldige Lektorieren. Herrn Bernhard Kolberg, Inhaber der Firma Kolberg Percussion in Uhingen und Orchester-Schlagzeuger, gebührt Dank für sein Engagement und seine Offenheit gegenüber den Erkenntnissen objektiver Untersuchungen.*

## LITERATUR

- Chladni, E.F.F., Entdeckungen über die Theorie des Klanges. Weidmanns Erben und Reich, Leipzig 1787.
- Euler, L., De motu vibratorio tympanorum. Novi commentarii academiae scientiarum Petropolitanae 10 (1764), 1766, 243-260.
- 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.
- Fastl, H. und Zwicker, E., Psychoacoustics. 3. Auflage. Springer Verlag, Heidelberg 2007.
- 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., Zur Tonhöhe von Paukenklängen. Forschungsbericht 02/94 aus dem Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 1994.
- 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., Vibroakustische Untersuchungen an Paukenfellen. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/05. Hrsg. H. Fleischer und H. Fastl, Universität der Bundeswehr und Technische Universität München, Neubiberg 2005.
- Fleischer, H., Fell, Kessel und Gestell der Orchesterpauke. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/08. Hrsg. H. Fleischer und H. Fastl, Universität der Bundeswehr und Technische Universität München, Neubiberg 2008a.
- Fleischer, H., Kesselpauken ohne Paukenkessel? In: Fortschritte der Akustik (DAGA '08), DEGA, Berlin 2008b, 155 - 156.
- Fleischer, H., Die Pauke aus der Sicht der Physik. Michaelsteiner Konferenzberichte zur XXXV. Wissenschaftlichen Arbeitstagung und zum 28. Musikinstrumentenbau-Symposium vom Oktober 2007. Im Entstehen (2008c).
- Fleischer, H. und Fastl, H., Untersuchungen an Konzertpauken. In: Fortschritte der Akustik (DAGA '91). DPG-GmbH, Bad Honnef 1991, 885 - 888.
- Fletcher, N.H. und Rossing, T.D., The physics of musical instruments. 2. Aufl. Springer Verlag, New York 1998.
- Gottlieb, H.P.W. und Aebischer, H.A., Eigenfrequencies of a baffled circular membrane with exterior fluid and attached cavity. *Acustica* 65 (1987), 2-10.
- Hornborstel, E.M. und Sachs, C., Systematik der Musikinstrumente. *Zeitschrift für Ethnologie* 46 (1914).
- Lemme, H., Hörbares sichtbar machen. *Elektronik* 22 (2000), 150 – 155.
- 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., Interaction of a membrane with an enclosed and surrounding fluid – FEM/BEM coupling. In: Designing for Silence - Euro-Noise 98. DEGA, Oldenburg 1998, 145 - 150.
- Moosrainer, M. und Fleischer, H., Application of BEM and FEM to musical instruments. In: Boundary Elements in Acoustics - Advances and Applications. Hrsg. O. v. Estorff, WIT Press, Southampton/Boston 2000, 377 - 410.
- Rossing, T.D., Die Physik der Pauke. Spektrum der Wissenschaft, Januar 1983, 55-65.
- Schad, C.-R., Wörterbuch der Glockenkunde. Hallwag Verlag, Stuttgart 1996.
- Terhardt, E., Zur Tonhöhenwahrnehmung von Klängen. I. Psychoakustische Grundlagen. *Acustica* 26 (1972a), 173-186.
- Terhardt, E., Zur Tonhöhenwahrnehmung von Klängen. II. Ein Funktionsschema. *Acustica* 26 (1972b), 187-199.
- Terhardt, E., Akustische Kommunikation. Springer, Berlin 1998.
- Tubis, A. und Davis, R.E., Kettle-shape dependence of timpani normal modes. In: Proceedings of the 12th ICA, Toronto 1986, K2-7.
- 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.
- Zwicker, E. und Feldtkeller, R., Das Ohr als Nachrichtenempfänger, 2. Aufl. Hirzel Verlag, Stuttgart 1967.

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.
- Heft 1/03      Fleischer, H., Schwingungs- und Schalluntersuchungen an der indischen Tabla.
- Heft 1/04      Fleischer, H., Schwingung und Schall eines Hackbretts.
- Heft 1/05      Fleischer, H., Vibroakustische Untersuchungen an Paukenfellen.
- Heft 1/06      Fleischer, H., Korpusschwingungen einer Elektrogitarre.
- Heft 1/07      Fleischer, H., Hörversuche mit Glockenklängen.
- Heft 1/08      Fleischer, H., Fell, Kessel und Gestell der Orchesterpauke.

Anfragen richten Sie bitte an

Helmut Fleischer

LRT 4 UniBwM

D-85577 Neubiberg

oder

helmut.fleischer@unibw.de

---

**ISSN 1430-936X**

**Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik**